

## **3D-ПЕЧАТНАЯ ТЕМ-КАМЕРА ОТКРЫТОГО ИСПОЛНЕНИЯ**

*П.А. Попов, студент каф. ТУ*

*Научный руководитель М.Е. Комнатнов, доцент каф. ТУ, к.т.н.  
г. Томск, ТУСУР, popov.pav.and@gmail.com*

Выполнена разработка ТЕМ-камеры открытого исполнения с применением 3D-печати. Частотные зависимости КСВН ТЕМ-камеры составляют менее 1,3 в диапазоне частот от 62,5 до 931 МГц. Изготовленная ТЕМ-камера позволяет выполнять измерение помехоэмиссии и оценку помехоустойчивости радиоэлектронных средств размером не более 184×162×30 мм.

**Ключевые слова:** ТЕМ-камера, помехоустойчивость, помехоэмиссия, 3D-печать.

В соответствии со стандартами [1–3], для измерения помехоэмиссии и помехоустойчивости радиоэлектронных средств (РЭС) применяется ТЕМ-камера. В зависимости от рабочего диапазона частот и размера испытываемого объекта (ИО) ТЕМ-камеры могут быть выполнены в различном конструкционном исполнении. Различают открытые и закрытые ТЕМ-камеры, с симметричным и асимметричным расположением центрального проводника относительно корпуса [3, 4]. Преимуществом ТЕМ-камеры открытого исполнения является отсутствие боковых стенок. Их отсутствие позволяет избежать сложности изготовления и предоставить постоянный доступ к ИО. Обычно для изготовления ТЕМ-камеры применяется листовая металл. Такая камера сложна в изготовлении, обладает значительным весом и стоимостью. Альтернативным способом изготовления, позволяющим избавиться от данных недостатков, является применение 3D-печати. По этой причине разработка ТЕМ-камеры открытого исполнения с применением 3D-печати является актуальной задачей. Цель работы – выполнить разработку ТЕМ-камеры открытого исполнения с применением 3D-печати.

ТЕМ-камера представляет собой полосковую линию передачи, состоящую из регулярной части с внутри расположенным центральным проводником и двух сужающихся переходов, необходимых для подключения к СВЧ-соединителям (рис. 1). При измерении излучаемой помехоэмиссии РЭС к одному из СВЧ-соединителей ТЕМ-камеры подключается измерительный приемник, а к другому – согласованная нагрузка. В регулярной части ТЕМ-камеры размещается ИО. При этом измеряется уровень наведенных токов на центральный проводник от ИО. При оценке помехоустойчивости ИО он также разме-

щается в регулярной части ТЕМ-камеры. На вход СВЧ-соединителя от генератора подается сигнал с заданными характеристиками. В результате на ИО воздействует однородное поле, которое поглощается согласованной нагрузкой, подключенной ко второму СВЧ-соединителю. При этом фиксируется уровень напряженности электрического поля, при котором ИО перестает функционировать с заданным качеством.

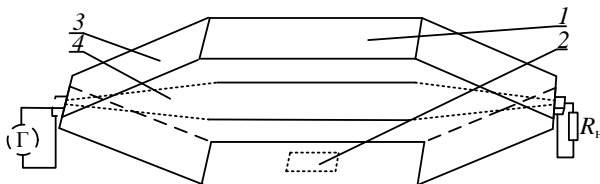


Рис. 1. Общий вид ТЕМ-камеры открытого исполнения: 1 – корпус; 2 – место под ИО; 3 – сужающиеся переходы; 4 – центральный проводник

Геометрические параметры ТЕМ-камеры определяются исходя из максимального размера ИО и ее волнового сопротивления, которое должно составлять 50 Ом для обеспечения согласования с измерительной аппаратурой, подключаемой к СВЧ-соединителям. Верхний предел рабочего диапазона частот ТЕМ-камеры снижается по мере увеличения габаритных размеров. Геометрические параметры выбирались исходя из условия максимального размера ИО, которое должно составлять не менее 180×150×30 мм. В таблице представлены геометрические параметры ТЕМ-камеры открытого исполнения.

#### Геометрические параметры ТЕМ-камеры

Геометрические параметры	Значение, мм
Длина корпуса в регулярной части	330
Длина корпуса в области сужения	201
Длина центрального проводника в регулярной части	308
Длина центрального проводника в области сужения	210
Ширина корпуса	290
Ширина центрального проводника	270
Высота	188
Толщина проводника	2

При изготовлении ТЕМ-камеры выполнялась 3D-печать ее составных частей (рис. 2). Для придания жесткости и прочности ТЕМ-камеры в качестве материала печати использован полиэтиленгликоль-терефталат (PETG-пластик) с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 3$ .

