

УДК 621.372.0

**ШИРОКОПОЛОСНОЕ СОГЛАСУЮЩЕ-СИММЕТРИРУЮЩЕЕ
УСТРОЙСТВО НА ТРЕХ СВЯЗАННЫХ ЛИНИЯХ ПЕРЕДАЧИ****Г.Н. Девятков, М.В. Коваль***Новосибирский государственный технический университет*

Рассмотрено широкополосное согласующе-симметрирующее устройство на трех связанных линиях передачи, получена его математическая модель и найдены условия идентичности передачи сигнала в плечи. Полученные условия – это основные соотношения, которые должны быть выполнены при проведении синтеза широкополосных симметрирующих устройств. Синтез рассмотренного симметрирующего устройства сводится к синтезу эквивалентного четырехполюсника. С помощью формул преобразования была найдена математическая модель эквивалентного четырехполюсника и проведен синтез в рамках двухэтапной процедуры, где на первом этапе строится начальное приближение, т.е. уточняется структура его собственных функций и находятся начальные значения ее параметров, а на втором – находится оптимальное решение в заданной полосе рабочих частот. Затем был произведен обратный переход к согласующе-симметрирующему устройству и найдены все его параметры. Для иллюстрации возможностей метода синтеза был проведен синтез согласующе-симметрирующих устройств для различных значений сопротивлений нагрузок в полосе нормированных рабочих частот с модулем коэффициента отражения по входу не хуже 0,2 для различных сопротивлений нагрузок. Приведенные численные примеры подтверждают корректность предложенных математических процедур. Метод позволяет разработчику активно вмешиваться в процесс синтеза и в реальном масштабе времени находить оптимальные решения.

Ключевые слова: компактное симметрирующее устройство, синтез, согласование, связанные отрезки линий передачи.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-50-58

Введение

Симметрирующие устройства – это основные компоненты во многих коммуникационных устройствах, таких как балансный смеситель, двухтактный усилитель, антенные системы и др. Основные функции симметрирующего устройства – это симметрирование и согласование. Важнейшими характеристиками симметрирующего устройства являются широкополосность, уровень модуля коэффициента отражения в полосе пропускания. Одной из современных тенденций развития симметрирующих устройств является миниатюризация конструкции данных устройств.

Известно, что наиболее компактными являются симметрирующие устройства на связанных отрезках линий передачи, при этом они могут совмещать в себе функции симметрирования и согласования нагрузок.

Наиболее простым и широко применяемым является симметрирующее устройство Маршанда [1]. Это устройство состоит из двух отрезков связанных четвертьволновых линий передачи. Недостаток данного устройства – большие габариты. С целью улучшения рабочих параметров и уменьшения габаритов сим-

Исследование выполнено при финансовой поддержке Министерства образования и науки РФ (госзадание № 8 337 2014/К).

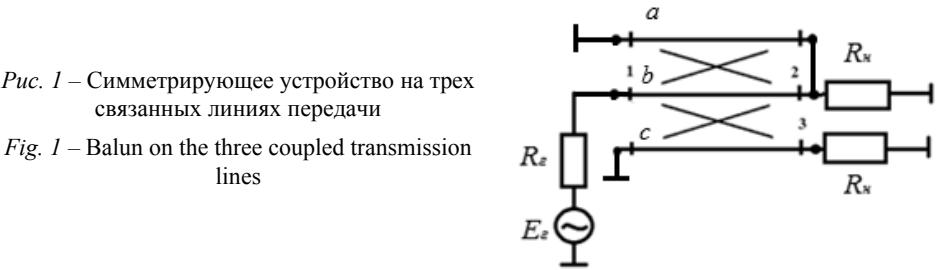
метрирующие устройства претерпели ряд изменений [2–3]. В источнике [3] описано миниатюризированное симметрирующее устройство на двух связанных отрезках линий передачи длиной $\lambda/8$. Недостаток данного устройства – узкая полоса пропускания.

Симметрирующие устройства на трех связанных линиях передачи более сложны в проектировании, но зато более компактны и имеют достаточно хорошие рабочие характеристики. В источнике [4] предложен аналитический метод синтеза симметрирующих устройств на трех связанных отрезках линий передачи. Следует отметить, что предложенный метод представляет собой достаточно сложную математическую процедуру и требует высокой квалификации разработчика.

