

УДК 537.226.1

<https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-57-65>

НАУЧНАЯ СТАТЬЯ

Исследование диэлектрических характеристик материалов, изготавливаемых с применением аддитивных технологий

С.В. Харалгин[@],
М.И. Войтович

АО «ЦНИРТИ им. академика А.И. Берга», Москва, 107078 Россия

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

Резюме. На основе существующих методов измерения диэлектрических характеристик материалов выбран метод конечного интегрирования, оптимальный для проведения расчетов в системе электродинамического автоматизированного проектирования. Исходя из расчетных значений матрицы рассеяния по заданному алгоритму вычислены диэлектрическая проницаемость и тангенс угла диэлектрических потерь образцов печатаемого полимера. При оценке точности расчета диэлектрических характеристик осуществлена валидация для образца с заданными характеристиками. Для образца, печатаемого по технологии послойного наплавления полимерных нитей, проведена оценка влияния параметров заполнения на диэлектрические характеристики печатаемой модели в X-диапазоне длин волн. Приведено описание модели, реализованной в системе автоматизированного проектирования. Путем обработки результатов моделирования получены аппроксимирующие зависимости для диэлектрической проницаемости и потерь от степени заполнения диэлектриком. Из расчетных угловых диаграмм следует, что снижение степени заполнения диэлектрика напрямую отражается на степени анизотропии получаемого при печати полимера в плоскости расположения экструдированных слоев. При этом также увеличивается глубина экстремумов, наблюдаемых при углах 0°, 90° и 180°. Наличие этих экстремумов напрямую связано с тем, что силовые линии напряженности основного типа волны в волноводе располагаются перпендикулярно широкой стенке, и в ситуации, когда объемы воздушных зазоров между цилиндрами оказываются параллельными силовым линиям напряженности, наблюдается общее снижение диэлектрической проницаемости. Для печатаемого образца, состоящего из двух слоев перекрещенных цилиндров, воздушные объемы оказываются параллельными силовым линиям с периодом в 90°, что и подтверждается полученными результатами. Увеличение глубины экстремумов при снижении степени заполнения связано с соответствующим увеличением воздушного пространства между цилиндрами в слое печатаемого полимера.

Ключевые слова: технология 3D-печати, аддитивные технологии, волноводный метод определения диэлектрических характеристик

• Поступила: 24.02.2021 • Доработана: 03.03.2021 • Принята к опубликованию: 05.03.2021

Для цитирования: Харалгин С.В., Войтович М.И. Исследование диэлектрических характеристик материалов, изготавливаемых с применением аддитивных технологий. *Российский технологический журнал*. 2021;9(2):57–65. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2021-9-2-57-65>

Прозрачность финансовой деятельности: Никто из авторов не имеет финансовой заинтересованности в представленных материалах или методах.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

RESEARCH ARTICLE

Investigation of the dielectric characteristics of materials manufactured using additive technologies

**Sergey V. Kharalgin[@],
Maksim I. Voytovich**

Academician A.I. Berg Central Radio-Research Institute, Moscow, 107078 Russia

[@] Corresponding author, e-mail: hsvl92@mail.ru

Abstract. Based on the existing methods of measuring the dielectric characteristics of materials, the most optimal method for performing calculations in the electrodynamic computer-aided design system is selected by the finite integration method. Based on the calculated values of the scattering matrix, the permittivity and the tangent of the dielectric loss angle of the printed polymer samples are calculated according to a given algorithm. When evaluating the accuracy of the calculation of the dielectric characteristics, validation was performed for a sample with the specified characteristics. For a sample printed using the technology of fused filament fabrication, the influence of the filling parameters on the dielectric characteristics of the printed model in the X-band of wavelengths was estimated. The description of the model implemented in the computer-aided design system is given. By processing the simulation results, approximating dependences for the permittivity and losses on the degree of filling with the dielectric are obtained. It follows from the calculated angular diagrams that the decrease in the degree of filling of the dielectric directly affects the degree of anisotropy of the polymer obtained during printing in the plane of the extruded layers. This also increases the depth of the extremes observed at angles of 0°, 90° and 180°. The presence of these extremes is directly related to the fact that the force lines of the main wave type in the waveguide are located perpendicular to the wide wall and in a situation where the volumes of air gaps between the cylinders are parallel to the force lines of tension, there is a general decrease in the dielectric constant. For a printed sample consisting of two layers of crossed cylinders, the air volumes are parallel to the lines of force with a period of ninety degrees, which is confirmed by the results obtained. An increase in the depth of the extremes with a decrease in the degree of filling is associated with a corresponding increase in the air space between the cylinders in the layer of the printed polymer.

Keywords: 3D printing technology, additive technologies, waveguide method for determining dielectric characteristics

• Submitted: 24.02.2021 • Revised: 03.03.2021 • Accepted: 05.03.2021

For citation: Kharalgin S.V., Voytovich M.I. Investigation of the dielectric characteristics of materials manufactured using additive technologies. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2021;9(2):57–65 (in Russ.). <https://doi.org/10.32362/2500316X-2021-9-2-57-65>

Financial Disclosure: No author has a financial or property interest in any material or method mentioned.

The authors declare no conflicts of interest.

