

**ПРОТОТИПИРОВАНИЕ СВЧ-УСТРОЙСТВ С ЗАДААННЫМИ  
ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИМИ ХАРАКТЕРИСТИКАМИ  
ПО ТЕХНОЛОГИИ АДДИТИВНОЙ 3D-ПЕЧАТИ**

**С.В. Харалгин<sup>1,2,@</sup>,  
Г.В. Куликов<sup>1</sup>,  
А.Б. Котельников<sup>3</sup>,  
М.В. Снастин<sup>4</sup>,  
Е.М. Добычина<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>МИРЭА – Российский технологический университет, Москва 119454, Россия

<sup>2</sup>Центральный научно-исследовательский радиотехнический институт имени академика А.И. Берга, Москва 107078, Россия

<sup>3</sup>Московский педагогический государственный университет, Москва 119991, Россия

<sup>4</sup>Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет), Москва 125993, Россия

@Автор для переписки, e-mail: hsvl92@mail.ru

Целью настоящего исследования является оценка и изучение возможностей технологии 3D-печати, применяемой для производства СВЧ-приборов, и сравнение характеристик полученных устройств с характеристиками электродинамической модели. Печатаение металлических деталей является чрезмерно дорогостоящим процессом в мелкосерийном производстве, причем и с точки зрения стоимости оборудования, и применительно к используемым материалам. Детали микроволновых устройств изготовлены нами из пластика. Относительно дешевые полимеры, используемые в 3D-печати, являются диэлектриками, и чтобы ограничить распространение электромагнитной волны во всех направлениях, потребовалось создание проводящего слоя на поверхности печатных моделей. В статье определены параметры печати FFF, которые в наибольшей степени влияют на распространение электромагнитной волны, описан процесс и проблемы, возникающие при печати и гальванизации деталей, обсуждаются этапы моделирования устройств и измерения их параметров. Для реализации проводящего слоя на поверхности моделей использовали метод гальванизации. В статье исследованы адгезионные свойства полученных металлических покрытий, приведены результаты электромагнитного моделирования, определены параметры, которые в наибольшей степени влияют на качество реализованных устройств. Исследованы характеристики микроволновых приборов, выполненных по технологии 3D-печати. Проведена оценка возможностей изготовления антенн и коаксиально-волноводных переходов с использованием этой технологии. Проведены лабораторные измерения характеристик изготовленных приборов. Результаты моделирования рассмотренных устройств хорошо согласуются с экспериментальными.

ми характеристиками изготовленных моделей с использованием технологии 3D-печати. Проведен полный цикл производства микроволновых устройств: проектирование, моделирование, производство образцов и валидация характеристик. Перспективы дальнейшего развития описанной технологии включают в себя изменение типов пластмасс, используемых в качестве субстрата, применение отделочных декоративных и функциональных покрытий, улучшение адгезионных свойств нанесенного слоя меди с подложкой.

**Ключевые слова:** технология 3D-печати, рупорная антенна, коаксиально-волноводный переход, аддитивные технологии, гальванизация.

## PROTOTYPING OF MICROWAVE DEVICES WITH SPECIFIED ELECTRODYNAMIC CHARACTERISTICS USING ADDITIVE 3D PRINTING TECHNOLOGY

S.V. Kharalgin<sup>1,2,@</sup>,  
G.V. Kulikov<sup>1</sup>,  
A.B. Kotelnikov<sup>3</sup>,  
M.V. Snastin<sup>4</sup>,  
E.M. Dobychina<sup>4</sup>

<sup>1</sup>MIREA – Russian Technological University, Moscow 119454, Russia

<sup>2</sup>Academician A.I. Berg Central Scientific Research Radio Engineering Institute, Moscow 107078, Russia

<sup>3</sup>Moscow Pedagogical State University, Moscow 119991, Russia

<sup>4</sup>Moscow Aviation Institute (National Research University), Moscow 125993, Russia

@Corresponding author e-mail: hsvl92@mail.ru

The technology of additive 3D printing is widely used in various branches of science and industry. The purpose of the research presented in the article is to evaluate and study the possibilities of 3D printing technology applied to the manufacture of microwave devices and to compare the characteristics of the devices obtained with the characteristics used in the electrodynamic model. Printing metal parts is an overly expensive process in small-scale production, both in terms of the cost of equipment and in relation to the materials used. In this work, parts for microwave devices were made of plastic with the aim of cheapening. Relatively cheap polymers used in 3D printing are dielectrics. Therefore, to limit the propagation of an electromagnetic wave in all directions it was necessary to create a conductive layer on the surface of printed models. The article: identifies the FFF print parameters that affect to the maximum extent the propagation of an electromagnetic wave; describes the process and problems encountered when printing and galvanizing parts; discusses the steps of modeling devices and measuring their parameters. The characteristics of microwave devices made by 3D printing technology were investigated. An assessment of the possibilities of manufacturing antennas and coaxial-waveguide transitions using this technology was carried out. To implement the conductive layer on the surface of the models, the method of galvanization was used. The adhesion properties of the obtained metallic coatings were investigated. The results of electromagnetic modeling are given. The parameters that affect to the maximum extent the quality of the implemented devices were determined.

Laboratory measurements of the characteristics of produced devices were conducted. The simulation results of the examined devices are in good agreement with the experimental characteristics of the made models using 3D printing technology. A complete production cycle of microwave devices was carried out: design, simulation, sample production, and validation of characteristics. Prospects for the further development of the described technology include a variation of the types of plastics used as a substrate, the application of finishing decorative and functional coatings, an improvement in the adhesion properties of the applied copper layer with the substrate.

**Keywords:** 3D printing technology, horn antenna, coaxial-waveguide transition, additive technologies, galvanization.

### Введение

В настоящее время технология аддитивной 3D-печати находит широкое применение в различных отраслях науки и производства. При этом печать цельнометаллических деталей до сих пор является чрезмерно дорогостоящим процессом с точки зрения мелкосерийного производства как в плане стоимости оборудования, так и в отношении расходных материалов.

Целью представленных в статье исследований являлась оценка и проработка возможностей технологии 3D-печати применительно к изготовлению устройств СВЧ и сравнение характеристик полученных устройств с характеристиками, закладываемыми в электродинамической модели.

Заготовки для реализованных устройств СВЧ с целью удешевления изготавливали из пластика. Поскольку относительно дешевые полимеры, используемые в 3D-печати, являются диэлектриками, для ограничения распространения электромагнитной волны во всех направлениях потребовалось создание проводящего слоя на поверхности распечатанных моделей. В настоящей работе определяются параметры 3D-печати, которые в наибольшей степени влияют на распространение электромагнитной волны, описан процесс и проблемы, возникшие при печати и гальванизации деталей, рассмотрены этапы моделирования устройств и измерения их параметров.

#### 1. Технологии, оборудование и материалы, используемые при прототипировании

**Виды технологий 3D-печати.** Среди существующих технологий 3D-печати можно выделить следующие: масочная стереолитография (SGC), технология многоструйного моделирования (MJM), цветная струйная печать (CJP), цифровая светодиодная проекция (DLP), струйная трехмерная печать (3DP), выборочное лазерное спекание (SLS), выборочная лазерная плавка (SLM), стереолитография (SLA), выборочное тепловое спекание (SHS), изготовление объектов методом ламинирования (LOM), электронно-лучевая плавка (EBM), прямое лазерное спекание металлов (DMLS), производство электронно-лучевой плавкой (EBF<sub>3</sub>), моделирование методом послойного наплавления (FFF), технология ламинирования методом селективного осаждения (SDL) [1].

Низкая цена и широкая доступность оборудования и расходных материалов на российском рынке обусловили выбор для реализации моделей метода послойного наплавления (*Fused Filament Fabrication*, FFF). Процесс FFF-печати заключается в последова-

тельном нанесении слоев расплавленного пластика, подаваемого в место печати. Каждый слой наносимого пластика повторяет контуры соответствующего слоя исходной трехмерной модели, область внутри контуров может либо заполняться пластиком – при этом деталь получается монолитной, либо заполняться частично вплоть до печати пустотелой детали. Принтеры, используемые для такого типа печати, состоят из холодной или нагреваемой подвижной платформы (ПП), на которую наносится первый слой, а также печатающей головки, разогревающей поступающий в нее пластик (филамент). Остальные составляющие принтера определяются его конструкцией. Для перемещения печатающей головки и ПП применяют винтовые и ременные передачи, приводимые в движение шаговыми двигателями или серводвигателями. Линейность перемещения ПП и печатающей головки обеспечивают стальные направляющие рельсы.

**Оборудование, используемое для 3D-печати.** В рамках данной работы использовали принтер конструкции Prusa i3, представленный на рис. 1. Некоторые характеристики принтера приведены в табл. 1.

