

28. *Koshkid'ko V.G., Alpatova O.V., Serdyuk E.S.* О гранитсах применения приближенно формулы для определения поверхностного импеданса прямоугольной канавки [On the limits of the applicability of approximate formulas to determine the surface impedance of the rectangular grooves], *Radiotekhnika i elektronika* [Communications Technology and Electronics], 2016, Vol. 61, No. 5, pp. 447-450.
29. *Tsaliev T.A., Cherenkov V.S.* Возбуждение одиночной канавки и эквивалентный поверхностный импеданс ребристых структур [Excitation of single groove and the equivalent surface impedance of ribbed structures], *Radiotekhnika i elektronika* [Communications Technology and Electronics], 1985, Vol. 30, No. 9, pp. 1689.
30. *Brekhovskikh L.M.* Волны в слоистых средах [Waves in layered media]. Moscow: AN SSSR, 1957, 502 p.

Статью рекомендовал к опубликованию д.ф.-м.н., профессор А.Х. Аджиев.

**Кошкидько Владимир Георгиевич** – Южный федеральный университет; e-mail: kvg59@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; тел.: +78634371733; кафедра антенн и радиопередающих устройств; к.т.н.; доцент.

**Алпатова Ольга Витальевна** – e-mail: [alpatova-ov@yandex.ru](mailto:alpatova-ov@yandex.ru); тел.: +78634371694; кафедра электротехники и мехатроники; к.т.н.; доцент.

**Koshkidko Vladimir Georgievich** – Southern Federal University; e-mail: kvg59@mail.ru; 44, Nekrasovsky, Taganrog, 347928; phone: +78634371733; the department of antennas and radio transmitters; cand. of eng. sc.; associate professor.

**Alpatova Olga Vital'evna** – e-mail: [alpatova-ov@yandex.ru](mailto:alpatova-ov@yandex.ru); phone: +78634371694; the department of electrical engineering and mechatronics; cand. of eng. sc.; associate professor.

УДК 621.371

**Д.В. Семенихина, Н.Н. Горбатенко**

### **ВОЗБУЖДЕНИЕ НЕЛИНЕЙНО НАГРУЖЕННОГО ИДЕАЛЬНО ПРОВОДЯЩЕГО ЦИЛИНДРА, ПОКРЫТОГО СЛОЕМ МЕТАМАТЕРИАЛА**

*Нелинейные нагрузки (НН), расположенные на поверхности идеально проводящего цилиндра, дают малую напряженность поля на высших гармониках, поэтому нелинейные рассеиватели и антенны с нелинейными нагрузками, работающие одновременно на нескольких кратных частотах, осуществляют связь на малые расстояния. Использование эффекта нелинейного рассеяния (ЭНР) предполагает повышения энергетических характеристик приемного устройства. Одной из возможных структур, использующих ЭНР является цилиндр с нелинейными нагрузками покрытый слоем метаматериала. В данной статье приводится решение задачи возбуждения сторонними источниками идеально проводящего нелинейно нагруженного цилиндра, покрытого слоем метаматериала. Применение покрытий из метаматериала может способствовать снижению радиолокационной заметности цилиндрических нелинейных рассеивателей. Исследуются особенности электродинамического анализа нелинейно нагруженного цилиндра, покрытого слоем метаматериала. Анализ задачи возбуждения цилиндра с нелинейными нагрузками, покрытого слоем метаматериала основан на решении уравнений Максвелла, с применением нелинейных граничных условий и условий излучения на бесконечности. Исследованы свойства метаматериала, которые бы обеспечивали повышения уровня высших частотных гармоник рассеянного на цилиндре поля. В результате моделирования ячейки метаматериала получены коэффициенты прохождения и отражения в полосе частот от 6 ГГц до 12 ГГц. С помощью метода Никольсона – Росса проведена процедура гомогенизации электрофизических параметров предложенного метаматериала и найдены его диэлектрическая и магнитная проницаемости на частоте 9.92 ГГц. Результаты свидетельствуют о применимости структуры из метаматериала в задачах нелинейного рассеивания для повышения уровня поля на кратных гармониках.*

