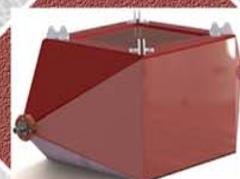
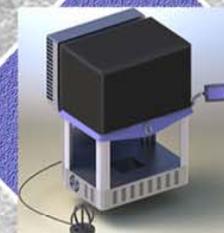


М.Е. Комнатнов



ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ
НА ОСНОВЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ
ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ
СОВМЕСТИМОСТЬ

Министерство науки и высшего образования
Российской Федерации

Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники

М.Е. Комнатнов

Проектирование устройств
на основе линий передачи для испытания
радиоэлектронных средств
на электромагнитную совместимость

Томск
Издательство ТУСУРа
2024

УДК 621.396.6.001.63:621.391.82
ББК 32.844-017
К635

Рецензент
Гизатуллин З. М., д-р техн. наук

Издание осуществлено при финансовой поддержке
Министерства науки и высшего образования
Российской Федерации, проект FEWM-2024-0005,
соглашение 075-03-2024-183 от 17.01.2024 г.

Комнатнов, Максим Евгеньевич

К635 Проектирование устройств на основе линий передачи для испытания радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость : моногр. / М.Е. Комнатнов. – Томск: Изд-во Томск. гос. ун-та систем упр. и радиоэлектроники, 2024. – 167 с.

ISBN 978-5-6050217-6-6

Представлен теоретический и практический материал, по проектированию устройств на основе линий передачи для испытания радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость. Описано развитие методов и подходов к проектированию, назначение и область применения устройств на основе линий передачи, начиная с полосковых линий до гигагерцевых камер поперечных электромагнитных волн. Внимание акцентируется на методике проектирования, с использованием которой созданы TEM- и GTEM-камеры, а также полосковая линия и коаксиальная камера. Представлены ключевые элементы разработки устройства с испытательным контейнером в виде TEM-камеры для совместного климатического и электромагнитного воздействия на различные радиоэлектронные средства и биологические объекты.

Для научных и инженерно-технических работников, специализирующихся в области электромагнитной совместимости, а также студентов и аспирантов радиотехнических специальностей.

УДК 621.396.6.001.63:621.391.82
ББК 32.844-017

ISBN 978-5-6050217-6-6

© Комнатнов М.Е., 2024
© Томск. гос. ун-т систем упр.
и радиоэлектроники, 2024

Оглавление

Введение.....	5
1 УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ.....	7
1.1 Виды устройств.....	7
1.2 Полосковая линия.....	9
1.3 ТЕМ-камера.....	14
1.4 ГТЕМ-камера.....	23
1.5 Коаксиальная камера.....	29
2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ.....	33
2.1 Методика проектирования устройств на основе линий передачи.....	33
2.2 Проектирование ТЕМ-камеры.....	38
2.3 Проектирование малогабаритной ТЕМ-камеры.....	57
2.4 Проектирование ГТЕМ-камеры.....	67
2.5 Проектирование полосковой линии.....	71
2.6 Проектирование коаксиальной камеры.....	78
3 СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ.....	84
3.1 ТЕМ-камера.....	84
3.2 Малогабаритная ТЕМ-камера.....	88
3.3. Полосковая линия.....	92
3.4 Коаксиальная камера.....	94
3.5 Климатическая экранированная камера.....	95
3.5.1 Проектирование климатической экранированной камеры.....	95
3.5.2 Устройство для проведения испытаний элементов радиоэлектронной аппаратуры.....	99
3.5.3 Устройство для проведения исследований в области биомедицины.....	106
3.5.4 Испытательный контейнер.....	112
3.5.5 Автоматизированная система управления температурой поверхности испытательного контейнера.....	115
3.5.6 Элементы управления камерой.....	131

3.5.7 Методы совместных климатических и электромагнитных испытаний	137
Заключение	142
Список сокращений.....	145
Литература	147

Введение

Одним из основных аспектов устойчивой работы радиоэлектронной аппаратуры (РЭА) систем связи при воздействии на неё дестабилизирующих факторов является соблюдение требований электромагнитной совместимости (ЭМС) [1]. Требования по ЭМС РЭА устанавливают соответствующие уровни излучаемой помехоэмиссии и помехоустойчивости. Их измерение и анализ проводят в соответствии с нормативными документами (НД), в которых оговариваются порядок проведения испытаний и необходимые для этого измерительные приборы и устройства. Испытания оборудования на ЭМС, проводимые на открытом пространстве (Open Area Test Site – OATS), являются образцовыми для большинства НД по ЭМС, которые предполагают оценку поля в дальней зоне. Как правило, подобные НД регламентируют испытания оборудования на помехоэмиссию и помехоустойчивость к воздействию электромагнитной помехи (ЭМП) [2]. При этом OATS могут оказаться трудоемкими и некорректными за счет влияния неконтролируемых внешних полей и климатических условий окружающей среды на испытуемый объект (ИО). Альтернативой является проведение испытаний в закрытом пространстве с бесконечной землей и равномерным распространением поля вдоль поверхности с полным его поглощением [3]. Для этих целей существуют разработанные полубезэховые, безэховые электромагнитные реверберационные камеры, а также устройства на основе линий передачи (ЛП), такие как ТЕМ (transverse electromagnetic)- / GTEM (gigahertz transverse electromagnetic)-камеры и пр. Они широко применяются при испытаниях радиоэлектронных средств (РЭС) на ЭМС и совершенствуются вслед за развитием РЭА, что делает их востребованными при проектировании критичной РЭА для проведения исследований отдельных узлов и блоков на дестабилизирующие воздействия, включающие, например, совместные климатические и электромагнитные воздействия.

Основная цель данной монографии – познакомить читателя с проектированием и созданием устройств на основе ЛП для исследования и испытания элементов и устройств РЭА на ЭМС.

В разделе 1 приведена последовательность развития методов и подходов к проектированию устройств на основе ЛП, начиная с полосковых линий до гигагерцовых камер поперечных электромагнитных волн, а также их назначение и область применения. В разделе 2 представлена оригинальная методика проектирования устройств на основе ЛП, с использованием которой выполнено проектирование классической и малогабаритной ТЕМ-камер, GTEM-камеры, а также полосковой линии и коаксиальной камеры. В разделе 3 описываются созданные устройства на основе ЛП, а также излагается порядок разработки и создания устройства на основе ЛП с возможностью климатического воздействия на ИО.

1 УСТРОЙСТВА НА ОСНОВЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ И ИХ НАЗНАЧЕНИЕ

1.1 Виды устройств

Методы воздействия однородного поля высокой амплитуды на ИО в коротковолновом диапазоне (1–30 МГц) осуществляются с использованием безэховой камеры (БЭК) и излучающей системы значительных габаритов, что не всегда целесообразно при исследованиях и испытаниях небольших РЭС и кабельной продукции. Оценка устойчивости ИО к воздействию ЭМП может быть выполнена с применением более компактного и дешевого устройства, разработанного в 1965 г. и названного stripline (с англ. полосковая линия) [4]. Оно предназначено для измерения восприимчивости РЭС к воздействию высокоамплитудных полей в диапазоне низких частот. В результате разработки ПЛ в 1974 г. предложена первая ТЕМ-камера (рисунок 1.1,*а*) для имитации распространения Т-волны в открытом пространстве [5], позволявшая проводить измерения помехоэмиссии и помехоустойчивости небольших узлов РЭС в замкнутом экранированном от внешних ЭМП пространстве. Следствием успешного применения ТЕМ-камер стала разработка в 1984 г. новых методов и подходов с использованием сдвоенной ТЕМ-камеры [6] и коаксиальной камеры [7] для измерения эффективности экранирования (ЭЭ) материалов. Дальнейшее совершенствование ТЕМ-камер было направлено на исключение из конструкции регулярной и одной из пирамидальных частей и введение радиопоглощающих материалов (РПМ), чтобы увеличить верхнюю граничную частоту и объём камеры. В результате в 1989 г. разработали GTEM-камеру (рисунок 1.1,*б*) [8]. Кроме того, исключение регулярной части, добавление внутренних проводников и РПМ позволило создать другие варианты ТЕМ-камер: WTEM (wire transverse electromagnetic) [9] (рисунок 1.1,*в*), EUROTEM [10] (рисунок 1.1,*г*), FP-TEM (four-port transverse electromagnetic) [11] (рисунок 1.1,*д*), а также различные их гибриды с другими камерами, например БЭК и реверберационную камеру [12].

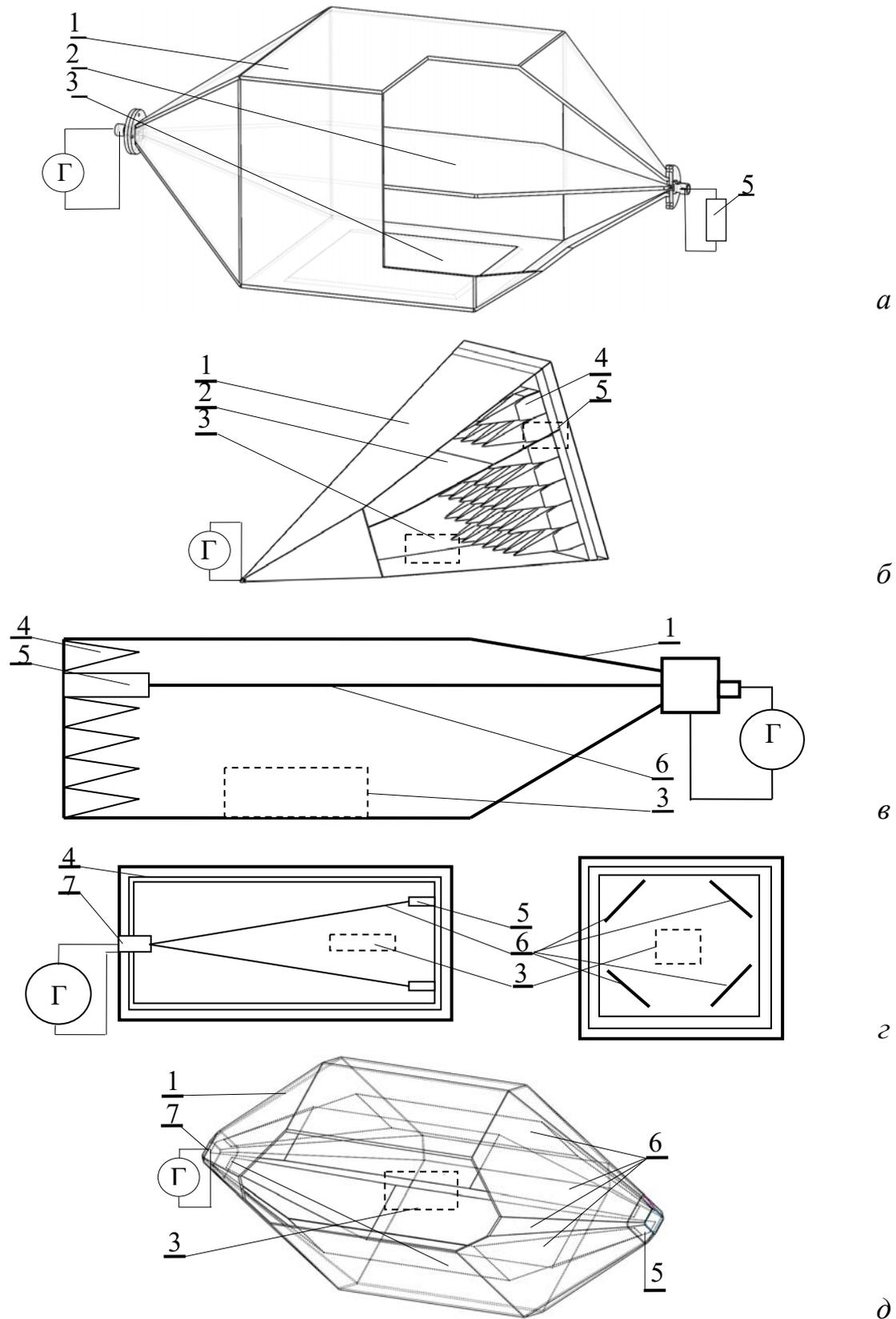


Рисунок 1.1 – Виды камер поперечных электромагнитных волн:
a – TEM; *б* – GTEM; *в* – WTEM; *г* – EUROTEM; *д* – FP-TEM
 (1 – корпус; 2 – центральный проводник; 3 – область под испытуемый объект; 4 – радиопоглощающий материал; 5 – согласованная нагрузка; 6 – массив проводников; 7 – фазовращатель; Г – генератор)

Модернизация испытательных устройств на основе ЛП в настоящее время направлена на расширение диапазона рабочих частот, увеличение объёма, повышение равномерности поля в зоне ИО, а также на гибридизацию разных видов камер.

1.2 Полосковая линия

Полосковая линия представляет собой несимметричную ЛП, состоящую из двух металлических пластин, между которыми распространяется электромагнитная волна (ЭМВ), возбуждаемая сигналом от генератора [4]. В дальнейшем ПЛ была модифицирована [13] и включена в международный стандарт ISO 11452-5:2002, регламентирующий испытания на устойчивость к ЭМП небольших компонентов и кабельной продукции в автомобильной промышленности [14]. На территории РФ действуют ГОСТ ИСО 11452-5-2007 [15], ГОСТ 32140-2013 [16] и ГОСТ 32141-2013 [17]. Стандарт [15] устанавливает методы испытаний компонентов транспортных средств на устойчивость к узкополосному излучению электромагнитной энергии в диапазоне частот от 20 до 400 МГц и высотой ИО до 50 мм. Модифицированное устройство [13] (рисунок 1.2) представляет собой конструкцию с линейным коаксиально-полосковым переходом (КПП) 1 на концах активного проводника 2, расположенного над опорным проводником 3. Высота ИО должна составлять $1/3$ от расстояния между активным и опорным проводниками $h_{\text{ПЛ}}$, что определяет высоту ПЛ. Данное соотношение является удовлетворительным для равномерного распространения поперечной ЭМВ в ПЛ с ИО [5].

Согласование по волновому сопротивлению $Z_{\text{в}}$ измерительного оборудования с ПЛ одно из важных условий, поскольку в противном случае оценка помехоэмиссии и помехоустойчивости может оказаться некорректной или вовсе невозможной, например, вследствие перехода в режим защиты высокочастотного усилителя из-за высокой амплитуды отражённого сигнала от входа ПЛ.

Проектирование несимметричной ПЛ с нулевой толщиной $t_{\text{ПЛ}} = 0$ активного проводника [18, 19] (см. рисунок 1.2,в) сводится к вычислению сопротивления $Z_{\text{В}}$, определяемого отношением ширины $w_{\text{ПЛ}}$ активного проводника к его высоте $h_{\text{ПЛ}}$ над опорным проводником при $w_{\text{ПЛ}}/h_{\text{ПЛ}} > 1$ [15]:

$$Z_{\text{В}} = \frac{\eta_0}{\frac{w_{\text{ПЛ}}}{h_{\text{ПЛ}}} + 2,42 - \frac{0,44h_{\text{ПЛ}}}{w_{\text{ПЛ}}} + \left(1 - \frac{h_{\text{ПЛ}}}{w_{\text{ПЛ}}}\right)^6}, \quad (1.1)$$

где $\eta_0 = 120\pi$ – характеристическое сопротивление свободного пространства.

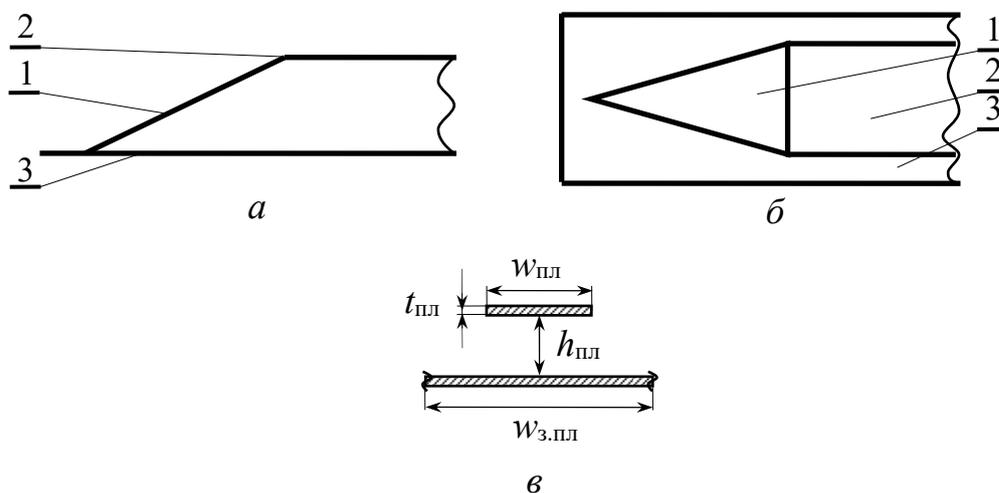


Рисунок 1.2 – Виды сбоку (а), сверху (б) и в поперечном сечении (в) несимметричной полосковой линии с линейным коаксиально-полосковым переходом

Из [20] известны выражения, позволяющие вычислить сопротивление $Z_{\text{В}}$ с наименьшей погрешностью и учётом толщины $t_{\text{ПЛ}}$ активного проводника. Они получены путем введения нормированного отношения $t_{\text{ПЛ}}/h_{\text{ПЛ}}$ в выражения с нулевой толщиной активного проводника [21]. Так, при $1 < w_{\text{ПЛ}}/h_{\text{ПЛ}} \leq 20$ и $t_{\text{ПЛ}}/h_{\text{ПЛ}} \leq 0,2$

$$Z_{\text{В}} = \frac{\eta_0}{\frac{w_{\text{ПЛ}}}{h_{\text{ПЛ}}} + \frac{w_{3.\text{ПЛ}}}{h_{\text{ПЛ}}} + 1,393 + 0,667 \ln \left(\frac{w_{\text{ПЛ}}}{h_{\text{ПЛ}}} + \frac{w_{3.\text{ПЛ}}}{h_{\text{ПЛ}}} + 1,444 \right)}, \quad (1.2)$$

где $w_{3,ПЛ}/h_{ПЛ}$ – эффективная ширина активного проводника, которая может быть найдена как

$$\frac{w_{3,ПЛ}}{h_{ПЛ}} = \frac{1,25}{\pi} \frac{t_{ПЛ}}{h_{ПЛ}} \left(1 + \ln \left(\frac{2h_{ПЛ}}{t_{ПЛ}} \right) \right). \quad (1.3)$$

Размеры и форма КПП оказывают непосредственное влияние на коэффициент стоячих волн по напряжению (КСВН), а для наилучшего согласования используют различные устройства, например аттенюатор [22]. В этой связи совершенствование конструкции и характеристик ПЛ для разных целей и задач в большинстве случаев заключается в минимизации максимального значения КСВН в широком диапазоне частот при наибольшей высоте ИО. Так, например, для оценки воздействия ЭМП на небольшие (до 15 мм) ИО (электронная компонентная база, соединители и пр.) разработана конструкция миниатюрной ПЛ с модулем коэффициента отражения $|S_{11}|$, не превышающим минус 10 дБ в диапазоне частот до 1 ГГц [23]. Для достижения приемлемых результатов применяют параметрическую и структурную оптимизацию ПЛ, а также используют различные методы вычисления в разных программных продуктах. Например, в [24] выполнен расчет для трёх моделей ПЛ на основе конструкции ТЕМ-камеры. Модели соответствуют стандарту [14] с отличительной особенностью в виде прорези в центре активного проводника, что позволило увеличить верхнюю граничную частоту $f_{гр}$ на 110 МГц по сравнению с ПЛ, приведенной в [14]. Путем изменения геометрических параметров данной ПЛ получены три модели для трех разных ИО (кабельная продукция, малогабаритные РЭС, интегральные схемы (ИС)) и трех поддиапазонов частот от 10 кГц до 4 ГГц.

Измерения с использованием ПЛ применяются для решения разных практических задач, а её совершенствование остаётся актуальным в связи с неуклонным ростом частот рабочих и помеховых сигналов, а также миниатюризацией и интеграцией компонентной базы.

Так, для измерения эффективности экранирования материалов и прокладок предложена конструкция ПЛ с высотой ИО до

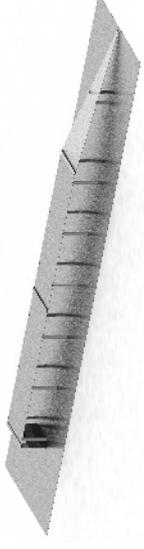
40 мм и модулем коэффициента отражения $|S_{11}| \leq -5$ дБ до 18 ГГц [25]. Для оценки помехоустойчивости ноутбука к напряженности электрического поля 2,7 кВ/м создана конструкция с двойным углом клинообразного расширения с рабочим диапазоном частот до 3 ГГц [26]. В стандарте IEC 61967-8 [27] по измерению помехоэмиссии интегральных схем предписано использовать устройства на основе ПЛ с $|S_{11}| \leq -20$ дБ в диапазоне частот от 150 кГц до 3 ГГц. В [28, 29] описываются конструкции ПЛ с $|S_{11}| < -20$ дБ до 3 ГГц для оценки помехоэмиссии от ИС [28], в том числе для мобильных устройств с высотой ИО 2 мм [29]. Для испытаний на помехоустойчивость и помехоэмиссию ИС представлена конструкция экранированной ПЛ [30], расчет которой проводился методом отображения пространств проектных параметров (Response surface space mapping), отличающимся использованием грубой (схемной) и точной (электродинамической) моделей для ускорения процесса нахождения оптимальных значений параметров исследуемой конструкции. Разработанная ПЛ имеет $|S_{11}| \leq -20$ дБ в диапазоне до 4,4 ГГц.

Промышленностью выпускаются ПЛ разных производителей (таблица 1.1) [31–33].

Таким образом, полосковые линии широко применяются для оценки уровня излучаемой помехоэмиссии и помехоустойчивости различных РЭС, имеющих малые поперечные и большие продольные размеры, а также кабельной продукции и ЭЭ материалов. Разработка конструкции ПЛ для оценки восприимчивости различных РЭС и кабельной продукции к узкополосному электромагнитному излучению (ЭМИ) в диапазоне частот до 3 ГГц является актуальной. Важно включить ПЛ в комплекс измерительных средств, применяемых для испытаний на ЭМС.

Таблица 1.1 – Характеристики полосковых линий разных производителей

Фирма	TESEQ [31]			TDK [32]			SCHWARZBECK [33]		
	SL 50	SL 90	SL 150	STL 01	STL 02	STL 03	TEMZ 5231	TEMZ 5232	TEMZ 5238
Модель			TPL 300						
Диапазон частот, ГГц	≤ 1	$\leq 0,2$	≤ 1	≤ 1	$\leq 0,12$				
КСВН	1,3	1,22	1,25	$< 2,0$	$< 2,0$	$< 2,0$	$< 1,8$	$< 2,0$	$< 2,0$
Максимальная мощность, кВт	1	0,15	0,1	0,5	0,1	5	0,5	0,06	0,05
Z _в , Ом	50	90	50	50	50	50	50	90	188
Высота ИО, мм	50	50	260	15	80	160	50	50	200
Внешний вид	1	2	–	3	4	6	–	5	–

Виды ПЛЛ	
1	
2	
3	
4	
5	
6	

1.3 TEM-камера

Традиционно TEM-камера (рисунок 1.3) состоит из центральной пластины 1 и трех объемных частей корпуса 2 с прямоугольным поперечным сечением, к каждому концу которого подключен соединитель 3 [5]. К одному из соединителей 3 подключается генератор, а к другому – нагрузка 50 Ом. В результате воздействия генератора внутри камеры возбуждается поперечная ЭМВ, которая распространяется вдоль камеры и поглощается нагрузкой. Равномерность поперечной составляющей напряженности электрического поля E_y в регулярной части камеры определяется максимальными габаритами ИО, который помещается на испытательный стол или измерительную плату 4, и соответствием поперечного сечения камеры заданному волновому сопротивлению, например $Z_B = 50$ Ом. Неравномерность распространения поля в TEM-камере не должна превышать ± 3 дБ по стандарту IEC 61967-2 [34]. Подключение внешних устройств к соединителям 3 может отличаться в зависимости от испытаний на помехоэмиссию [34] или помехоустойчивость [35]. В общем случае корректность получаемых результатов определяется максимальным рассогласованием внешних устройств с TEM-камерой в заданном диапазоне частот.

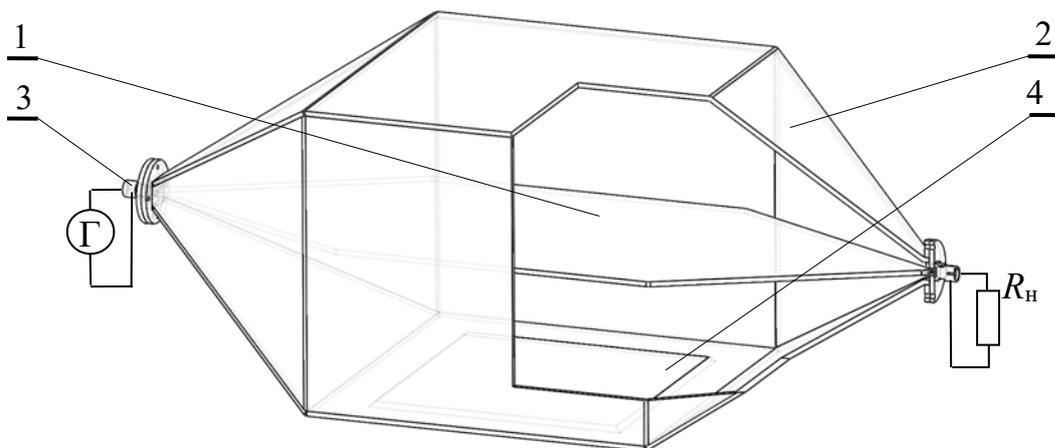


Рисунок 1.3 – Внешний вид и подключение TEM-камеры

Конструкция ТЕМ-камеры реализована исходя из методик и аналитических оценок М.Л. Crawford из Национального бюро стандартизации (США) [5], который описал распространение поперечной ЭМВ вдоль волноводного тракта с $Z_B = 50$ Ом. Приближенные аналитические формулы [36] получены на основе экранированной ЛП [37], метода рефлектометрии во временной области [38] и экспериментального исследования краевой емкости [5]. Эти выражения усовершенствовал С.М. Weil при помощи численного анализа поперечного сечения ЛП для нулевой и конечной толщины центрального проводника [39]. Malaric K. и Bartolic J. [40] выполнили нормирование геометрических параметров и представили оптимальные графические зависимости для Z_B .

ТЕМ-камера имеет достаточно сложную геометрическую форму (рисунок 1.4), размеры которой могут быть вычислены приближенно. Согласно расчетным критериям и экспериментальным оценкам высота ИО z_1 должна составлять не более $1/3$ от расстояния d между опорным и центральным проводниками ($d \geq 3z_1$) [40], что определяет высоту камеры. Данное соотношение является удовлетворительным для равномерного распространения поперечной ЭМВ в прямоугольном волноводе с ИО и, как следствие, минимального отклонения КСВН. Аналогично длина прямоугольной части l ТЕМ-камеры находится из условия $l \geq 3x_1$ [40], где x_1 – длина ИО. Длина пирамидальных частей корпуса камеры lp определяется как $l/2$. Длина прямоугольной части центрального проводника камеры $l_2 \approx 0,92l$, а $l_3 = lp$. Размеры поперечного сечения ТЕМ-камеры определяются с учётом соотношения ширин центрального проводника камеры w и корпуса a : $w \approx 0,72a$ [36]. Напряжение на входе ТЕМ-камеры при известной подводимой от генератора мощности P_n вычисляется по формуле $V_c = (P_n Z_B)^{0,5}$, а при известном расстоянии d , где поле уже сформировано и имеет равномерное распространение [5], напряженность электрического поля $E_y = V_c/d$. Частота $f_{гр}$ ТЕМ-камеры определяется для TE_{11} -волны [36] и соответствует $f_{гр} = c/(2a)$.

Для согласования ТЕМ-камеры с измерительным оборудованием сопротивление Z_B в каждом элементарном сечении камеры (см. рисунок 1.4,б) должно соответствовать 50 Ом, что определяется для нулевой и конечной толщины проводника. Возможное расположение ИО внутри камеры показано на рисунках 1.4,б, в.

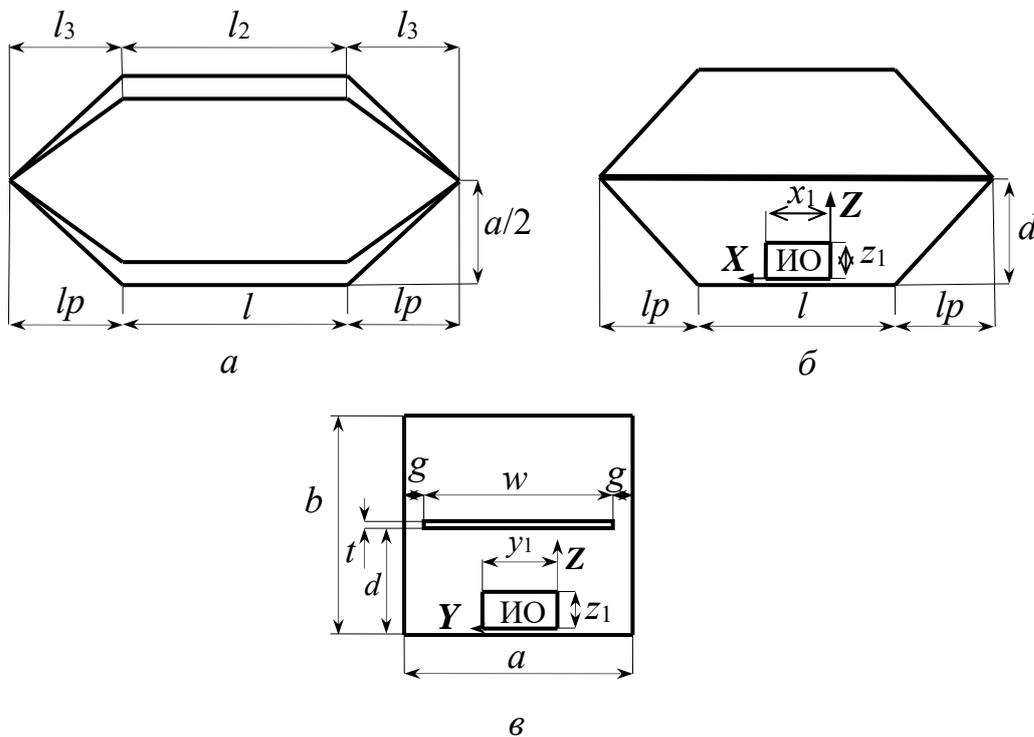


Рисунок 1.4 – Вид сверху (а), в продольном (б) и поперечном (в) сечениях ТЕМ-камеры с центральным расположением проводника

Расчёт сопротивления Z_B для структуры с бесконечно тонким проводником выполняется по формуле [36]

$$Z_B = \frac{\eta_0}{4 \left[\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\sinh \left(\frac{\pi g}{2b} \right) \right) \right]} - \frac{C}{\epsilon_0}, \quad (1.4)$$

где

$$\frac{C}{\epsilon_0} = \left[\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\sinh \left(\frac{\pi g}{2b} \right) \right) \right] - \frac{\Delta C}{\epsilon_0}; \quad (1.5)$$

$$\frac{\Delta C}{\varepsilon_0} = \frac{2}{\pi} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{k}}{1 + \sqrt{\lambda}} \right)^2 \left(\frac{1+k}{1+\lambda} \right); \quad k - \text{волновое число}; \quad \lambda - \text{длина волны}$$

в камере.

Расчёт волнового сопротивления для структуры с конечной толщиной проводника выполняется по формуле [39, 40]

$$Z_B = \frac{\eta_0}{4 \left[\frac{w}{b-t} + \frac{C'_f}{\varepsilon_0} \right]}, \quad (1.6)$$

где C'_f – погонная ёмкость, определяемая для соотношения

$\frac{a-w}{2b} \geq 0,4$ выражением

$$\frac{C'_f}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{b}{b-t} \ln \left(\frac{2b-t}{t} \right) + \ln \left(\frac{t(2b-t)}{(b-t)^2} \right) + \ln \left[\coth \frac{\pi}{2} \left(\frac{a-w}{b-t} \right) \right] \right] \dots, \quad (1.7)$$

а для $\frac{a-w}{2b} < 0,4$ выражением

$$\frac{C'_f}{\varepsilon_0} = \frac{2b}{\pi(b-t)} \ln \left[1 + \coth \frac{\pi}{2} \left(\frac{a-w}{b-t} \right) \right] + \frac{t}{a-w} \dots \quad (1.8)$$

На рисунке 1.5,*а* показана зависимость волнового сопротивления Z_B от ширины центрального проводника w камеры при изменении его толщины t от 0 до 5 мм. Видно, что волновое сопротивление камеры уменьшается на 2 Ом с увеличением толщины t на 1 мм при заданных геометрических размерах корпуса. Это необходимо учитывать при вычислении геометрических размеров корпуса, граничной частоты $f_{гр}$ и жесткости конструкции.

Зависимость сопротивления Z_B от нормированных геометрических параметров камеры показана на рисунке 1.5,*б*. Геометрия нормирована к высоте камеры b , поскольку она (согласно условию $d = 3z_1$) пропорциональна высоте ИО. Нормируемыми выбраны следующие параметры: толщина проводника t , ширина проводника w и ширина корпуса a . Данными параметрами определяется волновое сопротивление ТЕМ-камеры [39].

На рисунке 1.5,б видно, что при изменении a/b изменяется w/b . Из этого следует, что в обоих случаях увеличивается зазор g между проводником и корпусом (таблица 1.2), а оптимальное значение $a/b \approx 1$. Зазор g более резко увеличивается при $a/b = 0,5$, чем при $a/b = 1,5$. Следовательно, параметр w оказывается меньше при $a/b = 0,5$, но частота $f_{гр}$ увеличивается.

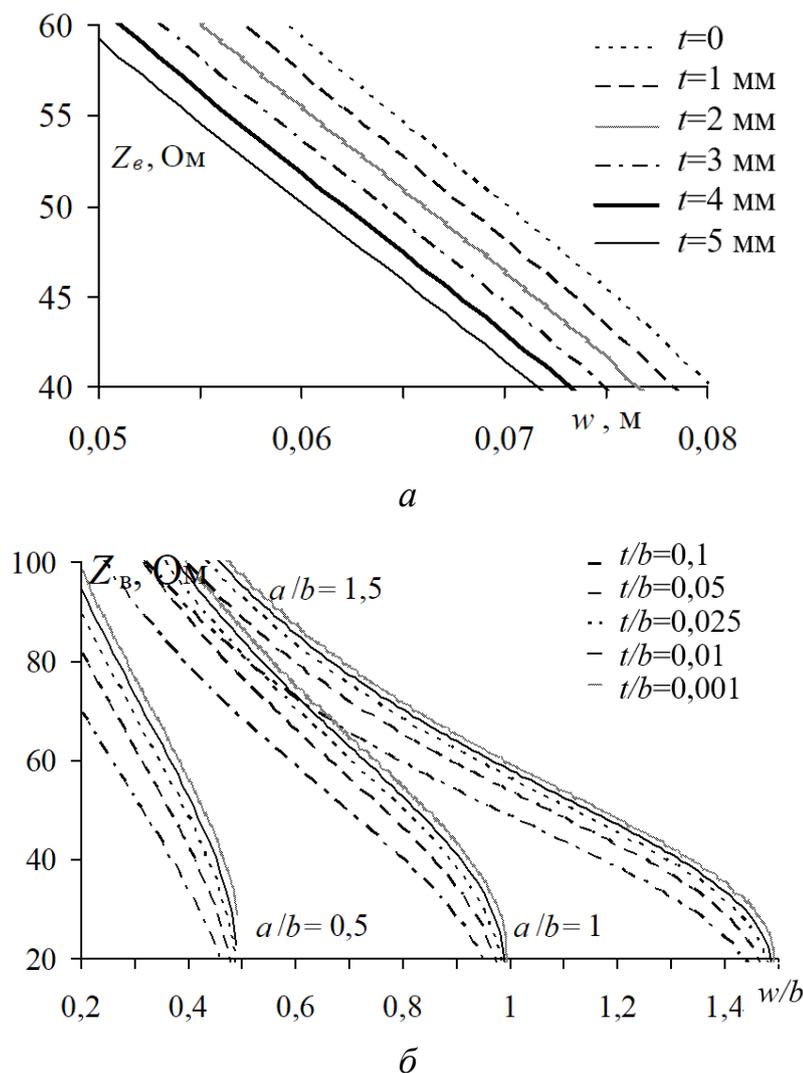


Рисунок 1.5 – Зависимость волнового сопротивления от ширины центральной части проводника камеры (а) и нормированной ширины проводника при разных отношениях t/b и a/b (б)

Из зависимостей для разных значений t/b видно, что Z_B уменьшается с ростом толщины проводника t . Соответственно требуемое значение a/b должно быть около единицы, а t/b стремиться к нулю, тогда отношение w/a будет находиться в диапа-

зоне $0,7 \leq w/a < 1$, что обеспечит большую площадь под ИО в плоскости zy и увеличение $f_{гр}$ камеры.

Таблица 1.2 – Нормированная ширина центрального проводника w/b при $Z_B = 50$ Ом

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

Диапазон рабочих частот ТЕМ-камеры достаточно широк – от постоянного тока до $f_{гр}$, начиная с которой возбуждаются высшие типы TE - и TM -волн, что приводит к неконтролируемому воздействию на ИО. Размеры ИО зависят от внутреннего испытательного пространства, увеличение которого снижает верхнюю $f_{гр}$, а следовательно, ограничивает возможность применения камеры для измерений по диапазону рабочих частот. Эту проблему решают посредством структурной оптимизации: вводят внутрь ТЕМ-камеры РПМ, металлы с высокой магнитной проницаемостью, а также выполняют прорези в центральном проводнике и корпусе [41], между которыми устанавливают резисторы, позволяющие подавить нежелательные резонансы.

Для улучшения характеристик ТЕМ-камер применяют численные методы [42], с помощью которых оптимизируются геометрические параметры камеры, оценивается неравномерность распространения поля при размещении внутри камеры неоднородных материалов [43], проводится коррекция взаимодействия ИО с ТЕМ-камерой [44, 45]. Поскольку переходы из сужающихся частей в центральную часть корпуса, сужение центрального проводника и дополнительные устройства его крепления нарушают равномерность поля [46], то оптимизируются параметры центрального проводника в местах его крепления к корпусу соединителя, а также длины центральной и сужающихся частей, чтобы получить хорошее согласование камеры в заданном диапазоне ча-

стот [47] и при максимальной высоте ИО [48]. Так, анализ поперечных ЭМВ в трёх плоскостях ТЕМ-камеры методом конечных разностей во временной области (МКРВО) показал зависимость неравномерности распространения электромагнитного поля от размеров неоднородных материалов [43]. При помощи МКРВО проведено исследование токов, наведенных на ИО при воздействии ЭМП в ТЕМ-камере, получена метрика количественного изменения поверхностного тока, индуцированного на ИО при различных средах, выполнена коррекция размеров ИО и ТЕМ-камеры [44]. Обобщающий подход [45] к исследованию реактивных сопротивлений ТЕМ-камеры с использованием метода моментов (ММ) показал взаимодействие между камерой и ИО и влияние полей высших мод на ИО.

Изучено изменение Z_v при внесении ИО в ТЕМ-камеру и распределение поверхностных токов по ИО. Показано, что даже при небольших габаритах ИО поверхностные токи на ИО и обратные токи, проходящие по поверхности корпуса камеры, оказывают существенное влияние на равномерность распространения поля внутри камеры. Для испытания больших ИО разработана модифицированная ТЕМ-камера [48], которая удовлетворяет стандартам EN 55035 [49] для испытания жидкокристаллических телевизоров (с диагональю до 47 дюймов) в диапазоне частот 150 кГц–150 МГц. Она может быть использована согласно IEC 61000-4-20 [50] для испытаний на ЭМС крупногабаритной РЭА. Увеличение рабочего испытательного пространства в ней достигается за счёт новой формы центрального проводника, а также его согласования и калибровки с измерительным оборудованием.

Расширение диапазона рабочих частот и увеличение внутреннего объёма испытательного пространства достигаются также за счёт гибридизации ТЕМ-камеры с реверберационной камерой [12]. Оценка влияния высших мод на равномерность распространения поля в ТЕМ-камере [51] показала, что необходимо правильно ориентировать датчики поля относительно направления распространения поля внутри камеры. Рассмотрены два способа расположения датчиков электрического поля: в прямоугольном

вырезе в боковой стенке параллельно центральному проводнику при ориентации датчика перпендикулярно распространению электромагнитного поля и в верхней стенке параллельно распространению поля перпендикулярно плоскости центрального проводника. В обоих случаях вырез оказывает минимальное влияние, поскольку поверхностные токи на стенках камеры параллельны оси распространения основной моды электрического поля. Показано повышение напряженности поля на 20 % при расположении датчика параллельно электрическому полю. Выполнено сравнение результатов измерений равномерности распространения поля на частотах 500 МГц и 2,45 ГГц. Измерения напряженности поля на двух частотах различались на 10 %, при этом на частоте 2,45 ГГц наблюдалась хорошая симметрия и равномерность распространения ЭМП. Методы подавления мод высших порядков в ТЕМ-камере приведены в [52]. Авторы провели численное моделирование модифицированной ТЕМ-камеры для испытаний ИС в частотном диапазоне от 1 до 2,5 ГГц. Leat C. и Walters A.J. исследовали расширение верхней граничной частоты в асимметричной ТЕМ-камере, сосредоточив внимание на TE_{11} -моды и её подавлении с помощью активных систем с целью уменьшения амплитуды резонанса, а также возбуждения обратной составляющей поля через контур для ослабления TE_{11} -моды [53]. Ими же решена проблема, связанная с возникающим резонансом при возбуждении TE_{111} -моды в асимметричной ТЕМ-камере [54]. В основе конструкции камеры лежит использование центрального проводника, в котором сделаны полуволновые прорезы с резистором 330 Ом посреди каждой. В результате амплитуда E -поля на резонансе (TE_{111}) уменьшилась приблизительно на 20 дБ. Модифицированы ТЕМ-камеры с $Z_p = 75$ Ом под увеличенный размер ИО для частот сотовой связи 900–935 МГц [55]. Приведены результаты моделирования ТЕМ-камеры в программе Quickfield, использующей метод конечных элементов (МКЭ), и программе MAFlA, использующей метод конечного интегрирования (МКИ). Показаны результаты измерения камеры для диапазона частот до 935 МГц при КСВН < 1,1 [40].

В зависимости от характеристик ТЕМ-камер с их помощью возможны исследования ЭЭ материалов [6, 56], прокладок [57], кабелей [58], корпусов компонентов [59] и блоков [60], измерения наводок на произвольно ориентированные микрополосковые линии [61, 62], калибровка датчиков электрического поля [63, 64], испытания ИС и функциональных узлов в целом, например согласно MIL-STD [65]. Стандартами IEC [34, 35] и SAE [66] предусматриваются испытания на помехоэмиссию и помехоустойчивость ИС в ТЕМ-камере. Помехоэмиссия от ИС исследуется при её размещении внутри ТЕМ-камеры и измерении наведенных ею на центральный проводник камеры токов [67]. При этом исследования ИС оказываются более актуальными и полезными при повышении их уровня помехоустойчивости или уменьшения уровня помехоэмиссий от них [68–71], что достигается за счёт идентификации механизмов отказа при воздействии ЭМИ в широком диапазоне параметров. Исследования в ТЕМ-камере влияния импульсного электрического поля высокой амплитуды с наносекундной длительностью (3–300 нс) проводятся в биомедицинских целях, например для лечения рака и генной терапии [72, 73]. Однако физические механизмы, лежащие в основе взаимодействия наносекундного импульсного электрического поля с живыми клетками, тканью или органами, до сих пор не установлены и активно исследуются [74, 75].

В настоящее время промышленностью выпускаются различные ТЕМ-камеры:

Frankonia TEMF 500 – КСВН $\leq 1,1$ при $f \leq 500$ МГц, $E = 350$ В/м, $d = 100$ мм;

TEMF 3000 – КСВН $\leq 1,2$ при $f \leq 3$ ГГц, $E = 1,4$ кВ/м, $d = 23,5$ мм [76];

Teseq DTEM – КСВН $\leq 1,2$ при $f \leq 400$ МГц, $d = 300$ мм [31].

Ряд ТЕМ-камер представлен фирмой Instruments For Industry (IFI) (КСВН $< 1,25$) [77].

Таким образом, ТЕМ-камеры широко используются для испытаний как в радиотехнике, так и в биомедицине. Исследования направлены на поиск оптимальных геометрических размеров и форм элементов конструкции ТЕМ-камеры, а также на расшире-

ние диапазона рабочих частот при минимальной неравномерности поля в увеличенном испытательном пространстве камеры. При этом на этапе проектирования уделяется недостаточно внимания подробностям и тонкостям, возникающим в процессе изготовления сложных конструкций СВЧ-устройств из металла, характеристики которых чувствительны к изменению геометрических параметров.

1.4 ГТЕМ-камера

ГТЕМ-камера (рисунок 1.6) получила наибольшее распространение, поскольку имеет превосходящие характеристики относительно остальных видов камер. По сравнению с ТЕМ-камерами ГТЕМ-камеры обладают большей верхней граничной частотой ($f_{гр} \leq 25$ ГГц), а также большим объемом под ИО (до 1,5–2 м³), что обеспечивается за счёт смещения центрального проводника в верхнюю часть камеры [78].

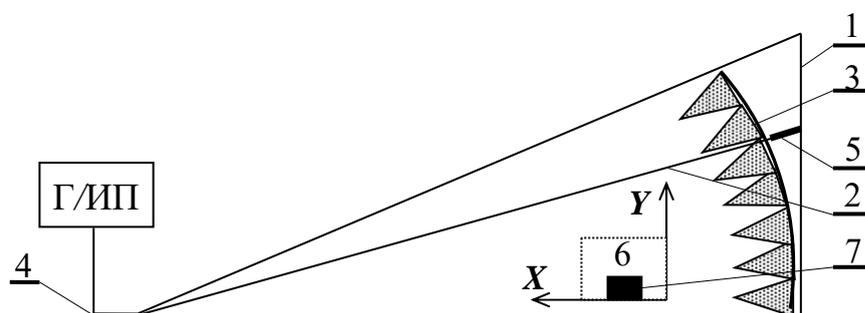


Рисунок 1.6 – Конструкция ГТЕМ-камеры и её подключение

ГТЕМ-камера выполняется в открытом или закрытом виде, в вертикальном или горизонтальном исполнении и содержит внешний металлический корпус 1, выполненный в форме пирамиды, внутри которой размещен центральный проводник 2. Основание пирамиды изнутри покрыто РПМ 3 для поглощения энергии высокочастотного ЭМИ. Центральный проводник соединен одним концом на вершине пирамиды с коаксиальным соединителем 4, а другим – с группой резисторов 5, являющихся согласованной нагрузкой для токов низкой частоты и расположенных

возле основания пирамиды за РПМ. В зоне испытаний 6 располагается ИО 7. При этом расположение зоны может изменяться в зависимости от размеров ИО и требуемой напряжённости электрического поля. В остальном принцип работы ГТЕМ-камеры такой же, как у ТЕМ-камеры.

Конструкция ГТЕМ-камеры при вычислении значений её геометрических параметров рассматривается как сужающаяся ЛП со смещенным центральным проводником. Аналитическая оценка размеров поперечного сечения в раскрыве камеры проводится при заданных значениях длины L и определяющих раскрыв углов α , γ и θ (рисунок 1.7) по выражениям $a = 2L \operatorname{tg}(\alpha)$, $b = L[\operatorname{tg}(\gamma) - \operatorname{tg}(\theta)]$ и $d = L[\operatorname{tg}(\gamma) + \operatorname{tg}(\theta)]$ [79].

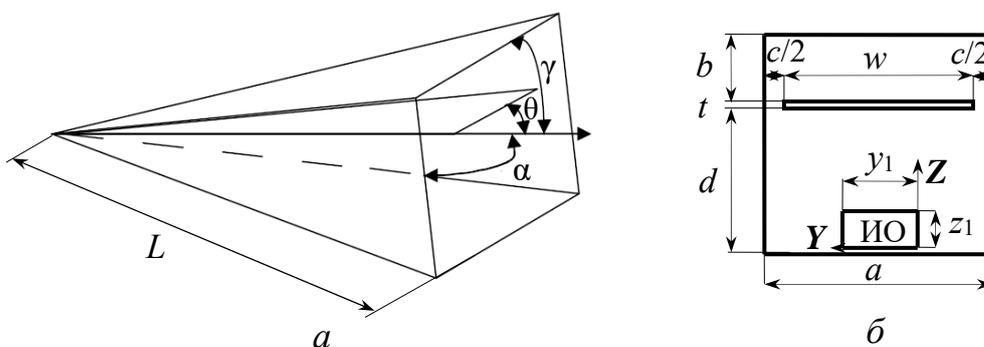


Рисунок 1.7 – Общий вид (а) и поперечное сечение (б) ГТЕМ-камеры

Для каждого элементарного поперечного сечения волновое сопротивление Z_B вычисляется из соотношения $Z_B/\eta_0 = \varepsilon_a/C$ [79]. При этом $\varepsilon_a = \varepsilon_r \varepsilon_0$, а ёмкость C может быть определена через неявную функцию геометрических параметров поперечного сечения камеры [79]:

$$C = 2\varepsilon\varepsilon_0 \left(\frac{\left[1 + (1 - \chi^2) A_1 \right] K(k) - A_1 \left[(1 + \xi)^2 - \chi^2 \right] E(k)}{\left[1 - \xi(2 + \xi) A_1 \right] K'(k') + A_1 \left[(1 + \xi)^2 - \chi^2 \right] E'(k')} \right) \operatorname{mod} k, \quad (1.9)$$

где $K(k)$ и $E(k)$ – полные нормальные эллиптические интегралы первого и второго рода соответственно; $K'(k') = K(k')$; $E'(k') =$

$$\begin{aligned}
&= E(k'); \quad k' = (1 - k^2)^{0,5}; \quad \chi = \frac{1}{2}(\cos\varphi_1 + \cos\varphi_2), \quad \xi = \frac{1}{2}(\cos\varphi_1 - \cos\varphi_2), \\
k &= \frac{2\sqrt{\xi}}{\left([1 + \xi]^2 - \chi^2\right)^{0,5}}, \quad \varphi_1 = \frac{\pi}{2a}(a - w), \quad \varphi_2 = \frac{\pi}{2a}(a + w), \\
A_1 &= \left[\frac{\cosh\left[\pi a^{-1}(b + d)\right] - \cosh\left[\pi a^{-1}(d - b)\right]}{\sinh\left[\pi a^{-1}(b + d)\right]} - 1 \right].
\end{aligned}$$

Приведённые в [79] выражения позволили вычислить значения геометрических параметров и создать ГТЕМ-камеру в виде сужающейся экранированной ЛП размером $2,2 \times 1,3 \times 1$ м, в которой $E_v < 600$ В/м может воздействовать на ИО с размерами $200 \times 200 \times 150$ мм.

Совершенствование ГТЕМ-камер, как и ТЕМ-камер, связано с увеличением верхней граничной частоты $f_{гр}$, пространства для ИО и со снижением неравномерности распространения поля. Кроме того, множество исследований посвящено оптимизации элементов конструкции ГТЕМ-камеры с целью улучшения её рабочих характеристик. Например, рассматривается согласование наиболее критичных для обеспечения рабочих характеристик элементов конструкции, таких как КПП, а также гибридная нагрузка. Предложена конструкция сверхширокополосного КПП, преимуществами которого являются простота и малые вносимые потери (ВП) [80]. Трёхмерное квазистатическое и электродинамическое моделирование КПП позволяет вычислить Z_B соединителя, КПП и ГТЕМ-камеры. По результатам моделирования получили $|S_{11}|$ менее минус 12 дБ в диапазоне частот 0,5–25 ГГц. Посредством моделирования центрального проводника с согласованной нагрузкой установлено, что расположение резисторов по краям центрального проводника позволяет уменьшить КСВН камеры [81].