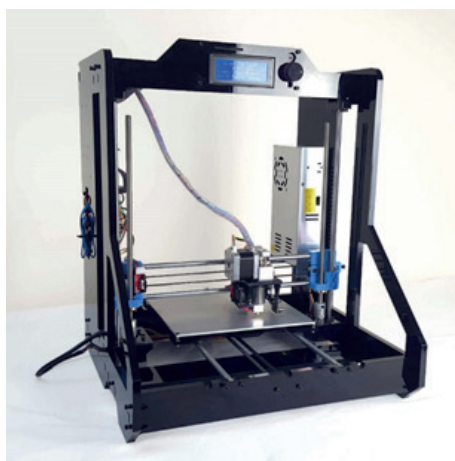


Рис. 1. 3D-принтер конструкции Prusa i3.

Таблица 1. Характеристики 3D-принтера

Характеристика	Значение
Размер печатной области, мм	210×210×230
Диаметр сопла печатающей головки, мм	0.2–0.6*
Минимальная высота слоя, мкм	100

\* В настоящей работе использовано сопло диаметром 0.4 мм.

Исходная конструкция принтера доработана путем замены пластиковых составляющих на металлические, что повысило жесткость и обеспечило возможность поместить принтер в закрытую камеру. Размещение принтера в закрытой камере позволило создать при печати повышенную температуру воздуха внутри (около 65 °С), вследствие чего появилась возможность печати ABS-пластиком, уменьшилась усадка печатаемых моделей и устранилась деламинация от поверхности платформы. Из-за высокой температуры внутри камеры при печати ABS-пластиком плата управления, а также шаговые двигатели, подающие пластик в печатающую головку, вынесены на внешнюю часть печатной камеры. Печатная камера оборудована также вытяжной вентиляцией для увеличения обдува

<sup>1</sup>ABS-пластик – термопластическая смола, сополимер акрилонитрила с бутадиеном и стиролом.

воздухом моделей, печатаемых из PLA-пластика<sup>2</sup>. В принтере произведена замена печатающей головки с одним соплом на печатающую головку с двумя соплами для печати одновременно двумя типами пластика. Установлена зеркальная основа поверх ПП для увеличения адгезии. Перед печатью на поверхность зеркальной основы наносится слой лака, чтобы исключить деламинацию первого слоя модели.

**Характеристики деталей, получаемых методом FFF-печати.** Характеристики получаемых деталей зависят от параметров выбранного для печати материала и от настроек печати. В настоящей работе использовали PLA-пластик, характеристики которого приведены в табл. 2<sup>3</sup> [2].

Таблица 2. Характеристики PLA-пластика

Характеристика	Значение
Температура плавления, °С	173–178
Температура размягчения, °С	50
Твердость (по Роквеллу)	R70–R90
Относительное удлинение при разрыве, %	3.8
Прочность на изгиб, МПа	55.3
Прочность на разрыв, МПа	57.8
Модуль упругости при растяжении, ГПа	3.3
Модуль упругости при изгибе, ГПа	2.3
Температура стеклования, °С	60–65
Плотность, г/см <sup>3</sup>	1.23–1.25
Минимальная толщина стенок, мм	1
Усадка при изготовлении изделий	Нет
Влагопоглощение, %	0.5–50

С целью повышения прочности детали печатали со 100-процентным межслойным заполнением. Перед печатью в настройках принтера задавали условие, чтобы каждый последующий слой наносился так, что линии, по которым проходит печатающая головка, были повернуты на 90° относительно предыдущего слоя. В результате деталь печатается послойно, и полимер подается в сопло под давлением. Это приводит к тому, что расплавленный пластик накладывается на модель с бочкообразным профилем и внешняя поверхность распечатываемых изделий обладает ребристостью, как представлено на рис. 2.

Последующая абразивная обработка распечатанных деталей позволила выровнять поверхности, однако при исходном проектировании моделей пришлось учитывать усадки и изменения габаритных размеров в результате обработки.

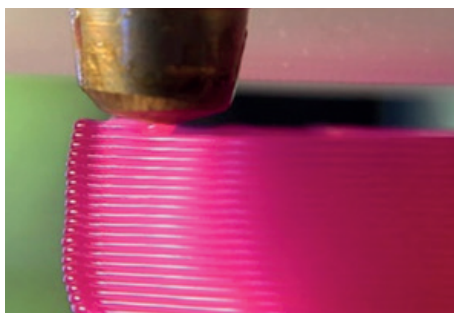
**Погрешности, возникающие при 3D-печати.** Сегодня на рынке существует множество материалов для 3D-печати, обладающих различными характеристиками. Влияние вида материала на точность изготовления заключается в различной степени усадки материала в процессе остывания распечатанной модели. Выбор PLA-пластика обусловлен тем, что он обладает меньшим коэффициентом усадки.

Следующая погрешность определялась качеством сборки конструкции 3D-принтера. Отклонения от перпендикулярности различных направляющих ПП и печатающей

<sup>2</sup>PLA-пластик – термопластичный алифатический полиэфир.

<sup>3</sup>PLA-пластик для 3D-печати [Электронный ресурс]. URL: [http://3dtoday.ru/wiki/PLA\\_plastic/](http://3dtoday.ru/wiki/PLA_plastic/) (дата обращения: 11.01.2019).

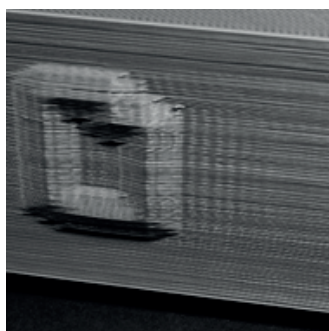




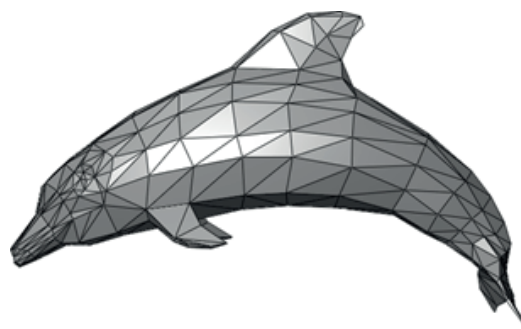
**Рис. 2.** Эффект ребристости при 3D-печати.

головки приводили к перекосам изготавливаемой модели. Подобную погрешность нивелировали путем калибровки области печати. На высоких скоростях печати инерционность ПП и печатающей головки приводила к погрешностям типа «волна» (рис. 3а) на внешних поверхностях деталей. Для печати изначально с помощью САД-программ разрабатывали компьютерную модель, которую переводили в сеточную модель, за счет чего и возникала погрешность, зависящая от степени детализации модели (рис. 3б).

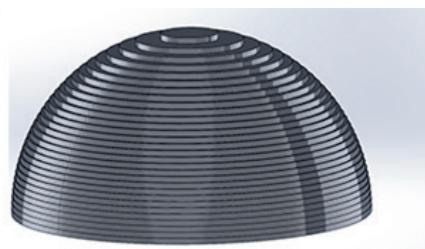
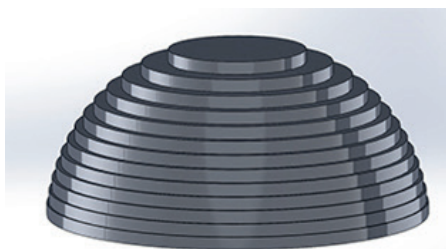
Так как модель печатается послойно, а высота слоя конечна, то наблюдался тот же эффект, что и при цифровом преобразовании аналогового сигнала – погрешность дискретизации и квантования: гладкие наклонные поверхности компьютерной 3D-модели распечатывались ступенчато. Реализация полусферы при различной минимальной высоте слоя представлена на рис. 3в.



а



б



в

**Рис. 3.** Типовые источники погрешности при 3D-печати:

а – вследствие инерционности ПП; б – конечность детализации сеточной модели;  
в – эффект ступенчатости при различной высоте слоя печати.

Минимальная высота слоя при печати дает еще одну погрешность: если требовалось распечатать некоторый выступ высотой 50 мкм, то при минимальной высоте слоя в 100 мкм возникала погрешность высоты выступа на 50 мкм.

Точность позиционирования печатающей головки зависит от значения минимального угла, на который могли повернуться валы шаговых двигателей, отвечающих за перемещение сопла.

Стабильность температуры печатающей головки существенно влияет на качество и точность печати. При температуре, превышающей оптимальную, повышается текучесть пластика, и ширина печатаемых линий увеличивается, что может привести к увеличению площади печатаемых линий. При пониженной температуре текучесть уменьшается, при этом также уменьшается толщина печатаемых линий, что может привести к неполному заполнению слоев и к худшей межслойной адгезии.

## 2. Моделирование и изготовление СВЧ-элементов

**Реализация рупорного излучателя X-диапазона длин волн.** Основой для реализации рупорного излучателя послужила публикация [3]. В нашей работе изначально повторяется реализация антенны X-диапазона с более подробным исследованием характеристик.

