

Влияние краевых дефектов печати на электродинамические характеристики патч-антенны *

А. Г. Черевко, С. Н. Былин, В. В. Лубский

Сибирский гос. унив. телекоммуникаций и информатики (СибГУТИ)

Аннотация: Рассмотрено влияние периодических и случайных краевых дефектов на частотную зависимость характеристик параметра S_{11} квадратной патч-антенны. Определен максимальный размер краевого дефекта, не значимый для S_{11} . На примере аналогичной круглой патч-антенны показано, что зависимость характеристик параметра S_{11} от обратного радиуса кривизны является линейной, что позволяет относительно просто оценивать влияние радиуса изгиба конформной антенны на ее характеристики.

Ключевые слова: патч-антенна, графен, параметр S_{11} , дефекты печати, электродинамические характеристики.

Для цитирования: Черевко А. Г., Былин С. Н., Лубский В. В. Влияние краевых дефектов печати на электродинамические характеристики патч-антенны // Вестник СибГУТИ. 2023. Т. 17, № 3. С. 123–135. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-3-123-135>.



Контент доступен под лицензией
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Черевко А. Г., Былин С. Н.,
Лубский В. В., 2023

Статья поступила в редакцию 02.04.2023;
принята к публикации 19.05.2023.

1. Введение

Диапазон 5.2 ГГц входит в состав сетей 5-го поколения. 5G-технологии позволяют передавать данные с максимальной скоростью до 20 Гбит/с, энергоэффективность сети 5G на порядок лучше, чем в сети предыдущего поколения. В сети 5G задержка снижается до 1 мс и менее. Эффективность использования диапазона частот, количество информации, которую можно передать на единицу частотного диапазона, в сети 5G в 3 раза выше, чем в 4G. Ёмкость трафика на единицу площади, то есть скорость передачи данных на квадратный метр площади покрытия сети, в сети 5G на два порядка выше, чем в сети 4G [1]. Это позволяет использовать технологию 5G для критичных коммуникаций и видеонаблюдения, услуг тактильного интернета, в таких сферах, как телемедицина, бизнес, радиолокация двойного применения, управление дронами и беспилотниками.

Благодаря широкополосным свойствам, малыми габаритами и простоте изготовления патч-антенны отлично зарекомендовали себя в этом диапазоне. Для таких антенн перспективно использовать технологии 2D-печати, особенно при их изготовлении из новых материалов, например графена [2, 3]. При печати возникают краевые дефекты (рис. 1), которые могут

* Работа выполнена в рамках государственного задания № 071-03-2023-001 от 19.01.2023.

влиять на её электродинамические характеристики. Однако этот эффект систематически не исследован.

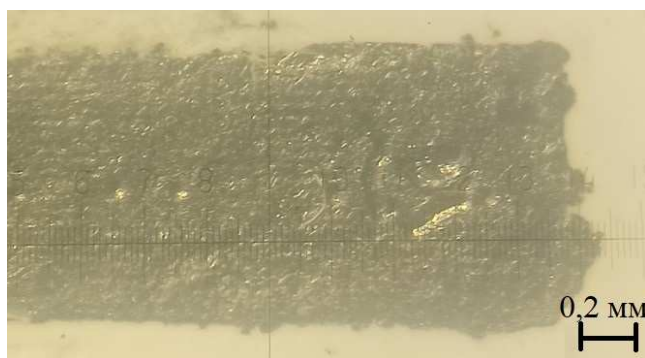


Рис. 1. Дефекты на патч-антенне с излучающей стороной из графена

Таким образом, актуальным является исследование влияния типов граничных эффектов печати патч-антенн на их электродинамические характеристики. Эти эффекты целесообразно исследовать на патч-антеннах, созданных на диэлектриках, используемых в реальных антеннах. Таким диэлектриком был выбран армированный стеклотканью фторопласт (ФАФ-4Д), который широко применяется для изготовления гибких печатных плат, также он широко используется при изготовлении RFID-антенн, различного типа меток для защиты товаров от краж, гибких печатных кабелей, гибких полиамидных носителей (ГПН), гибких терморезисторов, мембран акустических преобразователей и даже фотоэлектрических преобразователей [4]. В качестве проводящего слоя была выбрана медь, что типично для таких антенн. Использование медного проводящего слоя исключает влияние неучитываемых факторов, связанных с новыми материалами. Толщина проводящего слоя была выбрана равной 35 мкм, т.е. слой был достаточно тонким, и влияние скин-эффекта на результат измерения при такой толщине отсутствовало. Для эксперимента были выбраны круглая и квадратная патч-антенны, которые хорошо изучены [5]. Антенны были промоделированы в пакете CST Studio Suite (версия 2021). Экспериментальные образцы были созданы на основе этих моделей.

2. Электродинамические характеристики квадратной и круглой патч-антенн

Путем моделирования были определены размеры отражающей и излучающей сторон квадратной патч-антенны и радиусы этих сторон круглой патч-антенны для диапазона 5.2 ГГц. Они равнялись, соответственно, $L_{\text{отр}} = 52.5$ мм, $L_{\text{изл}} = 34.5 \div 39.5$ мм; $R_{\text{отр}} = 34$ мм, $R_{\text{изл}} = 22$ мм. Фотографии антенн приведены на рис. 2 и 3.

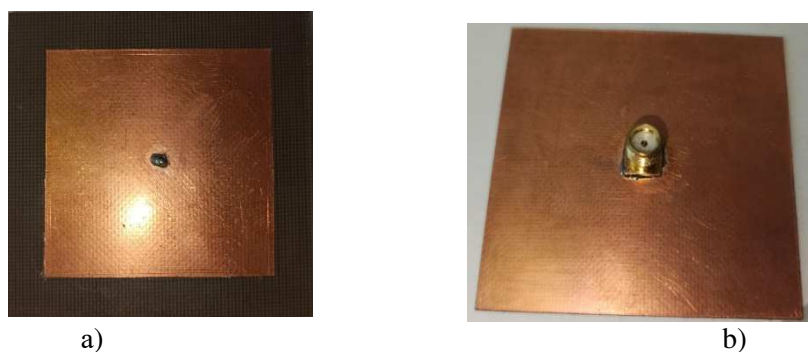


Рис 2. Квадратная патч-антенна:
а) излучающая сторона антенны, б) отражающая сторона антенны



Рис. 3. Круглая патч-антенна:
а) излучающая сторона антенны, б) отражающая сторона антенны

Результаты исследования электродинамических характеристик квадратных патч-антенн с различной длиной L стороны излучающей поверхности приведены на рис. 4.

