



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2022-20-5-82-89>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.372.5

СПОСОБ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ МЕТОДИКИ СИНТЕЗА КВАЗИДВУХПОЛОСОВЫХ СОГЛАСУЮЩИХ УСТРОЙСТВ

М.А. ЯНЦЕВИЧ., А.А. СВИРИДЕНКО

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

Поступила в редакцию 5 апреля 2022

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2022

Аннотация. В статье рассматриваются вопросы, связанные с возможностями аналитической методики синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств и способом ее совершенствования. Методика основана на математическом аппарате обобщенного метода Дарлингтона с применением на этапе выбора аппроксимирующей функции специального способа формирования квазидвухполосовых частотных характеристик. Представлено сопоставление результатов согласования нагрузки, полученных при помощи разработанной методики и прогрессивным численным методом синтеза. Проведенный анализ решенной задачи позволил произвести частную оценку возможностей предлагаемой аналитической методики согласования. Обозначено важное ограничивающее обстоятельство для методики синтеза – отсутствие решений для нагрузок повышенной сложности, что связано с малой вариативностью известных аппроксимирующих функций передачи мощности. В качестве решения проблемы рассматриваются ограниченно-плоские функции, отличающиеся от классических аппроксимаций расширенной вариативной способностью. Использование комбинации знаний о формировании квазидвухполосовых частотных характеристик и методики использования ограниченно-плоских функций позволило расширить диапазон согласуемых нагрузок. Представлено решение тестовой задачи согласования 5-элементной нагрузки, для которой использование классических аппроксимаций не приемлемо.

Ключевые слова: согласующая цепь, модель, квазидвухполосовая частотная характеристика, аппроксимация, ограниченно-плоская функция, методика, нагрузка, параметры, интегральная ошибка.

Конфликт интересов. Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Янцевич М.А., Свириденко А.А. Способ совершенствования методики синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств. Доклады БГУИР. 2022; 20(5): 82-89.

A METHOD FOR IMPROVING THE TECHNIQUE FOR THE SYNTHESIS OF QUASI-TWO BANDPASS MATCHING DEVICES

MIKHAIL A. YANTSEVICH, ANATOLY A. SVIRIDENKO

Military Academy of the Republic of Belarus (Minsk, Republic of Belarus)

Submitted 5 April 2022

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2022

Abstract. The article deals with issues related to the possibilities of the analytical technique for the synthesis of quasi-two-band matching devices and the way to improve it. The technique is based on the mathematical apparatus of the Generalized Darlington method with the use of a special method of forming quasi-two-band frequency characteristics at the stage of choosing an approximating function. A comparison of the results of load matching obtained using the developed methodology and a progressive numerical synthesis method is presented. The analysis of the solved problem allowed us to make a private assessment of the capabilities of the proposed analytical method of matching. An important limiting circumstance for the synthesis technique is indicated – the lack of solutions for loads of increased complexity, which is caused by a small variability of the known approximating power transfer functions. As a solution to the problem, boundedly flat functions are considered, which differ from classical approximations in their extended variability. The use of a combination of knowledge about the formation of quasi-two-band frequency characteristics and the technique of using limited-flat functions made it possible to expand the range of matched loads. A solution to the test problem of matching a 5-element load is presented, for which the use of classical approximations is not acceptable.

Keywords: matching circuit, model, quasi-two-band frequency response, approximation, boundedly flat function, technique, load, parameters, integral error.

Conflict of interests. The authors declare no conflict of interests.

For citation. Yantsevich M.A., Sviridenko A.A. A Method for Improving the Technique for the Synthesis of Quasi-two Bandpass Matching Devices. Doklady BGUIR. 2022; 20(5): 82-89.

Введение

Одним из требований, предъявляемых к современным средствам связи, глобальным спутниковым системам позиционирования, является обеспечение их работы одновременно в нескольких частотных диапазонах. А это означает, что техническое исполнение таких систем предусматривает наличие в своем составе многоканальных приемо-передающих модулей. Неотъемлемой составляющей последних являются многополосные и квазидвухполосовые согласующие устройства.

Основная задача этих устройств – обеспечение максимального уровня передаваемой мощности между элементами приемо-передающего тракта в заданных частотных диапазонах. Поэтому качество согласования влияет на эффективность работы аппаратуры, в частности на такие характеристики, как дальность радиосвязи, помехозащищенность, пропускная способность радиоканала. Это обстоятельство сохраняет интерес к совершенствованию существующих методов их реализаций.

