

УДК 621.396.677.51

А. А. Головков, Е. И. Можаяева
Санкт-Петербургский государственный электротехнический
университет "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина)
ул. Профессора Попова, д. 5, Санкт-Петербург, Россия, 197376

Предельные характеристики согласования приемных рамочных антенн с помощью нефостеровских цепей¹

Аннотация. Исследуются предельные характеристики согласования электрически малоразмерной рамочной антенны с помощью простейшей нефостеровской цепи – отрицательной индуктивности. Рассмотрены различные варианты включения отрицательной индуктивности в структуру рамочной антенны. Получено аналитическое предельное соотношение для рабочей полосы частот рамочной антенны при включении отрицательной индуктивности в разрыв проводника рамки. Показано, что для практической реализации наиболее удобной является схема с включением отрицательной индуктивности между проводящей плоскостью и свободным выводом рамки. При таком включении нефостеровского элемента существует небольшой проигрыш в ширине рабочей полосы частот по сравнению с включением этой индуктивности в разрыв проводящей плоскости рамки, однако в 2 раза выше наводимая в рамке ЭДС. Получено интегральное выражение для максимальной полосы согласования рамочной антенны при включении отрицательной индуктивности у заземленного вывода, интеграл в котором вычислялся численно для различных добротностей рамочной антенны и соотношений между резонансной частотой рамки и рабочим диапазоном частот. Полученные результаты подобны ограничению Фано–Юлы для пассивных согласующих цепей.

Ключевые слова: согласование, добротность, электрически малая антенна, нефостеровские элементы, конвертор отрицательного импеданса

Для цитирования: Головков А. А., Можаяева Е. И. Предельные характеристики согласования приемных рамочных антенн с помощью нефостеровских цепей // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2018. № 1. С. 32–37.

A. A. Golovkov, E. I. Mozhaeva
Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI"
5, Professor Popov Str., 197376, St. Petersburg, Russia

Limiting Characteristics for Receiving Small Size Frame Antenna Matching Using Converter Negative Impedance

Abstract. The limiting characteristics of electrically small-sized loop antenna matching by means of non-Foster's negative inductance are studied. Various options for including negative inductance in frame antenna structure are considered. The analytical limit expression for the operating frequency band of the small-sized loop antenna with the inclusion of negative inductance in the gap of the conductor frame is obtained. It is shown that for practical implementation the most convenient is the scheme with the inclusion of negative inductance between the conducting plane and the free output of the frame. Such inclusion of negative inductance causes small loss in width of the working frequency band compared with the inclusion of this inductance in the gap of the frame conductive plane, but EMF induced in the frame is twice as large. An integral expression is obtained for the maximum band matching of the small-sized loop antenna with the inclusion of negative inductance in grounded output, the integral in which is calculated numerically for various small-sized loop antenna quality factor and ratios between resonant frequency of the frame and operating frequency range. The results obtained are similar to Fano-Yula restriction for passive matching chains.

Key words: Matcging, Q-factor, Electrically Small Antenna, Non-Foster Elements, Negative Impedance Converter

For citation: Golovkov A. A., Mozhaeva E. I. Limiting Characteristics for Receiving Small Size Frame Antenna Matching Using Converter Negative Impedance. *Izvestiya Vysshikh Uchebnykh Zavedenii Rossii. Radioelektronika* [Journal of the Russian Universities. Radioelectronics]. 2018, no. 1, pp. 32–37. (In Russian)

Введение. Нефостеровские согласующие цепи с отрицательными реактивными элементами на основе конверторов отрицательного импеданса (КОИ) широко используются для согласования

¹ Исследование выполнено в рамках государственной работы "Проведение научно-исследовательских работ" (код проекта 8.7130.2017/8.9) базовой части государственного задания Минобрнауки России.