Целью данной работы является разработка численного метода синтеза, который позволил бы в интерактивном режиме проводить синтез согласующе-симметрирующих устройств на отрезках связанных линий передачи в заданной полосе рабочих частот.

1. Постановка задачи

Структурная схема симметрирующего устройства на трех связанных отрезках линий передачи a, b, c приведена на рис. 1, где R_T и R_H – сопротивления генератора и нагрузки соответственно.



При разработке метода синтеза ограничимся случаем, когда емкость связи между линиями a и c равна нулю, тогда параметры устройства полностью определяются проводимостями четного $Y_{oe}^a, Y_{oe}^b, Y_{oe}^c$ и нечетного Y_{oo}^a, Y_{oo}^c типов возбуждения.

2. Теория

2.1. Математическая модель симметрирующего устройства

Для нахождения математической модели данного устройства применяется метод декомпозиции, т. е. разбиваем данное устройство на два простых устройства, приведенных на рис. 2, где $\theta = \pi/2$ – электрическая длина, $y_{oo}^{a'}, y_{oo}^{a''}, y_{oo}^{b'}, y_{oo}^{b''}$ – проводимости нечетного типа возбуждения, а $y_{oe}^{a'}, y_{oe}^{a''}, y_{oe}^{b'}, y_{oe}^{b''}$ – проводимости четного типа возбуждения отрезков связанных линий передачи a', b', a'', b'' .

Будем строить математическую модель симметрирующего устройства в у-матричном представлении, так как это позволяет получать более удобные в практическом отношении реализации. Для этого находим системы уравнений каждой секции устройства (рис. 2), затем объединяем их в одну. Полученная математическая модель симметрирующего устройства на трех связанных отрезках линиях передачи имеет вид

$$y = \begin{vmatrix} \frac{\Sigma'_b + \Sigma''_a}{2S} & \frac{p'_b - \Sigma'_b - \Sigma''_a}{2S'} & \frac{p''_a}{2S'} \\ \frac{p'_a - \Sigma'_b - \Sigma''_a}{2S'} & \frac{\Sigma'_a - p'_a - p'_b + \Sigma'_b + \Sigma''_a}{2S} & -\frac{p''_a}{2S'} \\ \frac{p''_b}{2S'} & -\frac{p''_b}{2S'} & \frac{\Sigma''_b}{2S} \end{vmatrix}, \quad (1)$$

где $\Sigma'_a = y_{oo}^{a'} + y_{oe}^{a'}$, $\Sigma'_b = y_{oo}^{b'} + y_{oe}^{b'}$, $p'_a = y_{oo}^{a'} - y_{oe}^{a'}$, $p'_b = y_{oo}^{b'} - y_{oe}^{b'}$, $\Sigma''_a = y_{oo}^{a''} + y_{oe}^{a''}$, $\Sigma''_b = y_{oo}^{b''} + y_{oe}^{b''}$, $p''_a = y_{oo}^{a''} - y_{oe}^{a''}$, $p''_b = y_{oo}^{b''} - y_{oe}^{b''}$, $S = j \operatorname{tg} \theta$, $S' = j \sin \theta$.

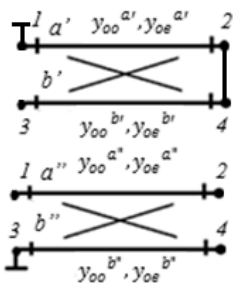


Рис. 2 – Два простых устройства на отрезках связанных линий передачи

Fig. 2 – Two simple networks on the coupled transmission lines

2.2. Анализ работы симметрирующего устройства

Несмотря на очевидное достоинство данного устройства – широкополосность, коэффициенты прямой передачи сигнала на выходы симметрирующего устройства не равны, так как $y_{21} \neq y_{31}$, что следует из полученной y -матрицы устройства (1), следовательно, данное устройство не выполняет свою основную функцию симметрирования.