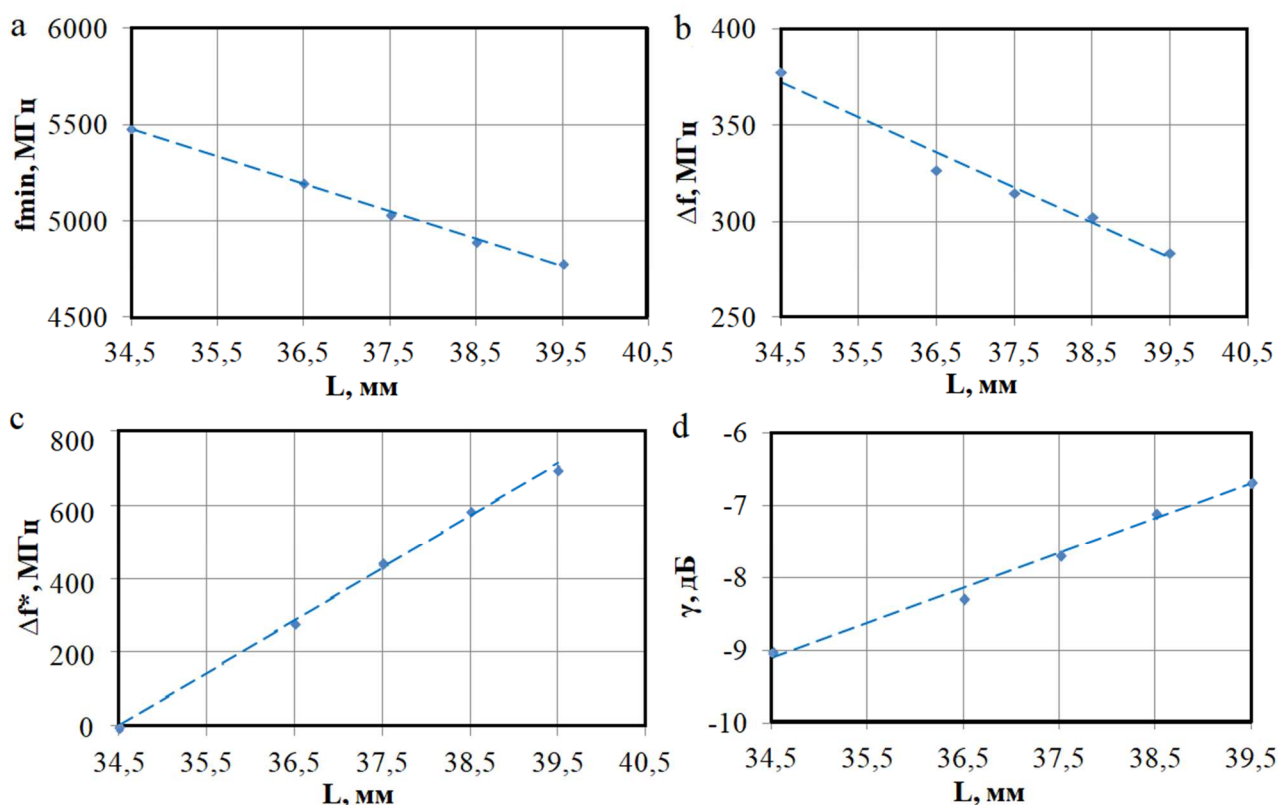


Рис. 4. Зависимость электродинамических характеристик квадратной патч-антенны от размера L стороны излучающей поверхности,

а) $f_{\min} = f(L)$; б) $\Delta f = f(L)$; в) $\Delta f^* = f(L)$; д) $\gamma = f(L)$

На рис. 4:

$\Delta f^* = [f_{\min}(L = 34.5 \text{ мм}) - f_{\min}(L)]$ – разность частот минимумов S11, которая вычисляется как разность между частотой минимума антенны при размере стороны излучающего квадрата $L = 34.5$ мм и частотами минимума антенн с иными размерами этого квадрата;

$f_{\min}$ – частота минимума параметра S11;

Δf – полуширина кривой S11(f);

γ – значение минимума параметра S11.

Представленные зависимости носят линейный характер с достоверностью аппроксимации не хуже 97 %, что соответствует теории таких антенн [6]. Частотные зависимости параметра S_{11} для различных размеров излучающих поверхностей приведены на рис. 5.

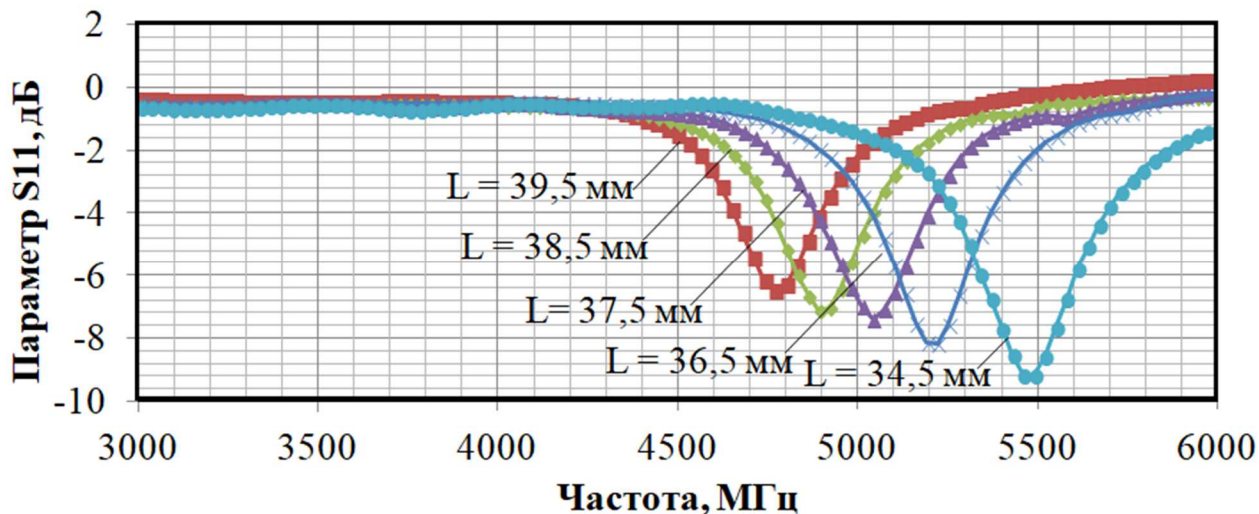


Рис. 5. Частотная зависимость параметра S_{11}

2.1. Конформные свойства экспериментальной патч-антенны

Конформные свойства созданных патч-антенн изучались на примере круглой антенны. Эти свойства представляют несомненный интерес в связи с расширяющимся использованием таких антенн в беспилотных летательных аппаратах [7], поскольку они могут размещаться на поверхности летательного аппарата, повторяя форму объекта, и интегрироваться с устройствами обработки и преобразования сигналов [8]. Проведены измерения электродинамических характеристик для плоской антенны (радиус изгиба (кривизны) r является бесконечным) и при радиусах кривизны $r = 5$ см, $r = 4$ см, $r = 3$ см и $r = 2.5$ см. Изгиб был осуществлен с помощью цилиндров соответствующих радиусов. На рис. 6 представлена круглая патч-антенна в изогнутом состоянии. На рис. 7 представлена зависимость электродинамических характеристик от обратного радиуса кривизны ($1/r$).