*Метаматериал; гомогенизация; нелинейная нагрузка.*

D.V. Semenikhina, N.N. Gorbatenko

### EXCITATION OF PERFECTLY CONDUCTING NONLINEAR LOADED CYLINDER, COATED WITH A LAYER OF THE METAMATERIAL

*A nonlinear loads, disposed on the surface of perfectly conducted cylinder, provide a small field intensity at higher harmonics, so that nonlinear scatterers, antenna with nonlinear loads, operating at several multiples frequencies simultaneously could communicate over short distances. Application of the effect of nonlinear scattering (ENS) suggests increasing the energy characteristics of the receiver. One of the possible structures that use the ENS is a cylinder with a non-linear loads covered with a layer of the metamaterial. In this article we considering the problem of excitation of a perfectly conducting non-linear loaded cylinder, coated with a layer of the metamaterial, using external sources. The use of metamaterial coatings could reduce radar cross-section of the nonlinear cylindrical scatterers. The features of nonlinear electrodynamic analysis of a nonlinear loaded cylinder, coated with a layer of the metamaterial were investigated. The problem of cylinder excitation with nonlinear loads, covered with a layer of metamaterial is based on the solution of Maxwell's equations with nonlinear boundary conditions and the radiation conditions at infinity. The properties of a metamaterial that would ensure an increase in the level of higher frequency harmonics of the scattered field on the cylinder were investigated. As result of simulation, reflection and transmission coefficients in the frequency band from 6 GHz to 12 GHz were obtained. Applying Nicholson – Ross method, the procedure of homogenization was conducted and permittivity and permeability at a frequency of 9.92 GHz of the structure were found. The results suggest the applicability of the structure of the metamaterial in the nonlinear scattering problems to improve field level at multiple harmonics.*

*Metamaterial; homogenization; nonlinear load.*

**Введение.** Известно [1–3], что ряд открытых ЭД структур обладает, резонансом поля на некоторой пространственной гармонике, например, периодические плоские решетки, – это сравнимо с резонансом в последовательном колебательном контуре. В [4] была продемонстрирована возможность использования в качестве структуры, обладающей данным эффектом, проводящего цилиндра, покрытого слоем диэлектрика. Результаты исследования показали, что при определенных значениях толщины и диэлектрической проницаемости материала, соответствующих возбуждению поверхностной волны в слое на частоте гармонике, могут изменяться уровень возбужденного поля и форма ДН. Показано, как пространственно-резонансные свойства цилиндра со слоем диэлектрика и решетки НН могут быть использованы для увеличения абсолютных или относительных уровней высших частотных гармоник электромагнитного поля, излучаемого или рассеиваемого ЭД структурой с НН.

Перспективным продолжением данного направления стало бы использования материалов, обладающих уникальными электрофизическими параметрами. В последнее время растет число научных работ, посвященных применению ММ в антенной технике. Так, в [5–16] ММ используется для повышения коэффициента полезного действия, улучшают частотную избирательность и чувствительность.

Ранее было [17] показано, что использование метаматериала (ММ) в качестве подложки для нелинейной микрополосковой структуры, способствует повышению уровня кратных гармоник ЭМП.

Было предложено, что пространственно-резонансные свойства цилиндра, покрытого слоем ММ, также могут содействовать возрастанию уровня высших частотных гармоник.

**Постановка и решение задачи.** Пусть имеем идеально проводящий цилиндр радиуса  $a$ , покрытый слоем ММ с внешним радиусом  $b$  ( $b > a$ ) параметрами  $\tilde{\epsilon}_{a1}(\varpi)$ ,  $\mu_{a1}(\varpi)$ . В объеме  $V_2$  однородном по  $z$ , заданы плотности сторонних токов частотой  $\omega$ ; объем  $V_j$  может быть расположен как внутри, так и вне слоя метаматериала. Модель идеально проводящего цилиндра с нелинейными нагрузками, покрытого слоем ММ, представлена на рис. 1.