Термины:

ABS-пластик – ударопрочная техническая термопластическая смола на основе сополимера акрилонитрила с бутадиеном и стиролом.

Fused filament fabrication (FFF) – технология изготовления трехмерных объектов посредством послойного наплавления полимерных нитей.

Selective Laser Sintering (SLS) – технология аддитивного производства, основанная на послойном спекании порошковых материалов (полиамиды, пластик) с помощью луча лазера.

Stereolithography (SLA) – технология 3D-печати, основанная на послойном отверждении жидкого материала под действием луча лазера.

ВВЕДЕНИЕ

Применение аддитивных технологий в современном производстве охватывает все новые сферы промышленности. Исследования в рамках применимости 3D-печати для изготовления сверхвысокочастотных (СВЧ) устройств представлены

в большом количестве научных материалов, например [1–6]. Помимо применения технологии 3D-печати устройств СВЧ металлами [7–9], применяется и полимерная печать с нанесением проводящих покрытий различными методами. На данном этапе, помимо широко известной печати различными полимерами, исследованы возможности аддитивных методов по изготовлению СВЧ устройств проводящими материалами с удельным сопротивлением $5 \cdot 10^{-7}$ Ом · м [1], а также низкотемпературными спекаемыми керамиками [2]. Основным преимуществом данной технологии является возможность создания устройств, обладающих уникальными характеристиками, изготовить которые классическими методами очень сложно либо невозможно. Так, например, в [3] представлены результаты исследования метаматериалов, изготавливаемых с помощью 3D-печати. На электронном ресурсе [4] авторы представили сравнение возможностей по изготовлению спиральной антенны по технологиям лазерной стереолитографии (SLA) и технологии спекания порошков (SLS) с нанесением проводящего слоя с использованием аэрозольного напыления. Результаты измерения диаграммы направленности и коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВн) от входа спиральной антенны авторы не предоставляют, ссылаясь на неприемлемость полученных характеристик, связанную с неучтенными электродинамическими характеристиками печатаемого полимера. В [5] приведены результаты полного цикла исследований и изготовления рупорной антенны и коаксиально-волноводных переходов с использованием технологии послойного наплавления (Fused filament fabrication): проектирование, моделирование, изготовление образца и валидация характеристик. Исследования, направленные на определение диэлектрических характеристик печатаемых материалов, отражены в [1, 6]. В [6] авторы при помощи резонаторного метода определили диэлектрические характеристики печатаемого материала и получили некоторую дисперсию по выборке из девяти образцов, обосновывая расхождения в значениях неполной заливкой с образованием воздушных карманов. К сожалению, авторы не уделили внимания влиянию на диэлектрическую проницаемость степени заполнения полимером пространства модели. В [1] за счет уменьшения степени заполнения печатаемых полых цилиндров авторы добиваются снижения диэлектрической проницаемости, однако соответствующих зависимостей диэлектрических характеристик и исследования возникающей при этом анизотропии не представлено. При этом, использование печатаемого пластика в качестве структуры проводящей электромагнитную энергию встречается в большом количестве публикаций [10–13].

Целью данной работы является оценка влияния характеристик заполнения печатаемого образца по технологии послойного наплавления полимерных нитей FFF на диэлектрические характеристики печатаемой модели в X-диапазоне длин волн. В работе проводится описание модели, реализованной в системе автоматизированного проектирования, с дальнейшим вычислением диэлектрических характеристик при различных степенях заполнения.

1. ВЫБОР МЕТОДА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК МАТЕРИАЛОВ

Известно, что модели при печати по технологии послойного наплавления полимерных нитей обладают неоднородностями в виде воздушных карманов, направление которых напрямую зависит от того, каким образом модель была разбита на слои. В связи с этим при выборе метода определения диэлектрических характеристик закладывалось требование по чувствительности системы к анизотропии измеряемых материалов. Среди разнообразия существующих методов определения диэлектрических характеристик материалов, обладающих специфическими особенностями, можно выделить следующие [15]: резонаторные методы, методы линии передач, методы свободного пространства и конденсаторные методы. Резонаторные методы, к сожалению, весьма узкополосны. Конденсаторные методы находят свое применение в низкочастотной части длин волн, которая может достигать до 1 ГГц. При измерении свойств материалов методами свободного пространства используют направленные свойства антенн, при этом аналогично методам линии передач измеряются коэффициенты передачи и коэффициент отражения от исследуемого образца. С точки зрения электродинамического моделирования методы свободного пространства являются ресурсоемкими по причине того, что для создания направленной диаграммы требуется антенна больших, относительно длины волн, размеров.

В связи с необходимостью измерений характеристик анизотропных материалов в широком диапазоне частот при сравнительно небольшой ресурсоемкости для моделирования был выбран метод линии передач с использованием прямоугольного волновода. Сущность метода заключается в том, что измеряемый образец размещается в прямоугольном волноводе с последующим измерением комплексных коэффициентов отражения и передачи, а далее по алгоритму, описанному в [15], проводилось вычисление диэлектрических характеристик образца.

2. МОДЕЛИРОВАНИЕ МАТЕРИАЛА, ИЗГОТАВЛИВАЕМОГО С ПРИМЕНЕНИЕМ АДДИТИВНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

Для оценки влияния плотности заполнения печатаемого образца на диэлектрические характеристики в системе автоматизированного проектирования (САПР) была создана и реализована 3D-модель. Ее вид показан на рис. 1.

