

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.8.6>

УДК: 621.372.8

ТЕМ КАМЕРА ОТКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ ДЛЯ ИСПЫТАНИЙ МАЛОГАБАРИТНЫХ РАДИОЭЛЕКТРОННЫХ СРЕДСТВ НА ЭЛЕКТРОМАГНИТНУЮ СОВМЕСТИМОСТЬ

П.А. Попов, М.В. Храмцов

Томский государственный университет систем управления и радиоэлектроники
634050, Томск, ул. Ленина, 40.

Статья поступила в редакцию 28 февраля 2023 г.

Аннотация. В работе представлена разработка и изготовление ТЕМ-камеры открытого исполнения. Она позволяет выполнять оценку эмиссии и устойчивости к помехам радиоэлектронных средств, размером не более $184 \times 162 \times 30$ мм. Выполнен аналитический и квазистатический анализ регулярной части ТЕМ-камеры. В диапазоне частот до 1,4 ГГц значение модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ регулярной части не превышает минус 45 дБ. Разработана электродинамическая модель ТЕМ-камеры и выполнена оптимизация геометрических параметров с применением генетического алгоритма. Анализ электродинамической модели показал, что в диапазоне частот до 920 МГц коэффициент стоячих волн по напряжению (КСВН) не превышает 1,3. Неравномерность электрического поля в области размещения испытуемого объекта составляет не более 6 дБ в диапазоне частот до 875 МГц. Применяя численный метод конечных элементов и метод матрицы линии передачи выполнена проверка достоверности полученных результатов. Разработана твердотельная модель ТЕМ-камеры для оценки влияния конструктивных особенностей сборки. Частотные зависимости $|S_{11}|$ твердотельной модели не превышают минус 17,69 дБ в диапазоне частот до

916 МГц. Выполнено изготовление ТЕМ-камеры посредством лазерной резки и гибки алюминиевого листа. Используя векторный анализатор цепей Микран Р4М-18 выполнено измерение S -параметров изготовленной ТЕМ-камеры. Модуль коэффициента передачи $|S_{21}|$ и отражения $|S_{11}|$ изготовленной ТЕМ-камеры в диапазоне частот до 936 МГц не превышают минус 2,2 дБ и минус 17,69 дБ. Представлены результаты оценки напряженности поля излучаемых помех от отладочной платы на базе ПЛИС Altera Cyclone IV в диапазоне частот до 1 ГГц с помощью, изготовленной ТЕМ-камеры.

Ключевые слова: ТЕМ-камера открытого исполнения, электромагнитная совместимость, эмиссии, устойчивость, аналитический расчет, квазистатический анализ, электродинамический анализ.

Автор для переписки: Попов Павел Андреевич, popov.pav.and@gmail.com

Введение

В настоящее время, радиоэлектронные средства (РЭС) используются во всех сферах деятельности. Тенденция развития РЭС направлена на рост быстродействия путем увеличения верхних граничных частот. Вместе с тем уменьшаются габариты устройств и снижаются питающие напряжения. Кроме роста производительности РЭС, также возрастает уровень эмиссий [1] и снижается их устойчивость к помехам [2], что может привести к сбою или полному отказу работы устройств. Поэтому важным этапом разработки любого РЭС является испытание на соответствие требованиям по обеспечению электромагнитной совместимости (ЭМС).

При измерении уровня напряженности поля излучаемых помех и оценке восприимчивости к помехам требуется воссоздать условия максимально приближенные к эксплуатационным. Для реализации таких условий применяются специализированные испытательные средства, такие как безэховая камера, реверберационная камера и открытая испытательная площадка. В данных испытательных установках целесообразно проводить испытания на ЭМС крупногабаритных РЭС, по той причине, что испытания дорогостоящие и

требуют сложной измерительной оснастки, поэтому проводить испытания на ЭМС малогабаритных РЭС в таких установках неэкономично. Для испытаний на соответствие требованиям ЭМС малогабаритных РЭС стоит использовать ТЕМ-камеру. Множество стандартов, таких как IEC 61000-4-3 [3], IEC 61000-4-20 [4] и ISO 11452-3 [5], требуют использовать ТЕМ-камеру для испытаний РЭС. В зависимости от конкретных задач, диапазона рабочих частот и размера испытываемого объекта (ИО) ТЕМ-камеры могут быть выполнены в различном конструктивном исполнении [6-9]. Существуют ТЕМ-камеры открытого и закрытого конструктивного исполнения, с симметричным и асимметричным расположением центрального проводника относительно корпуса. Преимуществом ТЕМ-камеры открытого исполнения является отсутствие боковых стенок, что позволяет избежать сложности изготовления и предоставить постоянный доступ к ИО. Цель работы – представить результаты разработки и изготовления ТЕМ-камеры открытого исполнения.

1. Применение ТЕМ-камеры открытого исполнения

Общий вид ТЕМ-камеры открытого исполнения представлен на рисунке 1. Она представляет собой модифицированную конструкцию полосковой линии и состоит из трех частей: регулярной части и двух сужающихся клинообразных переходов. Регулярная часть выполнена из центральной токнесущей пластины и двух параллельных пластин корпуса. Сужающиеся переходы обеспечивают подключение к ТЕМ-камере СВЧ-соединителей.

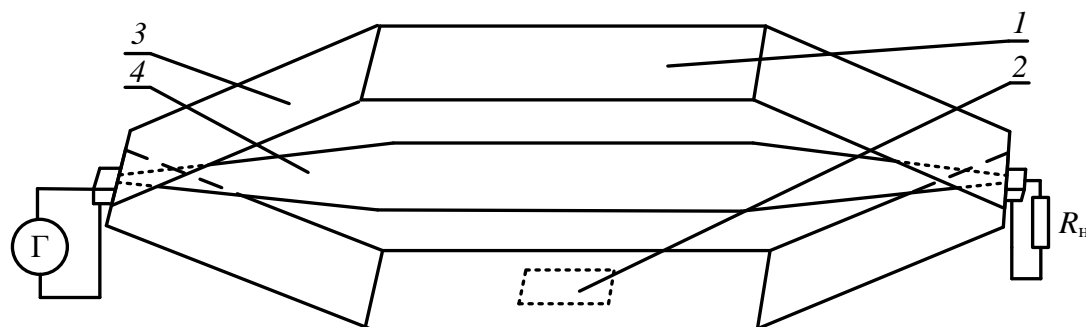


Рис. 1. ТЕМ камера открытого исполнения: 1 – корпус; 2 – место размещения ИО; 3 – клинообразные сужающиеся переходы; 4 – центральный проводник

Оценка устойчивости к помехам выполняется при размещении ИО в рабочей области ТЕМ-камеры. К входу одного из СВЧ-соединителей подключается генератор и подается сигнал с заданными характеристиками. В результате на ИО объект воздействует однородное поле, поглощаемое нагрузкой, которая подключена к другому СВЧ-соединителю. Фиксируется уровень напряженности электрического поля, при котором ИО перестает функционировать с заданным качеством. При измерении напряженности поля излучаемых помех ИО также размещается в регулярной части камеры. К одному из СВЧ-соединителей подключается согласованная нагрузка, а к другому измерительный приемник. После этого измеряется уровень наведенных токов от ИО на центральный проводник ТЕМ-камеры.

2. Аналитический расчет

На рисунках 2 и 3 представлена структура ТЕМ-камеры открытого исполнения в виде продольного и поперечного сечения.

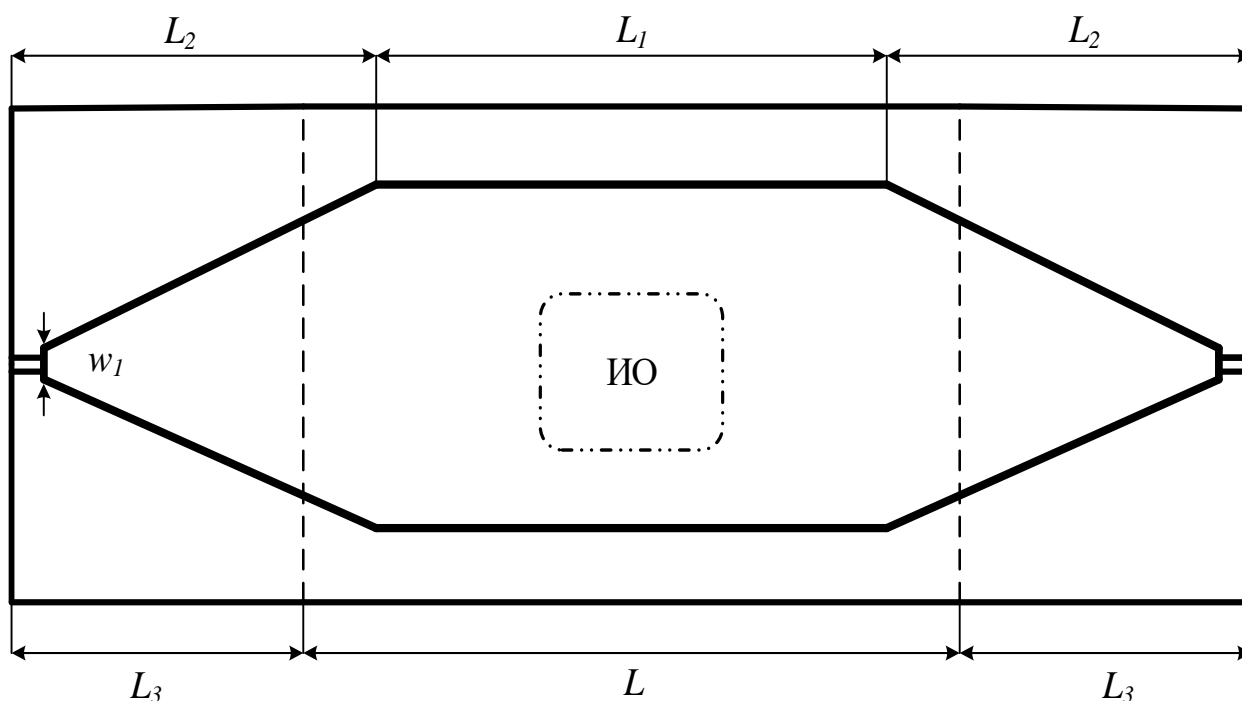


Рис. 2. Продольное сечение ТЕМ-камеры открытого исполнения: вид сверху

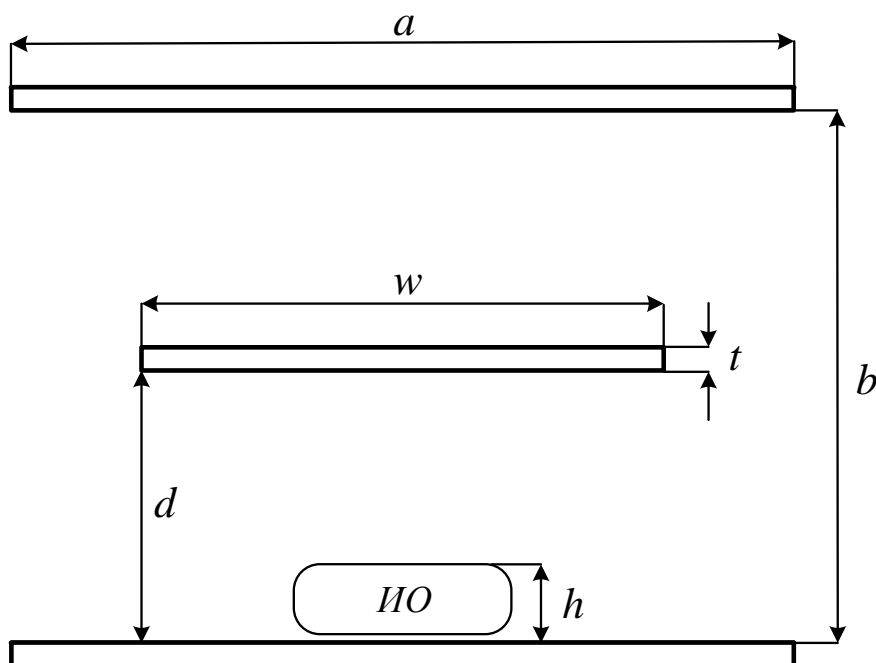


Рис. 3. Поперечное сечение ТЕМ-камеры открытого исполнения

Геометрические параметры ТЕМ-камеры определяются ее волновым сопротивлением, которое должно составлять 50 Ом для обеспечения минимального значения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) и согласования с внешней измерительной оснасткой. От габаритов ТЕМ-камеры также зависит рабочий диапазон частот и максимальный размер ИО. Так, с увеличением габаритов ТЕМ-камеры снижается рабочий диапазон частот.