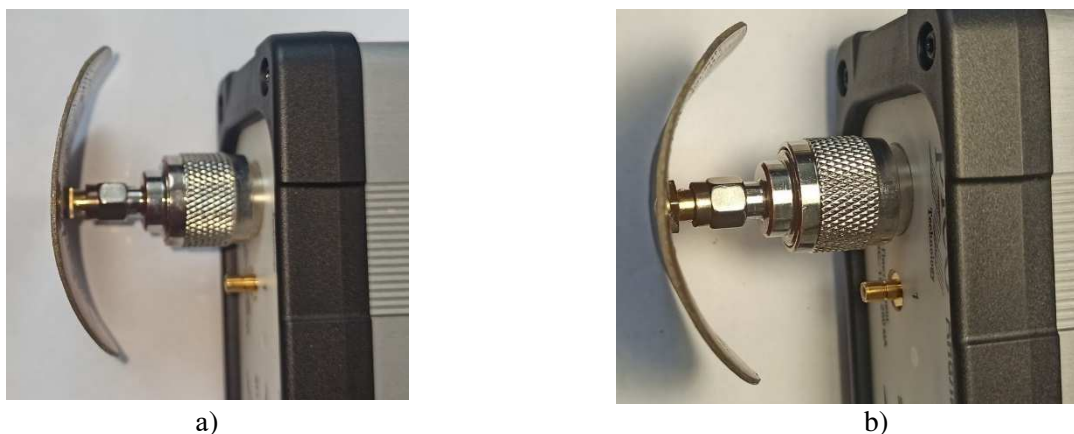


Рис. 6. Круглая патч-антенна, подключенная к анализатору цепей, с радиусом кривизны 5 см (а) и 2.5 см (б)

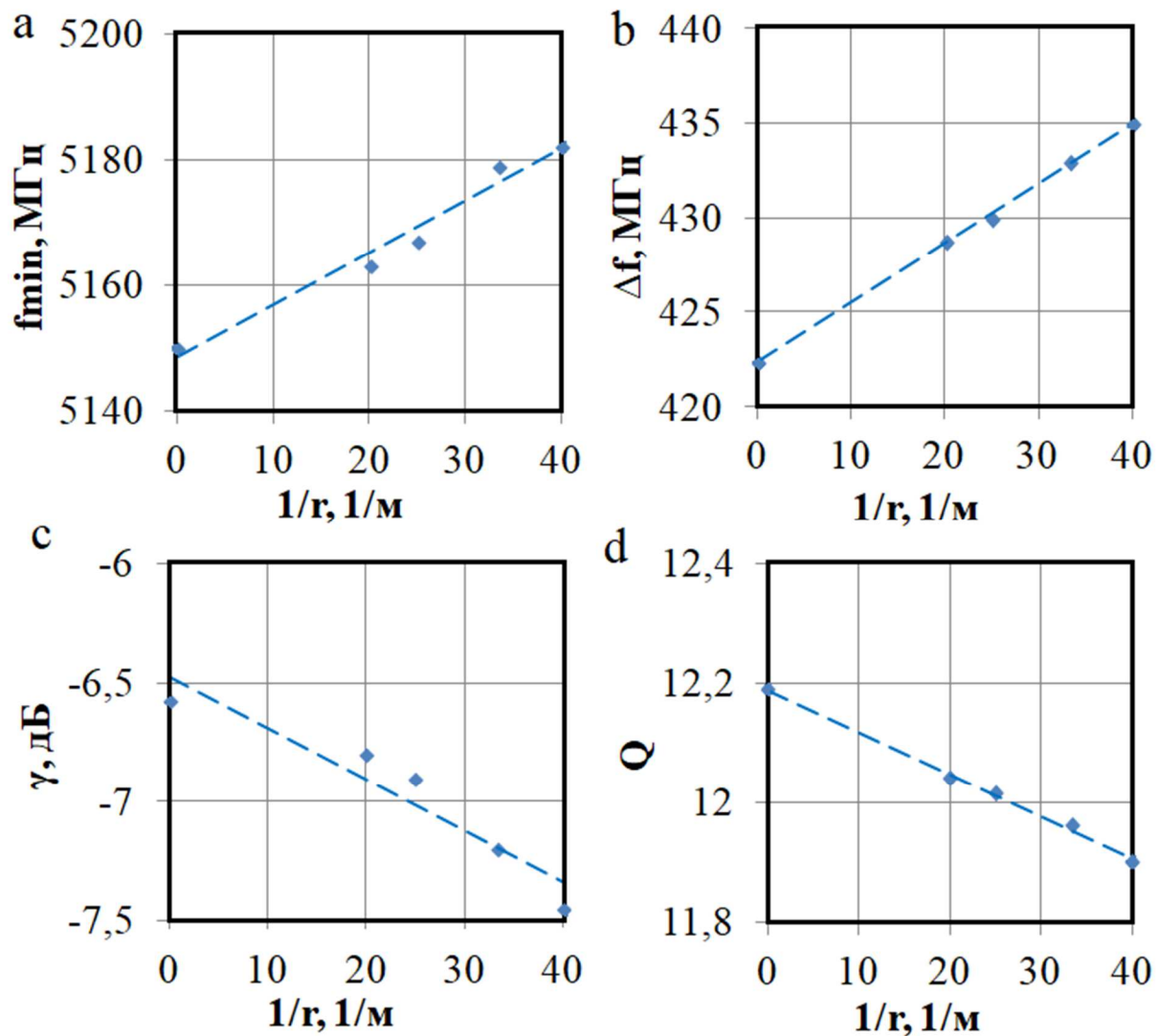


Рис. 7. Зависимость электродинамических характеристик от обратного радиуса кривизны ($1/r$),
 а) $f_{\min} = f(1/r)$; б) $\Delta f = f(1/r)$; в) $\gamma = f(L)$; г) $Q = f(1/r)$

На рис. 7 частота минимума параметра S_{11} – $f_{\min}$, полуширина кривой $S_{11}(f)$ – Δf , значение минимума параметра S_{11} – γ , добротность патч-антенны – Q .