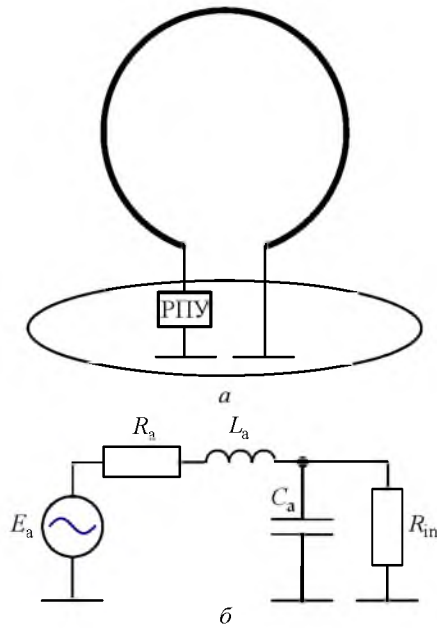


Рис. 1

штыревых электрически малоразмерных антенн (ЭМА) [1]–[4] монопольного или дипольного типа (TM₁₀ mode). В [3], [4] найдены соотношения для предельных полос пропускания штыревой ЭМА, согласованных с помощью КОИ, подобные соотношениям Фано–Юлы для согласования антенн этого типа с помощью пассивных реактивных (фостеровских) элементов [5]. Представляет интерес найти подобные соотношения и для согласования нефостеровскими цепями антенн рамочного типа (TE₁₀ mode).

Типичная структура приемной рамочной антенны показана на рис. 1, а, а эквивалентная схема ее входного импеданса на частотах до первого параллельного резонанса [5] – на рис. 1, б, где РПУ – радиоприемное устройство; E_a – ЭДС в антенне; R_a , L_a , C_a – эквивалентные активное сопротивление, индуктивность и емкость рамочной антенны соответственно; R_{in} – входное сопротивление РПУ.

Вещественная часть входного сопротивления рамочной ЭМА определяется соотношением [5]:

$$R_a \approx \frac{\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0}}{6\pi} \left(\frac{2\pi}{\lambda} \right)^4 (nS_p)^2, \quad (1)$$

где μ_0 , ε_0 – магнитная и диэлектрическая проницаемости свободного пространства ($\sqrt{\mu_0/\varepsilon_0} \approx 367.7$ Ом); λ – длина волны; n – число витков рамки; S_p – площадь рамки.

Добротность импеданса рамочной ЭМА на частоте параллельного резонанса ω_p

$$Q \approx \omega_p L_a / R_a = (\omega_p C_a R_a)^{-1}$$

обычно достаточно велика ($Q > 10$).

Возможные схемы согласования рамочных ЭМА с помощью КОИ. Классическая схема согласования рамочной антенны включает 2 каскадно включенных КОИ, реализующих отрицательный параллельно включенный конденсатор и последовательно включенную отрицательную индуктивность, а также трансформатор сопротивления для преобразования сопротивления R_a к входному сопротивлению приемника R_{in} . Практическая реализация этой схемы затруднительна и как правило приводит к самовозбуждению из-за неустойчивости КОИ с плавающим потенциалом и к увеличению уровня шумов на входе приемного устройства. Альтернативой является использование единственного более устойчивого заземленного КОИ, реализующего функцию отрицательной индуктивности, и трансформатора сопротивления. При использовании указанного КОИ отрицательная индуктивность может быть включена либо в разрыв проводника рамки (рис. 2, а), либо у заземленного ее конца (рис. 2, в).

Характеристики согласования антенн более удобно исследовать в режиме передачи [5], поэтому, используя принцип взаимности передающей и приемной антенн в изотропной среде, определим предельные характеристики согласования антенны с помощью КОИ в режиме передачи радиосигнала от высокочастотного генератора E_T с внутренним сопротивлением $R_i = R_{in}$.

Предельные соотношения для половинной рамки с отрицательной индуктивностью. Первый случай включения отрицательной индуктивности в ЭМА исследован в [6]. Поскольку КОИ с плавающим потенциалом обычно нестабилен, то рамку разделяют по диаметру проводящей плоскостью и включают отрицательную индуктивность между этой плоскостью и половинным проводником рамки, преобразуя систему к схеме на рис. 2, б. В этом случае в широком диапазоне частот диаграмма направленности соответствует диаграмме направленности полной одиночной рамки, в то время как при отсутствии отрицательной индуктивности форма диаграммы половинной рамки над проводящей плоскостью существенно искажается [6]. В [6] показано, что отрицательная индуктивность значительно расширяет рабочий диапазон частот рамочной ЭМА, определенный по заданному значению входного коэффи-