Для поглощения ЭМИ на частотах выше 300 МГц используется пирамидальный РПМ с нелинейными частотными характеристиками. Поскольку РПМ в области низких частот обладает высокой емкостной составляющей, это приводит к уменьшению

сопротивления камеры вблизи задней стенки. Для уменьшения влияния РПМ на характеристики камеры центральный проводник разбивают на несколько секций, сужающихся вблизи задней стенки камеры. Это минимизирует отражения, возникающие при изменении геометрии центрального проводника. При этом $|S_{11}|$ камеры незначительно (на 3 дБ) уменьшается при повышении числа секций (с 9 до 21) [82]. Помимо основного типа волн выше $f_{гр}$, внутри ГТЕМ-камеры распространяются волны высших порядков, что существенно влияет на рабочие характеристики камеры. Для подавления неосновных типов мод применяют разные методы. Например, разработана упрощенная эквивалентная модель камеры, позволяющая разделять моды ТЕМ и ТМ₁₁ [83]. Такой подход позволяет определять отраженную и поглощенную мощность в пирамидальном РПМ и её рассеяние на сосредоточенных элементах. Кроме того, пирамидальный РПМ и сосредоточенная нагрузка обладают низкой поглощающей способностью относительно мод высших порядков. С помощью оптимизации элементов конструкции камеры можно добиться увеличения размеров пространства для размещения ИО.

Методика, предложенная в [84], связывает общие принципы проектирования семейства ГТЕМ-камер, способ подавления стеночного поглощения и мод высших порядков. Для подавления стеночного поглощения на нижней стенке камеры размещают РПМ и выполняют две симметричные продольные прорезы вблизи боковых стенок, которые предотвращают циркуляцию вихревых токов и передачу энергии ЭМВ высших порядков посредством активного поглощения. Для подавления мод высших порядков резисторы с сосредоточенными параметрами с наличием и без наличия параллельных емкостей комбинируют с ферритовыми пластинами и пирамидальными углеродными поглотителями. В итоге получается камера с улучшенной однородностью поля, увеличенным рабочим объемом и повышенной верхней $f_{гр}$. Анализ ГТЕМ-камеры при помощи численных методов [85] позволил описать поведение высших типов мод и разработать программное обеспечение (ПО) для определения частоты среза и резонансных частот. Эффект, приводящий к многократным пе-

реотражениям с затухающей амплитудой ЭМВ из-за разной скорости распространения, исследован в [86]. Конструктивные особенности и характеристики дешёвого варианта ГТЕМ-камеры рассмотрены в [87]. Представленная в [88] методика корректировки частотной зависимости коэффициента отражения РПМ в ГТЕМ-камере позволяет уменьшить КВСН и повысить точность измерений. С её помощью проведено численное моделирование для оценки напряженности электрического поля внутри камеры и получена зависимость точности измерений излучаемого электрического поля от кроссполяризации в ГТЕМ-камере. В [89] описывается метод вычисления S -параметров для упрощенной модели КПП ГТЕМ-камеры, позволяющий эффективно определить характеристики элементов согласования на низких и средних частотах и оптимизировать их. Для согласования конца центрального проводника в ГТЕМ-камере на низких и средних частотах применяют массив нагрузочных сопротивлений, а на высоких – РПМ [90].

Ведется много исследований, связанных с методами проведения испытаний и расширением рабочих характеристик ГТЕМ-камер, которые активно коммерциализуются [91]. Так, в [92] приведена методика, с помощью которой можно повысить эффективность измерений, и описаны различные оценки однородности поля согласно стандарту [50], включая измерение помехоэмиссии и помехоустойчивости РЭС. В [93] представлен метод измерения помехоэмиссии печатной платы (ПП) с программируемой логической интегральной схемой (ПЛИС) при помощи ГТЕМ-камер. Перед проведением измерений ПП с ПЛИС экранируется металлическим корпусом, чтобы избежать непреднамеренного воздействия от вспомогательных компонентов ПП. Измерения проводились при горизонтальном и вертикальном расположении ПП с ПЛИС, а также при различной конфигурации логических схем. Методика, описывающая проведение испытаний ПП, содержащих микроконтроллер (МК), представлена в [94]. Рассмотрены основные условия проведения испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость, описаны методы калибровки поля. В качестве ИО служила ПП, содержащая МК с тактовой частотой 40 МГц. В [86] предложен метод измерения помехоэмиссии ИС с помощью

ГТЕМ-камеры. Показано, что посредством ряда измерений можно получить более точную информацию об ИС как об источнике ЭМП.

ГТЕМ-камеры нашли применение также в антенных измерениях. Метод калибровки антенн заключается в следующем. Антенна размещается в центре объема под ИО, где поле определено. ГТЕМ-камера возбуждается известным высокочастотным напряжением. Выходное напряжение с антенны сравнивается с известной напряженностью поля без антенны для определения антенного фактора. Результаты измерений при помощи логопериодической антенны в диапазоне частот от 300 МГц до 1 ГГц по данной методике приведены в [95]. Метод калибровки датчиков электрического и магнитного полей с использованием ГТЕМ-камеры в диапазоне частот от 10 кГц до 30 МГц описан в [96]. Для проведения калибровки выполняется измерение при помощи эталонного датчика, результаты сравниваются с показаниями испытываемых датчиков.

Исследование сходимости при измерениях в БЭК и ГТЕМ-камере приведено в [97]. Представлен метод измерения ЭМИ от объектов, обладающих электрически большими размерами на частотах выше 1 ГГц. Выполнено измерение двух объектов разных размеров. Измерение малого объекта в БЭК проведено методом азимутального сканирования, сканирование большого объекта ограничивается высотой антенны. Показано, что метод сканирования необходимо применять и в ГТЕМ-камере, так как метод трехортогонального положения согласно стандарту [50] не подходит для ИО, характеризующихся неравномерной диаграммой излучения.

Применение ГТЕМ-камер не ограничивается проведением испытаний на ЭМС. В [79] описывается проведение биомедицинских исследований в ГТЕМ-камере, изложены результаты оптимизации волнового сопротивления камеры на участке поглощающей нагрузки, а также экспериментальной оценки оптимальных условий воздействия на биологический объект (БО). Особое внимание уделено напряженности поля в объеме под ИО на частотах 900 МГц и 1800 МГц.

В настоящее время промышленностью выпускаются различные ГТЕМ-камеры:

Tescom TC-5063A – КСВН $\leq 1,7$ при $f = 100$ МГц–3 ГГц; ЭЭ ≥ 80 дБ при $f \leq 2$ ГГц и ЭЭ ≥ 70 дБ при $f = 2$ –3 ГГц; $E = 13$ дБмкВ/м при 1 мкВ на входе; $H = 220$ мм; вертикальное исполнение [98];

Frankonia GTEM 500 – КСВН $\leq 1,2$ при $f = 10$ кГц–18 ГГц, $P = 500$ Вт, $H = 400 \times 400 \times 300$ мм;

Frankonia GTEM 1000 – КСВН $\leq 1,2$ при $f = 10$ кГц–18 ГГц, $P = 700$ Вт, $H = 750 \times 750 \times 700$ мм [76];

Teseq GTEM 500 – КСВН $\leq 1,45$ при $f \leq 20$ ГГц, $P = 100$ Вт, $H = 410 \times 410 \times 310$ мм;

Teseq GTEM 2000 – КСВН $\leq 1,45$ при $f \leq 20$ ГГц, $P = 1$ кВт, $H = 1500 \times 1500 \times 1320$ мм [31].

Совершенствование ГТЕМ-камер для применения как в радиотехнике, так и в биомедицине остаётся актуальной задачей, поэтому разработка методики их проектирования является перспективным направлением.

1.5 Коаксиальная камера

Производство экранирующего композитного материала (КМ) включает измерение его ЭЭ. Оно может быть выполнено согласно стандарту [99] с использованием БЭК или устройств на основе ЛП [100–102] в виде сдвоенной ТЕМ-камеры [6] и коаксиальной камеры [7]. На стадии проектирования и предварительных испытаний КМ использование устройств на основе ЛП имеет ряд преимуществ, таких как небольшие размеры исследуемых образцов, применение одного измерительного прибора, а именно векторного анализатора цепей (ВАК). Таким образом, методы измерения с использованием коаксиальных и ТЕМ-камер на этапе проектирования КМ более эффективны и менее затратны.

Коаксиальная камера выполняется в виде коаксиального волновода с внутренним цилиндрическим проводником. Её конструкция представляет собой отрезок ЛП из двух соосных конических коаксиальных проводников, изолированных друг от друга.

Измерение ЭЭ в коаксиальной камере заключается в измерении ВП при распространении ЭМВ вдоль камеры с размещенным внутри исследуемым материалом заданной толщины t_0 . Из-за разницы волновых сопротивлений среды Z_B и исследуемого материала Z_m падающая ЭМВ мощностью P_i отражается от поверхности материала, что приводит к формированию отраженной волны мощностью P_r , а также прошедшей сквозь материал ЭМВ мощностью P_t . Оставшаяся мощность поглощения P_a соотносится с ЭЭ исследуемого материала (рисунок 1.8) [7]. В результате ЭЭ может быть определена путем измерения отношения мощности падающей волны P_i к мощности прошедшей через экран волны P_t , что также может быть выполнено посредством измерения коэффициента передачи S_{21} коаксиальной камеры с расположенным внутри образцом материала.

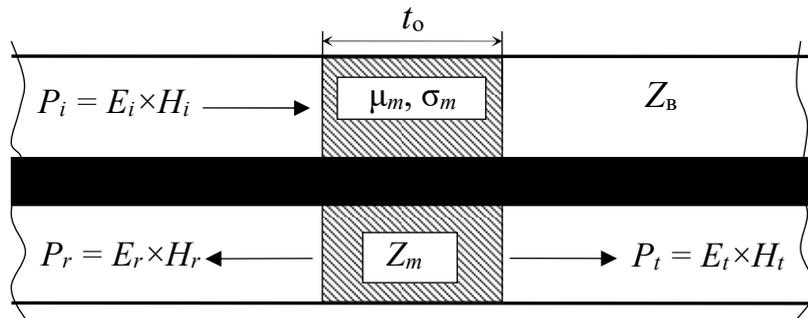


Рисунок 1.8 – Распространение электромагнитной волны в коаксиальной камере с исследуемым материалом

Согласно ASTM E57 [101] коаксиальная камера имеет неразрывный центральный проводник ЛП, а образец материала выполнен в форме диска с отверстием в центре. Исследуемый образец размещается внутри камеры в воздушном зазоре между проводниками. В этом случае

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

где S_{21} – коэффициент передачи камеры с исследуемым материалом.

Согласно ASTM D4935 [102] образец материала имеет круглую форму без отверстий и помещается в зазор между двумя симметричными половинами коаксиальной камеры, соединенными винтами из диэлектрического материала. При измерении в коаксиальной камере с прерыванием центрального проводника

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

где S_{21u} и S_{21l} – коэффициенты передачи ненагруженной (без исследуемого материала) и нагруженной (с исследуемым материалом) коаксиальной камеры соответственно.

Описанные методы получили широкое распространение вследствие простоты подхода к измерению и обработки результатов. При этом совершенствование подобных камер необходимо для изучения экранирующих свойств материалов в более широком диапазоне частот.

Волновое сопротивление коаксиальной камеры в поперечном сечении ЛП вычисляется по формуле [103]

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

где ϵ_r – относительная диэлектрическая проницаемость среды; r_1 и r_2 – радиусы внутреннего и внешнего проводников соответственно.

Граничная частота коаксиальной камеры определяется частотой возбуждения TE_{11} как

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

где c – скорость света в свободном пространстве.

Коаксиальные камеры широко применяются для измерения ЭЭ планарных материалов [104]. Одна из конструкций коаксиальной камеры позволяет проводить измерение ЭЭ через количественную меру затухания подводимого к камере сигнала в диапазоне частот до 1 ГГц [105]. Конструкция коаксиальной камеры

для измерения частотного спектра комплексной диэлектрической проницаемости жидких диэлектриков представлена в [106].

Таким образом, коаксиальные камеры являются эффективным инструментом измерения ЭЭ различных КМ, в то же время менее затратным, чем измерения в БЭК.

2 ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

2.1 Методика проектирования устройств на основе линий передачи

Разработана методика проектирования, которая позволяет учитывать неточности, возникающие при создании сложных форм конструкций волноводов из металла [107–109]. Методика апробирована при проектировании и создании устройств на основе ЛП, предназначенных для исследований и испытаний элементов и узлов РЭА на ЭМС [110–115], а также для исследований БО, представляющих собой клетки и ткани живых организмов [116]. Устройства, созданные при помощи данной методики, являются основой аппаратно-программного комплекса испытаний на ЭМС элементов и узлов РЭА при дестабилизирующих воздействиях [117].

Методика проектирования содержит полный цикл вычислений значений геометрических параметров устройств на основе ЛП (рисунок 2.1), который включает следующие этапы.

1. Аналитическую оценку значений $Z_{\text{в}}$ поперечных сечений.
2. Создание квазистатических моделей поперечных сечений.
3. Создание трехмерной геометрической модели из набора поперечных сечений для требуемой длины устройства.
4. Квазистатический анализ и оптимизацию значений геометрических параметров моделей поперечных сечений.
5. Создание трехмерных геометрических моделей элементов конструкции в виде частей устройства для электродинамического анализа с возможностью их сопряжения (линия ... на рисунке 2.1) под одно и то же значение $Z_{\text{в}}$.
6. Электродинамический анализ модели КПП устройства и оптимизацию его по алгоритму.
7. Электродинамический анализ модели центральной части устройства и оптимизацию её по алгоритму.

8. Частичную или полную сборку электродинамической модели.
9. Электродинамический анализ и оптимизацию значений геометрических параметров устройства в целом по алгоритму.
10. Поиск чувствительных параметров и анализ их влияния на характеристики устройства.
11. Создание твердотельной модели устройства.
12. Электродинамический анализ твердотельной модели.
13. Создание чертежей по твердотельной модели устройства.
14. Изготовление и сборку устройства (резка, гибка и пайка металла).
15. Измерение основных параметров и характеристик устройства.
16. Анализ влияния значений геометрических параметров реальной конструкции устройства на его характеристики.
17. Изменение (при необходимости) значений геометрических параметров твердотельной модели (или моделей, созданных ранее) на основе измеренных значений геометрических параметров реальной конструкции устройства.

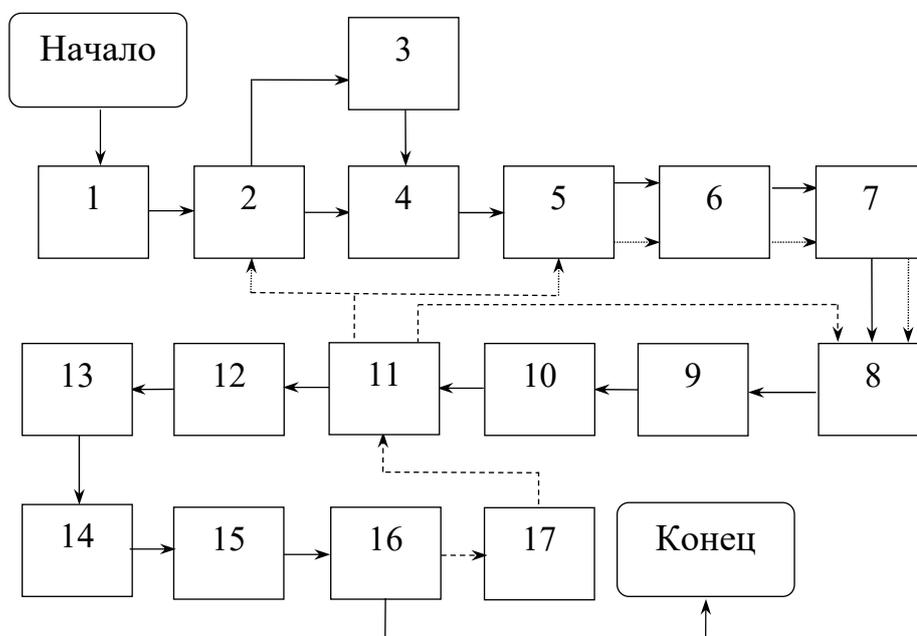


Рисунок 2.1 – Методика проектирования устройств на основе линий передачи

Проектирование с использованием разработанной методики может начинаться необязательно с аналитической оценки геометрических параметров структуры, а с любого из этапов создания моделей для квазистатического или электродинамического анализа с их последующей оптимизацией. Целью является учет на этапе проектирования процессов резки, гибки и пайки металла конструкции волновода со сложной геометрической формой, анализируя результаты электродинамического моделирования.

Начало. Исходными данными для проектирования устройства на основе ЛП являются габариты ИО, размещаемого внутри испытательного пространства, – высота z_1 , ширина y_1 и длина x_1 . Значения геометрических параметров поперечного сечения в регулярной части устройства (см. рисунок 1.4,в) задаются относительно габаритов ИО, например для ТЕМ-/ГТЕМ-камер и устройства ПЛ как $a = ky_1$, $b = 2d + t = 2kz_1 + t$, а длина регулярной части l выбирается равной kx_1 (см. рисунок 1.4,а, б). При этом значение коэффициента k первоначально приравнивается к трем, что связано с оптимальной (± 3 дБ) неравномерностью распределения поля в зоне ИО [5] и соответствием НД [34]. Далее выбирается требуемое волновое сопротивление Z_B , которое может принимать значения 50, 75, 110 Ом и др.

Аналитическая оценка. Вычисление первоначальных значений параметров поперечного сечения в регулярной части (зона расположения ИО) устройства осуществляется под выбранное волновое сопротивление Z_B посредством приближённой аналитической оценки. Для этого в зависимости от устройства могут быть использованы выражения (1.2), (1.6), (1.9) или (1.12). Из условия требуемой максимальной напряжённости электрического поля $E_{\max \text{ ИО}}$ в зоне ИО находятся максимальные мощность P_{Π} и напряжение U_{Π} , подводимые ко входу устройства от генератора: $P_{\Pi} = (U_{\Pi})^2 / Z_B = (E_{\max \text{ ИО}} d)^2 / Z_B$. По найденным значениям U_{Π} и P_{Π} выбирается соответствующий тип СВЧ-соединителя, учитывая значения его S -параметров или КСВН. Значения геометрических параметров поперечного сечения в месте КПП определяются

исходя из метода крепления к устройству (механический и/или пайка) и геометрических параметров СВЧ-соединителя. Также в зависимости от метода крепления определяются минимально возможные значения геометрических параметров центрального проводника соединителя и активного проводника устройства. В случае изначально заданной высокой амплитуды E_{\max} ИО в месте КПП должен быть предусмотрен диэлектрический материал, диэлектрическая проницаемость ϵ_r , которого выбирается исходя из номинального пробивного напряжения в месте расположения КПП.

Создание моделей поперечных сечений, их квазистатический анализ и оптимизация. Аналитическая оценка волнового сопротивления Z_B поперечных сечений приближенная, поэтому для ее уточнения используется квазистатический анализ. Для этого на основе аналитически полученных значений, используя модуль [118] в системе TALGAT [119], создаются модели поперечных сечений в местах расположения КПП и регулярной части и вычисляются значения Z_B . Далее проводится оптимизация значений геометрических параметров двух поперечных сечений под заданную величину Z_B . Для оптимизации геометрических параметров устройств на основе ЛП эффективны метод доверительных интервалов [120], широко используемый в задачах электродинамики [121], и генетический алгоритм (ГА) [122]. Значения, полученные для двух двумерных моделей поперечных сечений (в областях КПП и регулярной части) с оптимальными геометрическими параметрами, позволяют сгенерировать трёхмерную модель, используя модуль [123], и вычислить волновое сопротивление Z_B с помощью квазистатического анализа в системе TALGAT. Значения Z_B изменяются в зависимости от длины частей устройства, что определяет максимальное отклонение волнового сопротивления ΔZ_B от требуемого. На основе отклонений вычисляются значения $|S_{11}|$ и/или КСВН и определяются углы раскрытия в области КПП, а также длина модели устройства. Далее, используя модуль [124] на основе МКЭ, можно сравнить полученные электрические

параметры для указанного поперечного сечения, а также вычислить $E_{\max \text{ ИО}}$ в зонах ИО и КПП и их отклонение от заданного значения.

Создание моделей частей устройства, их электродинамический анализ и оптимизация. Значения геометрических параметров, полученные с использованием квазистатического анализа, позволяют создать части модели КПП, устройства согласования (линейного, ступенчатого и/или линейно-ступенчатого переходов) и регулярной части [109]. При этом модели частей должны быть сопряжены (линия \cdots на рисунке 2.1) в местах их соединения под одно и то же заданное волновое сопротивление Z_B . Используя электродинамический анализ моделей частей устройства, вычисляют $|S_{11}|$ и/или КСВН. При этом оптимизация для каждой части устройства проводится по отдельности. Оптимизированные модели частей устройства собираются в единую модель и выполняется расчет частотных зависимостей её электрических параметров. Для достижения минимальных значений $|S_{11}|$ и/или КСВН, а следовательно, неравномерности электрического поля в зоне ИО проводится оптимизация геометрических параметров модели устройства. Целью оптимизации является получение значений геометрических параметров при минимальном значении $|S_{11}|$ или КСВН в указанном диапазоне рабочих частот при неизменном значении высоты z_1 ИО. Собранная модель содержит много параметров, а электродинамический анализ каждой модели выполняется достаточно долго. Поэтому оптимизация значений геометрических параметров проводится по разработанным для каждого устройства индивидуально алгоритмам оптимизации. Алгоритм содержит пошаговое изменение основных, второстепенных и вспомогательных параметров, значения которых оказывают влияние на рассматриваемых частотах или заданном диапазоне частот. Разработанные алгоритмы основаны на методе доверительных интервалов и ГА. Электродинамический анализ и оптимизация устройства на основе ЛП способствуют получению более точных электрических параметров.

Создание твердотельной модели устройства и её электродинамический анализ. Этап создания твердотельной модели выполняется после оптимизации параметров и поиска всех возможных вариантов изготовления конструкции устройства. Твердотельная модель отражает конструкцию с учётом механических креплений, сварки, гибки и пайки. В случае изменения структуры или параметров модели она должна быть полностью перестроена (- - -) согласно методике (см. рисунок 2.1). Одним из основных отличий твёрдотельной модели от полной геометрической модели для электродинамического анализа является то, что с её помощью можно учесть деформацию металла, возникающую из-за механического изгиба, и корректно внести изменения в чертежи, например, после разгибания согнутых ранее элементов конструкции. Электродинамический анализ твёрдотельной модели может быть затратным как по времени (от нескольких часов до недели или более), так и по требуемой машинной памяти в зависимости от детальности конструкции и вычислительных способностей используемой рабочей станции.

Создание чертежей по твёрдотельной модели. На конечном этапе проектирования создаются чертежи деталей, сборочный чертёж, а также их перечень. По чертежам проводится сборка конструкции устройства на основе ЛП и измерение его электрических характеристик.

2.2 Проектирование ТЕМ-камеры

По методике, представленной в подразд. 2.1, выполнено проектирование ТЕМ-камеры, проведена оптимизация геометрических параметров при помощи разработанного алгоритма [109] и определены размеры конструкций, на основе которых могут быть изготовлены ТЕМ-камеры с верхней граничной частотой 0,5–8 ГГц при высоте ИО 80–5 мм [108]. Получены согласующиеся частотные зависимости $|S_{11}|$, вычисленные двумя электродинамическими методами без учета и с учетом реальных сгибов и резки металла. Методика проектирования апробирована при создании

ТЕМ-камер для диапазонов частот до 2 ГГц [125] и 5 ГГц [126] и высоты ИО до 20 мм и 5 мм.

Проектирование ТЕМ-камеры начинается с приближённой аналитической оценки геометрических параметров поперечных сечений (рисунок 2.2) при $Z_B = 50$ Ом и высоте ИО 5, 10, 20, 40, 80 мм.

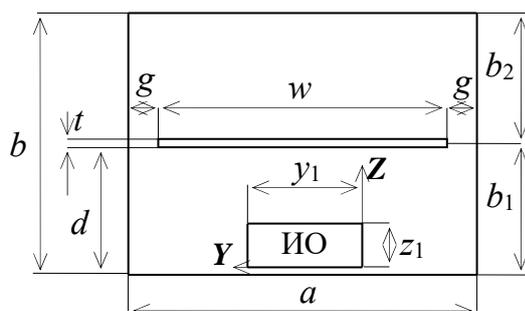


Рисунок 2.2 – Поперечное сечение в центре ТЕМ-камеры

Аналитическая оценка значений геометрических параметров ТЕМ-камеры

Вычисление параметров поперечного сечения в регулярной части (зона расположения ИО) ТЕМ-камеры осуществляется при заданном волновом сопротивлении Z_B . Сначала рассчитывается параметр b , который задаётся относительно высоты ИО и толщины t центрального проводника: $b = 2d + t = 6z_1 + t$. Пронормировав параметры a , w и t относительно b в формуле (1.6) и выразив их через нормированные коэффициенты k_a , k_w , k_t , при условии $k_a - k_w < 0,7$ для регулярной части получим [37]

$$Z_B = \frac{30\pi}{\left[\frac{k_w}{1-k_t} + \frac{2}{\pi(1-k_t)} \ln \left[1 + \coth \left(\frac{\pi}{2} \frac{k_a - k_w}{1-k_t} \right) \right] + \frac{k_t}{k_a - k_w} \right]}. \quad (2.1)$$

Очевидно, что увеличить размеры ИО можно за счет расширения центрального проводника, т. е. уменьшения зазора g между центральным проводником и корпусом камеры. При этом равномерность поперечной составляющей поля E в регулярной части

ТЕМ-камеры вблизи ИО гарантируется равенством значений волнового сопротивления всех элементарных поперечных сечений заданному Z_B . Тогда оптимальным соотношением является $a/w = 1$ при $g \rightarrow 0$. Однако при $g \rightarrow 0$ получить $Z_B = 50$ Ом невозможно, так как значение погонной емкости экранированной ЛП непосредственно зависит от зазора g [37].

Поскольку для ТЕМ-камеры всегда выполняется условие $a/w > 1$, положив $k_w = w/b \approx 1$ и используя выражение (2.1) при $Z_B = 50$ Ом, получим оптимальное соотношение между a и b с минимальным (0,001 для $t = 0,5$ мм и $z_1 = 80$ мм) и максимальным (0,1 для $t = 3$ мм и $z_1 = 5$ мм) значениями $k_t = t/b$. Так, построены зависимости $k_a(k_w)$ при заданных k_t и $Z_B = 50$ Ом (рисунок 2.3).

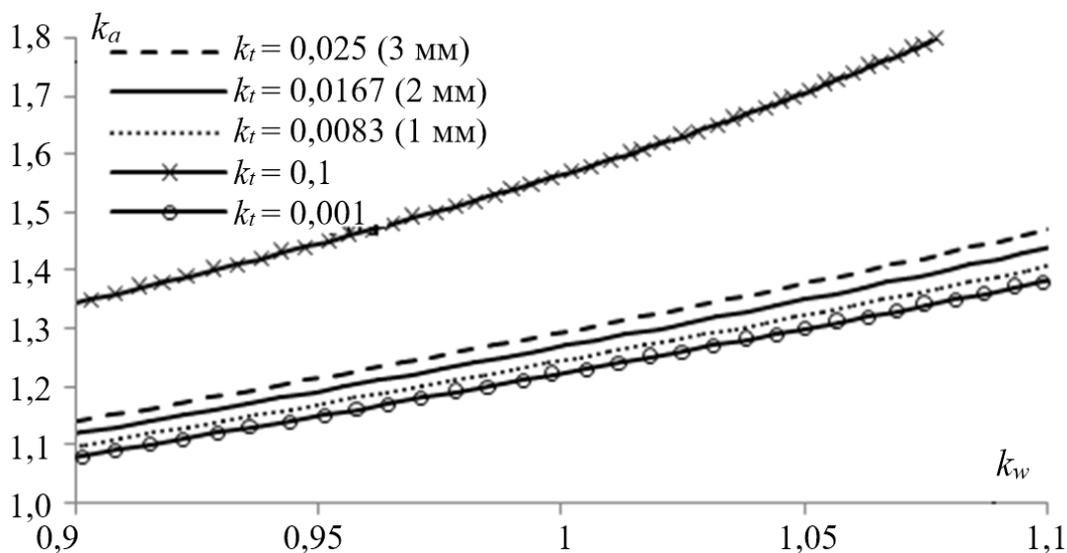


Рисунок 2.3 – Зависимости $k_a(k_w)$ для разных k_t

В диапазоне k_w от 0,9 до 1,1 оптимальное значение k_a (при $k_t < 0,025$) составляет от 1,08 до 1,4 (см. рисунок 2.3). При этом для камер с размером ИО от 5 до 80 мм согласно полученным зависимостям $k_a(k_w)$ при $Z_B = 50$ Ом и $k_w = 1$ оптимальное значение k_a находится в диапазоне от 1,22 до 1,57.

Из данных коэффициентов определен набор геометрических параметров для разных размеров z_1 . Для $z_1 = 20$ мм получены

$k_t = 0,0083, 0,0167$ и $0,025$ при $t = 1, 2, 3$ мм и коэффициенты $k_a = a/b = 1,24, 1,265$ и $1,29$ соответственно.

В продольном сечении камеры (рисунок 2.4,а) изначально длина регулярной части приравнена к ширине поперечного сечения ($l = a$), а длина пирамидальной части lp найдена из условия полного преломления ЭМВ на границе раздела металл-диэлектрик (рисунок 2.4,б)

$$lp = \frac{b}{2} \operatorname{tg}(\alpha), \quad (2.2)$$

где α – угол Брюстера ($\sim 57^\circ$) в радианах.

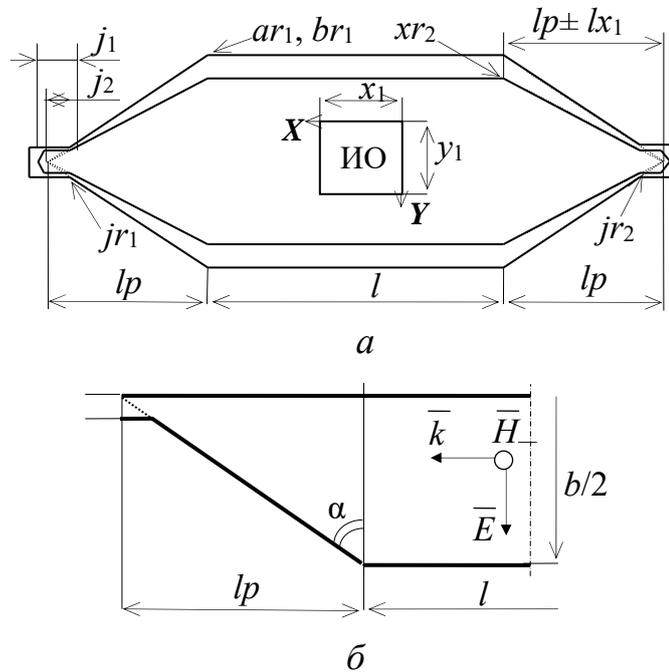


Рисунок 2.4 – Продольные сечения ТЕМ-камеры в плоскостях xy (а) и xz (б)

Обобщенный алгоритм для вычисления параметров ТЕМ-камеры с использованием выражения (2.1) приведён на рисунке 2.5,б. Он применим для расчета любых геометрических параметров экранированных ЛП, удовлетворяющих условию $k_a - k_w < 0,7$.

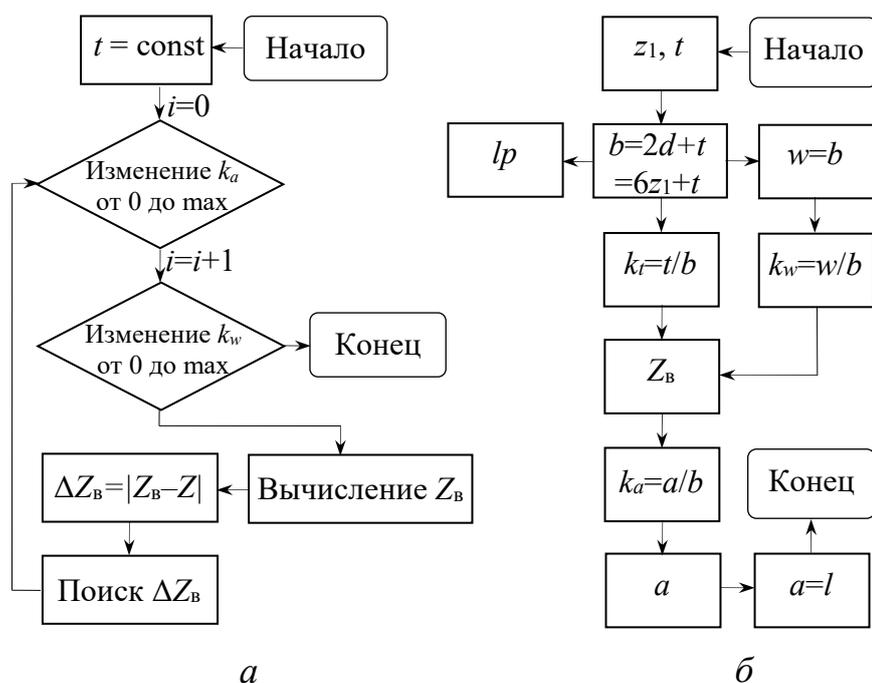


Рисунок 2.5 – Алгоритмы вычисления параметров экранированной ЛП и ТЕМ-камеры при заданном значении Z_B (а) и обобщенный алгоритм (б)

Квазистатическое моделирование

Для корректировки аналитически полученных значений применяется квазистатическое моделирование, поскольку оно менее затратно по вычислительным ресурсам, чем электродинамическое. Для моделей поперечных сечений ТЕМ-камеры (рисунок 2.6,а) при $t = 1$ мм и 2 мм исходными данными являлись вычисленные аналитически значения, удовлетворяющие требуемым размерам ИО. Квазистатический анализ подтвердил расчётные значения $Z_B = 50$ Ом элементарных поперечных сечений. Погрешность расчета не превысила 0,8 % для $z_1 = 80$ мм, но увеличилась до 5,34 % для $z_1 = 5$ мм при $t = 2$ мм. Это связано со значительным изменением высоты камеры (в 16 раз) при неизменном параметре t , что существенно сказывается на погонной емкости камеры. Учёт толщины проводника t позволяет снизить погрешность, однако ее уменьшение может привести к потере жесткости проводника и соответственно к его прогибу вдоль продольной оси камеры.

На основе одного поперечного сечения (рисунок 2.6,а) построена в программном модуле [123] модель набора поперечных

сечений ТЕМ-камеры (рисунок 2.6,б) по размерам, вычисленным с помощью разработанных алгоритмов [118–124]. Рассчитано волновое сопротивление Z_B вдоль координаты x в пределах ТЕМ-камеры (рисунок 2.7). Как видно, общее изменение сопротивления Z_B равно 5 Ом, что составляет 10 % от номинального значения 50 Ом и $KCBH \leq 1,25$.

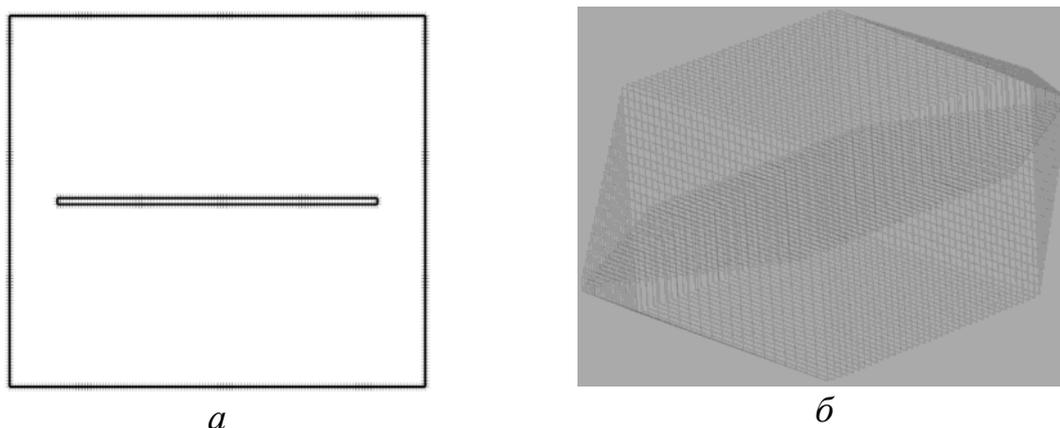


Рисунок 2.6 – Модель поперечного сечения в центре (а) и трёхмерная модель набора поперечных сечений (б) ТЕМ-камеры

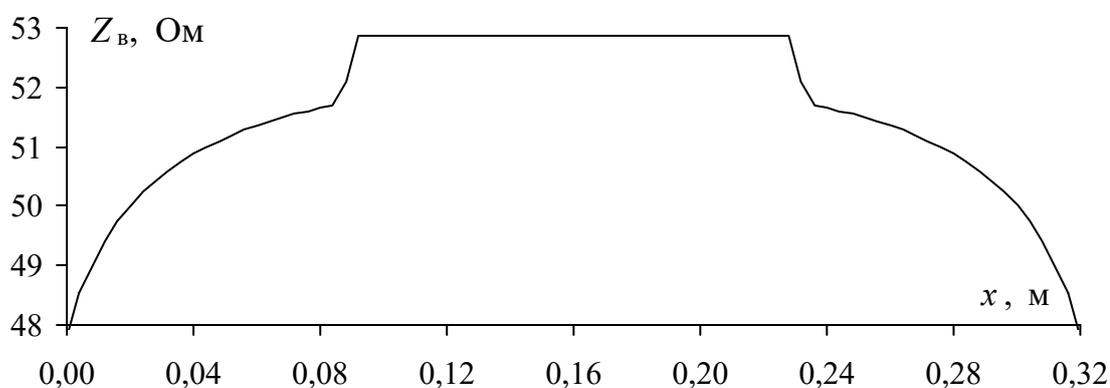


Рисунок 2.7 – Зависимость волнового сопротивления в поперечном сечении ТЕМ-камеры от продольной координаты

Значения параметров поперечного сечения, полученные для $z_1 = 20$ мм аналитически и с использованием квазистатического анализа, различаются на 0,05 % при $t = 2$ мм, на 0,08 % при $t = 1$ мм и 0,18 % при $t = 3$ мм. Максимальное различие при $z_1 = 5$ мм и $t = 1$ мм не превышает 4,37 %.

Электродинамическое моделирование и оптимизация геометрических параметров

По вычисленным значениям параметров поперечных сечений ТЕМ-камеры построены трехмерные модели ее регулярной и сужающихся частей для проведения электродинамического анализа. С учетом максимальной граничной частоты $f_{гр}$ ТЕМ-камеры и возможности размещения внутри нее ИО в виде ПП с ИС или малогабаритного РЭС выбран параметр $z_1 = 20$ мм. Толщина стенок камеры и центрального проводника взята 2 мм, что обеспечивает жесткость конструкции и возможность выполнить торцевое сверление в начале и конце центрального проводника камеры для подключения СВЧ-соединителя.

При помощи МКЭ проведен электродинамический анализ регулярной части ТЕМ-камеры на основе аналитически вычисленных значений ее параметров ($k_a = 1,24$ при $t = 1$ мм и $k_a = 1,265$ при $t = 2$ мм) при $z_1 = 20$ мм. Оптимизировался коэффициент k_w с исходным значением, равным единице, с целью минимизации максимального значения $|S_{11}|$. В диапазоне частот до 3 ГГц удалось получить $k_w = 0,9939$ при $k_a = 1,240$ и $k_t = 0,00833$ ($t = 1$ мм). При этом значение $|S_{11}|$ составило менее минус 80 дБ. Дополнительно при $k_a = 1,265$ и $k_t = 0,01677$ ($t = 2$ мм) получены значения $|S_{11}|$ ниже минус 75 дБ. Данные результаты подтверждают эффективность предложенного алгоритма (см. рисунок 2.5) для проведения качественного анализа, например коэффициент k_w вычислен с погрешностью не более 0,6 %.

С использованием метода доверительных интервалов выполнены электродинамический анализ и параметрическая оптимизация регулярной и сужающихся частей ТЕМ-камеры. Для минимизации максимального значения частотной зависимости $|S_{11}|$ при $Z_B = 50$ Ом применен разработанный алгоритм оптимизации [109]. В результате при заданных параметрах регулярной и сужающихся частей камеры определены ее оптимальные значения в требуемых пределах. После оптимизации сужающихся частей конструкция камеры приняла линейно сужающийся вид, при этом на корпусе

и т. д.). Радиусы скруглений, которые получаются в результате изгиба металла в каждой части ТЕМ-камеры, отмечены r (br_1 , jr_2 и т. д.). Алгоритм оптимизации (см. рисунок 2.8) циклический и переход может осуществляться по трём этапам: основному (—), дополнительному (— —) и вспомогательному (— · —). Алгоритм завершает работу при достижении заданной точности и выводит наилучшие значения параметров.

Вычисление оптимальных геометрических параметров по алгоритму, представленному на рисунке 2.8, выполняется следующим образом. На основе результатов оптимизации центральной и сужающейся частей камеры задаются значения b и b_1 больше толщины металла центральной пластины ($b \geq b_1 > t > 0$) и максимальной высоты ИО ($b/2 \geq 3z_1$ при $z_1 = 20$ мм). Находится оптимальное соотношение между шириной поперечного сечения a_1 и шириной центральной пластины w_1 в начале и конце ТЕМ-камеры при условии $w_1 < a_1$. Затем следует переход на этап, где определяется оптимальное соотношение между значениями a_1 и b_1 в зависимости от ширины центральной пластины w_1 на концах сужений. Далее вычисляется оптимальное соотношение между шириной центральной пластины w и шириной поперечного сечения a в регулярной части камеры. Определяется оптимальное соотношение между длиной сужения lp и значением a при условии $l = a$. Значение lp определяет угол между центральной пластиной и корпусом в области сужения, а также расположение начала сужения центральной пластины x_1 относительно ребра, образованного соединением пирамидальной и центральной частей камеры. На этом первый круговой ход основного этапа может быть закончен, но при вычислении оптимальных геометрических параметров он повторяется вышеописанным способом несколько раз, пока максимальные значения частотной зависимости S_{11} не минимизируются. После первого или нескольких круговых проходов алгоритма подключаются дополнительные (--) и вспомогательные (-·-) этапы с круговым ходом, приоритет отдается ходу, располагающемуся иерархически выше. По результатам выполнения дополнительного и вспомогательного этапов находятся

длины регулярной части на концах сужений j_1 и центральной пластины j_2 , а также длина центральной части камеры l и радиусы скруглений внутри корпуса. На последнем этапе корректируется высота центральной части b и толщина металла t_1 корпуса камеры.

Вычисления по вышеописанному алгоритму выполнялись на рабочей станции Intel I7 4930K (ОЗУ 64 Гбайт) с графическим процессором Tesla C2075, среднее время вычисления каждой частотной зависимости S_{11} (1001 точка) составило 122 мин. Выполнено порядка 5000 вычислений, на основе которых получены оптимальные параметры и соотношения для ТЕМ-камеры с $Z_B = 50$ Ом в рабочем диапазоне частот до 2 ГГц при высоте ИО 20 мм. В результате применения разработанной методики (см. рисунок 2.1) и алгоритма оптимизации (см. рисунок 2.8) определены оптимальные соотношения параметров для ряда ТЕМ-камер с $f_{гр}$ от 0,5 до 8 ГГц. При этом высота ИО z_1 варьируется от 80 до 5 мм [107–109].

Оптимизация полной трехмерной модели ТЕМ-камеры выполнена с использованием электродинамического анализа и показала $|S_{11}| < -26$ дБ в диапазоне частот до 2,08 ГГц с высотой ИО < 20 мм. Частотные зависимости $|S_{11}|$ построены с помощью МКРВО, ММПЛ и МКЭ с шагом расчетных сеток $\lambda/40$ (рисунок 2.9).

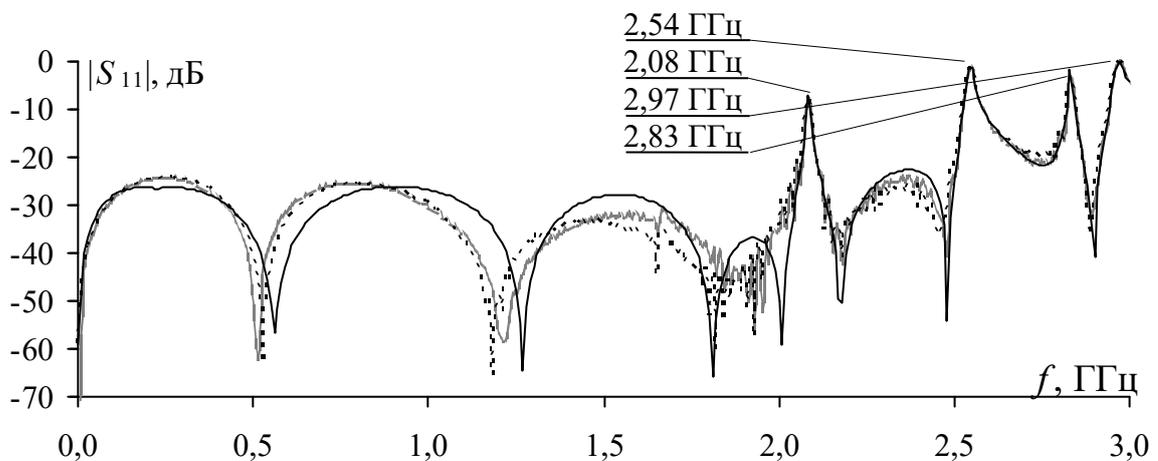


Рисунок 2.9 – Частотные зависимости $|S_{11}|$, вычисленные МКРВО (---), МКЭ (—) и ММПЛ (···)

Отношения параметров при $t = 2$ мм составили: $a/w = 1,300$, $k_a = 1,149$, $k_{a1} = a_1/b_1 = 1,231$ и $k_w = 0,883$. Анализ полученных значений коэффициента k_a для сужающихся ($k_{a1} = 1,231$) и регулярной ($k_a = 1,149$) частей камеры показал, что вдоль продольной составляющей от регулярной части камеры к КПП присутствует нелинейное расширение ($a \rightarrow a_1$) поперечного сечения на 11,5 % при линейном уменьшении ($b \rightarrow b_1$) высоты. Из рисунка 2.9 видно, что ТЕМ-камера имеет $f_{гр} = 2,08$ ГГц, на которой возбуждается мода TE_{11} , связанная с шириной a центральной части камеры. Резонансы, наблюдаемые выше $f_{гр} = 2,08$ ГГц, объясняются возбуждением высших типов волн, которые при необходимости могут быть ослаблены [41].

Чувствительность модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ к изменению параметров поперечного сечения ТЕМ-камеры

Установлено, что параметрами, оказывающими наибольшее влияние на частотные зависимости $|S_{11}|$, являются a_1 и lx_1 . Так, изменение на 1,44 мм значения a_1 в месте КПП приводит к существенному изменению $|S_{11}|$ на частотах выше 0,5 ГГц. Кроме того, lx_1 и xr_2 (см. рисунок 2.4,а) сильно влияют не только на форму частотной зависимости $|S_{11}|$, но и на возбуждение волны высшего типа TE_{11} на частоте 1,66 ГГц. Для анализа влияния этих параметров вычислены с помощью МКЭ частотные зависимости $|S_{11}|$ при изменении k_{a1} от 1,1 до 1,30 в случае $k_a = 1,15$ (рисунок 2.10). Значение k_a не изменялось, поскольку его увеличение приводит к снижению $f_{гр}$ ТЕМ-камеры, а уменьшение приводит к уменьшению максимальной высоты z_1 и ширины y_1 ИО.

Из рисунка 2.10 видно, что для значений k_{a1} от 1,1 до 1,28 максимум $|S_{11}|$ до $f_{гр}$ не превышает минус 23 дБ. Оптимальные параметры достигаются при значениях k_{a1} от 1,15 до 1,28, а именно $|S_{11}| < -26$ дБ в диапазоне частот 0,2–0,3 ГГц, а в диапазонах 0,8–1 ГГц и 1,5–1,7 ГГц минус 26 дБ и минус 28 дБ соответ-

ственно. При этом для 0,8–1 ГГц и 1,5–1,7 ГГц при $k_{a1} = 1,2$ коэффициент $|S_{11}|$ меньше на 2 дБ, чем при $k_{a1} = 1,15$, и не превышает минус 28 дБ и минус 30 дБ соответственно. В результате параметр k_{a1} может варьироваться от 1,2 до 1,28, что позволяет получить оптимальное согласование КПП в начале сужающихся частей ТЕМ-камеры.

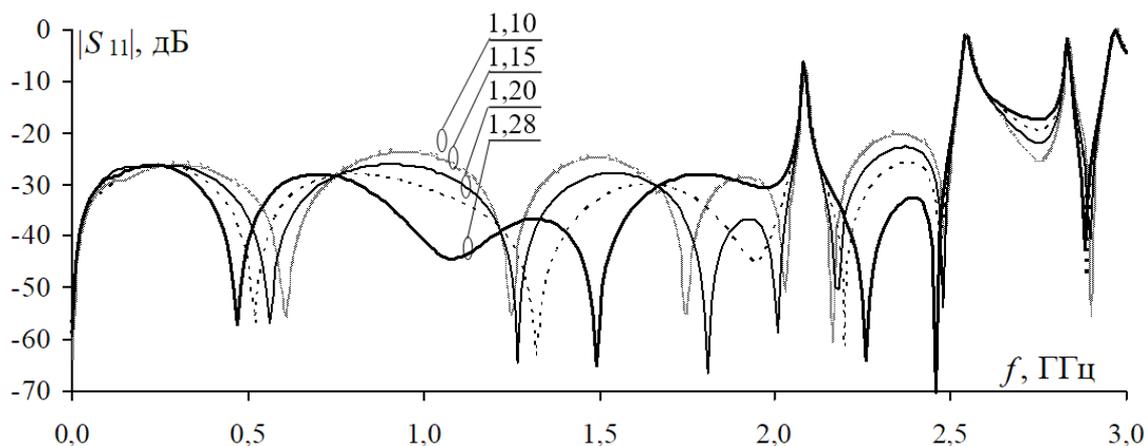


Рисунок 2.10 – Вычисленные МКЭ частотные зависимости $|S_{11}|$ геометрической модели ТЕМ-камеры при изменении параметра k_{a1}

Твердотельная модель

Создана твердотельная модель ТЕМ-камеры из листовой меди ($\rho = 8930 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 5,8 \cdot 10^7 \text{ См/м}$) [107]. Модель учитывает потенциальные изгибы, резку и пайку металла, а также возможные неточности, обусловленные сборкой реального устройства. В поперечном сечении ТЕМ-камера имеет вид прямоугольника с соотношением сторон $k_a = 1,149$ и $k_{a1} = 1,23$. Регулярная часть ТЕМ-камеры выполнена в форме параллелепипеда 1 (рисунок 2.11,а) с $a = l = 138,14 \text{ мм}$ и $b = 120,27 \text{ мм}$ (см. рисунки 2.2, 2.4), а две сужающиеся части – в виде пирамид, вершины которых имеют прямоугольные поперечные сечения с размерами $a_1 = 8,86 \text{ мм}$ и $b_1 = 7,2 \text{ мм}$.

Углы, образованные при соединении регулярной и сужающихся частей, имеют радиус скругления $ar_1 = 1 \text{ мм}$. Пирамидальные части сужаются под углами $32,7^\circ$ ($\alpha = 57,3^\circ$) и $36,7^\circ$ вдоль продольной оси камеры на расстоянии $lp = 89 \text{ мм}$. При этом угол

α сохранился $\sim 57^\circ$ и не зависит от соотношения a/b для различных высот b , так что выражение (2.2) можно использовать для расчета длины l_p пирамидальной части ТЕМ-камеры при разных высотах ИО.