В результате проведенного анализа математической модели устройства были определены условия, при которых обеспечивается на всех частотах равенство модулей коэффициентов передачи сигнала в прямом направлении ($y_{21} = y_{31}$) с разностью фаз в 180 градусов:

$$p'_b - \Sigma'_b = \Sigma''_a - p''_a, \quad (2)$$

$$p''_a = p''_b. \quad (3)$$

Результирующая матрица проводимостей симметрирующего устройства с учетом вышеприведенных условий имеет следующий вид:

$$y = \begin{vmatrix} \frac{\Sigma'_b + \Sigma''_a}{2S} & -\frac{p''_a}{2S'} & \frac{p''_a}{2S'} \\ -\frac{p''_a}{2S'} & \frac{\Sigma'_a - p'_a + p''_a}{2S} & -\frac{p''_a}{2S} \\ \frac{p''_a}{2S'} & -\frac{p''_a}{2S} & \frac{\Sigma'_a}{2S} \end{vmatrix}. \quad (4)$$

Полученные условия (2), (3) – это основные соотношения, которые должны быть выполнены при синтезе широкополосных согласующе-симметрирующих устройств на трех связанных четвертьволновых отрезках линий передачи.

Данной информации достаточно для определения параметров компактных согласующе-симметрирующих устройств на отрезках трех связанных линий передачи (рис.1):

$$\left. \begin{aligned} Y_{oe}^a &= y_{oe}^{a'} \\ Y_{oe}^b &= y_{oe}^{a''} \\ Y_{oe}^c &= y_{oe}^{b''} \end{aligned} \right\} \left. \begin{aligned} Y_{oo}^a &= y_{oo}^{a'} \\ Y_{oo}^c &= y_{oo}^{b''} \end{aligned} \right\}. \quad (5)$$

2.3. Синтез широкополосного согласующе-симметрирующего устройства

В работе [5] приводится численный метод синтеза широкополосных согласующе-симметрирующих устройств с общих позиций, который базируется на синтезе согласующей цепи [6].

Тогда с использованием результатов работы [5] задача синтеза данного устройства сводится к задаче синтеза эквивалентного четырехполюсника, что позволяет уменьшить количество математических выкладок и упростить решение задачи.

С помощью формул преобразования [5] переходим к математической модели эквивалентного четырехполюсника и по этой модели определяем структуру элементов y -матрицы четырехполюсника.

$$\left. \begin{aligned} y_{11}(S) &= y_{11}^2(S) \\ y_{22}(S) - y_{23}(S) &= 2 \cdot y_{22}^2(S) \\ y_{21}(S) &= y_{21}^2(S) \end{aligned} \right\}, \quad (6)$$

где $y_{11}(S)$, $y_{22}(S)$, $y_{21}(S)$, $y_{23}(S)$ – элементы y -матрицы симметрирующего устройства; $y_{11}^2(S)$, $y_{22}^2(S)$, $y_{21}^2(S)$ – элементы y -матрицы эквивалентного четырехполюсника. Далее проводим его синтез в рамках двухэтапной процедуры [6], где на первом этапе строится начальное приближение, т. е. уточняется структура его собственных функций и находятся начальные значения ее параметров, а на втором – находится оптимальное решение в заданной полосе рабочих частот. Результирующая y -матрица широкополосного согласующе-симметрирующего устройства на трех связанных отрезках линий передачи определяется с помощью обратных эквивалентных преобразований (6) и с использованием соотношений (5) определяются параметры согласующе-симметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи (рис. 1).

В качестве примера рассмотрим синтез согласующе-симметрирующего устройства в полосе нормированных рабочих частот $0,7 \dots 1,3$. Внутреннее сопротивление генератора $R_r = 1$, сопротивление нагрузок $R_n = 0,5$.

Вначале синтезируется эквивалентный четырехполюсник, согласующий в заданной полосе рабочих частот заданные сопротивления генератора и нагрузок. В результате получаем y -матрицу эквивалентного четырехполюсника, которая имеет вид

$$y = \begin{vmatrix} \frac{2,42}{2S} & -\frac{0,855}{2S'} \\ -\frac{0,855}{2S'} & \frac{1,105}{2S} \end{vmatrix}. \quad (7)$$

С помощью обратных эквивалентных преобразований находится матрица проводимостей согласующе-симметрирующего устройства (4):

$$y = \begin{vmatrix} \frac{4,84}{2S} & -\frac{1,71}{2S'} & \frac{1,71}{2S'} \\ \frac{1,71}{2S'} & \frac{2,71}{2S} & \frac{1,71}{2S} \\ \frac{1,71}{2S'} & \frac{1,71}{2S} & \frac{2,71}{2S} \end{vmatrix} \quad (8)$$

и с использованием соотношений (5) определяем параметры согласующе-симметрирующего устройства на отрезках трех связанных линий передачи (см. рис. 1), приведенные в таблице во втором столбце.