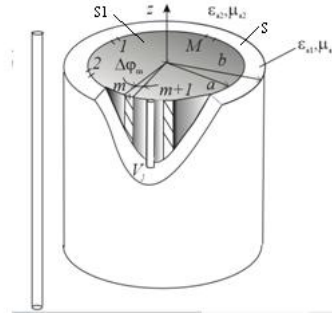


Рис. 1. Модель идеально проводящего цилиндра, покрытого слоем ММ с нелинейными нагрузками

Необходимо определить ЭМП, возбуждаемое сторонними источниками в присутствии заданного объекта в точках наблюдения  $p$  во внешней однородной изотропной среде. Векторы искомого ЭМП должны удовлетворять уравнениям Максвелла, ГУ на поверхностях цилиндра, нелинейных нагрузок и границе раздела метаматериал-среда, а также условиям излучения на бесконечности.

Рассмотрим задачу возбуждения идеально проводящего цилиндра, покрытого слоем ММ. Решаем задачу аналогично [4], учитывая зависимость электрофизических параметров среды от частоты  $\tilde{\epsilon}_{a1}(\omega), \mu_{a1}(\omega)$ . Запишем искомое поле с учётом параметров  $\tilde{\epsilon}_{a1}(\omega), \mu_{a1}(\omega)$ . Учитывая переотражение цилиндрических волн от границ раздела  $S$  (метаматериал) и  $S_1$  (идеально проводящий цилиндр) и условия излучения на бесконечности. Искомое магнитное поле  $H$  на основной частоте будет выглядеть следующим образом:

$$H_z^{i,z}(r, \varphi, r', \varphi') = -\frac{k_1(\omega)}{4W_1} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{im(\varphi-\varphi')} \times$$

$$\times \begin{cases} (J_m(k_1 r)H_m^{(2)}(k_1(\omega)a) - H_m^{(2)}(k_1 r)J_m'(k_1(\omega)a))H_m^{(2)}(kr') / H_m^{(2)}(k_1(\omega)a) + \\ + K_{1m}H_m^{(2)}(k_1(\omega)r) + K_{2m}J_m(k_1(\omega)r); & a < r < r'; \\ (J_m(k_1(\omega)r')H_m^{(2)}(k_1 a) - H_m^{(2)}(k_1(\omega)r')J_m'(k_1(\omega)a))H_m^{(2)}(kr) / H_m^{(2)}(k_1(\omega)a) + \\ + K_{1m}H_m^{(2)}(k_1(\omega)r') + K_{2m}J_m(k_1(\omega)r); & r' < r < b; \\ K_{3m}H_m^{(2)}(k_2 r)k_2 W_1 / k_1(\omega)W_2; & r > b; \end{cases} \quad (1)$$

где  $k_1(\omega) = \omega\sqrt{\epsilon_{a1}(\omega), \mu_{a1}(\omega)}$ ,  $k_2$  и  $W_1, W_2$  – коэффициенты распространения и характеристические сопротивления среды в областях  $V_1$  и  $V_2$ , соответственно;  $K_{1,2,3m}$  – неизвестные коэффициенты;

Аналогично, для задачи рассеяния ЭМВ на идеально проводящем цилиндре, покрытом слоем ММ, записываем искомое поле с учётом частотной зависимости  $\tilde{\epsilon}_{a1}(\omega), \mu_{a1}(\omega)$  получаем:

$$H_z^{M,z}(r, \varphi, r', \varphi') = -\frac{k_2}{4W_2} \sum_{m=-\infty}^{\infty} e^{im(\varphi-\varphi')} \times$$

$$\times \begin{cases} J_m(k_2 r')H_m^{(2)}(k_2 r) + K_{4m}H_m^{(2)}(k_2 r); & r > r' > b; \\ J_m(k_2 r)H_m^{(2)}(k_2 r') + K_{4m}H_m^{(2)}(k_2 r); & r' > r > b; \\ (k_1(\omega)W_2 / k_2 W_1)(K_{5m}J_m(k_1(\omega)r) + K_{6m}H_m^{(2)}(k_1(\omega)r)); & r < b < r'; \end{cases} \quad (2)$$