В регулярной части ТЕМ-камеры, напряженность поля при расстоянии d между центральным проводником и корпусом находится из соотношения (1):

$$E_v = \frac{V_c}{d} = \frac{\sqrt{P_n R_c}}{d}, \quad (1)$$

где V_c – входное напряжение ТЕМ-камеры, d – расстояние между центральным проводником и стенкой корпуса ТЕМ-камеры, P_n – мощность генератора, R_c – сопротивление линии передачи.

Для выполнения условия равномерного распределения ЭМВ, необходимо чтобы максимальная высота ИО составляла не превышала 30 % от расстояния между центральным проводником и корпусом ТЕМ-камеры [4]:

$$d \geq 3h, \quad (2)$$

где h – высота ИО.

Согласно [10] максимальная длина ИО не должна превышать 60 % от длины корпуса регулярной части ТЕМ-камеры:

$$L \geq \frac{l}{0,6}, \quad (3)$$

где L – длина регулярной части ТЕМ-камеры, l длина ИО.

Длина сужающихся клинообразных переходов находится из соотношения [11]:

$$L_3 \geq \frac{L}{2}. \quad (4)$$

Длина отрезка центрального проводника, расположенного в регулярной части камеры [11]:

$$L_1 \geq 0,92L. \quad (5)$$

Ширина корпуса ТЕМ-камеры в регулярной части равна [11]:

$$a = 1,67b, \quad (6)$$

где b – высота ТЕМ-камеры.

Ширина отрезка центрального проводника, расположенного в регулярной части ТЕМ-камеры [11]:

$$w = 0,72a. \quad (7)$$

Волновое сопротивление без учета толщины проводника находится из выражения (8) [11]:

$$Z_0 = \frac{n_0}{4 \left[\frac{a}{2} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\sinh \left(\frac{\pi g}{2b} \right) \right) \right]} - \frac{C}{\varepsilon_0}, \quad (8)$$

где $n_0 = 120 \cdot \pi$ – характеристическое сопротивление вакуума, C – погонная емкость.

Погонная емкость C определяется следующим образом:

$$\frac{C}{\varepsilon_0} = \left[\frac{a}{b} - \frac{2}{\pi} \ln \left(\sinh \left(\frac{\pi g}{2b} \right) \right) \right] - \frac{\Delta C}{\varepsilon_0}, \quad (9)$$

где $\frac{\Delta C}{\varepsilon_0} = \frac{2}{\pi} \ln \left(\frac{1 + \sqrt{k}}{1 + \sqrt{\lambda}} \right)^2 \left(\frac{1 + k}{1 + \lambda} \right)$, k – волновое число, λ – длина волны в камере.

Волновое сопротивление линии передачи с конечной толщиной проводника определяется из выражения (10) [12]:

$$Z_0 = \frac{n_0}{4 \left[\frac{w}{b-t} + \frac{C_f'}{\varepsilon_0} \right]}, \quad (10)$$

где C_f' – погонная ёмкость, при $\frac{a-w}{2b} \geq 0,4$ определяется как:

$$\frac{C_f'}{\varepsilon_0} = \frac{1}{\pi} \left[\frac{b}{b-t} \ln \left(\frac{t(2b-t)}{(b-t)^2} \right) + \ln \left[\coth \frac{\pi}{2} \left(\frac{a-w}{b-t} \right) \right] \right] \dots, \quad (11)$$

в случае $\frac{a-w}{2b} < 0,4$

$$\frac{C_f'}{\varepsilon_0} = \frac{2b}{\pi(b-t)} \ln \left[1 + \coth \frac{\pi}{2} \left(\frac{a-w}{b-t} \right) \right] + \frac{t}{a-w} \dots \quad (12)$$

Аналитический расчет поперечного сечения регулярной части ТЕМ-камеры выполнялся исходя из условия, что максимальный размер ИО должен составлять не менее 180×150×30 мм. Так, в результате расчета волновое сопротивление регулярной части Z_0 составило 50,13 Ом, рассчитанные геометрические параметры представлены в таблице 1.

Таблица 1. Геометрические параметры регулярной части ТЕМ-камеры, полученные в результате аналитического расчета

Параметры	Значение, мм
Ширина корпуса, a	350
Ширина центрального проводника, w	300
Высота, h	182
Расстояние от корпуса до центрального проводника, d	90
Толщина проводника, t	2

3. Квазистатический анализ

В случае аналитического расчета поперечного сечения регулярной части ТЕМ-камеры выполняется расчет с помощью приближенных формул. Поэтому выполнен квазистатический анализ регулярной части ТЕМ-камеры с помощью ПО TALGAT [13]. В качестве исходных данных геометрических параметров ТЕМ-камеры приняты параметры, полученные при выполнении аналитического

расчета, представленные в таблице 1. В результате квазистатического анализа Z_0 составило 45,34 Ом. Для достижения значения волнового сопротивления близкого к 50 Ом выполнена коррекция геометрических параметров. В результате волновое сопротивление Z_0 составило 50,2 Ом. Геометрические параметры регулярной части ТЕМ-камеры, полученные при квазистатическом анализе представлены в таблице 2.

Таблица 2. Геометрические параметры регулярной части ТЕМ-камеры, полученные в результате квазистатического анализа

Параметры	Значение, мм
Ширина корпуса, a	320
Ширина центрального проводника, w	270
Высота, h	186
Расстояние от корпуса до центрального проводника, d	92
Толщина проводника, t	2

Построена электродинамическая модель регулярной части ТЕМ-камеры длиной $L=330$ мм, с размерами поперечного сечения представленными в таблице 2. Выполнен электродинамический анализ регулярной части ТЕМ-камеры и построен график частотных зависимостей модуля коэффициента отражения $|S_{11}|$ (рисунок 4). Максимальное значение $|S_{11}|$ в диапазоне частот до 1,4 ГГц не превышает минус 45 дБ.

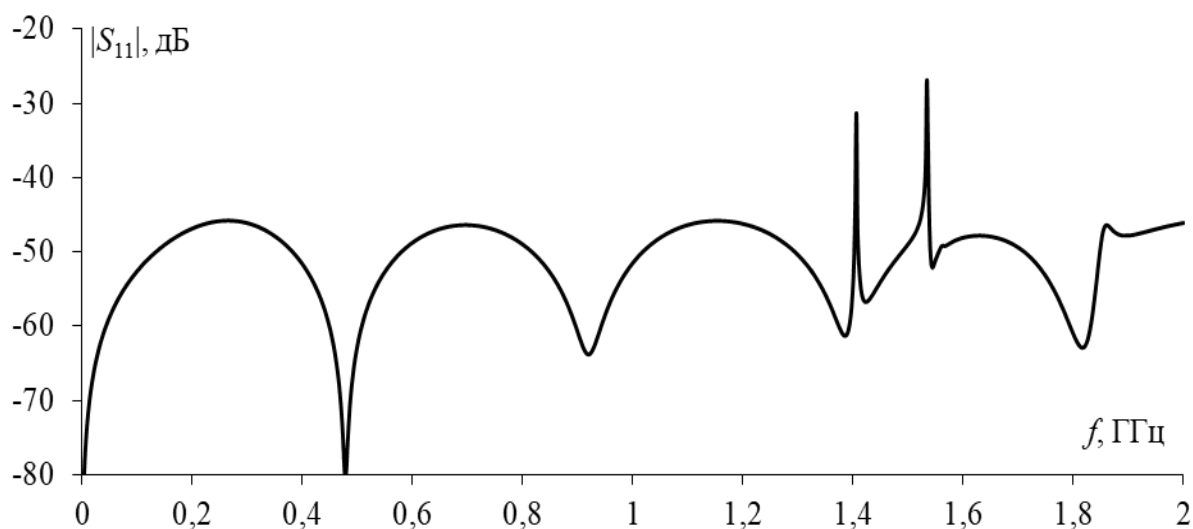


Рис. 4. Частотные зависимости $|S_{11}|$ регулярной части

4. Электродинамический анализ

Выполнена разработка электродинамической модели ТЕМ-камеры открытого исполнения, представленной на рисунке 5. Геометрические параметры поперечного сечения ТЕМ-камеры представлены в таблице 2. Длина корпуса в регулярной части принята равной $L = 330$ мм, а длина центрального проводника $L_1 = 300$ мм. Длина клинообразных сужающихся переходов составляет $L_2 = 246$ мм, а длина в центрального проводника в области сужения $L_3 = 220$ мм.

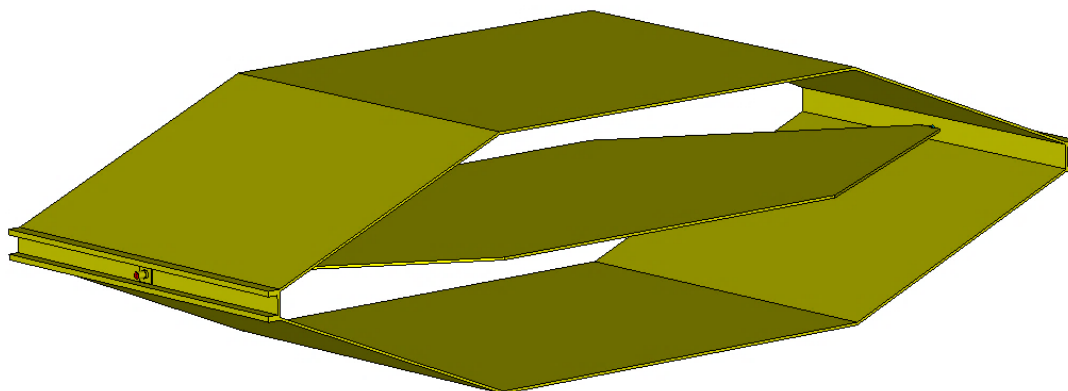


Рис. 5. Электродинамическая модель ТЕМ-камеры

С целью снижения максимального значения $|S_{11}|$ выполнена оптимизация параметров с применением генетического алгоритма (ГА). В таблице 3 представлены варьируемые геометрические параметры и диапазон их изменения.