Как и в любой другой науке, предпочтительными являются аналитические методы, которые дают возможность перспективы в решении задач согласования, наиболее полную информацию для конструктора и позволяют глубже понять физику процесса согласования. Настоящая статья является продолжением [1] и преследует несколько целей. Одна из них – оценка возможностей аналитической методики [1] по отношению к прогрессивным численным методам синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств. Другая цель – согласование нагрузок, обусловленных квазидвухполосовой частотной характеристикой, имеющих более сложный характер сопротивления, чем у простых моделей, подобных низкочастотной RC цепи. Большинство таких нагрузок недоступны для аналитических методов синтеза. Причиной этому

является малое количество вариативных параметров классических аппроксимирующих функций (АФ) передачи мощности [2]. Ниже представлен возможный вариант решения указанной проблемы.

Сопоставление результатов согласования

Эффективность аналитической методики [1] подтверждается примером согласования низкочастотной RC нагрузки. Полученная реализация согласующей цепи (СЦ) обеспечила более избирательную частотную характеристику в сравнении с другим аналитическим результатом согласования. Данный факт допускает мнение о значимой конкурентоспособности методики [1] в аналитической теории широкополосного согласования. Однако при решении подобных задач редко прибегают к аналитике, отдавая предпочтение более эффективной группе методов.

Численные методы согласования успешно решают задачи практически любой сложности, в том числе по реализации квазидвухполосовых согласующих устройств. Отсюда интерес к оценке возможностей аналитической методики [1] при согласовании с ее помощью нагрузок, доступных численным методам.

Необходимо отметить, что методика [1] рассчитана на использование классических АФ, способных дать решения для многих относительно простых задач согласования. Рассмотрим одну из таких задач (рис. 1), решение которой представлено в диссертационных исследованиях Васильева¹.

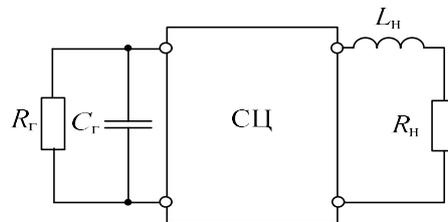


Рис. 1. Задача согласования комплексных нагрузок
Fig. 1. The task of matching complex loads

Параметры по условию задачи соответствуют: $R_T = 1$, $C_T = 0,5$, $R_H = 5$, $L_H = 1$. Диапазоны частот: $\omega_{\min 1} \dots \omega_{\max 1} = 1 \dots 2$ Гц, $\omega_{\min 2} \dots \omega_{\max 2} = 5 \dots 6$ Гц. Как было установлено в [3], комплексный характер согласуемых сопротивлений вводит дополнительное ограничение на порядок АФ. Решение задачи возможно для четного порядка функции передачи мощности. Согласно обозначенного требования к порядку функции передачи примем в качестве исходной АФ Чебышева 4-го порядка:

$$K_p(\omega^2) = K / \left[1 + \varepsilon^2 (8 \cdot \omega'^4 - 8 \cdot \omega'^2 - 1)^2 \right],$$

где $K \in (0; 1]$ – коэффициент уровня передачи мощности; $\varepsilon \in (0; 1]$ – коэффициента пульсаций чебышевской АФ; $\omega' = \left((1,39^2 - \omega^2) \cdot (5,574^2 - \omega^2) \right) / \omega \cdot 27,994$ – квазидвухполосовое частотное преобразование, полученное согласно [1].

В соответствии с методикой [1] решение получено при значениях параметров АФ $\varepsilon = 0,124$, $K = 1$. Полученная в результате синтеза квазидвухполосовая СЦ (рис. 2) формирует более избирательную частотную характеристику передачи мощности (рис. 3) в сравнении с известным результатом Васильева¹. Необходимо отметить, что полученная схемная реализация отличается только наличием трансформатора и дополнительными тремя реактивными элементами.

¹ Васильев Д.А. Структурно-параметрический синтез четырехполюсников при широкополосном согласовании и моделировании на основе аппарата Т-матриц : дис. ... к-та техн. наук : 05.12.04. – Минск, 2010: 121 л.

