

АНАЛИЗ ВЛИЯНИЯ ПОЛИМЕРНЫХ ПОКРЫТИЙ НА ЧАСТОТНЫЙ ДИАПАЗОН АНТЕННО-ФИДЕРНЫХ УСТРОЙСТВ

М.А. Ромашенко, Д.В. Васильченко, Е.А. Ищенко, С.Н. Паршин, Г.П. Золкин

Воронежский государственный технический университет, г. Воронеж, Россия

Аннотация: рассматриваются особенности использования антенно-фидерных устройств с полимерными покрытиями на беспилотных летательных аппаратах. Проведено исследование влияния полимерных покрытий на электродинамические характеристики антенно-фидерных устройств, применяемых в частотных диапазонах 915 и 1200 МГц. Выполнено экспериментальное измерение влияния полимерных покрытий с использованием гликоль-модифицированного полиэтилентерефталата (PETG), ударопрочного полистирола (HIPS), полилактида (PLA) и акрилонитрилбутадиенстирола (ABS). Были определены значения зависимости резонансных частот и коэффициент отражения антенных систем с нанесенным полимерным покрытием. Установлено, что увеличение диэлектрической проницаемости приводит к снижению резонансной частоты и увеличению коэффициента отражения. Эффективность излучения определяется совокупностью диэлектрических потерь и геометрических параметров полимерных покрытий. В частотном диапазоне 915 МГц стабильность параметров обеспечивают полимерные покрытия из ударопрочного полистирола (HIPS). Применение полимерного покрытия из гликоль-модифицированного полиэтилентерефталата (PETG) приводит к смещению резонансной частоты антенно-фидерного устройства. При частоте 1200 МГц устойчивое согласование обеспечивает полимерное покрытие из ударопрочного полистирола (HIPS) и белого полилактида (PLA). Применение гликоль-модифицированного полиэтилентерефталата (PETG) приводит к росту отражения и к увеличению параметра S_{11} . Полученные результаты могут быть использованы при проектировании антенно-фидерных устройств с учётом влияния диэлектрических свойств полимерных покрытий

Ключевые слова: аддитивная технология, полимерное покрытие, коэффициент стоячей волны, антенно-фидерное устройство

Благодарности: работа выполнена при финансовой поддержке Министерства науки и высшего образования Российской Федерации в рамках государственного задания «Молодежная лаборатория» (№ FZGM-2024-0003)

Введение

Беспилотные летательные аппараты (БПЛА) нашли применение в гражданском секторе для выполнения широкого спектра задач — от мониторинга сельскохозяйственных угодий и инспекции инфраструктурных объектов до контроля состояния транспортных дорог. Одним из основных технических требований к таким системам является обеспечение надёжной радиосвязи с учетом особенностей используемых приёмо-передающих антенно-фидерных устройств (АФУ). Размещение АФУ должно обеспечивать надёжное электромагнитное согласование с элементами конструкции, а также устойчивость к воздействию внешней среды. При этом БПЛА характеризуются ограниченным внутренним объёмом, общими цепями питания и заземления, что усложняет компоновку радиоэлектронных модулей. Также при размещении АФУ необходимо учитывать конструктивные ограничения,

включая место размещения и материал окружающих элементов [1, 2].

Постановка задачи

Для изготовления рам БПЛА применяют композитный материал Carbon Fiber Reinforced Polymer (CFRP). Данный материал обеспечивает высокую удельную прочность при относительно небольшой массе. Однако из-за электропроводной структуры в нем возникают наведённые поверхностные токи, приводящие к искажению диаграмм направленности и ухудшению радиотехнических характеристик АФУ. Для минимизации паразитных эффектов АФУ помещаются в изолирующие материалы, препятствующие их взаимодействию с токопроводящими элементами. Полимерное покрытие предотвращает непосредственный контакт антены с токопроводящей конструкцией, а также позволяет обеспечить защиту от механических воздействий, вибрационных нагрузок и иных внешних факторов. Одновременно такое покрытие фиксирует положение антенны, исключая её смещение в процессе эксплуатации.

