

**ОПТИМИЗАЦИЯ КОНСТРУКЦИИ ДИСКОВОЙ АНТЕННЫ КРУГОВОГО ОБЗОРА
МИКРОВОЛНОВОГО ДИАПАЗОНА
ДЛЯ ДАТЧИКОВ, СОДЕРЖАЩИХ ПРИЕМО-ПЕРЕДАЮЩИЕ УСТРОЙСТВА**В. П. Заярный^{1*}, Е. И. Нефёдов², Ю. И. Сидякин¹, И. Н. Пономарев³, Д. В. Заярный¹¹Волгоградский государственный технический университет, Волгоград, Россия
*zvp2000@mail.ru²Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН,
Фрязино, Московская обл., Россия³Волгоградский государственный университет, Волгоград, Россия

Аннотация. Описана оптимизированная конструкция дисковой антенны, обеспечивающей круговой (или секторный) обзор в составе датчиков видеонаблюдения (азимутальное перемещение объектов, охранные системы и т.д.). Приведены рассчитанные и измеренные диаграммы направленности излучателей, определяемые их конструктивными особенностями. Эти результаты позволили поэтапно оптимизировать конструкцию антенны, представляющей собой систему из двух идентичных дисков с четырьмя излучателями осевого излучения на каждом диске, идущими радиально от центров. Угол между соседними излучателями на диске составляет 90°. Диски расположены соосно, при этом они азимутально смещены относительно друг друга на угол 45°, что обеспечивает полный круговой или любой секторный обзор в азимутальной плоскости. Для такой конструкции антенны возможно также частотное разделение излучателей. Экспериментально установлено оптимальное расстояние между дисками, обеспечивающее наилучшее (минимальное) перекрытие главных лучей диаграмм направленности излучателей и их электродинамическую развязку, равное длине волны излучения λ для центральной частоты $f_0=10$ ГГц ($\lambda=3$ см). Рабочий диапазон частот антенны 8—12 ГГц.

Ключевые слова: датчик, круговой обзор, антенна, излучатель, диаграмма направленности, сверхбыстрая обработка информации

Ссылка для цитирования: Заярный В. П., Нефёдов Е. И., Сидякин Ю. И., Пономарев И. Н., Заярный Д. В. Оптимизация конструкции дисковой антенны кругового обзора микроволнового диапазона для датчиков, содержащих приемно-передающие устройства // Изв. вузов. Приборостроение. 2022. Т. 65, № 2. С. 125—131. DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-125-131.

**OPTIMIZATION OF MICROWAVE CIRCULAR-VIEW DISC ANTENNA DESIGN
FOR SENSORS CONTAINING TRANSCEIVERS**

V. P. Zayarnyi*, E. I. Nefyodov, Yu. I. Sidiyakin, I. N. Ponomarev, D. V. Zayarnyi

¹Volgograd State Technical University, Volgograd, Russia
zvp2000@mail.ru²V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS,
Fryazino, Moscow region, Russia³Volgograd State University, Volgograd, Russia

Abstract. An optimized design of a disk antenna is described, which provides a circular (or sector) view as part of video surveillance sensors (azimuthal movement of objects, security systems, etc.). Theoretically calculated and experimentally measured radiation patterns of the emitters determined by their design features, are presented. The results allow to optimize gradually design of the all-round looking antenna, which is a system of two identical discs with four axial emitters on each disc extending radially from the discs centers. The angle between adjacent radiators on the disk is 90°. The disks are located coaxially, while they have an azimuthal offset relative to each other at an angle of 45°, which provides a full circular or any sector view in the azimuthal plane. For this antenna design, frequency separation of the radiators is also possible. Experimentally determined optimal distance between the disks providing the best (minimum) overlap of the main beams of the radiation patterns of the radiators and their electrodynamic decoupling, equals to the radiation wavelength λ for the central frequency $f_0 = 10$ GHz ($\lambda = 3$ cm). The operating frequency range of the antenna is 8-12 GHz.

Keywords: sensor, all-round view, antenna, emitter, directional pattern, ultra-fast information processing

For citation: Zayarnyi V. P., Nefyodov E. I., Sidyakin Yu. I., Ponomarev I. N., Zayarnyi D. V. Optimization of microwave circular-view disc antenna design for sensors containing transceivers. *Journal of Instrument Engineering*. 2022. Vol. 65, N 2. P. 125—131 (in Russian). DOI: 10.17586/0021-3454-2022-65-2-125-131.