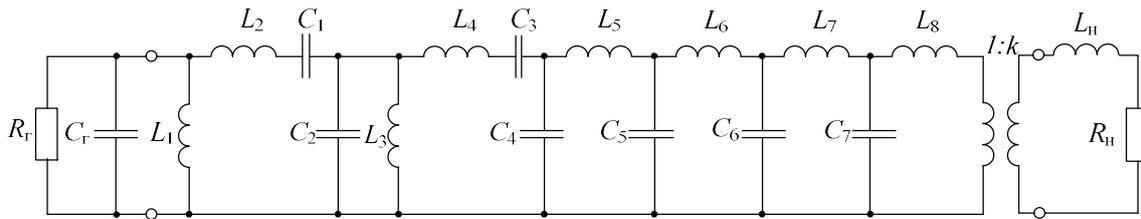


Рис. 2. Принципиальная схема СЦ с нагрузками
Fig. 2. Schematic of the matching device with loads

Значения номиналов СЦ соответственно равны: $L_1 = 0,527$, $L_2 = 0,145$, $C_1 = 0,749$, $C_2 = 1,034$, $L_3 = 0,308$, $L_4 = 0,274$, $C_3 = 0,529$, $C_4 = 0,251$, $L_5 = 0,5$, $C_5 = 0,568$, $L_6 = 0,0886$, $C_6 = 1,646$, $L_7 = 0,09746$, $C_7 = 0,822$, $L_8 = 0,041$, $k = 6,024$.

На рис. 3 представлено сопоставление частотных характеристик передачи мощности.

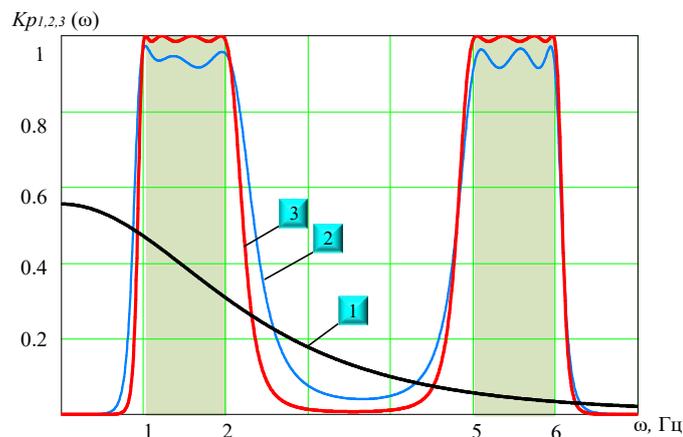


Рис. 3. Частотная характеристика передачи мощности соединенных нагрузок: 1 – без СЦ; 2 – с СЦ, реализованной Васильевым¹; 3 – с СЦ, полученной при помощи методики [1]

Fig. 3. Power transmission frequency response connected loads: 1 – without a matching network; 2 – with matching network implemented by Vasiliev¹; 3 – with matching network obtained using methodology [1]

Взяв за исходную АФ Чебышева 2-го порядка, решение данной задачи возможно с меньшим количеством элементов СЦ. Решение получено при значениях параметров функции передачи: $\varepsilon = 0,24$, $K = 1$.

В результате синтеза СЦ, получаем следующую реализацию, приведенную на рис. 4.

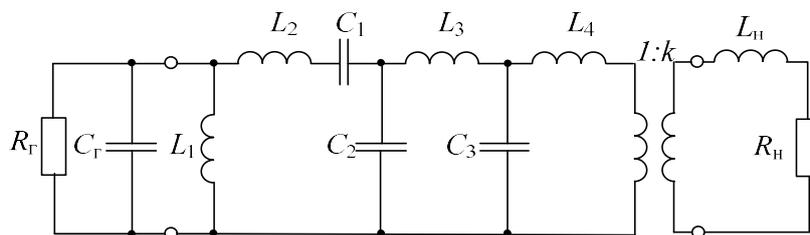


Рис. 4. Принципиальная схема СЦ с нагрузками
Fig. 4. Schematic of the matching device with loads

Значения номиналов СЦ соответственно равны: $L_1 = 0,504$, $L_2 = 0,146$, $C_1 = 1,017$, $C_2 = 0,783$, $L_3 = 0,16$, $C_3 = 0,525$, $L_4 = 0,066$, $k = 4,808$.

Полученная схемная реализация меньше на пять реактивных элементов при наличии трансформатора в сравнении со схемой, предложенной в работе Васильева¹. На рис. 5 показаны частотные характеристики передачи мощности.