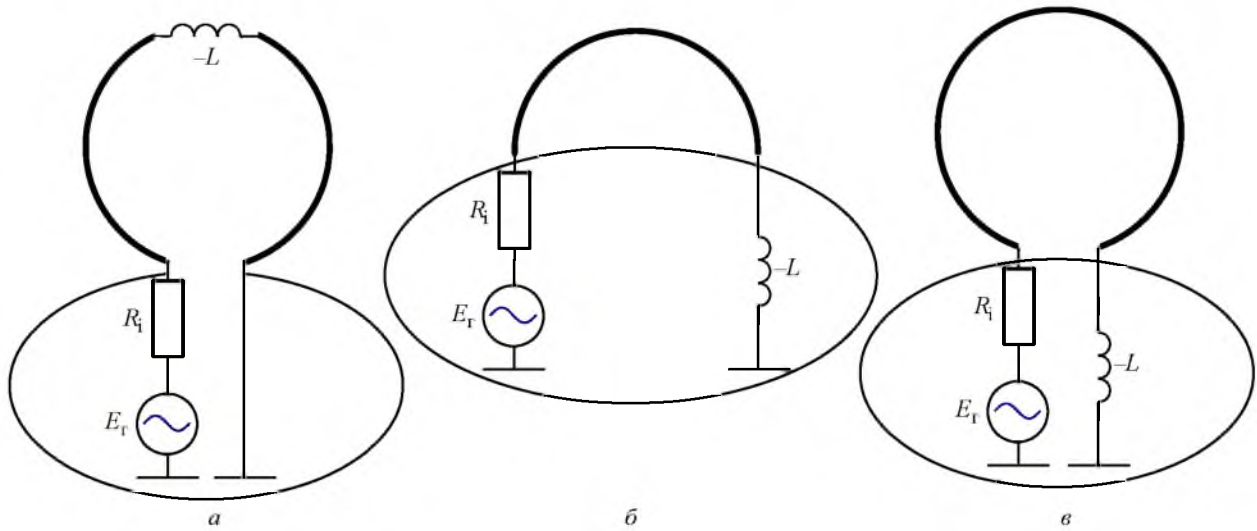


Рис. 2

циента отражения. Однако при построении ЭМА с отрицательной индуктивностью по рис. 2, б в 2 раза уменьшается площадь рамки и наводимая в рамке ЭДС, а значит, в 4 раза снижается значение R_a (1). Кроме того при работе рамочной антенны на частотах коротковолнового диапазона размеры проводящей плоскости должны быть достаточно велики.

Эквивалентная схема согласования входного импеданса рамочной антенны с КОИ, выполненной по рис. 2, б, представлена на рис. 3, а, где R_1 – выходное сопротивление генератора; $K = \sqrt{R_1/R_a}$ – коэффициент трансформации сопротивлений; Z_a – комплексное сопротивление рамки с КОИ; L – абсолютное значение индуктивности КОИ. При идеальном КОИ индуктивность половинной рамки $L_a/2$ будет полностью скомпенсирована отрицательной индуктивностью КОИ $-L$ в широкой полосе частот и эквивалентная рамке цепь может быть приведена к схеме на рис. 3, б. Для этого случая предельные характеристики согласования рамочной антенны определяются известной форму-

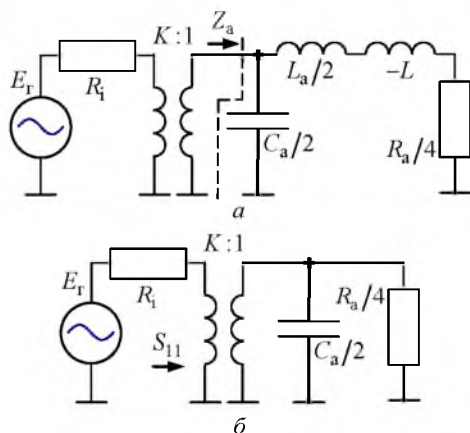


Рис. 3

лой Фано [7] для параллельного соединения конденсатора $C_a/2$ и резистора $R_a/4$:

$$[S_{11}]_{\min} \geq e^{-\pi/Q}; \quad Q = \frac{\Delta\omega C_a R_a}{8},$$

где $\Delta\omega$ – рабочая полоса частот антенны.

Предельные соотношения для полной рамки с отрицательной индуктивностью. На практике более удобно использовать включение согласующей отрицательной индуктивности у заземленного конца полной рамки, как показано на рис. 2, в. Эквивалентная схема входного импеданса такой рамки показана на рис. 4.

