

DOI: <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.2>

УДК: УДК 537.226.2

ИССЛЕДОВАНИЯ ЭЛЕКТРОДИНАМИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ PET-G ФИЛАМЕНТОВ ДЛЯ 3D-ПЕЧАТИ

А.В. Азаров¹, А.А. Политико², С.С. Рожков¹, В.А. Дьяконов²

¹Акционерное общество «Научно-исследовательский институт «Вектор»,
197022, г. Санкт-Петербург, ул. Академика Павлова, д. 14, литера А

²Акционерное общество «Композит»,
141070, Московская область, г. Королёв, ул. Пионерская, д. 4

Статья поступила в редакцию 27 мая 2026 г.

Аннотация. Технология 3Д-печати применяется при производстве единичных лабораторных образцов и габаритных макетов изделий, в том числе в радиоэлектронной промышленности. Для применения материалов в радиотехнике необходимо обладать полной информацией о его физических свойствах для возможности выполнения точного расчёта в специализированных программных средах электродинамического моделирования. Современные производители филаментов (прутков) пластика для 3Д-печати, как правило, не предоставляют сведения об электродинамических параметрах материалов. Связано это с отсутствием у производителей возможности выполнить исследования комплексной диэлектрической проницаемости материалов, а также со сложностями достоверно интерпретировать результаты измерений. Целью данной работы стали исследования диэлектрической проницаемости и тангенса угла диэлектрических потерь пластиков семейства PET-G различных окрасов от ведущих российских производителей филаментов для 3Д-печати. В работе представлены результаты экспериментов по измерению комплексной диэлектрической проницаемости филаментов в сверхширокой полосе частот

от 3 до 49 ГГц, а также представлены результаты сравнительного анализа полученных данных. Полученные результаты исследований легли в основу формирования базы данных об электродинамических параметрах отечественных филаментов и дополняют цикл статей об измерении диэлектрических свойств различных материалов для 3Д-печати.

Ключевые слова: 3D-печать, аддитивные технологии, электродинамические параметры материалов, диэлектрическая проницаемость, тангенс угла диэлектрических потерь, полиэтилентерефталат-гликоль, PET-G.

Автор для переписки: Рожков Сергей Сергеевич, SSR.kgd@mail.ru

Введение

На сегодняшний день в России зарегистрированы порядка 30 производителей прутков для 3Д-печати. Наибольшая доля всего отечественного производимого филамента приходится на 3-5 производителей из Москвы, Зеленограда, Томска и др.

В продуктовых линейках филаментов диаметром 1,75 мм у производителей представлен широкий перечень материалов от однородных пластиков (PLA, PET-G, ABS, SBS, ASA и т.д.) до сложных композитов с вкраплениями в пластики мелких фракций углеродного волокна, керамики, стекловолокна, древесины и различных минералов. Все виды пластиков обладают особыми химическими и физическими свойствами. Это позволяет решать специальные задачи в различных средах, в том числе агрессивных, а также требует индивидуального подхода к подбору параметров печати и настройке профиля печати.

PET-G представляет собой модифицированный полиэтилентерефталат (PET) и широко применяется для изготовления деталей механизмов, корпусов, кронштейнов, обтекателей и т. д. Полиэтилентерефталат-гликоль является гипоаллергенным и абсолютно безопасным для человека при постоянном контакте, поэтому преимущественно из этого типа пластика делают тару для бутилированной воды, детские игрушки, инструментарий для пищевой промышленности и изделия медицинского назначения.

Механические свойства пластика PET-G, обеспечивающие легкость обработки и высокую прочность, в купе с невысокой стоимостью и доступностью делают его незаменимым в рамках быстрого прототипирования лабораторных макетных образцов изделий в радиотехнической отрасли [1,2]. Однако в радиотехнике помимо механических свойств необходимо учитывать электродинамические параметры материалов, чтобы учесть влияние среды на преломление, отражение, поглощение и распространение электромагнитных волн [3] при компьютерном электродинамическом моделировании сложных СВЧ устройств.

ГОСТы на филаменты для аддитивных технологий [4,5] определяют ряд свойств материалов, но на сегодняшний день не все производители прикладывают сопроводительную документацию и технические условия (ТУ), регламентирующие свойства материалов. Связано это с тем, что на производстве, как правило, отсутствует возможность проведения измерений характеристик филаментов, а также довольно сложно обеспечивать требуемые параметры пластиков от партии к партии и контролировать допуски отклонений от норм. Ещё реже в ТУ на материалы есть информация о диэлектрических свойствах материалов.

Целью настоящей статьи является исследование электродинамических параметров (тангенса угла диэлектрических потерь $\tan(\delta)$ и диэлектрической проницаемости ϵ) одного из самых востребованных на сегодняшний день в аддитивных технологиях 3Д-печати пластика – полиэтилентерефталат-гликоля PET-G. Также результаты исследований в рамках выполненной работы лягут в основу формирования базы данных с диэлектрическими свойствами пластиков для 3Д-печати разных окрасов от разных производителей.

Для поддержания интереса среди научного сообщества к теме исследований, затронутой в статье, можно обратиться к авторам^{1,3} с запросом на получение результатов измерений (графиков частотных зависимостей действительной ϵ' и мнимой ϵ'' частей диэлектрической проницаемости), а также с запросом

на получение профиля печати для 3Д-принтера FBGhost 6 и образцов материала, имеющихся в наличии на момент обращения.