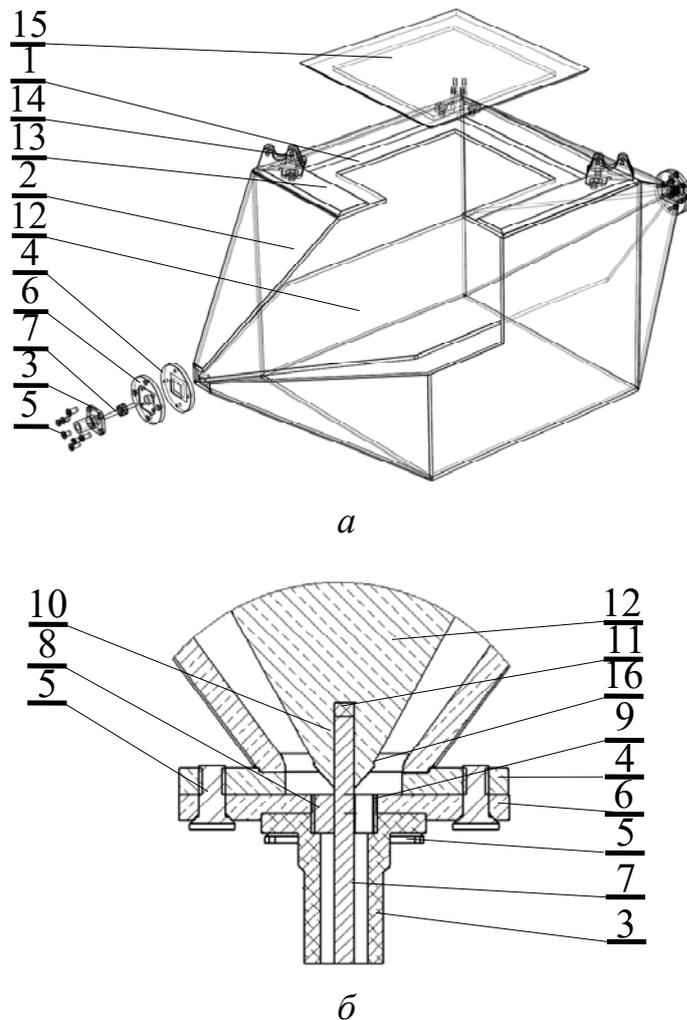


Рисунок 2.11 – Сборочный чертеж (а) и фрагмент КПП (б) разработанной ТЕМ-камеры

В месте расположения СВЧ-соединителя 3 выполнен изгиб металла радиусом $jr_1 = 3,4$ мм (см. рисунок 2.4, а) и имеется плоский цилиндрический элемент 4 (рисунок 2.11, б) с прямоугольным вырезом, соответствующим $a_1 = 8,86$ мм и $b_1 = 7,2$ мм, и кромками под углами $32,7^\circ$ и $36,7^\circ$. Вырез позволяет соблюдать требуемое значение k_{a1} на расстоянии $j_1 = 2$ мм. Корпус СВЧ-соединителя 3 крепится с помощью винтов 5 на плоский цилиндрический эле-

мент 6. По окружности в элементах 4 и 6 выполнены отверстия для их крепления между собой винтами 5 (см. рисунок 2.11,б).

Центральный проводник СВЧ-соединителя 7, диэлектрический цилиндр 8 и металлическое кольцо 9 образуют гермоввод, устанавливаемый в отверстие элемента 6 цилиндрической формы и корпуса соединителя 3. Центральный проводник 7 соединителя размещается в гильзе, имеющей винтовое соединение 10 и вставляющейся в отверстие 11 центрального проводника 12.

Одна из стенок центральной части ТЕМ-камеры, параллельной центральному проводнику 12, имеет вырез 80×80 мм, к поверхности которого припаивается прямоугольная рамка 13 с вырезом 100×100 мм, необходимая для крепления зажимов 14. Вырез в стенке камеры предназначен для размещения ИО с габаритами $x_1 \times y_1 \times z_1$ внутри испытательного пространства ТЕМ-камеры. Испытательный стол 15 выполнен из двух металлических пластин, спаянных вместе и имеющих размеры 80×80 мм и 100×100 мм. Вторая пластина имеет кромку, выполненную под углом 45° . Такая конструкция позволяет размещать внутри камеры малогабаритные РЭС и измерительную ПП в соответствии с требованиями стандартов [34, 35].

Минимальная неравномерность электрического поля в области ИО и высокие значения ЭЭ камеры обеспечиваются прижатием кромок испытательного стола 15 к вырезу прямоугольной рамки 13 и центральной части 1 корпуса.

Центральный проводник 12 с $t = 2$ мм (см. рисунок 2.2) на концах имеет сужения под угол 46° на расстоянии $j_2 = 2,19$ мм и под угол 61° на расстоянии $lp + lx_1 - j_2$ (см. рисунок 2.4,а), а между ними находится вырез в форме дуги 16 (см. рисунок 2.11,б). При этом расстояние между кромками корпуса и центрального проводника lx_1 соответствует 5,5 мм (см. рисунок 2.4,а). На торцах в начале и конце центрального проводника выполнены отверстия 11 для вставки гильзы 10 под механическое крепление центрального проводника 7 СВЧ-соединителя, что позволяет обеспечить лучшее согласование волнового сопротивления $Z_{\text{в}}$ камеры с генератором и нагрузкой.

Электродинамический анализ эффективности экранирования корпусом ТЕМ-камеры и напряженности E-поля

ЭЭ определяли при воздействии плоской ЭМВ на корпус ТЕМ-камеры со стороны испытательного стола: без него (сплошной полигон в регулярной части) и с ним при ширине щели 0,1 мм и 0,5 мм. Эти значения имитировали допуск на раскрой металла, а также плотное (0,1 мм) и неплотное (0,5 мм) прижатие граней испытательного стола к граням выреза в корпусе камеры. Вычисление ЭЭ проводилось для трех форм граней: изначальная конструкция с углом 90° (рисунок 2.12,а), доработанные – с углом 45° и со ступенчатым вырезом (рисунок 2.12,б, в). Вырезы позволяют исключить углубление испытательного стола внутрь камеры.

Для электродинамической модели соединения испытательного стола с корпусом камеры выполнялись по периметру при помощи восьми сопротивлений, расположенных на углах и кромках выреза корпуса и испытательного стола (рисунок 2.12,з). Поле вычислялось при помощи 65 точечных мониторов поля, расположенных по всему объему $20 \times 100 \times 100$ мм испытательного пространства: по 13 датчиков на высоте 1, 5, 10, 15, 20 мм (см. рисунок 2.12,з).

Выполнено моделирование ЭЭ для трех форм граней испытательного стола (см. рисунки 2.12,а–в). Получено более 200 частотных зависимостей ЭЭ в диапазоне до 3 ГГц. В центре камеры на расстоянии 1 мм от стола в диапазоне частот до 2 ГГц при фаске испытательного стола 45° ЭЭ составила не менее 42 дБ, тогда как при ступенчатой грани – 33 дБ, а с прямым углом – 31 дБ. На расстоянии 20 мм от испытательного стола при фаске 45° ЭЭ составила не менее 19 дБ, при ступенчатой грани – 11 дБ с прямым углом 12 дБ. Наихудшие значения наблюдались непосредственно возле щели (0,1 мм) между испытательным столом и корпусом камеры. На расстоянии 20 мм от щели при фаске испытательного стола 45° значения ЭЭ составляли не менее 5 дБ, при ступенчатой грани – минус 1 дБ, с прямым углом – 0 дБ.

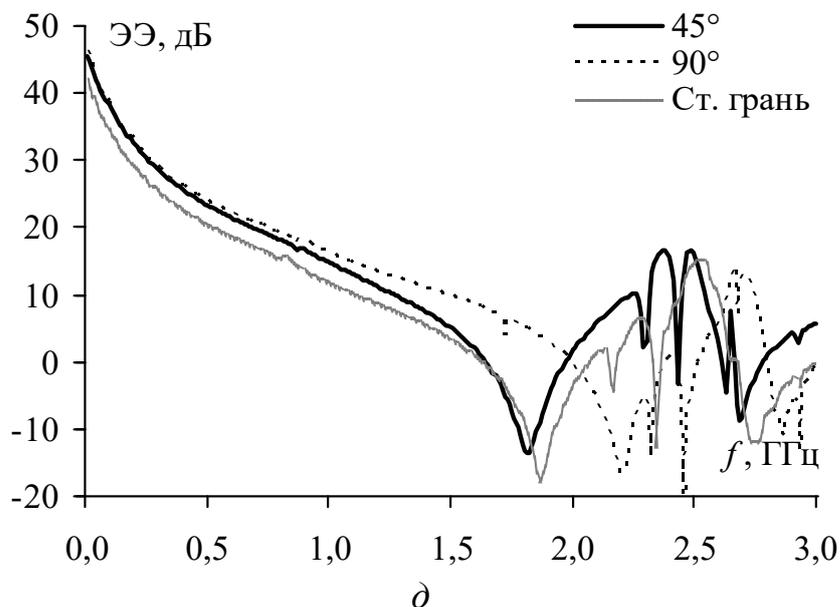
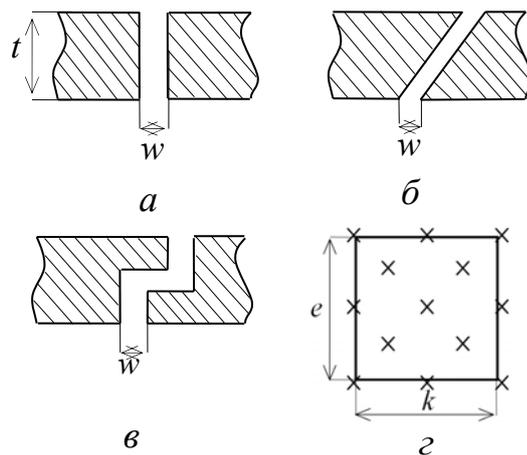
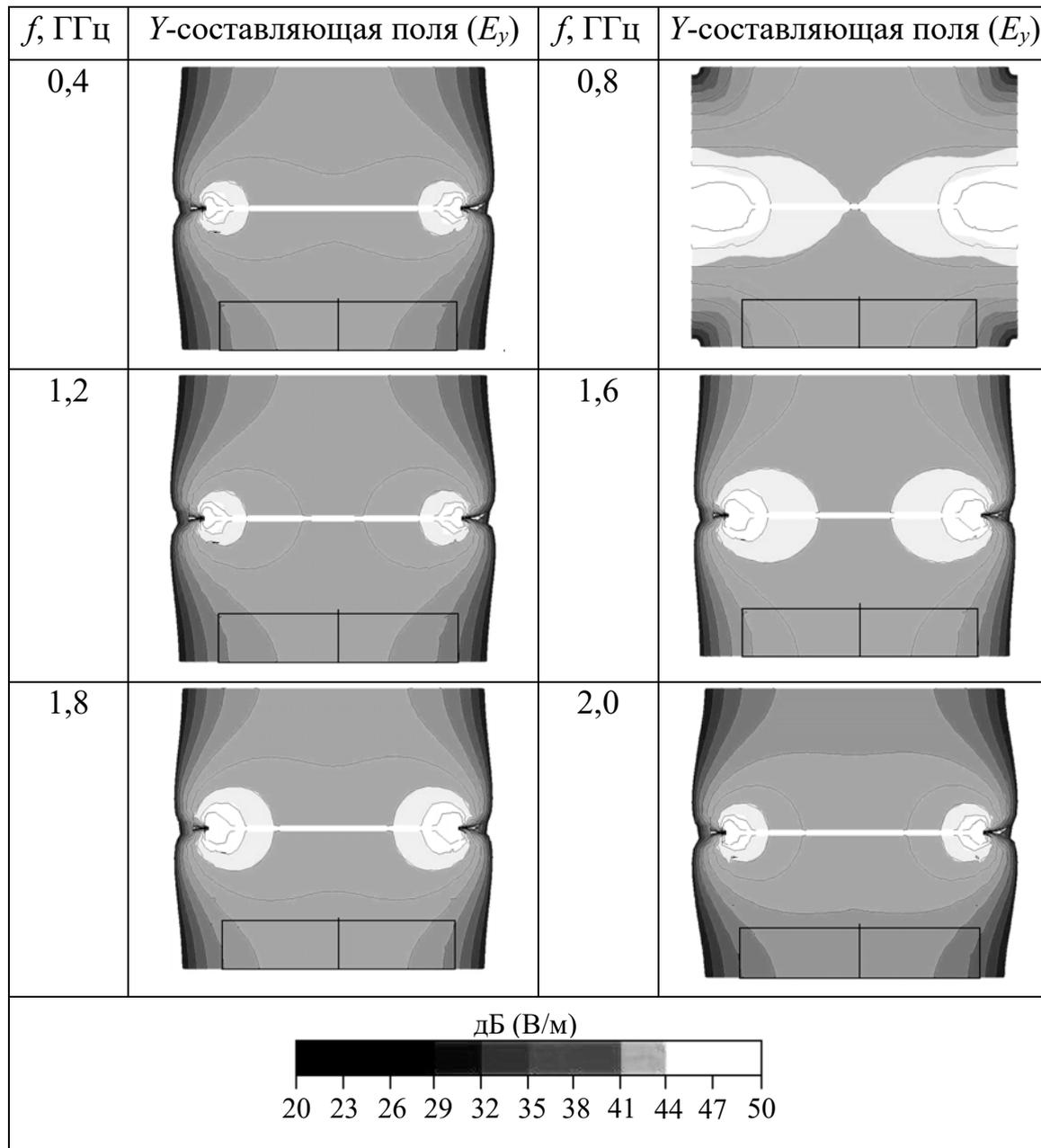


Рисунок 2.12 – Формы граней испытательного стола с нижней стенкой корпуса ТЕМ-камеры: под углами 90° (а), 45° (б), ступенчатая (в). Расположение датчиков E -поля на испытательном столе внутри камеры (г) и наихудшие частотные зависимости эффективности экранирования корпусом ТЕМ-камеры (д)

В результате получены наихудшие частотные зависимости ЭЭ для трех разных граней испытательного стола при расположении мониторов поля в 1 мм от щели между испытательным столом и корпусом ТЕМ-камеры (рисунок 2.12, д). Обобщающий анализ всех зависимостей показал, что для ЭЭ корпусом ТЕМ-камеры предпочтителен испытательный стол с фаской под углом 45° . Поэтому при сборке макета сделана фаска под угол 45° на гранях выреза корпуса камеры и испытательного стола. Вычислены уровни и представлены диаграммы напряженности электриче-

ского поля в центре ТЕМ-камеры при возбуждении ЭМП гауссовым импульсом с параметрами $U_m = 1$ В, $\tau_{И} = 0,81$ нс (таблица 2.1).

Таблица 2.1 – Диаграммы напряженности электрического поля внутри ТЕМ-камеры



Из таблицы 2.1 видно, что в диапазоне частот до 2 ГГц неравномерность напряженности электрического поля для Y -составляющей в центре зоны испытания 20×100 мм (выделена черной рамкой) не превышает ± 6 дБ.

Электродинамический анализ для расширения диапазона рабочих частот

Разработана модель ТЕМ-камеры, на внутренние боковые стенки которой нанесен тонкий слой μ -металла, чтобы расширить диапазон рабочих частот. В качестве исходной модели выбрана ранее разработанная электродинамическая модель камеры. Вычислены частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ (рисунок 2.13) в диапазоне до 3 ГГц для ТЕМ-камеры с μ -металлом толщиной $t = 0,1$ мм и шириной 120 мм, нанесенным по всей площади боковых стенок с двух сторон. В качестве μ -металла использовался Carpenter Нуми 800 (Ni 80%, Mo 5% Fe 14%) [127] с электрофизическими характеристиками $\mu_r = 400000$, $\sigma = 1,613$ МСм/м, $\rho = 8747$ кг/м³, тепловой проводимостью 34,59 Вт/К/м.

Как показывает рисунок 2.13, на частотах 2,1, 2,6 и 2,8 ГГц имеется серия резонансов в камере, не покрытой изнутри μ -металлом. Соответственно на частоте 2,1 ГГц и выше использование такой ТЕМ-камеры нецелесообразно. При покрытии внутренних боковых стенок μ -металлом амплитуда высших мод на частотах резонансов значительно ослабляется и значение $|S_{11}|$ в диапазоне частот до 3 ГГц не превышает минус 15 дБ. Кроме того, μ -металл оказывает значительное влияние на частотную зависимость $|S_{21}|$, которая с ростом частоты ослабляется и на частоте 2 ГГц составляет минус 6 дБ, а в диапазоне от 2 до 3 ГГц затухание возрастает и на частоте 2,9 ГГц достигает максимума минус 12 дБ. Выполнять измерения на частотах выше 3 ГГц нецелесообразно, поскольку моделирование показало, что $|S_{21}|$ достигает минус 26 дБ на частоте 3,8 ГГц и минус 48 дБ на частоте 4,15 ГГц. При использовании ТЕМ-камеры с μ -металлом на внутренних боковых стенках в диапазоне частот до 3 ГГц необходимо учитывать вносимое затухание. Анализ частотных зависимостей $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ для разных толщин μ -металла ($t = 0,1$ мм и 0,35 мм) показал, что толщина μ -металла не оказывает значительного влияния на частотные характеристики камеры. Таким образом, толщина μ -

металла может быть минимальна и его наносят на внутренние боковые стенки камеры при помощи термического осаждения.

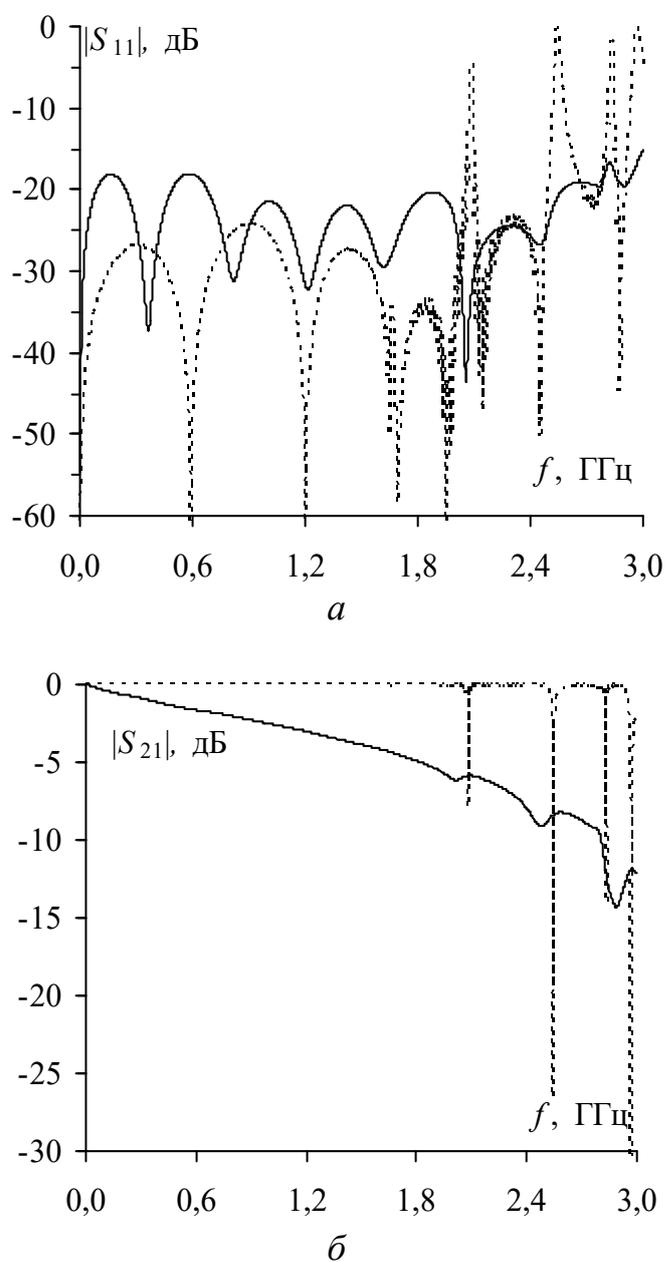
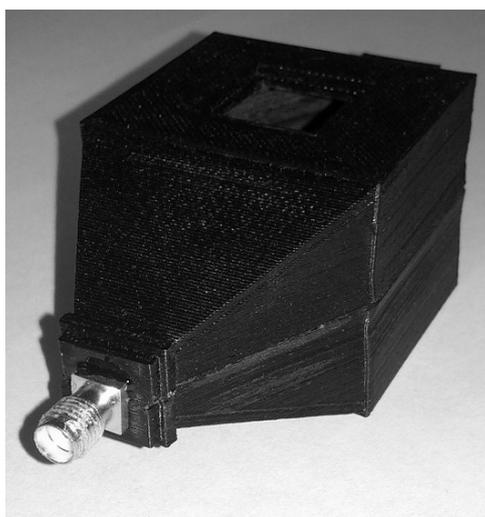


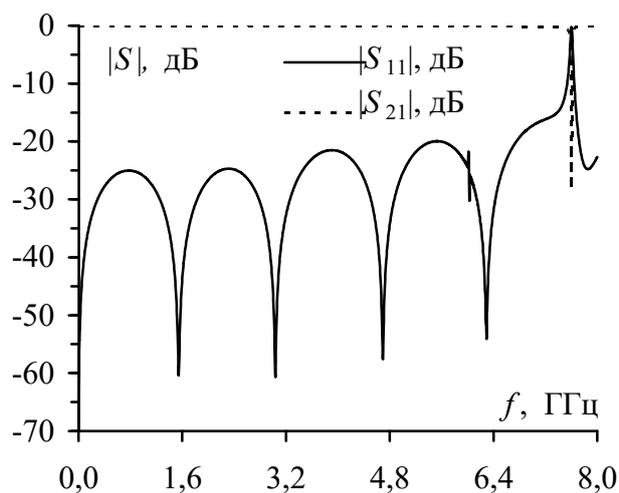
Рисунок 2.13 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (а) и $|S_{21}|$ (б) ТЕМ-камеры с покрытием боковых стенок μ -металлом толщиной $t=0,1$ мм (—) и без него (- - -)

Создана модель миниатюрной ТЕМ-камеры для измерения ЭЭ материалов (рисунок 2.14,а) в диапазоне частот до 7 ГГц с высотой ИО, не превышающей 5 мм. Камера предназначена для проведения измерений в более широком диапазоне частот при

воздействию высоких амплитуд напряженности электрического поля на объект. Соотношение сторон камеры $a/b = a'/b' = 1,425$ при уменьшении высоты ИО в 4 раза ($z_1 = 5$ мм). Выполнена оптимизация и вычислены геометрические параметры камеры: $w = 30,1$ мм; $a = 34,58$ мм; $b = 30,1$ мм; $L = 35,2$ мм; $L_1 = 22,2$ мм; $L_3 = 35,1$ мм; $X = 1,37$ мм.



a



б

Рисунок 2.14 – Миниатюрная ТЕМ-камера (*a*) и ее частотные зависимости $|S|$ -параметров (*б*)

Миниатюрная ТЕМ-камера изготовлена по технологии печати из пластика с последующим гальваническим и экранирующим покрытием корпуса и центрального проводника. Максимальное значение $|S_{11}|$ не превышает минус 20 дБ в диапазоне частот до 7 ГГц (рисунок 2.14,б).

2.3 Проектирование малогабаритной ТЕМ-камеры

По методике, изложенной в подразд. 2.1, выполнено проектирование малогабаритной ТЕМ-камеры для ИО с размерами $30 \times 30 \times 5$ мм [110–114, 128]. Проведена аналитическая оценка регулярной части ТЕМ-камеры и КПП. Вычислены значения геометрических параметров поперечного сечения регулярной части

ТЕМ-камеры (см. рисунок 2.2): $a = 100$ мм, $w = 43$ мм, $t = 1$ мм, $Z_B = 50$ Ом, $b_1 = b_2 = 15,5$ мм.

Расчитаны зависимости волнового сопротивления Z_B в поперечном сечении камеры от отношения w/a для разных соотношений a/b (рисунок 2.15).

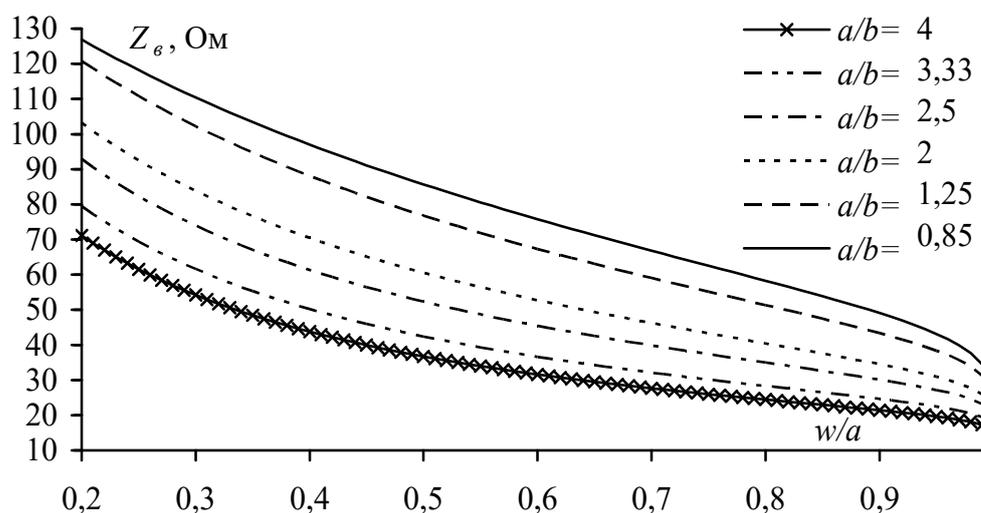


Рисунок 2.15 – Зависимости волнового сопротивления малогабаритной ТЕМ-камеры от соотношения w/a при разных a/b

С учетом условия $Z_B = 50$ Ом, размеров испытательной ПП и размещения ИС с максимальной длиной и шириной 30×30 мм во внутреннем пространстве камеры, исходя из соотношений $a/b = 3,33$, $w/a = 0,4$ (см. рисунок 2.15), найдены параметры $a = 100$ мм, $w = 40$ мм. Создана геометрическая модель регулярной части малогабаритной ТЕМ-камеры в программе TALGAT и вычислено значение Z_B , которое составило $50,26$ Ом (рисунок 2.16,а).

На основе полученных геометрических параметров при помощи аналитических выражений и квазистатического моделирования разработана электродинамическая модель регулярной части камеры длиной $L = 100$ мм. Построена частотная зависимость $|S_{11}|$ в диапазоне частот до 6 ГГц (рисунок 2.16,б), из которой видно, что значения $|S_{11}|$ не превышают минус 55 дБ, следовательно,

можно говорить о согласовании регулярной части камеры с трактом 50 Ом.

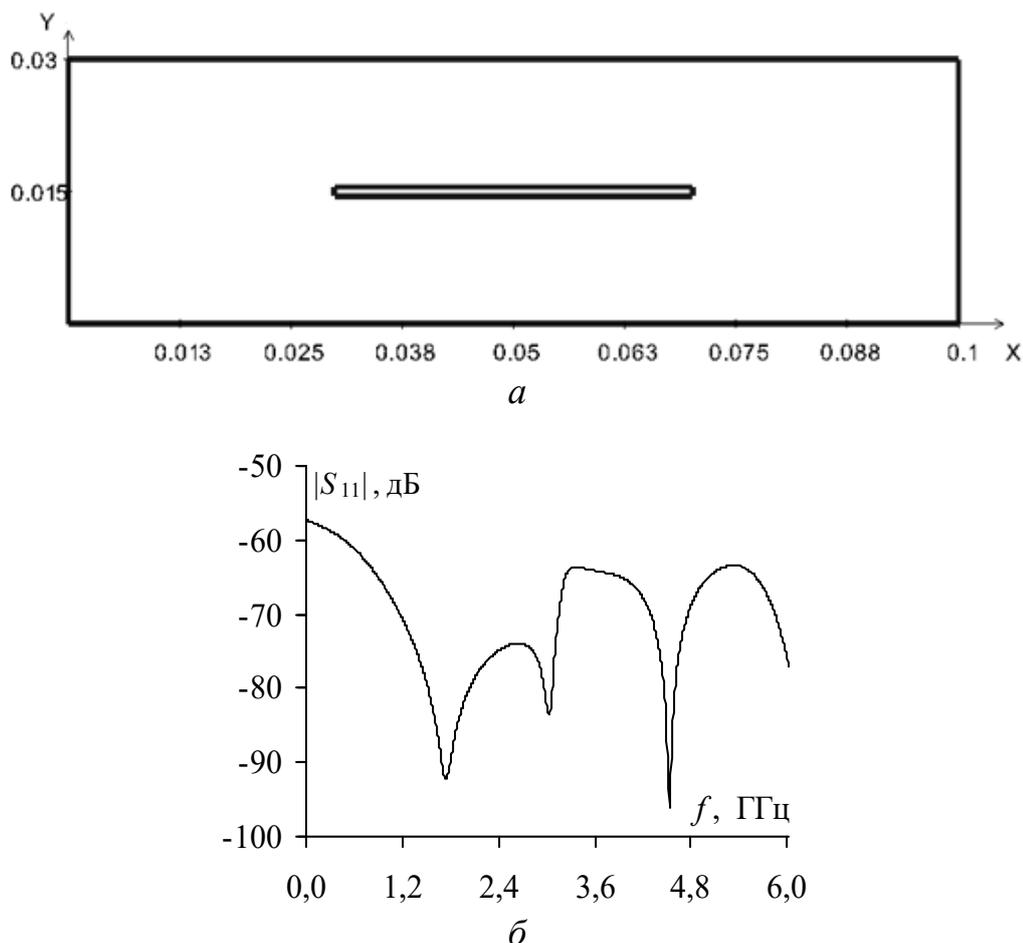


Рисунок 2.16 – Геометрическая модель регулярной части малогабаритной ТЕМ-камеры для квазистатического анализа в программе TALGAT (а) и вычисленная МКЭ частотная зависимость $|S_{11}|$ (б)

Для согласования волнового сопротивления регулярной части камеры с СВЧ-соединителем рассмотрены три формы КПП. Сначала был выполнен анализ пирамидальной формы перехода, используемого в конструкции ТЕМ-камеры, представленной в подразд. 2.2. Геометрические размеры всех элементов конструкции выбраны для ТЕМ-камеры с высотой ИО 5 мм (рисунок 2.17,а). Получена длина пирамидального перехода $L_3 = 50$ мм (рисунок 2.17,б) с высотой корпуса в месте расположения СВЧ-соединителей $b_1 = 4,5$ мм. Размер b_1 обусловлен возможностью подключения к камере СВЧ-соединителя типа SMA с диаметрами

диэлектрика и центрального проводника 4,1 мм и 1,28 мм соответственно (материал диэлектрика – тефлон, $\epsilon_r = 2,1$).

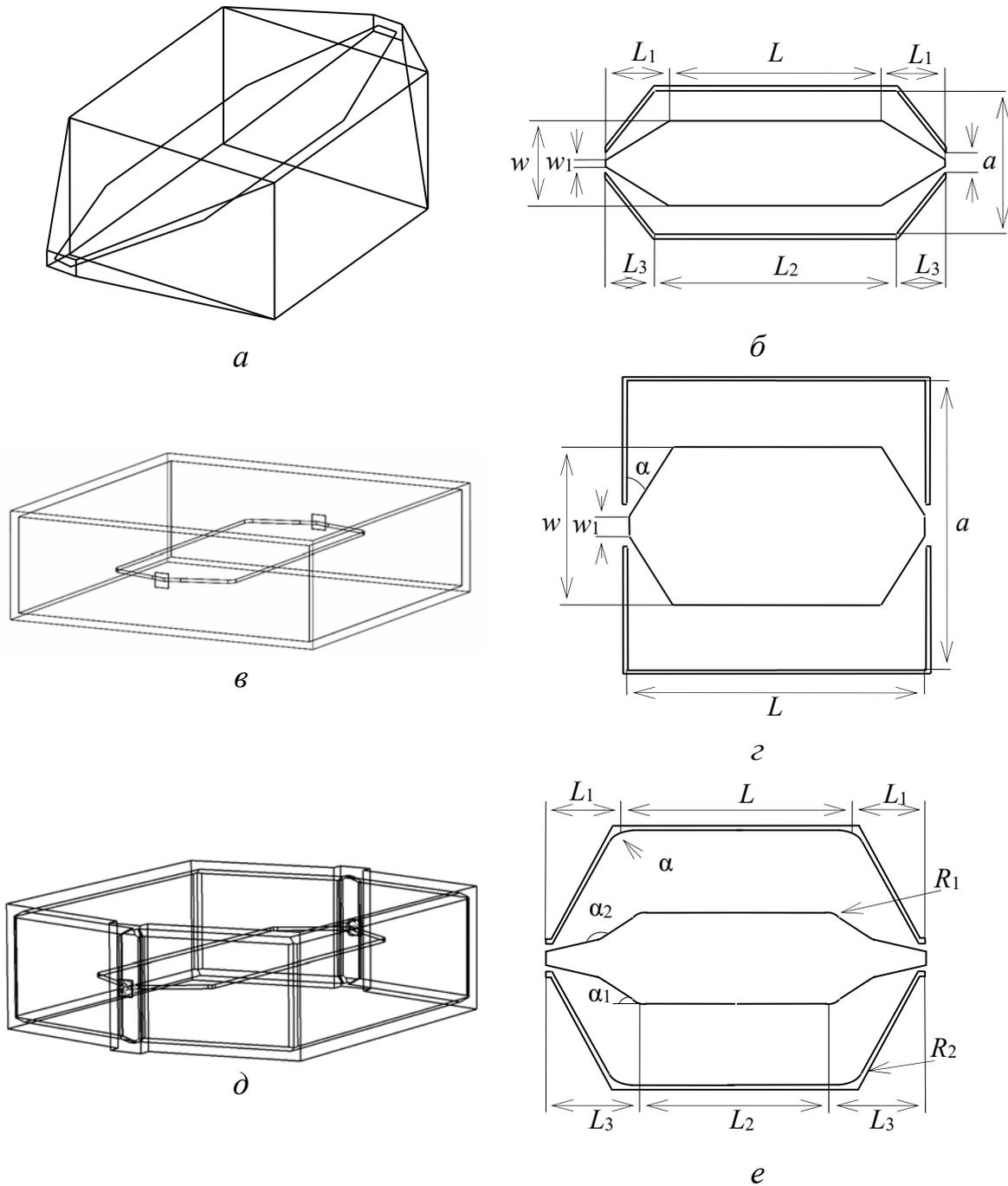


Рисунок 2.17 – Изометрические виды и продольные сечения сверху геометрических моделей ТЕМ-камер с пирамидальными переходами (а, б), прямоугольным корпусом (в, г) и сужающимися переходами при постоянной высоте корпуса (д, е)

Ширина корпуса a_1 и центрального проводника w_1 в месте подключения СВЧ-соединителя выбраны из условия $Z_B = 50$ Ом при соотношении $a/b = a_1/b_1$: $a_1 = 15$ мм, $w_1 = 3,9$ мм. Без дополнительных конструктивных изменений малогабаритная ТЕМ-камера с пирамидальными переходами обеспечивает $|S_{11}| < -20$ дБ в диапазоне частот до 4,75 ГГц. Верхняя граничная частота $f_{гр}$, после которой возбуждаются высшие типы волн, составила 5 ГГц. На частотной зависимости $|S_{11}|$ (рисунок 2.18) $f_{гр} = 5$ ГГц, что определяется длиной и шириной регулярной части корпуса камеры.

Наиболее простой из рассмотренных конструкций корпусов является конструкция с прямоугольной формой (рисунок 2.17,в). Внутренний объем корпуса с расположенным в нём центральным проводником составляет $100 \times 100 \times 30$ мм. Угол сужения ширины центрального проводника α вычислен методом доверительных интервалов. В качестве минимизируемой целевой функции оптимизации выбрано максимальное значение $|S_{11}|$ в диапазоне частот до 5 ГГц. По результатам оптимизации получен угол сужения $\alpha = 19,4^\circ$ (рисунок 2.17,з). При этом до частоты 4,8 ГГц $|S_{11}| < -28$ дБ (см. рисунок 2.18), что приемлемо для испытаний согласно стандартам на помехоэмиссию и помехоустойчивость.

Для расширения диапазона рабочих частот рассмотрена малогабаритная ТЕМ-камера с сужающимися согласующими переходами при их неизменной высоте (рисунок 2.17,д) [110]. Уменьшение ширины корпуса выполнено под линейным углом α с прямоугольным выступом на конце сужения, где сделано круглое отверстие для коаксиального соединителя, центральный проводник которого замыкается на центральный проводник камеры. Ширина центрального проводника уменьшалась под углом α_1 на расстоянии L_1 от продольной оси симметрии камеры и под углом α_2 до места подключения центрального проводника к СВЧ-соединителю, при этом углы скруглялись радиусами R_1 и R_2 соответственно (рисунок 2.17,е). В результате оптимизации получены следующие значения параметров модели: $\alpha = 11,9^\circ$,

$\alpha_1 = 31,8^\circ$, $\alpha_2 = 136,7^\circ$, $L_1 = 12,6$ мм, $R_1 = 2,45$ мм, $R_2 = 1$ мм,
 $|S_{11}| < -30$ дБ в диапазоне частот до 5,2 ГГц (см. рисунок 2.18).

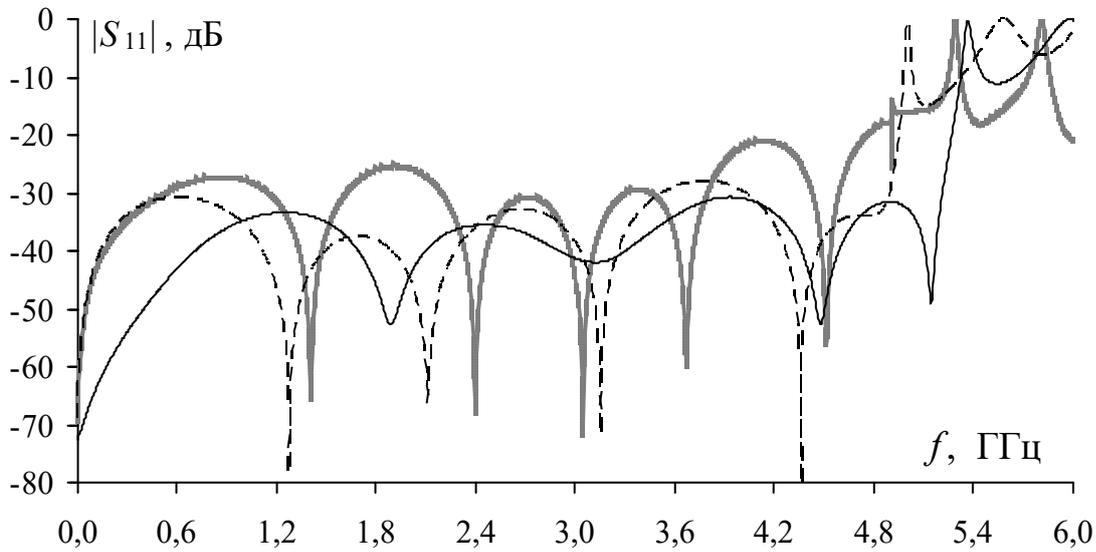


Рисунок 2.18 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ для ТЕМ-камер с пирамидальными переходами (\cdots), с прямоугольным корпусом ($---$) и с сужающимися переходами при неизменной высоте корпуса ($—$)

Для создания малогабаритной ТЕМ-камеры выбран последний вариант конструкции, поскольку он обеспечивает лучшее согласование с фидерным трактом 50 Ом. Для подтверждения схожести результатов выполнен электродинамический анализ с учащением сетки МКЭ и методом матриц ЛП (ММЛП). Настройка шага дискретизации проводилась заданием числа подынтервалов на длину волны вблизи модели и на границе анализируемого объема пространства. Полученные частотные зависимости $|S_{11}|$ приведены на рисунке 2.19.

Сравнение результатов вычислений выявило совпадение частотных зависимостей $|S_{11}|$, полученных с помощью МКЭ. Результаты, полученные ММЛП, показали худшую повторяемость, однако при учащении сетки удалось уменьшить амплитуду нефизических осцилляций на частотных зависимостях, вызванных численной дисперсией метода, и избавиться от ложного резонанса на частоте 0,6 ГГц. Между тем максимальные значения $|S_{11}|$, по-

лученные с помощью МКЭ и ММЛП, близки и не превышают минус 30 дБ на частотах до 5,3 ГГц.

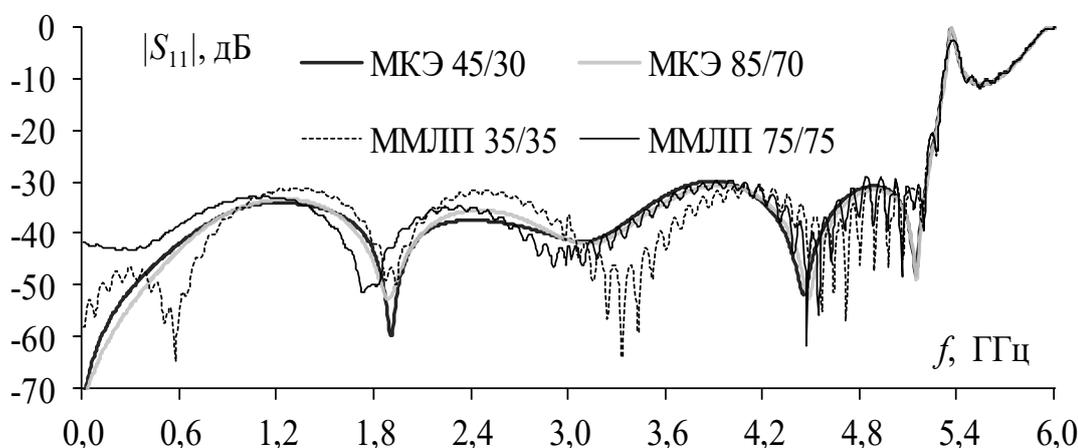


Рисунок 2.19 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ электродинамической модели малогабаритной ТЕМ-камеры, полученные ММЛП и МКЭ при учащении сетки

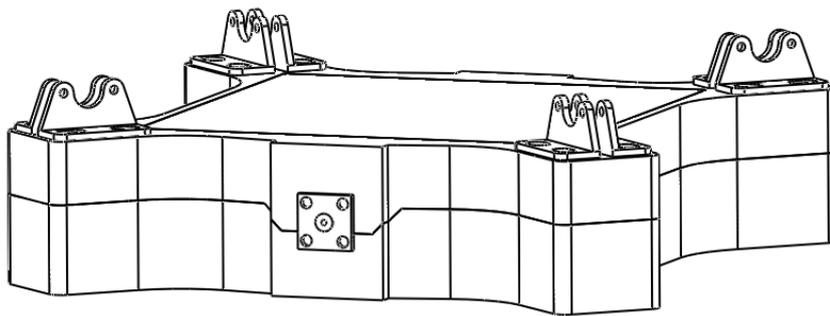
На основе электродинамической модели разработана твердотельная модель малогабаритной ТЕМ-камеры. Для доступа к внутреннему пространству камеры корпус разделен на две части, соединяемые посредством винтов (рисунок 2.20).

При разработке твердотельной модели учтены особенности сборки камеры: крепление СВЧ-соединителей к корпусу и их пайка с центральным проводником (рисунок 2.21,а), а также крепление для зажимов, обеспечивающих электрический контакт полигона земли на испытательной ПП с корпусом камеры (рисунок 2.21,б).

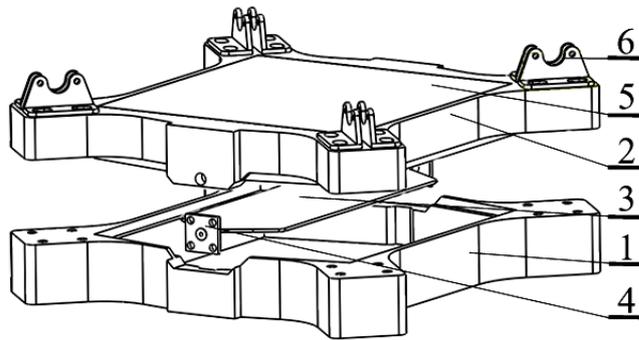
Для оценки влияния внесенных в конструкцию изменений на характеристики камеры выполнен электродинамический анализ твердотельной модели, который показал увеличение максимального значения $|S_{11}|$ до уровня минус 20 дБ в рабочем диапазоне частот (рисунок 2.22), в то время как для электродинамической модели $|S_{11}| < -28$ дБ.

Дополнительно выполнена оценка поперечной составляющей напряженности электрического поля E_y для электродинамической модели камеры. Мониторы поля располагались на границах

размещения ИО по сетке 30×30 мм с шагом 15 мм на высоте 2 мм от нижней стенки корпуса камеры (рисунок 2.23).

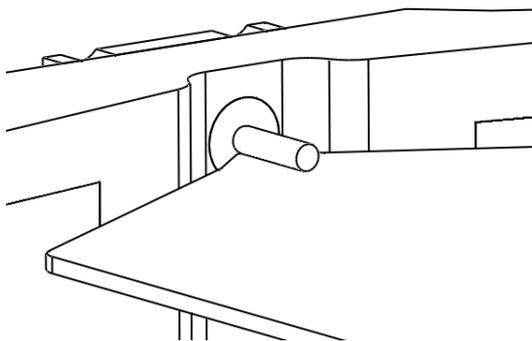


a

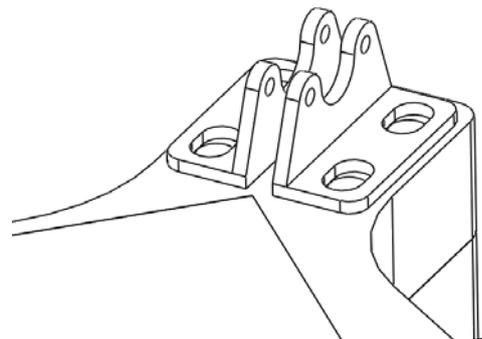


б

Рисунок 2.20 – Изометрический вид (*a*) и компоненты конструкции (*б*) твердотельной модели малогабаритной ТЕМ-камеры: 1 – основание корпуса; 2 – крышка; 3 – центральный проводник; 4 – СВЧ-соединители; 5 – испытательный стол; 6 – зажим



a



б

Рисунок 2.21 – Подключение центрального проводника к СВЧ-соединителю (*a*) и крепление зажима испытательной печатной платы (*б*)

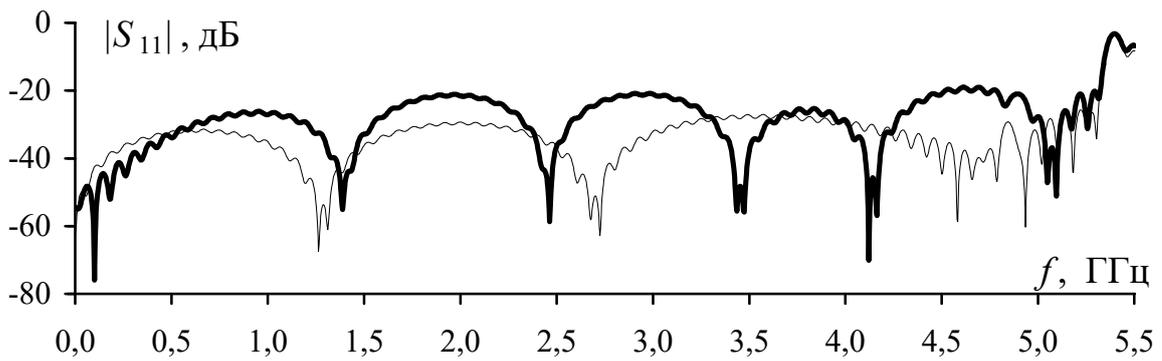


Рисунок 2.22 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ электродинамической (—) и твердотельной (---) моделей малогабаритной ТЕМ-камеры

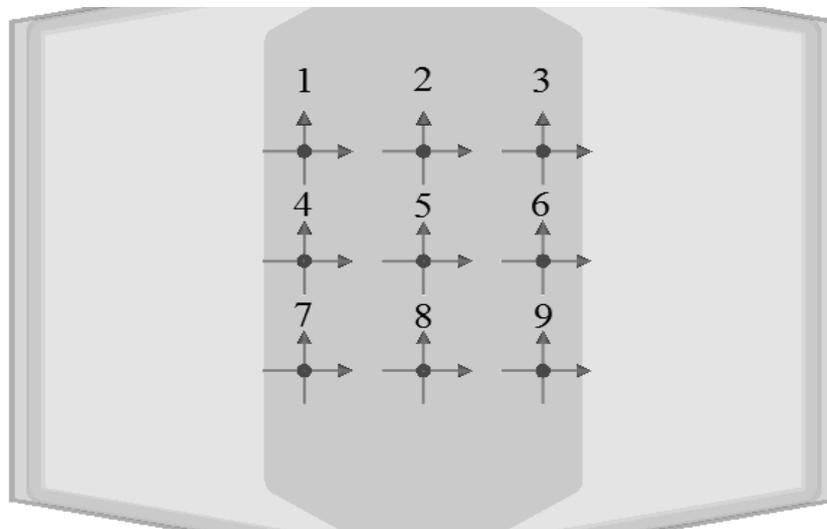
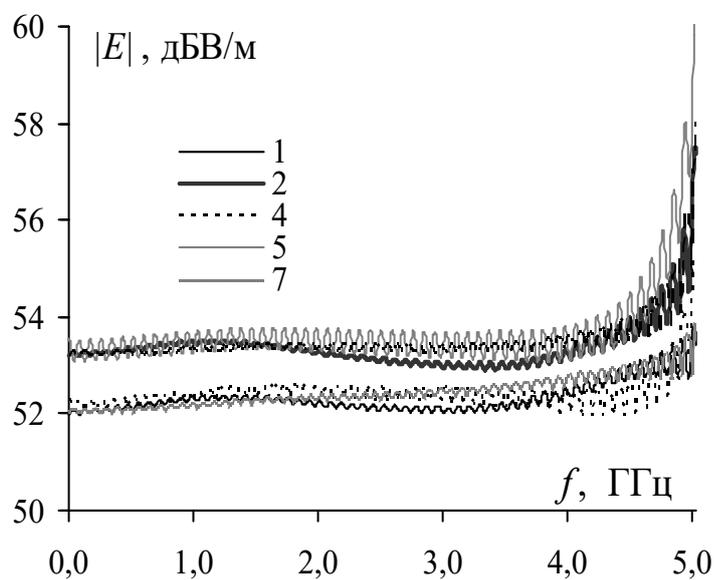


Рисунок 2.23 – Размещение точечных мониторов поля в месте расположения исследуемого объекта (вид сверху)

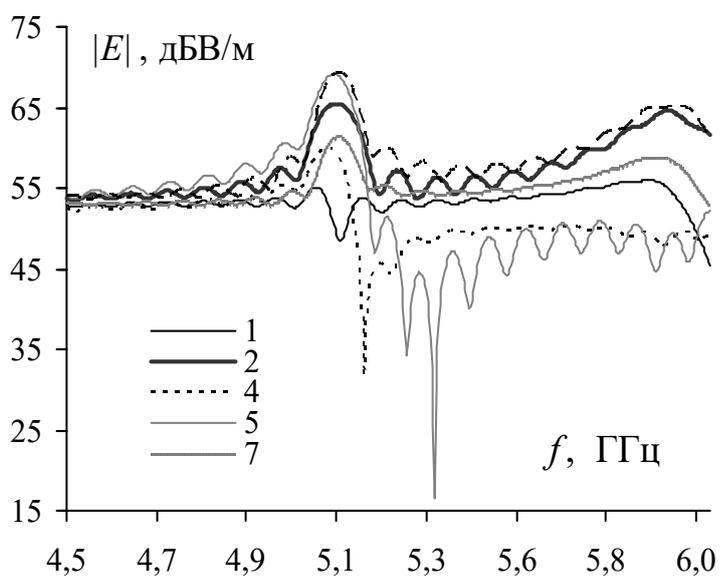
Анализ частотной зависимости модуля напряженности электрического поля показал, что неравномерность поля в области ИО составляет ± 3 дБ на частотах до 5 ГГц (рисунок 2.24,а). На более высоких частотах распространяются волны высших типов, что приводит к увеличению неравномерности распределения поля (рисунок 2.24,б). Из-за симметрии конструкции результаты вычислений в местах расположения мониторов 3, 6, 9 и 1, 4, 7 совпадают, поэтому повторяющиеся данные на рисунке 2.24 не приведены.