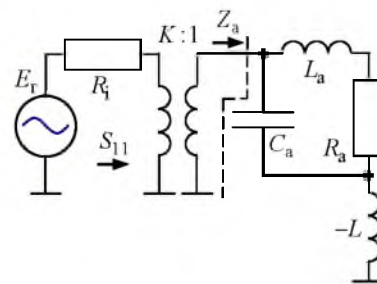


Рис. 4

Выражение для входного сопротивления антенны с индуктивным КОИ у заземленного конца имеет вид

$$Z_a(\Omega) = R_a \left\{ 1 - j\Omega \left[\frac{1}{Q} \left(1 + \Omega^2 \frac{L}{L_a} \right) - Q(1 - \Omega^2) \left(1 - \frac{L}{L_a} + \Omega^2 \frac{L}{L_a} \right) \right] \right\} \times \left[\left(\frac{\Omega}{Q} \right)^2 + (1 - \Omega^2)^2 \right]^{-1}, \quad (2)$$

где $\Omega = \omega/\omega_p$ – относительная частота;

$$Q = \omega_p L_a / R_a = (\omega_p C_a R_a)^{-1}$$

– добротность рамочной антенны на частоте параллельного резонанса ($\omega_p = (L_a C_a)^{-1/2}$ – частота параллельного резонанса рамки).

В случае включения отрицательной индуктивности у заземленного конца рамки полная компенсация реактивного сопротивления последней может быть достигнута лишь на одной частоте $\Omega_0 = \omega_0 / \omega_p \leq 1$.

Частоте Ω_0 соответствует абсолютное значение отрицательной индуктивности КОИ L , которое определяется из (2) решением уравнения

$$(1 - \Omega_0^2) \left[1 - \frac{L}{L_a} (1 - \Omega_0^2) \right] - \frac{1}{Q^2} \left(1 + \Omega_0^2 \frac{L}{L_a} \right) = 0. \quad (3)$$

Решив (3), получим значение индуктивности КОИ, компенсирующей реактивность рамочной антенны на частоте Ω_0 :

$$\frac{L}{L_a} = \frac{1}{1 - \Omega_0^2} - \frac{1}{Q^2 (1 - \Omega_0^2)} \approx \frac{1}{1 - \Omega_0^2}. \quad (4)$$

С учетом (2) и (4) получим выражение для квадрата модуля коэффициента отражения на входе генератора:

$$|S_{11}(\Omega)|^2 = \frac{|Z_a - R_i|^2}{|Z_a + R_i|^2} = \frac{N(\Omega, \Omega_0, r, Q)}{D(\Omega, \Omega_0, r, Q)},$$

где

$$\begin{aligned} N(\Omega, \Omega_0, r, Q) &= [1 - rA(\Omega, Q)]^2 + \\ &+ [\Omega Q / (1 - \Omega_0^2)]^2 B^2(\Omega, \Omega_0, Q); \\ D(\Omega, \Omega_0, r, Q) &= [1 + rA(\Omega, Q)]^2 + \\ &+ [\Omega Q / (1 - \Omega_0^2)]^2 B^2(\Omega, \Omega_0, Q); \\ r &= R_i / R_a, \end{aligned}$$

причем $A(\Omega, Q) = (1 - \Omega^2)^2 + \Omega^2 / Q^2$;

$$B(\Omega, \Omega_0, Q) = (\Omega^2 - \Omega_0^2)(1 - \Omega^2) - 1 / Q^2.$$

Запишем интегральное соотношение, определяющее предельный коэффициент отражения во входной цепи приемника с рамочной антенной, согласованной с помощью заземленного КОИ, реализующего функцию отрицательной индуктивности:

$$\int_{-\infty}^{\infty} \ln \frac{1}{|S_{11}(\omega)|^2} d\omega = 2 \int_0^{\infty} \ln \frac{1}{|S_{11}(\Omega)|^2} d\Omega = 2\omega_p \int_0^{\infty} \ln \frac{1}{|S_{11}(\Omega)|^2} d\Omega = 2\omega_p J(r, Q, \Omega_0), \quad (5)$$

где $J(r, Q, \Omega_0) = \int_0^{\infty} \ln \frac{1}{|S_{11}(\Omega)|^2} d\Omega$ может быть

найден численно для различных значений r, Q, Ω_0 .

На практике обычно требуется постоянное и минимальное значение $|S_{11}|$ в рабочей полосе частот антенны $\omega_B \dots \omega_H$ и равенство $|S_{11}(\omega)| = 1$ на всех остальных частотах. С учетом этих ограничений (5) преобразуется к виду

$$-4 \int_{\omega_H}^{\omega_B} \ln |S_{11}| d\omega = 2\omega_p J(r, Q, \Omega_0)$$

или $(\omega_B - \omega_H) \ln |S_{11}| = -(\omega_p / 2) J(r, Q, \Omega_0)$.

