

# ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕЧАТНОЙ АНТЕННЫ ОТ ФОРМЫ ЗАДАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ

Д. Г. Король

*Проведено исследование зависимости параметров прямоугольной печатной антенны от формы поверхности, на которой она располагается. Сравнивалась плоская печатная антенна и нанесенные на цилиндры разного диаметра и шар. Оценили влияние поверхности на число рабочих диапазонов и график обратных потерь  $S_{11}$ . Оценку характеристик проводили с использованием пакета электродинамического моделирования HFSS.*

*Ключевые слова:* печатная антенна, конформные антенны, HFSS, моделирование антенн.

## 1. Введение

На сегодняшний день одним из важных научно-технических направлений является разработка выпуклых антенных решеток, повторяющих форму объекта, на котором они расположены. Эти антенны называются конформными и их используют в спутниковой связи, авиации т. д. В качестве основного элемента конформной антенны удобно использовать печатный излучатель, так как он легко принимает форму выпуклой поверхности, дешев в изготовлении и хорошо встраивается в печатные платы [1]. При выборе печатного излучателя для летательного аппарата можно остановиться на дипольной антенне, размещенной на крыле самолета [2]. В [3] предлагается подход по синтезу линейной конформной фазированной решетки, напечатанной на полиимидной пленке для системы беспилотного летательного аппарата (БПЛА) в широком диапазоне сканирования. При необходимости можно сформировать луч для сканирования в секторе 360 градусов [4, 5].

Также в качестве основного элемента антенны можно использовать прямоугольный печатный излучатель [6]. Его можно использовать для создания сложных структур в задачах синтеза GPS-антенн с низким профилем и высокой производительностью для размещения на внешних металлических слоях кораблей и самолетов [7]. В [8, 9] технологию печатных антенн применяют для решения задачи по проектированию бортовых антенных систем космических аппаратов.

При увеличении длины прямоугольного печатного излучателя формируются новые резонансные частоты, и их грамотная оптимизация позволяет излучать или принимать сигнал в нескольких частотных диапазонах [10]. Это расширяет возможности по эффективному использованию антенн.

Для решения задачи определения параметров антенны до стадии изготовления и непосредственного измерения готовой антенны используют программы электродинамического моделирования [4, 5, 11 – 13].

Целью работы является исследование изменений значения и положения коэффициента обратного отражения  $S_{11}$ , показывающий степень согласованности антенны на основной частоте, а также на частотах побочных резонансов. Данный результат можно использовать при проектировании антенной системы, размещенной на летательном аппарате, с учетом влияния конструкции корпуса.

## 2. Прямоугольный печатный излучатель

Мы будем исследовать печатную антенну, рассчитанную на основную частоту  $f_{\text{осн}} = 3$  ГГц ( $\lambda = 10$  см). Общие принципы проектировки печатных излучателей представлены в [6, 7, 9, 10]. В качестве диэлектрической подложки для сверхвысокочастотных (СВЧ) печатных плат можно использовать материалы, производимые компанией Taconic [14]. Выберем материал RF-41 с диэлектрической проницаемостью  $\epsilon_r = 4,1$ . Определимся с геометрическими размерами:

1. Ширина печатного излучателя  $W$ :

$$W = \frac{\lambda}{2\sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}}. \quad (1)$$

2. Толщину диэлектрического основания  $h$  можно оценить из следующего соотношения:

$$h = (0,1 \dots 0,01)\lambda, \quad (2)$$

$$h = 10 \dots 1 \text{ мм.}$$

Выберем  $h = 1,57$  мм из стандартных толщин печатных плат RF-41.

3. Эффективная диэлектрическая постоянная  $\epsilon_{\text{eff}}$ :

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left( \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2h}{W}}} \right). \quad (3)$$

4. Длина печатного излучателя  $L$ :

$$L = \frac{\lambda}{2\sqrt{\epsilon_{eff}}}. \quad (4)$$

Размеры элементов согласования были получены при оптимизации для обеспечения значения параметра  $S_{11}$  ниже  $-10$  дБ на частоте 3 ГГц. Размеры питающей линии выбирались из цели обеспечить сопротивление 50 Ом. Общая геометрия печатного излучателя с указанием геометрических размеров представлена на рис. 1. Получили рабочую полосу частот, равную 70 МГц на 3 ГГц, и несколько побочных резонансов на частотах 4,6; 5,525; 6,15 и 7,65 ГГц. Коэффициент усиления (КУ) на частоте  $f_{осн}$  равен 9,8 дБ.