Первым этапом проектирования рупорного излучателя явилось создание модели в одной из систем электродинамического моделирования. При моделировании оценивались коэффициент стоячей волны по напряжению, диаграмма направленности и поверхностные токи. Определение силовых линий поверхностных токов в рупоре – это непростая задача, поскольку весьма трудоемко оклеивание алюминиевым скотчем полученной антенны с запитывающим волноводом сечением  $23 \times 10$  мм. Чтобы упростить оклеивание, было решено изготавливать излучатель из отдельных частей с их металлизацией по отдельности.

Определение плоскости, по которой возможно разделить антенну на две части с наименьшим влиянием на характеристики распространяющейся волны, возможно с помощью анализа картины силовых линий поверхностных токов. Из теории щелевых антенн известно, что щель, прорезанная в волноводе, излучает только тогда, когда она пересекает силовые линии токов. Щель, прорезанная по центру широкой стенки прямоугольного волновода с основным типом волны  $H_{10}$ , не излучает, так как токи обтекают щель.

В дальнейшем предстояла проверка: изменится ли структура силовых линий токов на поверхности рупора, так как электромагнитная волна  $H_{10}$  претерпевает ряд изменений при распространении в рупоре.

Толщина алюминиевого скотча составляет 55 мкм. В связи с этим обстоятельством возникает ограничение по нижней граничной частоте. Из определения скин-эффекта известно, что плотность тока в металлическом проводнике убывает по экспоненциальному закону. Частота, для которой плотность тока уменьшилась на 20 дБ при толщине алюминиевого покрытия 55 мкм, составила 50 МГц. Снижение нижней граничной частоты достигается при применении медного скотча, имеющего большую проводимость. Наклеивание нескольких слоев скотча не имеет смысла в связи с тем, что клеевая основа скотча является диэлектриком.

Ограничение по верхней граничной частоте связано с шероховатостью поверхности, получаемой в процессе печати. Полученные в результате печати неровности приводят к увеличению фактической длины протекания тока и появлению диффузного рассеяния. Печать антенны выполняли с высотой слоя, равной 0.1 мм, и среднее значение высоты неровностей взято приблизительно равным значению высоты слоя. Из [4] известна связь

между неровностью поверхности устройства СВЧ и длиной волны. При условии, что рассеиваемая мощность не превышает 10% от аналогичного зеркального отражения, получаем:

$$\sigma_r \leq 0,025\lambda_b, \quad (1)$$

где  $\sigma_r$  – среднеквадратическое значение случайных неровностей, мм;

$\lambda_b$  – длина волны в волноводе, мм.

Следовательно, для волновода, работающего в диапазоне частот 32.9–50 ГГц, технологическая неровность поверхности должна составлять 0.15 мм. Отсюда следует вывод, что изготовление устройств СВЧ при помощи 3D-печати без последующего выравнивания внутренних поверхностей и при оклеивании алюминиевым скотчем возможно в диапазоне частот 0.05–50 ГГц при условии рассеяния мощности в 10%.

После изготовления антенны последовал этап измерения характеристик. Измерения диаграммы направленности производили в антенном измерительно-вычислительном комплексе (АИВК) на базе безэховой камеры (БЭК) ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)». Лабораторный комплекс обеспечивает проведение автоматизированных измерений радиотехнических характеристик антенн, антенных систем и СВЧ-устройств в ближней и дальней зоне. Основные характеристики комплекса сведены в табл. 3.

**Таблица 3.** Параметры безэховой камеры

Характеристика	Значение
Частотный диапазон, ГГц	0.8–40
Коэффициент ослабления (экранирования) БЭК и дверей БЭК на частотах от 400 МГц до 40 ГГц, дБ, не менее	90
Коэффициент безэховости (уровень отраженного сигнала) при нормальном падении плоской волны и при падении плоской волны под углом 45°, дБ, не более	-30 дБ (на частотах от 1 до 40 ГГц); -20 дБ (на частотах от 0.8 до 1 ГГц)
Электрогерметичный экран	состоит из стальных панелей, соединенных методом сварки

При помощи стандартного коаксиально-волноводного перехода (КВП) рупор был подключен к векторному анализатору цепей с последующим съемом характеристик излучения в дальней зоне.

Амплитудную диаграмму направленности по углу  $\alpha$  и ее нормированную величину рассчитывали следующим образом:

$$A(\alpha) = \sqrt{\mathbf{E}_x^2(\alpha) + \mathbf{E}_y^2(\alpha)} \sim \sqrt{S_{rt\ co}^2(\alpha) + S_{rt\ cx}^2(\alpha)},$$

$$A_{\text{норм}}(\alpha) = A(\alpha) / A_{\text{max}}, \quad (2)$$

где  $\mathbf{E}_x$ ,  $\mathbf{E}_y$  – ортогональные в пространстве компоненты вектора  $\mathbf{E}$  напряженности электрической компоненты для произвольно поляризованной антенны;

$S_{rt\ co}^2$ ,  $S_{rt\ cx}^2$  – коэффициенты передачи между приемной и передающей антеннами при их согласованной и кросс-поляризации, соответственно.



Согласно формуле идеальной радиопередачи [5, 6], коэффициент передачи между приемной и передающей антеннами равен:

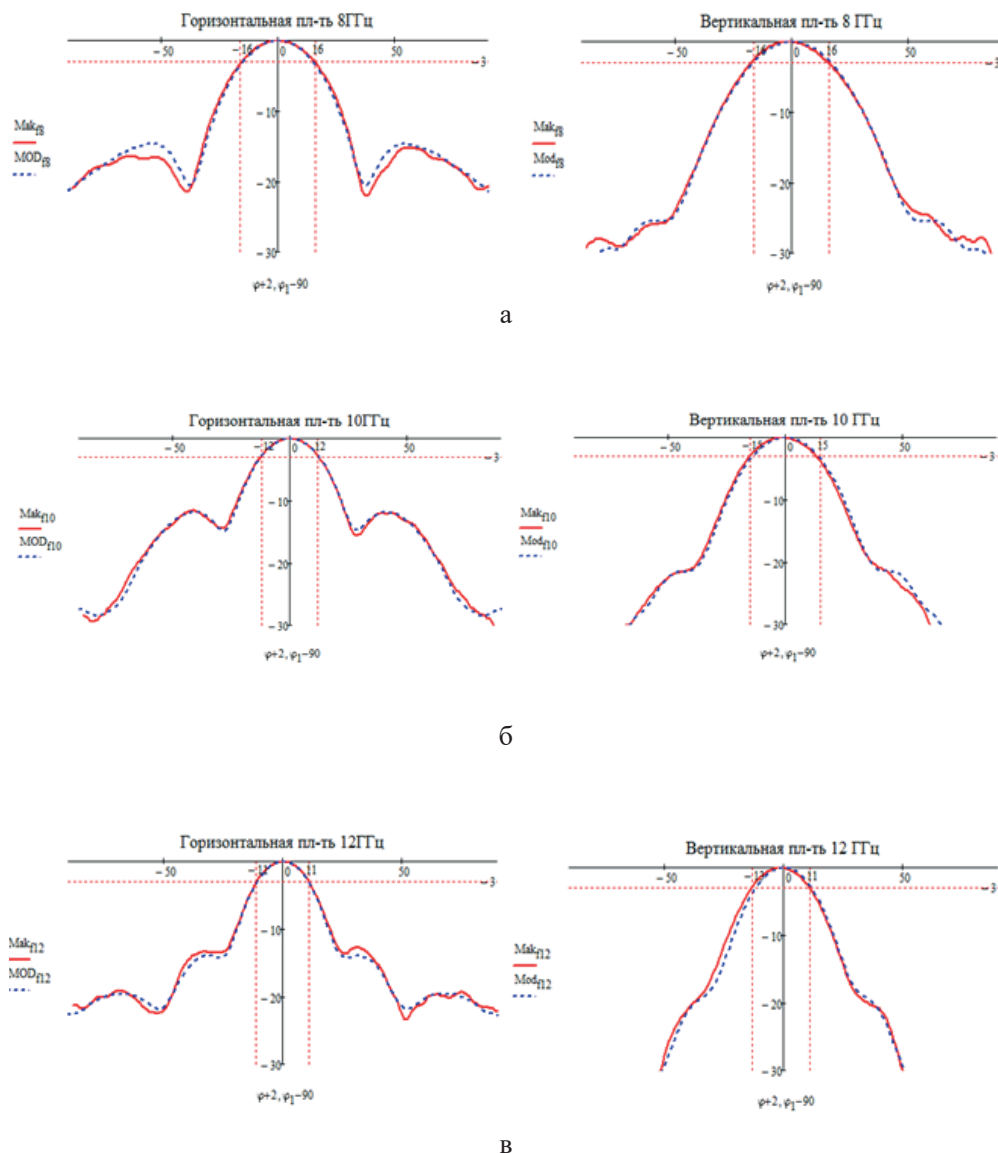
$$S_{rt}^2 = G_r G_t \left( \frac{\lambda}{4\pi R} \right)^2, \quad (3)$$

где  $G_r$ ,  $G_t$  – коэффициенты усиления приемной и передающей антенн;

$\lambda$  – длина волны, м;

$R$  – расстояние между фазовыми центрами антенн, м.