Для иллюстрации возможностей метода синтеза был проведен синтез согласующе-симметрирующих устройств для различных значений сопротивлений нагрузок. В таблице приведены полученные значения всех проводимостей четного и нечетного типов возбуждения.

Проводимости четного и нечетного типов возбуждения симметрирующего устройства

Conductively type even and odd excitation balun

	$R_H = 0,5$	$R_H = 1$	$R_H = 1,5$	$R_H = 2$
Y_{oe}^a	0,008	0,01	0,0025	0,0025
Y_{oe}^b	0	0	0	0
Y_{oe}^c	0,0212	0,01	0,0025	0,0025
Y_{oo}^a	0,0708	0,0726	0,0448	0,0556
Y_{oo}^c	0,0439	0,0442	0,0306	0,027

3. Результаты компьютерного моделирования

Моделирование синтезированных согласующе-симметрирующих устройств на трех связанных линиях передачи было проведено в программе MathCAD.

В результате моделирования были получены частотные характеристики: для $R_H = 0,5$ приведены на рис. 3, 4, 5; для $R_H = 1$ – на рис. 6, 7; для $R_H = 1,5$ – на рис. 8, 9; для $R_H = 2$ приведены на рис. 10, 11. График разности фаз выходных сигналов для всех значений нагрузки имеет идентичный вид, как на рис. 5 для $R_H = 0,5$.

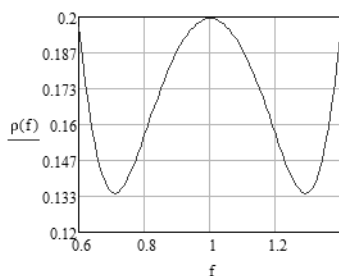


Рис. 3 – Модуль коэффициента отражения по входу $R_H = 0,5$

Fig. 3 – The module of the reflection coefficient at the input $R_H = 0,5$

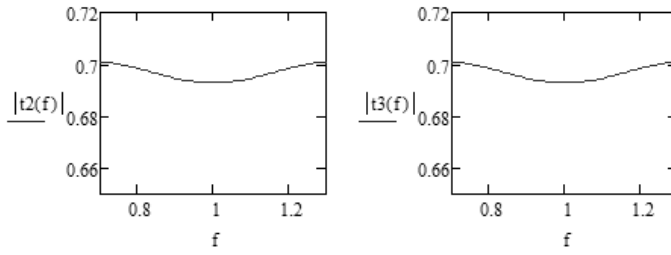


Рис. 4 – Модули коэффициентов передачи по напряжению в плечи $R_n = 0,5$

Fig. 4 – The modules of the voltage transmission coefficients $R_n = 0,5$

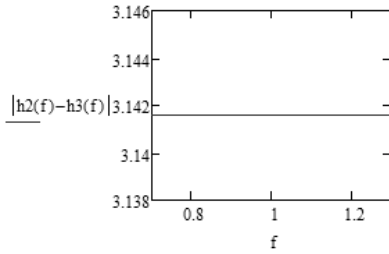


Рис. 5 – Разность фаз выходных сигналов $R_n = 0,5$

Fig. 5 – Phase difference of output signals $R_n = 0,5$

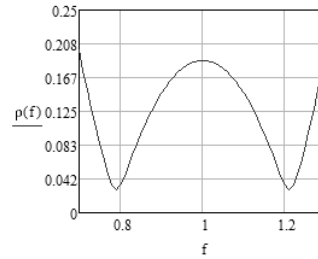


Рис. 6 – Модуль коэффициента отражения по входу $R_n = 1$

Fig. 6 – The module of the reflection coefficient at the input $R_n = 1$

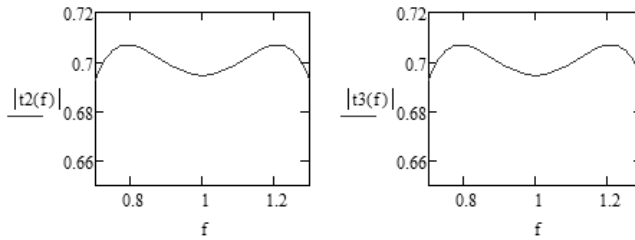
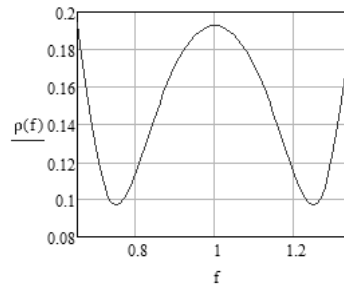