1. Описание оборудования 3Д-печати

На сегодняшний день для быстрого прототипирования кронштейнов, креплений, конструктивных элементов, технологической оснастки в рамках производства штучных изделий (лабораторных образцов и макетов) среди всех типов технологий 3D-печати [6] наиболее выгодна и доступна печать на аддитивном оборудовании с использованием технологии послойного наплавления материала fused deposition modeling (FDM). В последние годы такая технология является наиболее популярной в связи с низкой стоимостью оборудования печати и материалов (филамента). Также при необходимости пластиковую заготовку впоследствии можно металлизировать распылением токопроводящей краски, методом гальванизации химической металлизации и др.

Во время 3Д-печати был использован наиболее доступный и простой в эксплуатации 3Д принтер «FlyingBear Ghost 6» производства КНР. Он представлен на рисунке 1, а его основные характеристики приведены в таблице 1.



Рис. 1. 3Д-принтер FlyingBear Ghost 6.

FlyingBear Ghost 6 представляет собой 3Д-принтер, построенный по классической картезианской кинематике и использующей декартовую систему координат XYZ, в которой задаются координаты движения печатающей головки принтера. В основе FBGhost 6 лежит кинематическая схема H-bot, в которой используются два привода осей X и Y соединённых единым ремнём. Механическая часть построена на цилиндрических 8 мм направляющих с подшипниками линейного перемещения, также имеется подогреваемый стол, обдув модели и вентилятор термокамеры. Комплектуется FBGhost 6 защитным колпаком и необходимым инструментом для быстрого начала печати. К достоинствам выбранного принтера можно отнести низкую стоимость, полноту базового комплекта, закрытую термокамеру с защитным колпаком.

Таблица 1. Основные характеристики 3Д-принтера FlyingBear Ghost 6.

Наименование параметра	Значение параметра
Технология 3Д-печати	FDM
Тип корпуса	Закрытый
Количество экструдеров	1
Диаметр сопла, мм	0,4
Максимальная температура экструдера, °C	260
Максимальная температура стола, °C	110
Область печати, XYZ (мм, мм, мм)	210 × 210 × 255
Максимальная скорость печати, мм/с	150
Толщина слоя печати, мм	0,05-0,3
Точность позиционирования по осям XY, мм	0,01

Экспериментальные исследования электродинамических параметров материалов были проведены из линейки пластиковых прутков PET-G различных производителей и цветов. Обусловлено это тем, что в составе пластиков могут быть использованы различные включения красящего пигмента, влияющие на диэлектрические характеристики материала.

Для проведения замеров диэлектрических свойств были напечатаны при помощи аддитивной технологии FDM-печати пластиковые заготовки в виде квадратных пластин размерами 190 × 190 мм и толщиной 0,6...0,7 мм (рисунок 2).