где неизвестные коэффициенты  $K_{4,5,6m}$  определяются решением системы уравнений получаемых при учете следующих граничных условий для векторов вспомогательного поля:

$$H_z^{1,z}(b-0) = H_z^{1,z}(b+0); \quad E_\varphi^{1,z}(b-0) = E_\varphi^{1,z}(b+0); \quad E_\varphi^{1,z}(a) = 0.$$

Необходимо определить свойства ММ, который бы способствовал появлению пространственного резонанса при возбуждении идеально проводящего цилиндра со слоем метаматериала, что в свою очередь способствовала бы повышению уровня высших гармоник поля, обусловленных нелинейными нагрузками на поверхности цилиндра. Также, ставится задача отыскания такого ММ, у которого мнимые составляющие электрофизических параметров  $\tilde{\epsilon}_{a1}(\omega), \mu_{a1}(\omega)$  на частоте  $\omega$  имели бы минимальное значение.

**Выбор метаматериала.** Метаматериалы – это композитные материалы, обладающие уникальными электрофизическими свойствами, отсутствующими в природных материалах. Новые свойства метаматериалов обусловлены резонансным взаимодействием электромагнитной волны, распространяющейся в гетерогенной среде, наполненной включениями, имеющими специальную форму, обеспечивающую резонансное возбуждение токов во включениях.

В [4] было показано, что наличие в диэлектрике, покрывающем цилиндр с нелинейными нагрузками, даже малых электрических потерь может существенно уменьшить эффект увеличения поля на кратных гармониках. Следовательно, одним из главных критериев для выбора ММ является нахождения такой конструкции, которая обеспечивала минимальные электрические потери в заданной полосе частот. Также необходимым условием является минимальное потери в материале на основной частоте.

Важным вопросом является определение характеристик, которыми должен обладать слой, покрывающий цилиндр. Структура должна быть прозрачной для прохождения волны, чтобы обеспечивать наилучшие энергетические характеристики.

Известно, что материалы у которых отрицательно либо диэлектрическая, либо магнитная проницаемости, называемые SNG (single negative) сильно поглощают энергию электромагнитного поля и волны в них быстро затухают.

Высокий интерес в этой связи представляют, так называемые, DNG (double negative) материалы. Они обладают хорошими резонансными свойствами.

В [18] была предложена модель ММ, единичная ячейка которого представлена на рис. 2.

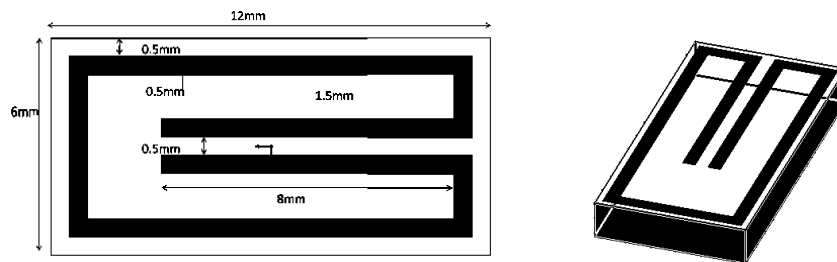


Рис. 2. Ячейка ММ

Геометрия ячейки представляет собой разомкнутый кольцевой резонатор, расположенный на подложке толщиной 1.5 мм из стеклотекстолита FR-4 ( $\epsilon=4.4, \mu=1$ ). Все геометрические размеры представлены на рис. 2

С использованием метода Никольсона-Росса (Nicolson, Ross) [19] были получены эффективные относительные диэлектрическая  $\epsilon_{eff}$  и магнитная проницаемости  $\mu_{eff}$ . Получение эффективных параметров из коэффициентов прохождения и отражения волн зависит от размеров ячейки. Они должны быть много меньше длины волны в среде.