Таблица 1. Вариационные геометрические параметры

Параметры	Диапазон, мм
Высота корпуса, b	180...230
Ширина корпуса, a	280...320
Длина регулярной части, L	290...340
Длина центрального проводника, L_1	280...320
Ширина центрального проводника, w	200...280
Длина сужающихся переходов, L_2	140...230
Ширина узкой стороны сужающегося перехода, w_1	10...30

В результате оптимизации параметров с помощью ГА получены следующие геометрические параметры ТЕМ-камеры открытого исполнения: $L = 330$ мм, $L_1 = 308$ мм, $L_2 = 210$ мм, $a = 290$ мм, $w = 270$ мм, $t = 2$ мм, $b = 184$ мм, $d = 91$ мм.

Выполнено электродинамическое моделирование трех ТЕМ-камер с геометрическими размерами поперечного сечения, полученными в результате аналитического, квазистатического анализа и при оптимизации (рисунок 6).

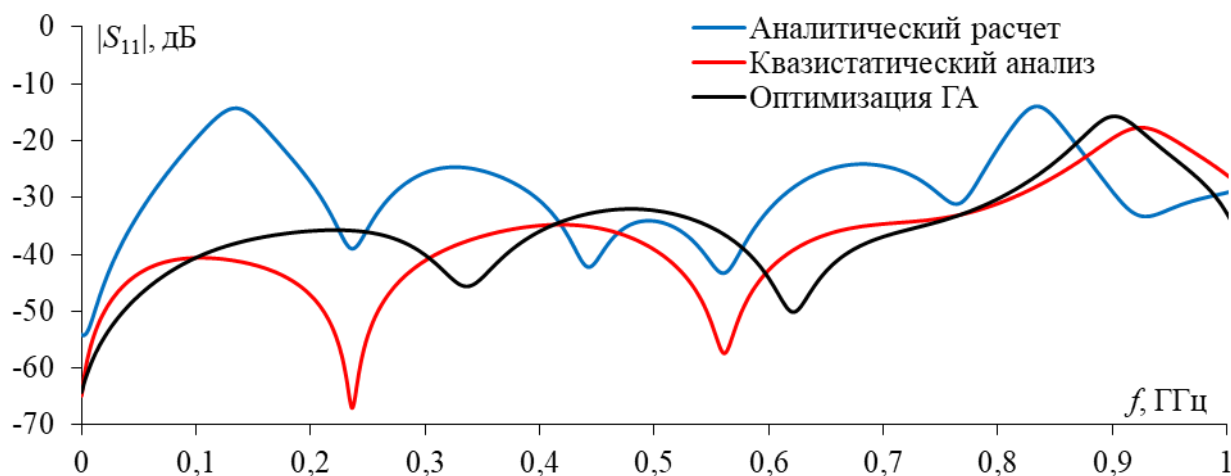


Рис. 6. Частотные зависимости $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры

В соответствии со стандартом [4], для минимизации неопределенности измерений, КСВН ТЕМ-камеры должен сохраняться достаточно малым, не более 1,3 в рабочем диапазоне частот, что соответствует $|S_{11}|$ равному минус 17,69 дБ.

В результате аналитического расчета ТЕМ-камеры $|S_{11}|$ не превышает минус 17,69 дБ в диапазоне частот от 160 МГц до 812 МГц. В случае квазистатического анализа ТЕМ-камеры $|S_{11}|$ не превышает минус 17,69 дБ в диапазоне частот до 882 ГГц. Наилучший результат получен оптимизации параметров с помощью ГА, $|S_{11}|$ не превышает минус 17,69 дБ в диапазоне частот до 920 МГц.

Вычислен КСВН для ТЕМ-камеры с геометрическими параметрами, найденными с помощью оптимизации ГА, так как она имеет наилучшие показатели частотной зависимости $|S_{11}|$. Из рисунка 7 видно, что КСВН не превышает значения 1,3 в диапазоне частот до 920 МГц. При этом, в диапазоне частот до 850 МГц КСВН не превышает значения 1.1.

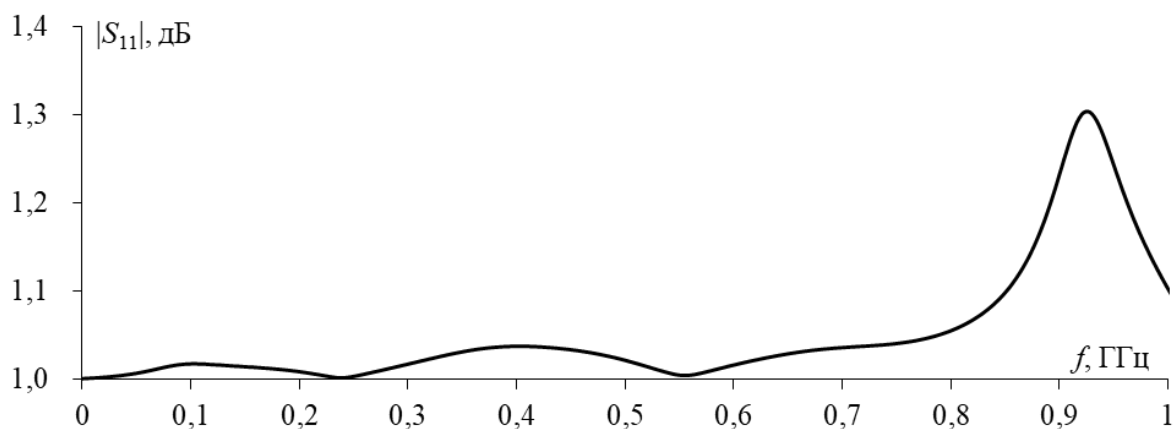


Рис. 7. КСВН электродинамической модели ТЕМ-камеры

Для оценки неравномерности распределения электрического поля электродинамической модели ТЕМ-камеры использованы точечные мониторы поля. Они размещались в регулярной части ТЕМ-камеры снизу центрального проводника, в области расположения ИО на высоте 25 мм от корпуса и на расстоянии 67 мм друг от друга.

Построен график частотных зависимостей напряженности электрического поля (рисунок 8) в полосе частот до 900 МГц из которого видно, что в диапазоне частот до 875 МГц неравномерность формируемого электрического поля составляет не более 6 дБ. На частотах свыше 875 МГц распространяются волны высших типов, приводящие к росту неравномерности распределения электрического поля (рисунок 9).

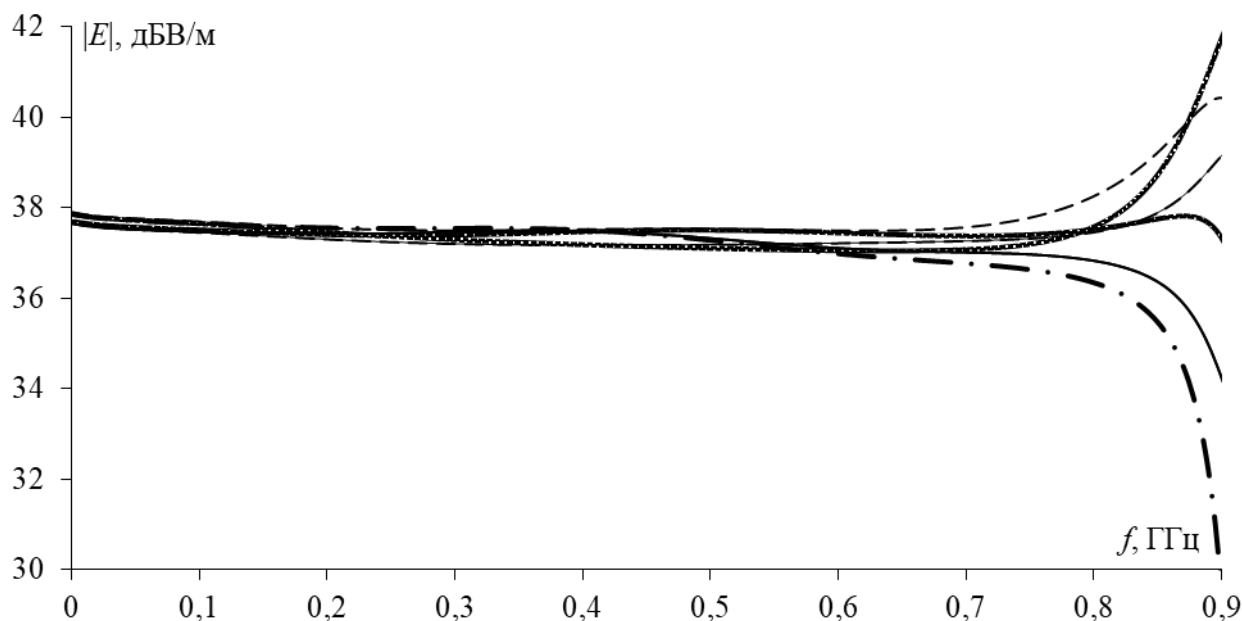


Рис. 8. Частотные зависимости напряженности электрического поля в диапазоне частот до 900 МГц

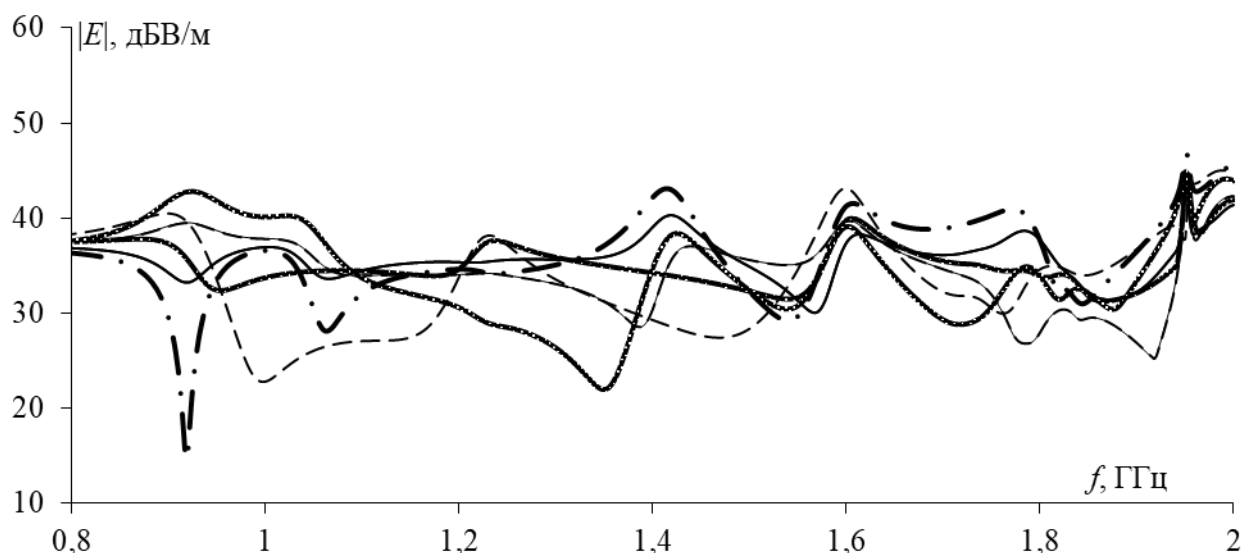


Рис. 9. Частотные зависимости напряженности электрического поля в диапазоне частот от 0,8 ГГц до 2 ГГц

Анализ электродинамической модели ТЕМ-камеры открытого исполнения выполнялся с помощью численного метода конечных элементов (МКЭ) с тетраэдральной сеткой разбиения структуры. Моделирование выполнялось с тремя разными настройками сетки разбиения:

- 1) 40 ячеек на длину волны и 30 ячеек на границе анализируемой области;
- 2) 50 ячеек на длину волны и 40 ячеек на границе анализируемой области;
- 3) 60 ячеек на длину волны и 60 ячеек на границе анализируемой области.