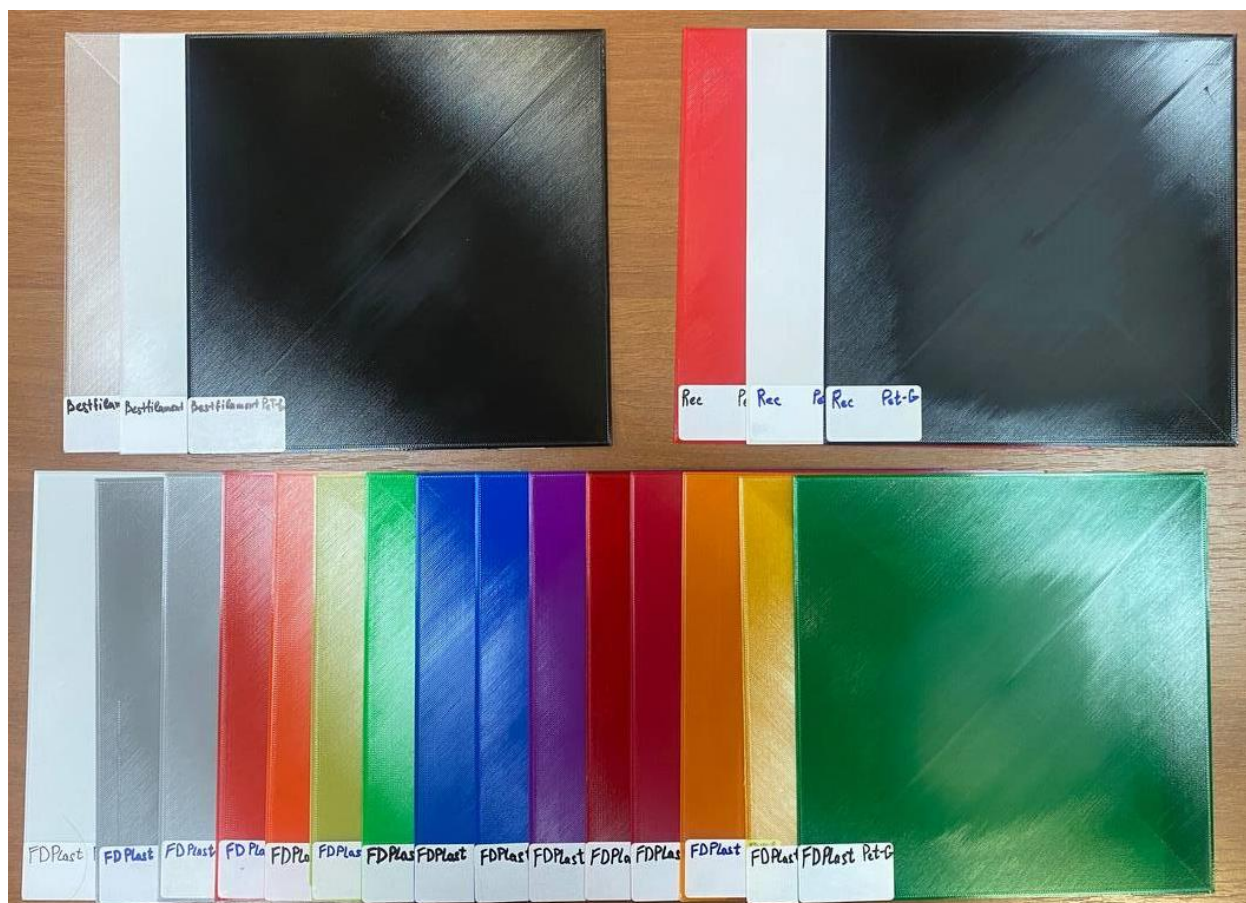


Рис. 2. Заготовки пластиков PET-G для проведения измерений частотных зависимостей комплексной диэлектрической проницаемости методом свободного пространства.

Параметры печати, используемые при изготовлении образцов PET-G пластика, приведены в таблице 2.

Таблица 2. Параметры печати для образцов пластика PET-G.

Наименование параметра	Значение параметра
Температура сопла, °C	245
Температура стола, °C	70
Скорость перемещения холостого хода, мм/с	150
Скорость печати первого слоя, мм/с	40
Скорость печати, мм/с	80
Толщина первого слоя, мм	0,2
Толщина печати слоёв, мм	0,2
Обдув модели, %	100
Длина ретракта, мм	1,2
Программное усиление адгезии	Юбка
Аппаратное усиление адгезии	Клей The 3D

2. Результаты экспериментальных исследований диэлектрических характеристик образцов пластика PET-G

Для определения электродинамических параметров изготовленных образцов пластика PET-G были проведены измерения их комплексной диэлектрической проницаемости в сверхширокой полосе частот СВЧ диапазона от 3 до 49 ГГц. Измерения диэлектрических характеристик проведены методом свободного пространства [7] с использованием специализированного экспериментального стенда, реализованного на базе векторного анализатора цепей типа R&S ZVA50 и широкополосных рупорных антенн с установленными фазокорректирующими линзами. С целью снижения погрешностей измерений электродинамических параметров материалов применялась временная селекция мешающих переотражений в СВЧ тракте и цифровая компенсация фоновых помех с математическим алгоритмом подавления эффекта Гиббса. Более подробное описание применяемого метода измерений СВЧ свойств материалов, а также используемой экспериментальной установки изложено в [8-11].

Результаты измерений действительной части диэлектрической проницаемости ϵ' и тангенса угла диэлектрических потерь $tg(\delta) = \epsilon''/\epsilon'$ образцов пластика PET-G от разных производителей (Bestfilament, REC и FDP), применяемого в аддитивной технологии 3D-печати, в диапазоне частот от 3 до 49 ГГц представлены на рисунках 3, 4 и 5.