Представленные зависимости являются линейными с достоверностью не хуже 88 %. Такая зависимость показывает, что для антенн этого типа при малых радиусах изгиба необходимо учитывать влияние радиуса изгиба на электродинамические характеристики. Однако оценку этого влияния можно получить, используя линейную зависимость характеристик от обратного радиуса кривизны. Частотная зависимость параметра S_{11} круглой патч-антенны при разных радиусах изгиба приведена на рис. 8.

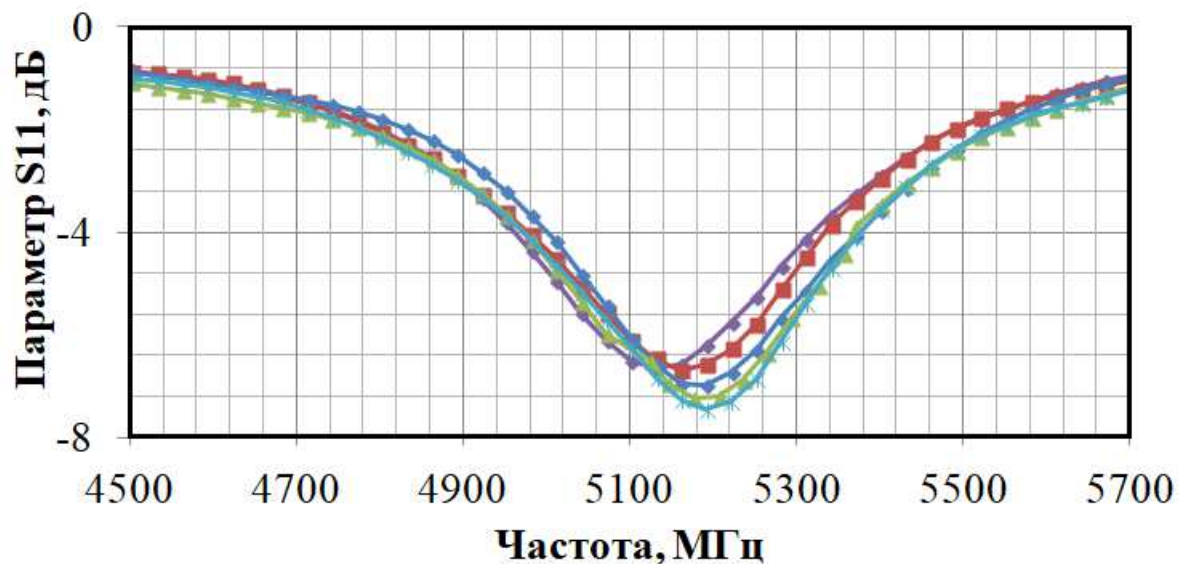


Рис. 8. Частотная зависимость параметра S11

- ◆ плоская патч-антенна без дефектов , ■ патч-антенна с радиусом кривизны 5 см,
- ◆ патч-антенна с радиусом кривизны 4 см, ▲ патч-антенна с радиусом кривизны 3 см,
- * патч-антенна с радиусом кривизны 2.5 см

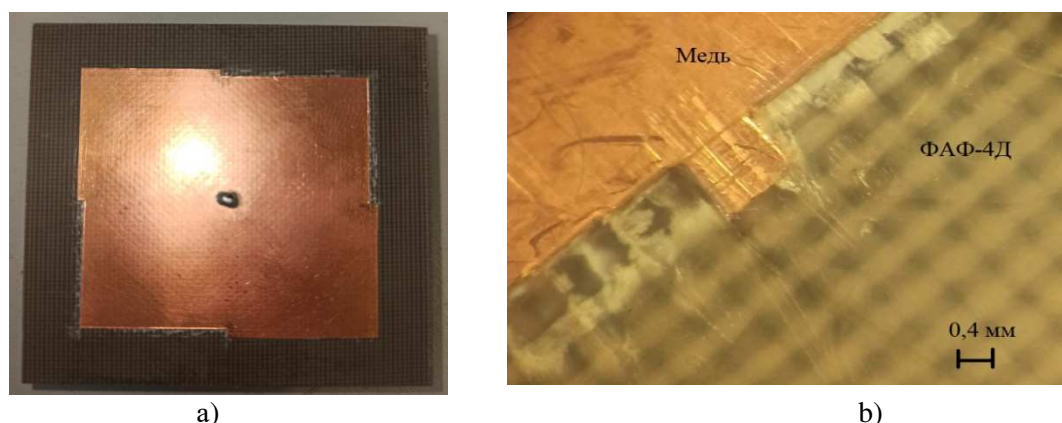
3. Влияние краевых дефектов печати на электродинамические характеристики патч-антенн

Краевые дефекты печатных патч-антенн могут распределяться как случайно, так и периодически вдоль ее периметра. В настоящей работе ставилась задача экспериментально промоделировать влияние таких дефектов на характеристики параметра S11 квадратной антенны, которая хорошо изучена.

Поэтому у патч-антенны были созданы как периодические, так и случайные дефекты и изучено их влияние на электродинамические характеристики для каждого случая.

3.1. Влияние дефектов печати при их периодическом распределении

Для эксперимента была взята квадратная патч-антенна с излучающей стороной 38.5 мм, а отражающей – 52.5 мм. На излучающей стороне исходного образца была вырезана «ступенька» высотой 1 мм и длиной 19.25 мм, как показано на рис. 9.



а) б)
Рис. 9. Исходный образец для экспериментов (а),
минимальный размер «ступеньки» под микроскопом (б)

Для исследования влияния длины l «ступеньки» на электродинамические характеристики патч-антенны длина «ступеньки» изменялась с шагом 1 мм, при этом измерялась частотная зависимость параметра S_{11} и определялись его параметры. Таким образом, максимальный размер дефекта – 19.25 мм (рис. 9а), минимальная длина периодического дефекта была ~1 мм (рис. 9б).