Рис. 7 – Модули коэффициентов передачи сигнала $R_n = 1$

Fig. 7 – The modules of the voltage transmission coefficients $R_n = 1$

Рис. 8 – Модуль коэффициента отражения по входу $R_n = 1,5$

Fig. 8 – The module of the reflection coefficient at the input $R_n = 1,5$



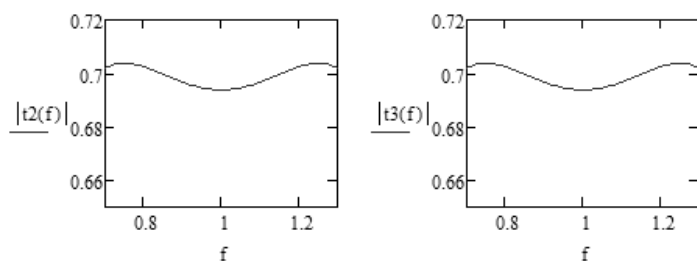


Рис. 9 – Модули коэффициентов передачи сигнала $R_H = 1,5$

Fig. 9 – The modules of the voltage transmission coefficients $R_H = 1,5$

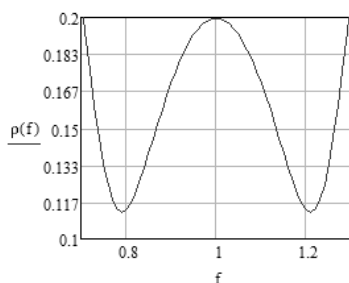


Рис. 10 – Модуль коэффициента отражения по входу $R_H = 2$

Fig. 10 – The module of the reflection coefficient at the input $R_H = 2$

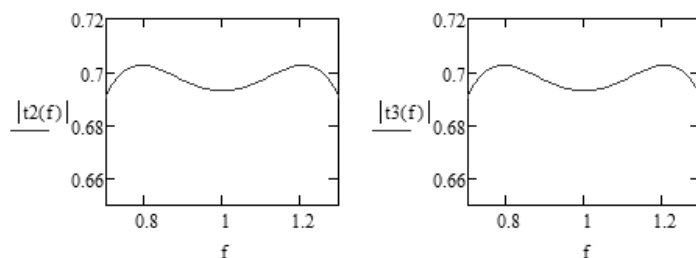


Рис. 11 – Модули коэффициентов передачи сигнала $R_H = 2$

Fig. 11 – The modules of the voltage transmission coefficients $R_H = 2$

Заключение

Разработан метод автоматизированного синтеза, который позволяет синтезировать широкополосные компактные согласующе-симметрирующие устройства на трех связанных отрезках линий передачи при различных сопротивлениях нагрузок. Приведенные численные примеры подтверждают корректность предложенных математических процедур. Метод позволяет разработчику активно вмешиваться в процесс синтеза и в реальном масштабе времени находить оптимальные решения.

ЛИТЕРАТУРА

1. A new planar Marchand balun / Z.-Y. Zhang, Y.-X. Guo, L.C. Ong, M.Y.W. Chia // IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest. – 2005. – P. 1207–1210. – doi: 10.1109/MWSYM.2005.1516893.

2. Design and optimization of 3D compact stripline and microstrip Bluetooth/WLAN balun architectures using the design of experiments technique / D. Staiculescu, N. Bushyager, A. Obatoyinbo, L.J. Martin, M.M. Tentzeris // *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*. – 2005. – Vol. 53, iss. 5, pp. 1805–1812. – doi: 10.1109/TAP.2005.846820.
3. A miniaturized microstrip balun constructed with two $\lambda/8$ coupled lines and redundant line / C.-I. Shie, Y.-H. Pan, K.-S. Chin, Y.-C. Chiang // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2010. – Vol. 20, iss. 12. – P. 663–665. – doi: 10.1109/LMWC.2010.2084076.
4. Lee H.-M., Tsai C.-M. Exact synthesis of broadband three-line baluns // *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*. – 2009. – Vol. 57, iss. 1, pp. 140–148. – doi: 10.1109/TMTT.2008.2009038.
5. Девятков Г.Н. Автоматизированный синтез широкополосных согласующе-симметрирующих устройств // *Научный вестник НГТУ*. – 2006. – № 1 (22). – С. 61–70.
6. Девятков Г.Н. Автоматизированный синтез широкополосных согласующих устройств, связывающих произвольные иммитансы источника сигнала и нагрузки // *Научный вестник НГТУ*. – 2004. – № 1 (16). – С. 155–165.