### 3. Численное моделирование

В программе HFSS построили печатный излучатель и нанесли его на поверхности различной формы. Общая геометрия представлена на рис. 2. Геометрия выбиралась из соображения изогнуть излучатель в горизонтальной и вертикальной плоскости. Соответственно цилиндр изгибает только в одной из плоскостей, а шар одновременно в 2-х плоскостях. Уменьшая радиус цилиндра, мы получаем более высокий изгиб нашего излучателя.

Задача состоит в определении частот побочных резонансов и наблюдении за смещением рабочей частоты. Побочные резонансы, если они хорошо разнесены с основной частотой, интересны возможностью их использования в передаче данных и в целом для печатной антенны – это дать возможность работать одновременно на нескольких частотах. А вот смещение рабочей частоты довольно нежелательный эффект, который означает, что в

конструкцию антенны нужно внести изменения для возвращения резонанса на основную частоту.

Результаты, представленные на рис. 3, сведены в отдельную таблицу. Плоский печатный излучатель позволяет получить наибольшее количество побочных резонансных частот. Частота основного излучения при изменении формы излучателя увеличивается. Случаи 2), 4) и 6) из таблицы демонстрируют существенные отклонения от частоты 3 ГГц, что приводит к отсутствию излучения на требуемой частоте. Наибольшее смещение наблюдается при изгибе в вертикальной плоскости.