3.1.1. Зависимость электродинамических характеристик патч-антенны от длины периодических дефектов

При отсутствии дефектов размер излучающей стороны патч-антенны соответствует размеру 36.5 мм, т.к. «ступеньки» убираются с двух сторон антенны. Результаты измерений приведены на рис. 10.

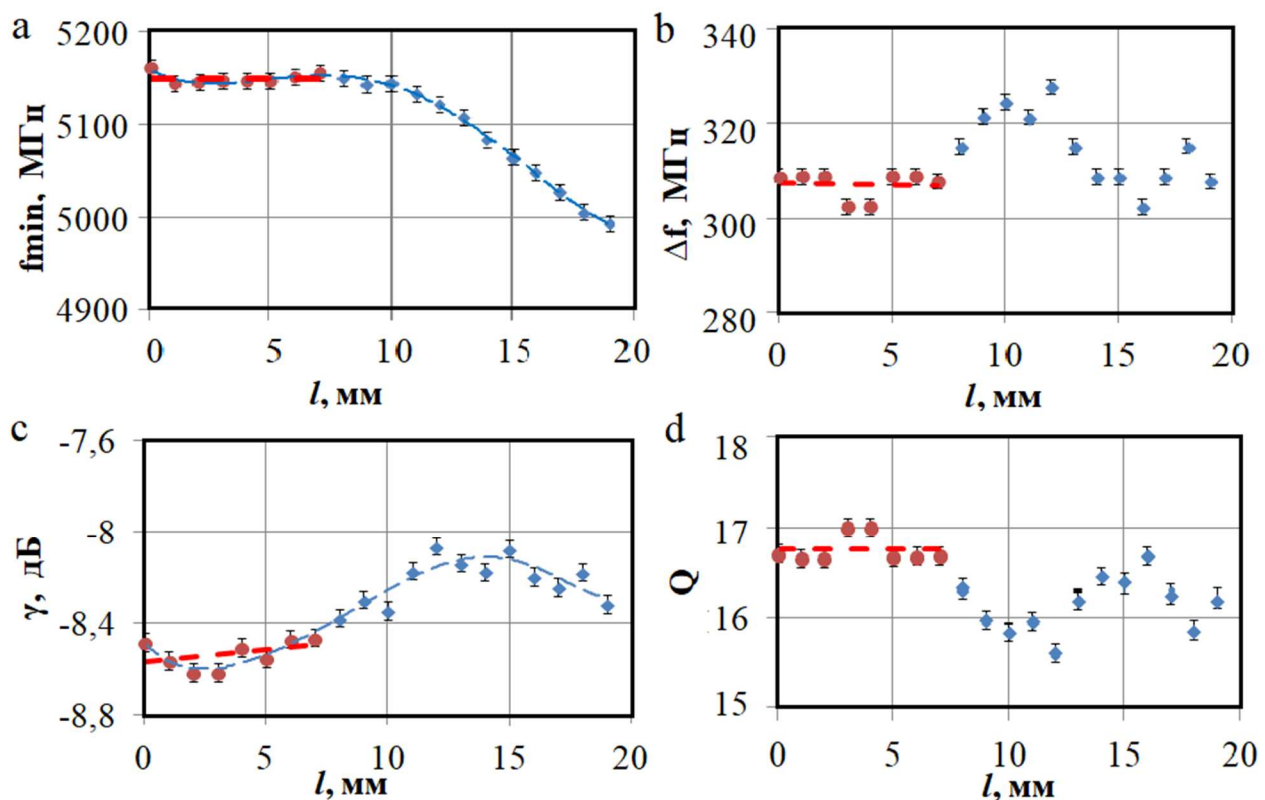


Рис. 10. Зависимость электродинамических характеристик квадратной патч-антенны от длины l периодического дефекта:

$$\text{a) } f_{\min} = f(l); \text{ b) } \Delta f = f(l); \text{ c) } \gamma = f(l); \text{ d) } Q = f(l)$$

На рис. 10 частота минимума параметра S_{11} – $f_{\min}$, полуширина кривой $S_{11}(f)$ – Δf , значение минимума параметра S_{11} – γ , добротность патч-антенны – Q .

Графики (рис. 10) показывают, что при периодических дефектах, длина которых не превышает 15 % от длины стороны квадрата излучающей поверхности, электродинамические характеристики можно считать постоянными с достоверностью 81 % и равными характеристикам бездефектной антенны.

Таким образом, наличие периодических дефектов, по сути, приводит к изменению эффективной длины стороны квадрата излучающей поверхности, однако это сказывается в том случае, когда длина дефектов превышает 15 % длины стороны квадрата.

3.2. Влияние случайных дефектов печати

Для моделирования случайных дефектов по периметру антенны вырезались прямоугольные зубья высотой от 0.1 до 1 мм, как это показано на рис. 11.

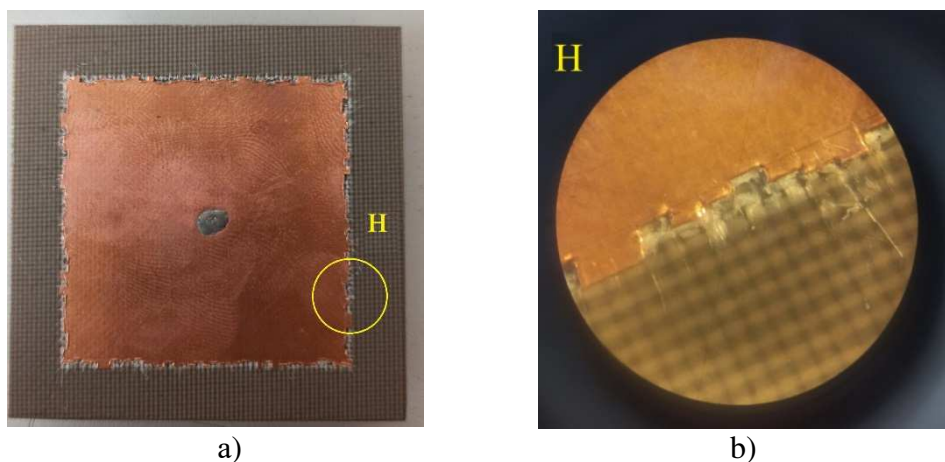


Рис. 11. Образец для исследования случайных дефектов:
а) внешний вид патч-антенны, б) область Н патч-антенны под микроскопом

Распределение зубьев по высоте было приблизительно равномерным. Распределение дефектов по стороне патч-антенны было произведено с помощью генератора случайных чисел [9]. Это распределение приведено на рис. 12.