Механические свойства покрытия, получаемого с помощью аддитивных технологий, зависят от используемого материала и могут различаться в зависимости от производителя, цвета, партии и даже катушки в рамках одной партии. При этом количество примесей и микроструктурные особенности материала покрытия также могут отличаться, что дополнитель но влияет на его диэлектрические свойства [3].

При использовании для антенны полимерного покрытия эффективная диэлектрическая проницаемость окружающей среды ($\epsilon_{\text{эфф}}$) возрастает, что приводит к снижению скорости распространения электромагнитной волны ($v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}}$), где c — скорость распространения света в вакууме. Соответственно, уменьшается значение длины волны в среде:

$$\lambda = \frac{\lambda_0}{\sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}}, \text{ где } \lambda_0 \text{ — длина волны в вакууме.}$$

В результате чего из-за дополнительной ёмкостной нагрузки резонансная частота антенны смещается в область меньших частот. Для антенны с диэлектрическим покрытием и без него для вычисления резонансной частоты используется выражение [4]:

$$f_{\text{рез}} = \frac{c}{2L_{\text{эфф}}\sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}}, \quad (1)$$

где $L_{\text{эфф}}$ — эффективная длина антенны. Таким образом, увеличение $\epsilon_{\text{эфф}}$ приводит к снижению резонансной частоты $f_{\text{рез}}$ на фактор $\frac{1}{\sqrt{\epsilon_{\text{эфф}}}}$ по сравнению со значением без полимерного покрытия.

Диэлектрическое покрытие изменяет входной импеданс антенны Z_L , воздействуя как на активную, так и на реактивную его составляющую. В общем случае Z_L определяется как $Z_L = \widehat{R}_L + jX_L$, зависит от геометрии антенны и окружающей среды. Наличие слоя с высоким уровнем диэлектрической проницаемости окружающей среды увеличивает ёмкостную нагрузку, что изменяет реактивную составляющую X_L и смещает резонансное состояние (условие $X_L = 0$). В этом случае коэффициент отражения рассчитывается на ос-

нове волнового сопротивления линии передачи и волнового сопротивления нагрузки следующим образом [5]:

$$\Gamma = \frac{Z_L - Z_0}{Z_L + Z_0}, \quad (2)$$

где $Z_0 \approx 120\pi$ — волновое сопротивление свободного пространства.

Если предположить, что среды 1 и 2 (диэлектрики) имеют одинаковую величину относительной магнитной проницаемости, то коэффициент отражения на первой границе можно рассчитать по уравнению [6]:

$$\Gamma = \frac{\sqrt{\epsilon_r} - 1}{\sqrt{\epsilon_r} + 1}. \quad (3)$$

Наличие диэлектрического покрытия изменяет входное сопротивление антенны, что приводит к изменению входного коэффициента отражения $|\Gamma|$. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) связан с величиной коэффициента отражения Γ соотношением [5]:

$$KCBH = \frac{1+|\Gamma|}{1-|\Gamma|}. \quad (4)$$

Увеличение модуля коэффициента отражения $|\Gamma|$ приводит к ухудшению параметра S_{11} , где часть электромагнитной волны рассеивается в покрытии, что снижает коэффициент полезного действия η и коэффициент усиления АФУ в направлении $G(\theta, \phi)$.

Таким образом, следует определить степень влияния полимерного покрытия на электродинамические характеристики АФУ, включая коэффициент отражения S_{11} , резонансную частоту и форму диаграммы направленности. При этом степень влияния покрытия на антенну определяется диэлектрическими параметрами материала (относительной диэлектрической проницаемости ϵ_r , тангенс угла диэлектрических потерь $\tan \delta$), а также толщиной покрытия, его формой, однородностью структуры и наличием примесей.

