

УДК 621.372

**СОБСТВЕННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ИДЕАЛЬНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА  
ДЛЯ СОГЛАСОВАНИЯ МАЛОШУМЯЩИХ УСИЛИТЕЛЕЙ****Д.И. Вольхин<sup>1</sup>, Г.Н. Девятков<sup>1</sup>**<sup>1</sup>*Новосибирский государственный технический университет*

Задача широкополосного согласования активных элементов по коэффициенту шума неизбежно встречается при проектировании широкополосных малошумящих усилителей СВЧ.

Несмотря на то что задача отличается от классической задачи широкополосного согласования иммитансов источника сигнала и нагрузки, ее можно свести к виду, пригодному для применения методов решения классической задачи. С этой целью в данной работе выведены собственные параметры реактивного четырехполосника, согласующего активные элементы по коэффициенту шума во всей полосе частот, где определены данные для расчета этого коэффициента. Собственные параметры такого четырехполосника, с одной стороны, позволяют строить методы синтеза входных согласующих цепей малошумящих усилителей и других устройств, где требуется согласование по коэффициенту шума, с другой стороны, собственные параметры позволяют строить оценки максимально достижимой полосы пропускания для согласующей цепи заданной сложности.

*Ключевые слова:* идеальный согласующий четырехполосник, параметры холостого хода, параметры короткого замыкания, согласование по коэффициенту шума.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-7-12

**Введение**

Проектирование малошумящих усилителей связано с решением задачи согласования. Особое внимание уделяется разработке входной согласующей цепи, так как именно она во многом определяет уровень коэффициента шума всего усилителя. Существует много работ, посвященных методам синтеза согласующих цепей малошумящих усилителей [1–3]. Достоинством этих работ является их интеграция с современными системами автоматизированного проектирования, однако данные методы не позволяют оценить качество полученного решения. Этот недостаток может быть исправлен с помощью собственных параметров идеального четырехполосника согласующего активный элемент по коэффициенту шума, определенных в данной работе.

Классическая задача широкополосного согласования формулируется следующим образом: обеспечить передачу максимальной мощности от источника сигнала в нагрузку в заданной полосе рабочих частот. При этом иммитансы источника сигнала и нагрузки могут быть произвольными. Для реактивной согласующей цепи классическая задача в терминах рисунка выглядит так:

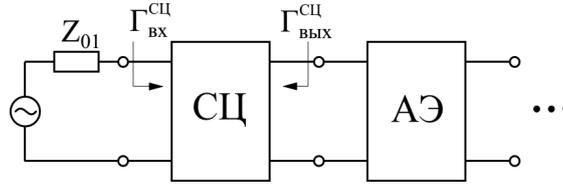
$$\max \left( \left| \Gamma_{\text{вх}}^{\text{СП}}(f) \right|^2 \right) \rightarrow \min, \quad (1)$$

где  $\Gamma_{\text{вх}}^{\text{СП}}$  – коэффициент отражения согласующей цепи по входу;  $f$  – частотные точки из заданного диапазона рабочих частот.

---

Работа выполнена при поддержке Министерства науки и высшего образования РФ, проект № FSUN-2020-0007

© 2020 Д.И. Вольхин, Г.Н. Девятков



К формулировке задачи широкополосного согласования по коэффициенту шума

To the formulation of the problem of broadband noise figure matching

Ранее в работе [4] для решения этой задачи были определены собственные параметры реактивного согласующего четырехполюсника.

Задачу широкополосного согласования по коэффициенту шума формулируют как обеспечение на входе активного элемента оптимального значения коэффициента отражения, соответствующего минимальному коэффициенту шума активного элемента.

Входные согласующие цепи малошумящих усилителей проектируют из реактивных элементов, поэтому задачу широкополосного согласования по коэффициенту шума (см. рисунок) можно записать следующим образом:

$$\Gamma_{\text{ВЫХ}}^{\text{СЦ}}(f) = \Gamma_{\text{ОПТ}}(f), \quad (2)$$

где  $\Gamma_{\text{ВЫХ}}^{\text{СЦ}}$  – коэффициент отражения согласующей цепи по выходу,  $\Gamma_{\text{ОПТ}}$  – коэффициент отражения активного элемента, при котором достигается минимальный коэффициент шума.

Несмотря на то что задача (2) отличается от классической задачи широкополосного согласования иммитансов источника сигнала и нагрузки, ее можно свести к виду, пригодному для применения методов решения классической задачи.

С этой целью в данной работе определяются собственные параметры реактивного четырехполюсника, согласующего активный элемент по коэффициенту шума, связывающие произвольные иммитансы источника сигнала и нагрузки.