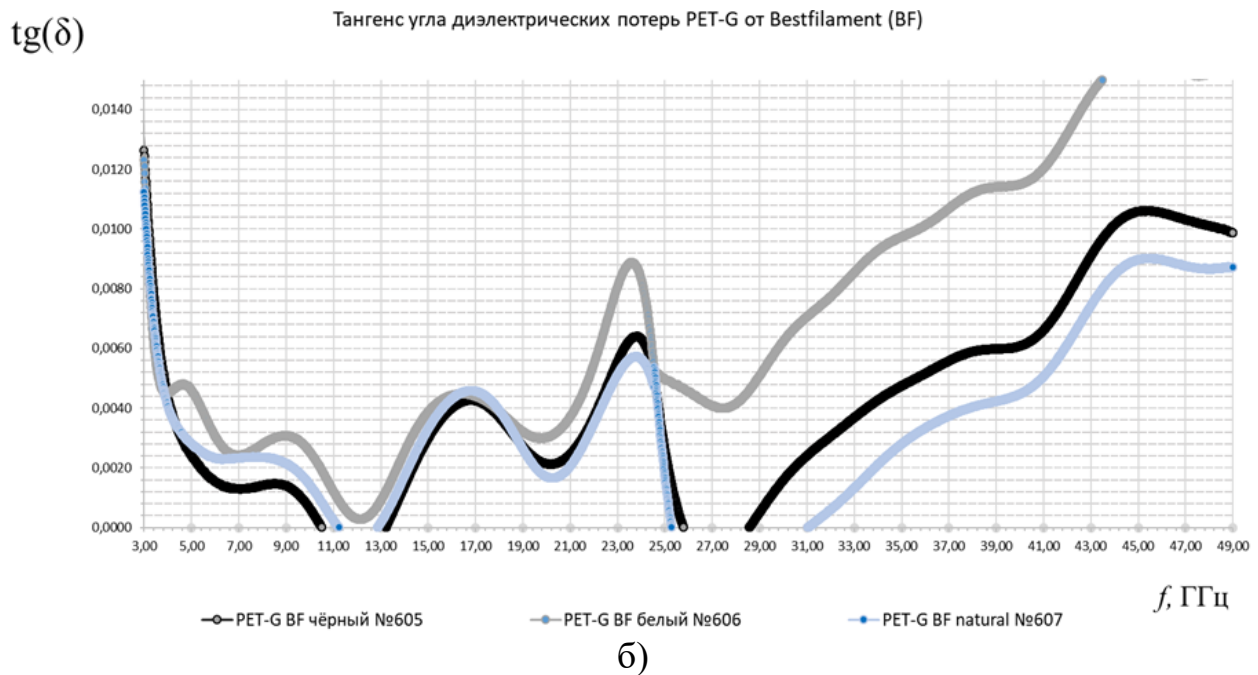
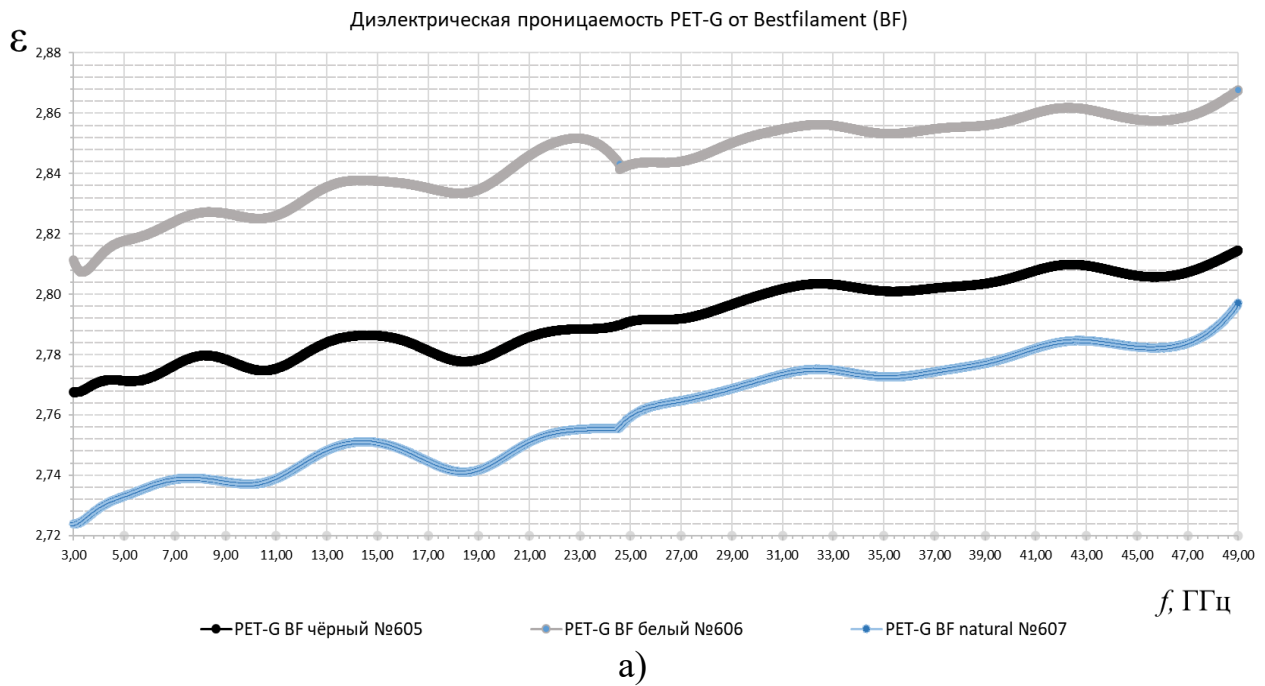


Рис. 3. Частотные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) пластиков PET-G от Bestfilament (BF).