Запишем последнее выражение в более привычной для практического применения форме:

$$|S_{11}| \geq e^{-\frac{J(r, Q, \Omega_0)}{2(\Omega_B - \Omega_H)}}, \quad (6)$$

где $\Omega_B = \omega_B / \omega_p$; $\Omega_H = \omega_H / \omega_p$ – относительные верхняя и нижняя частоты рабочего диапазона антенны соответственно.

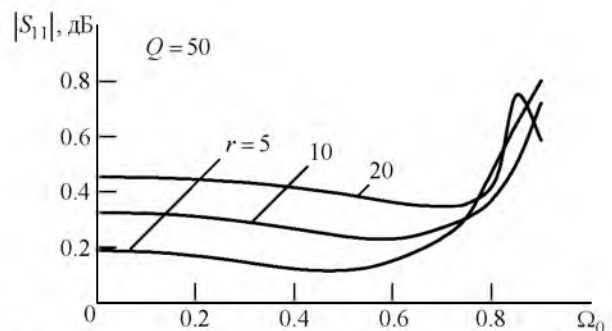
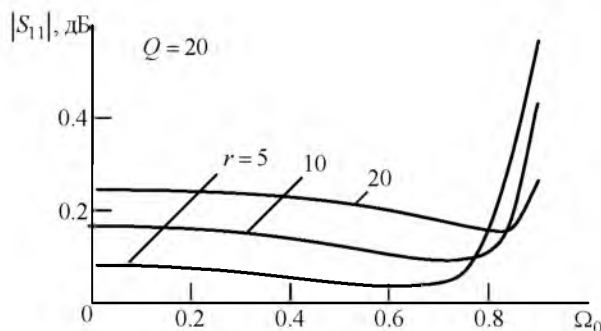


Рис. 5

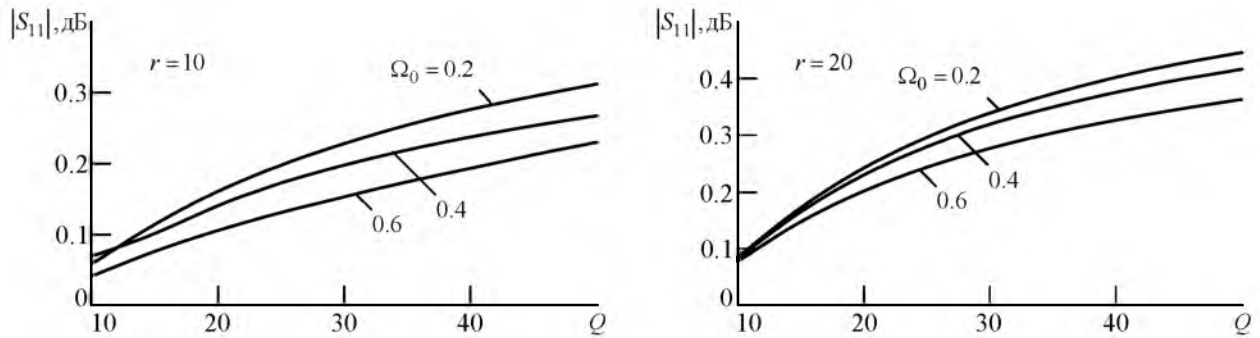


Рис. 6

Выражение (6) представляет собой искомое предельное соотношение, связывающее рабочий диапазон частот $\omega_B \dots \omega_H$ и модуль коэффициента отражения $|S_{11}|$ для рамочной ЭМА, согласованной с помощью отрицательной индуктивности, подключенной между выводом рамки и землей (см. рис. 2, в).

Результаты расчетов по (6) в рабочем диапазоне частот $f_H = 100$ МГц и $f_B = 130$ МГц представлены на рис. 5 и 6. На рис. 5 показаны частотные зависимости $|S_{11}| = f(Q)$ при различных значениях r , Q . На рис. 6 представлены зависимости модуля коэффициента отражения от добротности

$|S_{11}| = f(Q)$ при различных значениях r на нескольких частотах внутри рабочего диапазона.