Сравнительные диаграммы направленности в двух сечениях модели и макета представлены на рис. 4. Штриховыми линиями обозначены диаграммы модели, сплошными – диаграммы макета.

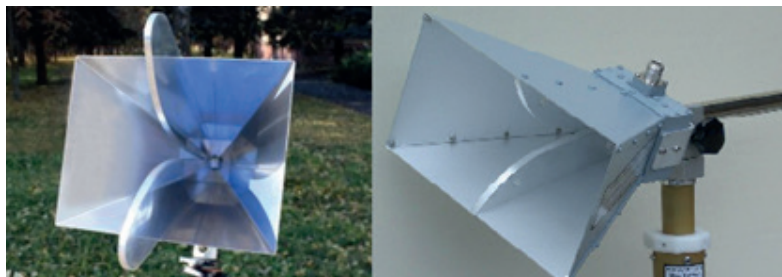


**Рис. 4.** Сравнительные диаграммы направленности модели и макета на частоте:  
а – 8 ГГц; б – 10 ГГц; в – 12 ГГц.

Из представленных диаграмм следует, что модель и макет имеют очень хорошую сходимость.

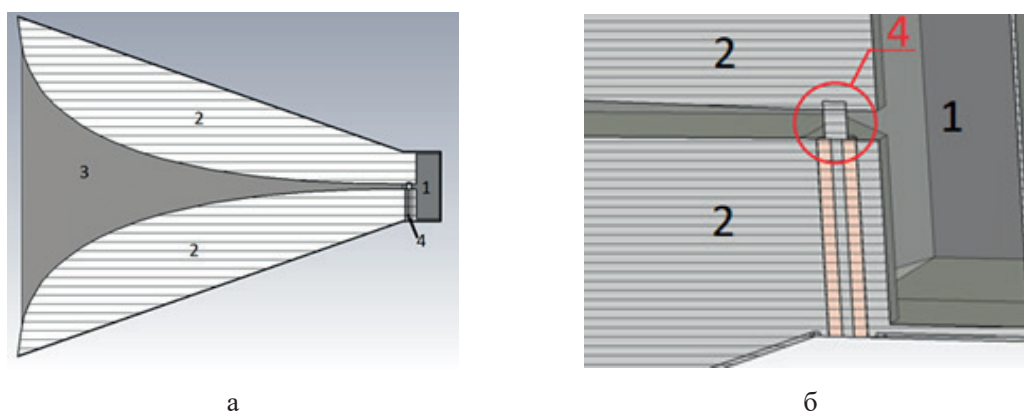
**Моделирование сверхширокополосного излучателя и коаксиально-волнового перехода.**

Для изготовления сверхширокополосной антенны нами выбран хорошо зарекомендовавший себя в измерительной технике тип рупорной антенны, представленный на рис. 5.



**Рис. 5.** Измерительные сверхширокополосные антенны.

Конструктивно подобные антенны состоят из комбинации рупора и экспоненциального перехода (ЭП). Разрез изготавливаемого излучателя представлен на рис. 6а.



**Рис. 6.** Разрез модели сверхширокополосного излучателя:  
а – излучатель; б – реализация ввода СВЧ (обозначения в тексте).

Антенна состоит из резонатора 1, двух ЭП 2, рупора 3, коаксиального СВЧ-ввода 4. Резонатор представляет собой Н-волновод, закороченный с одной стороны. Н-волновод имеет более широкую полосу пропускания, доходящую до нескольких октав. Однако увеличение полосы частот в этих волноводах сопровождается снижением электропрочности и заметным возрастанием коэффициента затухания [6]. Поскольку Н-волновод имеет меньшее в сравнении с прямоугольным волновое сопротивление, согласование свободного пространства с коаксиальной линией (50 Ом) осуществляется более просто. При этом в резонаторе степенями свободы при оптимизации являются расстояние до короткого замыкания, высота и ширина ступени Н-волновода. Экспоненциальные переходы представляют собой две пластины определенной ширины, расположенные по центру широкой стенки волновода. Ввод энергии СВЧ производится при помощи коаксиального кабеля, расположенного перпендикулярно оси рупора. Оплетка коаксиального кабеля соединяется с первым ЭП, центральная жила – с противоположным (рис. 6б).

В процессе электродинамического моделирования в одной из систем автоматизированного проектирования проводили оптимизацию структуры в диапазоне частот 1.5–18 ГГц. В результате моделирования получен график зависимости коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) от частоты (рис. 7). Резкое повышение КСВн на частоте 14.5 ГГц связано со структурой поля в резонаторе, как показано на рис. 8. Цветовым градиентом проекций поля обозначено абсолютное значение напряженности.

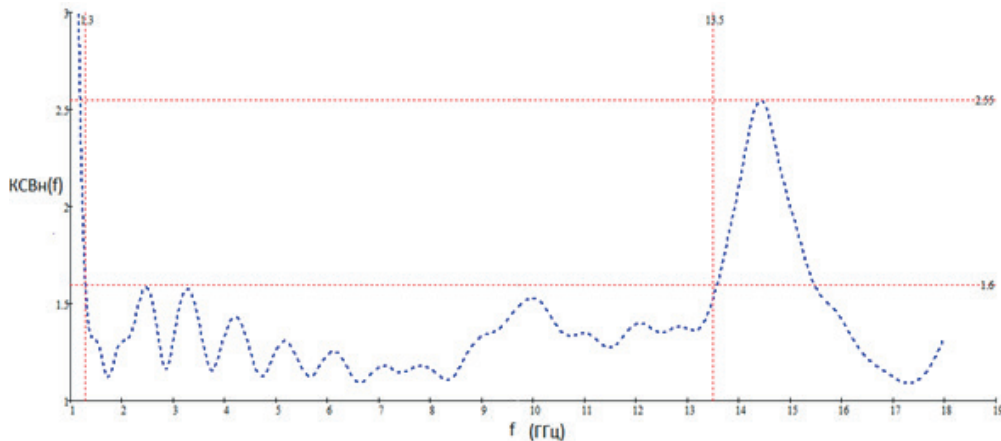


Рис. 7. График зависимости КСВн антенны от частоты, полученный в результате моделирования.

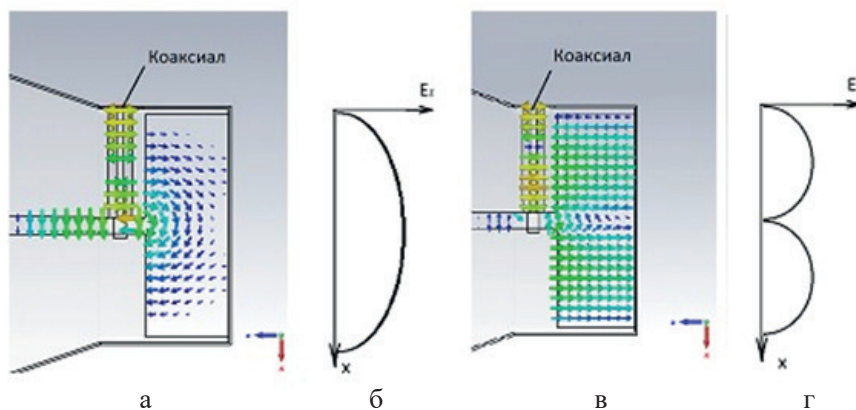


Рис. 8. Проекция силовых линий и распределение электрического поля по оси  $x$ : а, б — на частоте 7.0 ГГц; в, г — на частоте 14.5 ГГц, соответственно.

В диапазоне частот 1.3–13.5 ГГц распределение поля по оси  $x$  имеет вид, близкий к одному полупериоду косинуса. Данный тип волны имеет достаточно простую структуру и собственную частоту, синфазную с волной, распространяющейся между экспоненциальными переходами. На частоте выше 13.5 ГГц происходит усложнение конфигурации поля (в распределении поля по оси  $x$  присутствуют два максимума). Помимо изменения типа волны, происходит повышение собственной частоты резонатора, и волна, отраженная от КЗ резонатора, оказывается несинфазной волне, распространяющейся в рупоре, что, в свою очередь, приводит к возрастанию КСВн. В области частот ниже 1.3 ГГц резкое возрастание КСВн связано с тем, что существование любых типов мод в резонаторе на частотах ниже критической невозможно. Указанное обстоятельство обуславливает смещение плоскости короткого замыкания ближе к коаксиальному вводу и резкое по-

вышение КСВн. Расстояние до короткого замыкания в резонаторе подобрано примерно равным четверти длины волны в волноводе на центральной частоте. В результате оптимизации получен излучатель с размерами раскрытия  $109 \times 156$  мм и длиной 173 см.