Если расстояние между пластиной и свободным пространством равно  $d$ , то коэффициент отражения может быть вычислен как [19]:

$$\Gamma = \frac{Z_o - 1}{Z_o + 1}, \quad (3)$$

где  $Z_o$  – это относительный импеданс выраженный через диэлектрическую и магнитную проницаемости.

$$Z_o = \sqrt{\frac{\mu_r}{\epsilon_r}}. \quad (4)$$

$S$ -параметры рассчитываются согласно формулам:

$$S_{21} = \frac{(1 - \Gamma^2)z}{1 - \Gamma^2 z^2}, \quad (5)$$

$$S_{11} = \frac{(1 - z^2)\Gamma}{1 - \Gamma^2 z^2}, \quad (7)$$

где коэффициент передачи рассчитывается как:

$$z = \exp\left(-j\left(\frac{\omega}{c}\right)\sqrt{\mu_r \epsilon_r}d\right), \quad (8)$$

где  $\omega = 2\pi f$ ,  $c$  – скорость света

Используя тот же метод, что описан в [20], получаем электрофизические параметры, выраженные через коэффициенты прохождения и отражения:

$$\mu_r = \frac{2c(1 - S_{21} + S_{11})}{j\omega d(1 + S_{21} - S_{11})}. \quad (9)$$

$$\epsilon_r = \mu_r + j\frac{2cS_{11}}{\omega d} \quad (10)$$

Коэффициенты отражения и прохождения для ячейки ММ, изображенной на рис. 2, были посчитаны, для определения электромагнитных характеристик данной структуры.

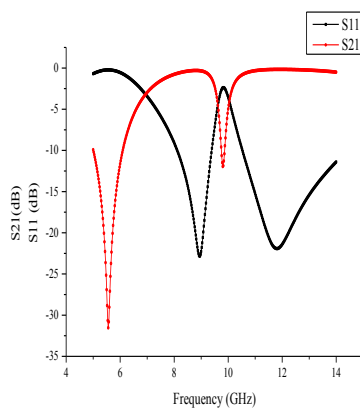


Рис. 3. Зависимость коэффициента отражения и коэффициента прохождения от частоты

После чего была проведена процедура гомогенизации согласно формулам (3–10) и получены электрофизические параметры данной структуры.

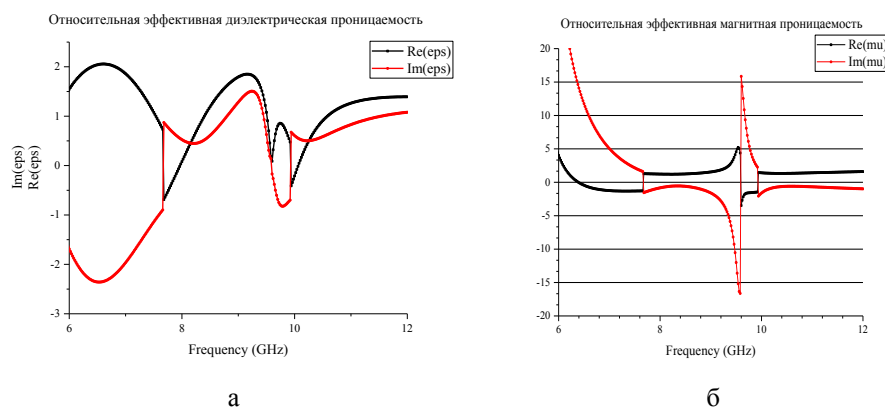


Рис. 4. ЧХ диэлектрической (а) и магнитной (б) проницаемостей

Как видно из рис. 4, данная структура является DNG – материалом на частоте 9.92 ГГц, так как  $\epsilon = -0,41 + j0,04$ ,  $\mu = -1,46 + j0,05$

Данная структура удовлетворяет требованиям постановки задачи, а значит, может быть использована в качестве слоя покрытия цилиндра для возбуждения поверхностных волн.