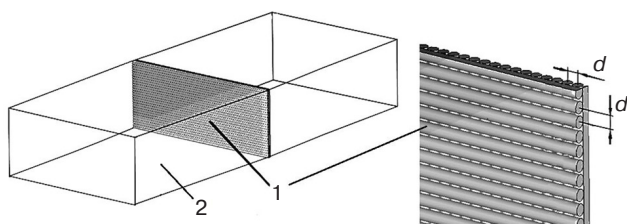


Рис. 1. Модель печатаемого образца, расположенного в волноводе:
1 – измеряемый образец,
2 – волновод

Модель состоит из металлического волновода из числа стандартизированных размеров сечения 23×10 мм, работающего в X-диапазоне длин волн. В волноводе располагается измеряемый образец, состоящий из двух перекрестно расположенных слоев, расстояние между которыми 0.27 мм. Каждый слой представляет собой ряд цилиндров диаметром 0.3 мм, состоящих из материала с диэлектрической проницаемостью ϵ равной 2.6 и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\epsilon) = 0.02$ [6], как и у полимера акрилонитрил бутадиен стирол (ABS-пластик). В виде параметра задано расстояние d между соседними в слое цилиндрами. При варьировании значений параметра d в диапазоне от 0.24 до 0.35 мм с шагом 0.01 мм, были получены комплексные коэффициенты передачи $\dot{S}_{21}$ и отражения $\dot{S}_{11}$, которые впоследствии пересчитывались в диэлектрические характеристики ϵ и $\text{tg}(\epsilon)$ по алгоритму, приведенному в [15].

При этих расчетах использованы следующие зависимости комплексных коэффициента отражения и коэффициента передачи волноводной секции с размещенным образцом от диэлектрической проницаемости:

$$\dot{S}_{11}(\dot{\epsilon}) = \frac{(\mu\gamma_1 - \gamma_2)}{(\mu\gamma_1 + \gamma_2)} \times \frac{\left(1 - \exp\left[2l(k_{\text{кр}}^2 - k_0^2\dot{\epsilon}\mu)^{0.5}\right]\right)}{\left(1 - \left[\frac{(\mu\gamma_1 - \gamma_2)}{(\mu\gamma_1 + \gamma_2)}\right]^2 \exp\left[2l(k_{\text{кр}}^2 - k_0^2\dot{\epsilon}\mu)^{0.5}\right]\right)}, \quad (1)$$

$$\dot{S}_{21}(\dot{\epsilon}) = \frac{\exp\left[l(k_{\text{кр}}^2 - k_0^2\dot{\epsilon}\mu)^{0.5}\right] \left(1 - \left[\frac{(\mu\gamma_1 - \gamma_2)}{(\mu\gamma_1 + \gamma_2)}\right]^2\right)}{\left(1 - \left[\frac{(\mu\gamma_1 - \gamma_2)}{(\mu\gamma_1 + \gamma_2)}\right]^2 \exp\left[2l(k_{\text{кр}}^2 - k_0^2\dot{\epsilon}\mu)^{0.5}\right]\right)}, \quad (2)$$

где γ_1, γ_2 – постоянные распространения для волноводов с воздушным и диэлектрическим заполнением, соответственно; l – длина образца в волноводе; μ – магнитная проницаемость образца (для немагнитных материалов $\mu = 1$); $\dot{\epsilon}$ – комплексная диэлектрическая проницаемость образца; k_0 – волновое число для вакуума; $k_{\text{кр}}$ – волновое число для критической длины волны в волноводе.

Для численного анализа анизотропии среды проводилось вращение образца (рис. 2) на угол Θ в плоскости, перпендикулярной распространению волны в волноводе. При этом не допускалось образование воздушных зазоров между стенками волновода и образцом.

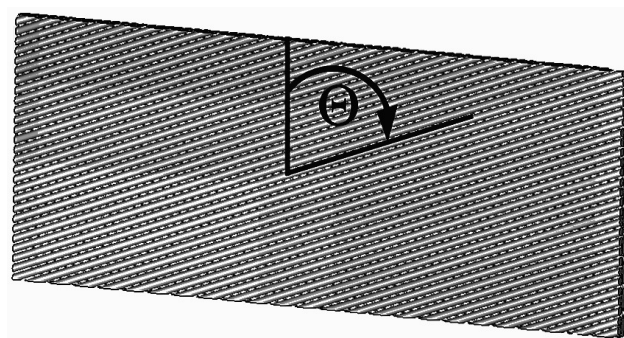


Рис. 2. Модель печатаемого образца при численном анализе анизотропии

При анализе анизотропии в силу симметрии структуры модель печатаемого образца вращалась в диапазоне углов Θ от 0° до 180° с шагом 5° , с одновременным варьированием степени заполнения.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ВЫЧИСЛЕНИЯ ДИЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Для анализа точности алгоритма [15] по обработке комплексных коэффициентов передачи и отражения в модель волновода был установлен тестовый образец, представляющий собой цельный параллелепипед с диэлектрической проницаемостью ϵ равной 2.6 и тангенсом угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\epsilon) = 0.02$. Результаты вычисления диэлектрических характеристик представлены на рис. 3 и 4.