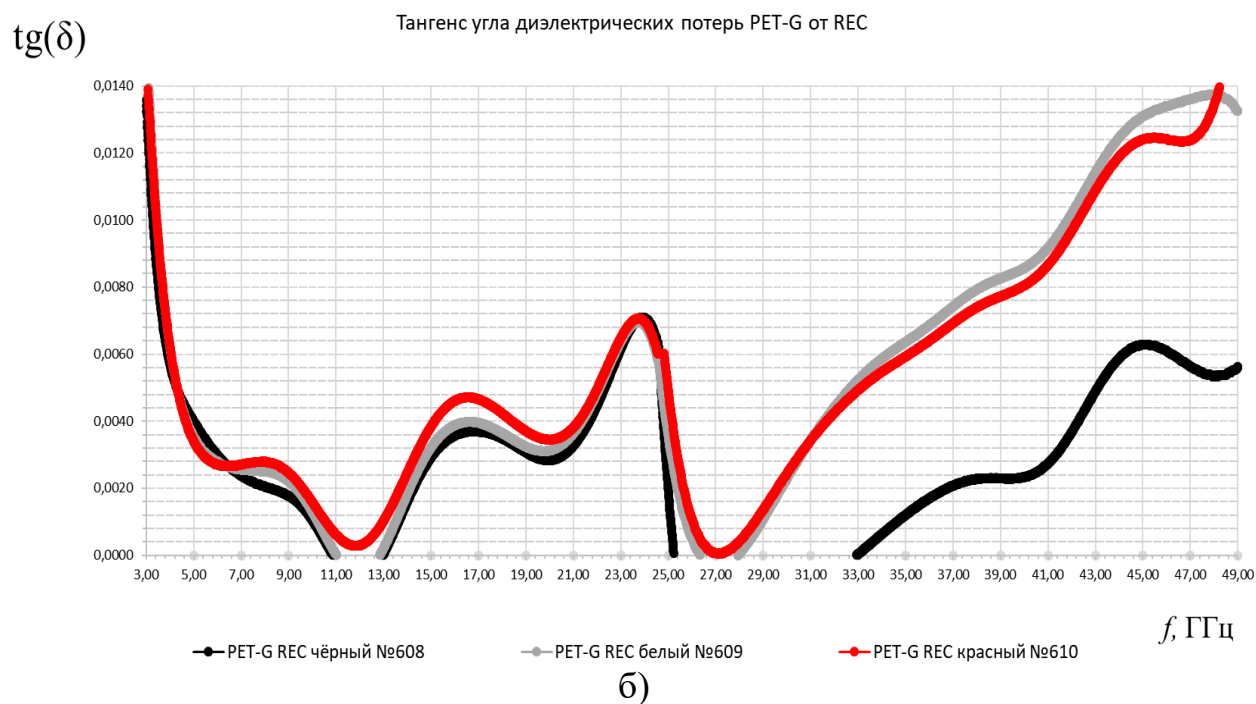
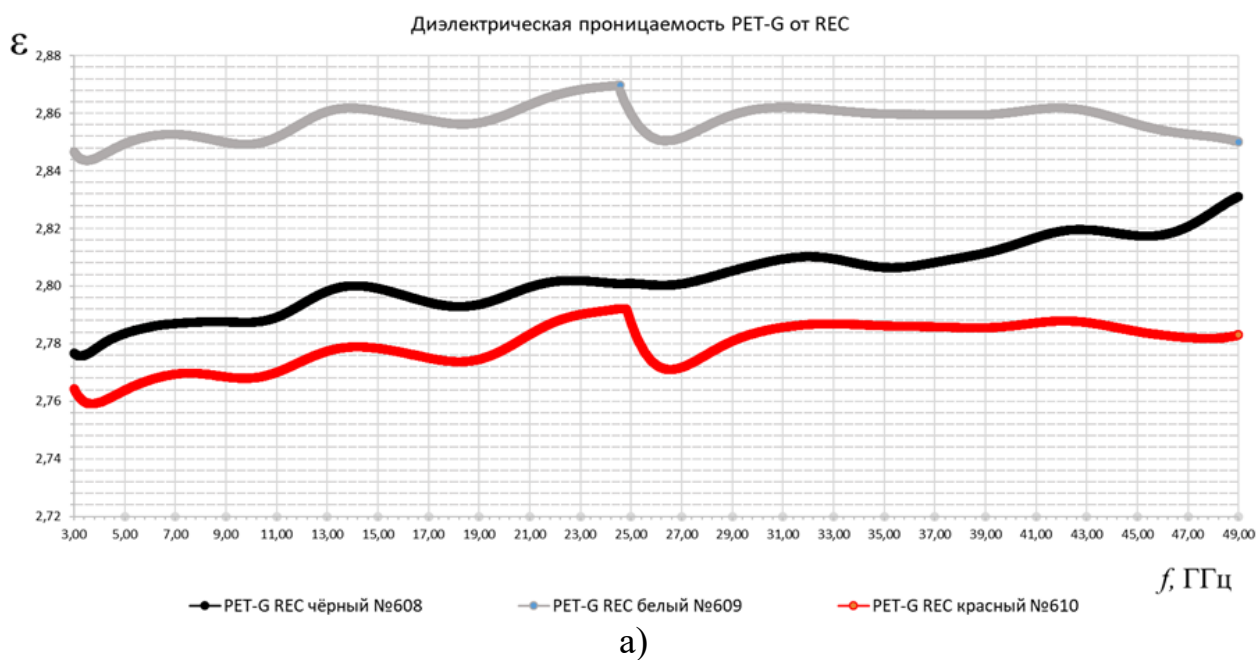


Рис. 4. Частотные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) пластиков PET-G от REC.