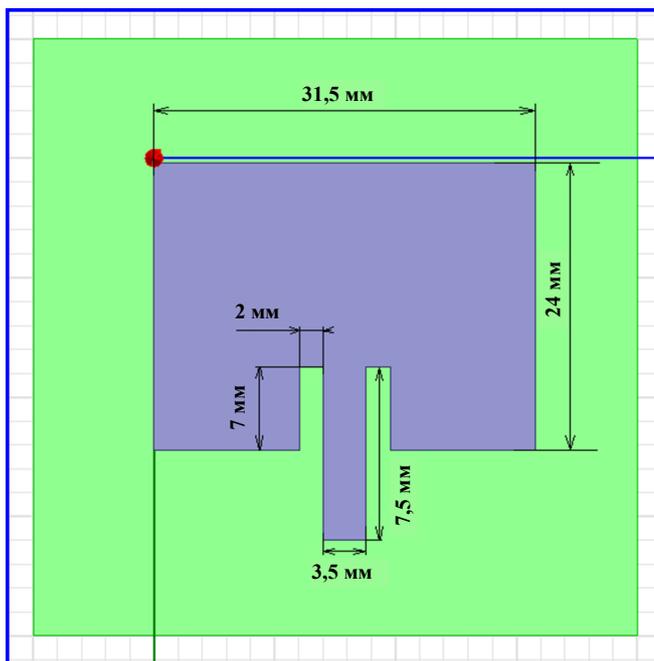


Рис. 1. Геометрия печатного излучателя

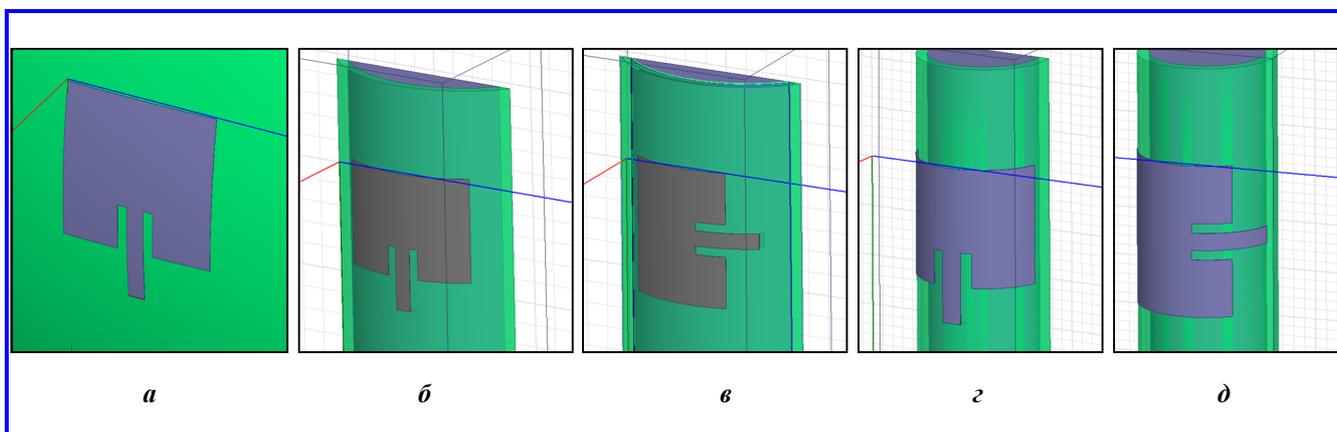
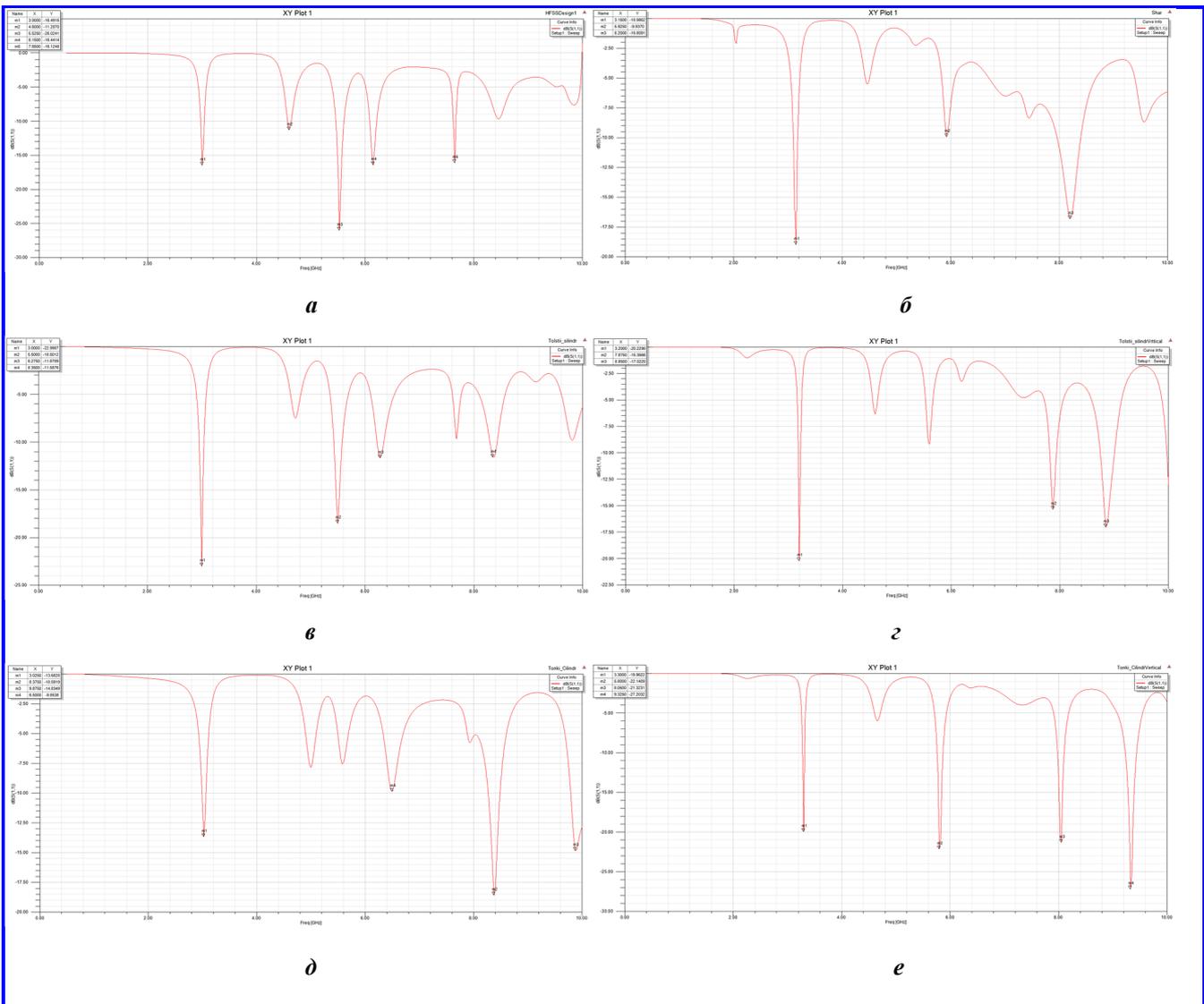