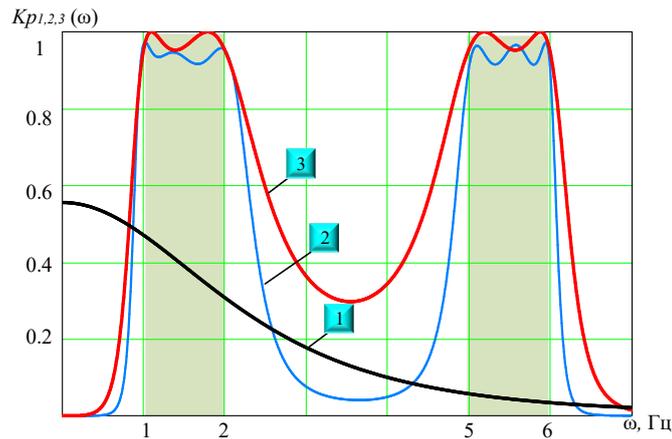


Рис. 5. Частотная характеристика передачи мощности соединенных нагрузок: 1 – без СЦ; 2 – с СЦ, реализованной Васильевым¹; 3 – с СЦ, полученной при помощи методики [1]

Fig. 5. Power Transmission Frequency Response connected loads: 1 – without a matching network; 2 – with matching network implemented by Vasiliev¹; 3 – with matching network obtained using methodology [1]

Качество согласования по критерию максимума передачи мощности в обеих реализациях согласующих устройств не уступает результатам, полученным структурно-параметрическим методом. В этом можно убедиться при оценке интегральной ошибки в заданных частотных диапазонах (табл. 1).

Интегральная ошибка первой реализации (рис. 2) меньше на 5,345 и 5,193 % (для соответствующего частотного поддиапазона), чем у схемы Васильева¹. Для второй реализации (рис. 4) эти значения равны 3,859 и 3,707 %. Представленные схемы имеют в своем составе такой элемент, как трансформатор, который в большинстве случаев можно исключить при помощи преобразования Нортон.

Таблица 1. Оценка уровня передаваемой мощности по интегральному критерию
Table 1. Estimation of the power level transmitted by the integral criterion

Реализация Realization	Количество реактивных элементов СЦ Number of reactive elements of the matching network	Интегральная ошибка в различных частотных диапазонах Integral error in different frequency ranges	
		$1 - \int_1^2 K_{2,3}(\omega)$	$1 - \int_5^6 K_{2,3}(\omega)$
Васильева ¹	12	0,061	0,059
Согласно методике [1]	рис. 2	0,007468	0,0074683
	рис. 4	0,02233	0,0223294

Синтез квазидвухполосовых СЦ с использованием ограниченно-плоских АФ

Обеспечение оптимальных характеристик моделируемых радиотехнических устройств, как правило, связано с увеличением требований к их конструкции. Вместе с тем речь идет о повышении сложности моделей сопротивлений этих устройств. Применение классических АФ в аналитической теории широкополосного согласования позволяет находить решение для относительно простых по структуре моделей сопротивлений (различные комбинации двух и трехэлементных *RLC* цепей) с ограниченным диапазоном значений собственных параметров. Для более сложных конструкций нагрузок аналитические решения имеют частный характер или вовсе отсутствуют. АФ с расширенным вариативным потенциалом и методика ее использования в [2] позволяет значительно увеличить диапазон согласуемых нагрузок. Предлагается использовать знание о принципах формирования квазидвухполосовых частотных характеристик [1] применительно к методике синтеза [2], основанной на использовании ограниченно-плоских АФ.

На рис. 6 представлен распространенный эквивалент нагрузки, характер сопротивления которого может соответствовать различным радиотехническим устройствам [4–5].

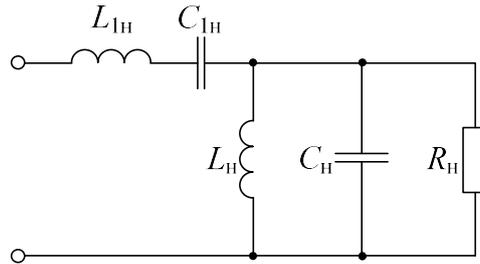


Рис. 6. Эквивалентная схема нагрузки
Fig. 6. Equivalent scheme load

Зададим следующие значения параметров нагрузки:

$$R_{Г} = 1, R_{н} = 5, C_{н} = 1, L_{н} = 10, C_{1н} = 1,4, L_{1н} = 3.$$

Диапазоны частот:

$$\omega_{\min 1} \dots \omega_{\max 1} = 0,2 \dots 0,3 \text{ Гц}, \quad \omega_{\min 2} \dots \omega_{\max 2} = 0,9 \dots 1 \text{ Гц}.$$