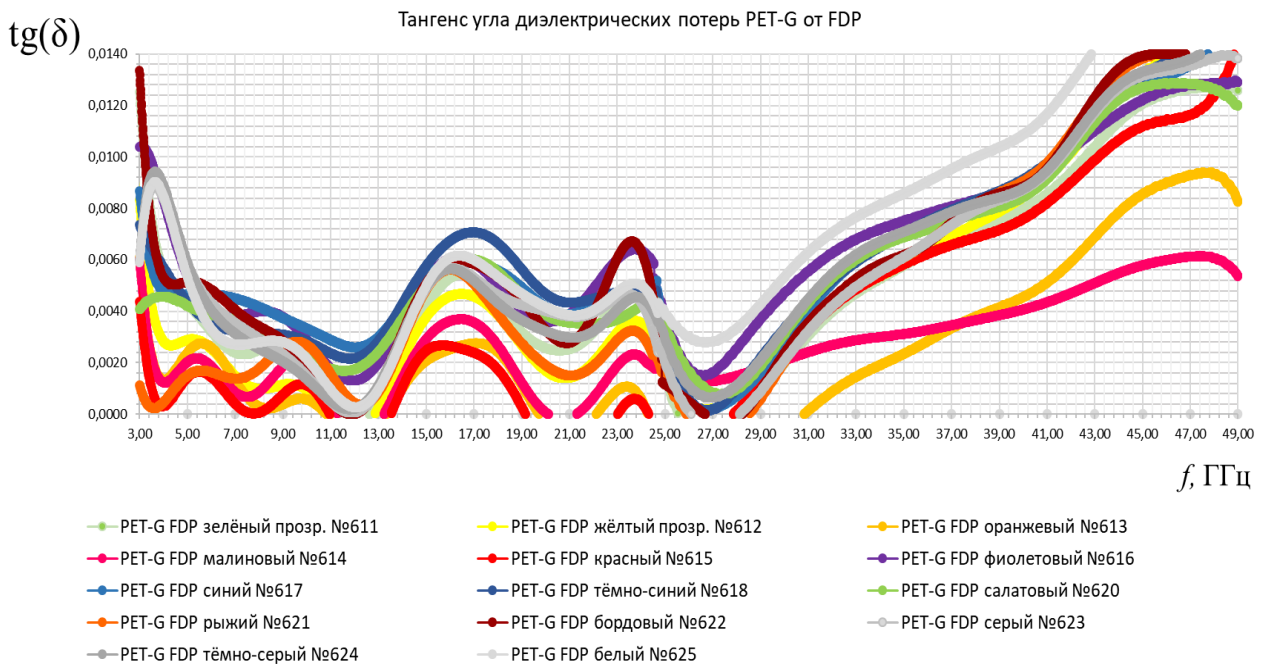
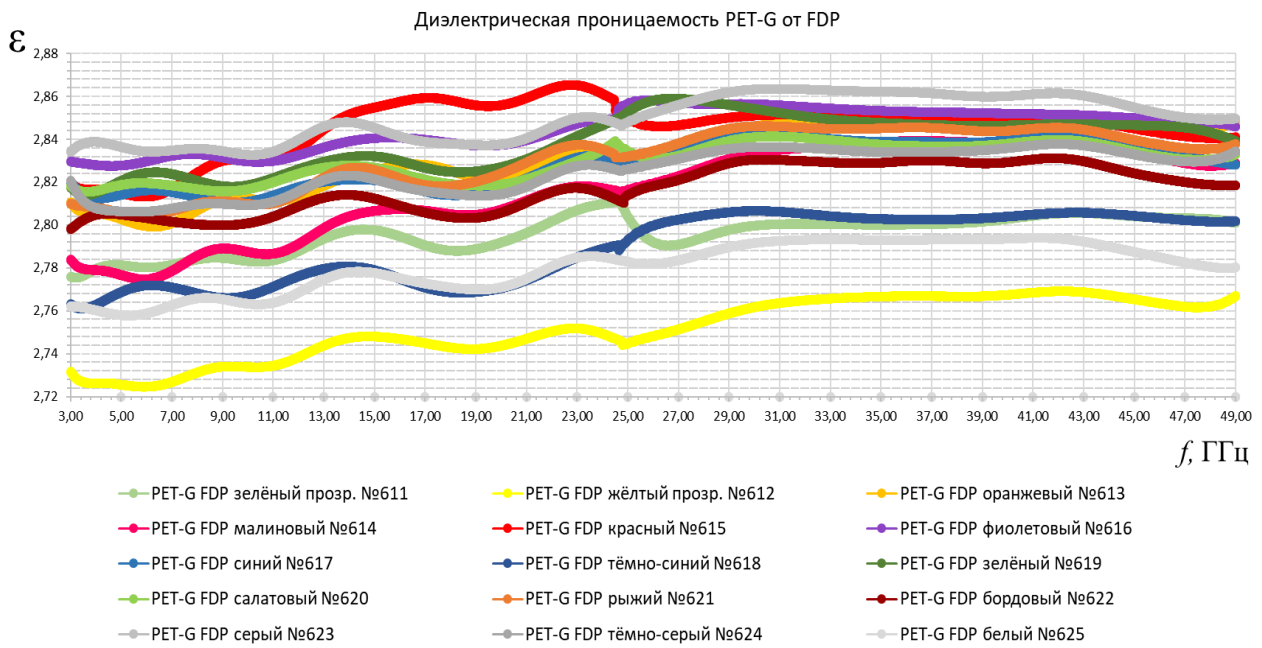


Рис. 5. Частотные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости (а) и тангенса угла диэлектрических потерь (б) пластиков PET-G от FDP.

Экспериментальные данные, полученные в результате исследований и оформленные в виде графиков зависимостей диэлектрических параметров ϵ' и $\text{tg}(\delta)$ от частоты, позволяют количественно оценить в сверхширокой полосе параметры материалов, применяемых в аддитивной технологии 3D-печати FDM.

По графикам видно, что в диапазоне 3,0...49,0 ГГц с ростом частоты диэлектрическая проницаемость PET-G пластика растёт и составляет $\epsilon = 2,72...2,88$. Тангенс угла диэлектрических потерь $\text{tg}(\delta)$ во всём рассматриваемом диапазоне частот не превышает 0,014.

Также наблюдается, что параметр ϵ' в некоторой степени чувствителен к красящему пигменту, добавляемому в PET-G пластики производителями. Наличие красителей влияет на значения действительной части диэлектрической проницаемости в пределах $\pm 0,08$. Значения $\text{tg}(\delta)$ для образцов PET-G пластика изменяются незначительно (рисунки 3б, 4б и 5б) и наблюдаются области, где $\text{tg}(\delta)$ принимает значения около минус 0,001, что не имеет физического смысла. Вероятно, это связано с некоторой неплоскостностью исследуемых образцов материалов, из-за чего могут возникать воздушные зазоры между поверхностями образца и измерительной диафрагмой, входящей в состав экспериментального стенда, что в результате приводит к появлению погрешностей и ошибок измерений ϵ'' [3].

Для удобства сравнения характеристик PET-G пластиков одинаковых цветов от разных производителей электродинамические параметры пластиков белого цвета представлены на рисунках 6 и 7.