### 1. Собственные параметры реактивного четырехполюсника для согласования по коэффициенту шума

Рабочими параметрами согласующих четырехполюсников являются коэффициент передачи по напряжению, коэффициенты отражения по входу и выходу, которые определяются через  $z$ - или  $y$ -параметры четырехполюсников [5]:

$$\begin{aligned} t &= \frac{2 \cdot \sqrt{\text{Re}(Z_{01}) \text{Re}(Z_{01})} \cdot z_{21}}{(Z_{01} + z_{11})(Z_{01} + z_{22}) - z_{21}^2}, & t &= \frac{-2 \cdot \sqrt{\text{Re}(Y_{01}) \text{Re}(Y_{01})} \cdot y_{21}}{(Y_{01} + y_{11})(Y_{01} + y_{22}) - y_{21}^2}, \\ \Gamma_{\text{ВХ}} &= \frac{(z_{22} + Z_{02})(z_{11} - Z_{01}^*) - z_{21}^2}{(z_{22} + Z_{02})(z_{11} + Z_{01}) - z_{21}^2}, & \Gamma_{\text{ВЫХ}} &= \frac{(y_{11} + Y_{01})(y_{22} - Y_{02}^*) - y_{21}^2}{(y_{11} + Y_{01})(y_{22} + Y_{02}) - y_{21}^2}, \\ \Gamma_{\text{ВЫХ}} &= \frac{(z_{11} + Z_{01})(z_{22} - Z_{02}^*) - z_{21}^2}{(z_{11} + Z_{01})(z_{22} + Z_{02}) - z_{21}^2}, & \Gamma_{\text{ВХ}} &= \frac{(y_{22} + Y_{02})(y_{11} - Y_{01}^*) - y_{21}^2}{(y_{22} + Y_{02})(y_{11} + Y_{01}) - y_{21}^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где  $Z_{01}, Z_{02}$  ( $Y_{01}, Y_{02}$ ) – импедансы (адмиттансы) источника сигнала и нагрузки;  $Z_{01}^*, Z_{02}^*$  ( $Y_{01}^*, Y_{02}^*$ ) – комплексно сопряженные импедансы (адмиттансы) источника сигнала и нагрузки.

Так как в случае согласования по коэффициенту шума необходимо обеспечить требуемое значение коэффициента отражения по выходу, выразим собственные параметры четырехполюсника через коэффициент отражения по выходу и коэффициент передачи по напряжению из (3).

В случае реактивного четырехполюсника для широкополосного согласования по коэффициенту шума вместо параметров  $|\Gamma_{\text{вых}}|$  и  $\arg(\Gamma_{\text{вых}})$  необходимо использовать параметры оптимального коэффициента отражения  $|\Gamma_{\text{опт}}^{\text{АЭ}}|$  и  $\arg(\Gamma_{\text{опт}})$ , поставляемые производителем транзисторов (или других активных элементов) в составе \*.s2p файла, используемого для проектирования маломощного усилителя. Тогда собственные z-параметры четырехполюсника примут вид:

$$\begin{aligned} z_{11} &= -j \operatorname{Im}(Z_{01}) + j \operatorname{Re}(Z_{01}) \frac{\cos(\arg(t)) - |\Gamma_{\text{опт}}| \cos(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}, \\ z_{22} &= -j \operatorname{Im}(Z_{02}) + j \operatorname{Re}(Z_{02}) \frac{\cos(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \cos(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}, \\ z_{21} &= \frac{j \cdot \sqrt{\operatorname{Re}(Z_{01}) \operatorname{Re}(Z_{02})} \cdot |t|}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}. \end{aligned} \quad (4)$$

Аналогично для y-параметров:

$$\begin{aligned} y_{11} &= -j \operatorname{Im}(Y_{01}) + j \operatorname{Re}(Y_{01}) \frac{\cos(\arg(t)) - |\Gamma_{\text{опт}}| \cos(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}, \\ y_{22} &= -j \operatorname{Im}(Y_{02}) + j \operatorname{Re}(Y_{02}) \frac{\cos(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \cos(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}, \\ y_{21} &= \frac{j \cdot \sqrt{\operatorname{Re}(Y_{01}) \operatorname{Re}(Y_{02})} \cdot |t|}{\sin(\arg(t)) + |\Gamma_{\text{опт}}| \sin(\arg(\Gamma_{\text{опт}}) - \arg(t))}. \end{aligned} \quad (5)$$

Так как в \*.s2p файлах шумовые параметры активного элемента приведены в расчете на стандартное значение волнового сопротивления источника сигнала 50 Ом и согласующая по коэффициенту шума цепь является входной цепью маломощного усилителя, то в качестве  $Z_{01}$  и  $Z_{02}$  нужно использовать значение 50 Ом. Однако параметры (4) и (5) позволяют получить собственные параметры и при произвольных иммитансах источника сигнала и нагрузки.