Известно, что первичные измерительные преобразователи (ПИП), или датчики, являются важнейшей составной частью информационно-измерительных систем, обеспечивающих первичное преобразование измеряемых физических величин к виду, удобному для дальнейшего преобразования и ввода в процессорное средство. В настоящей работе представлена дисковая антенна кругового обзора (АКО) в составе датчиков видеонаблюдения (азимутальное перемещение объектов, охранные системы и т.д.), у которой путем оптимизации конструкции (угла раскрытия у излучателей направленного — осевого — излучения и расстояния между дисками) достигалось наилучшее (минимальное) перекрытие главных лучей диаграмм направленности (ДН) излучателей, обеспечивающее полный круговой или секторный обзор пространства, при сохранении надежности и простоты конструкции АКО. Возможность изменения размеров дисков позволяет разрабатывать АКО для различных устройств этого же класса, в том числе требующих уменьшения размеров, например АКО с минимальным радиусом дисков (до 3 см), востребованные в системах сверхбыстрой обработки информации [1—3].

Описанные, например в [4—6], варианты подобных антенных систем имеют ряд недостатков. Прежде всего, это сложность и жесткость конструкции, не позволяющие оптимизировать форму диаграмм направленности излучателей, регулировать частотный диапазон (что необходимо выполнять при разработке предлагаемой АКО, а при наличии слоя диэлектрика в нем также имеет место потеря энергии).

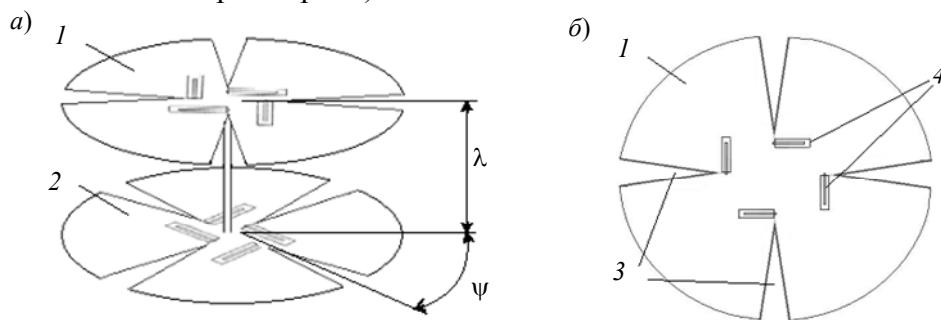


Рис. 1

Общий вид разработанной АКО приведен на рис. 1, а. Она содержит диски 1 и 2 (на рис. 1, б представлен один диск) толщиной 0,3—0,5 мм и радиусом 10,5 см. Расположенные соосно на металлическом стержне диаметром 0,5 см диски выполнены из металла с высокой электропроводностью (медь, алюминий). На дисках имеются излучатели электромагнитного поля 3 в виде линейно расширяющихся щелевых линий и выполненные из медной фольги полосковые линии 4 длиной $2,5\lambda$ (λ — длина волны излучения), шириной 2 мм, предназначенные для согласования излучателей с питающим фидером. Диски 1 и 2 развернуты азимутально относительно друг друга на угол $\psi = 45^\circ$ (рис. 1, а), а угол между соседними излучателями на каждом диске составляет 90° (рис. 1, б).

Предложенная антенна кругового обзора работает следующим образом. При подаче СВЧ-сигнала через полосковые линии 4, являющиеся широкополосными линиями связи с плавным переходом для уменьшения паразитного излучения, в щелях 3 возбуждается электромагнитное поле, которое, проходя вдоль этих щелей, излучается в окружающее пространство, образуя соответствующие диаграммы направленности (ДН). Для обеспечения электродинамической развязки по частоте к излучателям на дисках 1 и 2 возможно подводить сигнал на разных частотах в рабочем диапазоне (8—12 ГГц). При этом диаграммы направленности в электродинамических плоскостях E и H остаются практически неизменными в указанном

частотном диапазоне. Изменение геометрических размеров щелей 3, угла их раскрытия и полосковых линий 4 позволяет регулировать форму ДН излучателей и частотный диапазон излучения.

Наиболее важные электродинамические свойства одиночного излучателя (рис. 2, 1 — симметричная щелевая линия; 2 — линейно расширяющийся раскрыв; 3 — питающая микрополосковая линия; 4 — коаксиальный разъем), на основе которого создавалась АКО, теоретически и экспериментально уже исследовались авторами. Результаты исследований [7—10] получены для излучателей, у которых ширина главного луча ДН регулировалась изменением длины L и угла раскрытия α излучателя (рис. 2). При этом угол раскрытия излучателя изменялся в пределах $30\text{—}120^\circ$. Для проектируемой АКО длина всех излучателей была одинаковой $L=3\lambda=9$ см (на центральной частоте рабочего диапазона $f_0=10$ ГГц, длина волны $\lambda=3$ см).