КВП в реализованной конструкции является частным случаем перехода, выполненного в сверхширокополосном излучателе. ЭП заменен упрощенным ступенчатым переходом. Общий вид ступенчатого перехода, распечатанного на принтере, представлен на рис. 9. При моделировании КВП выполнялась оптимизация характеристик отражения. Целевой функцией при оптимизации стала минимизация КСВн в Ку-диапазоне длин волн, при этом варьировались следующие параметры: высоты отдельных ступеней и общая ширина ступенчатого перехода.

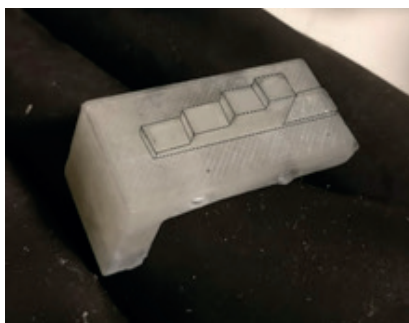


Рис. 9. Ступенчатый переход КВП.

После этапа электродинамического моделирования исходные модели были разбиты на отдельные части для последующей печати на 3D-принтере. Важным с точки зрения электродинамики является электрический контакт центральной жилы к первому ЭП и оплетки коаксиала ко второму ЭП.

Из-за наличия сложных поверхностей (типа ЭП) оклеивание скотчем с учетом поверхностных токов (а в случае КВП Ку-диапазона – наличие мелких частей) было бы весьма трудоемким, поэтому для последующей металлизации поверхностей выбран метод гальванизации.

**Нанесение металлических покрытий методом гальванизации.** Принципиально важной характеристикой при нанесении металлических покрытий на распечатанную модель является химическая стойкость, возможность механической обработки, а также стойкость к кратковременному локальному нагреву в случае пайки металлических поверхностей. Выбранный PLA-пластик не соответствует лишь третьему из этих требований, так как температура плавления пластика составляет  $173\text{--}178$  °С, температура размягчения –  $50$  °С. Это накладывает ограничения на пайку нанесенного слоя металла. В настоящей работе в качестве решения применяли сплав Вуда, обладающий температурой плавления  $68.5$  °С. При этом предлагаемая нами технология нанесения металлических покрытий позволяет выбрать произвольный инженерный пластик с разной температурой плавления, который бы подходил в большей мере для различных нужд. Недостаток таких материалов – высокая стоимость и труднодоступность на российском рынке.

В настоящее время методы нанесения металла на поверхность пластиковых деталей сводятся к технологиям химического и гальванического осаждения. Согласно [7], химическое меднение позволяет получать покрытия толщиной вплоть до  $20$  мкм.

Кроме того, химическое меднение позволяет наносить покрытие на детали сложной формы без необходимости их разделения на элементы более простой геометрии. Образующееся покрытие обладает при этом большей равномерностью. В случае гальванического нанесения деталь должна обладать простой геометрией, желательно без острых выступов и внутренних углов, чтобы получаемое покрытие было равномерным и не образовывались водородные карманы в местах углублений [7]. На рис. 10 приведено распределение электрического поля для П-образной детали, полученное численным моделированием в программе ELCUT.

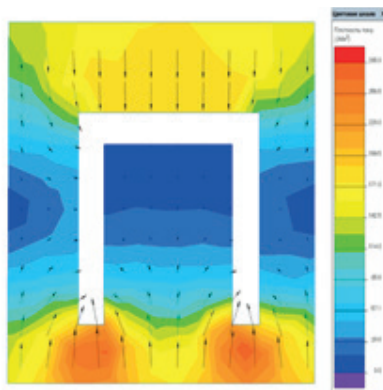


Рис. 10. Распределение напряженности электрического поля у П-образного профиля.

Как можно видеть из рис. 10, во внутренних углах напряженность поля минимальна, в местах с наименьшей длиной сторон напряженность поля максимальна. Именно здесь осаждение металла будет происходить с большей интенсивностью, однако, несмотря на это, за счет гальванизации возможно получение покрытий с толщиной, значительно превосходящей 20 мкм. В данной работе нами используется технология нанесения металлических покрытий методом гальванического осаждения, вследствие большей простоты и невысокой цены оборудования, а также по причине необходимости получения толщины покрытия более 20 мкм.

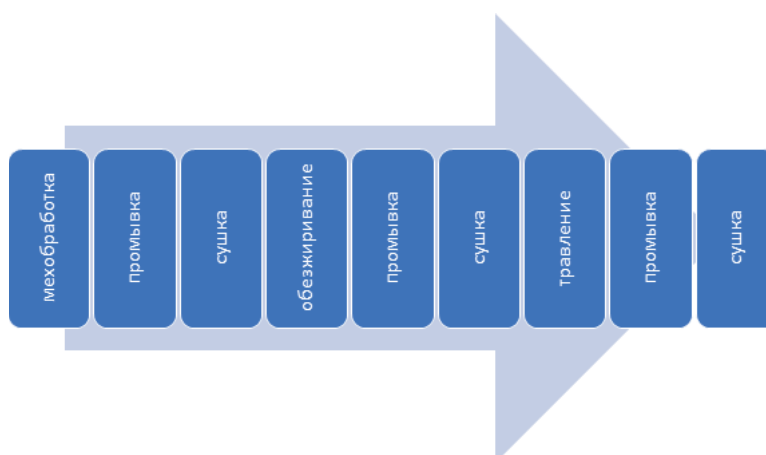
В соответствии с рекомендациями<sup>4</sup> использовали алгоритм подготовки деталей к нанесению металла, представленный на рис. 11. Все операции, если это не оговорено специально, осуществляли при нормальных условиях.

Механическая обработка заключалась в выравнивании шлифованием наждачной бумагой поверхностей, к которым имеются требования к плоскостности и шероховатости. Остальные поверхности также обрабатывались наждачной бумагой для образования сетки мелких штриховых рытвин, за счет которых достигается увеличение адгезии осадка с субстратом. Выполнялось также снятие фасок с ребер и стачивание острых вершин для исключения мест с повышенной плотностью тока, что может привести к неравномерности толщины металлического слоя. Кроме того, выполнялась очистка распечатанных моделей от любых артефактов, образующихся в процессе печати.

Промывку проводили в дистиллированной воде вручную, после каждой промывки раствор заменяли на чистую воду. Сушку вели принудительно под струей атмосферного

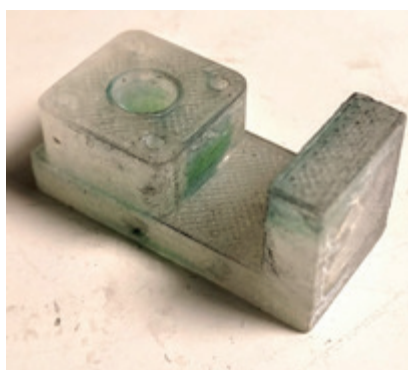
<sup>4</sup>Королева Г.В. Химическое меднение – что это такое? [Электронный ресурс]. URL: <http://blog.tep-nn.ru/?p=1206> (дата обращения: 11.01.2019).





**Рис. 11.** Алгоритм подготовки деталей перед металлизацией.

воздуха. Обезжиривание осуществляли в растворе этанола, затем в растворе 10 г/л гидроксида натрия, 40 г/л гидрокарбоната натрия, 40 г/л фосфата натрия. Состав раствора для травления: 100 г серной кислоты и 30 г хромового ангидрида на 1 л раствора, экспонирование 1–5 мин при 60 °С. В результате травления на поверхности деталей образовывался белый налет, который ухудшает адгезию осадка с поверхностью, поэтому после травления поверхность очищали щеткой. На рис. 12 изображена деталь после травления.



**Рис. 12.** Общий вид детали после травления.

Очевидно, что, несмотря на промывку и чистку, внутри детали, распечатанной со 100%-ным заполнением, можно видеть присутствие небольшого количества раствора для травления (зеленоватого цвета). Не исключено, что это может привести к образованию полостей и излишнему протравливанию поверхностей. Для получения токопроводящего покрытия используют медь: она является относительно недорогим металлом, причем медные покрытия наносят на самые разные основы, и технологические проблемы не возникают.

Среди достоинств медного покрытия можно выделить следующие [7]:

- хорошо полируется, легко деформируется, пластична;
- непосредственно после осаждения легко паяется;
- имеет высокие адгезионные свойства почти со всеми металлами;
- имеет самую высокую, наряду с серебром, удельную электропроводность, пригодна для изготовления печатных плат и волноводов;
- незаменима в качестве компонентов многослойных покрытий, особенно медь-никель-хром;

- имеет низкие внутренние напряжения, допускает получение очень толстых ненапряженных покрытий.