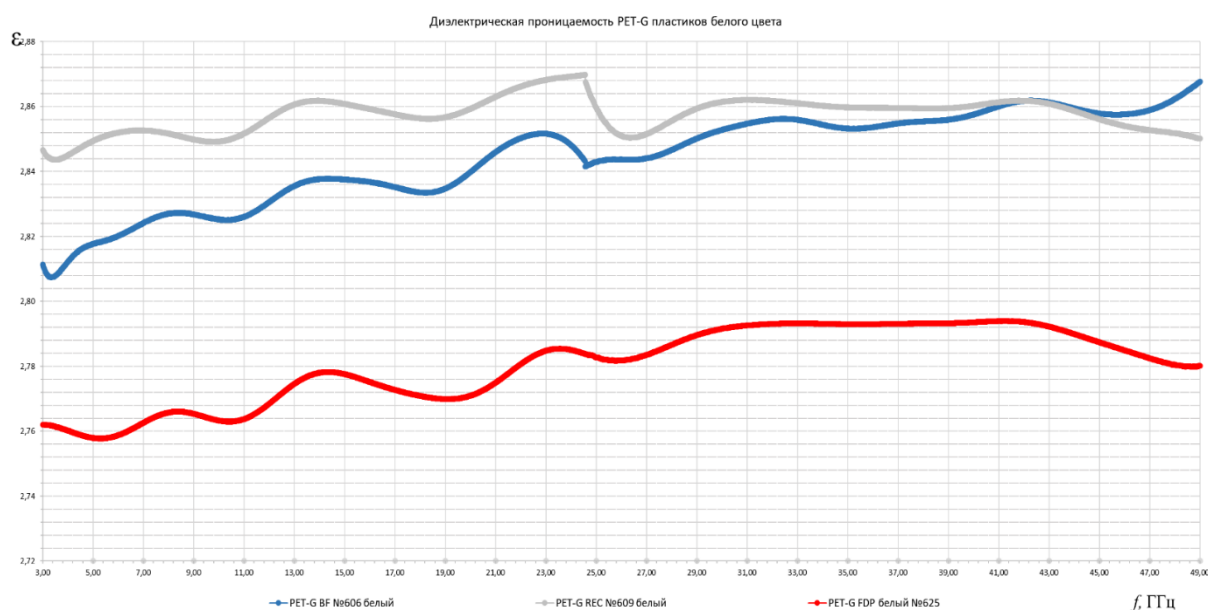


Рис. 6. Частотные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости образцов пластиков PET-G одного цвета (белый) от производителей BF, REC и FDP.

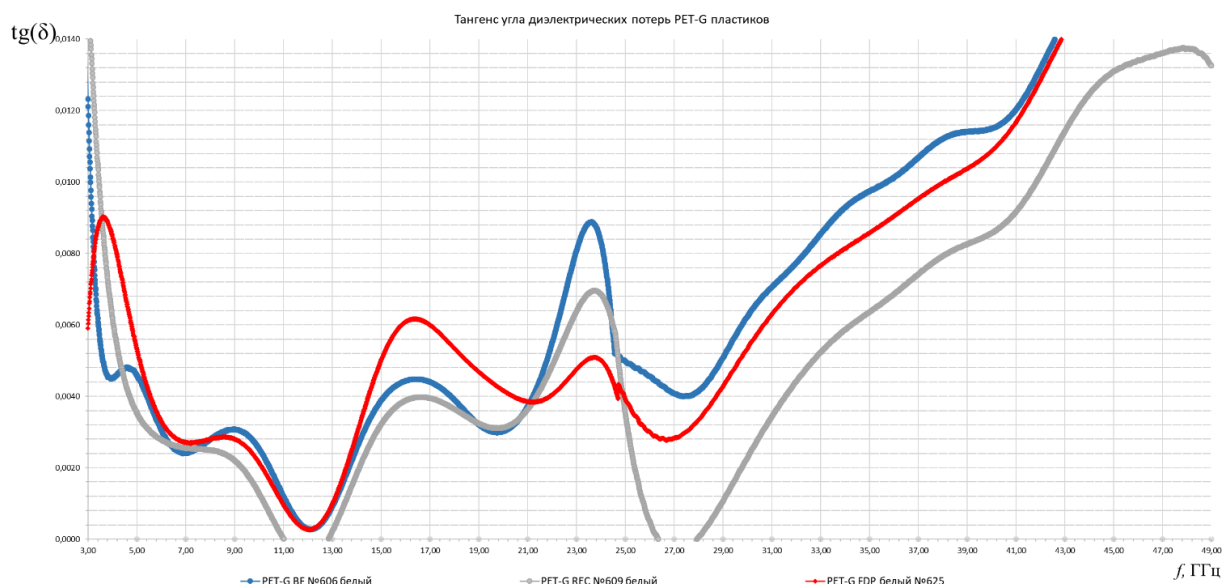


Рис. 7. Частотные зависимости действительной части диэлектрической проницаемости образцов пластиков PET-G одного цвета (белый) от производителей BF, REC и FDP.

По графикам частотных зависимостей ϵ на рисунке 6 видно, что PET-G с белым красящим пигментом (верхние два графика) и чёрным красящим пигментом (нижние два графика) от производителей BF и REC имеют идентичный характер поведения, но отличаются на 0,010...0,035 в зависимости от исследуемого частотного диапазона. На графиках частотных зависимостей $\text{tg}(\delta)$ (рисунок 7) также наблюдается идентичность характера поведения, а аппроксимированные значения тангенса угла диэлектрических потерь лежат для всех пластиков от трёх производителей в диапазоне 0,002...0,012. Всё это может быть обусловлено несколькими факторами:

1) Качество исходных гранул PET-G сырья, которые поступают на завод для дальнейшего производства филамента для 3D-печати. Так, например, у производителей REC и BF гранулы идентичны друг к другу, а у FDP — отличаются.

2) Метод производства филамента, а именно экструдирование пластикового прутка может иметь температурную девиацию от производителя к производителю, что также будет влиять на электродинамические параметры выходного филамента.

3) Различия в химическом составе красящих пигментов, применяемых на заводах-производителях, и процентное соотношение количества цветного пигмента к «чистому» материалу.