Рис. 12. Распределение дефектов на стороне патч-антенны

Частотная зависимость параметра S_{11} бездефектной и дефектной патч-антенны приведена на рис. 13.

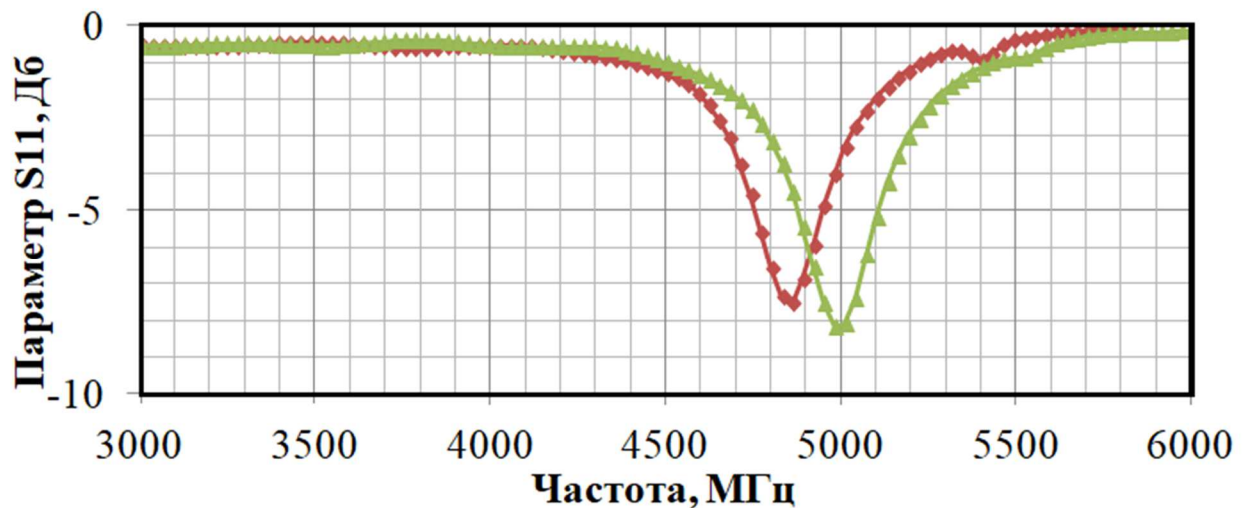


Рис. 13. Частотная зависимость параметра S11:

- ♦ при отсутствии дефектов на стороне патч-антенны,
- ▲ со случайно распределенными дефектами по периметру патч-антенны

Как видно из рис. 13, нанесение случайных дефектов изменяет параметр S11 заметным образом. Смещение частоты минимума S11 в сторону больших частот и его углубление связано с уменьшением эффективного размера излучающей поверхности и согласуется с рис. 4. Этот эффект необходимо учитывать при печати патч-антенн.

Практический интерес представляет определение высоты дефектов, незначимых для электродинамических характеристик патч-антенн.

3.2.1. Размер дефекта, незначимый для электродинамических характеристик патч-антенн

Для определения размера дефекта, незначимого для электродинамических характеристик, на каждой стороне излучающего квадрата вырезался прямоугольный дефект длиной 14.25 мм и высотой 1 мм (рис. 14). Затем высота прямоугольного дефекта уменьшалась с шагом 0.25 мм: от прямоугольного дефекта срезались полосы с шагом 0.25 мм с помощью канцелярского лезвия, для разметки и корректировки применялась игла. Длина дефектов оставалась постоянной. На каждом шаге измерялась частотная зависимость параметра S11.

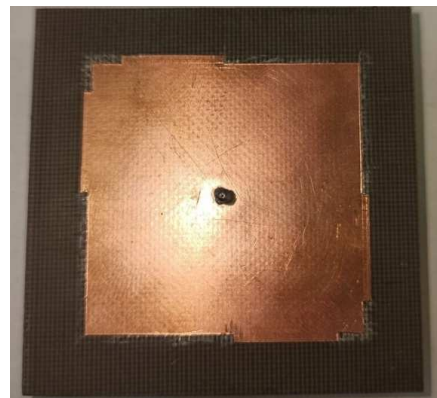


Рис. 14. Исходный образец для исследования размера дефекта, незначимого для электродинамических характеристик патч-антенн

Зависимость электродинамических характеристик этой антенны от высоты h прямоугольных дефектов представлена на рис. 15.