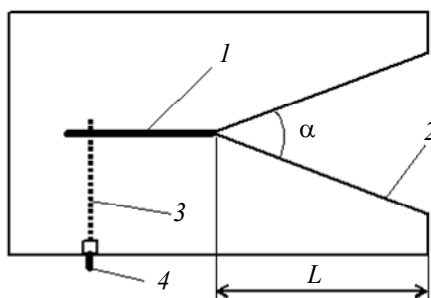


Рис. 2

Расчетные ДН строились согласно модельным представлениям, разработанным в [7, 10—15]. Из анализа геометрического расположения главных лучей ДН, полученных для указанных выше углов раскрытия излучателей, следует, что для обеспечения полного кругового обзора окружающего пространства в азимутальной плоскости достаточно расположить конструктивно вокруг диска восемь излучателей в радиальных от его центра направлениях. Следовательно, ширина ДН каждого излучателя по половинной мощности должна быть порядка 45° . Однако для обеспечения указанной ширины ДН угол раскрытия излучателей должен быть порядка 60° , что конструктивно обеспечить невозможно (из геометрических представлений видно, что угол раскрытия для каждого из восьми излучателей не должен превышать 45°). Эксперимент показал, что для указанного предельного значения угла раскрытия излучателей ($\alpha=45^\circ$) размещение восьми излучателей на одном диске создает неприемлемое перекрытие главных лучей их ДН. Это приводит к недопустимому искажению общей ДН АКО и не обеспечивает приемлемую электродинамическую развязку по частоте для соседних излучателей, работающих на разных частотах.

Обеспечить требуемый угол раскрытия излучателей ($\alpha=60^\circ$) позволяет размещение на одном диске четырех излучателей (рис. 1, б). При этом достигается наилучшее пространственное и частотное разделение ДН излучателей, позволяющее считать их практически независимыми.

Расчетная ДН (нормированная по мощности) для одного такого излучателя, имеющего длину $L=9$ см и угол раскрытия $\alpha=60^\circ$ в электродинамических плоскостях E (угол θ) и H (угол φ), приведена на рис. 3 (вследствие симметрии ДН в обеих электродинамических плоскостях на рис. 3 изображены только их половины). Из рис. 3 видно, что ширина главного луча ДН по половинной мощности в плоскостях E и H для данной конструкции излучателей практически одинакова и равна 52° .

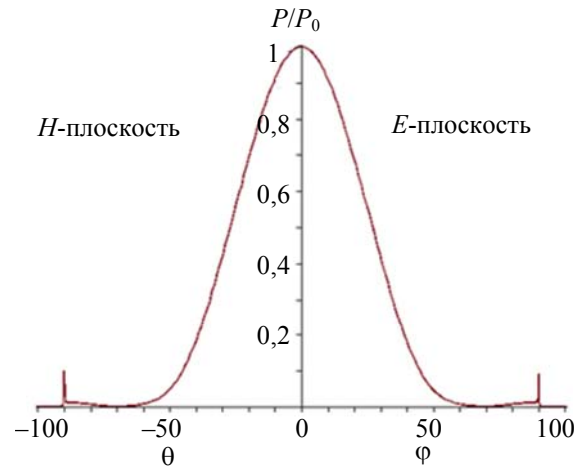


Рис. 3

Экспериментально измеренная и нормированная по мощности ДН излучателей для образцов, имевших такие же геометрические параметры, как и расчетные ($L=9$ см, $\alpha=60^\circ$), приведена на рис. 4. Ее измерения производились также в электродинамических плоскостях E и H на установке [7, 16], модернизированной для проведения данного эксперимента. Измерения производились также на центральной частоте указанного частотного диапазона $f_0=10$ ГГц. Из рис. 4 видно, что ДН имеют ширину главного луча по половинной мощности порядка 50° в плоскости E и 53° — в плоскости H , что хорошо согласуется с шириной расчетных ДН. Боковые лепестки ДН обусловлены, вероятнее всего, неидеальной формой исследовавшихся излучателей и наличием отражения от стенок измерительной камеры. Их уровень мог достигать значений 0,47 от уровня максимальной мощности излучения, но не превышал значения 0,5.