Согласование предлагаемой нагрузки с использованием классических АФ (Баттерворта, Чебышева) не представляется возможным ввиду их ограниченной параметрической способности. Предлагается использовать для согласования данной нагрузки квазидвухполосовую ограниченно-плоскую АФ 2-го порядка, конструкция которой соответствует следующему выражению:

$$K_P(\omega^2) = K / \left[1 + \frac{\varepsilon^2}{v_1 + v_2} (v_1 \cdot \omega'^2 + v_2 \cdot \omega'^4) \right],$$

где v_1, v_2 – варьируемые параметры; $\omega' = \left((0,243^2 - \omega^2) \cdot (0,954^2 - \omega^2) \right) / 0,084 \cdot \omega$ – квазидвухполосовое частотное преобразование, полученное согласно [1].

Руководствуясь алгоритмом синтеза, описанного в [2], получаем решение задачи при значениях параметров функции передачи: $\varepsilon = 0,4$, $K = 0,992$, $v_1 = 0,185$, $v_2 = 2,794$. В результате синтеза по функции выходного сопротивления получаем следующую реализацию СЦ, представленную на рис. 7.

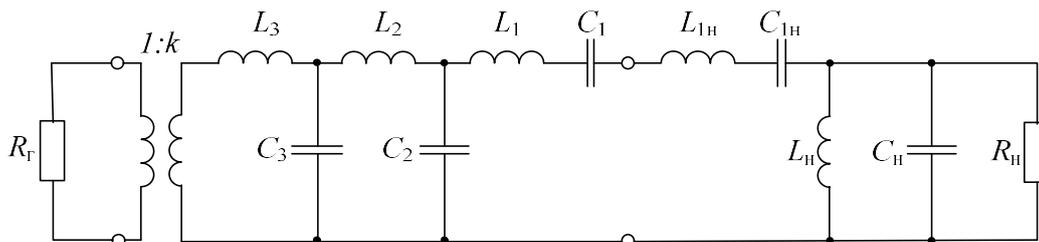


Рис. 7. Принципиальная схема СЦ с нагрузкой
Fig. 7. Schematic of the matching device with load

Значения номиналов СЦ соответственно равны: $L_1 = 0,221$, $C_1 = 2,283$, $C_2 = 1,639$, $L_2 = 4,26$, $C_3 = 0,722$, $L_3 = 2,434$, $k = 0,802$.

На рис. 8 представлены частотные характеристики передачи мощности.

Полученный результат согласования можно улучшить за счет увеличения порядка аппроксимации. Указанный пример носит демонстративный характер и приведен в доказательство параметрического преимущества ограниченно-плоской АФ в сравнении с классическими аппроксимациями.

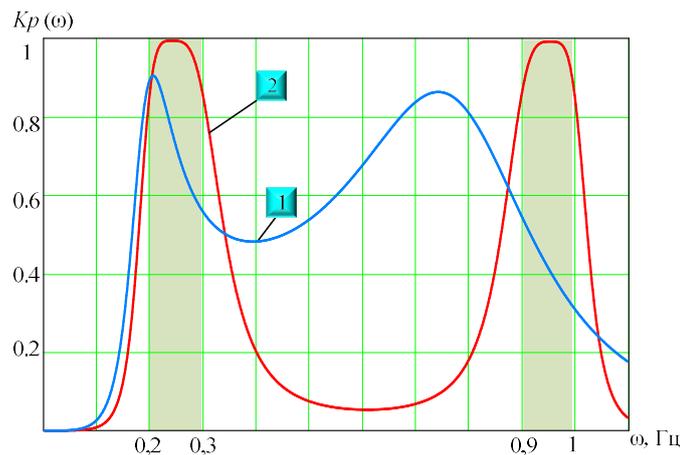


Рис. 8. Частотная характеристика передачи мощности нагрузки: 1 – без СЦ; 2 – с СЦ
Fig. 8. Power transmission frequency response load: 1 – without a matching network; 2 – with matching network

Заклучение

Впервые представлено аналитическое решение задачи согласования с обеспечением квазидвухполосовой частотной характеристики, в которой комплексный характер сопротивления имеет не только нагрузка, но и источник сигналов. При этом полученное согласующее устройство обеспечивает по ряду параметров лучший результат, нежели реализация численного метода. Данный факт свидетельствует о значимой конкурентоспособности предлагаемой в [1] аналитической методики синтеза. Другим важным результатом исследования, направленного на расширение диапазона согласуемых нагрузок, является комбинация знаний, выраженная в использовании квазидвухполосовых ограниченно-плоских АФ. Представленное решение тестовой задачи согласования 5-элементной модели не исчерпывает возможности предлагаемой аналитической концепции для более сложных конструкций нагрузок и определенно указывает на ее перспективы.