## 2. Апробация результатов

Продемонстрируем корректность собственных параметров реактивного четырехполюсника на примере транзистора CE3512, для которого производителем предоставлены данные для проектирования в формате \*.s2p файла с шумовыми параметрами, представленными в таблице.

**Шумовые параметры транзистора CE3512**  
**Noise parameters of CE3512**

F GHz	Fmin dB	Gammaopt		Rn/50
		MAG	ANG	
8	0,28	0,554	70,9	0,136
9	0,3	0,508	84,1	0,112
10	0,34	0,452	98,5	0,096
11	0,37	0,405	113,6	0,062
12	0,42	0,361	130,4	0,044
13	0,46	0,309	147,9	0,036
14	0,49	0,301	167	0,03

Подставим значение амплитуды и угла оптимального коэффициента отражения в выражения (4) или (5). При этом  $Z_{01} = Z_{02} = 50$ , аргумент коэффициента передачи по напряжению может быть задан произвольно. Это значит, что в общем случае определенные для собственных параметров выражения применимы в методах синтеза согласующих цепей с заданной фазовой характеристикой [6]. В данном примере аргумент коэффициента передачи по напряжению изменяется по линейному закону:

$$\arg(t(f)) = -kf,$$

где  $k$  – линейный коэффициент. Так как согласующая цепь является реактивной, амплитуда коэффициента передачи по напряжению жестко связана с амплитудой коэффициента отражения:

$$|t|^2 = 1 - |\Gamma_{\text{вых}}|^2.$$

Сформировав собственные параметры реактивного четырехполосника, вычислим коэффициент отражения согласующей цепи по выходу (3). Затем найдем коэффициент шума транзистора вместе с согласующей цепью в виде идеального реактивного четырехполосника по формуле

$$F = F_{\min} + 4 \frac{Rn}{Z_0} \frac{|\Gamma_{\text{вых}} - \Gamma_{\text{опт}}|^2}{|1 + \Gamma_{\text{опт}}|^2 (1 - |\Gamma_{\text{вых}}|^2)}.$$

Значения коэффициента шума усилителя полностью совпадают со значениями минимального коэффициента шума Fmin из таблицы во всех заданных частотных точках.

### Заключение

Выражения для собственных параметров соответствуют идеальному реактивному четырехполоснику, согласующему активный элемент по коэффициенту шума во всех частотных точках, где определены шумовые параметры. Выражения (4) и (5) определяют вид, к которому должны стремиться собственные параметры входной согласующей цепи малошумящего усилителя и могут быть положены в основу различных синтезирующих процедур [7], в том числе методов синтеза цепей с заданной фазовой характеристикой [6].

## ЛИТЕРАТУРА

1. **Бабак Л.И., Поляков А.Ю.** Автоматизированное проектирование малошумящих транзисторных СВЧ усилителей с реактивными согласующими цепями // Доклады ТУСУР. – 1997. – Т. 1, № 1. – С. 94–108.
2. **Sawarkar K.G., Tuckley K.** Negative image matching technique and its realization for ultra-wide band low noise amplifier // *China Communications*. – 2019. – Vol. 16, iss. 3. – P. 143–153.
3. Constant loss contours of matching networks for millimeter-wave LNA design / C.L. Ko, C.H. Li, M.C. Kuo, D.C. Chang // *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*. – 2016. – Vol. 26, N 11. – P. 939–941.
4. **Девятков Г.Н.** Рабочие и собственные параметры реактивного согласующего четырехполосника // Доклады Сибирского отделения Академии наук высшей школы. – 2000. – № 2. – С. 48–52.
5. **Маттей Д.Л., Янг Л., Джонс Е.М.Т.** Фильтры СВЧ, согласующие цепи и цепи связи. Т. 1. – М.: Связь, 1971. – 440 с.
6. **Вольхин Д.И., Девятков Г.Н.** Метод синтеза согласующих устройств с заданными фазовыми характеристиками // Доклады Академии наук высшей школы Российской Федерации. – 2016. – № 4 (33). – С. 49–60. – DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-49-60.
7. **Девятков Г.Н.** Автоматизированный синтез широкополосных согласующих устройств, связывающих произвольные иммитансы источника сигнала и нагрузки // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 1 (16). – С. 155–165.