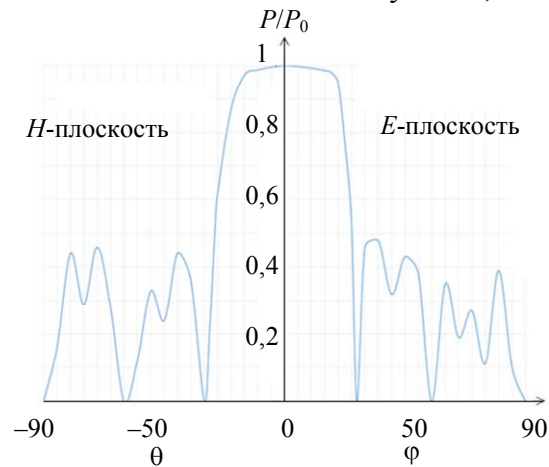


Рис. 4

Измеренная результирующая ДН для четырех излучателей на одном диске, построенная в радиальной системе координат (в логарифмическом масштабе), приведена на рис. 5. Из рисунка видно, что эта конструкция обеспечивает хорошее пространственное разделение главных лучей ДН, но не обеспечивает перекрытия окружающего пространства (и даже достаточно широкого сектора). Этот недостаток устраняется в конструкции, представляющей собой два подобных, соосно расположенных диска, азимутально смещенных друг относительно друга на угол $\psi = 45^\circ$ (рис. 1, а). Такая конструкция обеспечивает наилучшее пространственное и частотное разделение лучей общей ДН АКО в случае работы излучателей на разных частотах, что, в свою очередь, обеспечивает полный круговой и любой секторный обзор окружающего пространства в азимутальной плоскости. Экспериментально установлено, что оптимальное расстояние между дисками, обеспечивающее требуемое минимальное перекрытие

лучей ДН и электродинамическую развязку по частоте между излучателями верхнего и нижнего дисков АКО, составляет порядка одной длины волны (для данного случая $\lambda = 3$ см).

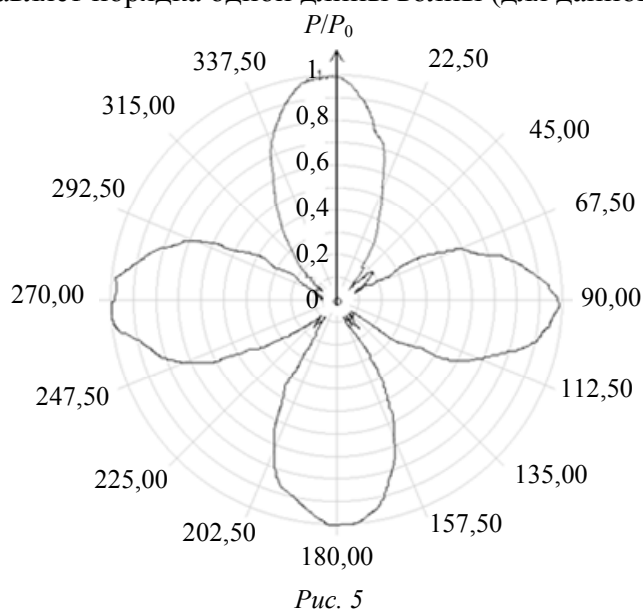


Рис. 5

При исследовании диаграмм направленности данной АКО в рабочем диапазоне частот (8—12 ГГц) выявлено, что для заданной геометрии излучателей их ДН в обеих электродинамических плоскостях (как в E -, так и в H -плоскости) существенно не изменялись, и по своим параметрам были близки к ДН, приведенным на рис. 3 и 4 для частоты $f_0 = 10$ ГГц. За пределами указанного диапазона частот проявлялись существенные искажения формы диаграмм направленности излучателей. Их следовало ожидать, поскольку полосковое питание обладает недостаточной широкополосностью, а использовавшиеся детектирующие СВЧ-сигнал диоды имеют ограниченный рабочий диапазон частот. Необходимость расширения частотного диапазона может быть достигнута заменой указанных элементов на более широкополосные.

С учетом изложенного общую диаграмму направленности всей АКО можно представить в виде восьми лучей, четыре из которых формируются излучателями верхнего диска, рис. 1, а (их ДН приведена на рис. 5), и четыре — идентичными излучателями нижнего диска, азимутально смещенными на угол $\psi = 45^\circ$. Обоснованные и выбранные геометрические параметры излучателей, их расположение на дисках и расстояние между дисками позволяют оптимальным образом сформировать практически независимые ДН каждого излучателя, охватывающие все окружающее пространство в азимутальной плоскости, или отдельные его секторы.