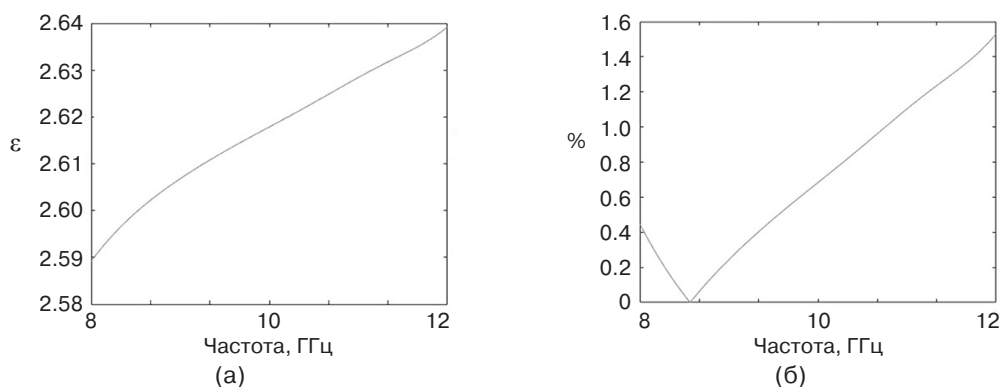


Рис. 3. Результаты вычисления диэлектрической проницаемости ϵ (а) и ошибка вычисления (б)

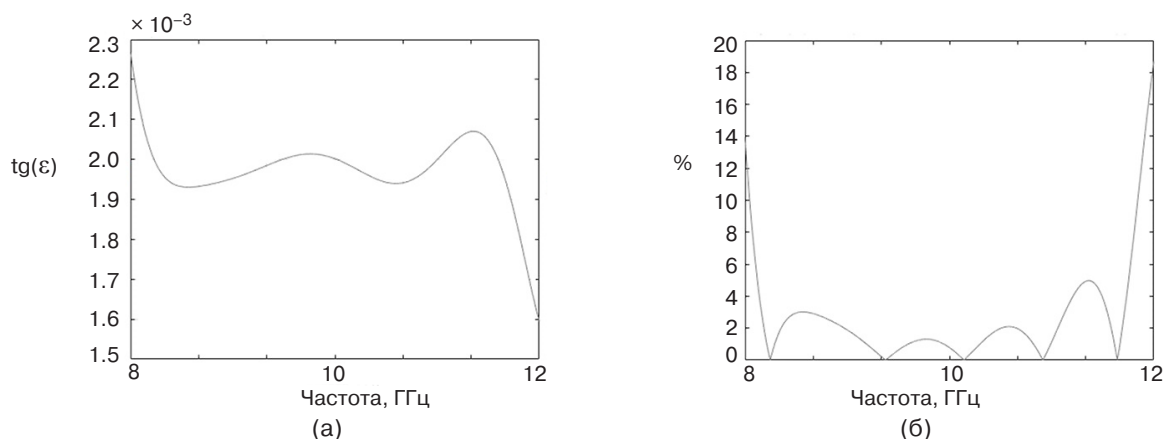


Рис. 4. Результаты вычисления тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\epsilon)$ (а) и ошибка вычисления (б)

Полученные результаты вычислений для тестового образца показали приемлемую сходимость. Так для реальной части диэлектрической проницаемости ошибка не превысила 1.6%, а для тангенса угла диэлектрических потерь ошибка возрастает на краях диапазона до 18%, однако в среднем не превышает 5%.

Зависимости вычисленных значений диэлектрических характеристик от степени заполнения диэлектриком и частоты электромагнитной волны представлены на рис. 5 и 6. При этом степень заполнения вычислялась как отношение объема печатаемого образца к объему цельного параллелепипеда.

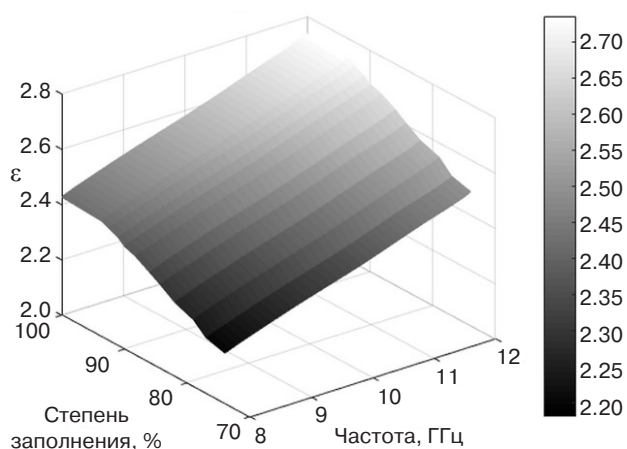


Рис. 5. Зависимость реальной части диэлектрической проницаемости ϵ от степени заполнения материалом и частоты электромагнитной волны