Таким образом, вычислены геометрические параметры регулярной части малогабаритной ТЕМ-камеры и рассмотрены варианты её согласования с $Z_B = 50$ Ом. Выполнены электродинамиче-

ский анализ и параметрическая оптимизация различных моделей согласующих переходов с целью минимизации максимального значения частотной зависимости $|S_{11}|$ в диапазоне рабочих частот.



a



б

Рисунок 2.24 – Частотные зависимости напряженности электрического поля в местах расположения мониторов в диапазонах частот до 5 ГГц (*a*) и 4,5–6 ГГц (*б*)

На основе полученных при моделировании частотных зависимостей $|S_{11}|$ для разработки выбран вариант, обеспечивающий наилучшее согласование ($|S_{11}| < -30$ дБ). Проверка сходимости

результатов вычисления частотных зависимостей $|S_{11}|$ выполнена при учащении сетки электродинамической модели с помощью двух численных методов. Вычислена напряженность E_y в месте расположения ИО, при этом максимальное отклонение напряженности поля составило не более 3 дБ в диапазоне частот до 5,2 ГГц. На основе электродинамической модели малогабаритной TEM-камеры разработана твердотельная модель с учетом допусков и технологических особенностей изготовления частей экспериментального макета. Электродинамический анализ твердотельной модели выявил увеличение рассогласования конструкции камеры ($|S_{11}| < -20$ дБ).

2.4 Проектирование GTEM-камеры

Выполнено проектирование GTEM-камеры по методике, изложенной в подразд. 2.1. Прежде всего проведена аналитическая оценка GTEM-камеры, используя выражение (1.9) при начальных значениях геометрических параметров $L = 1$ м, $b/d = 0,75$, $\alpha = \pi/9$, $\gamma = \pi/11$, $\vartheta = \pi/29$. Получены следующие значения при $Z_B = 56$ Ом: $a = 727,9$ мм, $b = 184,87$ мм, $d = 402,38$ мм, $w = 509,5$ мм. Создана модель поперечного сечения камеры на основе аналитически вычисленных значений его геометрических параметров. В результате квазистатического анализа поперечного сечения камеры вычислено волновое сопротивление $Z_B = 56,04$ Ом. Проведена оптимизация значений геометрических параметров для достижения $Z_B = 50$ Ом и получены $a = 793$ мм, $b = 197,3$ мм, $d = 394,7$ мм, $w = 597$ мм с результатом $Z_B = 50,04$ Ом.

Выполнен электродинамический анализ, используя МКИ. Толщины внешнего и внутреннего проводников выбраны равными 1 мм и 2 мм соответственно. Построена частотная зависимость волнового сопротивления Z_B (рисунок 2.25).

На рисунке 2.25 видно, что Z_B увеличивается с ростом частоты, что может быть связано с учётом потерь материала в модели.

Результаты электродинамического моделирования подтвердили точность ранее проведенных расчётов.

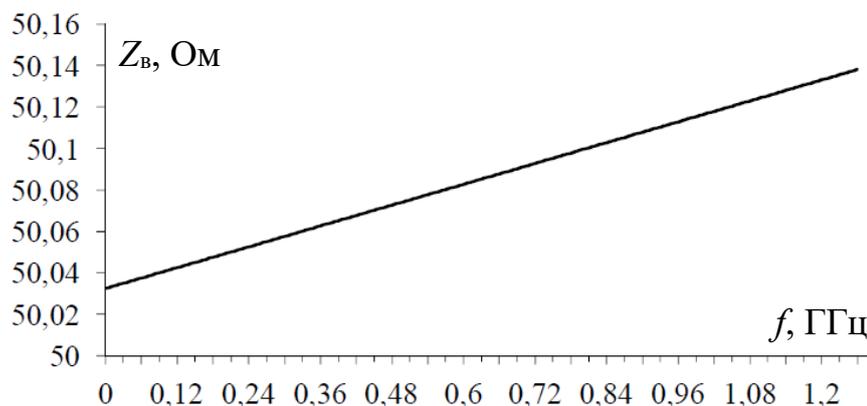


Рисунок 2.25 – Частотная зависимость волнового сопротивления разработанной ГТЕМ-камеры

Созданы отдельные элементы конструкции ГТЕМ-камеры и выполнено их электродинамическое моделирование. Отдельными элементами в ГТЕМ-камере выбраны КПП с СВЧ-соединителем, линейно расширяющаяся часть и РПМ, расположенный возле основания камеры. Для СВЧ-соединителя использовали модель соединителя в ТЕМ-камере. По геометрическим параметрам РПМ Accuser [129] создана электродинамическая модель и вычислена её частотная зависимость $|S_{11}|$ (рисунок 2.26).

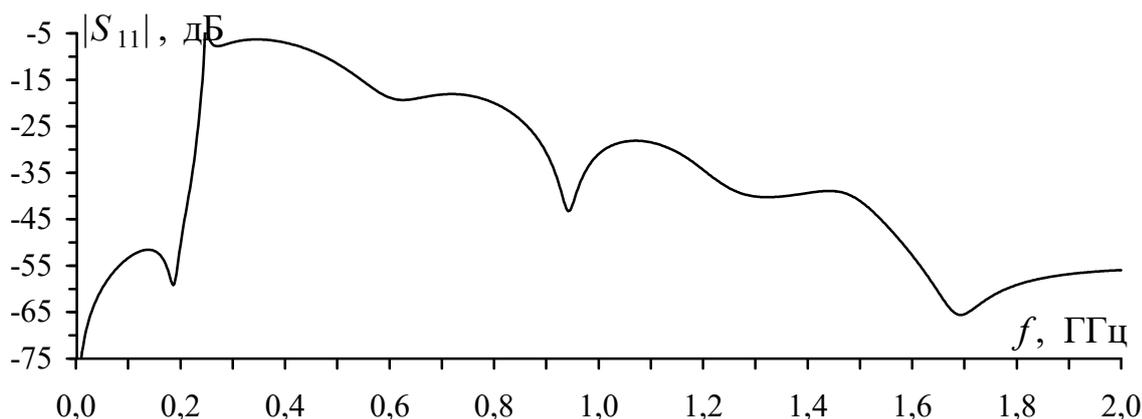


Рисунок 2.26 – Частотная зависимость $|S_{11}|$ для модели радиопоглощающего материала Accuser

Анализ в диапазоне частот 0,8–2 ГГц показал $|S_{11}| < -20$ дБ, что соответствует данным на РПМ Accuser. Резонанс на частотах

вблизи 300 МГц с уровнем минус 5 дБ вызван спецификой моделирования РПМ в волноводе 600×600 мм, модель РПМ может успешно использоваться в моделях ГТЕМ-камер в диапазоне частот до 2 ГГц.

Осуществлены аналитическая оценка и квазистатический анализ модели ГТЕМ-камеры открытого типа с максимальным размером ИО 250 мм. В модели учитывали: металл – медь ($\rho = 8930 \text{ кг/м}^3$, $\sigma = 5,96 \cdot 10^7 \text{ См/м}$); скругления краёв, возникающие в результате изгиба или обработки металла, а также пайки стыков корпуса и центрального проводника; параметры соединителя типа SMA и РПМ Accuser. Воздействием служил гауссов импульс, подводимый от волноводного порта с волновым сопротивлением 50 Ом.

Выполнена параметрическая оптимизация ГТЕМ-камеры по ширине w и углу расположения центрального проводника (рисунок 2.27).

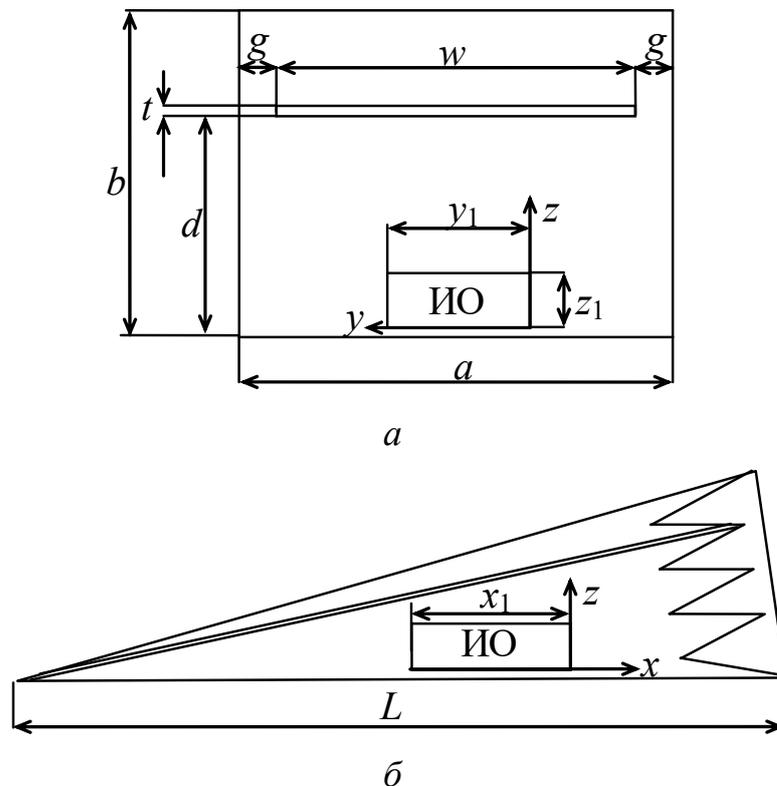


Рисунок 2.27 – Поперечное (а) и продольное (б) сечения ГТЕМ-камеры

Оптимизация проводилась при открытых граничных условиях и без РПМ для сокращения временных затрат. Целью оптимизации являлась минимизация максимального значения частотной зависимости $|S_{11}|$. В результате получены оптимальные значения размеров поперечного сечения, изгибов, кромок, углов и длин пирамидальной и прямоугольной частей ГТЕМ-камеры: $a = 600$ мм; $b = 470$ мм; $d = 347,9$ мм; $w = 403,5$ мм; $L = 1178,55$ мм; $t = 2$ мм; $a_1 = 7$ мм; $b_1 = 8,23$ мм; $w_1 = 4$ мм.

Построена частотная зависимость $|S_{11}|$ в диапазоне до 2 ГГц при помощи ММЛП (рисунок 2.28).

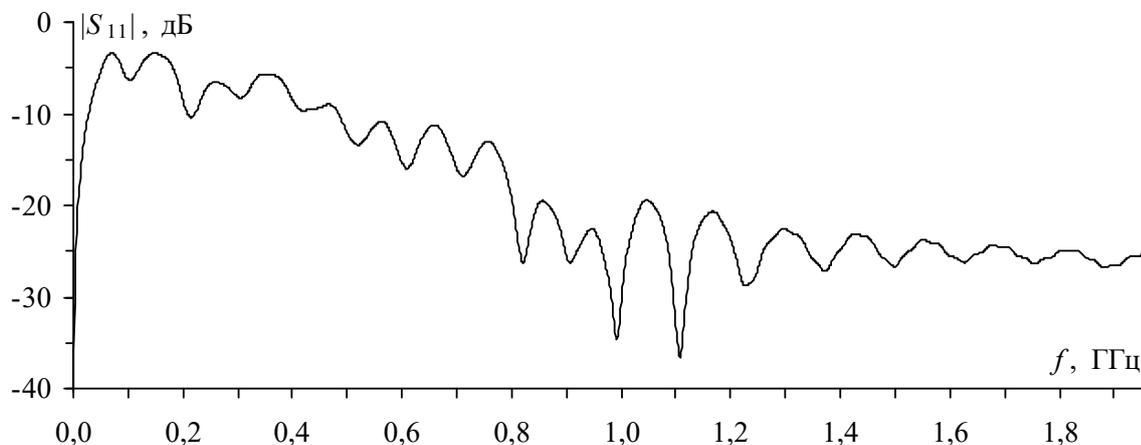


Рисунок 2.28 – Частотная зависимость $|S_{11}|$ ГТЕМ-камеры

На рисунке 2.28 видно, что в области низких частот до 0,8 ГГц имеются значительные отражения с максимальным значением, не превышающим минус 3 дБ (КСВН выше 5), связанные с тем, что на низких частотах конец центрального проводника плохо согласован (не имеет сужающихся частей) с нагрузкой 50 Ом. На частотах выше 0,8 ГГц $|S_{11}| < -17$ дБ. По результатам оптимизации разработана твердотельная модель ГТЕМ-камеры (рисунок 2.29).

Дополнительно была вычислена напряженность поля E_y внутри ГТЕМ-камеры (рисунок 2.30). Для этого на расстоянии 5 мм над нижней стенкой разместили 9 мониторов поля на расстоянии 50 мм друг от друга, которые охватывали площадь под ИО 100×100 мм.



Рисунок 2.29 – Твёрдотельная модель открытой ГТЕМ- камеры на передвижной подставке для измерительных приборов

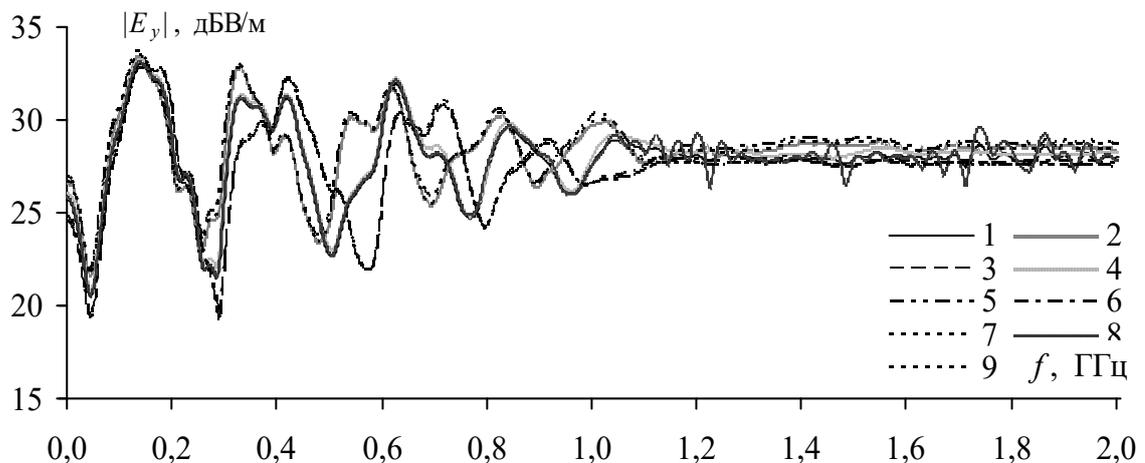


Рисунок 2.30 – Частотные зависимости напряженности электрического поля в зоне исследуемого объекта ГТЕМ-камеры (1–9 – точки расположения мониторов)

2.5 Проектирование полосковой линии

По методике, изложенной в подразд. 2.1, спроектирована ПЛ на основе несимметричной ЛП [110]. Согласно выражениям (1.1), (1.2) выполнена аналитическая оценка зависимости Z_B от $w_{ПЛ}/h_{ПЛ}$ [15, 20, 21] (рисунок 2.31). Видно, что параметр $w_{ПЛ}/h_{ПЛ}$

ПЛ находится в диапазоне от 4,875 до 4,95 при $Z_B = 50$ Ом. Расчеты проводились при $h_{\text{ПЛ}} = 60$ мм и $t_{\text{ПЛ}} = 1$ мм [20]. Значение $h_{\text{ПЛ}}$ выбрано из условия $h_{\text{ПЛ}} \geq 3x$, где x – высота ИО [5].

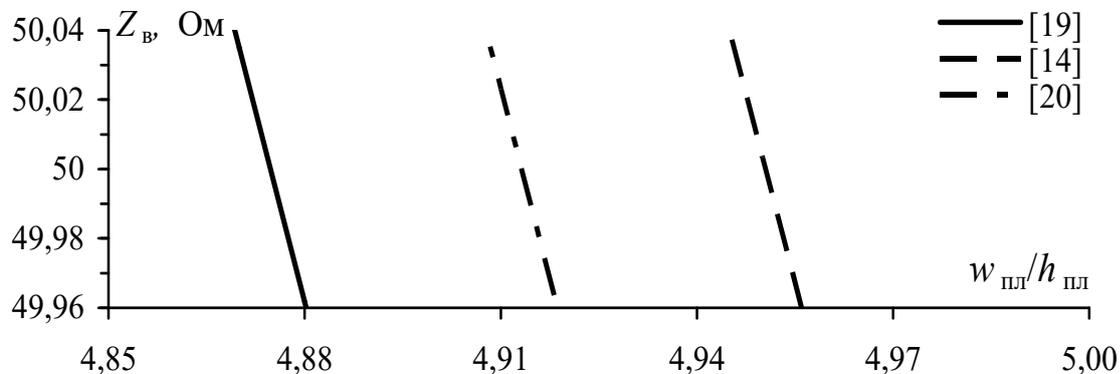


Рисунок 2.31 – Зависимости волнового сопротивления Z_B от соотношения $w_{\text{ПЛ}}/h_{\text{ПЛ}}$

Для квазистатического анализа ПЛ использовали программу TALGAT [119]. Исходными данными являлись аналитически полученные значения: $w_{\text{ПЛ}}/h_{\text{ПЛ}} = 4,95$ ($w_{\text{ПЛ}} = 297$ мм) по формуле (1.1) и $w_{\text{ПЛ}}/h_{\text{ПЛ}} = 4,875$ ($w_{\text{ПЛ}} = 292,5$ мм) по формуле (1.2). Получили $Z_B = 49,49$ Ом, т. е. $-1,03\%$, и $Z_B = 50,03$ Ом, т. е. $+0,05\%$ по отношению к 50 Ом. Таким образом, волновое сопротивление Z_B ПЛ, вычисленное по формуле (1.2) [20], имеет меньшую погрешность ($0,05\%$) по отношению к значению $1,03\%$, вычисленному по выражению (1.1) [15], что вызвано неучетом толщины ($t_{\text{ПЛ}} = 1$ мм) металла в последнем выражении. Корректировка $w_{\text{ПЛ}}$ в программе TALGAT для $Z_B = 50$ Ом дала $w_{\text{ПЛ}} = 292,72$ мм. Однако параметр $w_{\text{ПЛ}}/h_{\text{ПЛ}}$ получен при опорном проводнике в виде плоскости, что для реальной конструкции ПЛ некорректно. Поэтому заменили плоскость опорным проводником с конечной шириной $w_{3,\text{ПЛ}}$. Получена зависимость ширины опорного проводника $w_{3,\text{ПЛ}}$ от ширины активного проводника $w_{\text{ПЛ}}$ (рисунок 2.32) [130].

На рисунке 2.32 видно, что при уменьшении параметра $w_{\text{ПЛ}}$ на 2 мм (до 290,72 мм) $w_{3,\text{ПЛ}}$ возрастает до 770,72 мм, тогда как при увеличении $w_{\text{ПЛ}}$ на 2 мм (до 294,72 мм) $w_{3,\text{ПЛ}}$ уменьшается до

626,72 мм. То есть при незначительном изменении $w_{\text{ПЛ}}$ существенно изменяется $w_{\text{з.ПЛ}}$.

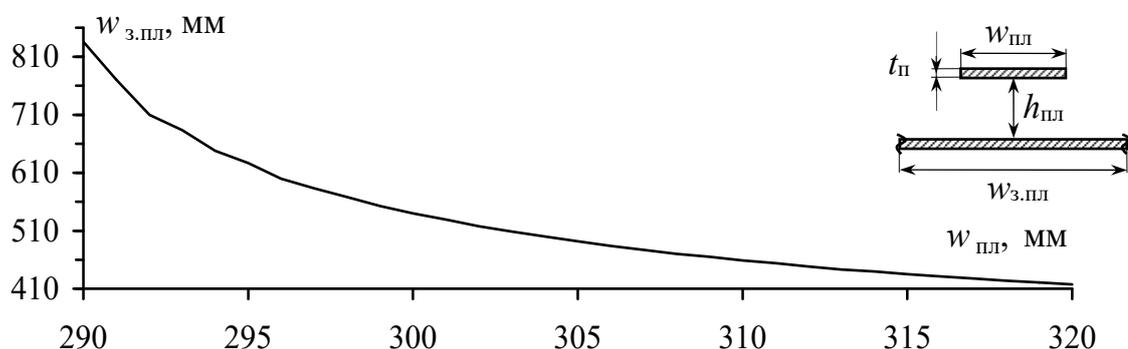


Рисунок 2.32 – Зависимость ширины опорного проводника $w_{\text{з.ПЛ}}$ от ширины активного проводника $w_{\text{ПЛ}}$ при $t_{\text{ПЛ}}=1$ мм, $h_{\text{ПЛ}}=60$ мм, $Z_{\text{В}}=50$ Ом

Выполнен анализ геометрических параметров ПЛ при высоте ИО 50 мм [15]. Получены погрешности для $Z_{\text{В}} +0,25$ % по выражению (1.1) и $-0,55$ % по выражению (1.2). При квазистатическом анализе погрешность составила $-0,52$ % для бесконечного и $+0,06$ % для конечного опорного проводника. Сужение опорного проводника на 10 мм (до 1490 мм) приводит к снижению погрешности до $+0,001$ %.

По методике проектирования, представленной в подразд. 2.1, выполнены электродинамический анализ и оптимизация параметров регулярной части и КПП ПЛ. Исходя из рисунка 2.32, для электродинамического анализа выбрано 8 вариантов геометрических параметров поперечного сечения ПЛ (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Значения параметров поперечного сечения полосковой линии для $Z_{\text{В}} = 50$ Ом при $h_{\text{ПЛ}} = 60$ мм, $t_{\text{ПЛ}} = 1$ мм

Вариант	1	2	3	4	5	6	7	8
$w_{\text{ПЛ}N}$, мм	288,72	289,72	290,72	292,72	294,72	302,72	312,72	322,8
$w_{\text{з.ПЛ}N}$, мм	938,72	835,72	770,72	683,72	626,72	508,72	443,5	408,6

Сначала была построена модель КПП совместно с СВЧ-соединителем (в качестве диэлектрика выбран тефлон, $\epsilon_r = 2,1$). Помощью МКЭ рассчитано максимальное значение $|S_{11}|$ соединителя, которое не превышало минус 40 дБ в диапазоне частот до 3 ГГц. Затем были построены модели ПЛ (рисунок 2.33) на основе длины регулярной части $l_{\text{ПЛ}} = 1500$ мм, длины нерегулярной части активного проводника $l_{\text{и}} = 290$ мм и длины опорного проводника $l_{\text{з.ПЛ}} = 2500$ мм при размерах соединительных участков ПЛ $w_c = 15$ мм, $l_c = 9$ мм, $h_c = 4$ мм и поперечных сечений из таблицы 2.2. В качестве материала выбран алюминий ($\sigma = 37 \cdot 10^6$ См/м, $\mu_r = 1,000022$).

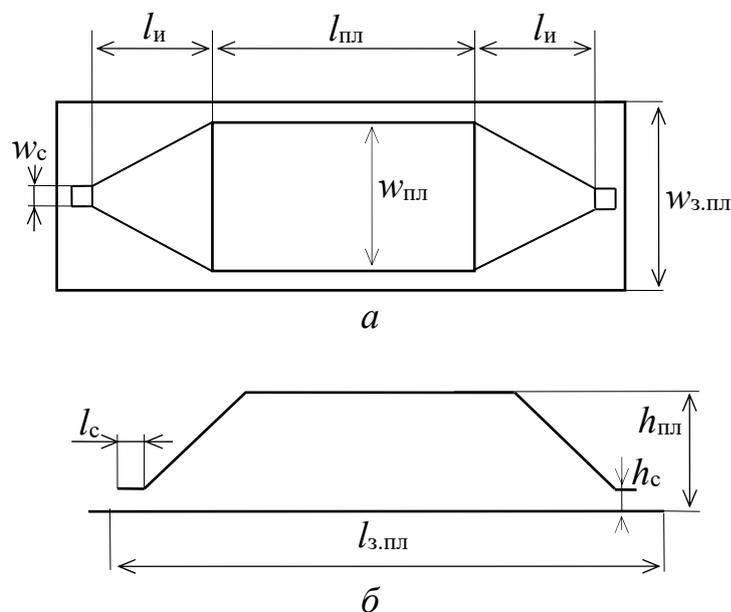


Рисунок 2.33 – Вид полосковой линии сверху (а) и сбоку (б)

Электродинамическая модель ПЛ (рисунок 2.34,а) состоит из опорного 1 и активного 2 проводников. Активный проводник соединяется с центральным проводником СВЧ-соединителя через сквозное отверстие в опорном проводнике ПЛ, образуя КПП (рисунок 2.34,б, в).

Вычислены частотные зависимости $|S_{11}|$ (рисунок 2.35) и $|S_{21}|$ (рисунок 2.36) для ПЛ со значениями геометрических параметров

из таблицы 2.2 в диапазоне частот до 3 ГГц. При изменении ширины $w_{\text{ПЛ}} = 292,72$ мм активного проводника на ± 2 мм (варианты 3 и 5 из таблицы 2.2) максимальное значение $|S_{11}|$ изменяется на ± 1 дБ.

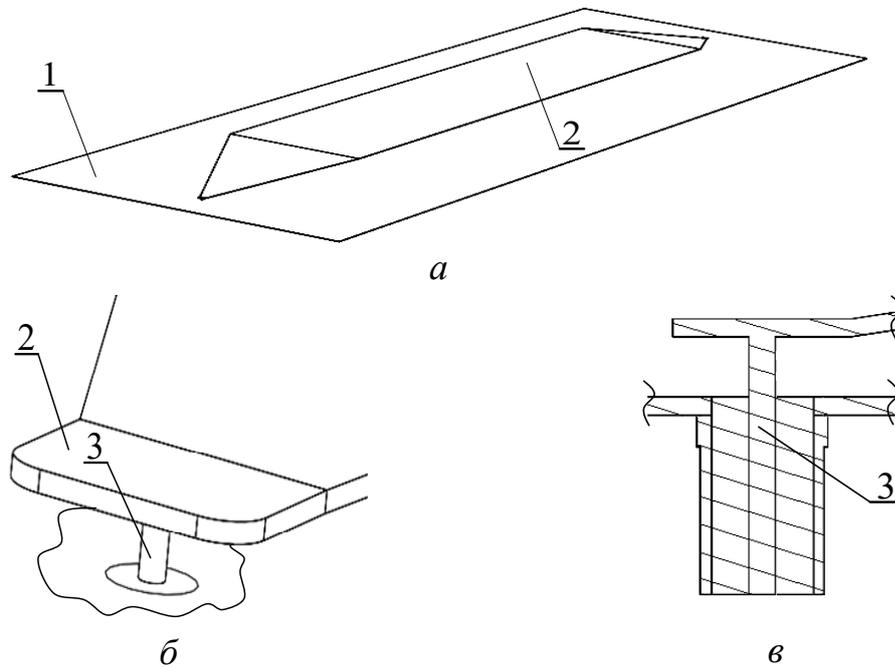


Рисунок 2.34 – Внешний вид модели полосковой линии (а) и её КПП (б), а также его продольного сечения (в) в месте соединения активного проводника ПЛ с центральным проводником СВЧ-соединителя

Наибольшее отклонение максимального значения $|S_{11}|$ наблюдается для вариантов 1 и 8 из таблицы 2.2 на частоте 25 МГц и составляет ± 3 дБ (см. рисунок 2.35).

Как видно на рисунке 2.35, для варианта 1 частотная зависимость $|S_{11}|$ не превышает минус 18 дБ, а для варианта 4 – минус 17 дБ в диапазоне частот до 3 ГГц. При этом максимальное значение $|S_{11}|$ для варианта 8 не превышает минус 14 дБ в диапазоне частот до 3 ГГц.

Из рисунка 2.36 следует, что затухание поля в случае вариантов 1, 4 минимально и не превышает 8 дБ. Для варианта 8 затухание максимально и составляет 15,5 дБ.

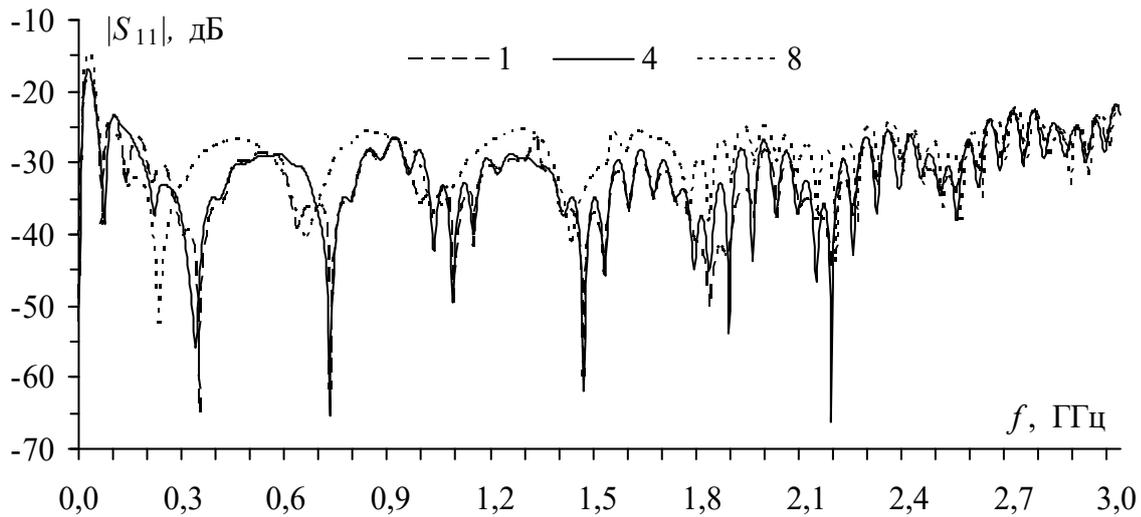


Рисунок 2.35 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ для вариантов 1, 4, 8 из таблицы 2.2

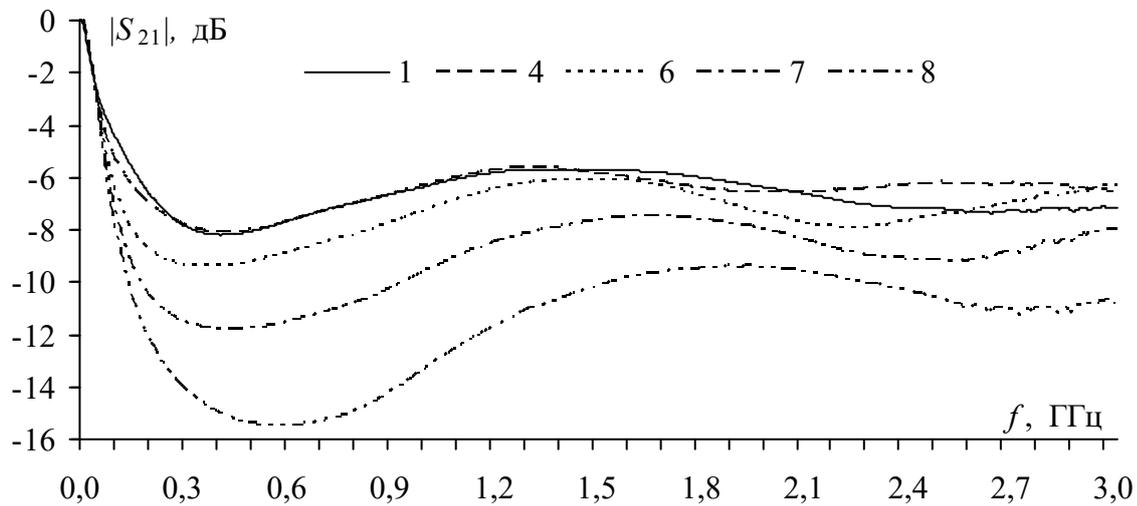


Рисунок 2.36 – Частотные зависимости $|S_{21}|$ для вариантов 1, 4, 6, 7, 8 из таблицы 2.2

Выполнена оптимизация геометрических параметров ПЛ по алгоритму, представленному на рисунке 2.37 [131], с использованием метода доверительных интервалов и ГА. Минимизировалось максимальное значение частотной зависимости $|S_{11}|$ для варианта 2 из таблицы 2.2 при $Z_B = 50$ Ом в диапазоне частот до 3 ГГц.

Оптимизация выполнялась следующим образом. На основе геометрических параметров построили модель ПЛ по заданным значениям $h_{\text{ПЛ}}$ и h_c при условии $h_{\text{ПЛ}} > h_c > t_{\text{ПЛ}}$. Далее находилось оптимальное соотношение между параметрами l_c , h_c и w_c в нача-

ле и конце активного проводника. После этого определяли оптимальное соотношение между длиной расширения и шириной активного проводника ($l_{\text{И}}$ и $w_{\text{с}}$), так как от длины расширения зависит угол между опорным проводником и сужением активного проводника. Затем находилось оптимальное значение длины активного проводника $l_{\text{ПЛ}}$.

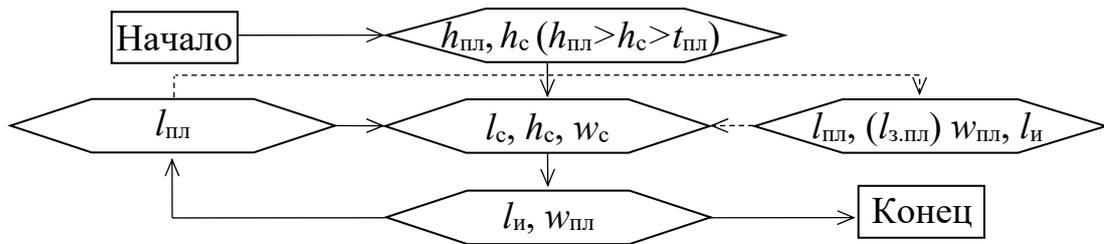


Рисунок 2.37 – Алгоритм оптимизации размеров полосковой линии

В результате получены оптимальные геометрические размеры и соотношения для ПЛ с $Z_{\text{В}} = 50$ Ом в диапазоне частот до 3 ГГц при высоте ИО 20 мм: $w_{\text{ПЛ}} = 258,1$ мм, $h_{\text{ПЛ}} = 61$ мм, $t_{\text{ПЛ}} = 1$ мм, $l_{\text{ПЛ}} = 1665,1$ мм, $w_{\text{з.ПЛ}} = 698,3$ мм, $l_{\text{з.ПЛ}} = 2580,1$ мм, $t_{\text{з.ПЛ}} = 1$ мм, $w_{\text{с}} = 13,2$ мм, $l_{\text{с}} = 9,1$ мм, $h_{\text{с}} = 3,2$ мм, $l_{\text{И}} = 362,9$ мм. Как видим, существенно (на 34,7 мм) снизилась ширина активного проводника (до 258,1 мм), тогда как ширина опорного проводника увеличилась незначительно (на 14,58 мм). По оптимальным размерам электродинамической модели построена твердотельная модель из листового алюминия ($\rho = 2,7$ г/см³, $\sigma = 37 \cdot 10^6$ См/м). При построении твердотельной модели учитывались характеристики слесарных инструментов и изменение кромок металла в результате его сжатия или растяжения. На основе твердотельной модели созданы чертежи конструкции ПЛ.

Используя методику подразд. 2.1, выполнили проектирование ПЛ со значениями геометрических параметров $w_{\text{з.ПЛ}} = 1500$ мм, $w_{\text{ПЛ}} = 740$ мм, $l_{\text{з.ПЛ}} = 4300$ мм, $l_{\text{И}} = 800$ мм, $l_{\text{ПЛ}} = 2500$ мм, $h_{\text{ПЛ}} = 150$ мм, $t_{\text{ПЛ}} = 2$ мм, $t_{\text{з.ПЛ}} = 5$ мм, взятыми из стандарта [14]. Получены оптимальные геометрические параметры ПЛ $l_{\text{И}} = 796,63$ мм, $w_{\text{ПЛ}} = 736,96$ мм, $h_{\text{с}} = 0,56$ мм с минимальным значением частот-

ной зависимости $|S_{11}|$ в диапазоне до 400 МГц (рисунок 2.38) [132]. На рисунке 2.38 видно, что параметр $|S_{11}|$ оптимизированной модели ПЛ не превышает минус 22 дБ, тогда как $|S_{11}|$ исходной модели составляет минус 19 дБ, что позволило уменьшить максимальное значение КСВН с 1,24 до 1,17.

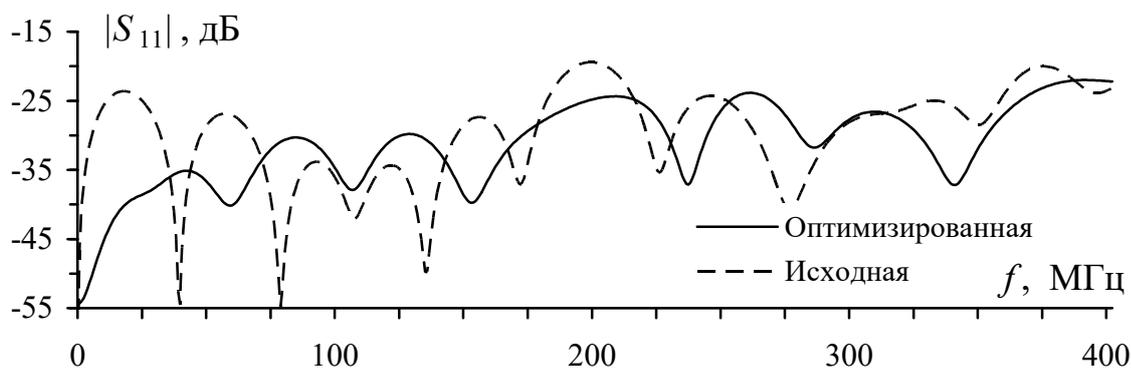


Рисунок 2.38 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ исходной (---) и оптимизированной (—) модели полосковой линии

Таким образом, используя методику проектирования, изложенную в подразд. 2.1, можно рассчитать значения оптимальных геометрических параметров ПЛ по максимальным заданным размерам ИО в требуемом диапазоне частот с учётом ограничений.

2.6 Проектирование коаксиальной камеры

По методике из подразд. 2.1 выполнено проектирование конструкции коаксиальной камеры для измерения ЭЭ композитных материалов в диапазоне частот до 10 ГГц [115].

Аналитическая оценка проведена по выражениям (1.12) и (1.13), вычислены радиусы $r_1 = 9,64$ мм и $r_2 = 22,00$ мм проводников в регулярной части при $Z_{\text{в}} = 50$ Ом и $f_{\text{гр}} = 3$ ГГц. На основе вычисленных геометрических параметров создана модель поперечного сечения и выполнен её квазистатический анализ в программе TALGAT. Значения геометрических параметров r_1 и r_2 были скорректированы в соответствии с требуемым волновым сопротивлением $Z_{\text{в}}$ и составили 10,00 мм и 21,44 мм.

Для согласования регулярной части камеры с СВЧ-соединителями выполнены разработка и анализ электродинамических моделей коаксиальной камеры с различными формами согласующих переходов (линейным, линейно сдвинутым и экспоненциальным) в диапазоне частот до 10 ГГц. Размеры моделей были вычислены с использованием параметрической оптимизации, целевой функцией которой являлась минимизация максимального значения частотной зависимости $|S_{11}|$ в указанном диапазоне частот.

В случае линейных переходов (рисунок 2.39,*а*) согласование центральной части коаксиальной камеры с СВЧ-соединителями обеспечивается линейным уменьшением радиусов внутреннего и внешнего проводников до $r_{c1} = 1,30$ мм и $r_{c2} = 2,95$ мм при $Z_B = 50$ Ом. Модель с линейно сдвинутыми согласующими переходами отличается от предыдущей модели разными длинами L сужений, выполненных на центральном и внешнем проводниках (рисунок 2.39,*б*). Получены следующие значения этих длин: $L_1 = 49,64$ мм, $L_2 = 61,72$ мм, $L_3 = 13,81$ мм, $L_4 = 37,30$ мм, $L_5 = 67,70$ мм, $L_6 = 14,00$ мм.

Разработана модель камеры, согласование которой обеспечивается экспоненциальными переходами. Внутренний радиус внешнего проводника изменяется в продольном направлении вдоль кривой, проходящей через 5 точек, соответствующих размерам, представленным на рисунке 2.40,*а*. Радиус центрального проводника уменьшается в продольном направлении вдоль кривой, описанной четырьмя точками (рисунок 2.40,*б*). Оптимальные значения геометрических параметров экспоненциальных согласующих переходов: $\Delta L_{c1} = 18,00$ мм, $\Delta L_{c2} = 31,70$ мм, $\Delta L_{c3} = 18,00$ мм, $\Delta L_1 = 15,00$ мм, $\Delta L_2 = 16,68$ мм, $\Delta L_3 = 16,68$ мм, $\Delta L_4 = 15,00$ мм, $\Delta r_{c1} = 3,10$ мм, $\Delta r_{c2} = 8,80$ мм, $\Delta r_1 = 6,29$ мм, $\Delta r_2 = 12,82$ мм, $\Delta r_3 = 19,35$ мм.

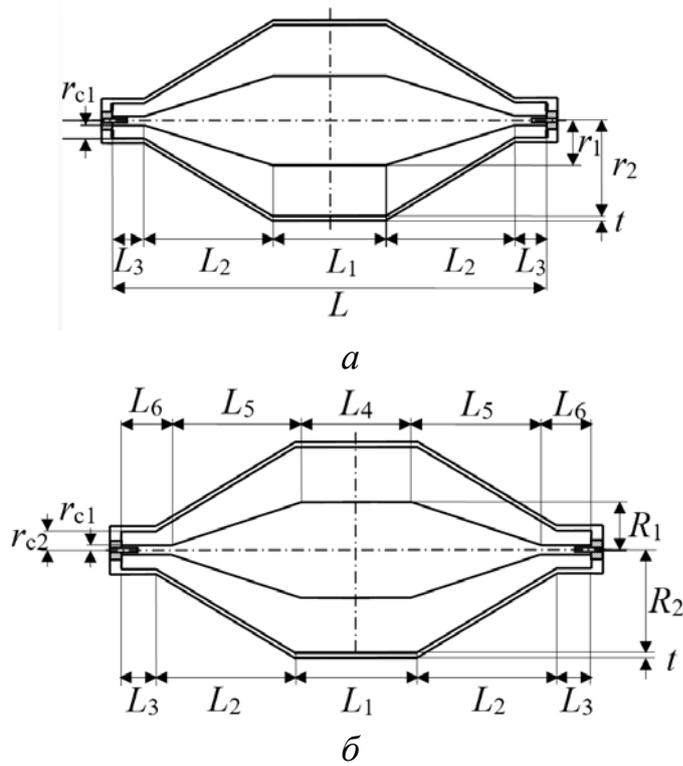


Рисунок 2.39 – Геометрические параметры коаксиальных камер с линейными (а) и линейно сдвинутыми (б) согласованными переходами

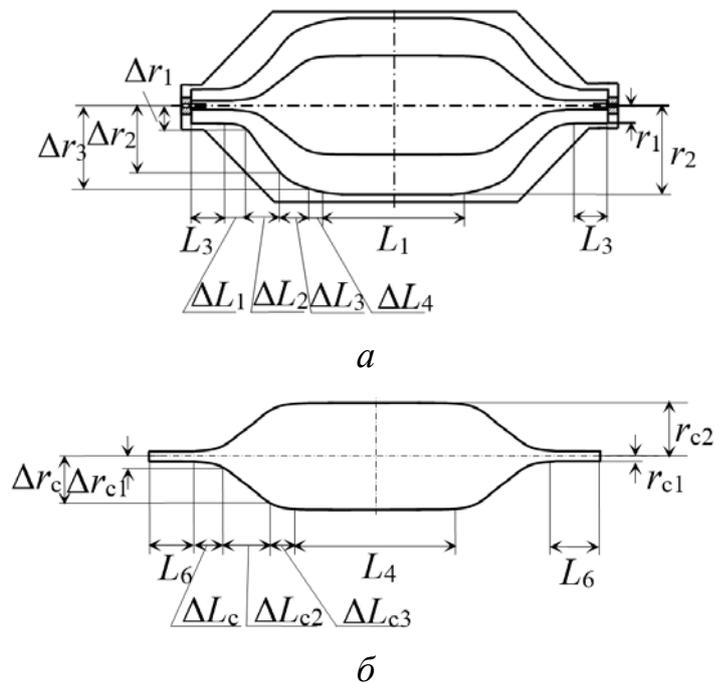


Рисунок 2.40 – Геометрические параметры внешнего (а) и внутреннего (б) проводников коаксиальной камеры с экспоненциальными согласующими переходами

Электродинамический анализ вычисленных частотных зависимостей S -параметров моделей с оптимизированными геометрическими размерами (рисунок 2.41) показал, что значения частотной зависимости $|S_{11}|$ для модели коаксиальной камеры с линейным согласующим переходом (см. рисунок 2.39,а) не превышают минус 11 дБ. При этом на частотах ниже $f_{\text{Гр}}$ камеры, соответствующих режиму возбуждения TE_{11} , наблюдается удовлетворительное согласование камеры с $Z_{\text{в}} = 50$ Ом, что указывает на возможность использования вычисленных значений геометрических параметров для разработки коаксиальной камеры с диапазоном рабочих частот до 10 ГГц. Модель с линейно сдвинутыми согласующими переходами (см. рисунок 2.39,б) имеет максимальное значение $|S_{11}|$, составляющее минус 15 дБ, за исключением увеличения до минус 12,6 дБ на частоте 5,09 ГГц и до минус 10,5 дБ на частоте 8,74 ГГц. Наилучшее согласование обеспечивается у модели с экспоненциальными переходами (см. рисунок 2.40) – максимальное значение $|S_{11}|$ не превышает минус 20 дБ (см. рисунок 2.41).

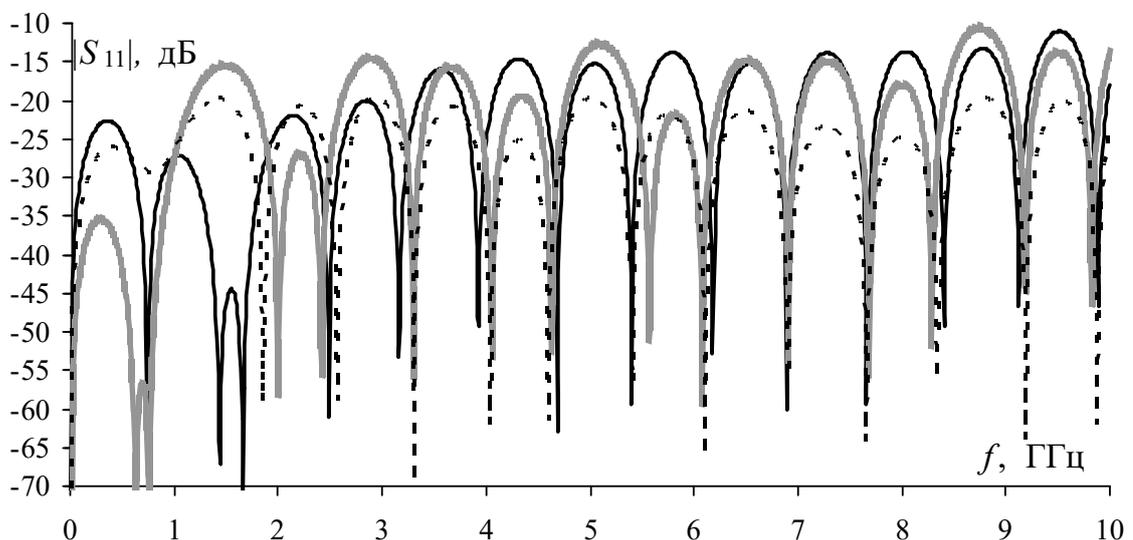


Рисунок 2.41 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ моделей коаксиальных камер с линейными (—), линейно сдвинутыми (⋯) и экспоненциальными (---) переходами согласования

Выполнен электродинамический анализ моделей с разрывом центрального проводника коаксиальной камеры и без него. Для

этого на основе электродинамической модели камеры с экспоненциальными переходами созданы твердотельные модели в соответствии с требованиями стандартов [101] и [102] (рисунок 2.42).

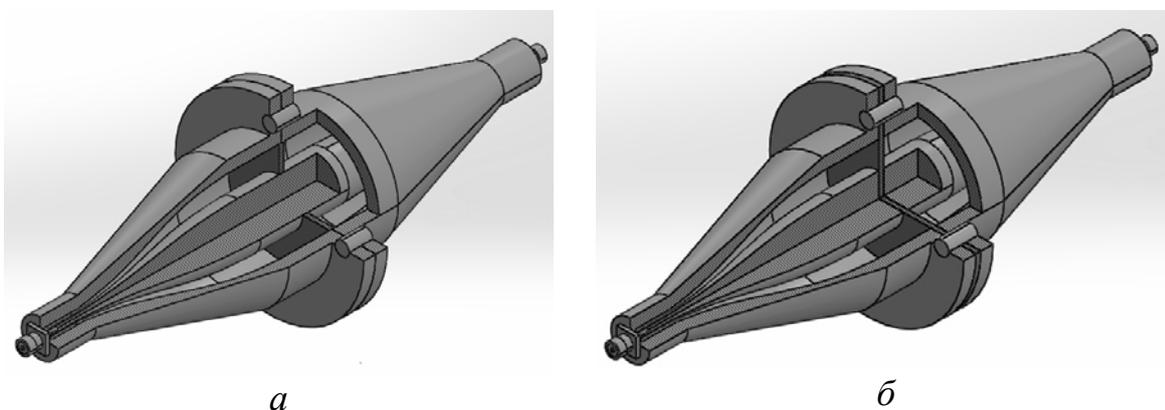


Рисунок 2.42 – Твердотельные модели коаксиальных камер, разработанные в соответствии с ASTM ES7 (а) и ASTM D4935 (б)

Разработана усовершенствованная коаксиальная камера [115], внешний проводник которой выполнен в виде двух симметричных элементов, соединенных резьбой. Центральный проводник камеры разделен на две половины, на конце одной из них выполнен паз цилиндрической формы, в котором имеется цилиндрический выступ для второй половины центрального проводника (рисунок 2.43,а). Для измерения ЭЭ исследуемого образца материала он должен быть расположен в зазорах на поверхностях цилиндрического выступа внешнего и внутреннего проводников (рисунок 2.43,б).

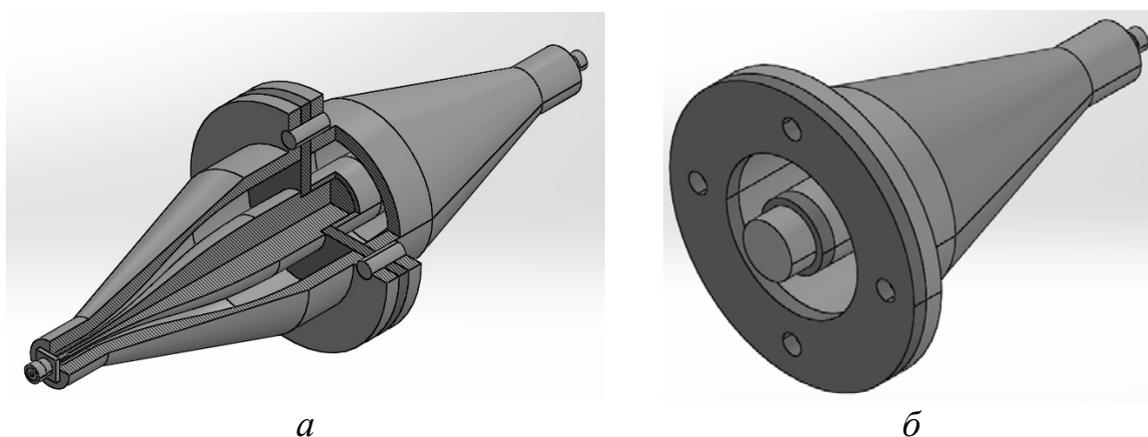


Рисунок 2.43 – Усовершенствованная коаксиальная камера (а) и форма исследуемого образца материала (б)

Создана твердотельная модель, значения геометрических параметров которой учитывают точность токарного станка с числовым программным управлением. Выполнена параметрическая оптимизация модели коаксиальной камеры с линейным согласующим переходом (рисунок 2.44,*а*) и дополнительными согласующими элементами: во внутреннем пространстве корпуса камеры в месте подключения СВЧ-соединителя выполнена фаска, что совместно с дополнительной фаской и отверстием во внутреннем проводнике (рисунок 2.44,*б*) обеспечивает соединение камеры с СВЧ-соединителями и согласование с фидерным трактом при $|S_{11}|$ не более минус 20 дБ и $|S_{21}|$ не менее минус 1,5 дБ в диапазоне частот до 11,9 ГГц.