Разработанная АКО представляет собой передающую часть ПИП, индивидуально к каждому излучателю которой подводится СВЧ-сигнал (немодулированный или с импульсной или иной модуляцией) в частотном диапазоне 8—12 ГГц. Приемная часть ПИП представляет собой одну или несколько приемных антенн (в нашем случае — рупорные антенны), обеспечивающих устойчивый прием сигнала от АКО в любой точке азимутального пространства для кругового или секторного обзора в указанном частотном диапазоне. Дальнейшая обработка сигнала может производиться с применением процессорных средств или без них, в зависимости от решаемой задачи.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Nefyodov E. I., Smolsky S. M. Electromagnetic fields and waves. Microwaves and mmwave engineering with generalized macroscopic electrodynamics. NY: Springer, 2019. 360 p.
2. Nefyodov E. I., Smolsky S. M. Understanding of electrodynamics, radio wave propagation and antennas: Lecture course for students and engineers. Wuhan: Scientific Research Publishing, 2012. 449 p.

3. Вайнер Ю. А., Гураль И. М., Коняшенко Е. А. и др. // Антенны / Под ред. А. А. Пистолькорса. М.: Связь, 1980. Вып. 28. С. 95.
4. Пат. РФ 2047249. Антенна / В. И. Гвоздев, С. В. Гирич, И. Н. Пономарев. 1995. БИ № 30.
5. Пат. РФ 103676. Антенна кругового обзора / А. А. Фролов, В. С. Гирич, В. П. Заярный. Заявл. 20 апреля 2011 г.
6. Фролов А. А., Гирич С. В., Заярный В. П. Антенна кругового обзора сверхвысококачественного диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. 2012. Т. 55, № 10—11. С. 697—703.
7. Фролов А. А., Гирич С. В., Заярный В. П. Изучение электродинамических характеристик антенн и антенных систем СВЧ диапазона // Изв. вузов. Радиофизика. 2009. Т. 52, № 4. С. 328—335.
8. Заярный В. П., Парпула С. А., Гирич В. С., Пономарев И. Н. Изучение влияния угла раскрытия плоских коротких щелевых антенн микроволнового диапазона на их характеристики // Изв. вузов. Радиофизика. 2016. Т. 59, № 6. С. 529—534.
9. Заярный В. П., Нефёдов Е. И., Пономарев И. Н. Особенности электродинамических характеристик симметричных щелевых линий на проводящей бесконечной полуплоскости в микроволновом диапазоне // Изв. вузов. Радиофизика. 2018. Т. 61, № 4. С. 274—279.
10. Нефёдов Е. И., Заярный В. П., Пономарев И. Н. Теоретическое и экспериментальное исследование электродинамических свойств плоских щелевых антенн микроволнового диапазона // Радиотехника и электроника. 2021. Т. 66, № 4. С. 365—372.
11. Нефёдов Е. И., Пономарев И. Н., Заярный В. П. Исследование излучательной способности идеально проводящей полуплоскости, которая возбуждается перпендикулярной ее краю щелью // Изв. вузов. Радиофизика. 2021. Т. 64, № 5. С. 384—395.
12. Марков Г. Т., Чаплин А. Ф. Возбуждение электромагнитных волн. М.: Энергия, 1967. 376 с.
13. Ufimtsev P. Ya. Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction. John Wiley & Sons, 2007. 329 p.
14. Janaswamy R. An accurate moment method model for the tapered slot antenna // IEEE Trans. on AP. 1989. Vol. 37, N 12. p. 1523—1528.
15. Janaswamy R., Shaubert D. H., Pozar D. M. Analysis of the transverse electromagnetic mode linearly tapered slot antenna // Radio Science. 1986. Vol. 21, N 5. P. 797—804.
16. Заярный В. П. Радиофизические свойства твердотельных слоистых структур с зарядовой связью: методы и информационные возможности для их определения. М.: Радио и связь, 2001. 212 с.