Методы решения и результаты

Для оценки влияния полимерных покрытий был проведён эксперимент с использованием антенн дипольного типа, рассчитанных на работу в диапазонах частот 915 МГц и 1200 МГц. Длина каждого плеча дипольной антенны для диапазона 915 МГц составляет 82 мм, общая длина — 164 мм. Для диапазона 1200 МГц длина плеча составляет 62,5 мм, общая длина антенны — 125 мм. В качестве материала для полимерных покрытий были использованы: гликоль модифицированный полиэтилентерефталат (PETG), ударопрочный полистирол (HIPS), полилактид (PLA) и акрилонитрил-бутадиенстирол (ABS). Полимерные покрытия были выполнены в форме цилиндра с толщиной стенки 1,5 мм и высотой, обеспечивающей полное покрытие плеча дипольной антенны.

Процесс измерения электродинамических параметров АФУ предоставлен на рис. 1. Для проведения эксперимента был выбран БПЛА с размерами 210 мм × 210 мм × 70 мм и массой 0,9 кг. Дипольная антenna, помещённая в полимерное покрытие, устанавливалась на луч БПЛА. Антenna располагалась таким образом, чтобы её ось была параллельна направлению полёта, а поверхность покрытия находилась на удалении не менее 30 мм от ближайших металлических и силовых элементов.



Рис. 1. Процесс измерения электродинамических параметров АФУ

Измерения проводились на антенне, подключённой к коаксиальному тракту с волновым сопротивлением 50 Ом. Измерения выполнялись на векторном анализаторе цепей Rohde Schwarz ZNH4.

Табл. 1 содержит результаты измерения уровня сигнала. Согласно полученным данным наличие полимерного покрытия действительно влияет на уровень сигнала, излучаемого антенной. В диапазоне 915 МГц испытуемые материалы обеспечили уровень сигнала в преде-

лах $-22,4\ldots-29,7$ дБ. В диапазоне 1200 МГц значения в пределах $-26,4\ldots-29,7$ дБ.

Таблица 1
Результаты измерения уровня сигнала
на частотах 915 МГц и 1200 МГц

Полимерные покрытия	915 МГц, дБ	1200 МГц, дБ
Без полимерного покрытия	-29,7	-29,7
HIPS, без пигмента	-29,5	-29,1
PETG, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	-24,1	-27,1
PLA, белый пигмент (наполнитель TiO_2)	-28,3	-28,7
PLA, голубой пигмент (наполнитель CuPc)	-22,4	-26,4
PLA, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	-28,6	-27,8

Для каждого полимерного покрытия проводились экспериментальные измерения с целью определения резонансной частоты антенны и входного коэффициента отражения S_{11} . Резонансная частота определялась как частота, при которой коэффициент отражения S_{11} достигал минимального значения, что соответствует максимальной эффективности передачи энергии. Расхождения в значениях для образцов PLA с белым и чёрным пигментами обусловлены неполной заливкой измеряемых образцов, в результате чего между слоями образуются воздушные зазоры [7]. В табл. 2 и 3 представлены резонансные частоты, зафиксированные при применении полимерных покрытий, а также соответствующие значения коэффициента отражения.

Таблица 2
Влияние полимерных покрытий на рабочие характеристики антенны диапазона 915 МГц

Полимерное покрытие	Резонансная частота, МГц	S_{11} , дБ
Без полимерного покрытия	915	-29,7
HIPS, без пигмента	917	-29,5
PETG, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	899	-24,1
PLA, белый пигмент (наполнитель TiO_2)	901	-28,3
PLA, голубой пигмент (наполнитель фталоцианин Cu)	905	-22,4
PLA, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	892	-28,6

Таблица 3

Влияние полимерных покрытий на рабочие характеристики антенны диапазона 1200 МГц

Полимерное покрытие	Резонансная частота, МГц	S_{11} , дБ
Без полимерного покрытия	1200	-29,7
HIPS, без пигмента	1201	-29,1
PETG, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	1291	-27,1
PLA, белый пигмент (наполнитель TiO_2)	1202	-28,7
PLA, голубой пигмент (наполнитель фталоцианин Cu)	1214	-26,4
PLA, чёрный пигмент (наполнитель углерод)	1271	-27,8

В частотном диапазоне 915 МГц резонансная частота при полимерном покрытии PLA с чёрным пигментом (углеродным наполнителем) составила 892 МГц, а при покрытии HIPS – 917 МГц. Одновременно коэффициент отражения увеличился, однако у PLA с чёрным пигментом он остался близким к значению без полимерного покрытия. Это вызвано высоким уровнем электропроводности углеродного наполнителя.