**Заключение.** В данной работе был проведен анализ задачи возбуждения идеально проводящего цилиндра с нелинейными нагрузками, покрытого слоем ММ, основанный на решении уравнений Максвелла и применении нелинейных граничных условий. Получены выражения для электромагнитного поля, возбуждаемого цилиндром с учётом частотной зависимости электрофизических параметров ММ.

С помощью моделирования ячейки ММ, получены коэффициенты отражения и прохождения. Проведена процедура гомогенизации и найдены значения диэлектрической и магнитной проницаемостей ММ на частоте 9.92 ГГц. Согласно результатам, мнимые части электрофизических параметров близки к нулю, следовательно, электрические потери минимальны на данной частоте.

Научная новизна данного исследования заключается в использовании слоя ММ взамен диэлектрического покрытия, предложенного в [4]. Данное решение позволяет предположить выравнивание кратных гармоник электромагнитного поля по сравнению с первой гармоникой за счёт низких электрических потерь в слое ММ в отличие от покрытия из диэлектрика.

Полученные результаты говорят о применимости данных структур с покрытием из метаматериала в задачах повышения относительного уровня кратных гармоник электромагнитного поля.

#### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. *Uberall H., Gaunavid G.C.* Relation Between the Ringing Resonances and Surface Waves in Radar Scattering // IEEE Trans. Ant. and Propag. – 1984. – Vol. 32, No. 10. – P. 1071-1079.
2. *Wang Nan* Electromagnetic Scattering from Dielectric Coated Circular Cylinder // IEEE Trans. Ant. and Propag. – 1985. – Vol. 33, No. 9. – P. 960-963.
3. *Mao Zhiji, Wu Jbanxiang.* The Pattern of Magnetic-Source of the Surface of the Infinite Length Conducting Circular Cylinder Coated with a Dielectric, Antennas and Propag.: AP-S Int. Symp. Syracuse, N.Y., June 6-10, 1988: Dig. Vol. 3. – New York (N. Y.), 1988. – P.1078-1081.
4. *Semenikhina D.V.* Radiation and Scattering patterns of two-dimensional nonlinear loaded circular cylinder coated with dielectric layer, Antenna Theory and Techniques, 2003 // 4th International Conference 9-12 Sept. 2003. – Vol. 2. – P. 837-841.