Результат электродинамического моделирования ТЕМ-камеры открытого исполнения с применением численного метода МКЭ представлен на рисунке 10. В диапазоне частот до 920 МГц $|S_{11}|$ не превышает значения минус 17,69 дБ.

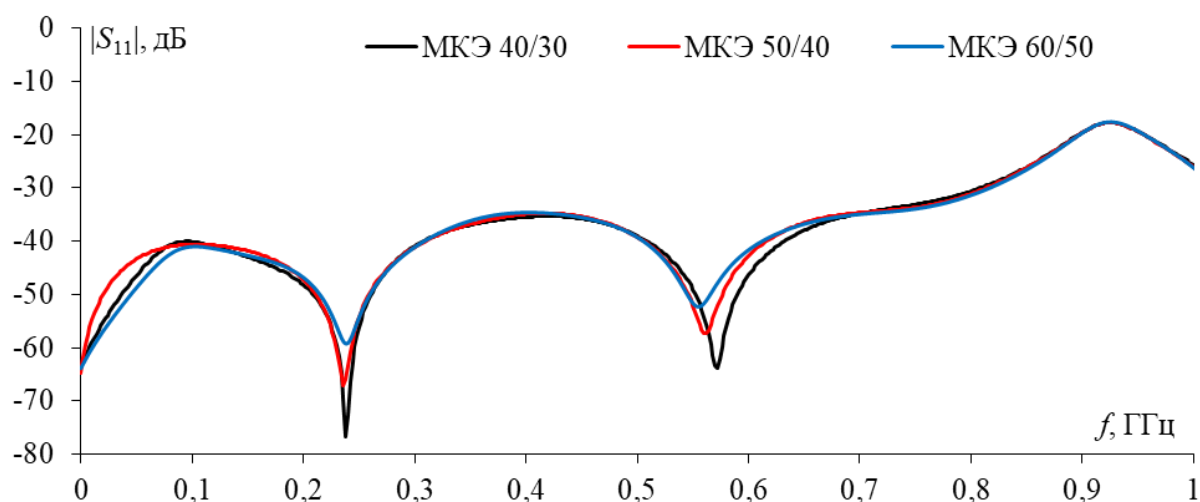


Рис. 10. Частотные зависимости $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры открытого исполнения, полученные с применением МКЭ

Для проверки достоверности полученных результатов выполнено электродинамическое моделирование модели ТЕМ-камеры с применением численного метода матрицы линии передачи (ММЛП) с гексагональной сеткой разбиения структуры.

Кроме того, моделирование выполнялось с тремя разными настройками сетки разбиения:

- 1) 25 ячеек на длину волны и 25 ячеек на границе анализируемой области;
- 2) 35 ячеек на длину волны и 35 ячеек на границе анализируемой области;
- 3) 45 ячеек на длину волны и 45 ячеек на границе анализируемой области.

Результат электродинамического моделирования ТЕМ-камеры открытого исполнения с применением численного метода ММЛП представлен на рисунке 11. В диапазоне частот до 1 ГГц $|S_{11}|$ не превышает минус 18,73 дБ.

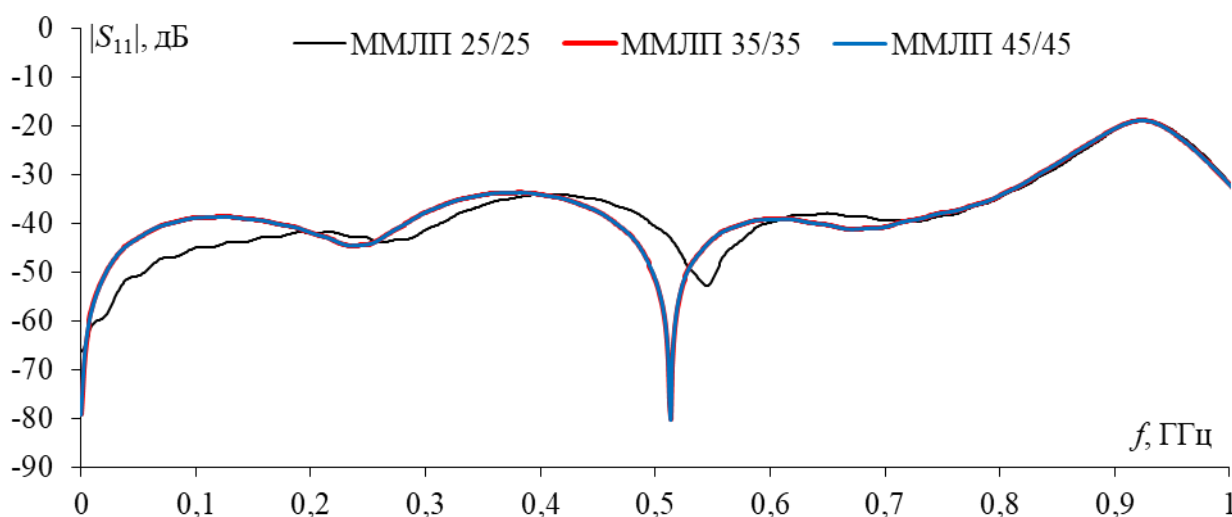


Рис. 11. Частотные зависимости $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры открытого исполнения, полученные с применением ММЛП

5. Разработка твердотельной модели ТЕМ-камеры открытого исполнения

На основе результатов электродинамического моделирования разработана твердотельная модель ТЕМ-камеры. Диметрический вид твердотельной модели представлен на рисунке 12. При разработке твердотельной модели учитывались конструкционные особенности сборки камеры. Она состоит из четырех частей. Монтаж корпуса СВЧ-соединителей и корпуса ТЕМ-камеры осуществляется винтовым соединением с П-образными соединителями (рисунок 13).

Электрический контакт СВЧ-соединителей и центрального проводника камеры обеспечивается посредством пайки.

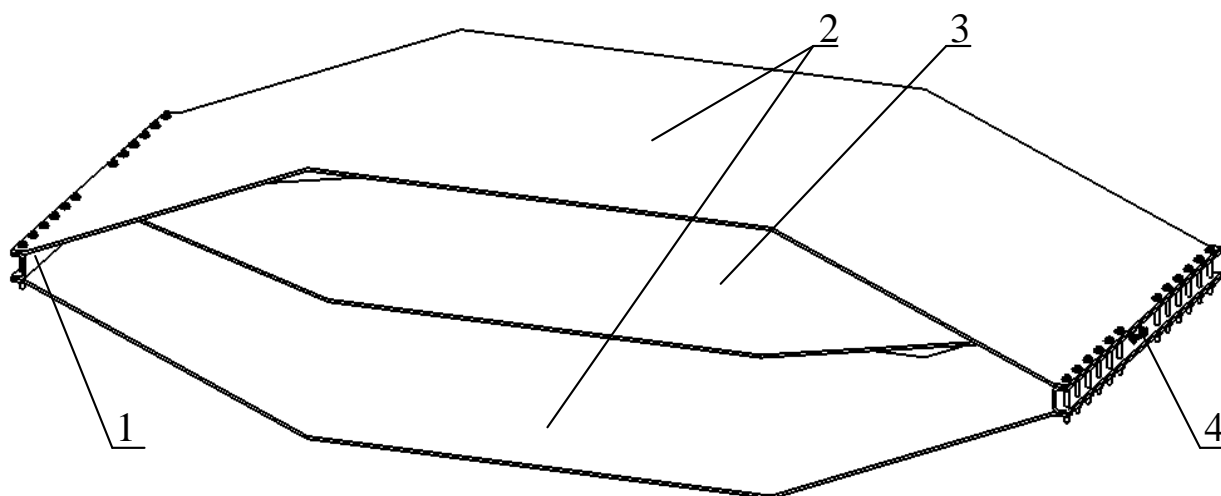


Рис. 12. Диметрический вид твердотельной модели ТЕМ-камеры открытого исполнения: 1 – П-образный соединитель, 2 – корпус, 3 – центральный проводник, 4 – СВЧ-соединитель

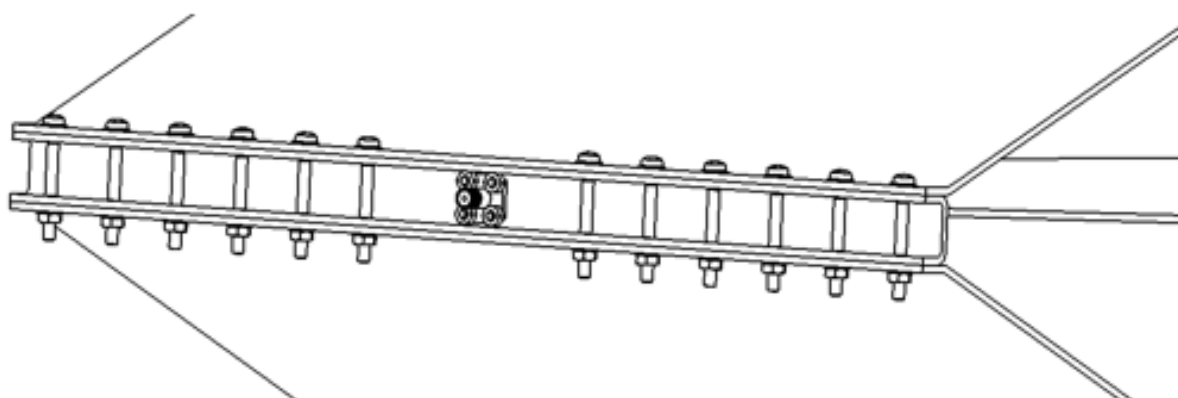


Рис. 13. Винтовое соединение СВЧ-соединителей и корпуса ТЕМ-камеры к П-образным соединителям

Конструкционные особенности твердотельной модели, такие как винтовой крепеж и радиус сгиба листового металла могут повлиять на характеристики ТЕМ-камеры. Поэтому выполнено повторное электродинамическое моделирование. Сравнение частотных зависимостей $|S_{11}|$ твердотельной и электродинамической модели представлено на рисунке 14. Из графика видно, что внесение изменений и уточнений в конструкцию твердотельной модели ухудшили ее характеристики. Максимальное значение $|S_{11}|$ твердотельной модели не превышает минус 17,69 дБ в диапазоне частот до 916 МГц.