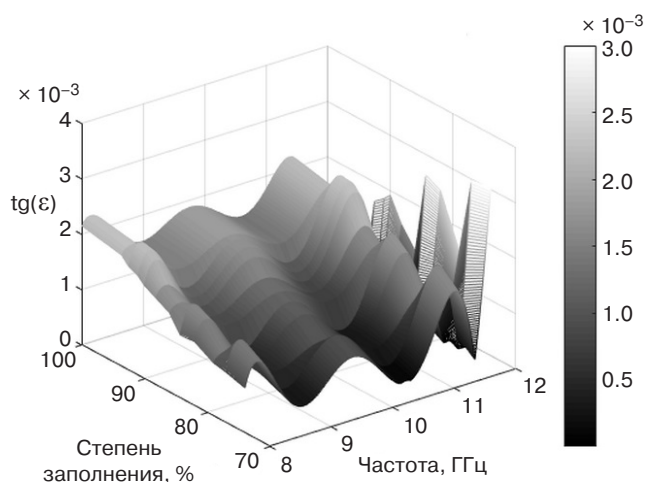


Рис. 6. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\epsilon)$ от степени заполнения диэлектриком и частоты электромагнитной волны

Из результатов вычисления диэлектрических характеристик следует, что с возрастанием степени заполнения печатаемого образца возрастают потери и диэлектрическая проницаемость. С увеличением частоты электромагнитного излучения также наблюдается рост диэлектрической проницаемости. Зависимость тангенса угла диэлектрических потерь от частоты имеет сложный волнообразный характер, причиной которого может являться ограниченная точность электродинамического моделирования, проявление которой так же отражено на рис. 4.

С целью уменьшения ошибки электродинамического моделирования было выполнено усреднение результатов по 1001 частотной точке. Результирующие выборки, состоящие из 13 значений, и их аппроксимирующие кривые представлены на рис. 7 и 8.

Аппроксимации были выполнены полиномами третьего порядка вида:

$$F(k_3) = a_1 k_3^3 + a_2 k_3^2 + a_3 k_3 + a_4, \quad (3)$$

где для диэлектрической проницаемости: k_3 – коэффициент заполнения в процентах; $a_1 = -1.34 \cdot 10^{-5}$;

$a_2 = 3.3 \cdot 10^{-3}$; $a_3 = -0.26 \cdot 10^{-2}$; $a_4 = 9$; а для тангенса угла диэлектрических потерь: $a_1 = 8.07 \cdot 10^{-8}$; $a_2 = 2.16 \cdot 10^{-5}$; $a_3 = -2 \cdot 10^{-3}$; $a_4 = 5.3 \cdot 10^{-2}$.

Результатами численного анализа анизотропии являются угловые диаграммы распределения реальной части диэлектрической проницаемости ϵ в декартовой системе координат при различных степенях заполнения (указано в процентах), представленные на рис. 9.

Из угловой диаграммы следует, что снижение степени заполнения диэлектрика напрямую отражается на степени анизотропии получаемого при печати полимера в плоскости расположения экструдированных слоев. При этом также увеличивается глубина экстремумов, наблюдаемых при углах 0° , 90° и 180° . Наличие этих экстремумов напрямую связано с тем, что силовые линии напряженности основного типа волны H_{10} располагаются перпендикулярно широкой стенке волновода и в ситуации, когда объемы воздушных зазоров между цилиндрами оказываются параллельными силовым линиям напряженности, наблюдается общее снижение диэлектрической проницаемости.