К недостаткам следует отнести:

- покрытия химически малостойки, в том числе в обычной атмосфере, не обеспечивают электрохимической защиты, в качестве самостоятельного финишного покрытия может применяться только с последующим применением лака;

- мало подходит для герметичных соединений, например, для покрытия сварных швов;

- легко диффундирует в другие металлы, требует нанесения барьерных слоев, особенно в условиях высоких температур;

- покрытия, хотя и пригодны под пайку, могут образовывать интерметаллиды, ухудшающие паяемость;

- медь нестойка в контакте со многими органическими веществами.

Для меднения печатных плат с металлизированными отверстиями рекомендуется применение электролита с пониженным содержанием сульфата меди и большой концентрацией серной кислоты состава [8]: медь сернокислая 60–80 г/л; серная кислота 180–200 г/л; температура 18–25 °С; плотность тока 1–4 А/дм<sup>2</sup>; желательно присутствие хлоридов ~30 мг/л и органических добавок.

Для гальванического меднения диэлектрических деталей требуется создать на поверхности детали токопроводящий слой. Рассмотрены два варианта создания проводящего слоя: печать деталей с помощью токопроводящих пластиков и покрытие напечатанных деталей токопроводящим лаком. Сначала для тестирования был выбран токопроводящий ABS-пластик<sup>5</sup>. Удельное электрическое сопротивление пластика составляет 14559 кОм·мм<sup>2</sup>/м, но оно оказалось чрезмерно большим сопротивлением для осаждения медного покрытия в гальванической ванне: после 8 ч гальванизации при токе 1 А/дм<sup>2</sup> детали не покрылись слоем меди. Безусловно, существуют пластики, обладающие существенно меньшим удельным сопротивлением<sup>6</sup>, но такие материалы недоступны на российском рынке. В связи с этим нанесение токопроводящего покрытия на диэлектрические детали осуществляли токопроводящим лаком Cramolin Graphite<sup>7</sup> с заявленной удельной проводимостью покрытия 1000–2000 Ом/м<sup>2</sup>. Лак наносили на детали в три слоя после этапа травления деталей в растворе серной кислоты и хромового ангидрида. После нанесения графитового покрытия проводили гальванизацию: детали подвешивали на катодной штанге на медные провода, которые пропускались через отверстия деталей или обматывались вокруг деталей в случае отсутствия отверстий. Важно подчеркнуть, что в местах, расположенных под медным проводом, толщина покрытия получалась меньше, чем в остальных местах. Детали, подвешенные на катодную штангу, загружались в электролит под напряжением, согласно [7].

Чтобы характеристики изготавливаемых СВЧ-изделий соответствовали предъявляемым требованиям, необходимо соответствие геометрии деталей, покрытых металлом, геометрии исходной компьютерной модели. Поэтому требуется контролировать толщи-

<sup>5</sup>Токопроводящий (Conductive) ABS-пластик [Электронный ресурс]. URL: <http://rusabs.ru/blogs/blog/tokoprovodyaschiy-conductive-abs-plastik/> (дата обращения: 11.01.2019).

<sup>6</sup>Токопроводящий филамент для 3D-печати Electrifi вышел в продажу [Электронный ресурс]. URL: <http://3dtoday.ru/blogs/news3dtoday/conductive-filament-for-3d-printing-electrifi-went-on-sale-/> (дата обращения: 11.01.2019).

<sup>7</sup>GRAPHITE Cramolin графитовый токопроводящий лак [Электронный ресурс]. URL: <http://cramolin.info/catalog/cramolin-laki/cramolin-graphite/> (дата обращения: 11.01.2019).

ну наносимого слоя металла и остановить гальванизацию в тот момент, когда толщина металла станет равной расчетной. Изъятие деталей из ванны в процессе гальванизации недопустимо, поскольку это может привести к отслаиванию металла. Таким образом, простой контроль непосредственным замером в течение гальванизации недопустим.

Чтобы определить время, необходимое для протекания процесса гальванизации, целесообразно использовать аналитическую формулу для толщины покрытия [8]:

$$h = itQ, \quad (4)$$

где  $i = I/S$  – плотность тока при электролизе, А/см<sup>2</sup>;

$I$  – общий ток в цепи, А;

$t$  – время экспозиции, ч;

$S$  – площадь покрываемой поверхности, см<sup>2</sup>;

$Q$  – электрохимический эквивалент, см<sup>3</sup>/А·ч.

В случае меди(II) электрохимический эквивалент будет равен 0.1326 см<sup>3</sup>/А·ч [8].

На практике толщина металлизации оказывается больше, чем расчетная, поэтому была произведена контрольная гальванизация для получения поправочного коэффициента, который можно было бы внести как множитель в выражение (4). Формула с поправочным коэффициентом позволила бы более точно контролировать время экспозиции для получаемого электролита.

В качестве субстрата был напечатан шар диаметром 20 мм со штангой. Форма шара выбрана для получения более равномерного распределения напряженности поля по его поверхности. Осаждение производили при постоянном токе в цепи в 150 мА без перемешивания электролита при температуре 21 °С в течение 13 ч. Площадь поверхности детали ~1256 мм<sup>2</sup>, следовательно, ток цепи по отношению к площади сферы равен

$$I = i / S = 0,15 / 0,1256 = 1,194 \text{ А/дм}^2.$$

Замеры диаметра шара после покрытия лаком были произведены в трех точках, соответствующие значения составили 20.0, 20.07 и 20.08 мм. Масса шара до гальванизации составляла 4.34 г, после гальванизации – 7.13 г; разница в массе составила 2.79 г. В соответствии с ГОСТ 9.302-88 для определения толщины покрытия  $h_{cp}$  (в мкм) по гравиметрическому методу необходимо воспользоваться соотношением:

$$h_{cp} = \frac{m_1 - m_2}{S\rho} 10^4,$$

где  $m_1$  – масса деталей после нанесения покрытия, г;

$m_2$  – масса деталей до нанесения покрытия или после растворения покрытия, г;

$S$  – площадь покрытия, см<sup>2</sup>;

$\rho$  – плотность материала покрытия, г/см<sup>3</sup>.

Соответственно, толщина покрытия равна 38.27 мкм.

Измерения диаметра гальванизированного шара в трех местах дали значения 20.8, 20.9 и 20.66 мм.

Третий тип измерения толщины покрытия подразумевал разрушающее воздействие в виде отрыва части металлизированного слоя от субстрата. В результате измерения тол-

щины металлизации получено значение 0.32 мм. Усредненное значение толщины получившегося покрытия равно 0.375 мм. Используя (4), можно рассчитать теоретическое значение толщины покрытия, которое составило 206 мкм. Отсюда найден поправочный коэффициент как отношение контрольной толщины к теоретической:

$$K_1 = 0,375 / 0,206 = 1,82.$$

Для повышения точности был проведен повторный цикл контрольной гальванизации. Детали экспонировались 19 ч 45 мин под током 500 мА, площадь поверхности 81.9 см<sup>2</sup>. В результате получен слой толщиной 240 мкм. Теоретическая толщина слоя составила 0.16 мм, и поправочный коэффициент равен

$$K_2 = 0,24 / 0,16 = 1,5.$$

При последующих процессах гальванизации также возможно уточнение данного поправочного коэффициента, для чего достаточно измерять получаемые покрытия неразрушающими методами. Итоговый коэффициент выбран нами равным 1.66 – средним от полученных замеров. Итоговое выражение для толщины покрытия:

$$h = 1,66itQ.$$

Необходимо учитывать, что в дальнейшем при замене электролита требуется соответствие по составу нового электролита тому, для которого были рассчитаны поправочные коэффициенты.

Изготовленные сверхширокополосная антенна и КВП представлены на рис. 13.

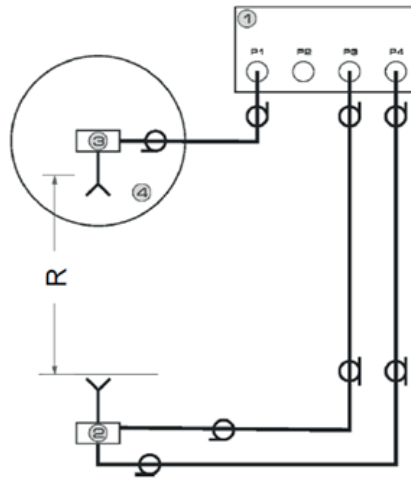


**Рис. 13.** Устройства СВЧ, изготовленные методом 3D-печати с последующей гальванизацией.

### **3. Экспериментальное исследование характеристик антенны**

Результатами экспериментального исследования характеристик антенны измерений являются главные сечения амплитудной диаграммы направленности (АДН) на интересующих частотах в рабочем диапазоне длин волн, а также зависимость КСВн от частоты и координаты фазового центра. Типовой стенд для измерений в дальней зоне представлен на рис. 14.