### OWN PARAMETERS OF AN IDEAL TWO-PORT FOR LOW NOISE MATCHING

**Volkhin D.I., Devyatkov G.N.**

*Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia*

The problem of broadband matching of active elements in terms of noise figure is inevitably encountered in the design of broadband low-noise microwave amplifiers. Despite the fact that this problem differs from the classical problem of broadband matching of signal source and load, it can be reduced to a form suitable for applying methods for solving the classical problem. For this purpose, in this work, the own parameters of a reactive two-port network are derived that match active elements in terms of noise figure in the entire frequency band, where the data for calculating this coefficient are determined. The own parameters of such a two-port network, on the one hand, make it possible to construct methods for the synthesis of input matching circuits of low-noise amplifiers and other devices where low noise matching is required. On the other hand, the own parameters allow one to construct estimates of the maximum achievable bandwidth for a matching circuit of a given complexity.

*Keywords:* Ideal matching two-port network, own parameters, noise figure matching.

DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-7-12

## REFERENCES

1. Babak L.I., Polyakov A.Yu. Avtomatizirovannoe proektirovanie maloshumyashchikh tranzistornykh SVCh usilitelei s reaktivnymi soglasuyushchimi tsepyami [Computer aided design of low-noise transistor microwave amplifiers with reactive matching circuits]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioelektroniki = Proceedings of TUSUR University*, 1997, vol. 1, no. 1, pp. 94–108.
2. Sawarkar K.G., Tuckley K. Negative image matching technique and its realization for ultra-wide band low noise amplifier. *China Communications*, 2019, vol. 16, iss. 3, pp. 143–153.
3. Ko C.L., Li C.H., Kuo M.C., Chang D.C. Constant loss contours of matching networks for millimeter-wave LNA design. *IEEE Microwave and Wireless Components Letters*, 2016, vol. 26, no. 11, pp. 939–941.
4. Devyatkov G.N. Rabochie i sobstvennye parametry reaktivnogo soglasuyushchego chetyrekhpolyusnika [Operating and own parameters of matching two-ports]. *Doklady Sibirskogo*

- otdeleniya Akademii nauk vysshei shkoly = Proceedings of Siberian Branch of the Russian Higher School Academy of Sciences*, 2000, no. 2, pp. 48–52.
5. Matthaei G.L., Young L., Jones E.M.T. *Microwave filters, impedance-matching networks, and coupling structures*. New York, McGraw-Hill, 1964 (Russ. ed.: Mattei D.L., Yang L., Dzhons E.M.T. *Fil'try SVCh, soglasuyushchie tsepi i tsepi svyazi*. Т. 1. Moscow, Svyaz' Publ., 1971. 440 p.).
  6. Volkhin D.I., Devyatkov G.N. Metod sinteza soglasuyushchikh ustroystv s zadannymi fazovymi kharakteristikami [Method of synthesis of matching devices with predetermined phase response]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2016, no. 4 (33), pp. 49–60. DOI: 10.17212/1727-2769-2016-4-49-60.
  7. Devyatkov G.N. Avtomatizirovannyi sintez shirokopolosnykh soglasuyushchikh ustroystv, svyazyvayushchikh proizvol'nye immitansy istochnika signala i nagruzki [Automated synthesis of broad-band matching devices connecting arbitrary impedance of signals source 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



**Вольхин Дмитрий Игоревич** – родился в 1990 году, канд. техн. наук, доцент кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств, НГТУ. Область научных интересов: автоматизированный синтез и проектирование активных и пассивных устройств СВЧ. Опубликовано 26 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: d.volkhin@ngs.ru).

**Volkhin Dmitry Igorevich** (b. 1990) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor of the Department of Design and Technology of Electronic Devices in the Novosibirsk State Technical University. His research interests are focused on automated synthesis and design of active and passive microwave devices. He is the author of 26 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: d.volkhin@ngs.ru).



**Девятков Геннадий Никифорович** – родился в 1945 году, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры конструирования и технологии радиоэлектронных средств Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: автоматизированный синтез активных и пассивных устройств СВЧ. Опубликовано 190 научных работ, в том числе две монографии. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. Email: devyatkovgn@mail.ru).

**Devyatkov Gennadii Nikiforovich** (b. 1945) – Doctor of Science (Eng.), Associate Professor, Professor at the Department of Design and Technology of Electronic Devices in the Novosibirsk State Technical University. Research interests: automated synthesis and design of active and passive microwave devices. He is the author of over 150 scientific papers and 2 monographs. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: devyatkovgn@mail.ru).

*Статья поступила 16 августа 2020 г.  
Received August 16, 2020*

#### To references:

Volkhin D.I., Devyatkov G.N. Sobstvennyye parametry ideal'nogo chetyrekhpolusnika dlya soglasovaniya maloshumyashchikh usilitelei [Own parameters of an ideal two-port for low noise matching]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2020, no. 3 (48), pp. 7–12. DOI: 10.17212/1727-2769-2020-3-7-12.