В частотном диапазоне 1200 МГц наблюдается смещение резонансной частоты: PLA (белый пигмент) – 1291 МГц, PLA (чёрный пигмент) – 1271 МГц, PLA голубой – 1214 МГц, PETG чёрный – 1209 МГц. Применение материала HIPS не оказало влияние на резонансные частоты, значения которого составило 1201 МГц. Частотные зависимости коэффициента отражения для разных материалов представлены на рис. 2-3.

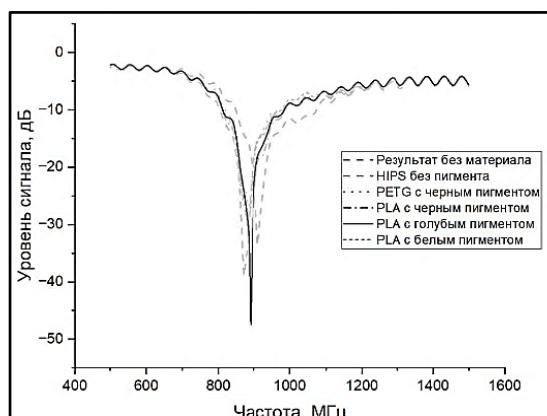


Рис. 2. Частотные характеристики антенны (~915 МГц) с применением полимерных покрытий

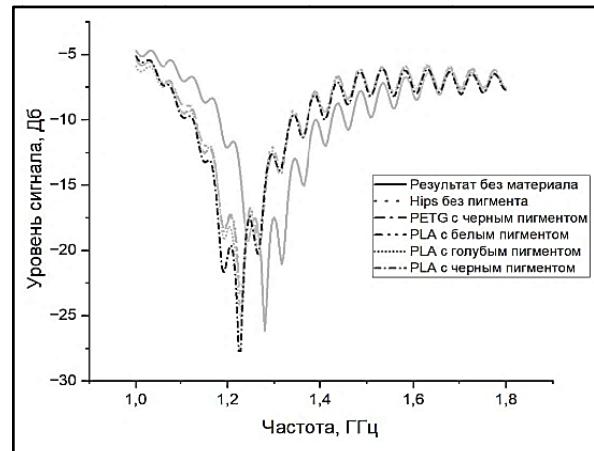


Рис. 3. Частотные характеристики антенны (~1200 МГц) с применением полимерных покрытий

Анализ результатов и выводы

Полученные результаты эксперимента подтверждают влияние диэлектрических свойств полимерных покрытий на характеристики АФУ. Данное влияние вызвано применением полимерных покрытий с $\epsilon > 1$, что приводит к увеличению эффективной диэлектрической проницаемости среды.

В частотном диапазоне 915 МГц применение полимерных покрытий вызвало снижение резонансной частоты по сравнению с антенной без покрытия. Без покрытия резонансная частота антенны составляет 915 МГц при коэффициенте отражения $S_{11} \approx 29,7$ дБ;

HIPS (ударопрочный полистирол): значение резонансной частоты антенны составляет 917 МГц (смещение 0,2 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 29,5$ дБ. Данное влияние вызвано изменениями на границе «воздух–полимер»;

PLA, голубой пигмент (фталоцианин Cu): значение резонансной частоты антенны составляет 905 МГц (смещение 1,1 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 22,4$ дБ. Данное влияние вызвано изменениями на границе «воздух–полимер»;

PLA, белый пигмент (наполнитель TiO_2): значение резонансной частоты антенны составляет 901 МГц (смещение 1,5 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 28,3$ дБ. Это указывает на влияние диэлектрических потерь, обусловленное высоким показателем преломления материала;

PETG, чёрный (наполнитель углерод): значение резонансной частоты антенны составляет 899 МГц (смещение 1,7 %). Значение

коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 24,1$ дБ. Данное влияние вызвано более высокой диэлектрической проницаемостью покрытия и наличием проводящих примесей;

PLA, чёрный (наполнитель углерод): значение резонансной частоты антенны составляет 892 МГц (смещение 2,5 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 28,6$ дБ. Данное влияние вызвано двумя факторами: во-первых, высоким значением диэлектрической проницаемости материала, обусловленным углеродным наполнителем, что увеличивает электрическую длину вибратора и приводит к снижению резонансной частоты; во-вторых, углеродный наполнитель может незначительно повысить добротность системы, компенсируя потери и сохраняя глубокий резонансный минимум.