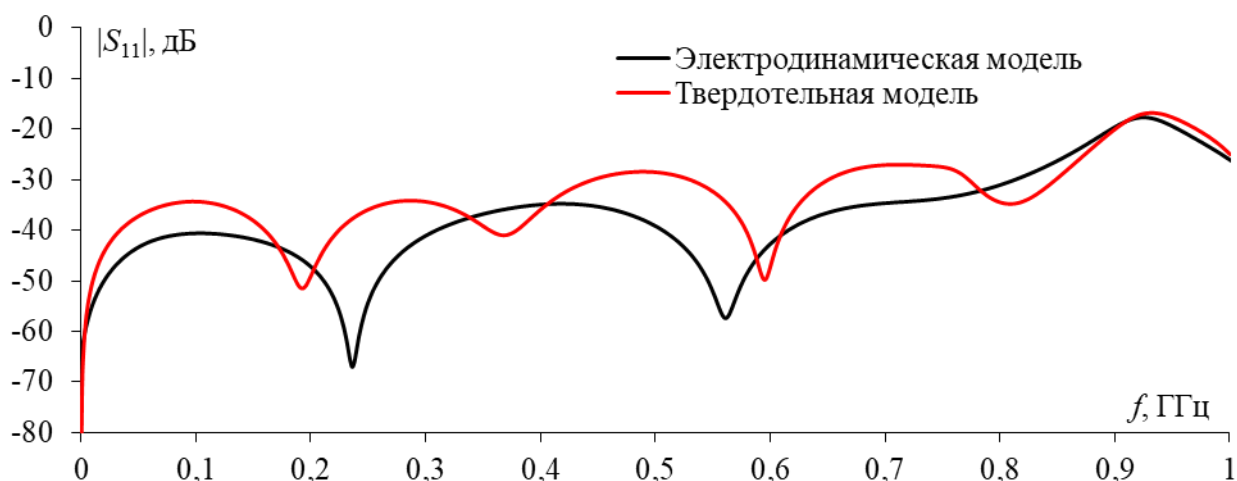


Рис. 14. Частотные зависимости $|S_{11}|$ твердотельной и электродинамической модели ТЕМ-камеры открытого исполнения

Так как у ТЕМ-камеры открытого исполнения отсутствуют боковые стенки, для придания жесткости и прочности конструкции предусмотрены опоры, расположенные по краям регулярной части, представленные на рисунке 15.

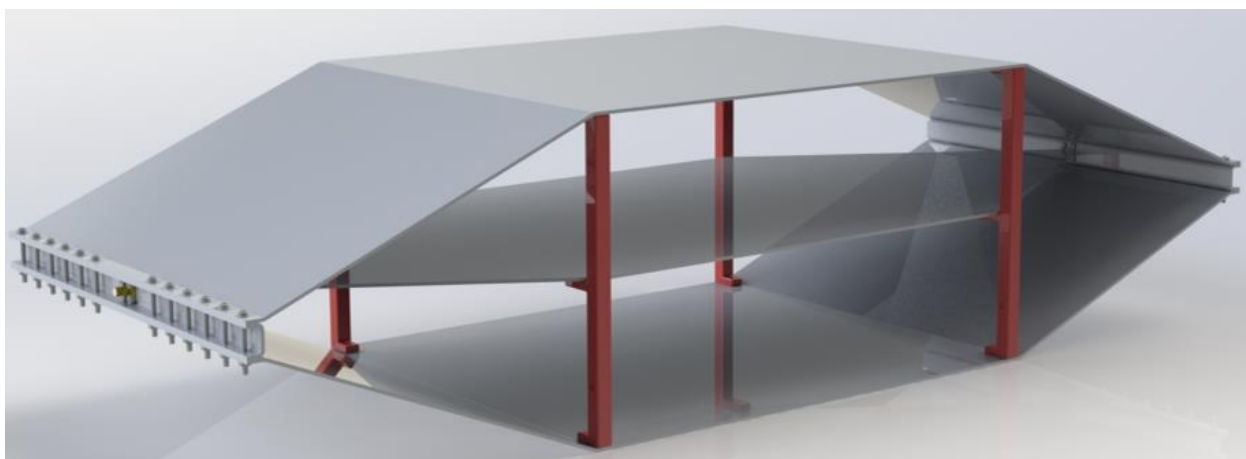


Рис. 15. Расположение опор

Для оценки влияния опор на характеристики ТЕМ-камеры выполнено электродинамическое моделирование. В качестве материала опор выбран полиэтиленгликольтерефталат (PETG-пластик) с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$. Частотные зависимости $|S_{11}|$ при ТЕМ-камеры с опорами представлены на рисунке 16. Из полученного графика видно, что использование опор снижает рабочий диапазон частот ТЕМ-камеры и $|S_{11}|$ в диапазоне частот до 850 МГц не превышает минус 18 дБ.

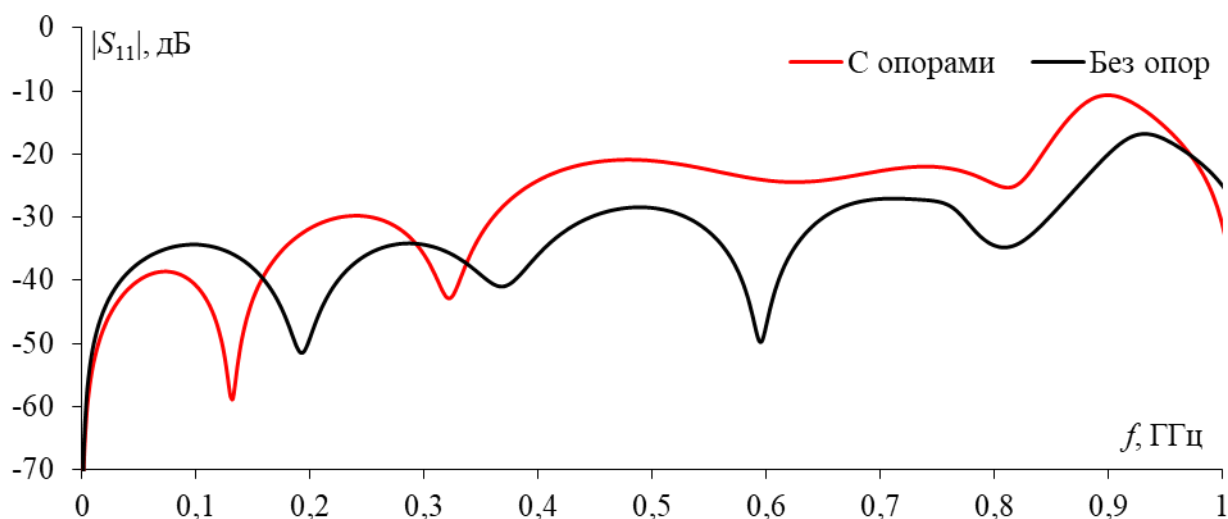


Рис. 16. Влияние опор на частотные зависимости $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры

Для оценки влияния материала изготовления опор выполнен электродинамический анализ. Рассмотрены варианты изготовления опор из PETG-пластика с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 3$, из тефлона с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 2,1$ и пенопласта с диэлектрической проницаемостью $\epsilon = 1,2$. Частотные зависимости $|S_{11}|$ при разных материалах изготовления опор представлены на рисунке 17.

Из полученного графика частотных зависимостей $|S_{11}|$ видно, что при изготовлении опор, предпочтительно использовать пенопласт. Поскольку у ТЕМ-камеры с опорами из пенопласта в диапазоне частот до 910 МГц $|S_{11}|$ не превышает минус 17,73 дБ. Недостатком пенопласта является его прочность и жесткость, поэтому в качестве материала опор используется PETG.

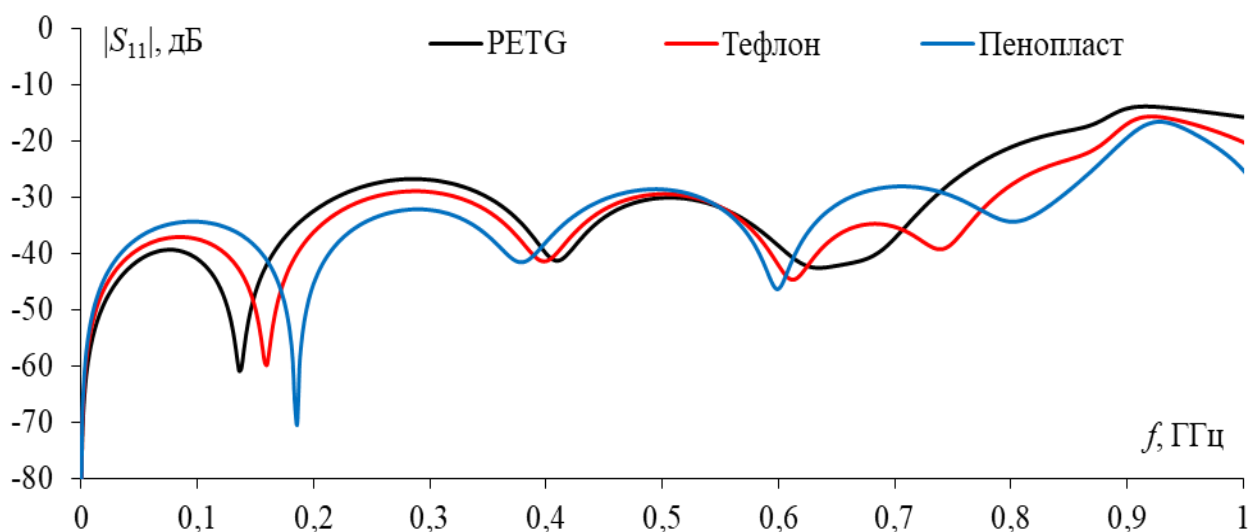


Рис. 17. Частотные зависимости $|S_{11}|$ ТЕМ-камеры при различном материале опор

6. Изготовление и измерение параметров ТЕМ-камеры

Для изготовления ТЕМ-камеры использовался алюминиевый лист АМЦН2 размером $2000 \times 1200 \times 2$ мм. Посредством лазерного станка выполнялась резка составных частей ТЕМ-камер (рисунок 18).