При измерении АДН антенны исследуемая антенна располагалась на опорно-поворотном устройстве (ОПУ), а измерительный зонд – в дальней зоне на расстоянии порядка 6 м. При вращении измеряемой антенны на ОПУ по азимуту регистрировали коэффициент передачи между антеннами. Для определения координат фазового центра антенны



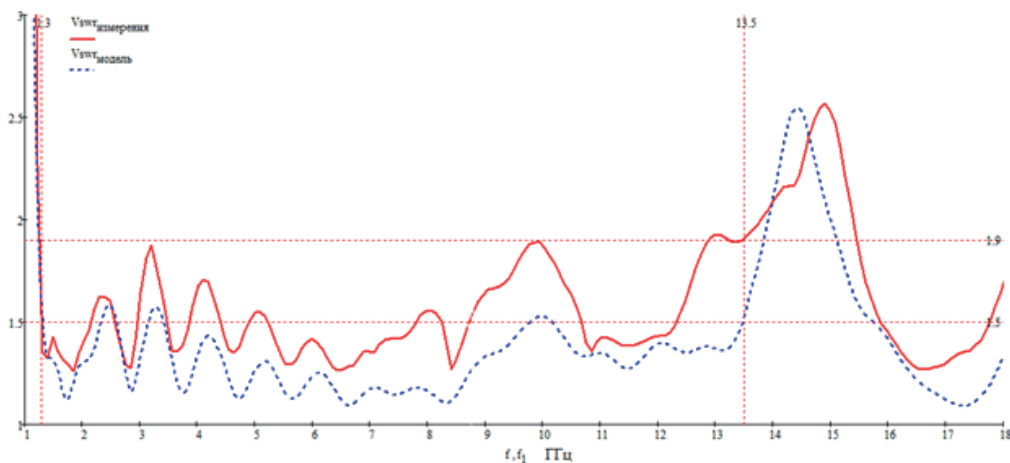
**Рис. 14.** Схема стенда для измерения характеристик в дальней зоне:

1 – векторный анализатор цепей; 2 – измерительный зонд;  
3 – исследуемая антенна; 4 – ОПУ.

применялся математический аппарат [8]. В общем случае фазовый центр антенны вынесен относительно оси вращения поворотного стола. Данный параллакс влияет как на измеряемую амплитудную диаграмму направленности (ДН), так и на фазовую ДН. Определение координат фазового центра возможно осуществить после измерения основных сечений ДН и анализа их фазовых составляющих.

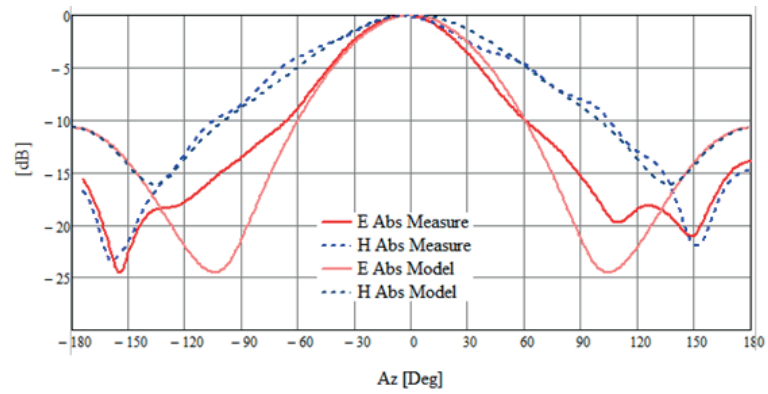
Результатами измерений явились главные сечения амплитудной диаграммы направленности, зависимость КСВн от частоты и координаты фазового центра. Сравнительные результаты расчета модели и измерения макета представлены на рис. 15–17.

Из результатов сравнения моделей и макетов, изготовленных с применением технологии 3D-печати, следует хорошее совпадение параметров изготовленных антенн с изначальными моделями. Можно утверждать, что вследствие высокой скорости прототипирования в сочетании с низкой ценой технология 3D-печати применительно к устройствам СВЧ обладает рядом преимуществ по сравнению со стандартными методами изготовления.

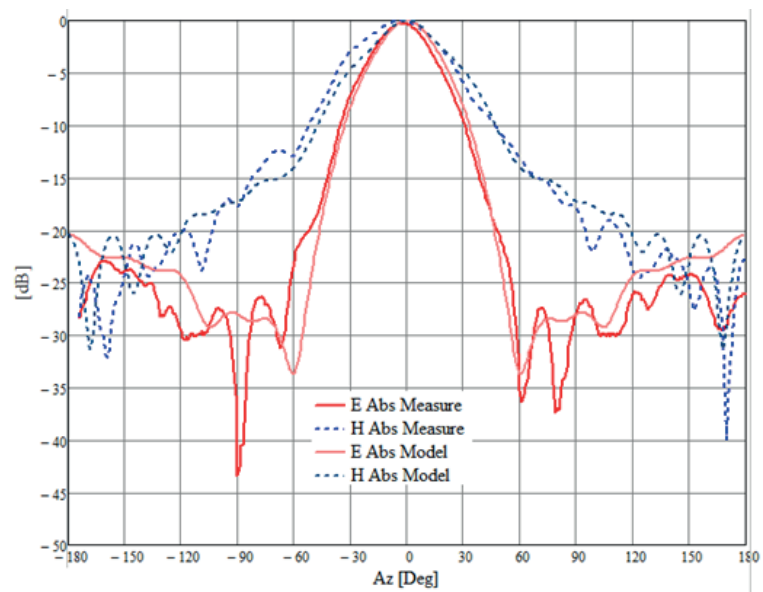


**Рис. 15.** Сравнительные графики КСВн модели и макета.

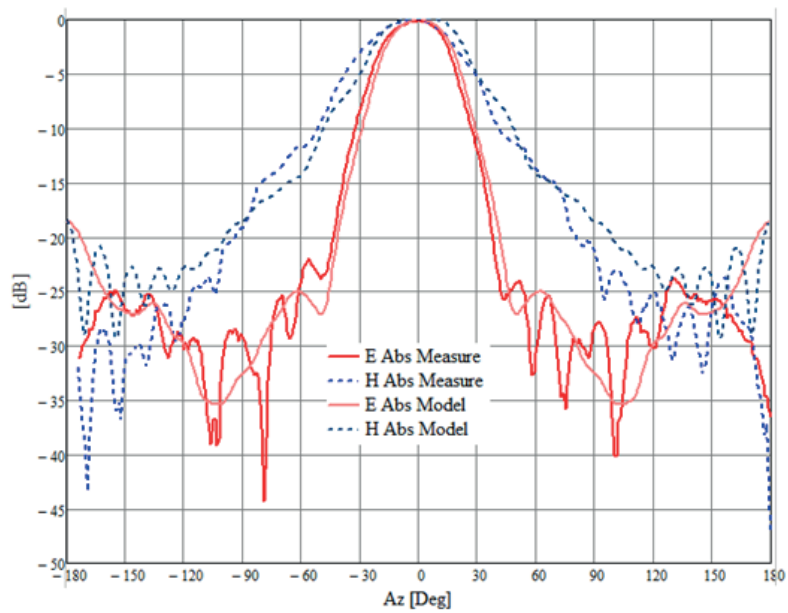




а



б



в

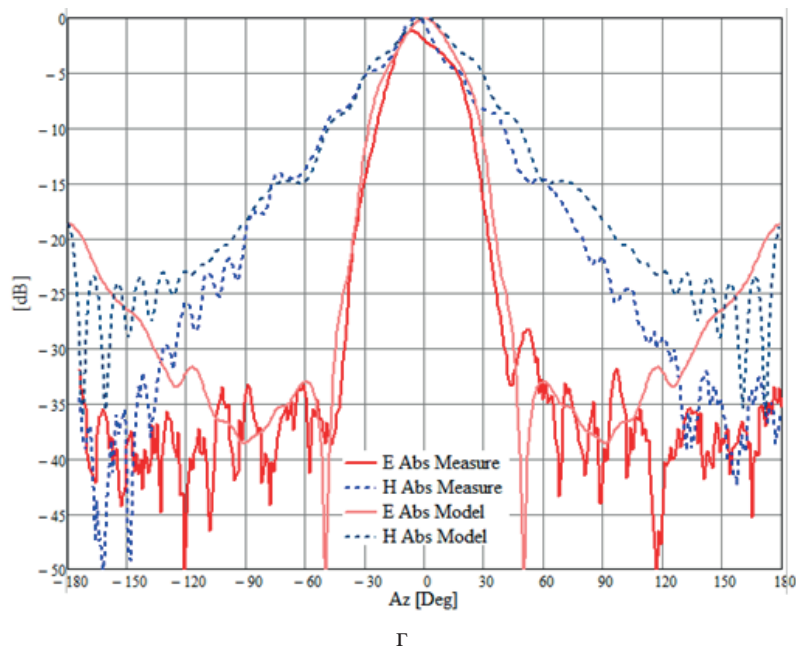


Рис. 16. Сравнение главных сечений диаграммы направленности с моделью на частоте: а – 1.5 ГГц; б – 6 ГГц; в – 9 ГГц; г – 12 ГГц.