В диапазоне 1200 МГц применение полимерных покрытий также оказывает влияние на резонансные характеристики АФУ. Без полимерного покрытия значение резонансной частоты антенны составляет 1200 МГц при коэффициенте отражения $S_{11} \approx 29,7$ дБ;

HIPS (ударопрочный полистирол): значение резонансной частоты антенны составляет 1201 МГц (смещение 0,1 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 29,1$ дБ.

PLA, голубой пигмент (Cu): значение резонансной частоты антенны составляет 1214 МГц (смещение 1,17 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 26,4$ дБ. Данное влияние вызвано увеличением эффективной диэлектрической проницаемости покрытия;

PLA, белый пигмент (наполнитель TiO_2): значение резонансной частоты антенны составляет 1202 МГц (смещение 0,75 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 28,7$ дБ;

PETG, чёрный (наполнитель углерод): значение резонансной частоты антенны составляет 1291 МГц (смещение 7,6 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 27,1$ дБ. Данное влияние вызвано высоким показателем преломления материала, что изменяет эффективную длину полуволнового вибратора;

PLA, чёрный (наполнитель углерод): значение резонансной частоты антенны составляет 1271 МГц (смещение 5,9 %). Значение коэффициента отражения составляет $S_{11} \approx 27,8$ дБ. Данное влияние вызвано двумя факторами: во-первых, высоким значением диэлектрической проницаемости материала, обусловленным углеродным наполнителем, что увеличивает

электрическую длину вибратора и повышает частоту резонанса; во-вторых, углеродный наполнитель может незначительно повышать добротность системы, компенсируя потери и поддерживая глубокий резонансный минимум.

Согласно полученным данным, резонансная частота f_0 антенны в диэлектрической среде с относительной проницаемостью ϵ_r смещается согласно выражению $f \approx \frac{f_0}{\sqrt{\epsilon_r}}$. Применение

полимерного покрытия прямо пропорционально увеличивает значение $\epsilon_{\text{эфф}}$, поэтому наблюдается снижение f относительно f_0 . Диэлектрическая проницаемость выше на низких частотах, затем уменьшается с ростом частоты и далее остается постоянной, что согласуется с [8]. Введение покрытия смещает Z_L (за счёт реактивной составляющей, связанной с ёмкостью диэлектрической оболочки), поэтому и величина S_{11} отклоняется от значения без полимерного покрытия. Если материал обладает низкими диэлектрическими потерями и малой диэлектрической проницаемостью, его влияние на электромагнитное поле минимально.

Заключение

В работе было проведено исследование влияния полимерных покрытий на резонансную частоту и коэффициент отражения АФУ в частотных диапазонах 915 МГц и 1200 МГц. Экспериментальные измерения выполнены с применением полимерных покрытий: гликоль-модифицированного полиэтилентерефталата (PETG), ударопрочного полистирола (HIPS), полилактида (PLA) и акрилонитрил бутадиен-стирола (ABS). Установлено, что влияние полимерного покрытия антенны обусловлено диэлектрическими свойствами используемых материалов. Анализ экспериментальных данных показал, что в частотном диапазоне 915 МГц материал HIPS оказывает минимальное влияние на резонансную частоту антенны. Для диапазона 1200 МГц материал HIPS и PLA с белым пигментом (наполнитель TiO_2) также оказывают минимальное смещение рабочей частоты. Полученные результаты позволяют оценить влияние полимерных покрытий на электродинамические характеристики антенн и учитывать их при проектировании АФУ.