BROADBAND BALUN BASED ON THREE COUPLED TRANSMISSION LINES

Devyatkov G.N., Koval M.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

A balancing unit (Balun) based on three coupled transmission lines is discussed in this article. Its mathematical model has been obtained and identity conditions for transferring signals to shoulders have been found. As an example, the synthesis and simulation of balancing units has been carried out in the normal operating frequency broadband of 0,7 – 1,3, with the reflection coefficient modulus at the input being less than 0.2 for various impedance loads. A method of mathematical synthesis has been developed. This method allows synthesizing broadband Balun based on the three coupled transmission lines with various loads. Numerical examples given in the paper confirm the correctness of the proposed procedures. This mathematical method of synthesis allows developers to actively intervene in the process of synthesis and find optimal decisions in real time.

Keywords: Balun, mathematical matching, coupled transmission lines.

DOI: 10.17212/1727-2769-2015-4-50-58

REFERENCE

1. Zhang Z.-Y., Guo Y.-X., Ong L.C., Chia M.Y.W. A new planar Marchand balun. *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest*, 2005, pp. 1207–1210. doi: 10.1109/MWSYM.2005.1516893
2. Staiculescu D., Bushyager N., Obatoyinbo A., Martin L.J., Tentzeris M.M. Design and optimization of 3D compact stripline and microstrip Bluetooth/WLAN balun architectures using the design of experiments technique. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 53, iss. 5, pp. 1805–1812. doi: 10.1109/TAP.2005.846820
3. Shie C.-I., Pan Y.-H., Chin K.-S., Chiang Y.-C. A miniaturized microstrip balun constructed with two $\lambda/8$ coupled lines and redundant line. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2010, vol. 20, iss. 12, pp. 663–665. doi: 10.1109/LMWC.2010.2084076
4. Lee H.-M., Tsai C.-M. Exact synthesis of broadband three-line baluns. *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, 2009, vol. 57, iss. 1, pp. 140–148. doi: 10.1109/TMTT.2008.2009038
5. Devyatkov G.N. Avtomatizirovannyi sintez shirokopolosnykh soglasuyushche-simmetriyushchikh ustroystv [Automatic synthesis of broadband balun]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2006, no. 1 (22), pp. 61–70.

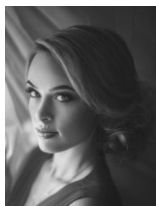
6. Devyatkov G.N. Avtomatizirovannyi sintez shirokopolosnykh soglasuyushchikh ustroystv, svyazyvayushchikh proizvol'nye immitansy istochnika signala i nagruzki [Automatic synthesis of broadband balun that connect an arbitrary of impedance of generator and load]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2004, no. 1 (16), pp. 155–165.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Девятков Геннадий Никифорович – родился в 1945 году, д-р техн. наук, доцент, профессор кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: автоматизированный синтез активных и пассивных устройств СВЧ. Опубликовано 150 научных работ, в том числе две монографии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: devyatkovgn@mail.ru).

Devyatkov Gennadii N. (b.1945) – Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor at the Department of Electronic Device Construction and Design in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on synthesizing active and passive microwave devices. He is the author of 150 scientific papers and 2 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: devyatkovgn@mail.ru).



Коваль Мария Владимировна – родилась в 1989 году, аспирант кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: автоматизированный синтез активных и пассивных устройств СВЧ. Опубликовано 7 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: marri54@yandex.ru).

Koval Mariya V. (b.1989) – a Postgraduate Student at the Department of Electronic Device Construction and Design in the Novosibirsk State Technical University. Her research interests are currently focused on the synthesis of active and passive microwave devices. She is the author of 7 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russian Federation. Email: marri54@yandex.ru).

*Статья поступила 28 октября 2015 г.
Received on October 28, 2015*

To Reference:

Devyatkov G.N., Koval M.V. Shirokopolosnoe soglasuyushche-simmetriruyushchee ustroystvo na trekh svyazannykh liniyakh peredachi [Broadband balun based on three coupled transmission lines]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2015, no. 4 (29), pp. 50–58. doi: