

УДК 004.89:629.375

ИССЛЕДОВАНИЕ СТАТИЧЕСКОЙ ЭФФЕКТИВНОЙ ОТРАЖАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ БЛА DJI PHANTOM 3 PRO

ХРАМЕНКОВ А. С., ЧИГРЯЙ В. Г., ЕГОРОВ Ю. Н.

*Учреждение образования «Военная академия Республики Беларусь»
(г. Минск, Республика Беларусь)*

Аннотация. В докладе представлены результаты исследования статической эффективной отражающей поверхности (ЭОП) малоразмерного беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 3 PRO для частот 9,3 и 12 ГГц на линейной горизонтальной и вертикальной поляризациях. Исследование ЭОП проводилось методом электродинамического моделирования с использованием специализированного пакета программ CST STUDIO SUITE 2019, а также экспериментальным путем в безэховой камере и с помощью сверхширокополосного автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса. В результате анализа отражающих свойств беспилотного летательного аппарата DJI Phantom 3 PRO получены диаграммы обратного вторичного излучения, вычислено среднее значение ЭОП, по критерию согласия Колмогорова-Смирнова оценен вид закон распределения ЭОП.

Abstract. The article presents the results of a study of the static Radar Cross Section (RCS) of the small-sized unmanned aerial vehicle DJI Phantom 3 PRO for frequencies 9,3 and 12 GHz in linear horizontal and vertical polarizations. The study of RCS was carried out by the method of electrodynamic modeling using a specialized software package CST STUDIO SUITE 2019, as well as experimentally in an anechoic chamber and with the help of an ultra-wideband automated measuring and computing complex. As a result of the analysis of the reflective properties of the unmanned aerial vehicle DJI Phantom 3 PRO, diagrams of the back-to-back radiation were obtained, the average value of the RCS was calculated, according to the criterion of agreement Kolmogorova-Smirnova estimate kind of RCS distribution law.

Введение

В настоящее время наблюдается тенденция повышения популярности и широкого применения малоразмерных беспилотных летательных аппаратов (БЛА) в гражданской сфере. Многие из них приобретаются в любительских целях, другие используются в коммерческих целях, таких как аэрофотосъемка и геодезия. Следует отметить, что в зонах боевых действий коммерчески доступные БЛА могут использоваться в военных интересах. Так малоразмерный БЛА, оснащенный видеокамерой, может применяться сухопутными войсками и использоваться для ведения разведки на тактическом уровне [1]. Имеющиеся в продаже беспилотные летательные аппараты могут быть адаптированы к перевозке небольших, но потенциально смертоносных взрывчатых веществ (например, ручной гранаты). В ходе проведения боевых действий могут быть задействованы БЛА различных типов. Их применение затрудняет скрытное развертывание и изменение позиции вражеских войск и транспортных средств.

В связи с этим актуальной практической и научной задачей является исследование и анализ отражающих способностей малоразмерных БЛА в различном диапазоне частот для различного вида поляризации. Отражающая способность цели характеризуется ее эффективной отражающей поверхностью (ЭОП) [2]. Зависимость ЭОП цели от угла ориентации относительно радиолокатора на цель представляет собой диаграмму обратного вторичного излучения (ДОВИ). Практическая значимость исследования ДОВИ цели заключается в возможности использования результатов при оценивании потенциальной дальности обнаружения малоразмерных БЛА существующими и перспективными радиолокаторами. Научная значимость исследования ДОВИ цели заключается в возможности использования результатов при формировании математической модели радиолокационной цели типа малоразмерный БЛА, а также при выделении отличительных признаков малоразмерных БЛА с целью их селекции на фоне других воздушных объектов и помех.

В рамках научных исследований проводился анализ статической эффективной отражающей поверхности малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO. Исследования проводились в X диапазоне для частот 9,3 и 12 ГГц на линейной горизонтальной и вертикальной поляризациях относительно строительной оси БЛА.

Основная часть

Диаграмма обратного вторичного излучения анализируемой цели может быть получена путем экспериментального измерения полей рассеяния реальной цели (масштабной модели) или путем электродинамического моделирования. Для проведения исследований ЭОП малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO с помощью систем электродинамического моделирования использовался специализированный пакет программ CST STUDIO SUITE 2019 компании CST [3]. Проведение электродинамического моделирования предполагало наличие трехмерной (3D) модели малоразмерного БЛА. Соответствующая модель БЛА DJI Phantom 3 PRO была взята с веб-сайта GrabCAD.com.

Экспериментальное измерение полей рассеяния реальной цели DJI Phantom 3 PRO проводилось в безэховой камере (БК) на базе учреждения образования «Военная академия Республики Беларусь» и с помощью сверхширокополосного автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса (СШП АИВК) компании Geozondas [4], на базе Республиканского научно-производственного унитарного предприятия «Центр радиотехники Национальной академии наук Беларуси» [5].

На рисунке 1, *а* представлена схема размещения измерительной аппаратуры при проведении исследований ЭОП БЛА DJI Phantom 3 PRO (рисунком 1, *б*) в безэховой камере.

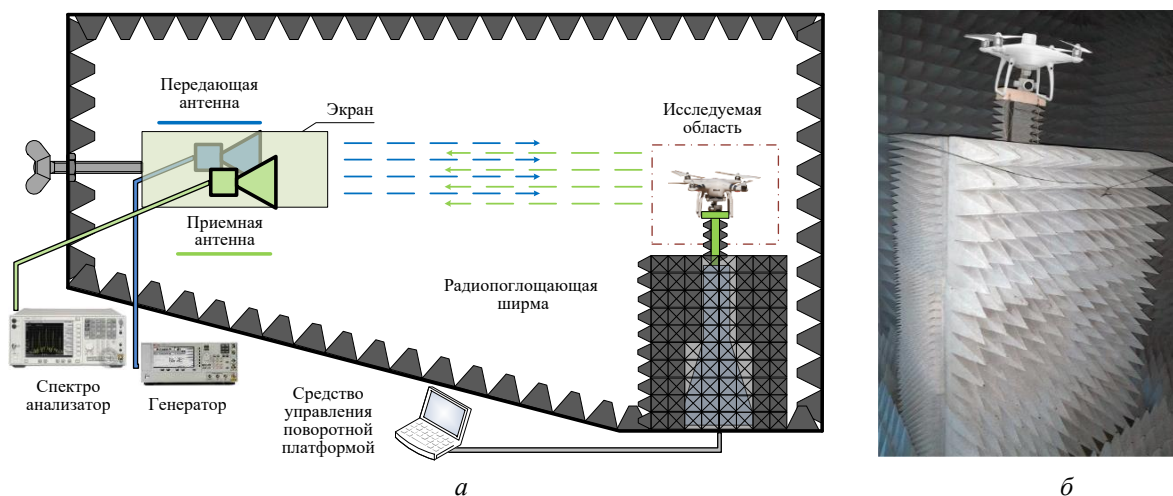


Рис. 1. Схема размещения измерительной аппаратуры при проведении исследований ЭОП в безэховой камере: *а* – внешний вид; *б* – крепление малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO

Следует отметить, что в используемой БК не обеспечивается полная компенсация собственных отражений камеры. Таким образом, результаты, полученные в БК, могут использоваться только в качестве грубой оценки среднего ЭОП малоразмерного БЛА и не позволяют судить о форме ДОВИ.

На рисунке 2, *а* представлена схема размещения СШП АИВК компании Geozondas [4] для проведения исследований ЭОП БЛА DJI Phantom 3 PRO (рисунком 2, *б*).

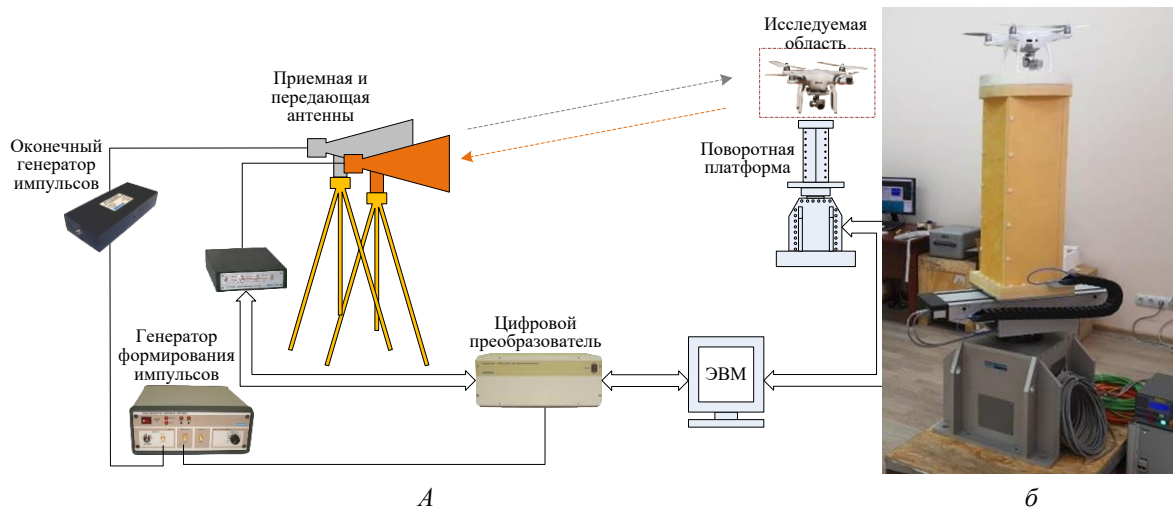


Рис. 2. Схема размещения СШП АИВК компании Geozondas при проведении исследований ЭОП БЛА: *а* – внешний вид; *б* – крепление малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO

Применение СШП АИВК позволяет отказаться от использования дорогостоящих безэховых камер и размещать комплекс в обычных помещениях, поскольку при этом обеспечивается возможность временной селекции полезного сигнала и мешающих отражений от стен, пола, потолка. Использование в СШП АИВК сверхкоротких импульсных сигналов, имеющих широкий спектр практически от десятков МГц до десятков ГГц, обеспечивает возможность оперативного проведения исследований. Исследование ЭОП проводится одновременно во всей полосе частот без перестройки передающей и приемной систем.

Оценивание отражательной способности малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO проводилось путем электродинамического моделирования и экспериментального измерения (в БК и с помощью СШП АИВК). С этой целью были получены ДОВИ малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO применительно

к трем фиксированным значениям углового положения цели в вертикальной плоскости $\Theta = 0^\circ, 10^\circ, 20^\circ$ для частот 9,3 и 12 ГГц на линейной горизонтальной поляризации. На основании измеренных ДОВИ, были получены средние значения ЭОП ($\sigma_{\text{ср}}$) DJI Phantom 3 PRO. На рисунке 3 представлены средние значения ЭОП DJI Phantom 3 PRO в зависимости от углового положения цели в вертикальной плоскости, полученные различными методами.

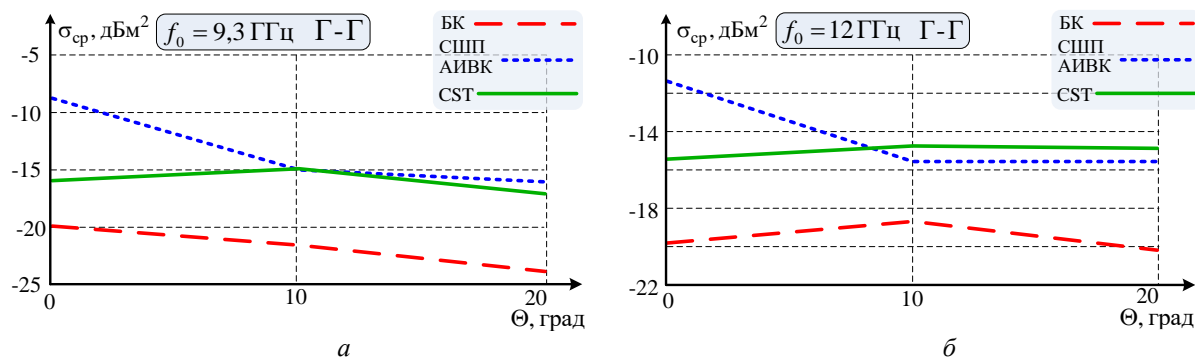


Рис. 3. Зависимости среднего значения ЭОП DJI Phantom 3 PRO в зависимости от углового положения цели в вертикальной плоскости, полученные различными методами для частоты: а – 9,3 ГГц; б – 12 ГГц

Представленные результаты свидетельствуют о том, что средние ЭОП малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO, полученные методом электродинамического моделирования в CST STUDIO SUITE 2019 и экспериментального измерения с помощью СШП АИВК, характеризуются схожими значениями $\sigma_{\text{ср}} = -7 \dots -16$ дБм². В тоже время эти значения отличны от результатов, полученных в БК, где $\sigma_{\text{ср}} = -20 \dots -25$ дБм². Таким образом, дальнейший анализ формы ДОВИ малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO проводился по результатам, полученным с помощью электродинамического моделирования в CST STUDIO SUITE 2019 и экспериментального измерения в СШП АИВК.

В качестве примера на рисунке 4 представлены ДОВИ БЛА DJI Phantom 3 PRO, полученные методом электродинамического моделирования в CST STUDIO SUITE 2019 и с помощью СШП АИВК, применительно к значению углового положения цели в вертикальной плоскости $\Theta = 10^\circ$ для частот 9,3 и 12 ГГц на линейной горизонтальной и вертикальной поляризациях.

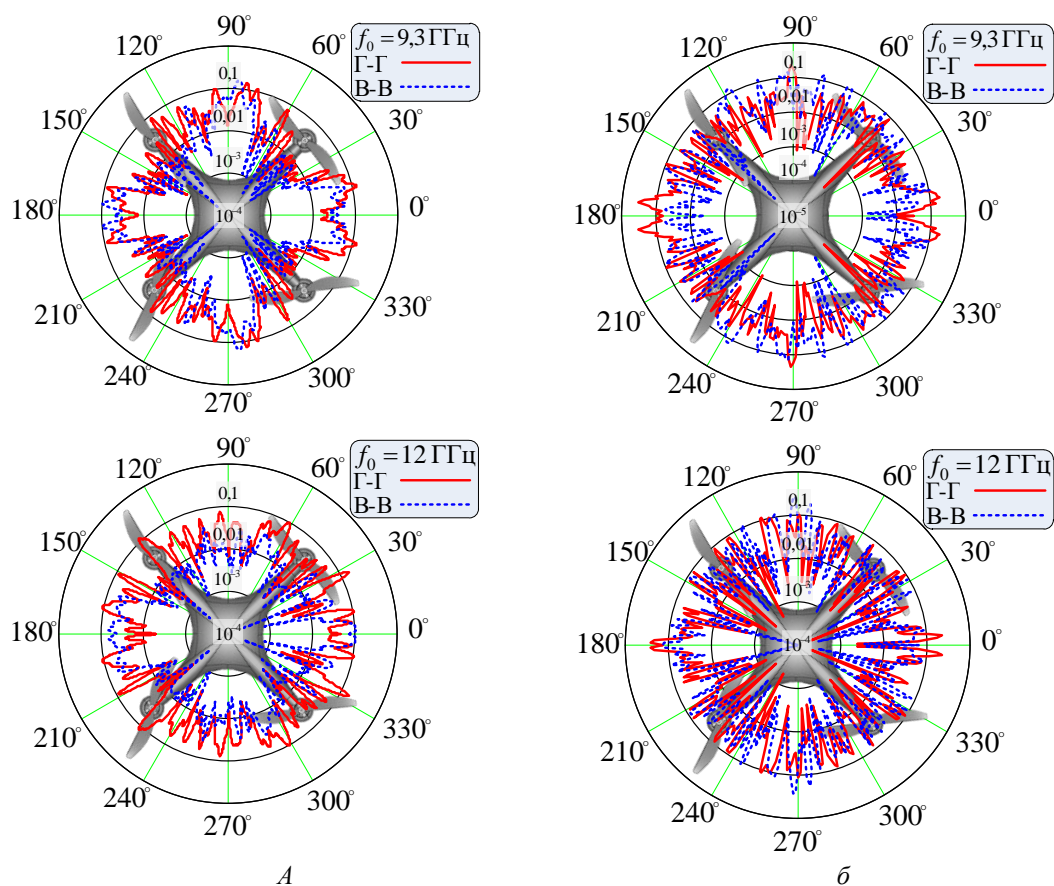


Рис. 4. ДОВИ DJI Phantom 3 PRO, полученные в: а – CST STUDIO SUITE 2019; б – СШП АИВК

Анализ представленных результатов показывает, что форма диаграммы обратного вторичного излучения БЛА имеет изрезанный характер. При этом ширина лепестка ДОВИ с увеличением частоты уменьшается [2]. Отличия в форме ДОВИ, полученной с помощью электродинамического моделирования в CST STUDIO SUITE 2019 (рисунок 4, а) и экспериментального измерения в СШП АИВК (рисунок 4, б), объясняются использованием упрощенной модели БЛА DJI Phantom 3 PRO. При проведении моделирования все детали модели были выполнены из одинакового материала, диэлектрическая и магнитная проницаемость которого определялась параметрами преобладающего материала реального объекта. Среднее значение ЭОП DJI Phantom 3 PRO составило $\sigma_{cp} = 0,025 \text{ м}^2$ при электродинамическом моделировании в CST STUDIO SUITE 2019 и $\sigma_{cp} = 0,036 \text{ м}^2$ при экспериментальном измерении в СШП АИВК.

Поскольку угловое положение радиолокационной цели в пространстве (в вертикальной и горизонтальной плоскостях) можно считать случайным, то и величина ЭОП в каждый отдельный момент времени радиолокационного наблюдения является случайной. Законы распределения этой случайной величины можно определить по рассчитанным (или экспериментально снятым) ДОВИ путем построения соответствующих гистограмм распределения. Гистограмма распределения является наиболее полной характеристикой случайной величины ЭОП [2, 6], с помощью которой можно определить среднее значение, а также квантили заданного порядка p [6].

В интересах анализа закона распределения ЭОП малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO, на основании полученных при проведении исследований ДОВИ, были построены гистограммы распределения ЭОП БЛА DJI Phantom 3 PRO. Для оценивания вида плотности вероятности ЭОП малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO было выдвинуто гипотезы о виде закона распределения. В качестве гипотетических плотностей распределения выступали: показательное (1), максимального значения (2), лог-нормальное (3), гамма (4), Рэлея (5). На рисунке 5 представлен внешний вид эмпирических гистограмм (получены методом электродинамического моделирования и экспериментального измерения) и гипотетических плотностей распределения [6].

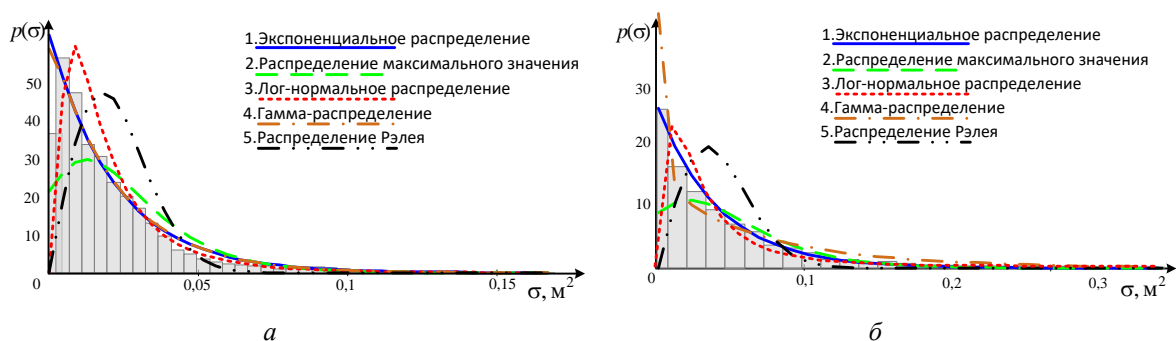


Рис. 5. Эмпирическая гистограмма распределения ЭОП БЛА DJI Phantom 3 PRO, полученная в: *a* – CST STUDIO SUITE 2019; *б* – СШП АИВК

Степень соответствия эмпирической гистограммы и гипотетической плотности распределения оценивалась в соответствии с критерием согласия Колмогорова-Смирнова [7]. Статистика критерия определяется выражением:

$$D_{\sigma} = \max_{\sigma_i} |F_{\sigma}(\sigma_i) - F_{\text{теор}}(\sigma_i, \Theta)|, \quad (1)$$

где $F_{\sigma}(\sigma_i)$ – дискретные отсчеты эмпирической функции распределения ЭОП; $F_{\text{теор}}(\sigma_i, \Theta)$ – дискретные отсчеты теоретической функции распределения ЭОП; Θ – вектор параметров, определяемый в соответствии с теоретической функцией распределения.

Полученная в соответствии с (1) статистика сравнивается с критическим значением $\lambda_{\text{крит}}$:

$$\lambda_{\text{крит}} = \sqrt{\frac{\ln\left(\frac{2}{\alpha}\right)}{2K}}, \quad (2)$$

где α – уровень значимости критерия, K – длина выборки.

В том случае, если полученная статистика D_{σ} (1) меньше критического значения $\lambda_{\text{крит}}$ (2), то выдвинутая гипотеза о виде закона распределения принимается, в противном случае – отвергается.

При оценивании вида закона распределения ЭОП БЛА DJI Phantom 3 PRO, исходя из заданного уровня значимости $\alpha = 0,01$, были рассчитаны критические значения применительно к выборкам, полученным при электродинамическом моделировании в CST STUDIO SUITE 2019 ($\lambda_{\text{крит}} = 0,182$) и при экспериментальном измерении в СШП АИВК ($\lambda_{\text{крит}} = 0,292$). Отличие в критических значениях обусловлено разной длиной выборки, полученной при электродинамическом моделировании и экспериментальном измерении. В таблице 1 приведены результаты оценивания вида закона распределения ЭОП БЛА DJI Phantom 3 PRO по критерию согласия Колмогорова-Смирнова.

Таблица 1. Результаты оценивания вида закона распределения ЭОП БЛА DJI Phantom 3 PRO

Метод исследования	Частота, поляризация	Законы распределения				
		1	2	3	4	5
CST STUDIO SUITE 2019	12 ГГц,	0,059	0,253	0,159	0,061	0,273
СШП АИВК	вертикальная	0,277	0,352	0,309	0,314	0,402

На основании представленных результатов, можно утверждать, что закон распределения ЭОП БЛА DJI Phantom 3 PRO наиболее согласуется с показательным законом распределения.

Заключение

В докладе представлены результаты анализа статической эффективной отражающей поверхности малоразмерного БЛА DJI Phantom 3 PRO. Исследования ЭОП проводились методом электродинамического моделирования и экспериментальным путем применительно для частот 9,3 и 12 ГГц на линейной горизонтальной и вертикальной поляризациях. Электродинамическое моделирование осуществлялось на основе имеющейся 3D модели БЛА DJI Phantom 3 PRO с использованием специализированного пакета программ CST STUDIO SUITE 2019. Экспериментальное исследование ЭОП DJI Phantom 3 PRO проводилось в безэховой камере и с помощью сверхширокополосного автоматизированного измерительно-вычислительного комплекса.

В результате проведенных исследований БЛА DJI Phantom 3 PRO были получены диаграммы обратного вторичного излучения, вычислено среднее значение ЭОП $\sigma_{\text{ср}} = 0,025 - 0,036 \text{ м}^2$, по критерию согласия Колмогорова-Смирнова оценен вид закона распределения ЭОП. Полученная гистограмма распределения ЭОП БЛА DJI Phantom 3 PRO наиболее согласуется с показательным законом распределения. Представленные результаты могут быть использованы в интересах оценивания потенциальной дальности обнаружения малоразмерных БЛА, формирования математической модели радиолокационной цели типа малоразмерный БЛА, а также для анализа отличительных признаков малоразмерных БЛА с целью их селекции на фоне других воздушных объектов и помех.

Список использованных источников

1. Radar Countermeasures for Unmanned Aerial Vehicles / Carmine Clemente, Francesco Fioranelli, Fabiola Colone and Gang Li. – London: SciTech Publishing, 2021. – 394 p.
2. Охрименко, А. Е. Основы радиолокации и радиоэлектронная борьба. Ч. 1. / А. Е. Охрименко. – М. : Воен. издат., 1983. – 456 с.
3. Курушин, А.А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST Microwave Studio / А.А. Курушин, А.Н. Пластиков. – Москва: Издательство МЭИ, 2011. – 155 с.
4. Levitas, V. N. Time Domain Antenna Measurement Systems // Ultrawideband and Ultrashort Impulse Signals, Sevastopol, Ukraine, 18-22 September 2006 – Sevastopol, 2006. – P. 90 – 95.
5. Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: Интернет-портал Республики Беларусь [Электронный ресурс]. – Режим доступа: [https:// radiotechnika.by/](https://radiotechnika.by/) – Дата доступа : 14.10.2022.
6. Вадзинский, Р.Н. Справочник по вероятностным распределениям / Р. Н. Вадзинский. – СПб. : Наука, 2001. – 295 с.
7. Лемешко, Б.Ю. Непараметрические критерии согласия / Б.Ю. Лемешко. – Москва: «ИНФРА-М», 2014. – 163 с.