Рис. 2. Антенна в виде: *a* – излучателя, расположенного на шаре радиусом 100 мм; *б* – излучателя, расположенного на цилиндре радиусом 30 мм, выгнутого горизонтально; *в* – излучателя, расположенного на цилиндре радиусом 30 мм, выгнутого вертикально; *з* – излучателя, расположенного на цилиндре радиусом 12 мм, выгнутого горизонтально; *д* – излучателя, расположенного на цилиндре радиусом 12 мм, выгнутого вертикально

Таблица

**Частотные параметры печатной антенны**

	$f_{осц}$ , ГГц	Частоты побочных резонансов, ГГц
1) плоский печатный излучатель	3	4,6; 5,525; 6,15; 7,65
2) печатный излучатель, расположенный на шаре радиусом 100 мм	3,15	5,925; 8,2
3) печатный излучатель, расположенный на цилиндре радиусом 30 мм, выгнутый горизонтально	3	5,5; 6,275; 8,35
4) печатный излучатель, расположенный на цилиндре радиусом 30 мм, выгнутый вертикально	3,2	7,876; 8,85
5) печатный излучатель, расположенный на цилиндре радиусом 12 мм, выгнутый горизонтально	3,025	6,5; 8,375; 9,875
6) печатный излучатель, расположенный на цилиндре радиусом 12 мм, выгнутый вертикально	3,3	5,8; 8,05; 9,325



**Рис. 3. График  $S_{11}$ : а – плоского печатного излучателя; б – печатного излучателя, расположенного на шаре радиусом 100 мм; в – печатного излучателя, расположенного на цилиндре радиусом 30 мм, выгнутого горизонтально; г – печатного излучателя, расположенного на цилиндре радиусом 30 мм, выгнутого вертикально; д – печатного излучателя, расположенного на цилиндре радиусом 12 мм, выгнутого горизонтально; е – печатного излучателя, расположенного на цилиндре радиусом 12 мм, выгнутого вертикально**

#### 4. Выводы

Форма задающей поверхности выпуклой антенны сильно влияет на ее характеристики. Из полученных результатов можно сделать вывод, что на смещение частоты основного излучения наибольшее влияние оказывает изгиб в вертикальной плоскости. В горизонтальной плоскости этот эффект наблюдается только при очень большом изгибе задающей поверхности. Помимо основной частоты смещению также подвержены частоты побочных резонансов. Это означает, что требуется дополнительная оптимизация размеров излучателя. Подбор побочных резонансов может уменьшить число антенн для передачи сигнала и повысить эффективность их использования для работы на нескольких частотах. В нашем случае при постоянстве размеров излучателя наибольшее количество побочных резонансов было получено для случая плоского печатного излучателя.