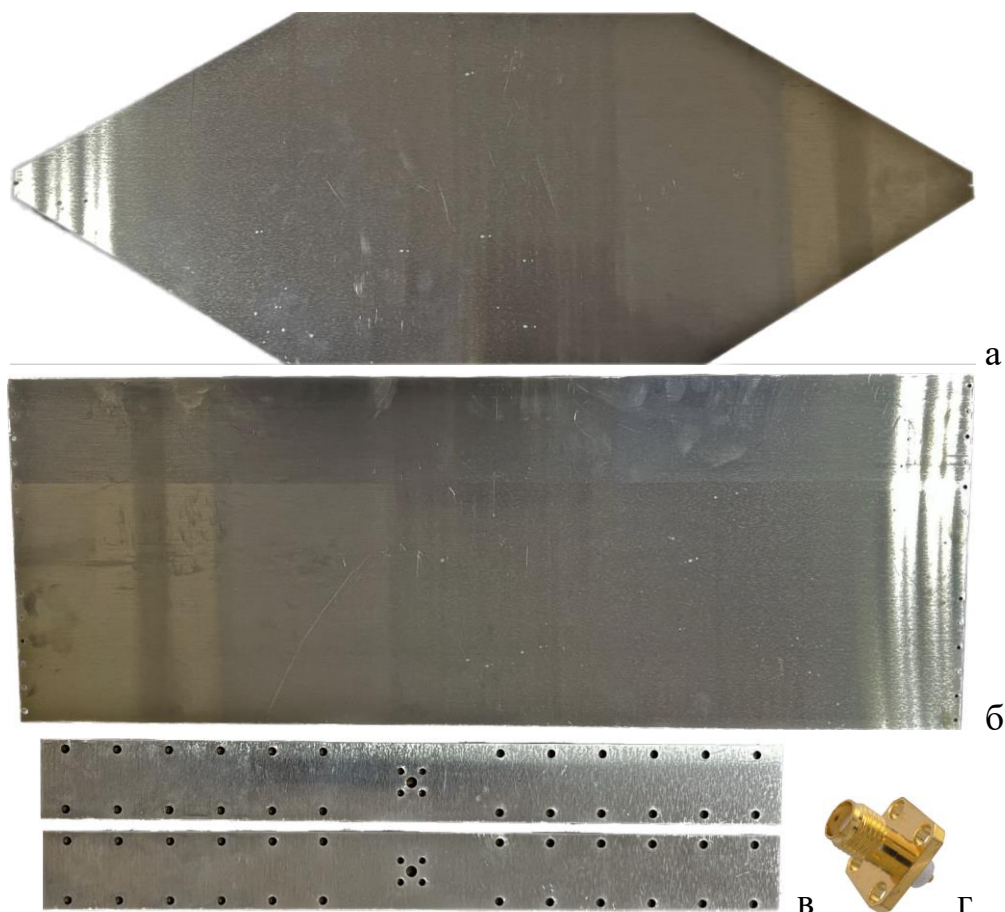


Рис. 18. Составные части ТЕМ-камеры: центральный проводник (а), корпус (б), П-образные соединители (в), СВЧ-соединитель (г)

После резки составных частей ТЕМ-камеры, с помощью листогибочного станка выполнялась гибка корпуса и соединителей. Сборка корпуса, П-образных и СВЧ-соединителей осуществлялась винтовым соединением. Подключение СВЧ-соединителей к центральному проводнику выполнялось посредством пайки. ТЕМ-камера в собранном виде представлена на рисунке 19.

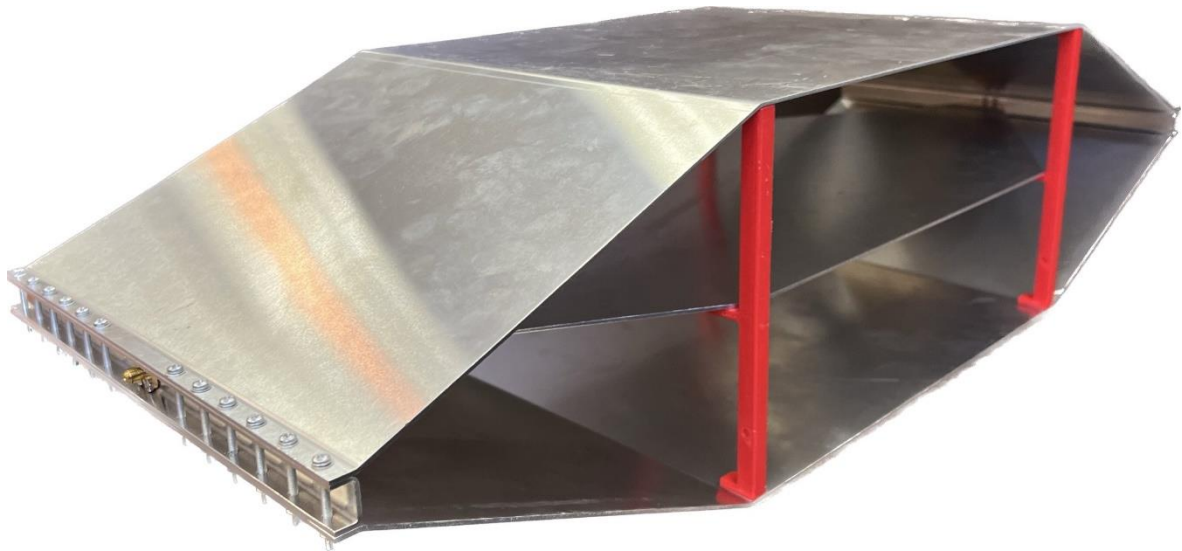


Рис. 19. ТЕМ-камера в сборе

Измерение S -параметров ТЕМ-камеры выполнялось в полубезэховой камере. Измерительная установка состоит из набора коаксиальных переходов, набора калибровочных мер и векторного анализатор цепей Микран Р4М-18 (рисунок 20).

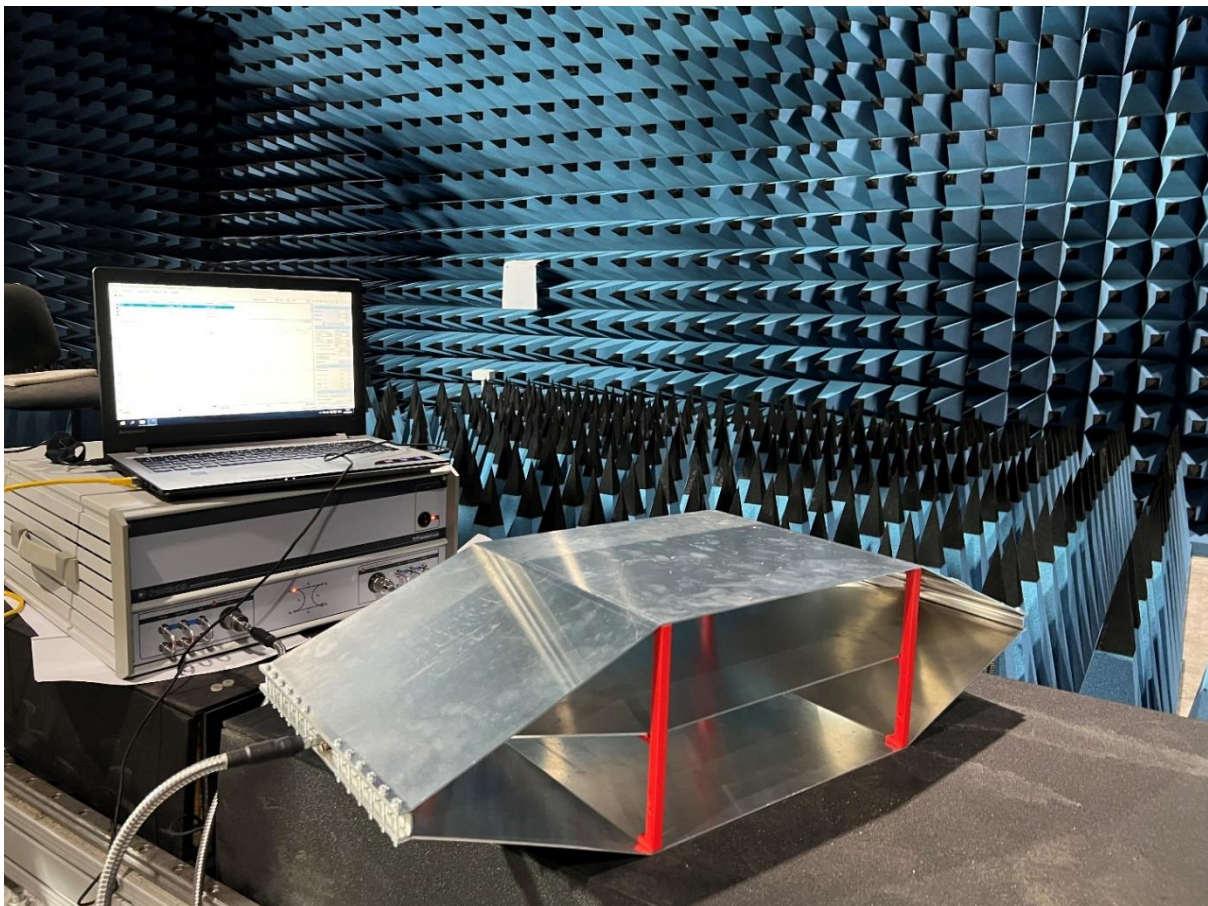


Рис. 20. Измерение S -параметров изготовленной ТЕМ-камеры

Сравнение частотных зависимостей $|S_{11}|$ электродинамической, твердотельной моделей и изготовленной ТЕМ-камеры представлено на рисунке 21. Кривые $|S_{11}|$ во всех случаях имеют схожий характер, и не превышают значения минус 17,69 дБ для электродинамической модели в диапазоне частот до 920 МГц, для твердотельной модели до 916 МГц и изготовленной ТЕМ-камеры до 936 МГц.