5. Griguer H., Drissi M., Marzolf E., Lalj H., Riouch F. Design and characterization of a tunable DNG metamaterial superstrate for small beam steering antennas // *Appl Phys A*. – 2011. – Vol. 103. – P. 895-898.
6. Landy N.I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R. and Padilla W.J. Perfect metamaterial absorber // *Physical Review Letters*. – 2008. – Vol. 100. 207402.
7. Li L., Yang Y., and Liang C. A wide-angle polarization-insensitive ultra-thin metamaterial absorber with three resonant modes // *Journal of Applied Physics*. – 2011. – Vol. 110. – 063702.
8. Smolyaninov Igor I., Smolyaninova Vera N. Metamaterial superconductors // *Physical Review B Condensed Matter and Materials Physics*. – 2015. – Vol. 91, Issue 9.
9. Wallen S Chong, C Kevrekidis, P.G. Boechler, N. Discrete Breathers in a One-Dimensional Granular Metamaterial: Linear Lattice with Nonlinear Local Resonators, 2014 International Symposium on Optomechatronic Technologies. – Vol. 2, Issue 1. – ISBN 978-1-4673-6752-3.
10. Ayop O., Rahim M.K.A., Murad N.A. Double layer circular ring metamaterial absorber for dual-directional application at 10 GHz, RFM 2013 // *IEEE International RF and Microwave Conference, Proceedings*. – 2013. – P. 405-408.
11. Sievenpiper Daniel F. Nonlinear grounded metasurfaces for suppression of high-power pulsed RF currents // *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*. – P. 1516-1519. – ISBN (1536-1225).
12. Soheilifar M.R., Sadeghzadeh R.A. Design, fabrication and characterization of stacked layers' planar broadband metamaterial absorber at microwave frequency, *AEU // International Journal of Electronics and Communications*. – 2014. – Vol. 9. – P. 86-93,
13. Palandoken, Merih Grede, Andre Henke, Heino. Broadband microstrip antenna with left-handed metamaterials // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2009. – Vol. 57. – P. 331-338. – ISBN (0018-926X).
14. Papasimakis N., Fedotov V.A., Zheludev N.I., Prosvirnin S.L. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency // *Physical Review Letters*. – 2008. – Vol. 101.
15. Rapoport Yu.G., Grimalsky V.V., Boardman A.D., Malnev V.N. Controlling Nonlinear Wave Structures in Layered Metamaterial, Gyrotropic and Active Media // 2014 IEEE XXXIV International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO). – 2014. – P. 46-50.
16. Fhafhiem N., Krachodnok P. A high gain omnidirectional antenna using metamaterial rods, 2014 11th International Conference on Electrical Engineering // *Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2014*. – 2014. – P. 1-4.
17. Семенихина Д.В., Чиков Н.И., Семенихин А.И., Горбатенко Н.Н. Электродинамический анализ и конструктивный синтез нелинейной микрополосковой решетки с подложкой из метаматериала // *Журнал радиоэлектроники*. – 2015. – № 7. – URL: <http://jre.cplire.ru/iso/jul15/8/text.pdf>.
18. Mohamed Lashab, Zebiri C., Benabdelaziz F., Naeem Ahmad Jan, Abd-Alhameed R.A. Horn Antennas Loaded with Metamaterial for Ku-band Application // *IEEE Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2014 International Conference, 14-16 April 2014*. – P. 1372-1375.
19. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques // *IEEE Trans. Instrum. Meas.* – 1970. – Vol. 19. – P. 377-382.
20. Ziolkowski R.W. Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials // *IEEE Trans. Antennas Propag.* – 2003. – Vol. 51. – P. 1516-1529.

## REFERENCES

1. Uberall H., Gaunavid G.C. Relation Between the Ringing Resonances and Surface Waves in Radar Scattering, *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, 1984, Vol. 32, No. 10, pp. 1071-1079.
2. Wang Nan Electromagnetic Scattering from Dielectric Coated Circular Cylinder, *IEEE Trans. Ant. and Propag.*, 1985, Vol. 33, No. 9, pp. 960-963.
3. Mao Zhiji, Wu Jbanxiang. The Pattern of Magnetic-Source of the Surface of the Infinite Length Conducting Circular Cylinder Coated with a Dielectric, *Antennas and Propag.: AP-S Int. Symp. Syracuse, N.Y.*, June 6-10, 1988: Dig. Vol. 3. New York (N. Y.), 1988, pp.1078-1081.
4. Semenikhina D.V. Radiation and Scattering patterns of two-dimensional nonlinear loaded circular cylinder coated with dielectric layer, *Antenna Theory and Techniques, 2003, 4th International Conference 9-12 Sept. 2003*, Vol. 2, pp. 837-841.
5. Griguer H., Drissi M., Marzolf E., Lalj H., Riouch F. Design and characterization of a tunable DNG metamaterial superstrate for small beam steering antennas, *Appl Phys A*, 2011, Vol. 103, pp. 895-898.