Практически на всех графиках на частотах порядка 24,0...25,0 ГГц наблюдается резкий переход исследуемых зависимостей образцов, обусловленный спецификой методики измерений. Именно в этом диапазоне производилась «сшивка» частотных зависимостей ε , полученных с использованием низкочастотного сегмента (3-25 ГГц) и высокочастотного сегмента (24-49 ГГц) измерительного стенда.

Заключение

В представленной работе приведены результаты экспериментальных исследований комплексной диэлектрической проницаемости пластиков семейства PET-G трёх отечественных производителей филаментов для 3D печати различных окрасов. Измерения ε' и ε'' проводились в диапазоне от 3,0 до 49,0 ГГц методом свободного пространства. С целью снижения погрешностей измерений электродинамических параметров применялась временная селекция мешающих переотражений в СВЧ тракте и цифровая компенсации фоновых помех. В соответствии с применяемой методикой погрешности измерений материальных параметров составляют менее 10 % $|\varepsilon|$.

Результаты исследования подтвердили, что PET-G пластик для 3D-печати является диэлектриком ($\text{tg}(\delta) \ll 1$) со значениями диэлектрической проницаемости, варьирующимися в интервале от 2,72 до 2,88, в зависимости от частоты. Тангенс угла диэлектрических потерь образцов PET-G пластика в низкочастотной области (до 30 ГГц) рассматриваемого диапазона практически не зависит от красящего пигмента, а в высокочастотной (30...49 ГГц) расхождение может достигать $\pm 0,008$. При этом $\text{tg}(\delta)$ не превышает значения 0,015.

Установлено различие ε (до 0,16) PET-G пластика в зависимости от оттенка красящего пигмента у филаментов от одного производителя.

Установлена высокая сходимость ε (не более 0,035) образцов PET-G пластика между производителями BestFilament и REC одного цвета. Установлено значимое различие ε (до 0,08) образцов PET-G пластика того же цвета у производителя FDP.

При этом установлена высокая степень корреляции в характере поведения электродинамических параметров образцов пластика у всех производителей.

Представленные результаты исследований стали основой для формирования базы данных об электродинамических параметрах отечественных филаментов, а текущая работа является частью цикла статей об измерении диэлектрических свойств различных материалов для 3D-печати.

Благодарности

Авторы работы выражают благодарность за сотрудничество и помощь в проведении исследований производителям материалов для 3D-печати:

1. ООО «РЭК» (REC);
2. ИП Журавлев Денис Владимирович (Bestfilament).

Литература

1. Харалгин С.В. и др. Прототипирование СВЧ-устройств с заданными электродинамическими характеристиками по технологии аддитивной 3D-печати // Российский технологический журнал, 2019, т. 7(1), с. 80-101.
2. Тюлин А.Е. и др. Применение 3D-печати для изготовления элементов радиоэлектронной аппаратуры космического назначения // Ракетно-космическое приборостроение и информационные системы, 2022, т. 9(3), с. 76-90.
3. Азаров А.В., Дьяконов В.А., Политико А.А., Рожков С.С. Исследование электродинамических параметров материалов аддитивной технологии 3D-печати // Тезисы докладов III Международной межведомственной научно-технической конференции «Космические технологии – 2025», Москва, 2025, с. 14-30.
4. ГОСТ Р 59100-2020. Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие технические требования – https://rosogosts.ru/file/gost/83/080/gost_r_59100-2020.pdf (дата обращения: 28.11.2024).

5. ГОСТ Р 59101-2020. Пластмассы. Филаменты для аддитивных технологий. Общие требования к технологическим процессам – https://rosgosts.ru/file/gost/83/080/gost_r_59101-2020.pdf (дата обращения: 28.11.2024).
6. Лысыч М.Н., Шабанов М.Л., Качурин А.А. Обзор современных технологий 3D-печати // Современные наукоемкие технологии, 2015, № 6, с. 26-30.
7. Рожков С.С. Методика экспериментальной оценки диэлектрической проницаемости плоских радиопрозрачных материалов // Тезисы 17-ой Международной конференции «Авиация и космонавтика – 2018», 2018, с. 268-269.
8. A.A. Politiko et al. Measurement of Radiophysical Properties and Electromagnetic Parameters of Material Samples in the Millimeter Microwave Range // 2024 Photonics & Electromagnetics Research Symposium (PIERS), 2024, pp. 1-9.
9. Semenenko V.N., Chistyayev V.A., Politiko A.A. et al. Test Stand for Measuring the Free-Space Electromagnetic Parameters of Materials over an Ultrawide Range of Microwave Frequencies // Meas. Tech., 2019, v. 62(2), p. 161.
10. Басков К.М., Политико А.А., Семененко В.Н. и др. Коррекция S-параметров при измерении материальных параметров магнитодиэлектрических композитов в свободном пространстве с применением диафрагмы // Журнал радиоэлектроники, 2017, № 5, с. 1-27.
11. Politiko A.A. et al., Bench for Measuring Electromagnetic Properties of Materials in Free Space in a Ultrawide Microwave Range // Proc. of the Conf. “Radiation and Scattering of Electromagnetic Waves (RSEMW)”, 2019, pp. 328-331.

Для цитирования:

Азаров А.В., Политико А.А., Рожков С.С., Дьяконов В.А. Экспериментальные исследования электродинамических параметров PET-G филаментов для 3Д-печати. // Журнал радиоэлектроники. – 2026. – №. 7. <https://doi.org/10.30898/1684-1719.2026.7.2>