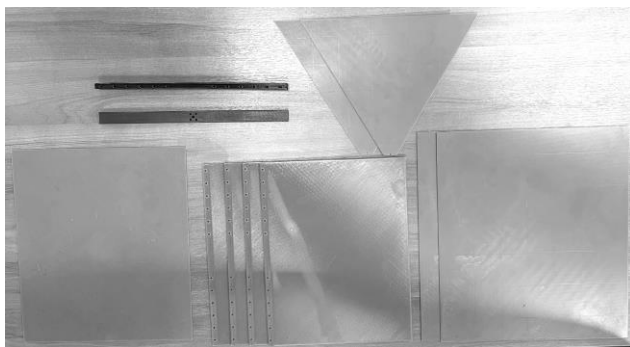


Рис. 2. Составные части ТЕМ-камеры

Соединение составных частей ТЕМ-камеры выполнялось с помощью эпоксидного клея. После соединения составных частей ТЕМ-камеры они покрывались клейкой алюминиевой и медной лентой кроме четырех держателей для исключения возможности возникновения контакта между корпусом и центральным проводником. После сборки ТЕМ-камеры, используя векторный анализатор цепей Р4М-18, выполнено измерение ее  $S$ -параметров (рис. 3).

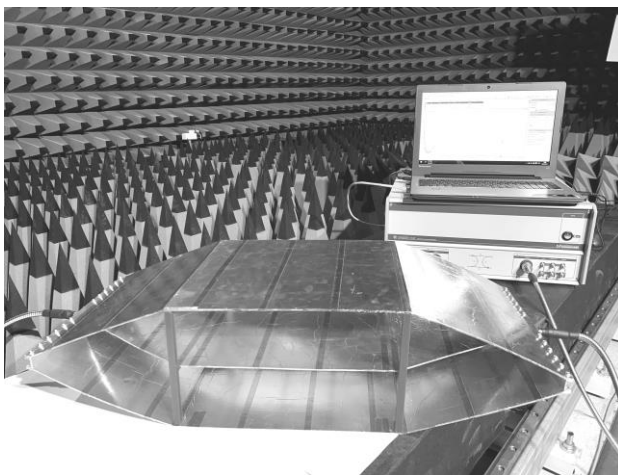


Рис. 3. Измерение  $S$ -параметров 3D-печатной ТЕМ-камеры

В соответствии со стандартом [2], для минимизации неопределенности измерений коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) ТЕМ-камеры должен составлять менее 1,3. На рис. 4 пред-

ставлен график частотных зависимостей КСВН ТЕМ-камеры открытого исполнения. Из графика видно, что КСВН не превышает значения 1,3 в диапазоне частот от 62,5 до 931 МГц.

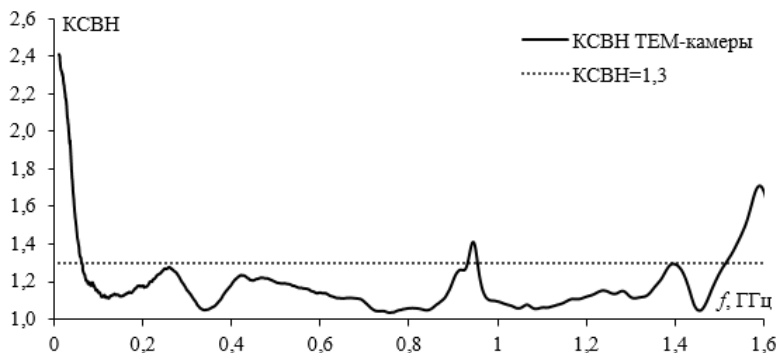


Рис. 4. Частотные зависимости КСВН ТЕМ-камеры открытого исполнения

Таким образом, выполнена разработка и изготовление ТЕМ-камеры с применением 3D-печати. ТЕМ-камера применима для измерения помехоэмиссии и оценки помехоустойчивости РЭС размером не более  $184 \times 162 \times 30$  мм в диапазоне частот от 62,5 до 931 МГц.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. ГОСТ ИЕС 61000-4-3–2016. Электромагнитная совместимость. – Ч. 4-3: Методы испытаний и измерений. Испытание на устойчивость к излучаемому радиочастотному электромагнитному полю. – М.: Стандартинформ, 2016. – 63 с.
2. ГОСТ ИЕС 61000-4-20–2014. Электромагнитная совместимость. – Ч. 4-20: Методы испытаний и измерений. Испытание на помехоэмиссию и помехоустойчивость в ТЕМ-волноводах. – ФГБУ «РСТ», 2021. – 72 с.
3. ISO 11452-3. Road vehicles – Electrical disturbances by narrow-band radiated electromagnetic energy. Vehicle test methods. – Part 3: Transverse electromagnetic mode (TEM) cell. – 2016. – 21 p.
4. Комнатнов М.Е. Обзор ТЕМ-камер, используемых при проведении испытаний на ЭМС // Матер. Всерос. науч.-техн. конф. студентов, аспирантов и молодых ученых «Научная сессия ТУСУР–2013». – Томск: В-Спектр, 2013. – Ч. 1. – С. 116–119.
5. Демаков А.В. Разработка ТЕМ-камеры для испытаний интегральных схем на электромагнитную совместимость / А.В. Демаков, М.Е. Комнатнов // Доклады ТУСУР. – 2018. – Т. 21, № 1. – С. 52–56.