6. Landy N.I., Sajuyigbe S., Mock J.J., Smith D.R. and Padilla W.J. Perfect metamaterial absorber, *Physical Review Letters*, 2008, Vol. 100. 207402.
7. Li L., Yang Y., and Liang C. A wide-angle polarization-insensitive ultra-thin metamaterial absorber with three resonant modes, *Journal of Applied Physics*, 2011, Vol. 110, 063702.
8. Smolyaninov Igor I., Smolyaninova Vera N. Metamaterial superconductors, *Physical Review B Condensed Matter and Materials Physics*, 2015, Vol. 91, Issue 9.
9. Wallen S Chong, C Kevrekidis, P.G. Boechler, N. Discrete Breathers in a One-Dimensional Granular Metamaterial: Linear Lattice with Nonlinear Local Resonators, 2014 International Symposium on Optomechatronic Technologies, Vol. 2, Issue 1. ISBN 978-1-4673-6752-3.
10. Ayop O., Rahim M.K.A., Murad N.A. Double layer circular ring metamaterial absorber for dual-directional application at 10 GHz, RFM 2013, *IEEE International RF and Microwave Conference, Proceedings*, 2013, pp. 405-408.
11. Sievenpiper Daniel F. Nonlinear grounded metasurfaces for suppression of high-power pulsed RF currents, *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, pp. 1516-1519. ISBN (1536-1225).
12. Soheilifar M.R., Sadeghzadeh R.A. Design, fabrication and characterization of stacked layers' planar broadband metamaterial absorber at microwave frequency, *AEU, International Journal of Electronics and Communications*, 2014, Vol. 9, pp. 86-93,
13. Palandoken, Merih Grede, Andre Henke, Heino. Broadband microstrip antenna with left-handed metamaterials, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2009, Vol. 57, pp. 331-338. ISBN 0018-926X.
14. Papisimakis N., Fedotov V.A., Zheludev N.I., Prosvirnin S.L. Metamaterial analog of electromagnetically induced transparency, *Physical Review Letters*, 2008, Vol. 101.
15. Rapoport Yu.G., Grimalsky V.V., Boardman A.D., Malnev V.N. Controlling Nonlinear Wave Structures in Layered Metamaterial, Gyrotropic and Active Media, 2014 *IEEE XXXIV International Scientific Conference Electronics and Nanotechnology (ELNANO)*, 2014, pp. 46-50.
16. Fhafhiem N., Krachodnok P. A high gain omnidirectional antenna using metamaterial rods, 2014 11th International Conference on Electrical Engineering, *Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, ECTI-CON 2014*, pp. 1-4.
17. Semenikhina D.V., Chikov N.I., Semenikhin A.I., Gorbatenko N.N. Elektrodinamicheskiy analiz i konstruktivnyy sintez nelineynoy mikropoloskovoy reshetki s podlozhkoy iz metamateriala [Electrodynamics analysis and constructive synthesis of nonlinear microstrip array with the substrate of the metamaterial], *Zhurnal radioelektroniki* [Journal of Radioelectronics], 2015, No. 7. Available at: <http://jre.cplire.ru/iso/jul15/8/text.pdf>.
18. Mohamed Lashab, Zebiri C., Benabdelaziz F., Naeem Ahmad Jan, Abd-Alhameed R.A. Horn Antennas Loaded with Metamaterial for Ku-band Application, *IEEE Multimedia Computing and Systems (ICMCS), 2014 International Conference, 14-16 April 2014*, pp. 1372-1375.
19. Nicolson A.M., Ross G.F. Measurement of the intrinsic properties of materials by time-domain techniques, *IEEE Trans. Instrum. Meas.*, 1970, Vol. 19, pp. 377-382.
20. Ziolkowski R.W. Design, fabrication, and testing of double negative metamaterials, *IEEE Trans. Antennas Propag.*, 2003, Vol. 51, pp. 1516-1529.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор Д.Д. Габриэлян.

**Семенихина Диана Викторовна** – Южный федеральный университет; e-mail: d\_semenikhina@mail.ru; 347928, г. Таганрог, пер. Некрасовский, 44; д.т.н.; профессор.

**Горбатенко Николай Николаевич** – e-mail: ngorbatenko@sfedu.ru; 347922, г. Таганрог, ул. Ломоносова, 53, кв. 50; тел.: +79287672023; аспирант.

**Semenikhina Diana Viktorovna** – South Federal University; e-mail: d\_semenikhina@mail.ru; 44, Nekrasovskiy, Taganrog, 347928, Russia; dr. of eng. sc.; professor.

**Gorbatenko Nikolay Nikolaevich** – e-mail: ngorbatenko@sfedu.ru; 53, Lomonosova stret, ap. 50, Taganrog, 347922, Russia; phone: +79287672023; postgraduate student.