Список литературы

1. Янцевич М.А., Филиппович Г.А Методика синтеза квазидвухполосовых согласующих устройств. *Доклады БГУИР*. 2020;2:71-79. DOI:10.35596/1729-7648-2020-18-2-77-79.
2. Янцевич М.А., Филиппович Г.А Методика синтеза широкополосных согласующих устройств с использованием ограниченно-плоских аппроксимирующих функций. *Известия ГТУ*. 2021;129:154-158.
3. Филиппович Г.А. *Широкополосное согласование сопротивлений*. Минск: Военная академия Республики Беларусь; 2004.
4. Caytan O., Bogaert L., Haolin Li, Van Kerrebrouck J., Lemey S., Agneessens S., Bauwelinck J., Demeester P., Torfs G., Vande Ginste D., and Rogier H. Compact and wideband transmit opto-antenna for radio frequency over fiber. *Optics Express*. 2019;27:8395-8414. DOI: 10.1364/OE.27.008395.
5. Ghorbani A. , Raed A. Abd-Alhameed, Neil J. McEwan, Zhou D. An Approach for Calculating the Limiting Bandwidth-Reflection Coefficient Product for Microstrip Patch Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2006;54(4):1328-1331. DOI: 10.1109/TAP.2006.872641.

References

1. Yantsevich M.A., Filippovich G.A. [The metod of synthesis of quasi-dual-band matching device]. *Doklady BGUIR = Doklady BGUIR*. 2020;2:71-79. (In Russ.)
2. Yantsevich M.A., Filippovich G.A. [Technique for the synthesis of quasi-two-band matching devices]. *Izvestiia Gomel'skogo gosudarstvennogo universiteta imeni F. Skoriny = Proceedings of Francisk Scorina Gomel State University*. 2021;129:154-158. (In Russ.)
3. Filippovich G.A. [*Broadband impedance matching*]. Minsk: Military Academy of the Republic of Belarus; 2004. (In Russ.)

4. Caytan O., Bogaert L., Haolin Li, Van Kerrebrouck J., Lemey S., Agneessens S., Bauwelinck J., Demeester P., Torfs G., Vande Ginste D., and Rogier H. Compact and wideband transmit opto-antenna for radio frequency over fiber. *Optics Express*. 2019;27:8395-8414. DOI: 10.1364/OE.27.008395.
5. Ghorbani A., Raed A. Abd-Alhameed, Neil J. McEwan, Zhou D. An Approach for Calculating the Limiting Bandwidth-Reflection Coefficient Product for Microstrip Patch Antennas. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. 2006;54(4):1328-1331. DOI: 10.1109/TAP.2006.872641.

Вклад авторов

Янцевич М.А. синтезировал согласующие цепи, провел сопоставление результатов согласования, определил способ совершенствования разработанной методики.

Свириденко А.А. принимал участие в интерпретации полученных результатов.

Authors' contribution

Yantsevich M.A. synthesized matching circuits, compared the results of matching, determined a way to improve the developed methodology.

Sviridenko A.A. participated in the interpretation of the obtained results.

Сведения об авторах

Янцевич М.А., старший инженер кафедры автоматизации, радиолокации и приемо-передающих устройств Военной академии Республики Беларусь.

Свириденко А.А., к.т.н., слушатель факультета Генерального штаба Военной академии Республики Беларусь.

Information about the authors

Yantsevich M.A., Senior Engineer at the Department of Automation, Radar and Transceivers of the Military Academy of the Republic of Belarus.

Sviridenko A.A., Cand. of Sci., Student at the Faculty of the General Staff of the Military Academy of the Republic of Belarus.

Адрес для корреспонденции

220057, Республика Беларусь,
г. Минск, пр. Независимости, 220,
Военная академия Республики Беларусь;
тел. +375-29-850-31-71;
e-mail: yantsevich1052500@mail.ru
Янцевич Михаил Александрович

Address for correspondence

220057, Republic of Belarus,
Minsk, Independence Ave., 220,
Military Academy of the Republic of Belarus
tel. +375-29-850-31-71;
e-mail: yantsevich1052500@mail.ru
Yantsevich Mikhail Aleksandrovich