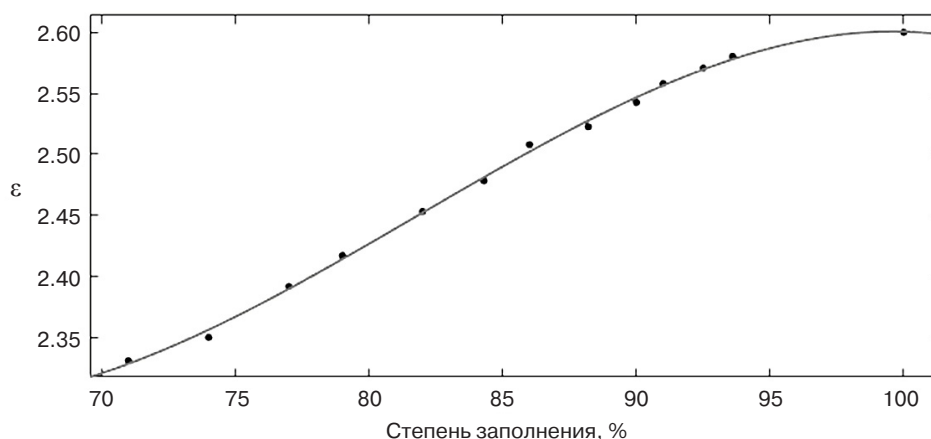


Рис. 7. Аппроксимация зависимости реальной части диэлектрической проницаемости ϵ

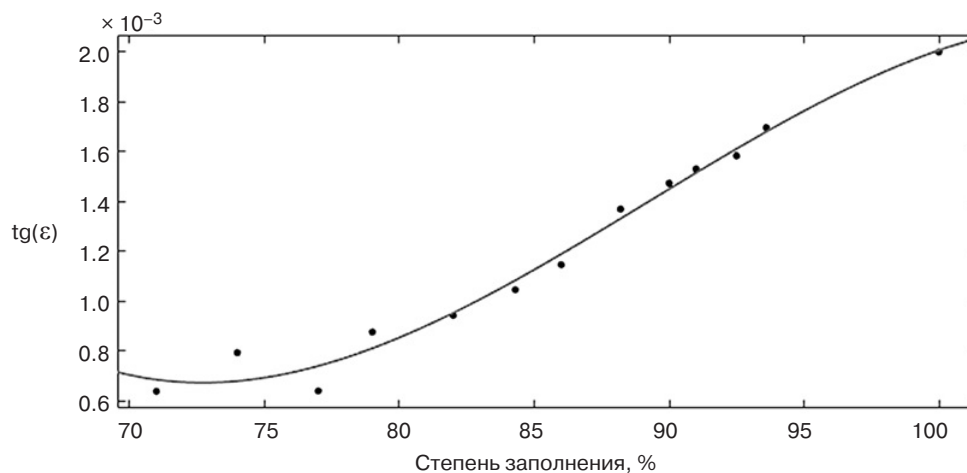


Рис. 8. Аппроксимация зависимости тангенса угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\epsilon)$

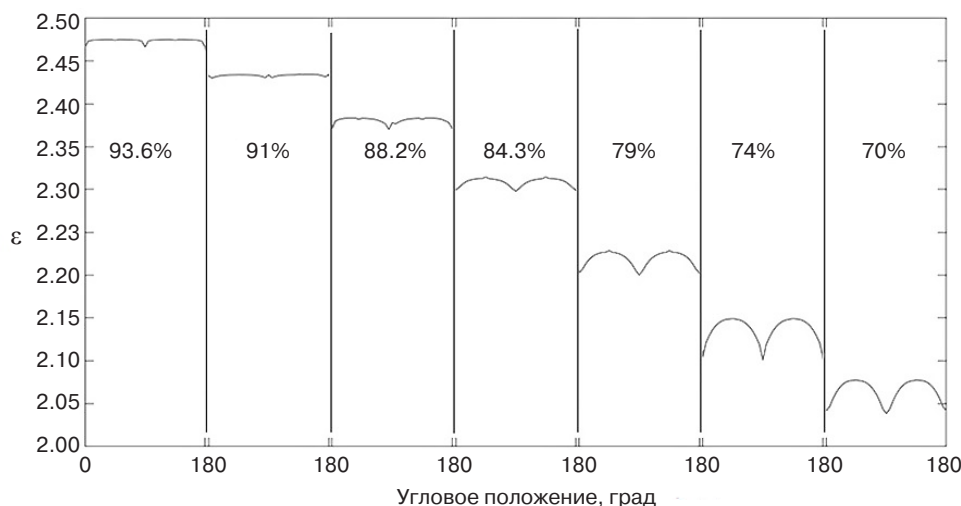


Рис. 9. Угловая зависимость диэлектрической проницаемости ϵ образца при различной степени заполнения диэлектриком

Ввиду того, что для характеристик диэлектрической проницаемости наблюдается симметрия в диапазоне углов от 0° до 90° и от 90° до 180° , для упрощения их аналитического описания в (1) и (2) следует ограничиться соответствующим сектором углов. Тогда выражения для реальной части диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь, входящие в (1), (2), в зависимости от степени заполнения (3) и угла поворота печатаемых слоев запишутся следующим образом:

$$\epsilon = F_\epsilon(k_3) \left[\left(-2.61 - 0.29 \cdot F_\epsilon(k_3)^2 \right) \cdot 10^{-6} \times \right. \\ \left. \times \Theta^2 + 2.5 \cdot 10^{-6} \cdot \Theta + 1 \right], \quad (4)$$

$$\text{tg}(\epsilon) = F_{\text{tg}(\epsilon)}(k_3) \times \\ \times \left[\left(39.4 \cdot 10^{-3} - 45 \cdot F_{\text{tg}(\epsilon)}(k_3) \right) \Theta + 1 \right], \quad (5)$$

где Θ — угол (в градусах) расположения печатаемых слоев лежит в интервале $(-45^\circ; 45^\circ)$, нулевым следует считать расположением печатаемых слоев под 45° относительно стенок волновода; k_3 — коэффициент заполнения в процентах, находится в интервале (60; 100).

Для печатаемого образца, состоящего из двух слоев перекрещенных цилиндров, воздушные объемы оказываются параллельными силовым линиям с периодом в 90° , что и подтверждается полученными результатами, приведенными на рис. 9. Увеличение глубины экстремумов при снижении степени заполнения связано с соответствующим увеличением воздушного пространства между цилиндрами в слое.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе проведена оценка влияния характеристик заполнения образца, печатаемого по технологии послойного наплавления полимерных нитей FFF, на диэлектрические характеристики печатаемой модели в X-диапазоне длин волн. Приведено описание модели, реализованной в системе автоматизированного проектирования, выполнена оценка точности вычисления диэлектрических характеристик по алгоритму, представленному в [15]. Результаты вычисления диэлектрических характеристик для тестового образца показали приемлемую сходимость: средняя ошибка для реальной части диэлектрической проницаемости не превысила 1,6%, а для тангенса угла диэлектрических потерь — 5%.