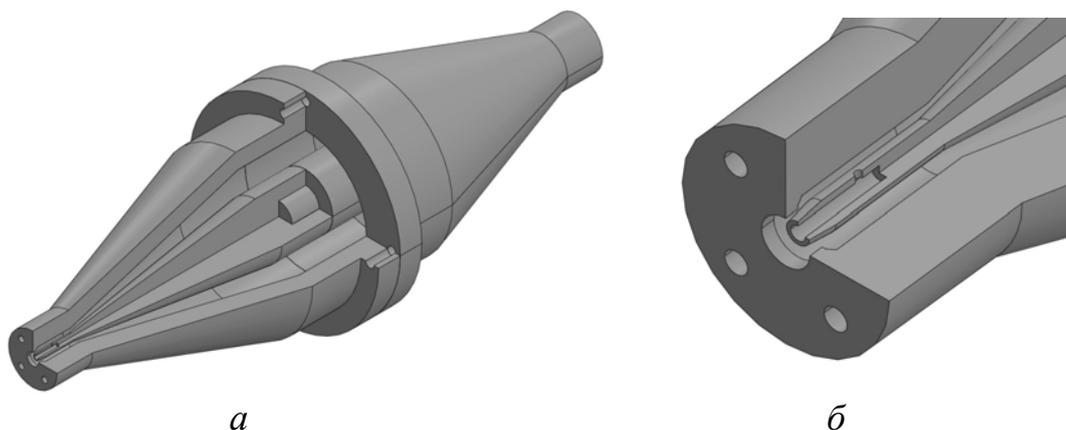


Рисунок 2.44 – Вид твердотельной модели коаксиальной камеры с линейным неравномерным согласующим переходом (*а*) и вблизи подключения к СВЧ-соединителю (*б*)

Таким образом, выполнен анализ трёх электродинамических моделей коаксиальной камеры с различными согласующими переходами. Использование методики подразд. 2.1 позволило получить оптимальные значения геометрических параметров коаксиальной камеры с минимальным значением $|S_{11}|$ в заданном диапазоне рабочих частот. Разработана твердотельная модель, на основе которой создана конструкция коаксиальной камеры, позволяющая проводить измерения ЭЭ различных КМ в диапазоне частот до 12 ГГц.

3 СОЗДАНИЕ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ

3.1 ТЕМ-камера

На основе результатов проектирования по методике (см. подразд. 2.2), изложенной в подразд. 2.1, создана ТЕМ-камера [107, 110] для испытания ИО высотой до 20 мм в диапазоне рабочих частот до 2 ГГц.

Прежде всего по твердотельной модели (рисунок 3.1,*а*) в системе автоматизированного проектирования были изготовлены чертежи для станков и по ним выполнены гидроабразивный рез, гибка, пайка и сборка экспериментального образца камеры (рисунок 3.1,*б*). ТЕМ-камера создана из четырех медных пластин, концы каждой пластины имеют по два изгиба с точностью $\pm 0,1^\circ$.

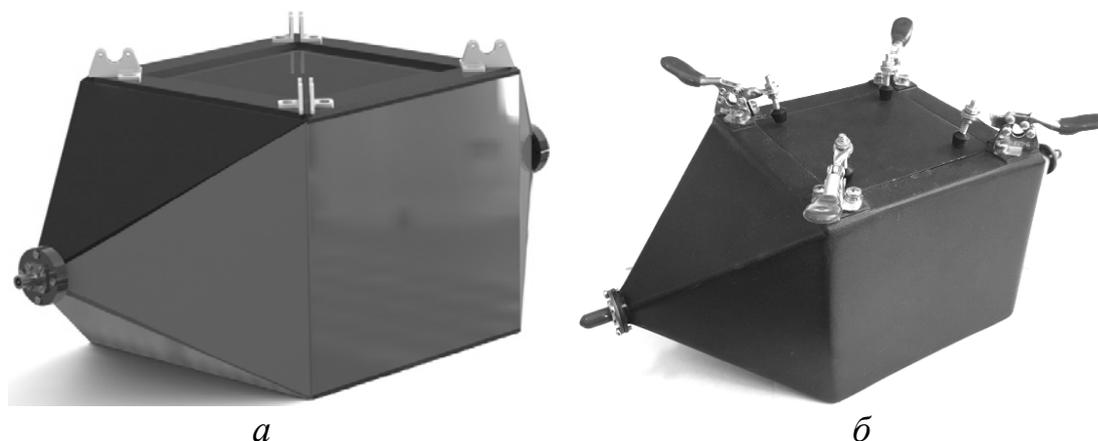


Рисунок 3.1 – Твердотельная модель (*а*)
и экспериментальный макет (*б*) ТЕМ-камеры

Пайкой по краям пластин образована регулярная часть в виде прямоугольного параллелепипеда и две сужающиеся части в виде пирамид. На концы пирамид припаяны цилиндрические элементы с прямоугольными вырезами, к которым посредством других цилиндрических элементов крепятся СВЧ-соединители. Центральные проводники СВЧ-соединителей закручены в гильзы, которые установлены в торцах центрального проводника камеры. В регу-

лярной части камеры выполнен вырез под испытательный стол или ПП, которые прижимаются к корпусу камеры зажимами.

Методом конечных элементов вычислены частотные зависимости $|S_{11}|$ для твердотельной модели (ТМ) и полной геометрической модели (ГМ) при $k_{a1} = 1,23$ (рисунок 3.2). Дополнительно вычислены зависимости для ГМ при $k_{a1} = 1,15$. Результаты электродинамического анализа проверялись на сходимость при изменении длины ячейки сетки от $\lambda/30$ до $\lambda/50$.

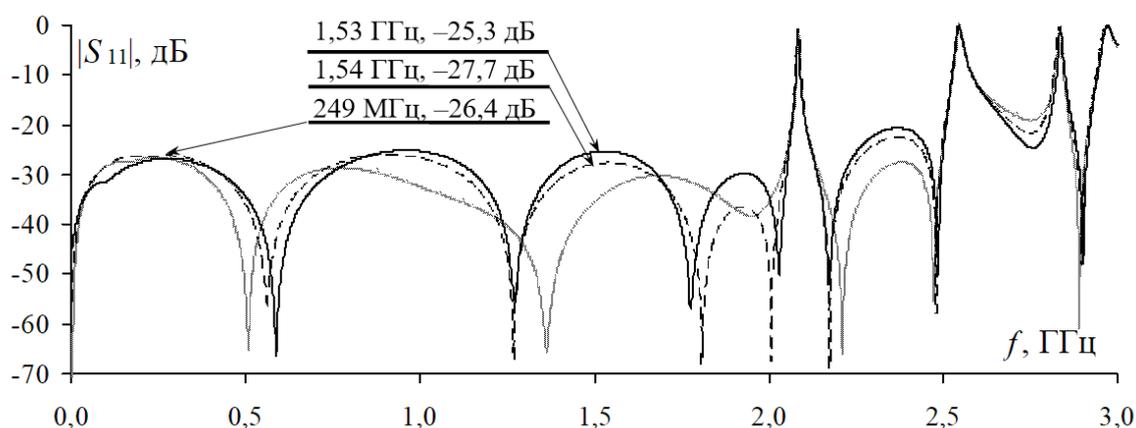


Рисунок 3.2 – Частотные зависимости $|S_{11}|$, вычисленные для геометрической модели при $k_{a1} = 1,15$ (- - -) и $k_{a1} = 1,23$ (···) и твердотельной модели при $k_{a1} = 1,23$ (—)

На рисунке 3.2 видно, что максимальное значение $|S_{11}|$ на частотах вблизи 1,53 ГГц для ТМ с $k_{a1} = 1,23$ соответствует минус 25,3 дБ, что на 4,8 дБ выше, чем для ГМ при $k_{a1} = 1,23$ на частоте 1,69 ГГц. При этом максимальное значение $|S_{11}|$ для ГМ при $k_{a1} = 1,23$ составляет минус 26,4 дБ на частоте 249 МГц. Формы частотных зависимостей $|S_{11}|$ близки для ГМ и ТМ при $k_{a1} = 1,23$, но не идентичны. Кроме того, как следует из рисунка 3.2, значения $|S_{11}|$ для ГМ при $k_{a1} = 1,15$ и для ТМ при $k_{a1} = 1,23$ аналогичны, а разница значений $|S_{11}|$ на частотах 1,53–1,54 ГГц не превышает 2,4 дБ, что говорит о существенном влиянии на параметр $|S_{11}|$ геометрической формы камеры в месте расположения КПП. Так, высокая разница между значениями $|S_{11}|$ (4,8 дБ) для ТМ и

ГМ при $k_{a1} = 1,23$, вероятно, объясняется тем, что существенно изменился радиус изгиба (jr_1 и jr_2 на рисунке 2.4,а) ТМ в месте расположения КПП для твердотельной модели при гибке пластины из металла.

Измерены параметры созданного макета ТЕМ-камеры, выявлены отклонения в размерах поперечного сечения в области расположения КПП, которые неконтролируемо возникли в результате прижатия кромок в пирамидальных частях корпуса и их пайки при высокой температуре (1100 °С). Так, в реальной конструкции значения на одном конце составили $a_1 = 8,3 \pm 0,1$ мм и $b_1 = 7,2 \pm 0,1$ мм, а на другом – $a_2 = 9,0 \pm 0,1$ мм и $b_2 = 7,4 \pm 0,1$ мм. На основе измеренных параметров в области расположения КПП твердотельная модель была перестроена (см. рисунок 2.1). Модель полностью повторяла размеры реальной конструкции, а для вычисления её S -параметров проведен электродинамический анализ. Частотная зависимость $|S_{11}|$ для ТМ с измененными параметрами показана на рисунке 3.3, где также приведены измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ макета ТЕМ-камеры (см. рисунок 3.1,б). Измерения проводились с помощью двух приборов: измерителя модуля коэффициента передачи и отражения «Микран Р2М-40» и векторного анализатора цепей «Agilent technologies Fieldfox N9918A». Измерения выполняли в разное время с повторением по 5 раз.

Из рисунка 3.3 следует, что измеренное при помощи двух приборов максимальное значение $|S_{11}|$ не превышает минус 22 дБ в диапазоне частот до 2,08 ГГц. Вычисленная частотная зависимость $|S_{11}|$ для ТМ с параметрами реальной конструкции аналогична обоим измеренным зависимостям $|S_{11}|$. При этом максимальная разница между измеренными и вычисленными значениями $|S_{11}|$ не превышает 4,3 дБ (1,0–1,2 ГГц). Из сравнения измеренных (см. рисунок 3.3) и вычисленных для ТМ (см. рисунок 3.2) при $k_{a1} = 1,23$ частотных зависимостей $|S_{11}|$ видно, что максимальная разница составляет 3,3 дБ (1,53–1,63 ГГц). Она мо-

жет быть уменьшена при корректировке конструкции ТЕМ-камеры в месте расположения КПП.

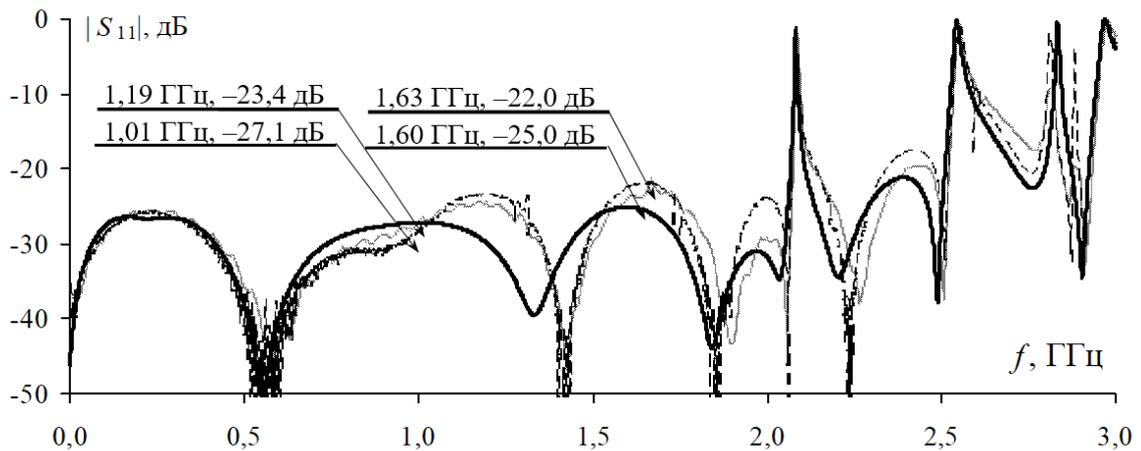


Рисунок 3.3 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры, измеренные приборами «Микран Р2М-40» (- - -) и «Agilent N9918А» (· · ·) и вычисленные для твердотельной модели (—)

Выполнено сравнение созданной ТЕМ-камеры с аналогом по высоте ИО и максимальному значению $|S_{11}|$. По результатам измерения созданная камера имеет улучшенные характеристики: $f_{гр} = 2,08$ ГГц, КСВН = 1,17, высота ИО 20 мм. Измеренные частотные зависимости S -параметров созданной ТЕМ-камеры сравнивались с зависимостями, представленными в [41], которые получены в результате электродинамического анализа камеры FCC-ТЕМ-JM2, предназначенной для измерения помехоэмиссии от ИС в соответствии с [66] (рисунок 3.4).

На рисунке 3.4 видно, что верхняя граничная частота для разработанной ТЕМ-камеры составляет 2,1 ГГц, тогда как для аналога – 1,85 ГГц. Максимальное значение $|S_{11}|$ для разработанной камеры меньше на 6 дБ в диапазоне частот до 1 ГГц и на 12 дБ в диапазоне до 1,5 ГГц. Максимальное значение $|S_{21}|$ для разработанной камеры плавно снижается до минус 1 дБ с ростом частоты до 2 ГГц, тогда как для аналога не уменьшается ниже минус 0,2 дБ, что может быть вызвано различием потерь в металле при вычислительном и натурном экспериментах.

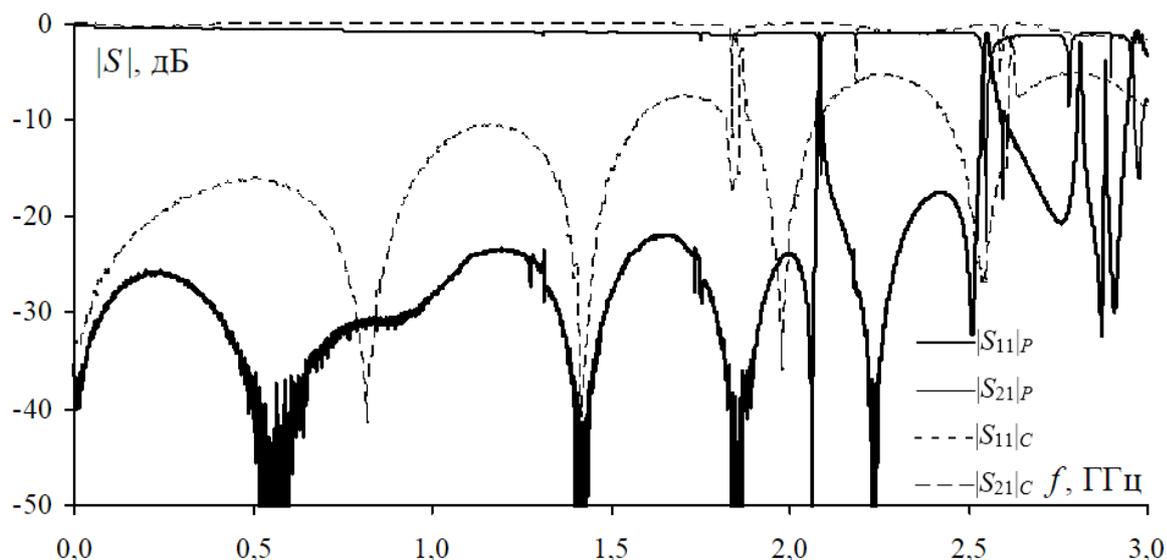


Рисунок 3.4 – Частотные зависимости S -параметров ТЕМ-камер: ($|S_{11}|_P$, $|S_{21}|_P$ – разработанной; ($|S_{11}|_C$, $|S_{21}|_C$ – FCC-ТЕМ-JM2

Таким образом, по разработанной методике изготовлена ТЕМ-камера для исследования и испытания на ЭМС объектов размером до $20 \times 100 \times 100$ мм в диапазоне частот до 2 ГГц с $|S_{11}| < -22$ дБ и максимальной разницей между измеренными и вычисленными значениями $|S_{11}|$ не более $\pm 1,65$ дБ, что позволит проводить измерения помехоэмиссии РЭС с большим динамическим диапазоном и меньшей амплитудой излучения.

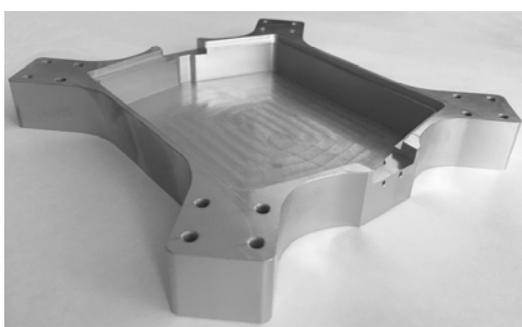
3.2 Малогабаритная ТЕМ-камера

На основе результатов проектирования, представленных в подразд. 2.3, создана малогабаритная ТЕМ-камера для испытаний ИС с максимальными габаритами $30 \times 30 \times 5$ мм в диапазоне частот до 5,2 ГГц [126] (рисунок 3.5).

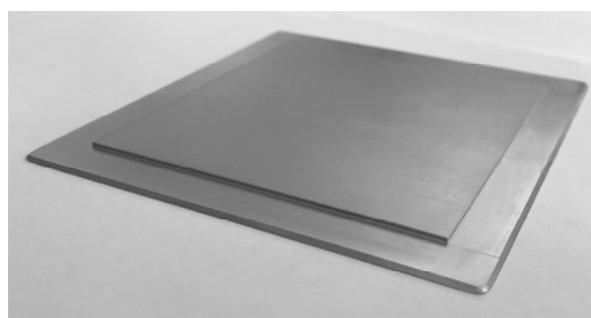
Испытательный стол, основание и крышка корпуса изготовлены посредством фрезерной обработки алюминиевых плит станком с числовым программным управлением, центральный проводник выполнен гидроабразивной резкой медного листа. Для защиты от коррозии на центральный проводник нанесено гальваническое покрытие серебром, а на остальные элементы конструкции – никелем.



a



б



в

Рисунок 3.5 – Основные элементы малогабаритной ТЕМ-камеры: *a* – крышка корпуса с СВЧ-соединителями и центральным проводником; *б* – основание корпуса; *в* – испытательный стол

После монтажа СВЧ-соединителей и центрального проводника (рисунок 3.6,*a*) выполнена сборка крышки и основания корпуса посредством винтового соединения (рисунок 3.6,*б*).

Для оценки помехоэмиссии от ИС в зависимости от угла поворота испытательной ПП в апертуре малогабаритной ТЕМ-камеры разработан испытательный стол, обеспечивающий размещение ПП круглой формы (рисунок 3.7).

S-параметры малогабаритной ТЕМ-камеры измеряли, используя ВАЦ «Микран Р4М-18» (рисунок 3.8).

На рисунке 3.9 приведены измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 18 ГГц. Как видно, значения $|S_{11}|$ не превышают уровень минус 17,1 дБ, а значения $|S_{21}|$ нахо-

дятся в диапазоне от 0 до минус 1 дБ до граничной частоты $f_{гр} = 5,3$ ГГц, после которой возбуждаются волны высших типов.



a

б

Рисунок 3.6 – Экспериментальный макет малогабаритной ТЕМ-камеры в сборке с открытой апертурой (*a*) и испытательным столом (*б*)

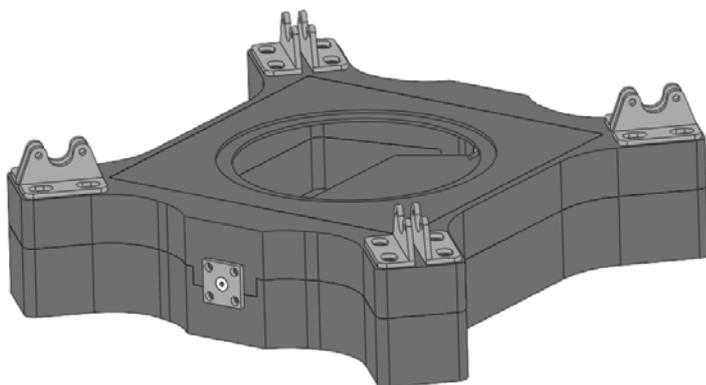


Рисунок 3.7 – Твёрдотельная модель малогабаритной ТЕМ-камеры с испытательным столом, предназначенным для размещения печатной платы круглой формы

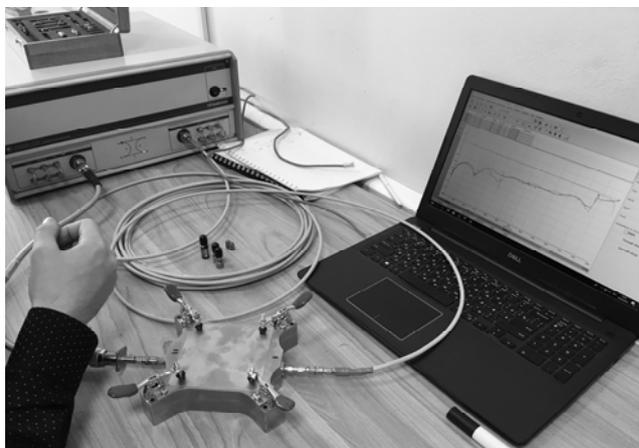


Рисунок 3.8 – Измерение S -параметров малогабаритной ТЕМ-камеры с помощью ВАЦ «Микран Р4М-18»

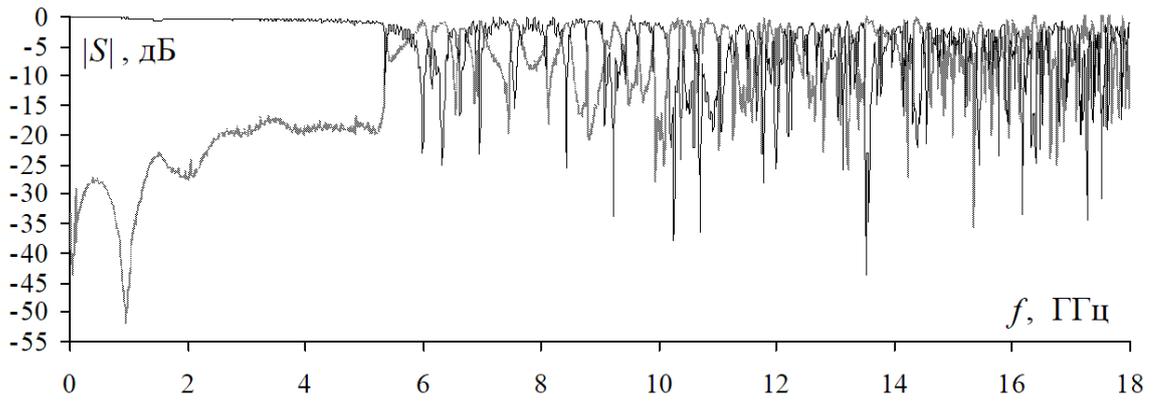


Рисунок 3.9 – Измеренные частотные зависимости $|S_{11}|$ (—) и $|S_{21}|$ (⋯) малогабаритной ТЕМ-камеры

Сравнение частотных зависимостей $|S_{11}|$ электродинамической и твердотельной моделей, а также созданного макета малогабаритной ТЕМ-камеры показало, что максимальное отклонение измеренных значений $|S_{11}|$ от результатов твердотельного моделирования составляет 5,1 дБ, а максимальное отклонение от результатов электродинамического моделирования составляет 12 дБ на частоте 4,83 ГГц (рисунок 3.10).

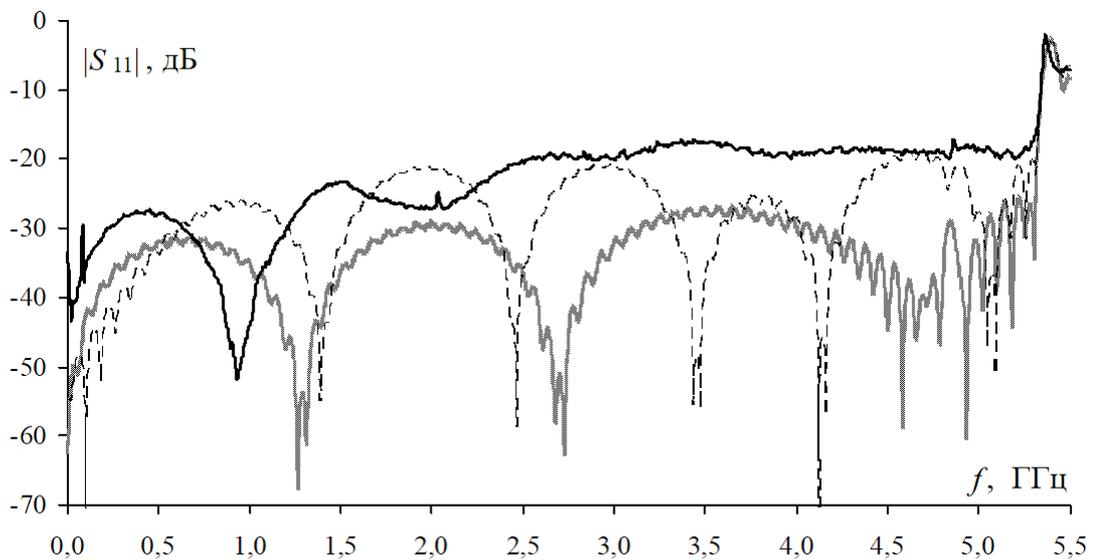


Рисунок 3.10 – Сравнение частотных зависимостей $|S_{11}|$ электродинамической (⋯), твердотельной (---) моделей и лабораторного макета (—) ТЕМ-камеры

Изготовленный макет малогабаритной ТЕМ-камеры пригоден для исследований и испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость ИС с высотой профиля не более 5 мм. Измерения

показали максимальное значение $|S_{11}|$ минус 17 дБ в диапазоне частот до 5,3 ГГц.

3.3. Полосковая линия

На основе результатов проектирования, полученных в подразд. 2.5, создана ПЛ с $Z_B = 50$ Ом, предназначенная для исследования и испытания на ЭМС протяжённых экранированных кабелей и конструкций, силовых шин электропитания и линий передачи с прямоугольным и спиральным поперечными сечениями, а также прочих РЭС, имеющих небольшие поперечные, но большие продольные размеры. Используя разработанную методику (см. подразд. 2.1) с алгоритмом оптимизации (см. подразд. 2.5), минимизировали максимальное значение частотной зависимости $|S_{11}|$ до минус 20 дБ в диапазоне частот до 3 ГГц при высоте ИО до 20 мм. Результаты измерения частотных зависимостей $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ ПЛ согласовались с результатами вычисления в диапазоне частот до 3 ГГц [110].

По оптимальным геометрическим параметрам создана твёрдотельная модель (рисунок 3.11).

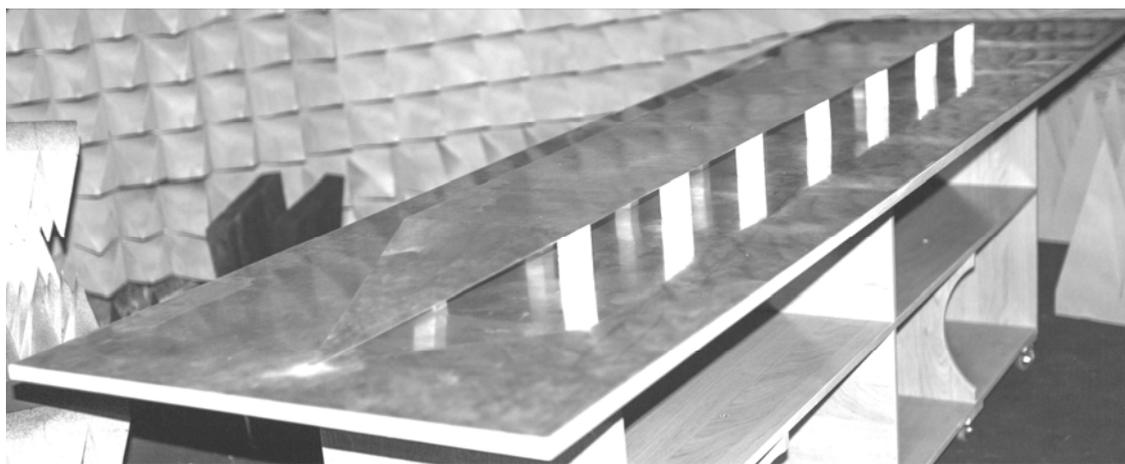


Рисунок 3.11 – Конструкция полосковой линии

Выполнена резка, гибка и сборка ПЛ по чертежам, сделанным на основе твердотельной модели. Посредством электродинамического моделирования твердотельной модели получены частотные

зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ в диапазоне до 3 ГГц. Максимальное значение $|S_{11}|$ не превышает минус 20 дБ (рисунок 3.12,*a*), а параметр $|S_{21}|$ с ростом частоты убывает от 0 до минус 8,6 дБ.

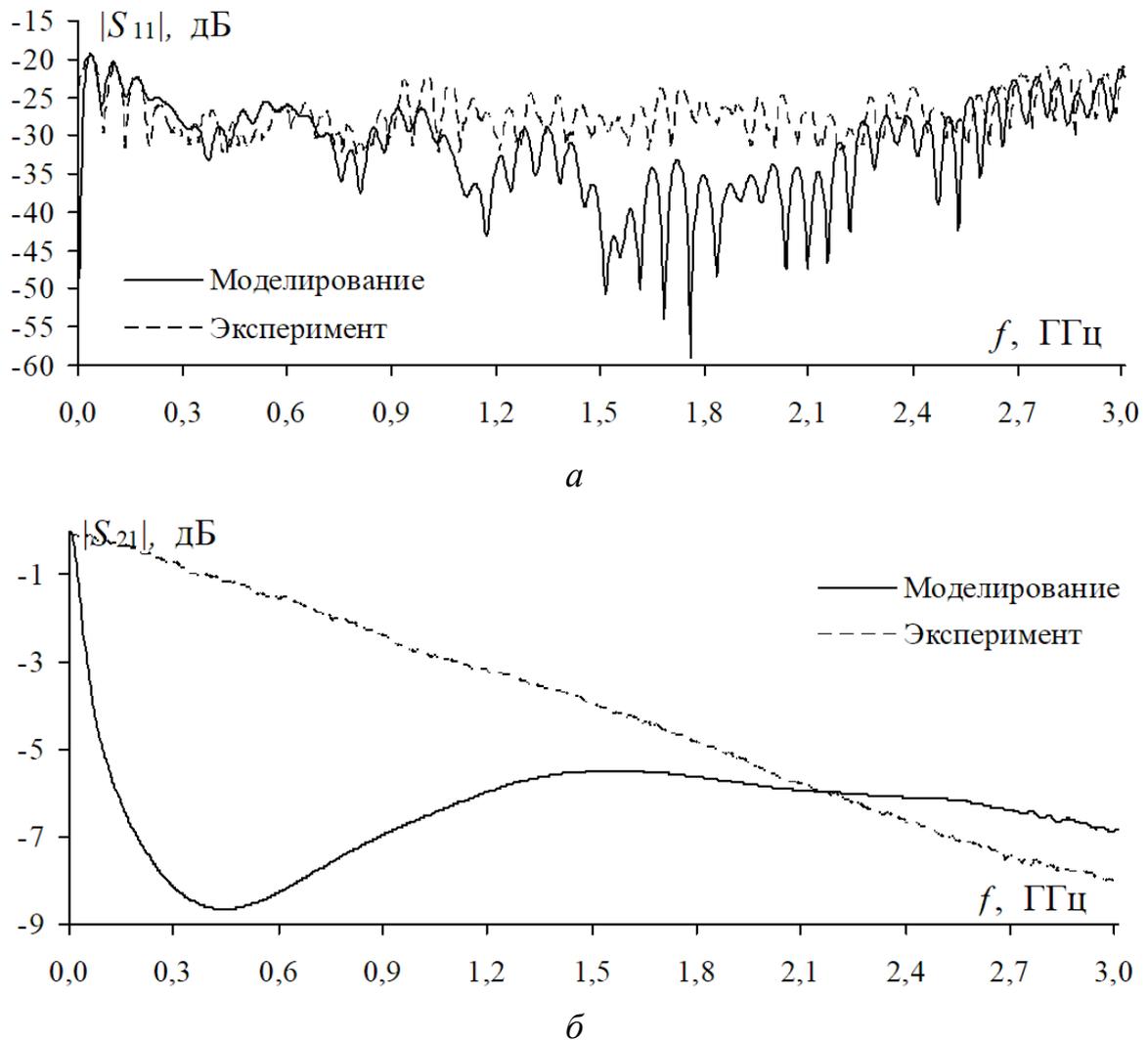


Рисунок 3.12 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ (*a*) и $|S_{21}|$ (*б*), полученные в результате электродинамического анализа и эксперимента

Измерения S -параметров ПЛ проводились в БЭК при помощи измерителя модуля коэффициента передачи и отражения Р2М-40 в диапазоне частот от 10 МГц до 3 ГГц (см. рисунок 3.12).

На рисунке 3.12,*a* видно, что в диапазонах частот до 1 ГГц и 2,2–3 ГГц результаты моделирования и эксперимента согласуются, отклонение не превышает ± 3 дБ. В диапазоне частот от 1 до

2,2 ГГц значения частотной зависимости $|S_{11}|$ при эксперименте практически не снижаются и остаются на уровне от -34 до -22 дБ, тогда как при моделировании прослеживается волнообразный характер частотной зависимости и ее максимальное значение не превышает -25 дБ. Значение $|S_{21}|$ в диапазоне частот до 3 ГГц не превышает минус 8,6 дБ. При этом результаты эксперимента имеют лучшие значения по сравнению с результатами вычисления.

3.4 Коаксиальная камера

На основе разработанной твердотельной модели по результатам проектирования (см. подразд. 2.6) разработана конструкторская документация на элементы коаксиальной камеры. По конструкторской документации изготовлена коаксиальная камера (рисунок 3.13) [133].



Рисунок 3.13 – Коаксиальная камера:
a – ее элементы; *б* – в собранном виде

Скалярным анализатором цепей P2M-40 измерены ее S -параметры (рисунок 3.14). На частотных зависимостях видно, что значения $|S_{11}|$ не превышают минус 20 дБ, а значения $|S_{21}|$ составляют не более минус 0,5 дБ в диапазоне частот до 12 ГГц, что удовлетворяет требованию согласования коаксиальной камеры с $Z_B = 50$ Ом.

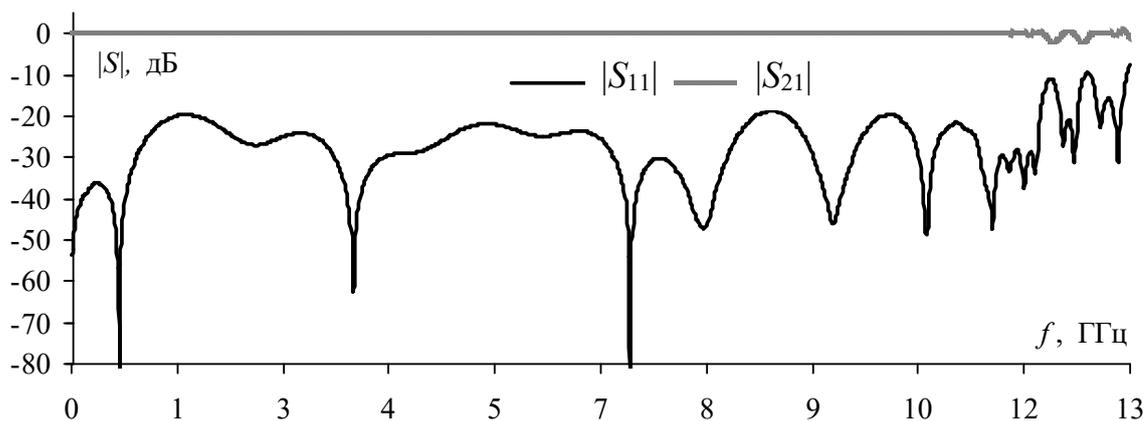


Рисунок 3.14 – Частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ коаксиальной камеры

3.5 Климатическая экранированная камера

3.5.1 Проектирование климатической экранированной камеры

С использованием методики, изложенной в подразд. 2.1, разработано устройство на основе ЛП для исследования и испытания РЭА и БО при совместном воздействии на них климатических и электромагнитных факторов [134–140].

В результате проектирования КЭК созданы:

- алгоритмы управления архитектурой КЭК [141], включающие использование операционных систем реального времени (ОСРВ) [142, 143] и их диагностику [144], а также консоль [145, 146] и симулятор [147] управления терморегулятором [148] и КЭК в целом;

- метод [149, 150], способ [151] и на их основе симулятор [152] и устройство [153] синхронизации группы разнотипных МК в терморегуляторе КЭК [154–159], позволяющие по разработанной методике [160] управления многофазным [161, 162] электропитанием [163] удерживать заданную температуру поверхности волновода.

Запатентована КЭК с модулем визуального контроля [164–166] для изучения в режиме реального времени [167] влияния на БО дестабилизирующих факторов [168–172].

Технические требования к КЭК разработаны согласно стандартам по проведению натуральных испытаний на помехоэмиссию IEC 61967-2 [34] и помехоустойчивость IEC 62132-2 [35] ИС с учетом одновременного воздействия температуры и влажности воздуха на ИО. В качестве ИО выбрана электронная компонентная база (ЭКБ), а именно чип-компоненты, высота которых в большинстве случаев не превышает 5 мм. Высота ИО увеличена до 20 мм с целью применения камеры для биологических исследований, то есть размещения чаши Петри со стандартными размерами (диаметр 50–100 мм, высота 15–20 мм). Степень жесткости испытаний ЭКБ при воздействии холодом выбрана не более минус $(40 \pm 3)^\circ\text{C}$ в соответствии с ГОСТ 28199–89 [173], при воздействии сухим теплом (относительная влажность воздуха 50 % при $+35^\circ\text{C}$) при температуре $(125 \pm 2)^\circ\text{C}$ в соответствии с ГОСТ 28200–89 [174], при воздействии влажным теплом с температурой $(40 \pm 2)^\circ\text{C}$ и относительной влажностью воздуха $93_{-3}^{+2}\%$ в соответствии с ГОСТ 28201–89 [175]. Указанные требования могут быть увеличены по ряду жесткости испытаний согласно стандартам. В камере предусмотрена циркуляция воздушного потока через испытательный контейнер со временем работы при максимальной загрузке не менее 96 ч. Применительно к ЭКБ диапазон температур увеличен в положительную и отрицательную стороны: от минус 50 до $+150^\circ\text{C}$. Эффективность экранирования камерой выбрана не менее 40 дБ в диапазоне частот до 37,5 ГГц согласно ГОСТ 50414-92 [176]. Частота увеличена до 40 ГГц согласно требованиям MIL-STD-461G [65] и AIAA S-121-2017 [177]. Волновое сопротивление выбрано 50 Ом с целью согласования контрольно-измерительных приборов (КИП) с ТЕМ-камерой, КСВН не выше 1,5 в частотном диапазоне от 150 кГц до 2 ГГц. Неравномерность напряженности электрического поля в зоне ИО не более ± 6 дБ. Разность составляющей сигнала между входом и выходом для помехозащитных фильтров не более $\pm 5\%$.

ИО устанавливается на одну из широких поверхностей ТЕМ-камеры. Подключение КИП и измерение характеристик ИО выполняется через внутренний соединитель в стенке камеры. Для СВЧ-соединителей, расположенных на концах пирамидальных

частей ТЕМ-камеры, рабочее напряжение установлено не менее 300 В, сопротивление изоляции – не менее 5 ГОм.

Основой создания КЭК является интеграция ТЕМ-камеры в климатическую камеру (рисунок 3.15,*а*) и повышение её ЭЭ от внешней ЭМП. В результате такой гибридизации и микропроцессорного управления двумя подсистемами (внутренней и внешней) создаётся и удерживается заданная температура внутри ТЕМ-камеры. Внешняя подсистема имеет независимые модульные элементы нагрева и охлаждения, которые расположены на поверхности ТЕМ-камеры и обеспечивают равномерный нагрев/охлаждение её стенок. Внутренняя подсистема состоит из двух частей: одна из них обеспечивает заданную температуру, другая – влажность воздуха, циркулирующего при помощи компрессора через воздушные каналы, расположенные в углах ТЕМ-камеры. КЭК имеет внешний многослойный экранированный корпус с РПМ на поверхности, что позволяет повысить ЭЭ. Также КЭК содержит внешние датчики температуры и ЭМП, данные с которых передаются по оптоволоконному каналу связи в систему управления. На жидкокристаллическом дисплее (ЖКД) пульта управления (ПУ) камерой отображается цифровая и графическая информация о температуре и влажности воздуха внутри ТЕМ-камеры, а также внешних ЭМП и температуре. С помощью ПУ можно задать, отследить и настроить дополнительные параметры (режим работы, давление компрессора, поток воздушного охлаждения радиатора и пр.).

КЭК имеет расположенную снизу автоматизированную съемную дверь (рисунок 3.15,*б*), на внутренней стороне которой находится испытательный стол. На него помещается ИО и подключается к СВЧ-соединителям. При необходимости используется ПП с припаянным на её поверхности ИО. После закрытия двери ИО оказывается внутри ТЕМ-камеры. КИП подключаются с внешней стороны двери к соединителям типа SMA (рисунок 3.15,*в*). При необходимости КЭК может быть оборудована для биологических исследований (рисунок 3.15,*г*). Для этого испытательный стол заменяется на стол для электромагнитных исследований БО (рисунок 3.15,*д*).

Внутри двери между испытательным столом и внешними соединителями КЭК включены помехозащитные фильтры, которые предотвращают попадание ЭМП на вход КИП. Дверь сделана съемной, что позволяет подключать ИО к КИП через разнотипные соединители, а также изменять их количество. СВЧ-генератор для возбуждения поперечной составляющей напряженности E -поля в ТЕМ-камере подключается сзади с внешней стороны КЭК.

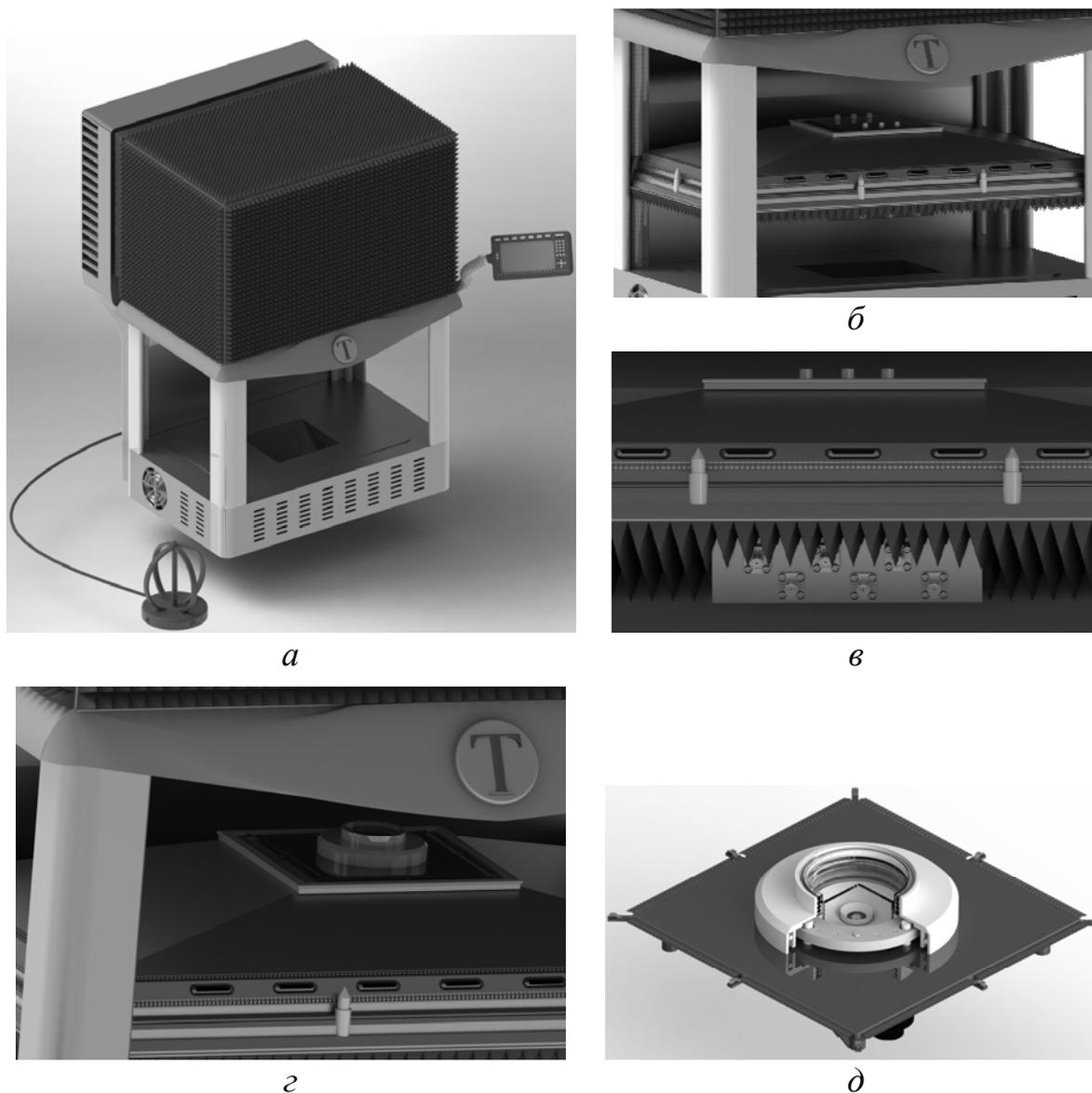


Рисунок 3.15 – Климатическая экранированная камера (а), вид с открытой дверью (б), вид двери со стороны соединителей (в), совместно со столом для электромагнитных исследований биологических объектов (г, д)

Технические характеристики КЭК: КСВН < 1,25; волновое сопротивление 50 Ом; верхняя граничная частота 2 ГГц; размеры ИО 20×100×100 мм для совместных электромагнитных и климатических испытаний, 55×100×100 мм для климатических испытаний; напряженность электрического поля менее 2 кВ/м; температурный диапазон от –50 до +150 °С; стабильность температурного поля ±0,5 °С; влажность воздуха внутри ТЕМ-камеры от 10 до 90 %; ЭЭ > 40 дБ в полосе частот до 40 ГГц.

Интерфейс связи с ИО осуществляется через соединители 3,5 мм или SMA, 4 клеммы питания. Интерфейс связи КЭК: 3,5 мм или SMA для ТЕМ-камеры с КИП; USB 2.0 для рабочей станции со специализированным ПО. Дополнительные параметры: головной МП 32-битный ARM Cortex-A5-36 536 МГц, графический МП 32-битный ARM Cortex-A5-44 544 МГц [178], сенсорный ПУ с OLED 5".

3.5.2 Устройство для проведения испытаний элементов радиоэлектронной аппаратуры

Климатическая экранированная камера [135, 134] (рисунок 3.16) состоит из экранирующего корпуса 1, радиаторного блока 2, ПУ 3 на гибком металлическом шланге 4, экранирующей юбки 5, испытательного стола 6, расположенного на съёмной двери 7 на червячном подъёмнике 8, защитных опорных стоек 9, внешнего датчика температуры и ЭМП 10 и блока системы управления климатическими воздействиями 11.

Система управления климатическими воздействиями (рисунок 3.17) включает в себя внутреннюю 13 и внешнюю 14 подсистемы под управлением МП 15 с программной реализацией пропорционально-интегрально-дифференцирующего (ПИД) регулятора, ПУ 3 с графическим МП 16, ЖКД 17, блоком кнопок и сенсорного управления 18, схемы слежения и контроля за температурой подсистем 19, сетевой блок питания 20 с кнопкой включения 21 на ПУ 3, автономный блок питания 22, драйверы с шаговыми электродвигателями 23 для червячных подъёмников 8 и замков 24 съёмной двери 7, а также схемы интерфейса для

подключения внешнего персонального компьютера (ПК) 25 через Ethernet-модуль 26.

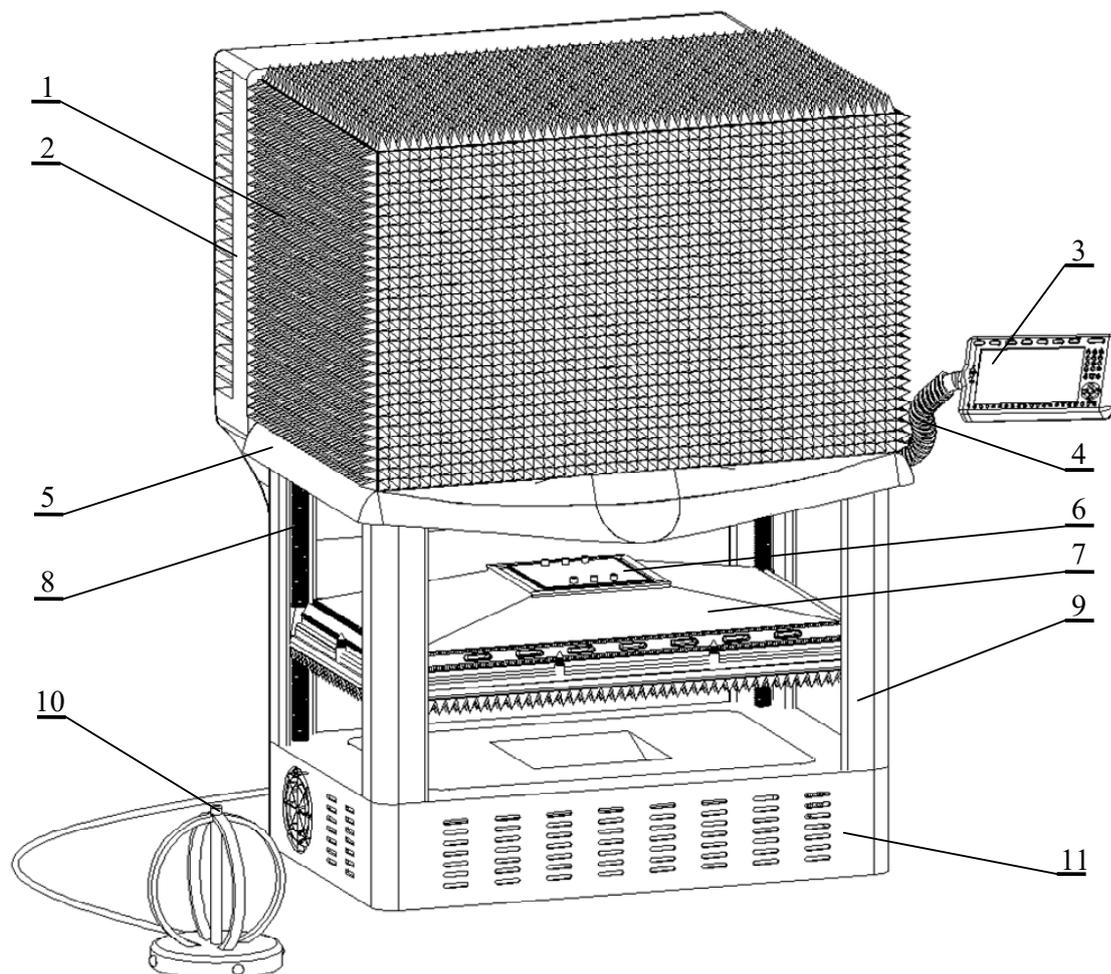


Рисунок 3.16 – Изометрический вид климатической экранированной камеры

В схемы стандартного включения головного 15 и графического 16 МП входят энергонезависимая память и запоминающие устройства с произвольной выборкой 27. Внешняя подсистема 14 состоит из модулей 28, которые располагаются между внешней поверхностью испытательного контейнера 12 и поверхностью внутренней оболочки экранирующего корпуса 29.