Сведения об авторах

- Вячеслав Петрович Заярный** — д-р техн. наук, профессор; Волгоградский государственный технический университет, кафедра физики; E-mail: zvp2000@mail.ru
- Евгений Иванович Нефёдов** — д-р физ.-мат. наук, профессор; Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, Фрязинский филиал, лаборатория исследования СВЧ свойств ферромагнетиков; E-mail: nefyodov32@mail.ru
- Юрий Иванович Сидякин** — д-р техн. наук, профессор; Волгоградский государственный технический университет, кафедра технологии машиностроения
- Игорь Николаевич Пономарев** — Волгоградский государственный университет, кафедра телекоммуникационных систем; ст. преподаватель, E-mail: ponomarev.igor@volsu.ru
- Дмитрий Вячеславович Заярный** — магистрант; Волгоградский государственный технический университет, кафедра технологии машиностроения

Поступила в редакцию 21.10.2021; одобрена после рецензирования 06.12.2021; принята к публикации 30.12.2021.

REFERENCES

1. Nefyodov E.I., Smolsky S.M. *Electromagnetic Fields and Waves. Microwaves and Mmwave Engineering with Generalized Macroscopic Electrodynamics*, NY, Springer, 2019, 360 p.
2. Nefyodov E.I., Smolsky S.M. *Understanding of Electrodynamics, Radio Wave Propagation and Antennas: Lecture Course for students and engineers*, Wuhan, Scientific Research Publishing, 2012, 449 p.
3. Vainer Yu.A., Gural I.M., Konyashenko E.A. et al. *Antenny (Antennas)*, A.A. Pistolkors, ed., Moscow, 1980, no. 28, pp. 95. (in Russ.)
4. Patent RU 2047249, *Antenna (Antenna)*, V.I. Gvozdev, S.V. Girich, I.N. Ponomarev, Published 1995, Bulletin 30. (in Russ.)

5. Patent RU 103676, *Antenna krugovogo obzora* (Surround Antenna), A.A. Frolov, V.S. Girich, V.P. Zayarny, Priority 20 April 2011. (in Russ.)
6. Frolov A.A., Girich S.V., Zayarny V.P. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2013, no. 10-11(55), pp. 629-633.
7. Frolov A.A., Girich S.V., Zayarny V.P. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2009, no. 4(52), pp. 297–304.
8. Zayarny V.P., Parpula S.A., Girich V.S., Ponomarev I.N. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2016, no. 6(59), pp. 479–483.
9. Zayarny V.P., Nefedov E.I., Ponomarev I.N. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2018, no. 4(61), pp. 281–285.
10. Nefedov E.I., Zayarnyi V.P., Ponomarev I.N. *Journal of Communications Technology and Electronics*, 2021, no. 4(66), pp. 420–426.
11. Nefedov E.I., Ponomarev I.N., Zayarny V.P. *Radiophysics and Quantum Electronics*, 2021, no. 5(64), pp. 384–395. (in Russ.)
12. Markov G.T., Chaplin A.F. *Vozbuzhdeniye elektromagnitnykh voln* (Excitation of Electromagnetic Waves), Moscow, 1967, 376 p. (in Russ.)
13. Ufimtsev P.Ya. *Fundamentals of the Physical Theory of Diffraction*, John Wiley & Sons, 2007, 329 p.
14. Janaswamy R. *IEEE Trans. on AP*, 1989, no. 12(37), pp. 1523–1528.
15. Janaswamy R., Shaubert D.H., Pozar D.M. *Radio Science*, 1986, no. 5(21), pp. 797–804.
16. Zayarnyy V.P. *Radiofizicheskiye svoystva tverdotel'nykh sloistykh struktur s zaryadovoy svyaz'yu. Metody i informatsionnyye vozmozhnosti dlya ikh opredeleniya* (Radiophysical Properties of Solid-State Charge-Coupled Layered Structures. Methods and Information Possibilities for Their Determination), Moscow, 2001, 212 p. (in Russ.)

Data on authors

Vyacheslav P. Zayarnyi	—	Dr. Sci., Professor; Volgograd State Technical University, Department of Physics; E-mail: zvp2000@mail.ru
Eugeny I. Nefyodov	—	Dr. Sci., Professor; V. A. Kotelnikov Institute of Radio Engineering and Electronics of the RAS, Fryazino Branch, Laboratory of Microwave Properties of Ferromagnetics; E-mail: nefyodov32@mail.ru
Yury I. Sidyakin	—	Dr. Sci., Professor; Volgograd State Technical University, Department of Technology of Mechanical Engineering
Igor N. Ponomarev	—	Volgograd State University, Department of Telecommunication Systems; Senior Lecturer, E-mail: ponomarev.igor@volsu.ru
Dmitry V. Zayarnyi	—	Undergraduate Student; Volgograd State Technical University, Department of Technology of Mechanical Engineering

The article was submitted 21.10.2021; approved after reviewing 06.12.2021; accepted for publication 30.12.2021.