При оценке влияния степени заполнения диэлектриком в диапазоне от 70% до 100% на анализируемые характеристики получены аппроксимирующие зависимости для величин ϵ и $\text{tg}(\epsilon)$, из которых можно сделать вывод о характере их уменьшении при снижении степени заполнения. Из результатов численного анализа анизотропии образцов следует вывод, что снижение степени заполнения диэлектриком напрямую отражается на степени анизотропии получаемого при печати полимера в плоскости расположения экструдированных слоев. При этом помимо общего снижения диэлектрической проницаемости и потерь наблюдается увеличение глубины экстремумов, наблюдаемых при углах 0° , 90° и 180° .

Вклад авторов. Все авторы в равной степени внесли свой вклад в исследовательскую работу.

Authors' contribution. All authors equally contributed to the research work.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Elsallal M.W., Hood J., McMichael I. 3D Printed Material Characterization for Complex Phased and Metamaterials. *Microwave Journal*. 2016;59(10):20–34.
2. Zhang S., Cadman D., Whittow W. et al. 3D Antennas, Metamaterials, and Additive Manufacturing. In: *Proc. Conf. 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*. Guangzhou, China. May 19–22, 2019. N.Y.: IEEE; 2019. P. 1. <https://doi.org/10.1109/IEEE-IWS.2019.8803909>
3. Sadeqi A., Rezaei Nejad H., Oweyung R.E., Sonkusale S. Three dimensional printing of metamaterial embedded geometrical optics (MEGO). *Microsystems & Nanoengineering*. 2019;5:16. <https://doi.org/10.1038/s41378-019-0053-6>
4. Как мы напечатали антенну. URL: <https://3dtoday.ru/blogs/ilyavyazigin/3d-antenna>
5. Харалгин С.В., Куликов Г.В., Котельников А.Б., Снастин М.В., Добычина Е.М. Изготовление устройств СВЧ с применением технологии 3D-печати. *Российский технологический журнал*. 2019;7(1):80–101. <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101>
6. Демиденко Е.В., Кузьмин С.В., Кирик Д.И. 3D-печать антенно-фидерных устройств с использованием полимерных материалов. В сб.: *VII Всероссийская НТК «Электроника и микроэлектроника СВЧ»*: сб. тез. докл. (28–31 мая 2018 г., Санкт-Петербург) СПб.: СПбГЭТУ «ЛЭТИ»; 2018. С. 491.
7. Creedon D.L., Goryachev M., Kostylev N., Sercombe T.B., Tobar M. A 3D Printed Superconducting Aluminium Microwave Cavity. *Applied Physics Letters*. 2016;109(3). <https://doi.org/10.1063/1.4958684>
8. Zhang B., Linnér P., Karnfelt C., Tarn P.L., Södervall U., Zirath H. Attempt of the metallic 3D printing technology for millimeter-wave antenna implementations. In: *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. Nanjing, China, 2015, p. 1–3. <https://doi.org/10.1109/APMC.2015.7413011>
9. Zhang B. et al. Metallic 3-D Printed Antennas for Millimeter- and Submillimeter Wave Applications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016;6(4):592–600. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2016.2562508>
10. Honari M.M., Mirzavand R., Saghlatoon H. Mousavi P. Investigation of the 3D Printing Roughness Effect on the Performance of a Dielectric Rod Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2018;17(11):2075–2079. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2869580>
11. Moscato S. et al. Infill-Dependent 3-D-Printed Material Based on NinjaFlex Filament for Antenna Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2016;15:1506–1509. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2516101>
12. Ahmadloo M. Design and fabrication of geometrically complicated multiband microwave devices using a novel integrated 3D printing technique. In: *2013 IEEE 22nd Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems*. San Jose, CA, USA. 2013, p. 29–32. <https://doi.org/10.1109/EPEPS.2013.6703460>
13. Le T. et al. A novel strain sensor based on 3D printing technology and 3D antenna design. In: *2015 IEEE*
1. Elsallal M.W., Hood J., McMichael I. 3D Printed Material Characterization for Complex Phased and Metamaterials. *Microwave Journal*. 2016;59(10):20–34.
2. Zhang S., Cadman D., Whittow W. et al. 3D Antennas, Metamaterials, and Additive Manufacturing. In: *Proc. Conf. 2019 IEEE MTT-S International Wireless Symposium (IWS)*. Guangzhou, China. May 19–22, 2019. N.Y.: IEEE; 2019. P. 1. <https://doi.org/10.1109/IEEE-IWS.2019.8803909>
3. Sadeqi A., Rezaei Nejad H., Oweyung R.E., Sonkusale S. Three dimensional printing of metamaterial embedded geometrical optics (MEGO). *Microsystems & Nanoengineering*. 2019;5:16. <https://doi.org/10.1038/s41378-019-0053-6>
4. Kak my napechatali antenu (How have we printed the antenna) URL: <https://3dtoday.ru/blogs/ilyavyazigin/3d-antenna>
5. 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. *Rossiiskii tekhnologicheskii zhurnal = Russian Technological Journal*. 2019;7(1):80–101 (in Russ.) <https://doi.org/10.32362/2500-316X-2019-7-1-80-101>
6. Demidenko E.V., Kuz'min S.V., Kirik D.I. 3D printing of antenna-feeder devices using polymer materials. In: *VII Vserossiiskaya NTK "Elektronika i mikroelektronika SVCh," sb. tez. dokl. (VII All-Russian Scientific and Technical Conference "Microwave Electronics and Microelectronics," Collection of Abstracts)*. Saint Petersburg: Saint-Petersburg Electrotechnical University; 2018, p. 491. (in Russ.).
7. Creedon D.L., Goryachev M., Kostylev N., Sercombe T.B., Tobar M. A 3D Printed Superconducting Aluminium Microwave Cavity. *Applied Physics Letters*. 2016;109(3). <https://doi.org/10.1063/1.4958684>
8. Zhang B., Linnér P., Karnfelt C., Tarn P.L., Södervall U., Zirath H. Attempt of the metallic 3D printing technology for millimeter-wave antenna implementations. In: *2015 Asia-Pacific Microwave Conference (APMC)*. Nanjing, China, 2015, p. 1–3. <https://doi.org/10.1109/APMC.2015.7413011>
9. Zhang B. et al. Metallic 3-D Printed Antennas for Millimeter- and Submillimeter Wave Applications. *IEEE Transactions on Terahertz Science and Technology*. 2016;6(4):592–600. <https://doi.org/10.1109/TTHZ.2016.2562508>
10. Honari M.M., Mirzavand R., Saghlatoon H. Mousavi P. Investigation of the 3D Printing Roughness Effect on the Performance of a Dielectric Rod Antenna. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2018;17(11):2075–2079. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2018.2869580>
11. Moscato S. et al. Infill-Dependent 3-D-Printed Material Based on NinjaFlex Filament for Antenna Applications. *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. 2016;15:1506–1509. <https://doi.org/10.1109/LAWP.2016.2516101>
12. Ahmadloo M. Design and fabrication of geometrically complicated multiband microwave devices using a novel integrated 3D printing technique. In: *2013 IEEE*