Модули 28 содержат термоэлектрические преобразователи (ТЭП) в виде элемента Пельтье (ЭП) и плоского нагревательного элемента (ПНЭ), а также датчики температуры (ДТ), информация с которых поступает непосредственно в МП 15, а управление элементами осуществляется сигналами широтно-импульсной мо-

дуляции (ШИМ) от группы МК 30 через реверсивные преобразователи 31.

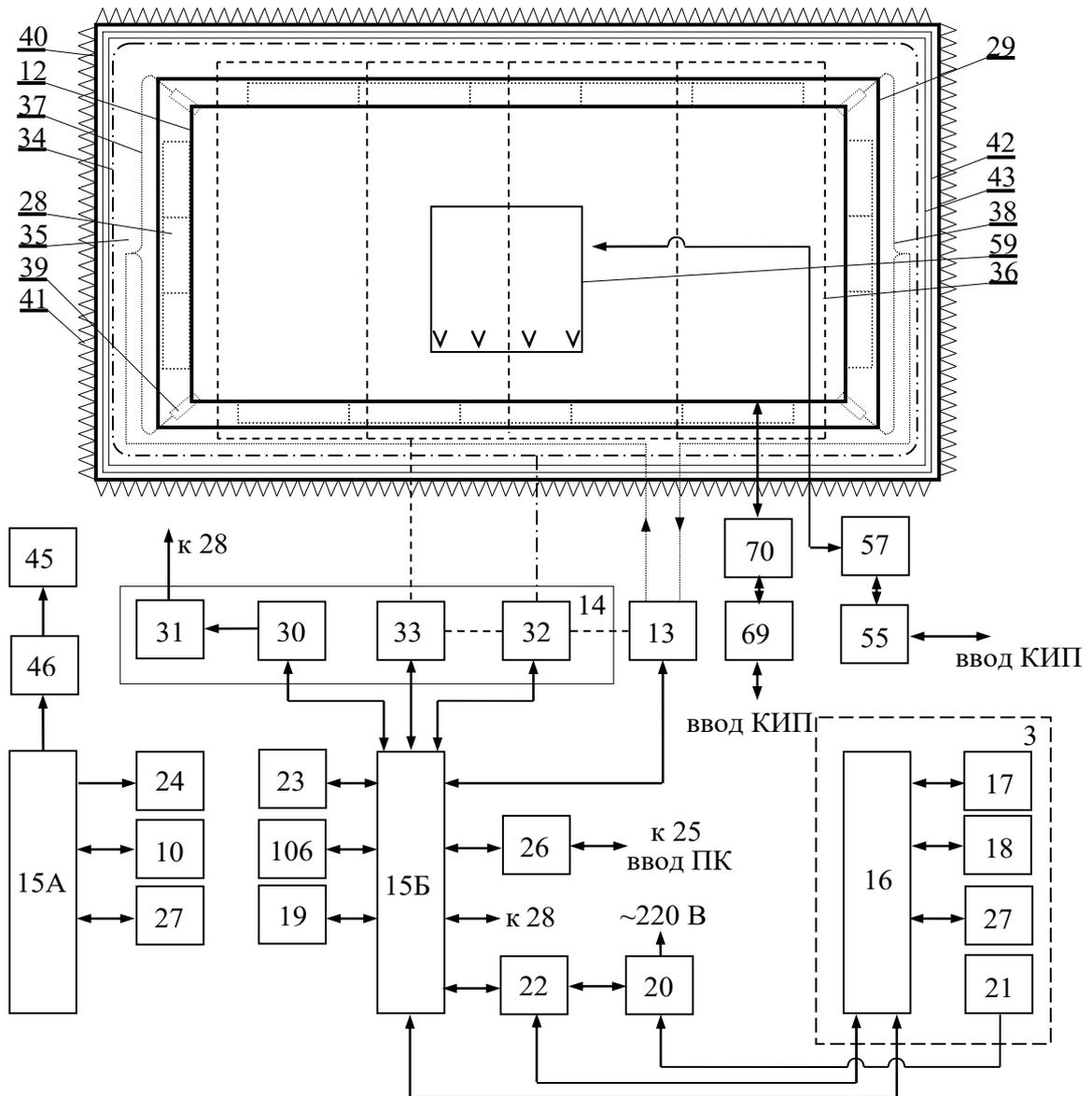


Рисунок 3.17 – Структурная схема устройства для управления климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера

Охлаждение модулей производится посредством активной 32 и пассивной 33 систем. Активная система охлаждения 32 содержит холодильную машину, теплообменник (испаритель) 34 которой располагается в полости 35 экранирующего корпуса, а пассивная система 33 выполнена замкнутым контуром из полых металлических трубок 36, в которых посредством компрессора

циркулирует воздушный поток, обеспечивая необходимую рабочую температуру модулей, а также заданную температуру экранирующего корпуса. Внутренняя подсистема климат-контроля 13 содержит воздушную магистраль входящего 37 и исходящего 38 воздушных потоков из испытательного контейнера 12 с воздушными электрическими вентилями 39, испаритель, парогенератор, накопитель с ЭП и ПНЭ, датчиками температуры, влажности и давления воздуха, рециркуляционный вентилятор и компрессор для циркуляции воздуха через испытательный контейнер 12.

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

Внешний датчик температуры и ЭМП 10 выполнен в виде отдельного устройства (см. рисунок 3.16) и содержит цифровые датчики. Датчик ЭМП состоит из антенн E - и H -составляющих поля, сигнал с каждой из которых через входной контур подаётся на собственный логарифмический усилитель и затем оцифровывается контроллером. В МК также поступает сигнал от цифрового ДТ. Информация о температуре и ЭМП от МК подаётся на преобразователь оптоволоконной связи, а из него в блок управления климатическими воздействиями, в частности на МП 15. При необходимости информация отображается на ЖКД 16.

Радиаторный блок 2 (рисунок 3.18) выполнен из металлического материала с высокой теплопроводностью (не менее $200 \text{ Вт/м}\cdot\text{К}$), имеет закрытые охлаждающие ребра 44, через кото-

рые циркулирует воздушный поток посредством четырех вентиляторов 45 с собственной схемой управления. Также радиаторный блок имеет экранированные полости для размещения в них электрических связей 47 и элементов силовой электроники 48 внутренней и внешней подсистем системы управления климатическими воздействиями 49. Между радиаторным блоком и экранирующим корпусом расположены обеспечивающие жесткость конструкции, полые экранирующие трубы из проводящего материала, в которых находятся электрические связи 50, воздушные магистрали 51 и трубы теплообменника 52 внутренней и внешней подсистем системы управления климатическими воздействиями.

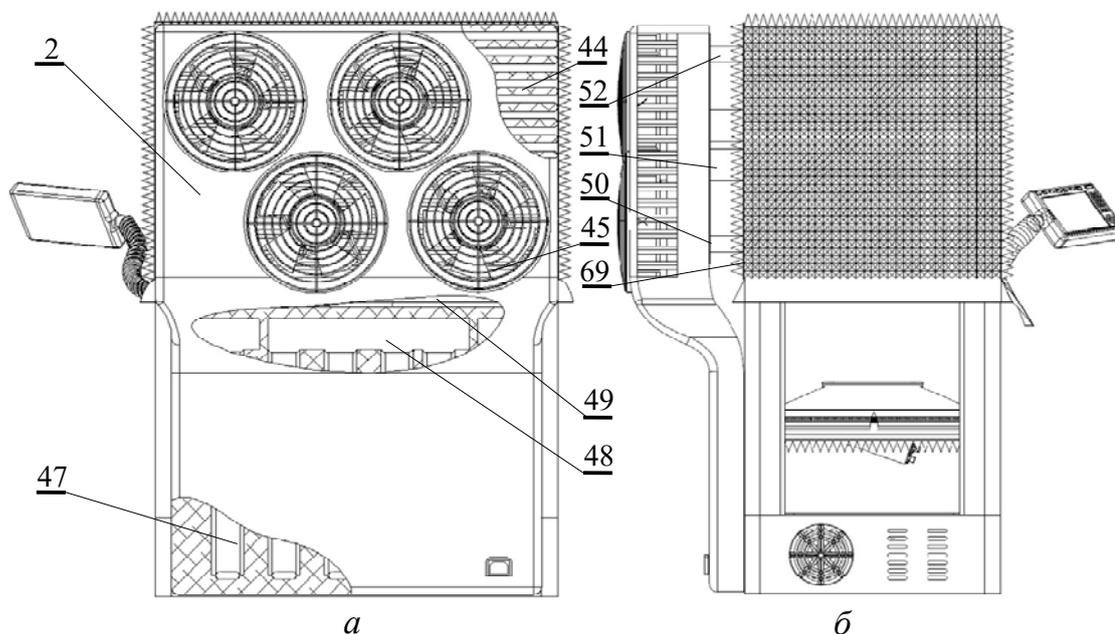


Рисунок 3.18 – Вид климатической экранированной камеры сзади (а) и слева (б)

Съемная дверь 7 (рисунок 3.19) располагается на червячных подъемниках 8, которые полностью вручную выкручиваются, чтобы дверь можно было при необходимости полностью снять. Дверь выполнена из металлического материала с высокой тепло- и электропроводностью. Внутренняя 53 и внешняя 54 стенки двери при её закрытии образуют оболочку замкнутого экранирующего корпуса 1. На внешней стороне внешней стенки располагаются РПМ 41 и соединители электрического ввода 55 для КИП. В полости между внутренней 53 и внешней 54 стенками располагают-

ся материалы, аналогичные тем, что используются в экранирующем корпусе, и помехозащитные фильтры электрического ввода, а также часть контура 36 внешней пассивной системы охлаждения, выполненной из металлических полых трубок, по которым циркулирует воздушный поток. На внутренней поверхности съемной двери 7 находится испытательный стол 6, который соответствует размерам ПП [34, 35] и имеет электрические соединители 58 внутри испытательного контейнера, расположенные на испытательном столе 6, для подключения ИО и электрические соединители снаружи 55, расположенные на защитной крышке 60, для подключения КИП.

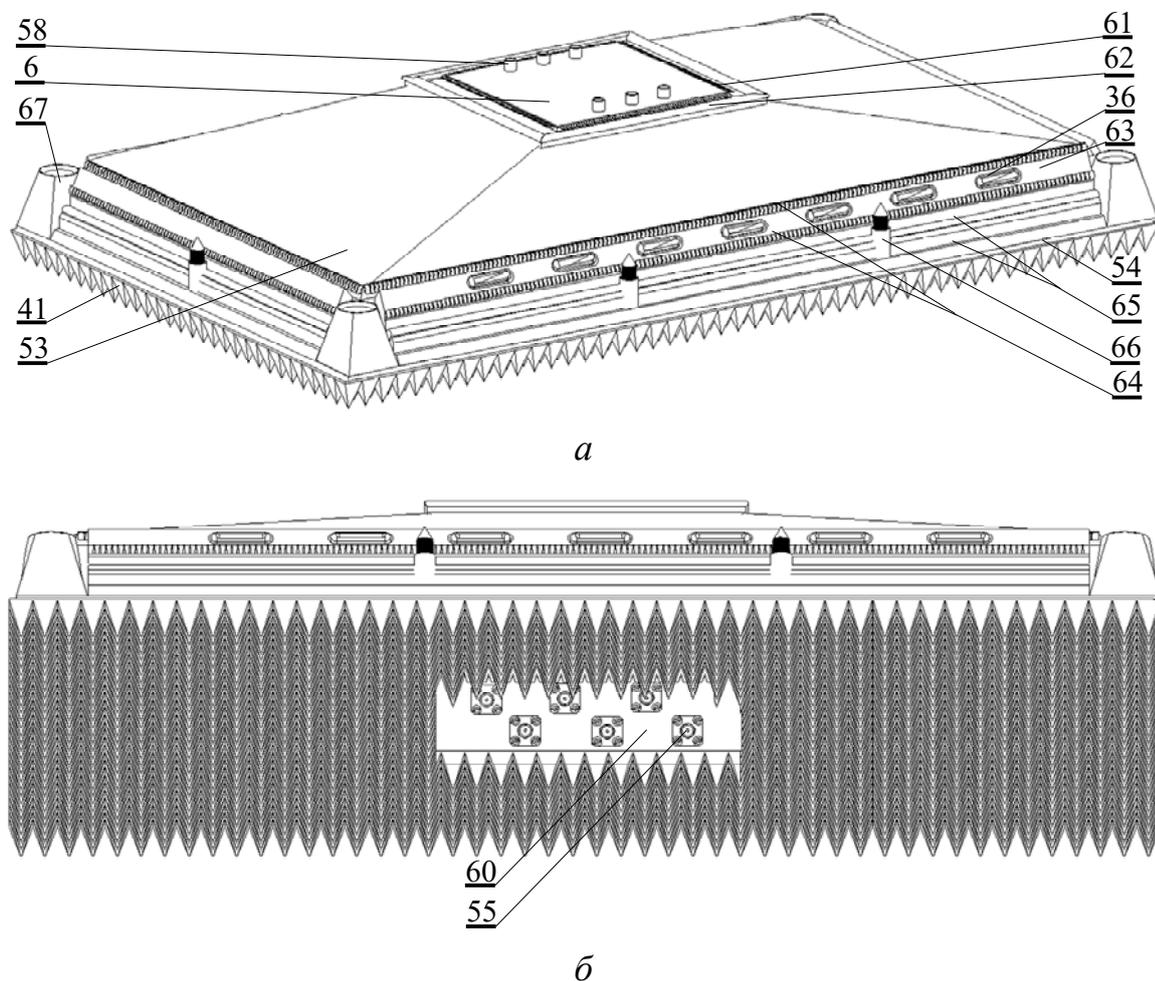


Рисунок 3.19 – Вид сверху съемной двери (а)
и вид спереди модуля электрического ввода (б)

Между испытательным столом 6, на который помещается ИО, и внешней стороной внутренней стенки двери 53 размещены

модули внешней подсистемы климатического управления. По периметру испытательного стола припаяны экранирующие 61 и герметизирующие 62 прокладки. Жесткость конструкции двери обеспечивается за счёт основания 63, которое представляет собой раму из металлического материала с треугольным поперечным сечением. По периметру рамы сделаны прорези для экранирующих 64 и герметизирующих 65 прокладок и вставок, а также полые цилиндрические выступы для винтовых стержней замка 66. В углах основания рамки имеются втулки, выполненные в форме пирамиды, с резьбовым отверстием для червячных подъемников 67.

Принцип работы КЭЖ заключается в следующем. ИО помещается на испытательный стол 6 и подключается к соединителям 58. При необходимости испытательный стол заменяется на ПП, на которой располагается ИО, например ИС. После закрытия двери ИО оказывается внутри испытательного контейнера. Возбуждение электромагнитного поля внутри испытательного контейнера, выполненного в виде ТЕМ-камеры, происходит при помощи генератора, подключенного к коаксиальному соединителю, через СВЧ-кабель, расположенный внутри камеры.

Равномерность поперечной составляющей E -поля обеспечивается при помощи геометрических размеров поперечных сечений корпуса и центрального проводника ТЕМ-камеры. Измерение помехоэмиссии проводится при подключении к СВЧ-соединителю измерительного приемника.

КЭЖ предназначена для исследований и испытаний объектов, представляющих собой отдельный компонент или небольшое устройство РЭА, на ЭМС с одновременным контролируемым воздействием окружающей среды, в частности для испытаний на помехоустойчивость объекта к совместным воздействиям контролируемых температурных полей внутри испытательного контейнера, а также измерения тепловых эмиссий при электромагнитном воздействии или тепловых и электромагнитных эмиссий от ИО, находящегося при заданном значении влажности воздуха внутри испытательного контейнера.

3.5.3 Устройство для проведения исследований в области биомедицины

КЭЖ для биологических исследований [140, 167] аналогична вышеописанной КЭЖ для исследования РЭС, но отличается конструктивным исполнением испытательного стола [164] (рисунок 3.20). Кроме того, несколько отличается схемотехническая часть устройства управления, а также добавлено устройство видеонаблюдения за исследуемым БО [165].

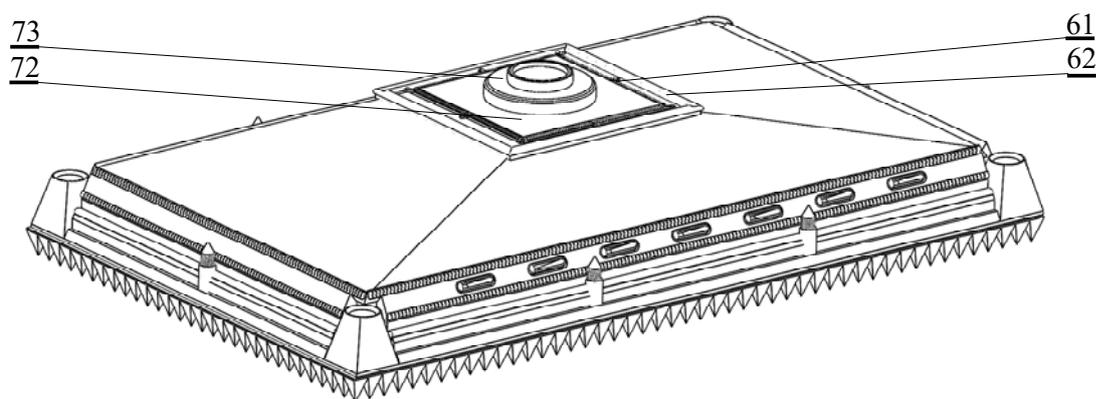


Рисунок 3.20 – Вид сверху съемной двери со столом для биологического объекта

Стол для электромагнитных исследований БО включает основание 72, выполненное в виде металлической плиты толщиной 2 мм, которая соответствует размерам 100×100 мм. На поверхности основания расположен корпус цилиндрической формы 73 из неметаллического материала. Цилиндрическая форма выбрана в результате проведенного анализа частотной зависимости $|S_{11}|$ для разных форм конструкций и материалов корпуса. Максимальное значение $|S_{11}|$ в диапазоне частот до 2 ГГц для цилиндрической формы корпуса не превышает минус 20 дБ, тогда как для идентичных размеров пирамидальной формы корпуса оно составляет минус 15 дБ. Предметный стол 71 (рисунок 3.21) выполнен из прозрачного материала в виде полого цилиндра с П-образным продольным сечением и расположен таким образом, что его внутренняя полость находится со стороны объектива 74 оптической системы.

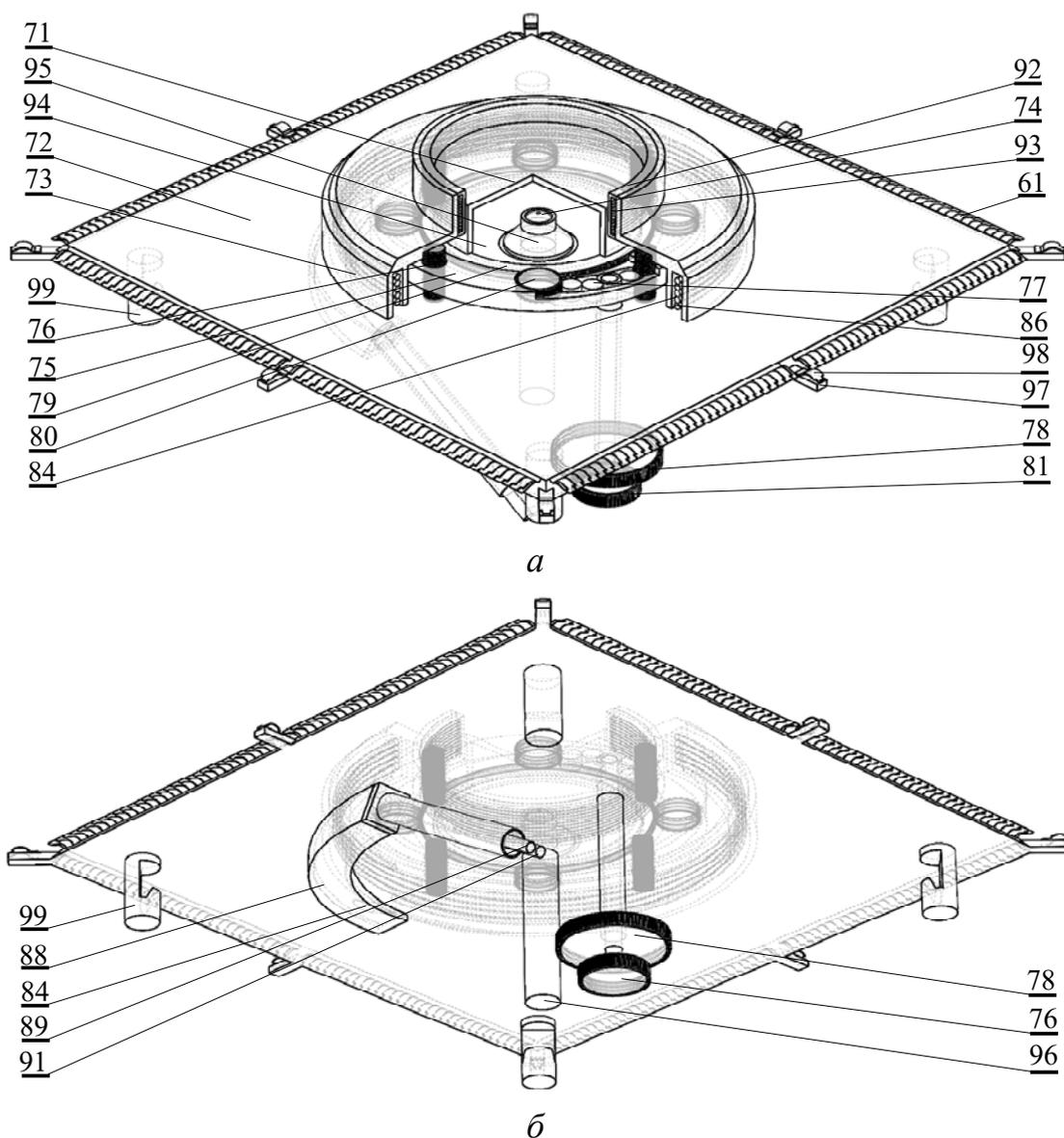


Рисунок 3.21 – Вид сверху (а) и снизу (б) стола для исследования биологических объектов

Лифтовая поворотная система позволяет поднимать или опускать предметный стол 71 при помощи кольца вертикального скольжения 75, четырех червячных шестеренок 76 с червячной передачей 77, расположенной в полости кольца вертикального скольжения 75. Червячная передача 77 имеет полу вертикальную управляющую ось с зубчатым наконечником 78, проходящую через отверстие в основании 72, и позволяет круговым вращением поднять или опустить предметный стол 71. Поворот предметного стола 71 на заданный угол осуществляется при помощи поворотного кольца 79 по направляющему пазу с внутренней стороны кольца вертикального скольжения 75, четырех ше-

стеренок 80, червячной передачи 77 и вертикальной управляющей оси с зубчатым наконечником 81, расположенной во внутренней полости вертикальной управляющей оси 78.

Экранированные от ЭМП ДТ 82 (рисунок 3.22) и датчики напряженности электрического поля 83 располагаются внутри корпуса 73. Электрическое соединение с датчиками осуществляется проводниками через отверстие 84 в основании 72. Цифровые сигналы с ДТ подводятся к МП 15 через схему преобразования 85. Датчики напряженности электрического поля 83 имеют выход на внешний вход КИП 56 через соединители 55, расположенные на корпусе модуля электрического ввода 60 на съемной двери 8, а также выход на расположенную в полости съемной двери 8 возле основания 72 внутреннюю схему, содержащую логарифмический усилитель 86 и МК с аналого-цифровым преобразователем (АЦП) 87. Через отверстие 84 в основании 72 с защитным кожухом 88 внутрь корпуса 73 вводится трубка 89 для подачи питательных веществ БО от медицинского резервуара 90 и световод бокового свечения в защитном кожухе 91. В корпусе 73 также имеется плавное скругление, переходящее к крепежу трубки 92 и световода бокового свечения без защитного кожуха 93. Это скругление предназначено для перехода из большего в меньший диаметр цилиндрического корпуса 73.

Световод бокового свечения 93 совместно с конусным отражателем 94 обеспечивает равномерное подсвечивание предметного стола 71. В центре металлического основания 72 имеется отверстие, через которое подводится и закрепляется конусным кольцом 95 оптоволоконный кабель 96 оптической системы, с одной стороны которого располагается объектив 74, направленный вертикально на предметный стол 71. На боковой поверхности металлического основания 72 размещены металлические экранирующие прокладки 61, а также металлические накладки 97 с пружинами электрического контакта 98, необходимые для повышения ЭЭ корпусом посредством перекрытия щели и плотного прижатия металлического основания 72 фиксаторами 99 на замки, расположенные во внутренней полости съемной двери 8.

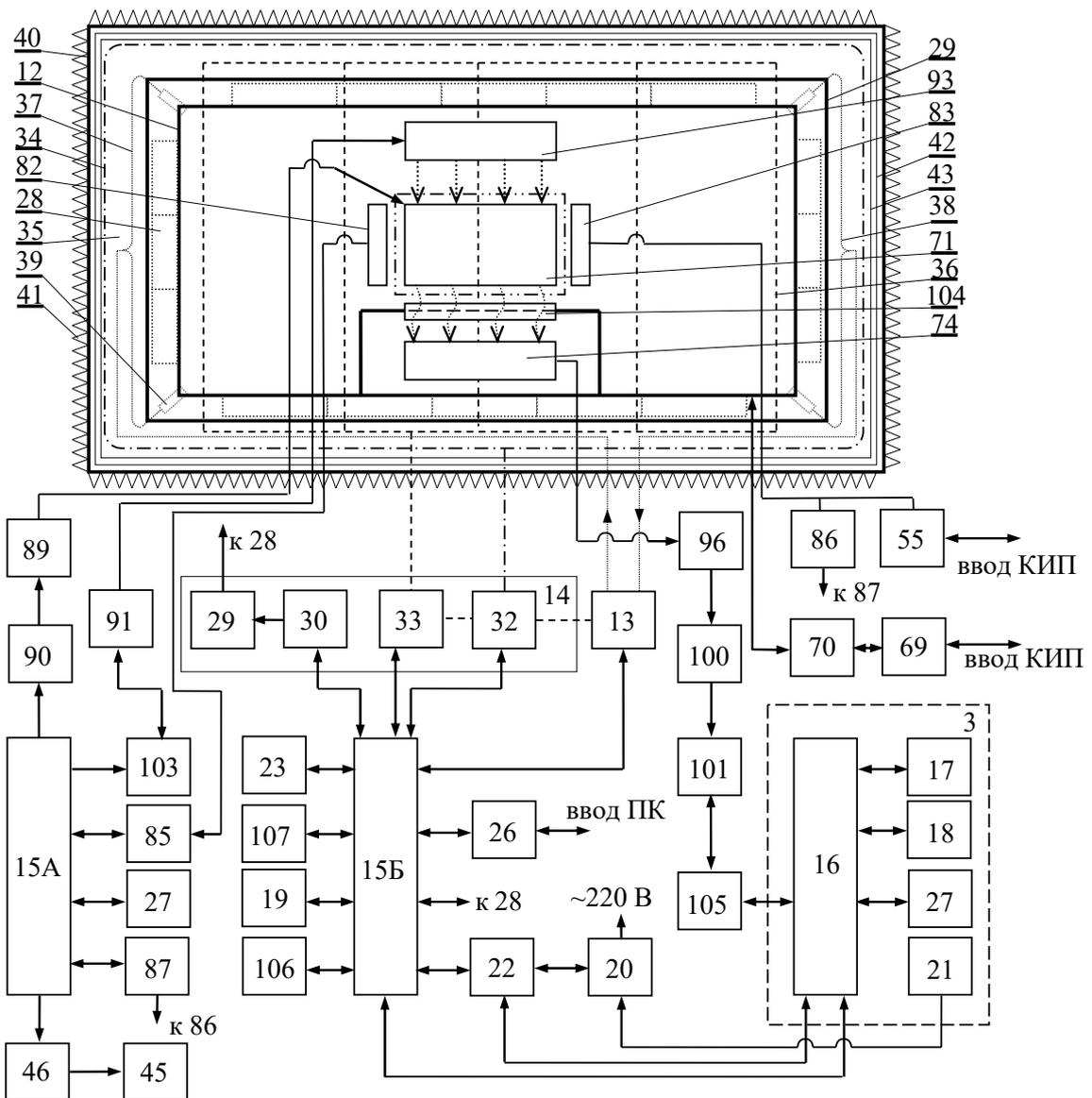


Рисунок 3.22 – Структурная схема управления климатическими воздействиями внутри испытательного контейнера

Также в полости находятся модули внешней подсистемы климат-контроля, которые управляются МК. По периметру съемной двери и испытательного стола припаяны экранирующие 61, 98 и герметизирующие 62 прокладки для повышения ЭЭ корпусом.

Элементы оптической системы (рисунок 3.23) объектив 74, оптоволоконный кабель 96 и окуляр 100 идентичны эндоскопу, но отличаются подстройкой фокусного расстояния l' между окуляром 100 и видеоматрицей видеокамеры 101. Подстройка фокусного расстояния до БО 102 позволяет отрегулировать четкость изоб-

ражения при неподвижном предметном столе 71 на расстоянии L от ТЕМ-камеры. Нижняя точка спуска лифтовой поворотной системы определяется характеристиками оптической системы, а именно фокусным расстоянием и расстоянием до предметного стола l .

Размер апертуры объектива D должен иметь относительно малое значение для минимизации диаметра отверстия в основании 72, так как большой диаметр может повлиять на равномерность поля и ЭЭ КЭК.

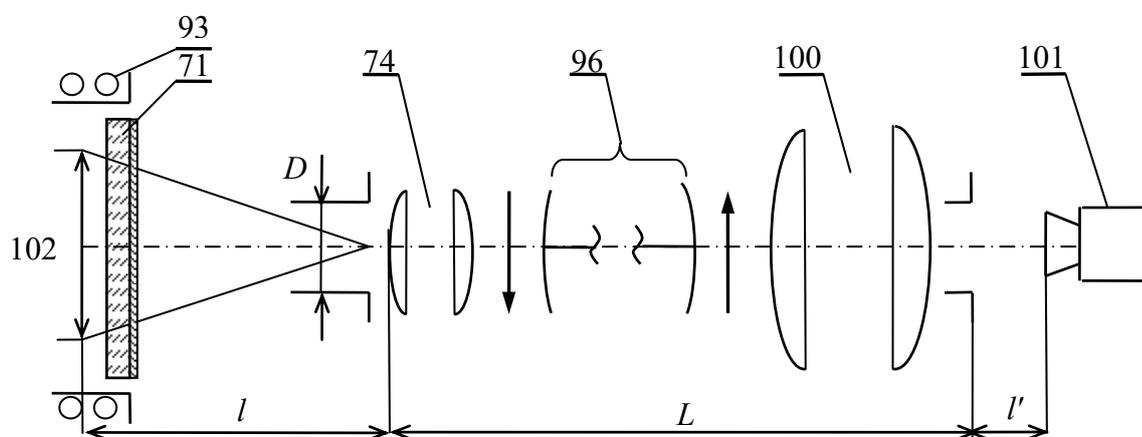


Рисунок 3.23 – Структурная схема оптической системы стола для биомедицинских исследований

Объектив оптической системы эндоскопического типа расположен вертикально в отверстии металлического основания. Над отверстием размещается БО на поверхности прозрачного предметного стола с равномерной подсветкой его стенок световодом видимого свечения, расположенным в корпусе из неметаллического материала. Таким образом, можно получить изображение БО внутри КЭК, ТЕМ- или ГТЕМ-камер, осуществляя видеонаблюдение результатов непрерывного воздействия на него электрического поля в режиме реального времени с минимальными искажениями поля.

Принцип работы КЭК для биомедицинских исследований заключается в следующем. БО 102 помещается на предметный стол 71 внутри испытательного контейнера. При необходимости к жи-

вым исследуемым объектам через трубку 89 могут подводиться питательные вещества из медицинского резервуара 90 (см. рисунок 3.22).

Световодом бокового свечения 93 от внешнего источника света 103 через кабель 91, который вводится в корпус устройства видеонаблюдения сквозь угловое отверстие 84 (обеспечивающее минимальный изгиб) в основании 72, подсвечивается БО, расположенный на предметном столе. Световой поток, подсвечивая БО, проходит через экранирующее стекло 104, попадая на объектив 74 короткофокусной оптической системы, содержащей группу линз. Сфокусированное изображение через волноводный ретранслятор 96 и окуляр 100 попадает на видеоматрицу 101, после чего сигнал обрабатывается процессором 105 и подводится к графическому МП 16, с которого изображение транслируется на ЖКД 17. При необходимости предметный стол может быть поднят или опущен посредством сигналов от МП 15 с помощью схемы 106. Сигнал также может быть записан на твердотельный накопитель 107 или выведен на ПК 25 при помощи МП 15. Возбуждение электромагнитного поля внутри испытательного контейнера, выполненного в виде ТЕМ-камеры, происходит при помощи генератора 68, подключенного к коаксиальному соединителю 69 камеры через высокочастотный кабель 70.

Равномерность E -поля обеспечивается при помощи геометрических размеров поперечных сечений корпуса и центрального проводника ТЕМ-камеры.

Представленная КЭК со столом для биомедицинских исследований позволяет вести видеонаблюдение в режиме реального времени и/или видеозаписи на цифровой носитель результатов воздействия электромагнитного поля на БО, находящийся в заданных условиях окружающей среды. Биомедицинский стол может использоваться как отдельное устройство в ТЕМ- или ГТЕМ-камере (рисунок 3.24).

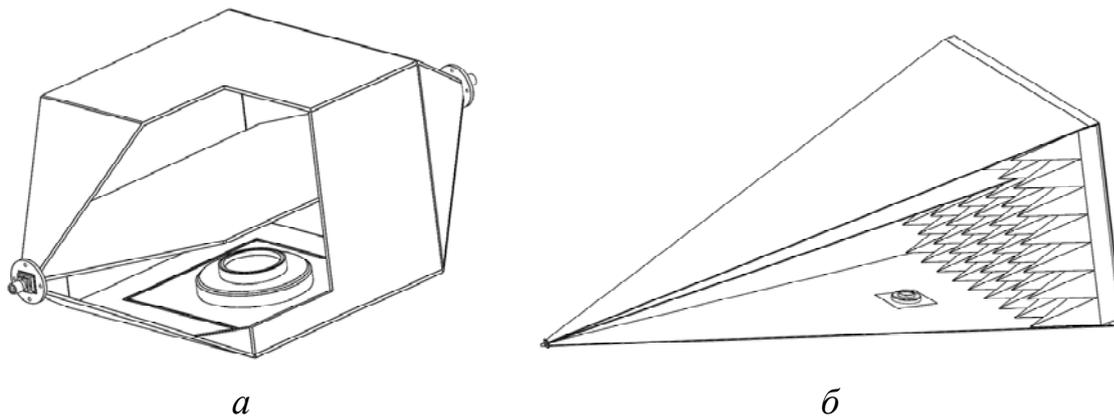


Рисунок 3.24 – Примеры расположения стола для биомедицинских исследований внутри ТЕМ-камеры (а) и ГТЕМ-камеры (б)

3.5.4 Испытательный контейнер

Основной частью КЭК является испытательный контейнер, выполненный в виде ТЕМ-камеры, где осуществляются климатические и электромагнитные воздействия на ИО. Соответственно ТЕМ-камера должна удовлетворять условиям возбуждения поперечной составляющей E -поля в широком диапазоне частот с минимальным рассогласованием КИП, а также иметь небольшие габариты для поддержания заданного температурного поля и влажности воздуха в её внутреннем объеме. В качестве испытательного контейнера используется ТЕМ-камера с оптимальными геометрическими параметрами и высотой ИО 20 мм при $KCBH < 1,22$ в диапазоне частот до 2 ГГц (см. подразд. 3.1). Возбуждение электромагнитного поля в ТЕМ-камере происходит при подаче на её вход воздействия от внешнего генератора. Контроль и поддержание заданной температуры внутри ТЕМ-камеры осуществляют две подсистемы. Термовоздушная подсистема обеспечивает приток и циркуляцию через ТЕМ-камеру воздуха с заданной температурой и влажностью. Термоконтактная подсистема обеспечивает заданную температуру стенок ТЕМ-камеры. Работа двух подсистем синхронизирована головным МП для создания климатических условий, близких к реальным условиям эксплуатации РЭА.

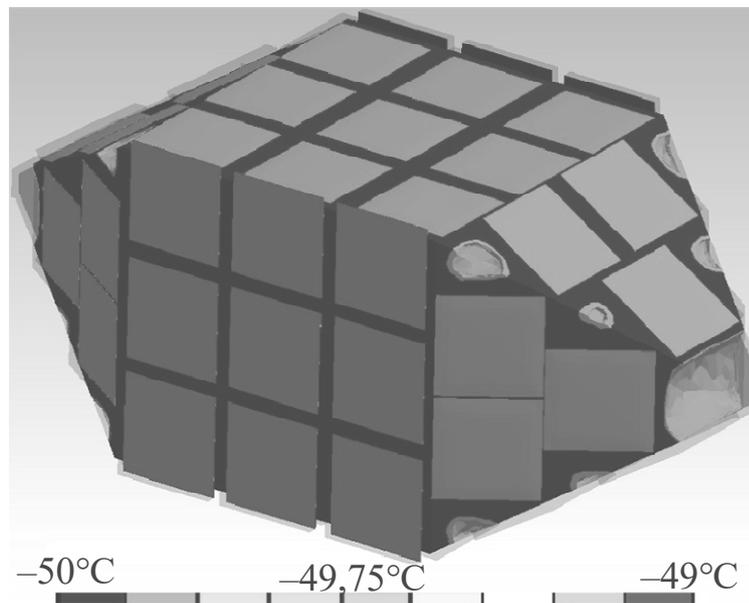
Выполнены приближенный расчет и моделирование термоконтактной подсистемы КЭК. Исходными данными для расчета

являлись максимальный объём (3,5 дм³) и расход охлаждающего газа, равный изменению максимального объема за час. В качестве охлаждающего газа служит сухой воздух и воздух, насыщенный паром, при температуре +150 °С. Максимальная холодопроизводительность системы при охлаждении от +150 до минус 50 °С составила около 1 кВт. Выполнено моделирование ТЕМ-камеры с ЭП (ТЕС1-12712S), расположенными по всей ее поверхности [155]. Вычисления температурного поля (рисунок 3.25) проводились в диапазонах от +26 до минус 50 °С и от минус 50 до +150 °С, что имитировало полный режим работы КЭК. В результате получены приближенные значения максимальной мощности ЭП (0,01 Вт/мм²) для полного режима работы камеры с максимально возможным количеством ЭП (60 шт. с габаритами ЭП 40×40 мм). Точность поддержания температуры в объеме размещения ИО составила ±0,5 °С, время достижения заданного диапазона температур – 2800 с.

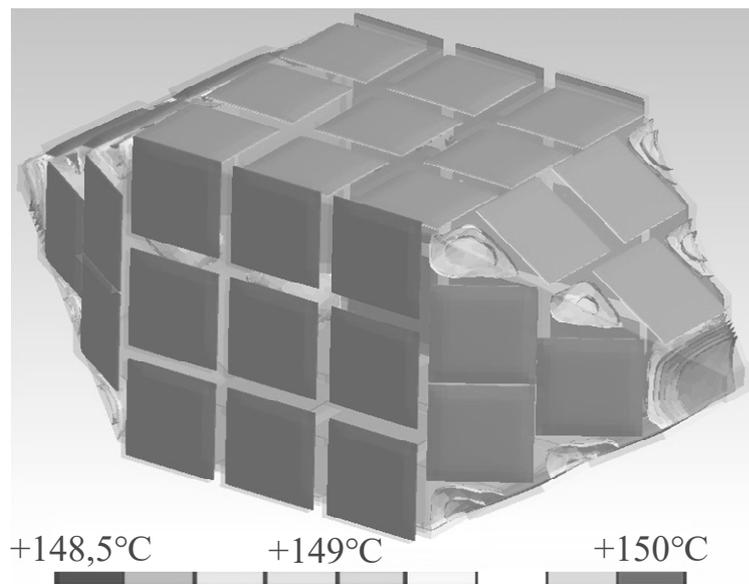
Моделировалось термическое расширение и сжатие металла в результате нагрева и охлаждения конструкции ТЕМ-камеры. В результате моделирования получено максимальное расширение (0,4 мм) и сжатие (0,2 мм) металла, что оказало несущественное влияние (±1 дБ) на параметр $|S_{11}|$.

На основе разработанных моделей и лабораторного макета создана электродинамическая модель ТЕМ-камеры, отличающаяся от исходной наличием входных и выходных отверстий для внутренней термовоздушной системы, обеспечивающей циркуляцию воздушного потока заданной температуры через внутренний объем ТЕМ-камеры. Отверстия расположены в углах корпуса, что позволяет минимизировать неравномерность поля в ТЕМ-камере. Вычислены частотные зависимости $|S_{11}|$ для диаметров отверстий от 1 до 3 мм, которые существенно не отличались. При этом частотные зависимости $|S_{11}|$ для ТЕМ-камер с отверстиями диаметром 3 мм в углах корпуса и без отверстий совпадали. Это говорит о минимальном влиянии отверстий диаметром 1–3 мм на равномерность поля внутри ТЕМ-камеры. Таким образом, трубки с

диаметрами 1–3 мм могут быть использованы для термовоздушной системы при их расположении в углах ТЕМ-камеры.



a



б

Рисунок 3.25 – Поле температур во внутреннем объеме ТЕМ-камеры при её охлаждении до минус 50 °С через $t = 700$ с (*a*) и последующем нагреве до +150 °С через $t = 2800$ с (*б*)

По результатам моделирования разработан терморегулятор для термоконтактной системы.

3.5.5 Автоматизированная система управления температурой поверхности испытательного контейнера

Поддержание требуемой температуры поверхности стенок испытательного контейнера в виде ТЕМ-камеры осуществляется посредством шести групп по четыре ТЭП на основе эффекта Пельтье в каждой группе. Разработаны методика и способ управления группами ТЭП [160], позволяющие поддерживать заданную температуру поверхности волновода [154]. На их основе создан терморегулятор средней мощности ТЭП [154, 156, 157] с использованием многофазного сигнала ШИМ [161, 162], подаваемого на реверсивный преобразователь [163].

Методика управления температурой поверхности волновода

Полный режим работы КЭК соответствует температурным диапазонам от +26 до минус 50 °С и от минус 50 до +150 °С. Максимальная холодопроизводительность системы при охлаждении от +150 до минус 50 °С составляет около 1 кВт. Расположение элементов Пельтье на стенках корпуса ТЕМ-камеры (рисунок 3.26) ограничено размерами ЭП (1), ДТ (2), размещаемых на ПП (3). Используются ЭП ТЕС1-12712 с максимальным током 12,5 А, тепловой мощностью 110 Вт и размерами 40×40 мм.

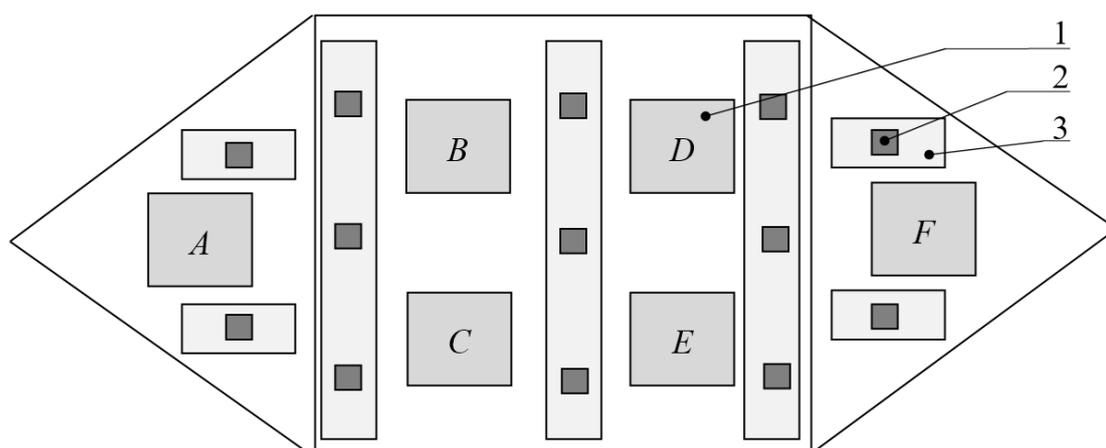


Рисунок 3.26 – Размещение термоэлектрических преобразователей и датчиков тока на поверхности ТЕМ-камеры

Прецизионные ДТ предназначены для мониторинга температуры и обеспечения обратной связи регулятора. Их располагают

таким образом, чтобы иметь точное представление о градиенте температуры на всей поверхности ТЕМ-камеры. Расположение всех элементов на камере ограничивается наличием проводных отводов питания, заземления, управления и обратной связи, что необходимо учитывать при проектировании.

Поскольку на двух пирамидальных частях ТЕМ-камеры располагается по одному ТЭП (A и F), а в центральной части – четыре ТЭП ($B-E$), то при одновременном включении всех ТЭП с одинаковым уровнем мощности невозможно достичь равномерного нагрева, поскольку на каждый ТЭП приходится разная площадь поверхности и на каждую группу ТЭП приходится разный объём внутри ТЕМ-камеры с общим максимальным объёмом $3,5 \text{ дм}^3$. Таким образом, для равномерного нагрева/охлаждения поверхности корпуса ТЕМ-камеры и её внутреннего объёма необходимо по-разному подавать электропитание на группы ТЭП. Это можно сделать, используя управляющие сигналы в виде ШИМ.

Классический ПИД-регулятор позволяет вычислить сигнал управления только одного объекта, поэтому для управления группой ТЭП и контроля температуры поверхности ТЕМ-камеры необходима распределенная система управления электропитанием ТЭП, получающая данные с ДТ. Разработана схема управления температурой поверхности корпуса ТЕМ-камеры (рисунок 3.27), включающая терморегулятор с устройством управления, предназначенный для поддержания температуры ТЭП, и реверсивный преобразователь, позволяющий менять полярность электропитания ТЭП и обеспечить необходимую среднюю мощность.

Разработан алгоритм управления распределенной системой регулирования температуры поверхности ТЕМ-камеры (рисунок 3.28). Основой алгоритма является автоматизированная система управления с обратной связью в виде программного ПИД-регулятора. Блок автоматического управления вычисляет скважность ШИМ-сигнала, управляющего ТЭП. Сначала алгоритм выполняет инициализацию программных структур, загрузку данных из ПЗУ (коэффициентов ПИД-регулятора, счетчиков, констант) и инициализацию ДТ [179–181].

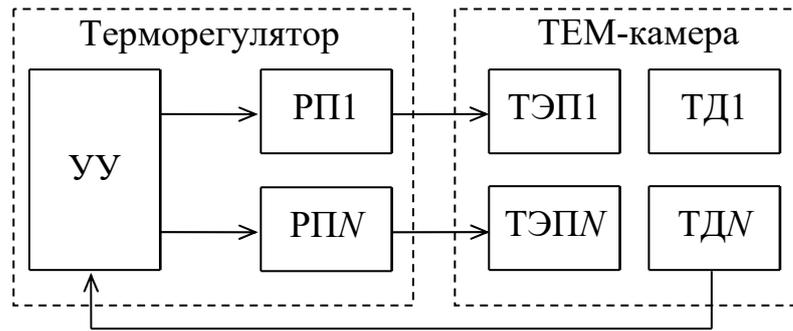


Рисунок 3.27 – Схема управления температурой поверхности ТЭМ-камеры

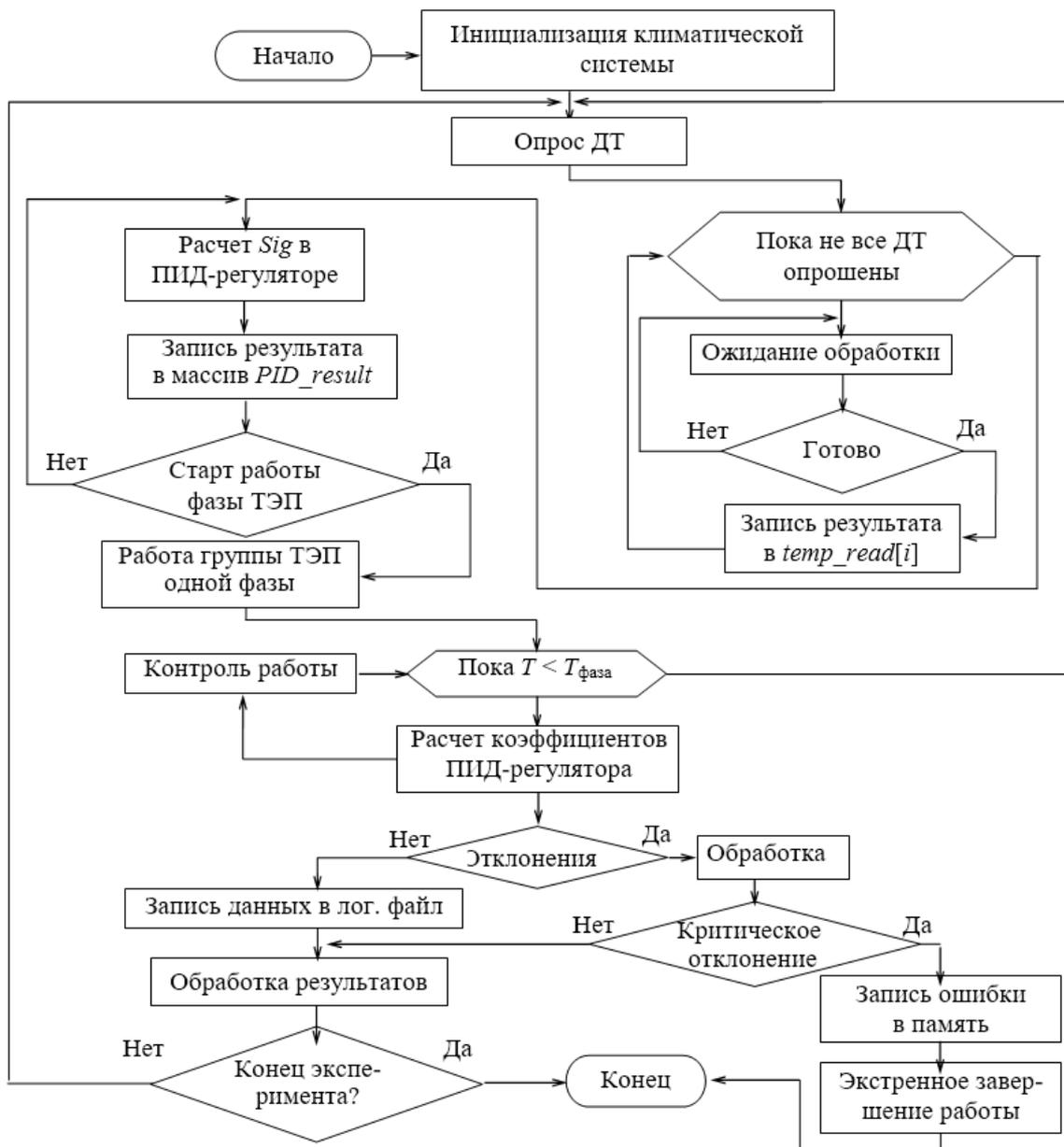


Рисунок 3.28 – Алгоритм контроля температуры климатической экранированной камеры

Далее алгоритм опрашивает ДТ и записывает результаты в массив *temp_read*. После этого блок ПИД-регулятора обрабатывает массив данных о температуре и заполняет массив *PID_result*, содержащий коэффициенты *Sig* сигнала управления ТЭП. По окончании вычислений в ПИД-регуляторе проводится подготовка к началу работы одной из групп ЭП: загрузка параметров, определяющих длительность каждой фазы, порядок работы фаз, условия начала и окончания работы фазы электропитания. Весь процесс функционирования КЭК контролируется для выявления ошибок и сбоев, которые регистрируются и передаются оператору.