Закключение. В настоящей статье приведены результаты исследования согласования рамочной ЭМА нефостеровской индуктивностью, включенной у заземленного вывода рамки (см. рис. 2, в). Проанализированы частотные зависимости коэффициента отражения рамочной антенны и получено предельное ограничение для полосы пропускания, связывающее параметры рамочной антенны, согласованной с помощью индуктивного КОИ, с рабочим диапазоном частот и коэффициентом отражения на входе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Sussman-Fort S. E., Rudish R. V. Non-Foster Impedance Matching of Electrically-Small Antennas // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2009. Vol. AP-57. P. 2230–2241.
2. Keum-Su Song, Rojas R. G. Non-Foster Impedance Matching of Electrically Small Antenna // IEEE Intern. Symp. on Antennas and Propagation and CNC/USNC/URSI National Radio Science Meeting, Toronto, Ontario, Canada, July 11–17, 2010. IEEE Trans. on Ant. and Prop. S/URSI. 2010. P. 215–402.
3. Bandwidth Limitations of Dipoles Matched with non-Foster Impedances / M. Hirvonen, A. Hujanen, J. Holmberg, J. C.-E. Sten // Proc. of Europ. Conf. on Antennas Propa-

- gat., EUCAP 2007, 6–10 Nov. 2007. URL: <https://aaltodoc.aalto.fi/bitstream/handle/123456789/3017/article3.pdf> (дата обращения: 20.02.2018).
4. Головкин А. А., Можяева Е. И. Ограничение полосы согласования приемных штыревых антенн нефостеровскими цепями // Изв. вузов России. Радиоэлектроника. 2016. № 2. С. 59–63.
5. John Dr., Volakis L. Antenna Engineering. Handbook. New York: McGraw-Hill, 2007. 1755 p.
6. Aberle J. T. Two-Port Representation of an Antenna with Application to Non-Foster Matching Network // IEEE Trans. on Ant. and Prop. 2008. Vol. AP-56, № 5. P. 1218–1222.

Статья поступила в редакцию 05 декабря 2017 г.

Головкин Александр Алексеевич – доктор технических наук (1993), профессор (1995) кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 126 научных работ, 49 авторских свидетельств и патентов. Сфера научных интересов – СВЧ-техника; антенны.
E-mail: algol110843@yandex.ru

Можяева Екатерина Игоревна – магистр по направлению "Радиотехника" (2017), аспирантка кафедры радиоэлектронных средств Санкт-Петербургского государственного электротехнического университета "ЛЭТИ" им. В. И. Ульянова (Ленина). Автор 10 научных публикаций. Сфера научных интересов – СВЧ-техника; антенны.
E-mail: kolychka-kate@rambler.ru

REFERENCES

1. Sussman-Fort S. E., Rudish R. V. Non-Foster Impedance Matching of Electrically-Small Antennas, IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2009, vol. 57, pp. 2230-2241.
2. Keum-Su Song, Roberto G. Rojas. Non-Foster Impedance Matching of Electrically Small Antennas. 2010 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and CNC/USNC/URSI National Radio Science Meeting, Toronto, Ontario, Canada, July 11–17.
3. Hirvonen M., Hujanen A., Holmberg J., Carl-Erik Sten J. Bandwidth Limitation of Dipoles Matched with non-Foster Impedances, Proceedings of European Conference on Antennas Propagation, EUCAP 2007, Nov. 2007, 5 p.
4. Golovkov A. A., Mozhaeva E. I. Bandwidth Limitations Matching of Electrically-Small Whip Antennas with Non-Foster Network. *Izvestija SPb GETU «LETI»* [Proceedings of Saint Petersburg Electrotechnical University]. 2016, no. 2, p. 59–63. (In Russian)
5. Dr. John, Volakis L. Antenna Engineering. Handbook. McGraw-Hill, 2007, p.1755.
6. Aberle J. T. Two-Port Representation of an Antenna with Application to Non-Foster Matching Network. IEEE Transactions on Antennas and Propagation. May 2008, vol. 56, pp. 1218–1222.

Received December, 05, 2017

Aleksander A. Golovkov – D.Sc. in Engineering (1993), Professor (1995) of the Department of Radio Electronic Facilities of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 126 scientific publications, 49 copyright certificates and patents. Area of expertise: microwave and theory of antennas.
E-mail: algol110843@yandex.ru

Ekaterina I. Mozhaeva – Master's Degree in Radio Engineering (2017), postgraduate student of the Department of Radio Electronic Facilities of Saint Petersburg Electrotechnical University "LETI". The author of 10 scientific publications. Area of expertise: microwave and theory of antennas.
E-mail: kolychka-kate@rambler.ru