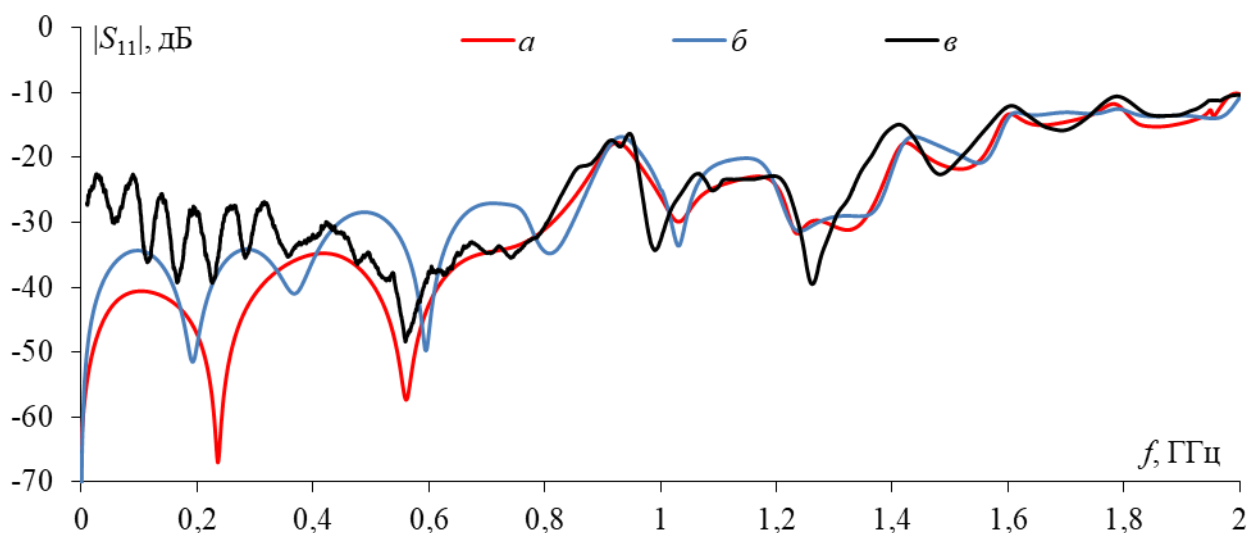


Рис. 21. Сравнение частотных зависимостей $|S_{11}|$ электродинамической (a), твердотельной ($б$) моделей и изготовленной ТЕМ-камеры ($в$)

На рисунке 22 представлены измеренные частотные зависимости модуля коэффициента передачи $|S_{21}|$ изготовленной ТЕМ-камеры. Из полученного графика видно, что в диапазоне частот до 936 МГц $|S_{21}|$ не превышает минус 2,2 дБ.

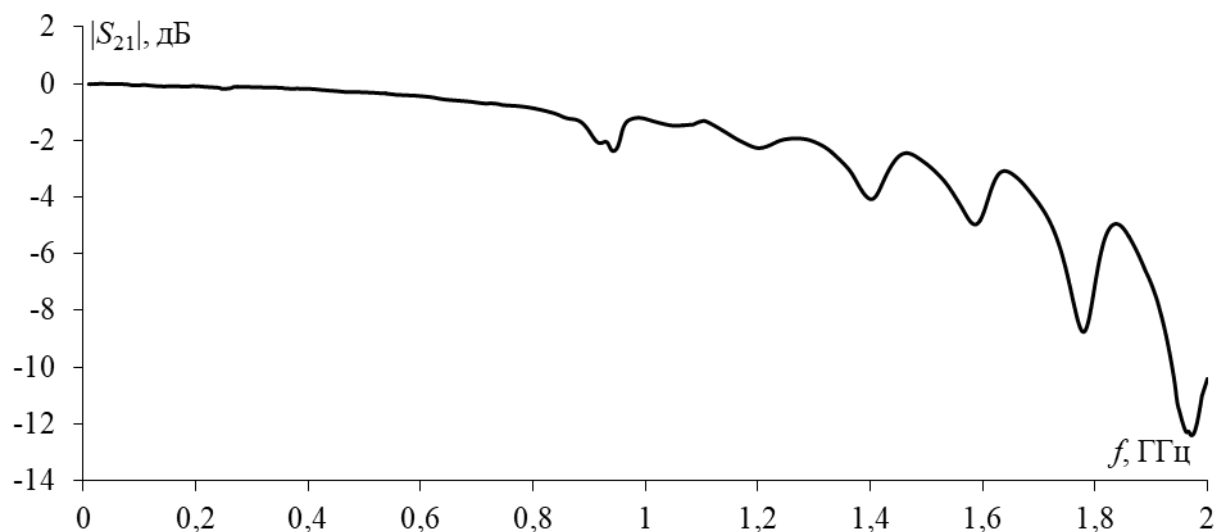


Рис. 22. Частотные зависимости $|S_{21}|$ изготовленной ТЕМ-камеры

7. Пример использования ТЕМ-камеры

С использованием изготовленной ТЕМ-камеры и анализатора спектра Микран СК4М-18 измерена напряженность поля излучаемых помех от отладочной платы на базе ПЛИС Altera Cyclone IV с внешним кварцевым генератором частотой 50 МГц. Испытуемая отладочная плата размещается в рабочей области ТЕМ-камеры под центральным проводником (рисунок 23). Лицевая и обратная сторона испытуемой отладочной платы представлена на рисунках 24 *а* и 24 *б* соответственно.

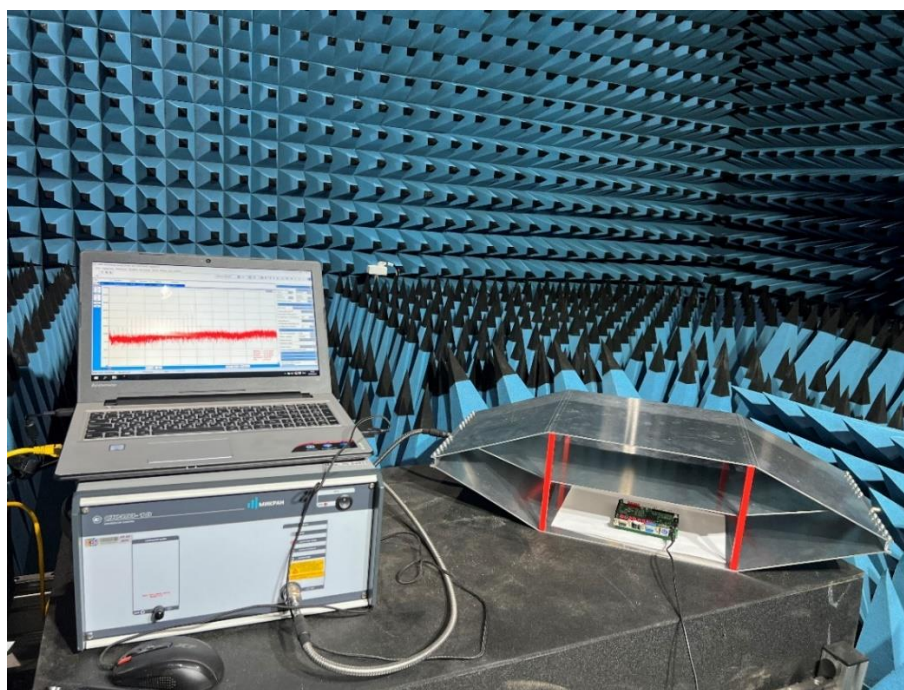


Рис. 23. Измерение напряженности поля излучаемых помех от отладочной платы на базе ПЛИС Altera Cyclone IV

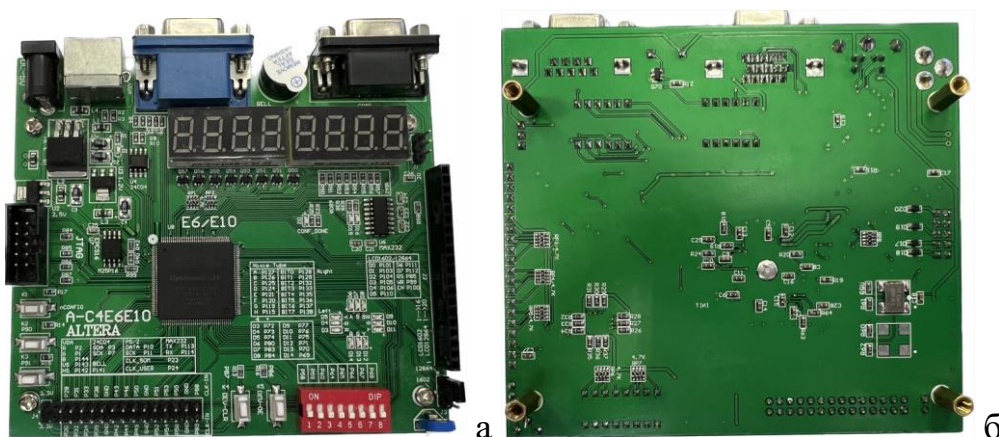


Рис. 24. Отладочная плата на базе ПЛИС Altera Cyclone IV: лицевая (*а*) и обратная (*б*) сторона

Измерение напряженности поля излучаемых помех выполнялось в двух состояниях работы отладочной платы. В первом случае при включении электропитания отладочной платы, ПЛИС не выполняет никакой рабочей программы. Во втором случае при включении электропитания ПЛИС формирует пять выходных сигналов с коэффициентом заполнения 50%, частотами повторения 72 МГц, 117 МГц, 234 МГц, 312 МГц и 468 МГц (рисунок 25).

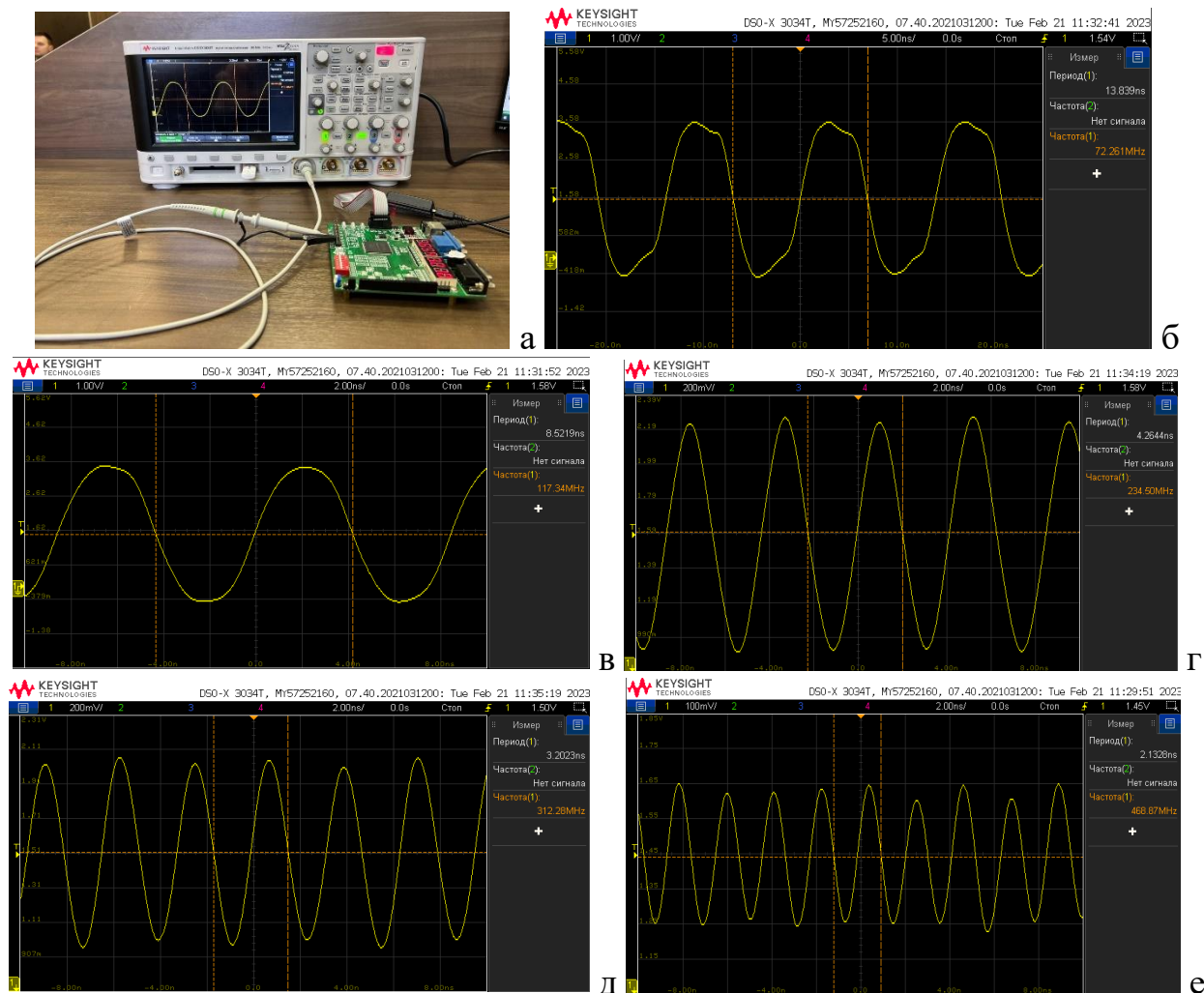


Рис. 25. Измерение осциллограмм сигналов (а): с частотами повторения 72 МГц (б), 117 МГц (в), 234 МГц (г), 312 МГц (д), 468 МГц (е)

Частотные зависимости напряженности поля излучаемых помех от отладочной платы в диапазоне частот до 1 ГГц, в случае, когда ПЛИС не выполняет рабочей программы представлены на рисунке 26. Из полученного графика видно, что наблюдается рост эмиссий на 15–30 дБ, относительно уровня

шумов измерительного приемника, на кратных гармониках частот тактирования кварцевого генератора 50 МГц.