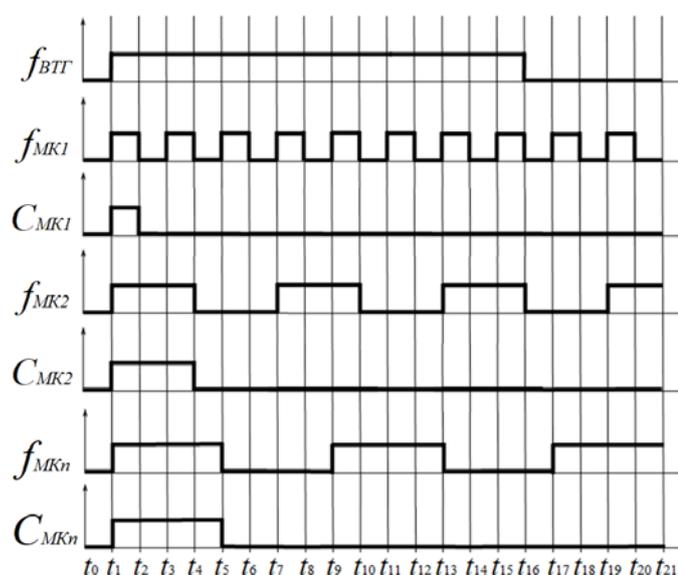
Способ и устройство синхронизации группы микроконтроллеров

КЭК содержит МП и МК, работающие на разных тактовых частотах. Кроме того, для получения большого количества ШИМ-сигналов необходима группа из нескольких МК. Поэтому требуется синхронизация вычислительных устройств, работающих на разных системных частотах, а также контроль синхронной работы и общего периода работы всех устройств.

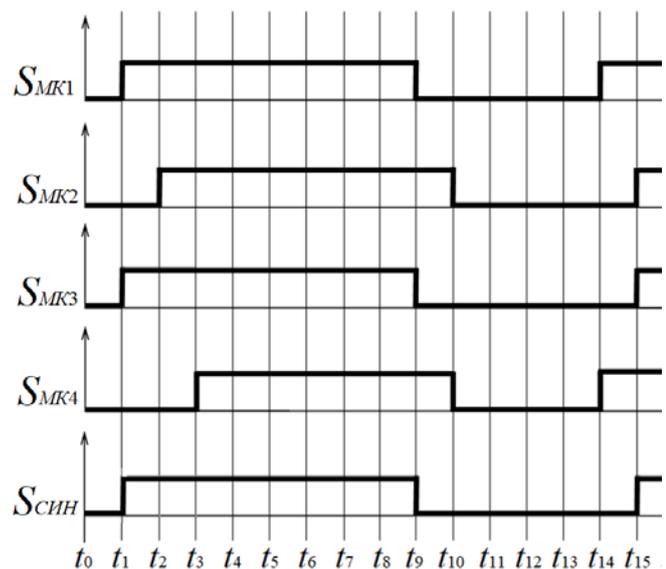
Разработан способ [150, 152, 153], позволяющий синхронизировать работу различных вычислительных систем, таких как МК, системы на кристалле, программируемые логические ИС, системы в корпусе и др. Способ обеспечивает выполнение каждым МК в заданном промежутке времени отдельной задачи (кода) синхронно в группе МК разной архитектуры вне зависимости от частоты работы каждого МК. Благодаря общей шине сброса МК можно восстановить синхронную работу в случае сбоя. Использование общей шины сброса счетчика импульсов синхронизации исключает накопление ошибки при подсчете и минимизирует время ожидания готовности всех МК перед выполнением синхронной работы.

Способ синхронизации заключается в следующем. Каждый *n*-й МК работает на своей частоте $f_{МКn}$, заданной внутренним или внешним тактовым генератором от внутреннего или внешнего кварцевого резонатора (Z_n). Частота внешнего тактового генератора (ВТГ) $f_{ВТГ}$ задается из условия $f_{ВТГ} < f_{МКn}$, поскольку МК должен подсчитывать количество сигналов синхронизации от

ВТГ (рисунок 3.29,*a*). На выходе ВТГ, в качестве которого используется схема часов реального времени, устанавливается заданная частота прямоугольных (тактовых) импульсов $f_{ВТГ}$, которые поступают на один из входов порта каждого МК. При этом вход МК должен поддерживать обработку внешних прерываний, поскольку она ведет подсчет сигналов синхронизации.



a



б

Рисунок 3.29 – Подсчет сигналов синхронизации (*a*) и временная диаграмма сигналов синхронной работы (*б*) группы микроконтроллеров

В каждом МК реализован счетчик сигналов синхронизации $C_{МК}$. Как только $C_{МК}$ достигает установленного значения, про-

исходит вызов внешнего прерывания. Таким образом, все МК ведут один подсчет импульсов от ВТГ и значения счетчиков $S_{МК}$, синхронизируемых МК, всегда равны.

При срабатывании внешнего прерывания МК вызывается функция, соответствующая данному прерыванию и выполняющая инкрементирование переменной $S_{МК}$ счетчика принятых сигналов ВТГ в памяти МК. В результате происходит подсчет принятых сигналов синхронизации от ВТГ каждым МК в группе. Когда переменная счетчика в памяти МК, отвечающая за подсчет сигналов синхронизации (рисунок 3.29,б), достигнет заданного значения, срабатывает отвечающее за начало синхронной работы внутреннее прерывание МК, которое сбрасывает счетчики всех других МК синхронизируемой группы ($S_{МК1}-S_{МК4}$).

Событие $S_{син}$ в момент времени t_3 означает, что все МК готовы к синхронной работе, поскольку в данный момент времени поступил последний сигнал синхронной работы от $S_{МК4}$. При этом последовательно происходит обнуление счетчика $S_{МК}$ и запуск счетчика синхронной работы группы МК продолжительностью с t_3 по t_9 .

Счетчик синхронной работы может быть реализован аппаратным таймером МК либо программно в памяти МК. В момент, когда хотя бы один МК из группы завершает свою работу (t_9), наступает окончание синхронной работы (рассинхронизация группы МК): выход из функции синхронной работы группы МК; сброс значения счетчика периода синхронной работы; переход к подсчету сигналов синхронизации. Так, на рисунке 3.29,б видно, что $S_{МК1}$ и $S_{МК3}$ начали и завершили работу одновременно, а другие МК еще продолжали работать.

Так как все МК могут работать на разных системных частотах, а подсчет сигналов синхронизации осуществляется каждым из них, начало синхронной работы для каждого МК может отличаться на период времени t_S между готовностью первого и последнего МК в группе. Предложенный способ синхронизации может работать по схеме Master-Slave (рисунок 3.30,а). Когда в системе присутствует ведущее устройство, в задачу которого входит контроль и управление процессом синхронизации (вклю-

чать/выключать сигнал синхронизации ВТГ и изменять частоту генерации сигнала синхронизации ВТГ, выполнять программный и/или аппаратный сброс синхронизируемых МК и т. д.), все операции выполняются за счет прямого обращения Master к ВТГ посредством интерфейса передачи данных с использованием вывода CMD (см. рисунок 3.30,а). Таким образом, схема синхронизации Master-Slave предоставляет дополнительные инструменты, что позволяет гибко настроить синхронизацию.

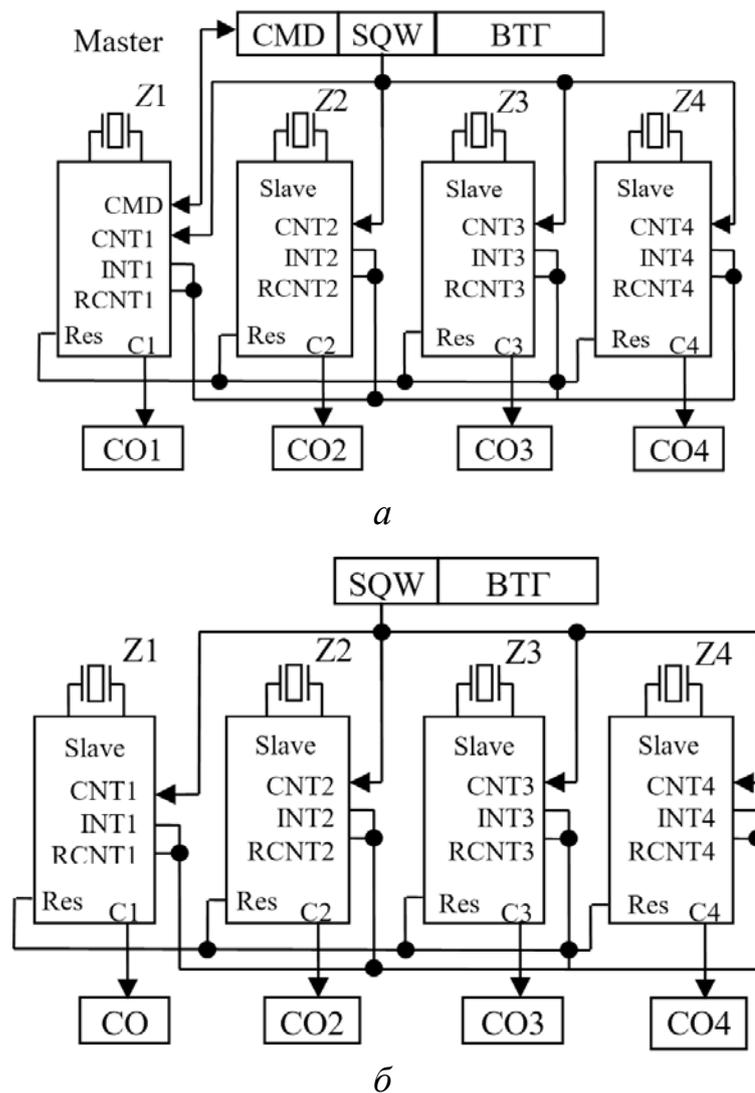


Рисунок 3.30 – Структурные схемы устройства синхронизации микроконтроллеров Master-Slave (а) и Slave-Slave (б)

Схема Slave-Slave (рисунок 3.30,б) предполагает отсутствие Master (ведущего устройства), в данном случае все синхронизируемые МК в равной степени выполняют общую работу. Настройка

ВТГ осуществляется перед началом работы. Каждый МК принимает сигнал синхронизации, поступающий на вывод МК CNT_n от вывода SQW ВТГ. Все МК ведут подсчет принятых сигналов, и как только значение счетчика достигнет заданного числа, вывод $RCINT_n$ инвертирует логическое состояние. Он изменяет свой логический уровень, тем самым генерируя внешнее прерывание на выводе INT_n у всех синхронизируемых МК. Функция обработки внешнего прерывания выполняет сброс счетчика сигналов синхронизации.

В результате первый МК, у которого счетчик синхросигналов достигнет установленного значения, вызовет прерывание INT_n у всех МК для сброса счетчика CNT_n , что позволит избежать накопления ошибки подсчета сигналов синхронизации каждым МК. В случае аппаратного либо программного сбоя в одном или нескольких МК все МК способны повторно синхронизироваться за счет внешнего прерывания.

Возможен аппаратный сброс всех МК. При срабатывании сброса (Reset) в одном МК все остальные МК синхронизируемой группы будут перезагружены. Данная опция применима в случае программного сбоя в одном из МК. В зависимости от причины сбоя МК может самостоятельно выполнить сброс (Reset). Если это не произойдет, ведущий МК (Master) синхронизируемой группы выполнит аппаратный сброс всех МК. Поскольку МК имеют линию (шину) сброса (Res), то при срабатывании перезагрузки (Reset) у одного МК остальные МК в группе также выполнят операцию сброса (Reset). На выводе C_n МК генерируется ШИМ-сигнал, скважность которого каждый МК регулирует самостоятельно.

Реверсивный преобразователь

Для регулирования средней мощности и возможности изменить значение и направление тока разработан реверсивный преобразователь (рисунок 3.31) [160]. Он отличается тем, что две пары активных элементов АЭ1–АЭ4 соединены относительно источника электропитания последовательно с ключевым элементом АЭ5 и позволяют управлять направлением тока через ЭП и средней

мощностью, используя один сигнал реверса (1 или 0) и один ШИМ-сигнал. Использование одного ШИМ-сигнала, управляющего элементом АЭ5, снижает риск возникновения сквозного тока через стойки мостовой схемы. Управляющие элементы УЭ1 и УЭ2 преобразуют уровень управляющего сигнала до уровня срабатывания элементов АЭ1–АЭ4. Элемент УЭ3 является преобразователем уровня ШИМ-сигнала для элемента АЭ5. Появление одновременно высокого уровня напряжения на выходе УЭ1 и УЭ2 исключается использованием линии задержки (ЛЗ) и инвертора, который также предназначен для изменения направления тока через ЭП в зависимости от режима его работы (нагрев или охлаждение). Для снижения уровня кондуктивных помех по цепям электропитания в схеме предусмотрены слаботочный Ф1 и силовоточный Ф2 фильтры.

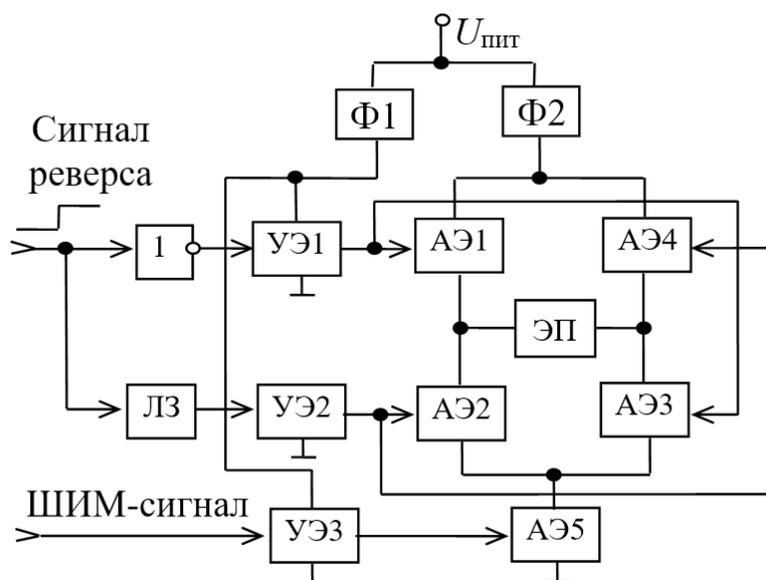


Рисунок 3.31 – Структурная схема реверсивного преобразователя для электропитания элемента Пельтье

В зависимости от электрических характеристик элементов АЭ1–АЭ5 можно управлять температурой поверхности одного и более ЭП. Управление режимом работы осуществляется сигналом реверса от МК или МП, который поступает на инвертор и ЛЗ. При поступлении на инвертор низкого уровня сигнала на элементе УЭ1 устанавливается инвертированный высокий уровень сигнала, а на элемент УЭ2 сигнал проходит через ЛЗ, значение которой

выбрано равным задержке сигнала в инверторе. Протекание тока через ЭП возможно при подаче на вход УЭЗ управляющего ШИМ-сигнала от МК или МП. Элемент УЭ1 вводит пару диагональных элементов АЭ1 и АЭ3 в режим насыщения. При этом пара диагональных элементов АЭ2 и АЭ4 находится в режиме отсечки. В зависимости от того, в каком режиме находится элемент АЭ5, через ЭП протекает ток требуемой величины, определяя мощность нагрева ЭП. Чтобы охладить эту же сторону ЭП, необходимо сменить направление тока через него. Для этого на инвертор и ЛЗ подаётся высокий уровень сигнала реверса от МК или МП. В результате пара диагональных элементов АЭ2 и АЭ4 перейдет в режим насыщения, а пара диагональных элементов АЭ1 и АЭ3 – в режим отсечки, тем самым протекание тока будет осуществляться по диагонали мостовой схемы. Для защиты от сквозных токов предусмотрена также программа, реализуемая МК, которая отключает ШИМ на время переключения сигнала реверса. Средняя мощность на нагрузке регулируется изменением коэффициента заполнения и частоты управляющего ШИМ-сигнала. Для достижения и поддержания заданной температуры ЭП в МК реализован ПИД-регулятор, выполняющий вычисление коэффициента заполнения выходного (управляющего) ШИМ-сигнала по данным о температуре ЭП. При этом на ЭП поддерживается электропитание во время нагрева и заданная температура.

На основе структурной схемы управления ЭП (рисунок 3.32,а) разработана принципиальная схема и создан терморегулятор (рисунок 3.32,б) КЭК, содержащий реверсивные преобразователи РП1, РП2, датчики тока ДТ1–ДТ3, ЭП1, ЭП2 и плату управления с группой из пяти МК АТМega2560, четыре из которых предназначены для независимого управления электропитанием ЭП через реверсивные преобразователи РП1, РП2. Значения температуры поверхности, нагреваемой/охлаждаемой группой из четырех ЭП, измеряются девятью ДТ и передаются в МК по интерфейсу связи I²C. В МК реализовано ПО, осуществляющее усреднение данных о температуре каждого ЭП в отдельности, расчёт коэффициентов заполнения ШИМ-сигналов для поддержа-

ния заданной температуры каждым ЭП и задержки по времени каждого из четырех ШИМ-сигналов относительно друг друга.

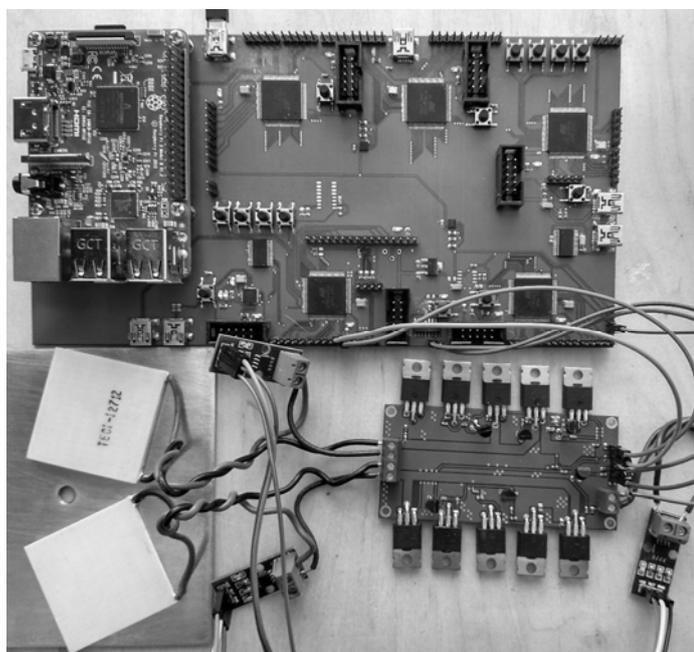
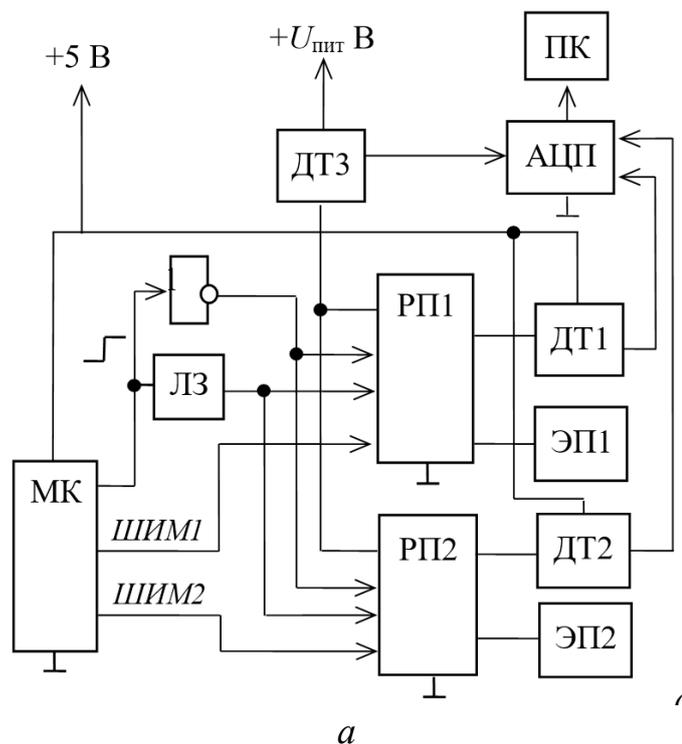


Рисунок 3.32 – Структурная схема (а) и экспериментальный макет (б) терморегулятора

Многофазность обеспечивается путём разнесения во времени периодов работы каждого ЭП. Каждый МК содержит 16 незави-

симых выходов аппаратного ШИМ-сигнала, аналого-цифровые преобразователи (АЦП) и может управлять четырьмя группами по четыре ЭП. На рисунке 3.32 показан вариант терморегулятора с двумя ЭП, поверхность ТЕМ-камеры имитирует медная пластина 100×100 мм. В качестве управляющего использован ШИМ-сигнал частотой $f = 245$ Гц с различными коэффициентами заполнения.

Нагрузкой реверсивных преобразователей являются ЭП, которые размещаются на поверхности ТЕМ-камеры вместе с ДТ. Для установки ЭП и ДТ на поверхность ТЕМ-камеры разработано специализированное крепление, которое представляет собой негорючую стеклотекстолитовую рамку с вырезами для четырёх ЭП и группы из трёх ДТ. Группа из трёх ДТ в такой рамке образует модуль поддержания температуры стенки ТЕМ-камеры (рисунок 3.33).

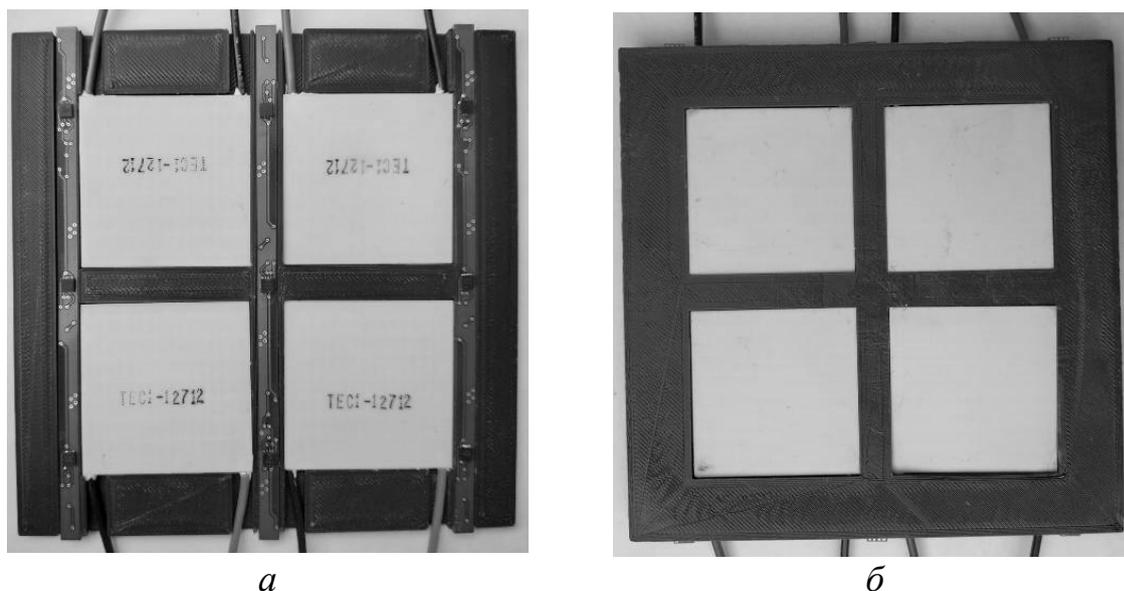
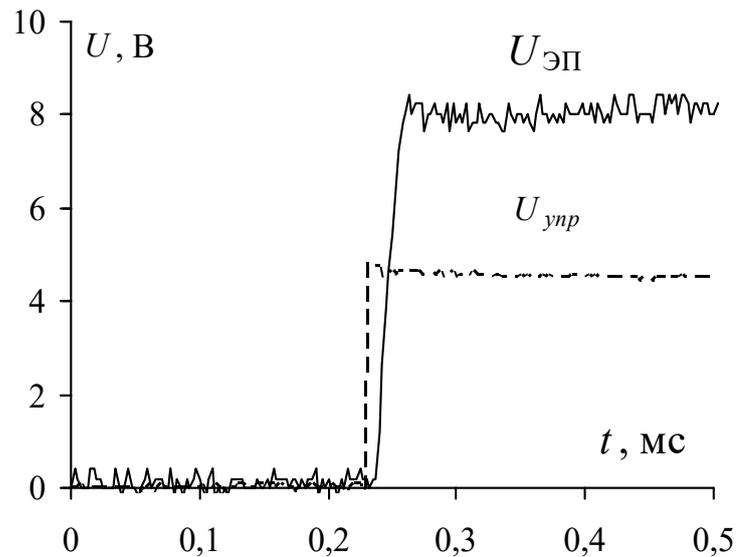


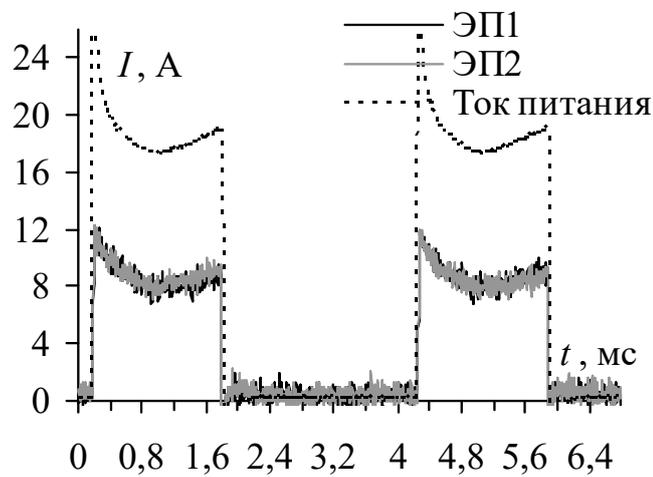
Рисунок 3.33 – Модуль с элементами Пельтье и датчиками тока:
а – вид со стороны, прилегающей к поверхности ТЕМ-камеры;
б – со стороны установки радиаторов

На ДТ и ЭП наносятся теплопроводящие прокладки и плотно прижимаются к стенке испытательного контейнера при помощи рамки. С противоположной стороны на каждый ЭП крепятся радиаторы с теплопроводящими трубками, отводящие тепло в основную радиатор морозильной системы КЭК [182].

Выполнено измерение амплитуд напряжений и токов осциллографом Keysight EDUX 1002G и датчиками тока ACS712-20В (рисунок 3.34). При измерении тока в цепи ЭП и питания последовательно включались шунтирующие резисторы с номинальным сопротивлением 0,01 Ом, напряжение на которых измерялось осциллографом.



a



б

Рисунок 3.34 – Управляющий ШИМ-сигнал (- - -) и напряжение электропитания (—) на ЭП (*a*); амплитуды токов, протекающих через ЭП1, ЭП2, и суммарный ток питания двух реверсивных преобразователей (*б*)

Сигналы от трёх ДТ ACS712-20В оцифровывались АЦП МК и передавались в ПК. Датчиками ДТ1 и ДТ2 измерялись токи че-

рез ЭП1 и ЭП2, а ДТЗ – суммарный ток потребления через два реверсивных преобразователя и два ЭП. Время измерения датчиком тока составляло 5 мкс, ошибка измерения была в пределах $\pm 1,5\%$.

На рисунке 3.34,*а* видно, что напряжение на ЭП достигает 8 В с отклонением 5 % при времени нарастания $t_{\phi+} = 15$ мкс и задержке относительно входного сигнала 20 мкс. В качестве управляющего используется ШИМ-сигнал частотой $f = 245$ Гц с коэффициентом заполнения $D = 40\%$, что соответствует длительности импульса $W_+ = 1,6$ мс и времени между импульсами $W_- = 2,47$ мс. Для лабораторного макета и проверки многофазного управления электропитанием ЭП импульсы токов (рисунок 3.34,*б*) каждого ЭП достигали значения $I_1 = I_2 = 9,5$ А, а суммарный ток потребления составлял $I_3 = 19$ А совместно с двумя реверсивными преобразователями и двумя ЭП. При этом форма импульсов имела вид переходного колебательного процесса длительностью до 0,2 мс за счёт паразитных параметров ЭП.

В двухфазном режиме два управляющих сигнала с аналогичными параметрами ($f = 245$ Гц, $D_+ = 40\%$) разносятся по времени на 2 мс, чем обеспечивается сдвиг фазы электропитания на 180° для каждого ЭП (рисунок 3.35,*а*). В результате удалось снизить единовременный суммарный потребляемый ток от источника питания до $I_3 = 9,5$ А, что соответствует току потребления одного ЭП: $I_1 = I_2 = 9,5$ А. Длительность переходного процесса при этом сократилась до 5 мкс. В 4-фазном режиме электропитания ЭП управляющий сигнал выбран частотой $f = 121$ Гц с коэффициентом заполнения $D_+ = 20\%$, что соответствует длительности импульса $W_+ = 1,62$ мс, и с временем между импульсами $W_- = 6,63$ мс со сдвигом каждого последующего импульса относительно первого 2,06, 4,13 и 6,18 мс соответственно.

Таким образом, в 4-фазном режиме сдвиг фазы составляет 90° , что обеспечивает суммарный ток потребления реверсивными преобразователями с ЭП не более тока потребления одного ЭП, а именно около 9,5 А (рисунок 3.35,*б*).

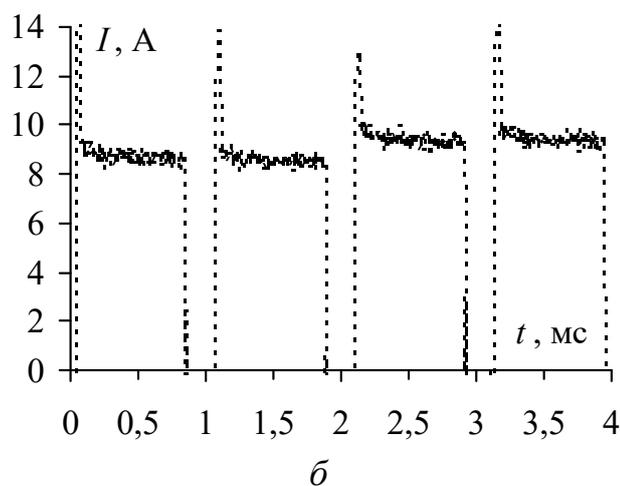
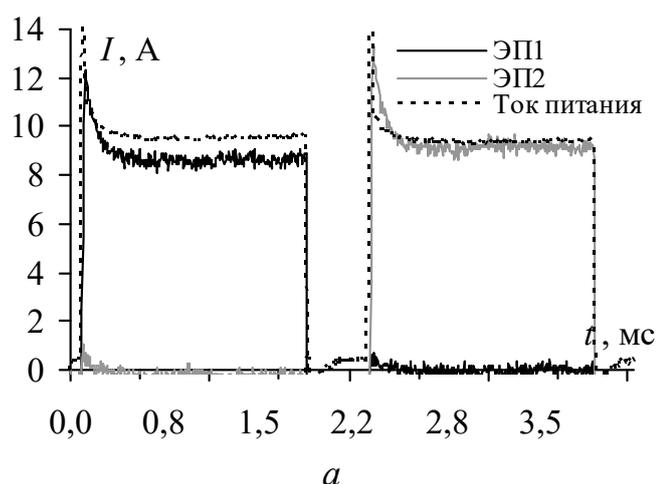


Рисунок 3.35 – Импульсы токов ЭП1 и ЭП2 (—) и суммарный ток электропитания реверсивных преобразователей (- -) для 2-фазного (а) и 4-фазного (б) режимов работы элементов Пельтье

Преимуществом такого подхода является простота масштабирования системы терморегулирования на основе ЭП. Количество ЭП может быть выбрано по необходимости с ограничением на суммарную мощность источника питания.

Измерение энергетических характеристик разработанного реверсивного преобразователя показало, что можно обеспечить мощность на ЭП до 77 Вт с коэффициентом полезного действия $\eta=73\%$ и коэффициентом мощности $\lambda=0,875$. Высокие потери (до 10,5 Вт) обусловлены наличием активного сопротивления открытого канала транзистора IRF9540N. При этом потери на активном сопротивлении канала транзистора IRFZ46N менее 1,5 Вт, а потери мощности при переключении не превышают 0,96 Вт, что

говорит о суммарных потерях в транзисторах, достигающих 14,6 Вт. Исходя из полученных результатов и анализа энергетических характеристик в схему реверсивного преобразователя (см. рисунок 3.31) внесены изменения: транзисторы АЭ1 и АЭ4 заменены на IRF4905 с меньшим активным сопротивлением открытого канала (20 мОм), а УЭ1–УЭ3 заменены на полевые транзисторы 2N7002, что позволило добиться более устойчивых управляющих уровней на затворах АЭ и увеличить плотность монтажа компонентов на ПП. За счёт этих изменений удалось увеличить напряжение и ток на ЭП и обеспечить мощность до 91 Вт с КПД $\eta = 81,8\%$. Суммарные потери в транзисторах составляют не более 6,63 Вт, их большая часть приходится на два транзистора IRFZ46N, включенных последовательно относительно источника питания. Также удалось снизить уровень колебательных выбросов и тем самым улучшить форму импульсов тока ЭП (рисунок 3.36).

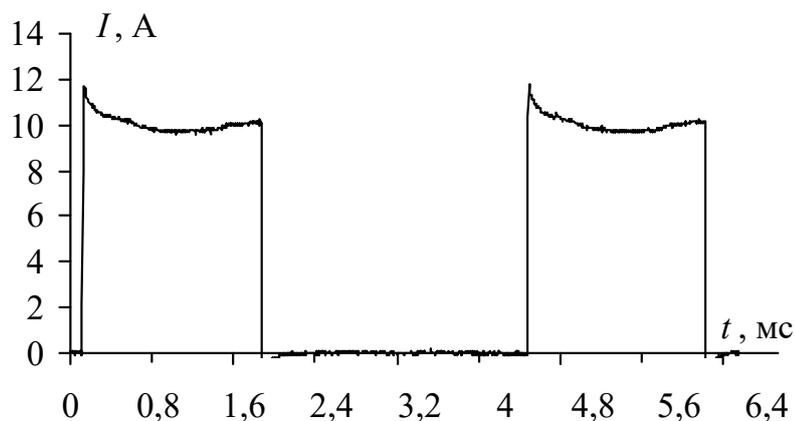


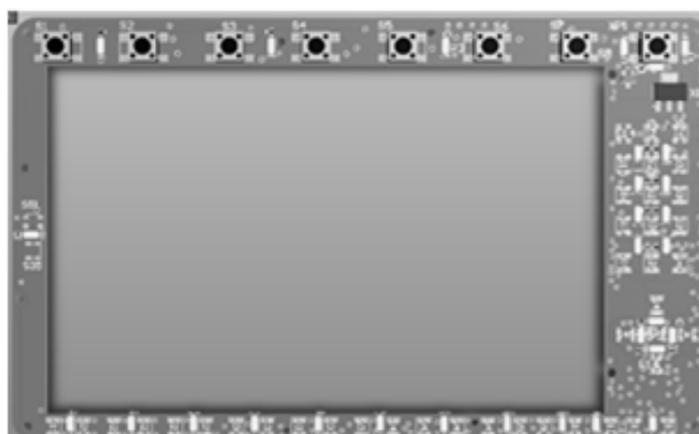
Рисунок 3.36 – Импульсы тока на элементе Пельтье с усовершенствованным реверсивным преобразователем при управляющем ШИМ-сигнале с $D_+=40\%$, $f=245$ Гц

В предложенной схеме КПД ниже, чем в существующих реверсивных преобразователях, что объясняется последовательным включением в цепь дополнительного транзистора. Однако это решение позволяет управлять средней мощностью на нагрузке посредством одного ШИМ-сигнала с возможностью реверса направления протекания тока.

3.5.6 Элементы управления камерой

Пульт управления

Управление КЭК осуществляется оператором через пульт [183]. На нём отображается графическая информация и заданные оператором параметры КЭК. ПУ содержит блок кнопок и сенсорный жидкокристаллический дисплей. При включении КЭК на ЖКД появляется главное меню. Выводится цифровая и графическая информация о температуре и влажности воздуха внутри испытательного контейнера, а также о внешнем ЭМП и температуре. Также можно задать, отследить и настроить дополнительные параметры (режим работы, давление компрессора, поток воздушного охлаждения радиатора и пр.). Передача данных от управляющего устройства к ПУ осуществляется по интерфейсу UART.



a



б

Рисунок 3.37 – Расположение кнопок на печатной плате (*a*) и макет пульта управления (*б*)

Разработаны ПП и макет ПУ (рисунок 3.37). Он имеет группы кнопок (рисунок 3.37,б) для управления КЭЖ. Группа 1 содержит кнопки для управления основными функциями КЭЖ (температура, влажность, характеристики поля и т. д.). Группа 2 является циферблатом. В группе 3 расположены кнопки, предназначенные для уменьшения или увеличения значения заданного параметра, а также для настройки ПУ. Группа 4 является джойстиком для навигации по пунктам меню, выбора режима работы и настройки. Группа 5 состоит из кнопок для аварийного предупреждения, используемых в экстренных случаях, например для отключения электроэнергии от камеры. Группа 6 включает кнопки с дополнительными функциями и необходима для задания и сохранения в память особых настроек. Группа 7 содержит кнопки для открытия/закрытия двери.

Устройство управления дверью камеры

Разработано и создано устройство управления открытием и закрытием двери КЭЖ (рисунок 3.38).

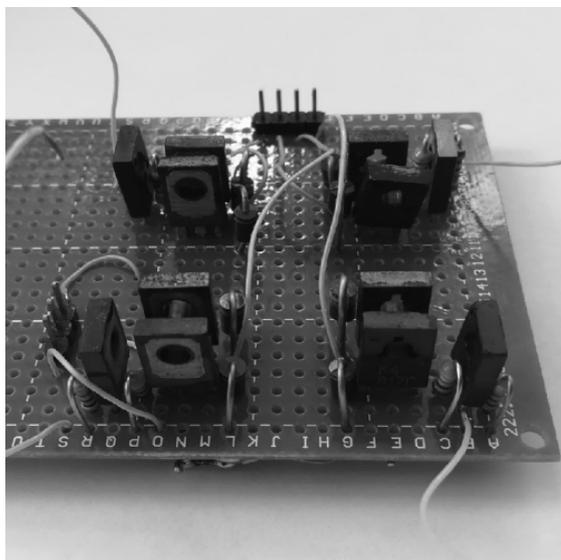
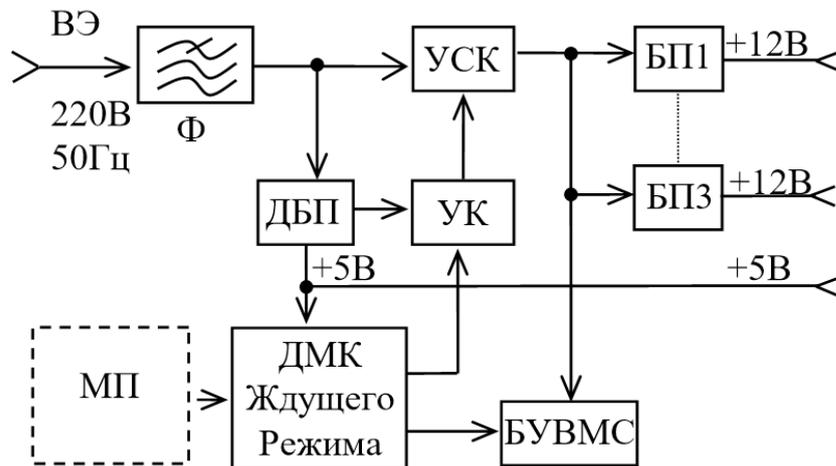


Рисунок 3.38 – Устройство управления шаговым двигателем

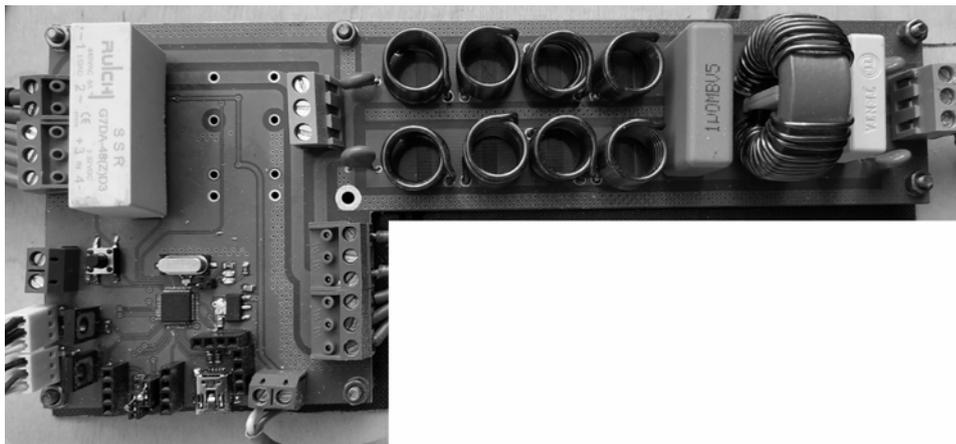
Электромеханическое управление дверью осуществляется четырьмя шаговыми двигателями с червячными подъёмниками, расположенными по углам. Вращение шагового двигателя происходит посредством однофазной мостовой схемы.

Устройство коммутации электропитания

Устройство коммутации электропитания (рисунок 3.39) создано для запуска трёх силовых импульсных блоков электропитания БП1–БП3 от дежурного блока питания КЭЖ и фильтрации кондуктивных помех по цепям электропитания.



а



б

Рисунок 3.39 – Схема (а) и вид (б) устройства коммутации электропитания климатической экранированной камеры

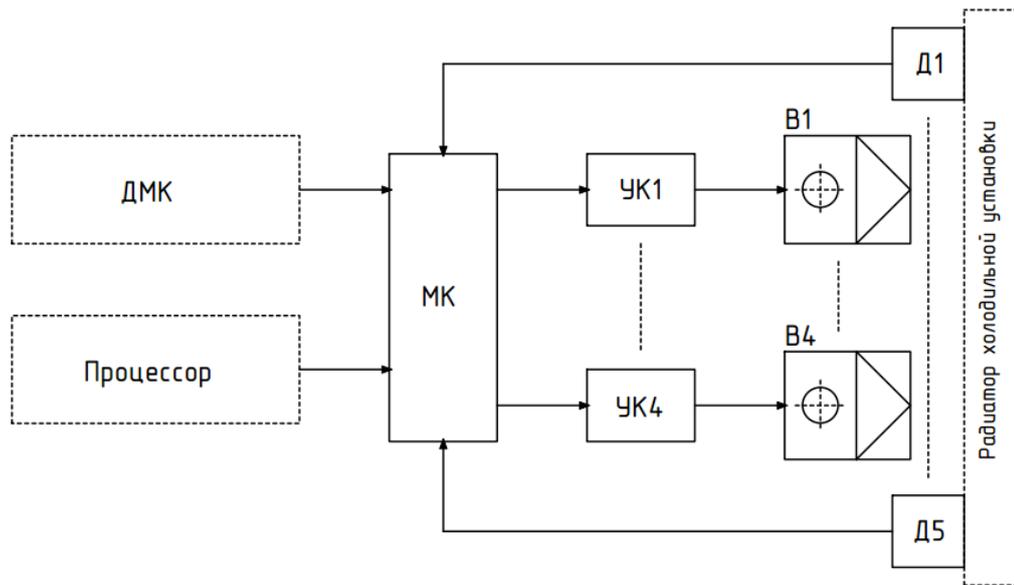
При включении вилки электропитания (ВЭ) камеры в розетку сетевое напряжение 220 В промышленной частоты 50 Гц поступает в фильтр Ф ЭМП. С выхода фильтра напряжение подается в блок коммутации БК, который содержит блок питания дежурного режима ДБП, схему управления на МК и устройство сильноточной коммутации УСК. При поступлении напряжения на вход БК на его выходе устанавливается постоянное напряжение 5 В.

Постоянное напряжение с выхода ДБП поступает на МК пульта управления и на узлы тестирования работоспособности подсистем КЭК. Запускается МК дежурного режима и выполняет программу. Основная функция программы – индикация на пульте управления периодичного свечения, во время которого КЭК находится в режиме опроса и тестирования подсистем, выполняемых другими узлами камеры. Включение КЭК нажатием кнопки «Питание» во время тестирования подсистем недоступно. В результате положительного опроса устанавливается заданный логический уровень на группе входов дежурного МК, который передаёт команду о возможности включения камеры, при этом кнопка «Питание» на пульте управления становится активной. Индикация на пульте управления отображает постоянное свечение желтого светодиода, камера переходит в режим готовности к включению. Такая ситуация возникает в случае, когда на одном из заданных входов дежурного МК нет требуемого логического уровня. После запуска МК включает блоки электропитания БП1–БП3 в зависимости от команд ведущего МП. Выходной сигнал МК с высоким логическим уровнем в режиме включения поступает на полевой транзистор, который коммутирует твердотельное реле с контактами, соединенными с выходом электромагнитного фильтра. В схеме присутствуют датчики переменного и постоянного тока и напряжения для комплексного тестирования камеры и определения неисправности узлов.

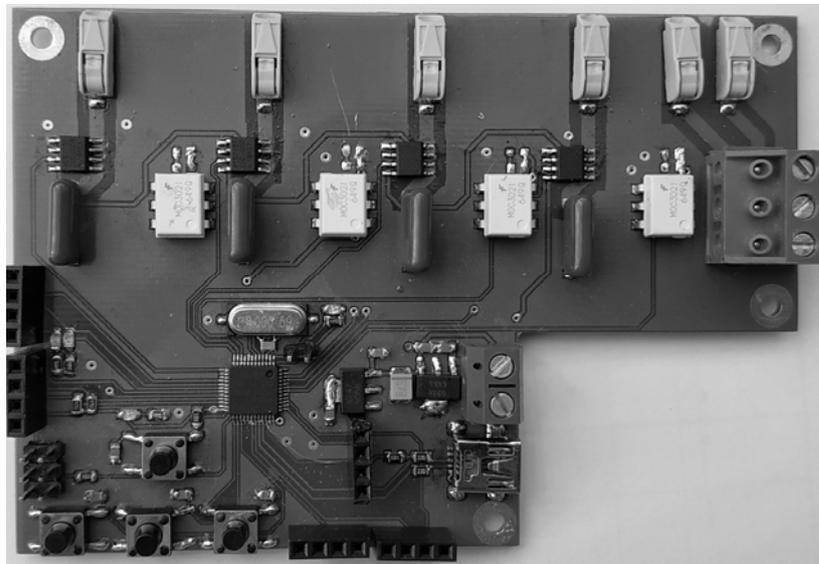
В качестве источника питания используется импульсный блок питания, имеющий систему аварийного питания и 8 каналов стабилизации выходного напряжения. Из них один канал +24 В служит для заряда аккумулятора. Данный уровень напряжения устанавливается при включении вилки камеры в розетку. Девятый канал управления служит для запуска блока питания и перехода его из ждущего режима. Система аварийного питания предназначена для резервного питания головного МП, ПУ и устройств управления петлями, стяжкой, компрессором и двигателями постоянного тока. Она необходима для корректного экстренного завершения работы и сохранения всех задач в ПЗУ, а также изъятия ИО из КЭК и закрытия двери.

Устройство управления вентиляторами морозильной системы

В режиме охлаждения при достижении низких температур необходимо отводить от радиаторов КЭЖ большое количество тепла. Для охлаждения радиатора разработана схема и создан блок управления вентиляторами (рисунок 3.40) [184].



а



б

Рисунок 3.40 – Схема (а) и устройство (б) управления вентиляторами охлаждения радиатора

Напряжение с выхода блока коммутации электропитания поступает на вход вентиляторов через устройства коммутации УК1–

УК4. МК регулирует скорость вращения вентиляторов на основе принимаемых данных с ДТ и команд управления от ведущего МП, расположенного в ПУ КЭК. Датчики температуры Д1–Д5 расположены на радиаторе и измеряют его текущую температуру, чтобы сформировать управляющий сигнал для УК1–УК4. Также МК диагностирует данный блок КЭК, принимая запрос тестирования подсистем от дежурного микроконтроллера и передавая обратно в него результат опроса узлов блока управления вентиляторами морозильной системы.

Датчик электромагнитного поля

Разработан датчик напряженности E -поля (рисунок 3.41) [185]. Чувствительным элементом датчика является антенна, сигнал с которой поступает на входную цепь, согласующую антенну со входом детектора в полосе частот до 500 МГц. Сигнал с детектора поступает на вход АЦП. После оцифровки с требуемой точностью сигнал может быть записан в память МК или выведен по шине I²C или SPI для дальнейшей цифровой обработки и/или хранения. В качестве источника питания служит гальванический элемент напряжением 1,5 В. Требуемое напряжение 5 В формируется при помощи DC/DC-преобразователя и линейного стабилизатора.

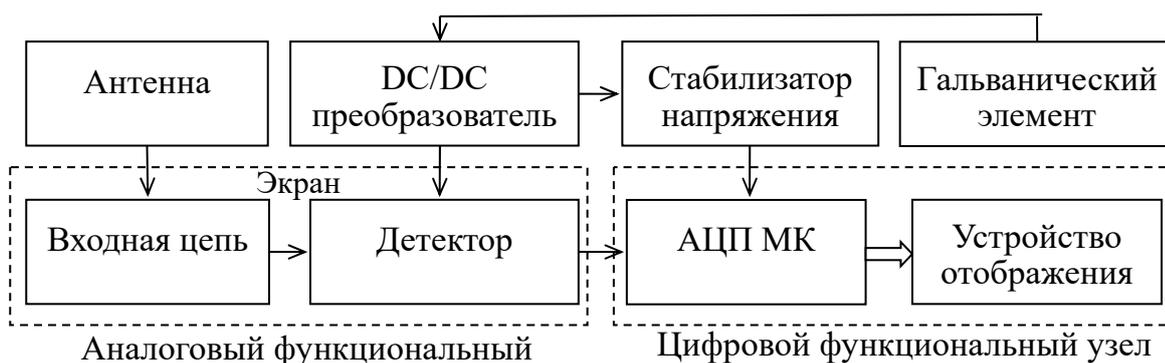


Рисунок 3.41 – Структурная схема датчика напряженности электрического поля

3.5.7 Методы совместных климатических и электромагнитных испытаний

Разработанная климатическая экранированная камера позволяет проводить исследования и испытания объекта, представляющего собой отдельный компонент или небольшое устройство, на ЭМС при одновременном контролируемом воздействии климатических условий окружающей среды, в частности испытания объекта на стойкость к совместным воздействиям контролируемых электромагнитного и температурного полей, измерения тепловой эмиссии при электромагнитном воздействии или измерения тепловых и электромагнитных эмиссий от объекта испытания, находящегося при заданном значении влажности воздуха внутри испытательного контейнера камеры.

Методы исследования компонентов соответствуют стандартам по испытаниям ИС на помехоэмиссию и помехоустойчивость, а также стандартам по испытаниям РЭА на ЭМС в ТЕМ-камерах. В КЭК измеряются характеристики ИО в диапазоне частот до 2 ГГц при воздействии поля до 3 кВ/м, температуры от минус 50 до +150 °С, влажности до 90 %. Эффективность экранирования корпусом шасси при этом не менее 40 дБ в диапазоне частот до 40 ГГц.

Испытания на помехоэмиссию включают измерение электромагнитных излучений от ИО при подаче на его вход полезного сигнала (рисунок 3.42). Также можно измерять помехоэмиссию при кратковременном отключении питания или подаче кондуктивного воздействия по цепи питания ИО. Все измерения можно проводить в широком диапазоне температур.

Схема измерения содержит: У – усилитель (при необходимости); И – измеритель мощности; Г – генератор; П – измерительный приёмник; Р – рабочую станцию с ПО; Н – нагрузку 50 Ом; ЛБП – лабораторный блок питания (при необходимости). С генератора через усилитель на вход ИО подаётся сигнал заданной формы и амплитуды. Приёмником измеряются помехоэмиссии от ИО, наводимые на согласованную ЛП (ТЕМ-камеру). Для ИО с питанием настраиваются форма и уровень кондуктивного воздей-

ствия на генераторе, после чего ЭМП подаётся в цепь питания ИО. Длительность кратковременного отключения питания регулируется ЛБП.