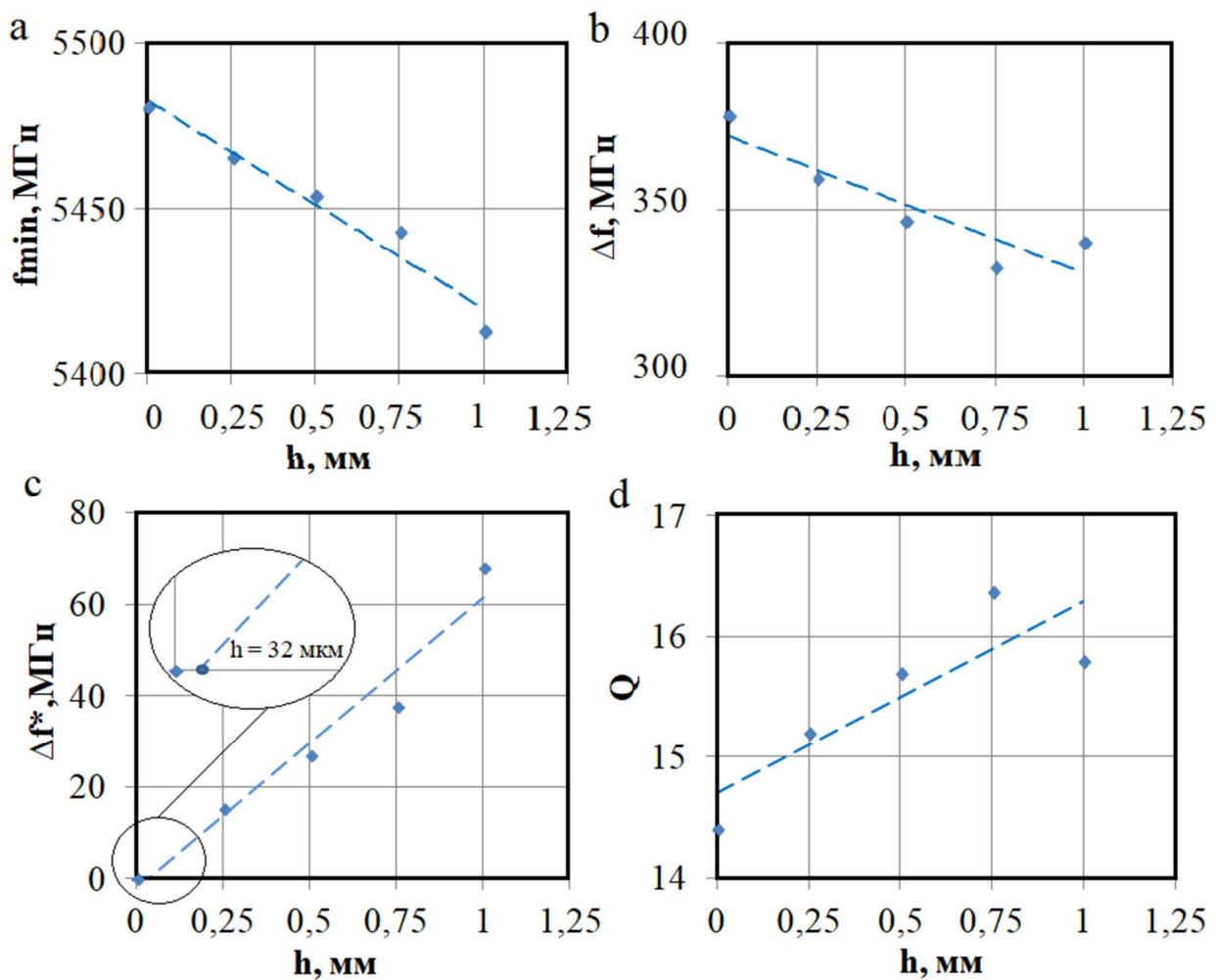


Рис. 15. Зависимость электродинамических характеристик от высоты дефекта h :

a) $f_{\min} = f(h)$; b) $\Delta f = f(h)$; c) $\Delta f^* = f(h)$; d) $Q = f(h)$.

На рис. 15 $\Delta f^* = f_{\min}(h=0) - f_{\min}(h)$, частота минимума параметра S11 – $f_{\min}$, полуширина кривой S11(f) – Δf , разность частот минимума S11 – Δf^* , добротность патч-антенны – Q .

Как видно из рис. 15, электродинамические характеристики антенны линейно зависят от высоты дефекта. При этом достоверность аппроксимации на рис. 15с составляет 95 %. Пересечение аппроксимирующей прямой с осью абсцисс дает высоту дефекта, которая незначима для электродинамических характеристик патч-антенны. Эта высота равняется 32 мкм. Типичная ширина дорожки профессионального 2D-принтера составляет 50 мкм, что несколько превышает найденное значение. Таким образом, при печати патч-антенн необходимо особое внимание уделить качеству печати краевых дорожек, особенно если чернила содержат нанотрубки.

Заключение

Изучено влияние периодических и случайных краевых дефектов на электродинамические характеристики патч-антенны. Для этого созданы квадратные патч-антенны с широко используемым ВЧ-диэлектриком ФАФ-4Д, также были созданы круглые патч-антенны. Влияние периодических и случайных дефектов изучалось путем их физического моделирования и измерения частотной зависимости параметра S11 этих моделей с дальнейшей математической обработкой для определения искомых характеристик. Антенны были выполнены на основе компьютерного моделирования патч-антенн в диапазоне 5G – 5.2 ГГц. Изучены

электродинамические характеристики антенн без краевых дефектов. Эти характеристики соответствовали теории. Исследования конформных свойств на базе круглых патч-антенн показали необходимость учета влияния радиуса изгиба на электродинамические характеристики. Однако оценку этого влияния можно получить, используя линейную зависимость характеристик от обратного радиуса кривизны, которая является линейной.

Исследование влияния периодических и случайных краевых дефектов на электродинамические характеристики квадратной патч-антенны показало, что:

- наличие периодических дефектов приводит к изменению эффективной длины стороны квадрата излучающей поверхности, однако это сказывается в том случае, когда длина дефектов превышает 15 % длины квадрата;

- наличие случайных дефектов приводит к смещению частоты минимума S_{11} в сторону больших частот и его углублению, что связано с уменьшением эффективного размера излучающей поверхности. Этот эффект необходимо учитывать при печати патч-антенн;

- определена высота прямоугольного дефекта, которая незначима для электродинамических характеристик. Длина дефекта при этом была сравнимой с половиной длины стороны антенны, что наблюдается при печати антенн. Искомая высота дефекта равняется 32 мкм и сопоставима с шириной дорожки профессионального 2D-принтера (50 мкм). Результат подчеркивает необходимость контроля качества краевых дорожек при печати графеновых патч-антенн и особенно чернилами из нанотрубок.

Литература

1. Приказ «Об утверждении Концепции создания и развития сетей 5G/IMT-2020 в Российской Федерации» // Минкомсвязи России: [Электронный ресурс]. URL: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minkomsvjazi-rossii-ot-27122019-n-923-ob-utverzhdanii/> (дата обращения: 23.07.2023).
2. Cherevko A. G., Krygin A. S., Ivanov A. I., Soots R. A., Antonova I. V. Advantages of Printed Graphene with Variable Resistance for Flexible and Environmentally Friendly 5G Antennas // *Materials*. 2022. V. 15 (20). 7267.
3. Cherevko A. G., Krygin A. S., Soots R. A., Antonova I. V. Flexible, Eco-Friendly G5 Graphene Resistive Dipole with J-Balancing System // *Proc. IEEE International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2022)*.
4. Фольгированные армированные фторопластовые диэлектрики (ФАФ-4Д) по ГОСТ 21008 [Электронный ресурс] // URL: <https://halogen.su/news/stati/folgirovannye-armirovannye-ftoroplastovye-dialektriki-faf-4d-po-gost-21008/> (дата обращения: 22.07.2023).
5. Гончаренко И. В. Антенны КВ и УКВ. Основы и практика. М.: ИП РадиоСофт, 2010. 256 с.
6. Кубанов В. П., Ружников В. А., Сподобаев М. Ю., Сподобаев Ю. М. Основы теории антенн и распространения радиоволн: учебное пособие / под ред. В. П. Кубанова. Самара: ИНУЛ-ПУТИ, 2016. 258 с.
7. Ильин Е. М., Кривов Ю. Н., Полубехин А. И., Кренев А. Н., Черевко А. Г. Многофункциональный бортовой РЛК с конформной антенной системой для беспилотных летательных аппаратов малой дальности // *Вестник СибГУТИ*. 2018. № 3. С. 79–88
8. Кисель Н. Н., Грищенко С. Г., Дерачиц Д. С. Исследование низкопрофильных конформных микрополосковых антенн // *Известия ЮФУ. Технические науки*. 2015. № 3 (164). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-nizkoprofilnyh-konformnyh-mikropoloskovykh-antenn> (дата обращения: 22.07.2023).
9. Генератор случайных чисел [Электронный ресурс]. URL: <https://randstuff.ru/number/> (дата обращения: 22.07.2023).