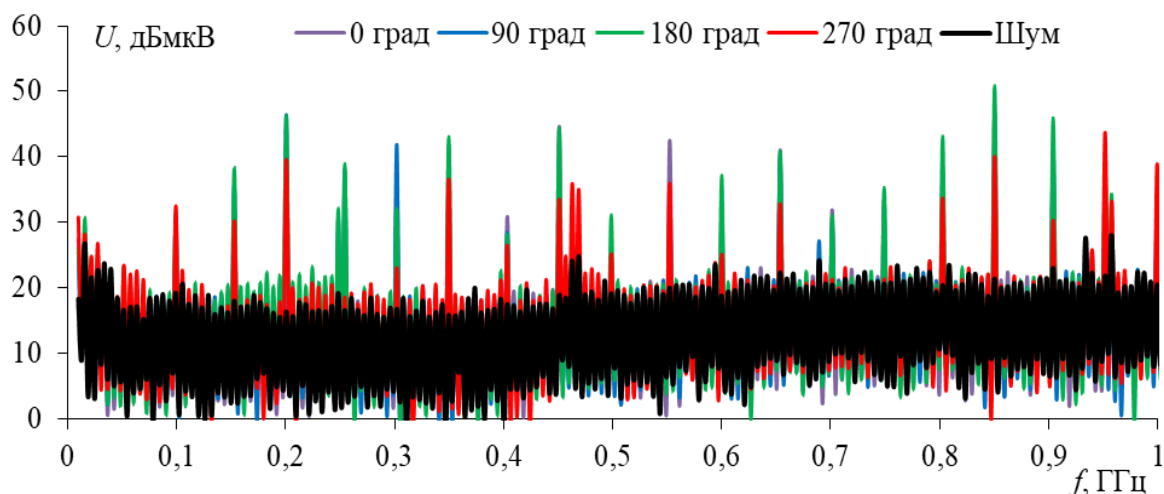


Рис. 26. Напряженность поля излучаемых помех, когда ПЛИС не выполняет рабочей программы, при повороте отладочной платы в апертуре ТЕМ-камере каждые 90°

На рисунке 27 представлены частотные зависимости напряженности поля излучаемых помех от отладочной платы в диапазоне частот до 1 ГГц, в случае, когда ПЛИС при включении электропитания формирует пять выходных сигналов частотами повторения 72 МГц, 117 МГц, 234 МГц, 312 МГц и 468 МГц. Из полученного графика видно, что кроме роста эмиссий на кратных гармониках частоты тактирования кварцевого генератора 50 МГц, также наблюдается рост эмиссий на 10–45 дБ на частотах формируемых сигналов ПЛИС и кратных им гармониках.

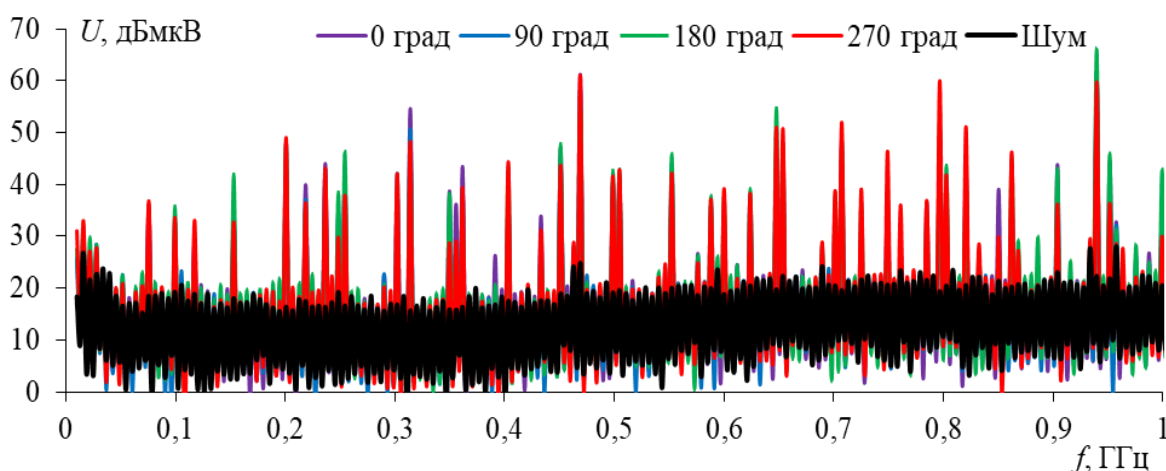


Рис. 27. Напряженность поля излучаемых помех, когда ПЛИС выполняет рабочую программу, при повороте отладочной платы в апертуре ТЕМ-камере каждые 90°

Заключение

Представлены результаты разработки и изготовления ТЕМ-камеры открытого исполнения для измерения напряженности поля излучаемых помех и оценке устойчивости к помехам малогабаритных РЭС. Выполнен аналитический и квазистатический анализ регулярной части ТЕМ-камеры. Построена электродинамическая модель ТЕМ-камеры и выполнена оптимизация параметров с применением ГА с целью минимизации неравномерности распределения электромагнитного поля в области размещения ИО. Частотные зависимости $|S_{11}|$ электродинамической модели не превышают минус 17,69 дБ в диапазоне частот до 926 МГц. Для проверки достоверности полученных результатов выполнен анализ электродинамической модели ТЕМ-камеры с использованием численных методов МКЭ и ММЛП. Построены графики напряженности электрического поля, из которых видно, что неравномерность распределения электромагнитных волн в месте расположения ИО объекта не превышает 6 дБ.

На основе результатов электродинамического моделирования разработана твердотельная модель ТЕМ-камеры. Она позволяет учесть конструкционные особенности сборки ТЕМ-камеры, влияющие на ее характеристики. Частотные зависимости $|S_{11}|$ электродинамической модели не превышают минус 17,69 дБ в диапазоне частот до 916 МГц.

Выполнено изготовление ТЕМ-камеры открытого исполнения путем лазерной резки и гибки листового алюминия. Произведено измерение S -параметров изготовленной ТЕМ-камеры с использованием векторного анализатора цепей Микран Р4М-18. Частотные зависимости $|S_{11}|$ и $|S_{21}|$ изготовленной ТЕМ-камеры не превышают минус 17,69 дБ и минус 2,2 дБ соответственно, в диапазоне частот до 936 МГц. Изготовленная ТЕМ-камера позволяет выполнять измерение напряженности поля излучаемых помех и оценку устойчивости к помехам РЭС, размером не более 184×162×30 мм.

Представлены результаты оценки напряженности поля излучаемых помех от отладочной платы на базе ПЛИС Altera Cyclone IV в диапазоне частот до 1 ГГц с помощью, изготовленной ТЕМ-камеры.

Литература

1. Fiori F.L. Investigations on the susceptibility of smart power ICs to RFI. *International symposium on electromagnetic compatibility*. 2013. P. 743-747.
2. Пирогов Ю.А., Солодов А.В. Повреждения интегральных микросхем в полях радиоизлучения. *Журнал радиоэлектроники*. 2013. № 6. С.1-38.
3. IEC 61000-4-3 – 2002. *Radiated radio frequency electromagnetic field immunity test*. Geneva, International electrotechnical commission. 2002. 63 p.
4. IEC 61000-4-20 – 2010. *Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-20: Testing and measurement techniques. Emission and immunity testing in transverse electromagnetic (TEM) waveguides*. Geneva, International electrotechnical commission. 2010. 72 p.
5. ISO 11452-3. *Road vehicles. Electrical disturbances by narrow-band radiated electromagnetic energy. Vehicle test methods. Part 3: Transverse electromagnetic mode (TEM) cell*. Geneva, International Organization for Standardization. 2016. 21 p.
6. Deng S. et al. Mode suppressed TEM cell design for high frequency IC measurements. *IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility*. 2007. P.1-6. <https://doi.org/10.1109/ISEMC.2007.13>
7. Walters A.J., Leat C. Targeted resonance control in a TEM cell. *IEEE transactions on electromagnetic compatibility*. 2008. V.50. №2. P.252-258. <https://doi.org/10.1109/TEMC.2008.921050>
8. Демаков А.В., Комнатнов М.Е. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2018. Т.21, №.1. С.52-56.

9. Desideri D., Maschio A. Development and commissioning of a test system based on a TEM cell for RF exposure. *Braz. J. of Biomedical Engineering*. 2011. V.27. P.25-30.
10. Alotto P., Desideri D., Maschio A. Parametric analysis and optimization of the shape of the transitions of a two-port rectangular TEM cell. *International Symposium on Electromagnetic Compatibility-EMC EUROPE*. 2012. P.1-6. <https://doi.org/10.1109/EMCEurope.2012.6396664>
11. Crawford M.L., Workman J.L., Thomas C.G. Expanding the bandwidth of TEM cells for EMC measurements. *IEEE Transactions on electromagnetic compatibility*. 1978. V.20. №3. P.368-375. <https://doi.org/10.1109/TEM.1978.303664>
12. Malaric K., Bartolic J. Design of a TEM-cell with increased usable test area. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2003. V.11, №2. P.143 154.
13. Куксенко С.П., Заболоцкий А.М., Мелкозеров А.О. Новые возможности системы моделирования электромагнитной совместимости TALGAT. *Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники*. 2015. Т.36. №2. С.45-50.

Для цитирования:

Попов П.А., Храпцов М.В. ТЕМ-камера открытого исполнения для испытаний малогабаритных радиоэлектронных средств на электромагнитную совместимость. *Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]*. 2023. №8. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2023.8.6>