#### Литература

1. Устройства СВЧ и антенны. Проектирование фазированных антенных решеток : учебное пособие для вузов / Под ред. Д. И. Воскресенского. – 4-е изд., перераб. и доп. – Москва : Радиотехника, 2012 – 744 с. : ил.
2. A design of conformal dipole array for aircraft applications / Yunfei Qiang, Lin Guo, Jing M. [et al.] // IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – 2016. – DOI : 10.1109/icmmt.2016.7761809.
3. Conformal Phased Array Antenna for Unmanned Aerial Vehicle with  $\pm 70^\circ$  Scanning Range / Jun-Jie Peng, Shi-Wei Qu, Mingyao Xia [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2021. – Vol. 69. – Issue 8. – P. 4580–4587. – DOI : 10.1109/tap.2021.3060125.
4. Король Д. Г. Построение и моделирование конформных антенных решеток с печатным излучателем / Д. Г. Король // Сборник тезисов работ международной молодежной научной конференции XLVIII Гагаринские чтения 2022. – Москва : Издательство «Перо», 2022. – С. 321. – URL : <https://gagarin.mai.ru/files/2022/abstracts2022.pdf>.
5. Король Д. Г. Оптимизация числа излучателей конформной антенной решетки летательного аппарата на основе генетического алгоритма / Д. Г. Король, В. С. Темченко // 21-я Международная конференция «Авиация и космонавтика». 21 – 25 ноября 2022 года. Москва. Тезисы. – Москва : Издательство «Перо», 2022. – С. 293. – URL : <https://aik.mai.ru/files/abstracts2022.pdf>.
6. Касьянов А. О. Апертурные антенны в печатном исполнении. Методы проектирования и области применения : Монография / А. О. Касьянов. – Ростов-на-Дону – Таганрог : Издательство Южного федерального университета, 2021. – 201 [2] с.
7. Conformal Patch Antenna Arrays Design for Onboard Ship Deployment Using Genetic Algorithms / S. A. Miti-lineos, S. K. Symeonidis, I. B. Mpatsis [et al.] // Advances in Power Electronics. – 2013. – P. 1–5. – DOI : 10.1155/2013/960514.
8. Бочаров В. С. Выбор диэлектрика подложки микрополосковой антенны при построении миниатюрной антенны / В. С. Бочаров, А. Г. Генералов, Э. В. Гаджиев // Антенны. – 2014. – № 12 (211). – С. 38 – 44.
9. Моделирование бортовой микрополосковой антенны / Е. В. Овчинникова, С. Г. Кондратьева, В. С. Бочаров [и др.] // Антенны. – 2016. – № 7 (227). – С. 10 – 22.
10. Исследование влияния длины патч-излучателя на его характеристики / С. М. Фёдоров, Е. А. Ищенко, М. А. Сиваш [и др.] // Вестник Воронежского государственного технического университета. – 2020. – Т. 16. – № 2. – С. 113 – 120.
11. Оценка результатов моделирования бортовых антенн с помощью САПР / Е. В. Овчинникова, П. А. Шмачилин, С. Г. Кондратьева [и др.] // Фундаментальные проблемы радиоэлектронного приборостроения. – 2018. – Т. 18. – № 4. – С. 896 – 899.
12. Гаджиев Э. В. Исследование характеристик направленности бортовых антенн космических аппаратов на ранней стадии разработки путём компьютерного моделирования / Э. В. Гаджиев, Е. В. Овчинникова, П. А. Шмачилин // Гагаринские чтения – 2016. XLII Международная научная молодежная конференция: Сборник тезисов докладов конференции. В 4-х томах. Том 1. Москва, 12 – 15 апреля 2016 года. – Москва : Московский авиационный институт (национальный исследовательский университет), 2016. – С. 509 – 510.
13. Вопросы моделирования антенно-фидерных устройств / В. О. Скрипачев, Э. В. Гаджиев, С. Г. Кондратьева [и др.] // Современные информационные технологии и ИТ-образование : Сборник научных трудов III Международной научной конференции «Конвергентные когнитивно-информационные технологии» и XIII Международной научно-практической конференции «Современные информационные технологии и ИТ-образование», Москва, 29 ноября – 02 декабря 2018 года / Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова; Федеральный исследовательский центр «Информатика и управление» РАН. – Москва : Лаборатория Открытых Информационных Технологий факультета ВМК МГУ им. М.В. Ломоносова, 2019. – С. 227 – 233.
14. Орехов С. Материалы компании Taconic для СВЧ и высокотемпературных печатных плат / С. Орехов // СВЧ электроника. – 2017. – № 3. – С. 44 – 46.

Поступила в редакцию 10.10.2022

*Данил Геннадиевич Король, магистр кафедры 406 «Радиофизика, антенны и микроволновая техника», т. +7(968)594-32-48, e-mail: Dan0932@yandex.ru. (Московский авиационный институт (Национальный исследовательский университет)).*

## INVESTIGATION OF DEPENDENCY OF CHARACTERISTICS OF PRINTED ANTENNA ON THE SHAPE OF SURFACE OF ITS LOCATION

D. G. Korol

*An investigation of dependency of parameters of a rectangular printed antenna on the shape of the surface of its location, is performed in the article. A flat printed antenna and antennas applied on cylinders of various diameters and a sphere were compared. The influence of the surface on the quantity of operating ranges and on return losses diagram  $S_{11}$  was assessed. The assessment of characteristics was performed using the HFSS electrodynamic simulation package.*