Черевко Александр Григорьевич

к.ф.-м.н., доцент, заведующий кафедрой физики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: persp14@mail.ru, ResearcherID: ABG-7540-2020, ORCID ID: 0000-0002-3229-2007.

Былин Станислав Николаевич

Студент СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: stasbylin@gmail.ru, ResearcherID: IYC-5381-2023, ORCID ID: 0009-0009-0572-3025.

Лубский Виталий Владимирович

Старший преподаватель кафедры физики СибГУТИ (630102, Новосибирск, ул. Кирова, 86), e-mail: vv10777@mail.ru, SPIN-код: 6047-3420, AuthorID: 1093263, ORCID ID: 0009-0002-1852-8922.

Авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Вклад соавторов: Каждый автор внес равную долю участия как во все этапы проводимого теоретического исследования, так и при написании разделов данной статьи.

The Effect of Printing Edge Defects on the Electrodynamic Characteristics of the Patch Antennas

Alexander G. Cherevko, Stanislav N. Bylin, Vitaly V. Lubsky

Siberian State University of Telecommunications and Information Science (SibSUTIS)

Abstract: The influence of repeatability and random edge defects on the frequency dependence of parameter S11 characteristics of a square patch antenna is considered. A certain maximum size of the edge defect, which does not affect its characteristics, is defined. By analogy with a round patch-antenna, it is shown that the dependence of the parameter S11 characteristics on the inverse radius of curvature is linear making it relatively easy to estimate the influence of conformal antenna bending radius on the characteristics.

Keywords: patch antenna, graphene, parameter S11, printing defects, electrodynamic properties

For citation: Cherevko A. G., Bylin S. N., Lubsky V. V. The effect of printing edge defects on the electrodynamic characteristics of the patch antennas (in Russian). *Vestnik SibGUTI*, 2023, vol. 17, no. 3, pp. 123-135. <https://doi.org/10.55648/1998-6920-2023-17-3-123-135>.



Content is available under the license
Creative Commons Attribution 4.0
License

© Cherevko A. G., Bylin S. N.,
Lubsky V. V., 2023

The article was received by the editors 02.04.2023;
Accepted for publication 19.05.2023.

References

1. Prikaz "Ob utverzhdenii Kontseptsii sozdaniya i razvitiya setey 5G/IMT-2020 v Rossiyskoy Federatsii" [Order "On Approval of the Concept for the Creation and Development of 5G/IMT-2020 Networks in the Russian Federation"]. *Minkomsvyazi Rossii*, available at: <https://legalacts.ru/doc/prikaz-minkomsvyazi-rossii-ot-27122019-n-923-ob-utverzhdenii/> (accessed 23.07.2023).
2. Cherevko A. G., Krygin A. S., Ivanov A. I., Soots R. A., Antonova I. V. Benefits of Printed Graphene with Variable Resistance for Flexible and Environmentally Friendly 5G Antennas. *Materials* 2022, iss. 15. 7267.
3. Cherevko A. G., Krygin A. S., Soots R. A., Antonova I. V. Flexible, Eco-Friendly G5 J-Balanced Graphene Resistive Dipole. *Proc. IEEE International Conference on Information, Control, and Communication Technologies (ICCT-2022)*.
4. *Folgirovannyye armirovannyye ftoroplastovyye dielektriki (faf-4d) po gost 21008* [Foil reinforced fluoroplastic dielectrics (faf-4d) according to GOST 21008], available at: <https://halogen.su/news/stati/folgirovannyye-armirovannyye-ftoroplastovyye-dielektriki-faf-4d-po-gost-21008/> (accessed 22.07.2023).
5. Goncharenko I. V. *Antenny KV i UKV. Osnovy i Praktika* [HF and VHF antennas. Fundamentals and Practice]. Moscow, IP RadioSoft, 2010. 256 p.
6. Kubanov V. P., Ruzhnikov V. A., Spodobaev M. Yu., Spodobaev Yu. M. *Osnovy teorii anten i rasprostraneniya radiovoln* [Fundamentals of the theory of antennas and propagation of radio waves]. S, INULPGUTI, 2016. 258 p.
7. Il'in E. M., Krivov Yu. N., Polubekhin A. I., Krenev A. N., Cherevko A. G., Mnogofunktsional'nyi bortovoi RLK s konformnoi antennoi sistemoi dlya bespilotnykh letatel'nykh apparatov maloi dal'nosti [Multifunctional airborne radar with a conformal antenna system for short-range unmanned aerial vehicles]. *Vestnik SibGUTI*, 2018, no. 3, pp. 79-88.
8. Kisel' N. N., Grishchenko S. G., Derachits D. S. Issledovanie nizkoprofil'nykh konformnykh mikropoloskovykh anten [Study of low-profile conformal microstrip antennas]. *Izvestiya YuFU. Tekhnicheskiye nauki*, 2015, no. 3 (164), available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/issledovanie-nizkoprofilnykh-konformnykh-mikropoloskovykh-anten> (accessed 22.07.2023).
9. *Generator sluchaynykh chisel* [Random number generator], available at: <https://randstuff.ru/number/> (accessed 22.07.2023).

Cherevko Alexander Grigorievich

Cand. of Sci. (Physics and Mathematics), Associate Professor, Head of the Department of Physics, SibSUTIS (630102, Novosibirsk, Kirov St., 86), e-mail: persp14@mail.ru, ResearcherID: ABG-7540-2020, ORCID ID: 0000-0002-3229-2007.

Bylin Stanislav Nikolaevich

Student of SibSUTIS (630102, Novosibirsk, Kirova str., 86), e-mail: stasbylin@gmail.ru, ResearcherID: IYC-5381-2023, ORCID ID: 0009-0009-0572-3025.

Lubsky Vitaly Vladimirovich

Senior Lecturer of the Department of Physics, SibSUTIS (630102, Novosibirsk, Kirova st., 86), e-mail: vv10777@mail.ru, SPIN-код: 6047-3420, AuthorID: 1093263, ORCID ID: 0009-0002-1852-8922.