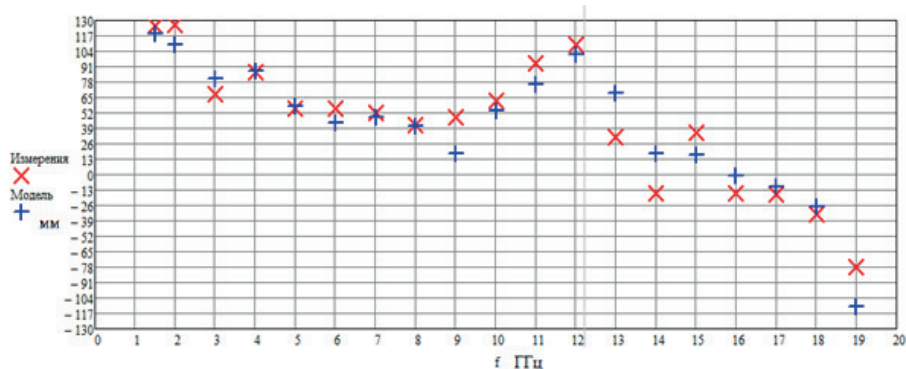


Рис. 17. Сравнительные результаты вычисления фазового центра модели и макета в зависимости от частоты.

### Заключение

Рассмотренная технология изготовления устройств СВЧ может найти широкое применение для прототипирования и создания мелкосерийных деталей, требующих наличия проводимого металлического слоя на их поверхности. Стоимость получаемых деталей значительно ниже стоимости аналогичных деталей, полученных методом фрезерования или литья – при учете, что к деталям, получаемым описанным способом, не выдвигаются требования высокой механической прочности. Следует отметить лучшие массогабаритные характеристики получаемых деталей в сравнении с цельнометаллическими. Сама технология FFF-печати подразумевает возможность создания цельных деталей без сборки, что не только уменьшает время производства, но и дополнительно снижает массу изделий из-за меньшего количества винтовых соединений. В результате исследований проведен полный цикл производства устройств СВЧ: проектирование, моделирование, изготовление образца и валидация характеристик. Результаты моделирования рассмотренных

устройств хорошо согласуются с экспериментальными характеристиками изготовленных макетов с применением технологии 3D-печати.

Выполнена оценка влияния шероховатости поверхности, получаемой в результате 3D-печати, на ограничения по частотным свойствам изготавливаемых устройств. Проведен анализ полосовых свойств сверхширокополосной антенны.

Перспективы дальнейшего развития описанной технологии включают вариацию типов пластиков, используемых в качестве субстрата, нанесение финишных декоративных и функциональных покрытий, увеличение адгезионных свойств наносимого слоя меди с субстратом. Представляет интерес и переход на технологию SLA-печати для расширения номенклатуры производимых изделий за счет улучшения качества печатных деталей.

### **Литература:**

1. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Качурин А.А. Обзор современных технологий 3D-печати // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 6. С. 26–30. URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=35053> (дата обращения: 25.11.2018).
2. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Воронцов Р.В. Материалы, доступные в рамках различных технологий 3D-печати // Современные наукоемкие технологии. 2015. № 5. С. 20–25. URL: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=35031> (дата обращения: 23.11.2018).
3. Yunus C.T., Peyman Mahouti, Filiz Güneş. Design and manufacturing of an X-band horn antenna using 3-D printing technology // Proceed. of the 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies - RAST 2017. Istanbul, Turkey, 2017. P. 195–198.
4. Воробьев Е.А. Расчет производственных допусков устройств СВЧ. Л.: Судостроение, 1980. 148 с.
5. Gregson S.F., McCormick J., Parini C.G. Principles of planar near-field antenna measurements. IET Electromagnetic Waves, series 53. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology, 2007. 424 p.
6. Сазонов Д.М. Антенны и устройства СВЧ. М.: Высшая школа, 1988. 432 с.
7. Гамбург Ю.Д. Гальванические покрытия. Справочник по применению. М.: Техносфера, 2006. 220 с.
8. Shang I.-P., Fu D.-M., Deng Y.-B., Jiang S. Measurement of phase center for antenna with the method of moving reference point // Proceed. of the 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAP) 2008. Kunming, 2008. P. 114–117.

### **References:**

1. Lysych M.N., Shabanov M.L., Kachurin A.A. Review of modern technologies of 3D printing. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* (Modern High Technologies). 2015; 6: 26-30. Available at: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=35053>. Date of access: 11/25/2018. (in Russ.)
2. Lysych M.N., Shabanov M.L., Vorontsov R.V. Materials available in various 3D printing technologies. *Sovremennyye naukoymkiye tekhnologii* (Modern High Technologies). 2015; 5: 20-25. Available at: <http://www.top-technologies.ru/ru/article/view?id=35031>. Date of access: 11/23/2018. (in Russ.)
3. Yunus C.T., Peyman Mahouti, Filiz Güneş. Design and manufacturing of an X-band horn

antenna using 3-D printing technology. *Procced. of the 8th International Conference on Recent Advances in Space Technologies - RAST 2017*. Istanbul, Turkey, 2017: 195-198.

4. Vorobiev E.A. Production tolerances calculation for microwave devices. Leningrad: Sudstroyeniye Publ., 1980. 148 p. (in Russ.)

5. Gregson S.F., McCormick J., Parini C.G. Principles of planar nearfield antenna measurements. IET Electromagnetic Waves, series 53. Stevenage: The Institution of Engineering and Technology, 2007. 424 p.

6. Sazonov D.M. Antennas and Microwaves Devices. Moscow: Vysshaya shkola Publ., 1988. 432 p. (in Russ.)

7. Gamburg Yu.D. Electroplated Coatings. Handbook for applying. Moscow: Tekhnosfera, 2006. 220 p. (in Russ.).

8. Shang I.-P., Fu D.-M., Deng Y.-B., Jiang S. Measurement of phase center for antenna with the method of moving reference point. *Proceed. of the 8th International Symposium on Antennas, Propagation and EM Theory (ISAP) 2008*. Kunming, 2008: 114-117.

#### Об авторах:

**Харалгин Сергей Владимирович**, сотрудник научно-производственного предприятия АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга» (107078, г. Москва, ул. Новая Басманная, д. 20); аспирант кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Куликов Геннадий Валентинович**, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры радиоэлектронных систем и комплексов Института радиотехнических и телекоммуникационных систем ФГБОУ ВО «МИРЭА – Российский технологический университет» (119454, Россия, Москва, пр-т Вернадского, д. 78).

**Котельников Андрей Борисович**, аспирант кафедры теоретической информатики и дискретной математики ФГБОУ ВО «Московский педагогический государственный университет» (119991, Россия, Москва, ул. Малая Пироговская, д. 1).

**Снастин Михаил Владимирович**, сотрудник научно-производственного центра радиоинформационной метрологии ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)» (125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

**Добычина Елена Михайловна**, кандидат технических наук, доцент, профессор кафедры «Радиофизика, антенны и микроволновая техника» ФГБОУ ВО «Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)» (125993, Россия, Москва, Волоколамское шоссе, д. 4).

#### About the authors:

**Sergey V. Kharalgin**, Employee, Academician A.I. Berg Central Scientific Research Radio Engineering Institute (20, Novaya Basmannaya st., Moscow 107078, Russia); Postgraduate Student of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Gennady V. Kulikov**, Professor, D.Sc. (Engineering), Professor of the Chair of Radio Electronic Systems and Complexes, Institute of Radio Engineering and Telecommunication Systems, MIREA – Russian Technological University (78, Vernadskogo pr., Moscow 119454, Russia).

**Andrey B. Kotelnikov**, Postgraduate Student of the Chair of Theoretical Informatics and Discrete Mathematics, Moscow Pedagogical State University (1, Malaya Pirogovskaya st., Moscow 119991, Russia).

**Mikhail V. Snastin**, Employee, Center of Radio Information Metrology, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia).

**Elena M. Dobychina**, Ph.D. (Engineering), Associate Professor, Professor of the Chair of Radiophysics, Antennas and Microwave Technology, Moscow Aviation Institute (National Research University) (4, Volokolamskoe highway, Moscow 125993, Russia).

**Для цитирования:** Харалгин С.В., Куликов Г.В., Котельников А.Б., Снастин М.В., Добычина Е.М. Прототипирование СВЧ-устройств с заданными электродинамическими характеристиками по технологии аддитивной 3D-печати // Российский технологический журнал. 2019. Т. 7. № 1. С. 80–101. DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101

**For citation:** Kharalgin S.V., Kulikov G.V., Kotelnikov A.B., Snastin M.V., Dobychina E.M. Prototyping of microwave devices with specified electrodynamic characteristics using additive 3D printing technology. *Rossiyskiy tekhnologicheskii zhurnal* (Russian Technological Journal). 2019; 7(1): 80-101. (in Russ.). DOI: 10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101