**Key words:** printed antenna, conformal antennas, HFSS, antenna modeling.

1. Antennas. Designing of phased antenna arrays : textbook for higher educational institutions / Edited by D. I. Voskresensky. – 4th edition, revised and updated. Moscow : Radiotekhnika, 2012 –744 p.: with figures.
2. A design of conformal dipole array for aircraft applications / Yunfei Qiang, Lin Guo, Jing M. [et al.] // IEEE International Conference on Microwave and Millimeter Wave Technology (ICMMT). – 2016. – DOI : 10.1109/icmmt.2016.7761809.
3. Conformal Phased Array Antenna for Unmanned Aerial Vehicle with  $\pm 70^\circ$  Scanning Range / Jun-Jie Peng, Shi-Wei Qu, Mingyao Xia [et al.] // IEEE Transactions on Antennas and Propagation. – 2021. – Vol. 69. – Issue 8. – P. 4580 – 4587. – DOI : 10.1109/tap.2021.3060125.
4. Korol D. G. Designing and simulation of conformal antenna arrays with a printed radiator / D. G. Korol // Collected abstracts of scientific papers of the XLVIII International youth scientific conference Gagarin readings 2022. – Moscow : Pero publishing house, 2022. – P. 321. – URL : <https://gagarin.mai.ru/files/2022/abstracts2022.pdf>.
5. Korol D. G. Optimization of the number of radiators of satellite conformal antenna array based on genetic algorithm / D. G. Korol, V. S. Temchenko // 21st International conference ‘Aviation and Cosmonautics’. November 21 – 25, 2022. Moscow. Abstracts. – Moscow : Pero publishing house, 2022. – P. 293. – URL : <https://aik.mai.ru/files/abstracts2022.pdf>.
6. Kasyanov A. O. Printed aperture antennas. Design techniques and applications : Monograph / A. O. Kasyanov. Rostov-on-Don – Taganrog : Publishing house of the Southern Federal University, 2021. –201 p. [2].
7. Conformal Patch Antenna Arrays Design for Onboard Ship Deployment Using Genetic Algorithms / S. A. Mitilineos, S. K. Symeonidis, I. B. Mpatsis [et al.] // Advances in Power Electronics. – 2013. – P. 1 – 5. – DOI : 10.1155/2013/960514.
8. Bocharov V. S. Selection of dielectric substrate of microstrip antenna in the designing of a miniature antenna / V. S. Bocharov, A. G. Generalov, E. V. Gadzhiev // Antennas. – 2014. – No. 12 (211). – Pp. 38 – 44.
9. Modeling on-board microstrip antenna / E. V. Ovchinnikova, S. G. Kondratyeva, V. S. Bocharov [et al.] // Antennas. – 2016. – No. 7 (227). – Pp. 10 – 22.
10. Investigation of the effect of the patch emitter length on its characteristics / S. M. Fedorov, E. A. Ishchenko, M. A. Sivash [et al.] // Journal of Voronezh State Technical University. – 2020. – V. 16. – No. 2. – Pp. 113 – 120.
11. Assessment of results of on-board antenna modeling with the help of CAD / E. V. Ovchinnikova, P. A. Shmachilin, S. G. Kondratyeva [et al.] // Fundamental problems of radioelectronic instrument engineering. – V. 18. – No. 4. – Pp. 896 – 899.
12. Gadzhiev E. V. Investigation of satellite on-board antennas directivity characteristics at an early stage of development by means of computer modeling / E. V. Gadzhiev, E. V. Ovchinnikov, P. A. Shmachilin // Gagarin readings – 2016. XLII International youth scientific conference: Collected abstracts of conference papers. In 4 volumes. Volume 1. Moscow, April 12 – 15, 2016. – Moscow : Moscow Aviation Institute (National Research University), 2016. – Pp. 509 – 510.
13. Matters of modeling of antenna-feeder devices / V. O. Skripachev, E. V. Gadzhiev, S. G. Kondratyeva [et al.] // Modern information technologies and IT education : Collected scientific works of III International scientific conference ‘Convergent cognitive and information technologies’ and XIII International research and practical conference ‘Modern information technologies and IT education’, Moscow, November 29 – December 02, 2018 / Lomonosov Moscow State University; Federal research center ‘Computer science and management’ of the Russian Academy of Sciences. – Moscow : Open Information Technologies Lab of the faculty of Computational Mathematics and Cybernetics of Lomonosov Moscow State University, 2019. – Pp. 227 – 233.
14. Orekhov S. Materials produced by Taconic for microwave and high temperature printed circuit boards / S. Orekhov // Microwave electronics. – 2017. – No. 3. – Pp. 44 – 46.

*Danil Gennadyevich Korol, Master of Sciences, department 406 «Radiophysics, antennas and microwave engineering», tel.: +7(968)594-32-48, e-mail: Dan0932@yandex.ru. (Moscow Aviation Institute (National Research University)).*