Литература

1. Ромашенко М.А., Коновалов Р.Г., Воробьев М.Е. Основные этапы методики обеспечения электромагнитной совместимости для подвижных объектов связи // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 1. С. 62-68.
2. Ромашенко М.А., Васильченко Д.В., Пухов Д.А. Современное состояние задач повышение помехоустойчивости канала управления беспилотных авиационных систем на основе искусственного интеллекта // Вестник Воронежского государственного технического университета. 2023. Т. 19. № 6. С. 142-146.
3. Strength of PLA Components Fabricated with Fused Deposition Technology Using a Desktop 3D Printer as a Function of Geometrical Parameters of the Process / V.E. Kuznetsov [et al.] // Polymers. 2018. 10(3), 313. URL: <https://doi.org/10.3390/polym10030313> свободный (дата обращения: 10.10.2025).
4. Biswas M., Banik S., Dam M. Li's formula extended to determine accurate resonant frequency of a rectangular patch antenna in multi-dielectric layers. Progress In Electromagnetics Research M. 99. 2021. p. 177-189.
5. Development of Novel Design of VSWR Section for SYMPLE / J. Kumar [et al.] // Conference: National Conference on Emerging Trends in Vacuum Electronic Devices & Applications, VEDA 2016, Gandhinagar, Gujarat, India, March 16-18, 2017. - URL: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14707.07208> свободный (дата обращения: 10.10.2025).
6. Influence of Dielectric Plate Parameters on the Reflection Coefficient of a Planar Aperture Antenna / V. Mandric [et al.] // Applied Sciences. 2023. Vol. 13. - URL: <https://doi.org/10.3390/app13042544> свободный (дата обращения: 10.10.2025).
7. Применение метода 3D-печати при изготовлении элементов антенно-фидерных устройств космических аппаратов / Ю.П. Борщев, А.И. Ананьев, И.В. Камышанов, Е.Н. Телеляев // Инженерный журнал: наука и инновации. 2020. № 9(105). С. 3.
8. Fabrication of 3D-Printed Polyurethane Resin Composites and its Dielectric Performance / B. Ghule [et al.] // Chemistry Africa. 2023. Vol. 7. - URL: <https://doi.org/10.1007/s42250-023-00793-2> свободный (дата обращения: 10.10.2025).

Поступила 20.09.2025; принята к публикации 11.11.2025

Информация об авторах

Ромашенко Михаил Александрович – д-р техн. наук, доцент, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kipr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>
Васильченко Дмитрий Владимирович – аспирант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: Shadow951@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>
Ищенко Евгений Алексеевич – аспирант, инженер, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>
Паршин Сергей Николаевич – лаборант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: smp.parshin@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0901-5896>
Золкин Глеб Павлович – лаборант, Воронежский государственный технический университет (394006, Россия, г. Воронеж, ул. 20-летия Октября, д. 84), e-mail: glebzolkin2004@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5429-4727>

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF POLYMER COATINGS ON THE FREQUENCY RANGE OF ANTENNA-FEEDER DEVICES

M.A. Romashchenko, D.V. Vasil'chenko, E.A. Ishchenko, S.N. Parshin, G.P. Zolkin

Voronezh state technical University, Voronezh, Russia

Abstract: the study addresses the features of using antenna-feeder devices (AFDs) with polymer coatings on unmanned aerial vehicles. The influence of polymer coatings on the electrodynamic characteristics of antenna-feeder devices operating in the frequency ranges of 915 MHz and 1200 MHz was investigated. Experimental measurements were carried out to assess the impact of polymer coatings made of glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG), high-impact polystyrene (HIPS), polylactic acid (PLA), and acrylonitrile butadiene styrene (ABS). The dependencies of the resonant frequencies and reflection coefficients were determined. It was found that an increase in dielectric permittivity leads to a decrease in the resonant frequency and an increase in the reflection coefficient. The radiation efficiency is determined by the interaction of dielectric losses and the geometrical parameters of the polymer coatings. In the 915 MHz frequency range, the stability of the parameters is ensured by polymer coatings made of high-impact polystyrene (HIPS). The application of glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG) coatings causes a shift in the resonant frequency of the antenna-feeder device. At 1200 MHz, stable matching is provided by polymer coatings made of high-impact polystyrene (HIPS) and white polylactic acid (PLA). The use of glycol-modified polyethylene terephthalate (PETG) results in increased reflection and a growth in the VSWR parameter. The obtained results can be applied in the design of antenna-feeder devices, taking into account the influence of the dielectric properties of polymer coatings