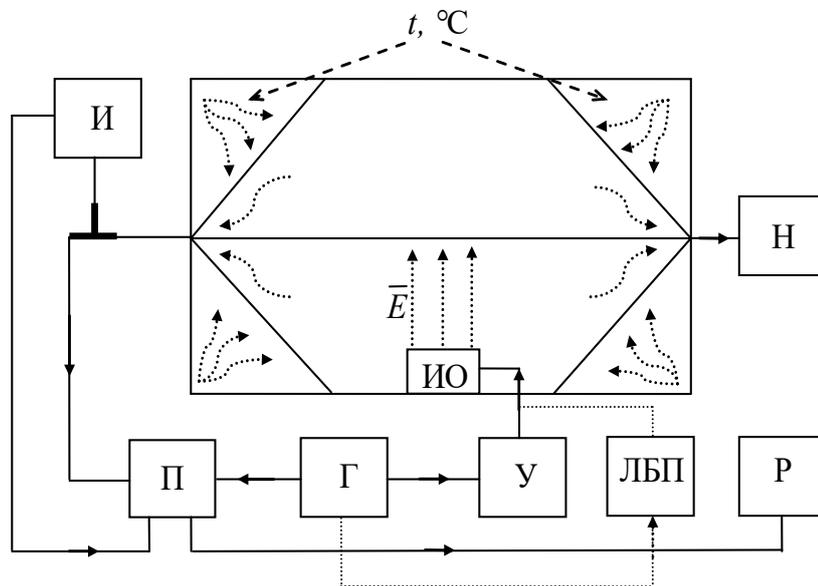


Рисунок 3.42 – Схема измерения помехоэмиссий от исследуемого объекта

Испытания на помехоустойчивость заключаются в измерении характеристик ИО при воздействии на него ЭМП с заданной напряжённостью и одновременно температурного поля (рисунок 3.43). При этом относительная влажность воздуха в камере не выходит за пределы заданного диапазона 40–60 %.

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

Температурные испытания компонентов проводятся при воздействии на ИО температурным полем в диапазоне от -50 до $+150$ °С (рисунок 3.44). При этом ИО может быть больше размера $60 \times 100 \times 100$ мм за счет того, что на него не воздействует ЭМП и неравномерность поля не имеет значения.

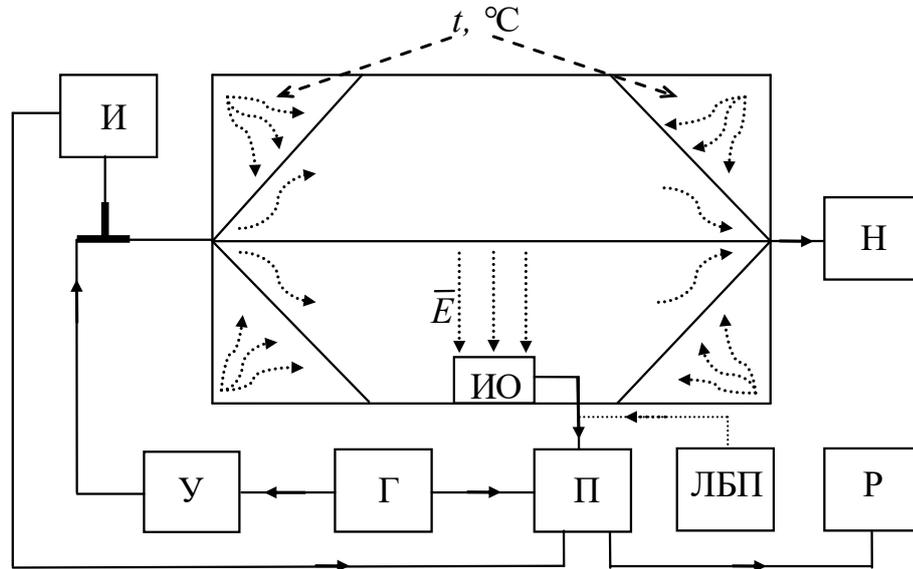


Рисунок 3.43 – Схема испытания на помехоустойчивость исследуемого объекта

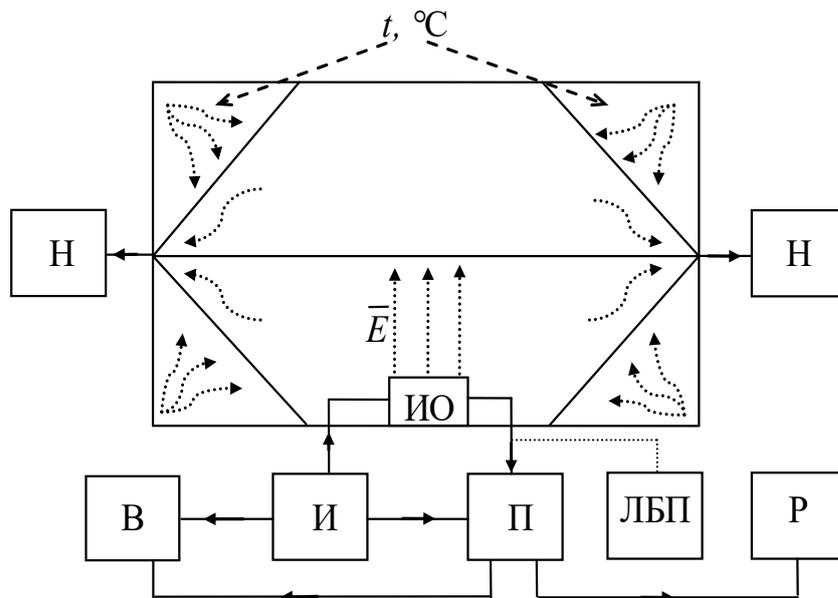


Рисунок 3.44 – Схема измерения характеристик компонентов при воздействии температурного поля и влажности воздуха

В схеме температурных испытаний применяется следующее оборудование: И – источник сигнала (формирователь произвольных сигналов); П – измерительный приёмник; Р – рабочая станция с ПО; Н – нагрузка 50 Ом; ЛБП – лабораторный блок питания (при необходимости). Сигнал заданной формы подаётся на ИО. Приёмником измеряются параметры в нормальных условиях (при $t = 20\text{ }^{\circ}\text{C}$ и относительной влажности воздуха 40–60 %) эксплуатации ИО. После этого производится воздействие температурным полем с постоянной влажностью воздуха и измеряются параметры компонента. Затем измеряются параметры компонента при воздействии температуры и влаги. Все данные измерительных приборов и КЭЖ одновременно записываются в память рабочей станции.

Схема подключения внешних измерительных устройств для проведения биомедицинских исследований с помощью КЭЖ (рисунок 3.45) содержит измеритель И и усилитель У подводимого сигнала с генератора Г, исследуемый БО, микроскоп или стол с визуальным контролем для биомедицинских исследований М, измерительный приёмник или анализатор спектра ИП, резервуар с питательными веществами РПВ (при необходимости), рабочую станцию РС, нагрузку 50 Ом Н.

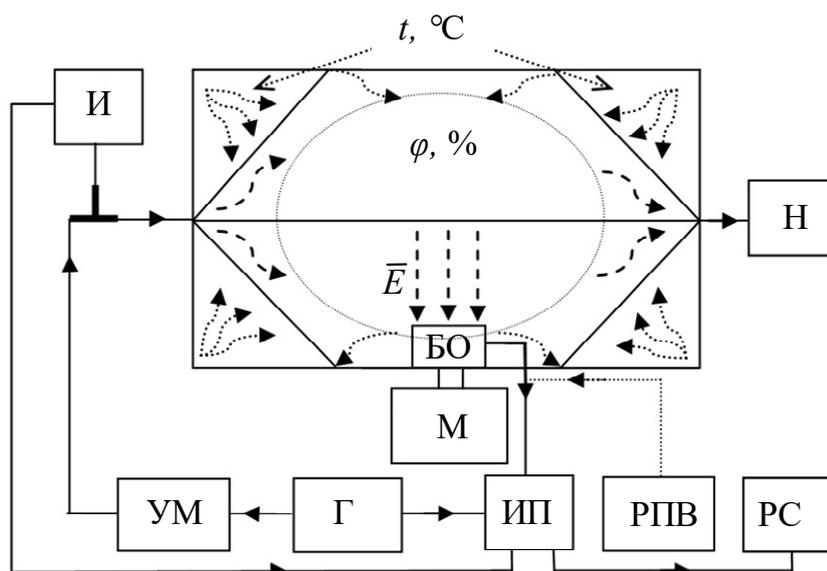


Рисунок 3.45 – Схема для проведения биомедицинских исследований

Для создания поля вместо генератора и усилителя может быть использован, например, генератор импульсного напряжения ГИН-1-1 (FID Technology) с амплитудой напряжения до 1000 В, длительностью (по половине амплитуды) 300 пс и частотой повторения до 1 кГц. Такое воздействие способно создать в рабочем объеме камеры $100 \times 100 \times 20$ мм поперечную ЭМВ напряженностью до 16 кВ/м.

Заключение

В монографии приведены результаты проектирования устройств на основе ЛП для исследования и испытания объектов на ЭМС. Представлена методика проектирования устройств на основе ЛП с применением аналитического, квазистатического и электродинамического подходов, позволяющая учитывать неточности, возникающие при создании сложной геометрической формы волноводов из металла. Применяя методику, инженер оценит на этапе проектирования изменения частотных зависимостей электрических параметров при реализации сложных форм конструкций волноводов из металла с изменением формы твердотельной заготовки согласно электродинамической модели. В данной работе методика проектирования позволила вычислить оптимальные значения геометрических параметров устройств на основе ЛП и учесть характеристики реальных слесарных и сварочных инструментов, а также увеличение кромок металла в результате его растяжения или сжатия при реализации конструкций. Применение методики позволило разработать, создать и запатентовать ряд усовершенствованных конструкций на основе ЛП.

Создана ТЕМ-камера с максимальным коэффициентом $|S_{11}|$ минус 22 дБ в диапазоне частот до 2 ГГц при максимальной высоте ИО 20 мм. Отклонение между измеренными и вычисленными максимальными значениями $|S_{11}|$ не превышает $\pm 1,65$ дБ в диапазоне частот до 2 ГГц. Полученные при помощи методики проектирования значения геометрических параметров могут быть линейно изменены для увеличения до 40 мм или уменьшения до 10 мм высоты ИО. При этом полоса рабочих частот камеры уменьшится до 1 ГГц или увеличится до 4 ГГц соответственно, а максимальное значение $|S_{11}|$ не должно существенно измениться (минус 25 дБ). Предложен алгоритм оптимизации значений геометрических параметров ТЕМ-камеры с применением численных методов. ТЕМ-камера использована в качестве испытательного контейнера внутри климатической экранированной камеры для

совместных исследований объектов при климатических и электромагнитных воздействиях.

Создана малогабаритная ТЕМ-камера для испытаний ИС высотой до 5 мм в диапазоне частот до 5,2 ГГц с коэффициентом $|S_{11}|$ менее минус 17 дБ. Разработан испытательный стол, обеспечивающий размещение ПП круглой формы, для оценки помехоэмиссии от ИС в зависимости от угла поворота измерительной ПП в апертуре камеры.

Создана ПЛ для испытания на ЭМС кабельной продукции высотой до 20 мм в диапазоне частот до 3 ГГц с максимальным значением $|S_{11}|$ не более минус 20 дБ. ПЛ предназначена для испытания РЭС на ЭМС, а также для исследования элементов сети высоковольтного питания, таких как СШЭП космического аппарата.

Выполнен анализ трёх электродинамических моделей коаксиальной камеры с различными согласующими переходами, в результате которого получены оптимальные значения геометрических параметров для конструкции камеры с минимальным значением $|S_{11}|$ в заданном диапазоне рабочих частот. Создана конструкция коаксиальной камеры для измерения ЭЭ материалов в диапазоне частот до 12 ГГц с коэффициентом $|S_{11}|$ менее минус 20 дБ.

Разработана камера для совместных климатических и электромагнитных испытаний с возможностью её применения для биомедицинских исследований. Камера позволит получить новые знания о взаимовлиянии внутренних и внешних электромагнитных и климатических воздействий на испытываемые объекты, размещенные в ее внутреннем объеме.

Методы испытаний могут быть при необходимости скорректированы под определенную задачу.

Созданные устройства предназначены для решения ряд различных задач в области ЭМС, в т.ч. проведения испытаний на помехоэмиссию и помехоустойчивость современных ИС, а также для выбора с заданной эффективностью экранирования материала с целью повышения их помехозащиты. Кроме того, созданные

устройства могут быть использованы при проектировании ИС непосредственно на рабочем месте проектировщика, исключая антенные измерения в безэховой или реверберационной камерах, что позволит выявлять уязвимые амплитуды и частоты воздействия ЭМП на интегральные схемы.

Список сокращений

АЦП –	аналого-цифровой преобразователь
АЭ –	активный элемент
БО –	биологический объект
БЭК –	безэховая камера
ВАЦ –	векторный анализатор цепей
ВП –	вносимые потери
ВТГ –	внешний тактовый генератор
ГА –	генетический алгоритм
ГМ –	геометрическая модель
ДТ –	датчик температуры
ЖКД –	жидкокристаллический дисплей
ИО –	испытуемый объект
ИС –	интегральная схема
КМ –	композитный материал
КПП –	коаксиально-полосковый переход
КИП –	контрольно-измерительный прибор
КСВН –	коэффициент стоячих волн по напряжению
КЭК –	климатическая экранированная камера
ЛЗ –	линия задержки
ЛП –	линия передачи
МК –	микроконтроллер
МКРВО –	метод конечных разностей во временной области
МКЭ –	метод конечных элементов
МКИ –	метод конечного интегрирования
ММ –	метод моментов
МП –	микропроцессор
НД –	нормативный документ
ПИД –	пропорционально-интегрально-дифференцирующий
ПК –	персональный компьютер
ПО –	программное обеспечение
ПЛ –	полосковая линия
ПЛИС –	программируемая логическая интегральная схема
ПНЭ –	плоский нагревательный элемент
ПП –	печатная плата
ПУ –	пульт управления

РП –	реверсивный преобразователь
РПМ –	радиопоглощающий материал
РЭА –	радиоэлектронная аппаратура
РЭС –	радиоэлектронные средства
СВЧ –	сверхвысокочастотный
ТМ –	твердотельная модель
ТС –	техническое средство
ТЭП –	термоэлектрический преобразователь
ШИМ –	широтно-импульсная модуляция
ЭКБ –	электронная компонентная база
ЭМВ –	электромагнитная волна
ЭМИ –	электромагнитное излучение
ЭМП –	электромагнитная помеха
ЭМС –	электромагнитная совместимость
ЭП –	элемент Пельтье
ЭЭ –	эффективность экранирования
ECSS –	сотрудничество европейских стран в области стандартизации космической деятельности
GTEM-cell –	гигагерцовая камера поперечных электромагнитных волн
OATS –	испытательный полигон на открытой местности
TEM-cell –	камера поперечных электромагнитных волн
WTEM-cell –	камера поперечных электромагнитных волн с проволочным центральным проводником
FR-TEM-cell –	четырёхпортовая камера поперечных электромагнитных волн

Литература

1. Макаренко С.И. Модели системы связи в условиях преднамеренных дестабилизирующих воздействий и ведения разведки: моногр. СПб.: Наукоемкие технологии, 2020. 337 с.
2. TEM waveguides for EMC measurements / C. Groh, J.P. Karst, M. Koch, H. Garbe // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1999. V. 41, N 4. P. 440–445.
3. Kwon J.-H., Choi H.-D. Experimental verification of correlation algorithm between FAC and open area test site/SAC // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 2003. P. 910–914.
4. Roseberry B.E., Schulz R.B. A parallel-strip line for testing RF susceptibility // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1965. Vol. 7, N 2. P. 142–150.
5. Crawford M.L. Generation of standard EM fields using TEM transmission cells // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1974. V. 16, N 4. – P. 189–195.
6. Wilson P.F., Ma M.T. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials: part II – near-field source simulation // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988. V. 30, N 3. P. 251–259.
7. Wilson P.F., Ma M.T., Adams J.W. Techniques for measuring the electromagnetic shielding effectiveness of materials. Part I: far-field source simulation // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1988. Vol. 30, N 3. P. 239–250.
8. Wilson P., Hansen D., Konigstein D. Simulating open area test site emission measurements based on data obtained in a novel broadband TEM cell // IEEE Nat. symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 1989. P. 133–137.
9. Carbonini L. Theoretical and experimental analysis of a multi-wire rectangularly shielded transmission line for EMC measurements // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 1991. P. 8–13.
10. Comparing the field quality of the new EUROTREM to GTEM and fully absorber lined chambers / D. Hansen, J. Funck, D. Ristau [et

al.] // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 1998. P. 132–136.

11. Jeon S.B., Park S.K., Kim D.H. Simple method to generate dominant E- and H-field inside a four-port TEM cell // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2013. Vol. 55, N 5. P. 979–982.

12. Podgorski A.S. New concept of hybrid TEM-cell and reverberation chamber facility // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 2012. P. 239–244.

13. Chung Y.-C., Kang T.-W., Park D.-C. Design and construction of stripline for measuring electromagnetic immunity of vehicular electrical cables // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 1997. P. 9–12.

14. ISO 11452-5:2002. Road vehicles. Component test methods for electrical disturbances from narrowband radiated electromagnetic energy. Part 5: Stripline. 2002. 39 p. URL: <https://www.iso.org/standard/24571.html> (accessed: 31.03.2024).

15. ГОСТ ИСО 11452-5:2007. Транспорт дорожный. Методы испытаний компонентов на устойчивость к воздействию узкополосного излучения электромагнитной энергии. Ч. 5: Полосковая линия передачи. 2007. 20 с. URL: [.gostinfo.ru/document/5291325.aspx](http://gostinfo.ru/document/5291325.aspx) (дата обращения: 31.03.2024).

16. ГОСТ 32140-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Машины строительные с внутренними источниками электропитания. Требования и методы испытаний. 2013. 35 с. URL: <http://www.specemc.ru/upload/files/gost/gost-32140-2013.pdf> (дата обращения: 31.03.2024).

17. ГОСТ 32141-2013. Совместимость технических средств электромагнитная. Машины для сельского и лесного хозяйства. Методы испытаний и критерии приемки. 2013. URL: <http://www.specemc.ru/upload/files/gost/gost-32141-2013.pdf> (дата обращения: 31.03.2024).

18. Wheeler A. Transmission-line properties of parallel wide strips by a conformal-mapping approximation // IEEE Trans. on Microwave Theory Tech. 1964. Vol. 12, N 3. P. 280–289.

19. Wheeler A. Transmission-line properties of parallel strips separated by a dielectric sheet // IEEE Trans. on Microw. Theory Tech. 1965. Vol. 13, N 2. P. 172–185.
20. Bahl I.J., Garg R. Simple and accurate formulas for a microstrip with finite strip thickness // Proc. IEEE. 1977. Vol. 65, N 11. P. 1611–1612.
21. Hammerstad E.O. Equations for microstrip circuit design // Proc. 5th European Microwave Conf. 1975. P. 268–272.
22. Kubík Z., Skála J. Stripline for electromagnetic susceptibility testing – Input impedance matching // Int. Conf. on Applied Electronics (AE). 2017. P. 1–4.
23. Valek M., Korinek T., Bostik T. Design of stripline for EMC testing // 14th Conf. on Microw. Tech. 2008. P. 1–4.
24. Luo W., Guan Y. The new strip-line TEM cells in EMC test // Int. Conf. on Electronic Information and Communication Techn. 2016. P. 497–500.
25. A new stripline measuring setup for the characterization of conductive gaskets up to 18 GHz / J. Catrysse, V. Filip, D. Pissort, C. Brull // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 2010. P. 165–170.
26. Murata Y., Hoshina T., Hatori Y. Susceptibility of notebook computers to HPM, 2014 // 2014 IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 2014. P. 549–553.
27. IEC 61967-8:2011. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic emissions. Part 8: Measurement of radiated emissions – IC stripline method. 2011. 34 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6196> (accessed: 10.05.2022).
28. Measuring and simulating EMI on very small components at high frequencies / L. Decrock, J. Catrysse, F. Vanhee, D. Pissoort // Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 2013. P. 961–965.
29. Kim J., Park H.-H. Novel IC-stripline design for near-field shielding measurement of on-board metallic cans // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 2016. P. 710–716.
30. Mandic T., Gillon R., Baric A. Optimization of IC-stripline performance by response surface space-mapping technique // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2017. Vol. 59, N 4. P. 1232–1238.

31. Teseq. URL: <https://www.ametek-cts.com/about-us/brands/teseq> (accessed: 31.03.2024).
32. TDK. URL: <https://www.tdkrfolutions.tdk.com/products/striplines> (accessed: 31.03.2024).
33. Schwarzbeck. URL: <http://www.schwarzbeck.de/en/striplines-tem-cells.html> (accessed: 31.03.2024).
34. 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. First Edit. 2005. 43 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6185> (accessed: 31.03.2024).
35. IEC 62132-2:2010. Integrated circuits – Measurement of electromagnetic immunity. Part 2: Measurement of radiated immunity – TEM cell and wideband TEM cell method. First Edit. 2010. 49 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/6508> (accessed: 31.03.2024).
36. Crawford M.L., Workman J.L., Thomas C.G. Expanding the bandwidth of TEM cells for EMC measurements // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1978. Vol. 20, N 3. P. 368–375.
37. Cohn S.B. Characteristic impedance of the shielded-strip transmission line // Trans. of the IRE Prof. Group on Microw. theory and techn. 1954. Vol. 2, Is. 2. P. 52–57.
38. Synthetic TDR measurements for TEM and GTEM cell characterization / M. Borsero, G. Vizio, D. Parena, V. Teppati // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2007. Vol. 56, N 2. P. 271–274.
39. Weil C.M. The characteristic impedance of rectangular transmission lines with thin center conductor and air dielectric // IEEE Trans. on Microw. Theory Tech. 1978. Vol. MMT-26, N 4. P. 238–242.
40. Malaric K., Bartolic J. Design of a TEM-cell with increased usable test area // Turk. J. Engin. 2003. Vol. 11, N 2. P. 143–154.
41. An Experimental investigation of higher order mode suppression in TEM cells / S. Deng, D. Pommerenke, T. Hubing, D. Shin // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2008. Vol. 50, N 2. P. 416–419.
42. Рахаева Е.А. Методы расчета и анализ характеристик электромагнитных полей в TEM-камерах: дис. ... канд. физ.-мат. наук : 01.04.01. Самара, 2008. 128 с.

43. Simulation of the effect of inhomogeneities in TEM transmission cells using the FDTD-method / J.V. Hese, L. Martens, D.D. Zutter [et al.] // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 1992. Vol. 34, N 3. P. 292–297.
44. Holloway C.L., Fornberg P. A Comparison of the Currents Induced on an EUT in a TEM cell to those induced in a free-space environment // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2007. Vol. 49, N 3. P. 474–484.
45. Pouhe D. Mutual influence between the equipment under test and TEM cells // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2012. Vol. 54, N 4. P. 726–737.
46. Desideri D., Macshio A. Development and commissioning of a test system based on a TEM cell for RF exposure // Brazilian Journal of Biomedical Engineering. 2011. Vol. 27, N 1. P. 25–30.
47. Alotto P., Desideri D., Macshio A. Parametric analysis and optimization of the shape of the transitions of a two-port rectangular TEM cell // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC EUROPE). 2012. P. 1–6.
48. Hilavin S., Kustepeli A. Design and implementation of a TEM stripline for EMC testing // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2014. Vol. 56, N 1. P. 23–27.
49. EN 55035:2017/CISPR 35. Electromagnetic compatibility of multimedia equipment – Immunity requirements. 2022. 90 p. URL: <https://celectronics.com/learning-center/en-550352017-cispr-35> (accessed: 31.03.2024).
50. IEC 61000-4-20:2022. Electromagnetic compatibility (EMC). Part 4-20: Testing and measurement techniques – Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides. 2022. 229 p. URL: <https://webstore.iec.ch/publication/34378> (accessed: 31.03.2024).
51. TEM cell system for vivo exposure at 2.45 GHz / A. Paffi, M. Liberti, F. Fratta, C. Merla, R. Pinto, G. Lovisolo // 6th European Conf. on Antennas and Propag. (EUCAP). 2012. P. 1099–1101.
52. An experimental investigation of higher order mode suppression in TEM cells / D. Shin, T. Hubing, D. Pommerenke, S. Deng // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2008. Vol. 50, N 2. P. 416–419.

53. Leat C., Walters A.J. Targeted Resonance control in a TEM cell // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2008. Vol. 50, N 2. P. 252–258.

54. Leat C., Walters A.J. Control of the TE resonance in an asymmetric TEM cell // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2008. Vol. 50, N 2. P. 431–434.

55. Malaric K., Bartolic J. TEM-cell with 75 Ω impedance for EMC measurements // 1999 IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 1999. Vol. 1. P. 234–238.

56. Expanding the frequency range of the TEM-t cell for the measurement of shielding materials up to 12 GHz / J. Catrysse, F. Vanhee, D. Pisssoort [et al.] // Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC EUROPE). 2012. P. 1–6.

57. SE measurements with a TEM cell to study gasket reliability / P. Faraji, J.L. Drewniak, D.S. McBain, D. Pommerenke // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 2013. P. 1–4.

58. Сравнение методов исследования эффективности экранирования бортовых кабелей летательных аппаратов / Н.А. Жегов, В.Ю. Кириллов, А.В. Клыков [и др.] // Технологии ЭМС. 2015. Т. 52, № 1. С. 44–48.

59. Park S.-H., Huynh H.-A., Kim S.-Y. Analysis of EMI reduction methods of DC-DC buck converter // IEEE 10th Int. Workshop on the Electromagn. Compat. of Integrated Circuits (EMC Compo). 2015. P. 92–96.

60. Senic D., Sarolic A. Shielding effectiveness measurements in resonant enclosure using mode-tuned and mode-stirred method // 21st Int. Conf. on Applied Electromagn. and communications (ICECom). 2013. P. 1–4.

61. Mandic T., Gillon R., Nauwelaers B. Characterizing the TEM cell electric and magnetic field coupling to PCB transmission lines // IEEE Trans. Electromagn. Compat. 2012. Vol. 54, N 5. P. 976–985.

62. Using termination effect to characterize electric and magnetic field coupling between TEM cell and microstrip line / C. Shi, W. Fang, C. Chai, Y. Huang // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2015. Vol. 57, N 6. P. 1338–1344.

63. Huan W., Chen Z. Compensation method for the coupling error between the EUT and TEM cell in E-field probe isotropic calibration // IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC). 2015. P. 1195–1200.
64. Yunsheng J., Cui M. Research on calibration accuracy of D-Dot transient electric field sensor // IEEE Conf. on Antenna Meas. & Applicat. (CAMA). 2017. P. 69–71.
65. MIL-STD-461G. Department of defense interface standard: Requirements for the control of electromagnetic interference characteristics of subsystems and equipment. 2015. 266 p. URL: http://everyspec.com/MIL-STD/MIL-STD-0300-0499/MIL-STD-461G_53571/ (accessed: 30.03.2023).
66. SAE J 1752/3:2017-09-22. Measurement of radiated emissions from integrated circuits TEM/Wideband TEM (GTEM) Cell Method; TEM Cell (150 kHz to 1 GHz), Wideband TEM Cell (150 kHz to 8 GHz). SAE Int. Publ., 2017. 16 p. URL: <https://www.beuth.de/en/standard/sae-j-1752-3/280447657> (accessed: 30.03.2023).
67. Crawford M.L. Predicting free-space radiated emissions from electronic equipment using TEM cell and open-field measurements // IEEE Int. Symp. Electromagn. Compat. (EMC). 1980. P. 80–85.
68. An EMI Evaluation Method for Integrated Circuits in Mobile Devices / H.H. Park, H.-T. Jang, H.-B. Park [et al.] // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2013. Vol. 55, N 4. P. 780–787.
69. Analysis of EMI effect on flash memory IC / H.-N. Lin, C.-W. Kuo, C.-K. Cheh [et. al.] // IEEE Int. Asia-Pacific Symp. on Electromagn. Compat. (APEMC). 2012. P. 757–760.
70. Muccioli J.P., North T.M., Slattery K.P. Predicting module level RF emissions from IC emissions measurements using a 1 GHz TEM or GTEM cell – a review of related published technical papers // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 2008. P. 1–7.
71. A method for the radiated emission test of IC modules / Y. Lingling, X. Coll, S. Haiyan [et al.] // IEEE Int. Conf. on Electronic Packaging Tech. (ICEPT). 2015. P. 972–974.
72. Experimental microdosimetry techniques for biological cells exposed to nanosecond pulsed electric fields using microfluorimetry /

S. Kohler, R.P. O'Connor, Thi Dan Thao Vu [et al.] // IEEE Trans. on Microw. Theory and Tech. 2013. Vol. 61, N 5. P. 2015–2022.

73. Busygina A.V., Komnatnov M.E., Matveyenko O.A. Problems of investigations in sphere of electromagnetic fields impact on biological objects // IEEE Int. Conf. on Biomedical Engineering and Comput. Techn. (SIBIRCON). 2015. P. 50–54.

74. Specific absorption rate assessment using simultaneous electric field and temperature measurements / D. Arnaud-Cormos, L. Duvillaret, G. Gaborit [et al.] // IEEE Antennas and Wireless Propag. Letters. 2012. Vol. 11. P. 252–255.

75. Microwave radiation induces a heat-shock response and enhances growth in the nematode *Caenorhabditis elegans* / J. Allan, P. Candido, C. Daniells [et al.] // IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn. 2000. Vol. 48, N 11. P. 2076–2081.

76. Frankonia. URL: <https://frankonia-solutions.com/>, свободный (accessed: 31.03.2024).

77. Instruments for industry. URL: <https://www.ametek-cts.com/about-us/brands/ifi>, свободный (accessed: 31.03.2024).

78. Nothofer A., Alexander M. The use of GTEM cells for EMC measurement // National Physical Laboratory. 2003. 53 p.

79. Calo G., Lattarulo F., Petruzzelli V. GTEM cell experimental set up for in vitro dosimetry // Journal of Communic. Software and Systems. 2007. Vol. 3, N 1. P. 34–43.

80. Design of ultra wide band transition connector for GTEM cell / W. Yuanyuan, Y. Mengxia, Z. Wensi, Z. Junru // Int. Conf. on Electronics, Communications and Control (ICECC). 2011. P. 3657–3660.

81. Bartolic J., Malaric K. Distribution of currents on septum in GTEM-cell depending on the resistor position // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 2003. P. 48–50.

82. Wideband analytical model of the GTEM-cell termination / R. Leo, L. Pierantoni, T. Rozzi, L. Zappelli // IEEE Int. Zurich Symp. and Tech. Exhibition on Electromagn. Compat. 1995. P. 607–612.

83. Pouhe D., Sandstede O., Monich G. Optimization of the GTEM cell wideband termination // Int. Conf. on Electromagn. in Advanced Applic. (ICEAA). 2011. P. 1285–1289.

84. Maier B., Pouhe D. Design and simulation of a mode suppressed GTEM cell // IEEE Int. Conf. on Electromagn. in Advanced Applications (ICEAA). 2012. P. 1159–1164.
85. Malaric K., Bartolic J., Malaric R. Determination of the higher order mode occurrence in a TEM and GTEM-cell using self developed computer program // IEEE Int. Asia-Pacific Microwave Conf. 2000. P. 1027–1030.
86. Dipole-moment model including phases for IC near-field analysis based on GTEM cell measurements / K. Kwak, D. Shin, Ji. Kim, Ja. Kim // IEEE Int. Asia-Pacific Symp. on Electromagn. Compat. (APEMC). 2016. P. 605–607.
87. Sinha S., Stander T. Development, simulation and construction of cost-effective GTEM cells // Int. Conf. Radioelektronika. 2013. P. 39–44.
88. Influence of absorber termination quality in the GTEM cell on the RF radiation measurement / N. Bahtina, Y.M. Poplavko, A.M. Shevchuk [et al.] // Int. Crimean Conference Microwave & Telecommunication Techn. 2005. P. 766–767.
89. Monich G., Pouhe D., Sandstede O. A system theoretical approach for investigating the performance of GTEM cell hybrid termination // Int. Conf. on Electromagnetics in Advanced Applic. (ICEAA). 2013. P. 49–53.
90. Chakrabarty A., Sanyal S., Ghosh S. Effect of cross-polarization specification on the test volume of a GTEM cell // Int. Conf. on Electromagn. Interference and Compat. (INCEMIC). 2003. P. 343–347.
91. Комнатнов М.Е. Обзор TEM-камер, используемых при проведении испытаний на ЭМС // Материалы всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2013». 2013. Ч. 1. С. 116–119.
92. Differences in specifications of field uniformity for GTEM cell between the standard IEC 61000-4-3:2002 and IEC 61000-4-20:3003 / Z. Xiang, W. Liaolan, W. Long [et al.] // IEEE Int. Asia-Pacific Conf. on Environmental Electromagnetics (CEEM). 2006. P. 782–786.

93. Characterizations of FPGA chip electromagnetic emissions based on GTEM cell measurements / K. Lee, M.Z.M. Jenu, C. Seong [et al.] // IEEE Int. Asia-Pacific Symp. on Electromagn. Compat. (APEMC). 2012. P. 978–982.

94. Nicolae P., Nicolae I., Stanescu D. Using GTEM cells for immunity tests on electronic boards with microcontroller // IEEE Int. Symp. on Electromagn. Compat. (EMC). 2012. P. 44–49.

95. Bronaugh E.L., Osburn J.D.M. Measuring antenna parameters in a GHz transverse electromagnetic (GTEM) cell // IEEE Int. Symp. Antennas and Propagation Society. 1992. P. 2064–2066.

96. Jang T.H., Lim J.H., Lee B.W. An alternative method for calibration of monopole and loop antenna in GTEM Cell // IEEE Int. Symp. Asia Pacific on Electromagn. Compat. (APEMC). 2016. P. 873–875.

97. Loh T., Alexander M.J. A method to minimize emission measurement uncertainty of electrically large EUTs in GTEM Cells and FARs above 1 GHz // IEEE Trans. on Electromagn. Compat. 2006. Vol. 48, N 4. P. 634–640.

98. Tescom. URL: <https://ctscorp-usa.com/> (accessed: 31.03.2024).

99. IEEE 299.1. Standard method for measuring the shielding effectiveness of enclosures and boxes having all dimensions between 0.1 m and 2 m. 2013. 96 p. URL: <https://standards.ieee.org/ieee/299/3090/> (accessed: 31.03.2024).

100. Wilson P.F., Ma M.T. Small aperture analysis of the dual TEM cell and an investigation of test object scattering in a single TEM cell. USA: National bureau of standards, 1984. Oct. 64 p.

101. ASTM E57. Test method for electromagnetic shielding effectiveness of planar materials. 1983. URL: <https://www.document-center.com/standards/show/ASTM-E57/history/1983%20EDITION> (accessed: 20.03.2023).

102. ASTM D4935. Standard Test Method for Measuring the Electromagnetic Shielding Effectiveness of Planar Materials. 2018. URL: <https://www.astm.org/Standards/D4935.htm> (accessed: 20.03.2023).

103. Fusco V.F. Microwave circuits: computer aided analysis and design. Prentice-Hall International (UK), 1987. 358 p.

104. Setup for EMI shielding effectiveness tests of electrically conductive polymer composites at frequencies up to 3.0 GHz / R. Valente, C. Ruijter, D. Vlasveld [et al.] // IEEE Access. 2017. Vol. 5. P. 16665–16675.

105. Coaxial test fixture for determining shielding effectiveness of a device against interfering electromagnetic fields: пат. US4814713А США, МПК G01R31/02. № 5617 / Van Brunt M.K. (US), Miller J.S. (US) ; заявл. 21.01.1987 ; опубл. 21.03.1989.

106. Способ измерения частотного спектра комплексной диэлектрической проницаемости: пат. RU2660284С1 Рос. Федерация, МПК G01R27/26. № 2017127063 / Молостов И.П., Щербинин В.В. ; заявл. 19.07.2017 ; опубл. 05.07.2017.

107. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Матвеевко О.А. ТЕМ-камера для оценки уровней помехоэмиссии и помехоустойчивости радиоэлектронных средств с возможностью исследования биологических объектов в диапазоне частот до 2 ГГц // Технологии ЭМС. 2018. Т. 67, № 4. С. 46–56.

108. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Т. Оптимизация геометрических параметров ТЕМ-камеры // Технологии ЭМС. 2016. Т. 59, № 4. С. 7–16.

109. Komnatnov M., Gazizov T., Melkozerov A. Optimization of the TEM-cell for a new type of climatic chamber // IEEE Int. Conf. on Numerical Electromagnetic Modeling and Optimization for RF, Microwave, and Terahertz Applications (NEMO). 2015. P. 1–4.

110. Комнатнов М.Е., Тернов С.А. Полосковая линия для оценки устойчивости радиоэлектронных средств к воздействию электромагнитного излучения в диапазоне частот до 3 ГГц // Технологии ЭМС. 2017. Т. 62, № 3. С. 44–53.

111. Дроздова А.А. Оценка уровня наведённого тока на испытуемый объект в ТЕМ-камере при воздействии на её вход электростатического разряда / А.А. Дроздова, М.Е. Комнатнов // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2022. Т. 25, № 4. С. 28–36.

112. Demakov A.V., Komnatnov M.E. Improved TEM-cell for EMC tests of integrated circuits // IEEE Int. multi-conf. on eng., comp. and information sciences (SIBIRCON). 2017. P. 399–402.

113. Демаков А.В., Комнатнов М.Е. Разработка TEM-камеры для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2018. Т. 21, № 1. С. 52–56.

114. Demakov A.V., Komnatnov M.E. TEM cell for testing low-profile integrated circuits for EMC // IEEE Int. Conf. on Micro/Nanotech and Electron Devices (EDM). 2020. P. 154–158.

115. Demakov A.V., Komnatnov M.E. Development of an improved coaxial cell for measuring the shielding effectiveness of materials // IOP Conf. Series: Mat. Sci. and Eng. 2020. Vol. 734, N 1. P. 1–5.

116. Study of impact of picosecond pulses on functional status of mitochondria of mice liver in TEM-cell / O.A. Matveyenko, M.E. Komnatnov, A.V. Busygina, L.P. Zharkova // Int. Conf. on Micro/Nanotech. and Electron Devices (EDM). 2016. P. 657–660.

117. Аппаратно-программный комплекс для синтеза и испытаний оптимальной сети высоковольтного электропитания: пат. RU2728325 Рос. Федерация. № 2019140938 / Комнатнов М.Е., Куксенко С.П., Газизов Т.Р., Демаков А.В., Осинцев А.В., Собко А.А., Иванов А.А., Квасников А.А. ; заявл. 09.12.2019 ; опубл. 29.07.2020, Бюл. № 22.

118. Quasi-static simulation of TEM/GTEM-cells: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2014661616 Рос. Федерация. № 2014619247 / Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. ; заявл. 15.09.2014. ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 10.11.2014.

119. TALGAT 2017: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018611481 Рос. Федерация. № 2017663209 / Газизов Т.Р., Мелкозеров А.О., Газизов Т.Т., Комнатнов М.Е. и др. ; заявл. 13.12.2017 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 02.02.2018.

120. Yuan Y.-X. A review of trust region algorithms for optimization // IEEE Int. Congress on Industrial and Applied Mathematics (ICIAM). 1999. P. 1–11.

121. A hybrid aggressive space-mapping algorithm for EM optimization / M.H. Bakr, J.W. Bandler, N. Georgieva, K. Madsen // IEEE Trans. on Microw. Theory and Techn. 1999. Vol. 47, N 12. P. 2440–2449.

122. Guo P. The enhanced genetic algorithms for the optimization design // Int. Conf. on Biomedical Engineering and Informatics (BMEI). 2010. P. 2990–2994.

123. Quasi-static modeling of GTEM-cells: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017610414 Рос. Федерация. № 2016619498 / Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. ; заявл. 08.09.2016. ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 10.01.2017.

124. Вычисление методом конечных элементов электрических параметров поперечного сечения ТЕМ/GTEM-камеры: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017610414 Рос. Федерация. № 202361643 / Комнатнов М.Е. ; заявл. 5.04.2023 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 18.04.2023.

125. ТЕМ-камера: пат. RU2606173 Рос. Федерация. № 2015156668 / Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. ; заявл. 28.12.2015 ; опубл. 10.01.2017, Бюл. № 1.

126. ТЕМ-камера для оценки помехоэмиссии и помехоустойчивости интегральных схем: пат. RU2727075 Рос. Федерация. № 2019140183 / Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. ; заявл. 09.12.2019 ; опубл. 17.07.2020, Бюл. № 20.

127. Carpenter. URL: <https://www.carpentertechnology.com/alloy-finder/humu-800> (accessed: 31.03.2024).

128. Методика проектирования GTEM-камеры / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов, А.А. Собко, А.В. Осинцев // Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. «Современные технологии в науке и образовании» (СТНО). 2016. В 4 т. Т. 2. С. 184–187.

129. ETS Lindgren. URL: <https://www.ets-lindgren.com/products/absorber?page=Products-Landing-Page> (accessed: 31.03.2024).

130. Тернов С.А., Демаков А.В., Комнатнов М.Е. Исследование влияния ширины активного и опорного проводников на коэффициент передачи и отражения устройства полосковой линии для испытания на электромагнитную совместимость // Всерос. науч.-техн. конф. молодых ученых и студентов «Современные проблемы радиоэлектроники». 2017. С. 380–384.

131. Тернов С.А., Комнатнов М.Е. Расширение частотного диапазона полосковой линии для испытания на электромагнитную совместимость // Тез. докл. науч.-техн. конф. молодых специалистов «Электронные и электромеханические системы и устройства». 2018. С. 80–82.

132. Сагалаков Е.В., Комнатнов М.Е. Электродинамическое моделирование полосковой линии для испытания радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость // Научная сессия ТУСУР-2015 : Материалы докл. всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых. 2015. С. 136–138.

133. Коаксиальная камера для измерения эффективности электромагнитного экранирования радиопоглощающих материалов: пат. RU2759079 Рос. Федерация. № 2020131978 / Демаков А.В., Комнатнов М.Е., Иванов А.А., Николаев И.И., Газизов Т.Р. ; заявл. 29.09.2020 ; опубл. 09.11.2021, Бюл. № 31.

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

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

136. Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. О совместных климатических и электромагнитных испытаниях радиоэлектронной аппаратуры // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. 2014. Т. 4, № 34. С. 39–45.

137. Комнатнов М.Е. Обоснование целесообразности проведения совместного испытания на электромагнитные и температурные воздействия бортовой радиоэлектронной аппаратуры кос-

мического аппарата // Сб. тр. VI ОМНТК «Молодежь. Техника. Космос». 2014. С. 46–48.

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

139. Климатическая экранированная камера: пат. RU2558706 Рос. Федерация. № 2014103639/07 / Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р. ; заявл. 03.02.2014 ; опубл. 08.07.2015, Бюл. № 22.

140. Камера для совместных климатических и электромагнитных воздействий на биологический объект: пат. RU2627985 Рос. Федерация. № 2015141198 / Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Бусыгина А.В., Собко А.А., Осинцев А.В., Матвеев О.А. ; заявл. 28.09.2015 ; опубл. 14.08.2017, Бюл. № 23.

141. Осинцев А.В., Комнатнов М.Е. Объектно-ориентированный анализ алгоритма управления и проектирование архитектуры программного обеспечения для климатической экранированной ТЕМ-камеры // Доклады ТУСУР. 2019. Т. 22, № 2. С. 83–89.

142. Комнатнов М.Е., Осинцев А.В., Собко А.А. Обзор операционных систем реального времени // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2016». 2016. Ч. 2. С. 319–321.

143. Osintsev A.V., Sobko A.A., Komnatnov M.E. Software under control of a real-time operating system for environmental shielded TEM-chamber // IEEE Int. Conf. on Micro/Nanotech. and Electron Devices (EDM). 2016. P. 159–163.

144. Osintsev A.V., Sobko A.A., Komnatnov M.E. Diagnostic service by means of a real-time operating system for environmental shielded TEM-chamber // IEEE Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). 2017. P. 301–304.

145. Demakov A.V., Osintsev A.V., Komnatnov M.M. Command console of environmental shielded TEM-chamber // IEEE Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). 2017. P. 403–405.

146. Комнатнов М.Е., Осинцев А.В., Собко А.А. Модуль связи климатической экранированной ТЕМ-камеры // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016». 2016. С. 300–303.

147. Симулятор климатической экранированной камеры: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2018660595 Рос. Федерация. № 2018617322 / Осинцев А.В., Комнатнов М.Е, Собко А.А. ; заявл. 13.07.2018 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 27.08.2018.

148. Осинцев А.В., Комнатнов М.Е. Программное обеспечение терморегулятора климатической экранированной ТЕМ-камеры // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2015. № 1-2. С. 55–59.

149. Osintsev A.V., Sobko A.A., Komnatnov M.E. Method for synchronizing a group of heterogeneous microcontrollers with time control of synchronous work // IEEE Int. multi-conf. on engineering, computer and information sciences (SIBIRCON). 2017. P. 305–308.

150. Осинцев А.В., Собко А.А., Комнатнов М.Е. Синхронизация группы микроконтроллеров // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых учёных «Научная сессия ТУСУР-2017». 2017. С. 80–83.

151. Способ синхронизации группы разнотипных микроконтроллеров с управлением временем синхронной работы // А.А. Собко, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов / Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 3. С. 51–63.

152. Симулятор синхронизации группы микроконтроллеров: свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ 2017617018 Рос. Федерация. № 2017613710 / Осинцев А.В., Газизов Т.Р., Комнатнов М.Е, Собко А.А., Сухоруков М.П. ; заявл. 24.04.2017 ; зарег. в Реестре программ для ЭВМ 21.06.2017.

153. Устройство синхронизации микроконтроллеров: пат. RU2674878 Рос. Федерация. № 2017117125 / Собко А.А., Осинцев А.В., Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Сухоруков М.П. ; заявл. 16.05.2017 ; опубл. 13.12.2018, Бюл. № 35.

154. Комнатнов М.Е., Собко А.А., Осинцев А.В. Плата управления терморегулятором климатической экранированной

ТЕМ-камеры // Междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2016». 2016. С. 314–317.

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

156. Собко А.А., Комнатнов М.Е. Терморегулятор для климатической экранированной камеры // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2015. № 1-2. С. 59–62.

157. Собко А.А., Комнатнов М.Е. Усовершенствование платы управления терморегулятором климатической экранированной камеры // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2016. Т. 1. С. 225–226.

158. Третьяков Т.И., Комнатнов М.Е. Усовершенствование терморегулятора климатической экранированной ТЕМ-камеры // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2022. Ч. 1. С. 290–293.

159. Собко А.А., Осинцев А.В., Комнатнов М.Е. Автоматический регулятор тока на основе комбинированной структуры ПИД-регулятора // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2017». 2017. С. 77–80.

160. Методика управления группой элементов Пельтье посредством реверсивных преобразователей с дополнительным ключом управления электропитанием для климатической ТЕМ-камеры // А.А. Собко, А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов, Т.Р. Газизов // Системы управления, связи и безопасности. 2019. № 4. С. 323–341.

161. Osintsev A.V., Sobko A.A., Komnatnov M.E. Multiphase power supply when inverting currents for group of Peltier elements // IOP Journal of Physics: Conf. Series. Int. Conf. Information Tech. in Business and Industry. 2018. Vol. 1015, N 5. P. 1–6.

162. Пятифазная широтно-импульсная модуляция терморегулятора / А.В. Осинцев, М.Е. Комнатнов, А.А. Собко, А.В. Демаков // Междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. «Современные

технологии в науке и образовании» (СТНО-2016). 2016. Т. 1. С. 27–30.

163. Н-мост на мощных полевых транзисторах, управляемый одним ШИМ-сигналом / А.А. Собко, М.Е. Комнатнов, А.В. Демаков, А.В. Осинцев // Современные технологии в науке и образовании – СТНО-2016: сб. тр. междунар. науч.-техн. и науч.-метод. конф. 2016. В 4 т. Т. 1. С. 15–17.

164. Стол для электромагнитных исследований биологических объектов: пат. RU2628001 Рос. Федерация. № 2015141200 / Комнатнов М.Е., Газизов Т.Р., Бусыгина А.В. ; заявл. 28.09.2015 ; опубл. 14.08.2017, Бюл. 23.

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

166. Комнатнов М.Е., Бусыгина А.В. Устройство для визуального контроля результатов совместного влияния климатических и электромагнитных факторов на живые ткани // Материалы докл. всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР-2015». 2015. Ч. 1. С. 168–171.

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

168. Матвеевко О.А., Комнатнов М.Е. Разработка методологических подходов к изучению совместного влияния электромагнитных и климатических факторов на биологические объекты // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2015. Ч. 2. С. 42–47.

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

170. Бебякина Е.В., Бусыгина А.В., Комнатнов М.Е. Моделирование поглощения электромагнитной энергии биологическим объектом в ТЕМ-камере // Материалы междунар. науч.-техн.

конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016». 2016. Ч. 2. С. 295–297.

171. Балахнина Я.В., Бусыгина А.В., Комнатнов М.Е. Изменение температуры объекта под воздействием электромагнитного поля в ТЕМ-камере // Материалы междунар. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2016». 2016. Ч. 2. С. 292–295.

172. Бебякина Е.В., Бусыгина А.В., Комнатнов М.Е. Моделирование поглощения электромагнитной энергии биологическим объектом в ТЕМ-ячейке // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2015. Ч. 2. С. 9–13.

173. ГОСТ 28199-89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Ч. 2. Испытания. Испытание А: Холод. М.: Стандартиформ, 2006. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/3776/> (дата обращения: 31.03.2024).

174. ГОСТ 28200-89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Ч. 2. Испытания. Испытание В: Сухое тепло. М.: Стандартиформ, 2006. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/1954/> (дата обращения: 31.03.2024).

175. ГОСТ 28201-89. Основные методы испытаний на воздействие внешних факторов. Ч. 2. Испытания. Испытание Са: Влажное тепло, постоянный режим. М.: Стандартиформ, 2006. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/1567/> (дата обращения: 31.03.2024).

176. ГОСТ Р 50414-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование для испытаний. Камеры экранированные. Классы, основные параметры, технические требования и методы испытаний. URL: <https://internet-law.ru/gosts/gost/19066/> (дата обращения: 31.03.2024).

177. AIAA S-121-2017. Electromagnetic Compatibility Requirements For Space Equipment And Systems. 2017. 116 p. URL: <https://webstore.ansi.org/standards/aiaa/aiaa121a2017> (accessed: 31.03.2024).

178. Atmel. URL: <http://www.atmel.com> (accessed: 10.01.2016).

179. Осинцев А.В., Собко А.А., Комнатнов М.Е. Разработка библиотеки датчика терморегулятора климатической экранированной ТЕМ-камеры // Динамика систем, механизмов и машин. 2016. Т. 2, № 1. С. 117–120.

180. Осинцев А.В., Комнатнова М.Е. Разработка кроссплатформенной библиотеки для прецизионного цифрового датчика МАХ31725 // Электронные средства и системы управления: материалы междунар. науч.-практ. конф. 2016. Т. 1. С. 227–229.

181. Осинцев А.В., Собко А.А., Комнатнов М.Е. Система сбора и обработки данных климатической экранированной ТЕМ-камеры // Сб. науч. тр. «Современные проблемы радиоэлектроники». 2016. С. 538–542.

182. Третьяков Т.И., Попов П.А., Комнатнов М.Е. Экспериментальное исследование системы нагрева и охлаждения испытательного контейнера климатической экранированной камеры // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2021. Ч. 2. С. 44–46.

183. Романов А.А., Собко А.А., Комнатнов М.Е. Разработка платы ввода и обработки команд управления климатической экранированной камерой // Электронные средства и системы управления: материалы междунар. науч.-практ. конф. 2017. Ч. 2. С. 20–22.

184. Абрамова К.Н., Осинцев А.В., Комнатнов М.Е. Разработка блока управления вентиляторами морозильной системы климатической экранированной камеры // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2021. Ч. 1. С. 53–55.

185. Каргаполова Н.В., Комнатнов М.Е. Портативный датчик напряженности электрического поля // Электронные средства и системы управления: материалы докл. междунар. науч.-практ. конф. 2015. Ч. 2. С. 25–30.

Научное издание
Комнатнов Максим Евгеньевич
ПРОЕКТИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ
ЛИНИЙ ПЕРЕДАЧИ ДЛЯ ИСПЫТАНИЯ
РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ
НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ
Монография

Подписано в печать 21.05.24. Формат 60x84/16.

Усл. печ. л. 9,77. Тираж 100 экз. Заказ № 88.

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«Томский государственный университет
систем управления и радиоэлектроники»
634050, г. Томск, пр. Ленина, 40
Тел. (3822) 533018