- 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC). San Diego, CA, USA, 2015, p. 981–986. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2015.7159714>
14. Раков А.В., Думчиков К.А., Жуков В.В., Ухандеев В.И., Колединцева М.Ю. Диэлектрические свойства короноэлектретов на основе полилактида. В сб.: *XXIV Международная конференция «Электромагнитное поле и материалы (Фундаментальные физические исследования)»*, сб. тез. докл. (18–19 ноября 2016 г., Москва). М.: НИУ «МЭИ»; 2016. С. 617.
15. Пархоменко М.П., Каленов Д.С., Еремин И.С. и др. Повышение точности измерений комплексных диэлектрической и магнитной проницаемостей в сверхвысокочастотном диапазоне волноводным методом. *Радиотехника и электроника*. 2020;65(8):764–768. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2018.9.6>
- 22nd Conference on Electrical Performance of Electronic Packaging and Systems. San Jose, CA, USA. 2013, p. 29–32. <https://doi.org/10.1109/EPEPS.2013.6703460>
13. Le T. *et al.* A novel strain sensor based on 3D printing technology and 3D antenna design. In: *2015 IEEE 65th Electronic Components and Technology Conference (ECTC)*. San Diego, CA, USA, 2015, p. 981–986. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2015.7159714>
14. Rakov A.V., Dumchikov K.A., Zhukov V.V., Ukhandeev V.I., Koledintseva M.Yu. Dielectric properties of coronobacter based on polylactide. In: *XXIV Mezhdunarodnaya konferentsiya “Elektromagnitnoe pole i materialy (Fundamental’nye fizicheskie issledovaniya)”*, sb. tez. dokl. (*Proceedings of the XXIV International Conference Electromagnetic Field and Materials (Fundamental Physical Research)*). Moscow: MPEI; 2016, p. 617. (in Russ.).
15. Parkhomenko M.P., Kalenov D.S., Eremina I.S., Fedoseeva N.A., Kolesnikova V.M., Dyakonova O.A. Improving the accuracy in measuring the complex dielectric and magnetic permeabilities in the microwave range using the waveguide method. *Journal of Communications Technology and Electronics*. 2020;65(8):894–898. <https://doi.org/10.1134/S1064226920080100> [Parkhomenko M.P., Kalenov D.S., Eremin I.S., Fedoseev N.A., Kolesnikova V.M., Barinov Yu.L. Povyshenie tochnosti izmerenii kompleksnykh dielektricheskoi i magnitnoi pronitsaemosti v sverkhvysokochastotnom diapazone volnovodnym metodom. *Radiotekhnika i elektronika = Journal of Communications Technology and Electronics*. 2020;65(8):746–768 (in Russ.).]

Об авторах

Харалгин Сергей Владимирович, инженер-электроник 1 категории АО «ЦНИРТИ им. Академика А.И. Берга» (107078, Россия, Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9). E-mail: hsvl92@mail.ru.

Войтович Максим Иванович, начальник лаборатории АО «ЦНИРТИ имени академика А.И. Берга» (107078, Россия, Москва, ул. Новая Басманная, д. 20, стр. 9). E-mail: maksimvoytovich@gmail.com.

About the authors

Sergey V. Kharalgin, Electronics Engineer of the 1st category, Academician A.I. Berg Central Radio-Research Institute (20, Novaya Basmannaya ul., Moscow, 107078 Russia). E-mail: hsvl92@mail.ru.

Maksim I. Voytovich, Head of Laboratory, Academician A.I. Berg Central Radio-Research Institute (20, Novaya Basmannaya ul., Moscow, 107078 Russia). E-mail: maksimvoytovich@gmail.com.