Key words: additive technology, polymer coating, standing wave ratio, antenna-feeder device

Acknowledgments: the work was supported by the Ministry of Science and Higher Education of the Russian Federation (project no. FZGM-2024-0003)

References

1. Romashchenko M.A., Konovalov R.G., Vorob'yev M.E. "Main stages of the methodology for ensuring electromagnetic compatibility for mobile communication objects", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2023, vol. 19, no. 1, p. 62–68.
2. Romashchenko M.A. "Measurement of emission of radiated interference of electronic equipment in tasks of ensuring EMC", *Bulletin of Voronezh State Technical University (Vestnik Voronezhskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta)*, 2010, vol. 6, no. 7, p. 20–22.
3. Kuznetsov V.E., Solonin, A.N., Urzhumtsev, O.D., Schilling, R., Tavitov, A.G. "Strength of polylactic acid components manufactured by layered deposition using a desktop 3D printer depending on geometrical parameters of the process", *Polymers* 2018, no. 10, p. 313, available at: <https://doi.org/10.3390/polym10030313> (date of access 10.10.2025).
4. Biswas M., Banik S., Dam M. "Li's formula extended to determine accurate resonant frequency of a rectangular patch antenna in multi-dielectric layers", *Progress in Electromagnetics Research*, 2021, no. 99, pp. 177-189.
5. Kumar Jitendra, Baranwal Arpit, Jaiswal Rahul, Patel Shreekant, Singh Raj, Anitha V. "Development of novel design of VSWR Section for SYMPLE", 2017, available at: <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.14707.07208> free (date of access 10.10.2025).
6. Mandic, Vanja & Rimac-Drlje, Sanjuana & Baxhaku, Ismail "Influence of dielectric plate parameters on the reflection coefficient of a planar aperture antenna", *Applied Sciences*, 2023, no. 13, pp. 2544, available at: <https://doi.org/10.3390/app13042544> free (date of access 10.10.2025).
7. Borshchev Yu.P., Ananyev A.I., Kamyshanov I.V., Telelyayev E.N., "Application of 3D printing method in manufacturing of antenna-feeder devices for spacecraft", *Engineering Journal: Science and Innovation (Inzhenernyy zhurnal: nauka i innovatsii)*, 2020, no. 9 (105), pp. 3.
8. Ghule Babaji Laad, Dr Sadasivuni Kishor, Maurya Muni Raj, Cabibihan John-John "Fabrication of 3D-printed polyurethane resin composites and its dielectric performance", *Chemistry Africa*, 2023, no. 7, available at: <https://doi.org/10.1007/s42250-023-00793-2> free (date of access 10.10.2025).

Submitted 20.09.2025; revised 11.11.2025

Information about the authors

- Mikhail A. Romachenko**, Dr. Sc. (Technical), Associate Professor, Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: kipr@vorstu.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5629-6056>
- Dmitriy V. Vasil'chenko**, Cand. Sc. (Technical), Voronezh State Technical University (84 20-letiya Oktyabrya str., Voronezh 394006, Russia), e-mail: Shadow951@bk.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1045-0841>
- Evgeniy A. Ishchenko**, graduate student, engineer, Voronezh State Technical University (84, 20th Anniversary of October St., Voronezh, 394006), e-mail: kursk1998@yandex.ru, ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-5270-0792>
- Sergey N. Parshin**, Laboratory assistant, Voronezh State Technical University (84, 20-letiya Oktyabrya St., Voronezh, 394006, Russia), e-mail: snp.parshin@gmail.com, ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-0901-5896>
- Gleb P. Zolkin**, Laboratory assistant, Voronezh State Technical University (84, 20th Anniversary of October St., Voronezh, 394006), e-mail: glebzolkin2004@mail.ru, ORCID: <https://orcid.org/0009-0000-5429-4727>