



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-126-8-43-49>

*Оригинальная статья*  
*Original paper*

УДК 621.372

## ШИРОКОПОЛОСНЫЙ ТРАНСФОРМАТОР ДЛЯ СОГЛАСОВАНИЯ НИЗКООМНЫХ НАГРУЗОК В ДИАПАЗОНЕ МЕТРОВЫХ ДЛИН ВОЛН

НАУМОВИЧ Н.М., ЮБКО А.П., ДАВЫДОВ М.В., МАЛЫЦЕВ О.С.

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники,  
г. Минск, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 24 мая 2019*

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

**Аннотация.** В работе представлены результаты предварительных исследований возможности разработки широкополосного трансформатора для согласования низкоомных комплексных нагрузок в диапазоне метровых длин волн с использованием связанной линии передачи мощности. Линия передачи выполнена на основе полиимида в виде гибкой печатной платы. Такой подход позволит выполнять широкополосное согласование каскадов с нестандартными величинами входного и выходного импеданса в широком диапазоне длин волн и мощностей за счет возможности определять импеданс проектируемой линии передачи с учетом характера нагрузки. На первом этапе было выполнено компьютерное моделирование трансформатора с коэффициентом трансформации импеданса 4:1 в диапазоне (40–240 МГц) для предельных входного и выходного сопротивления 50 и 12,5 Ом соответственно. Это позволило определить конструктивные параметры линии передачи. Также была предложена методика измерений величины вносимых потерь, необходимость разработки которой связана с невозможностью применения стандартных методов с использованием векторного анализатора цепей. Было проведено макетирование устройства и получены значения коэффициента стоячей волны относительно входа устройства и величины вносимых потерь для различных уровней входной мощности. Результаты макетирования показали, что изготовленный трансформатор обеспечивает коэффициент стоячей волны не хуже 2 во всем заданном частотном диапазоне. Вносимые потери составили от 0,02 до 1,54 дБ в зависимости от уровня входной мощности (1–1000 мВт). Полученные результаты дают основания продолжить разработку широкополосных трансформаторов с произвольным входным/выходным сопротивлением для согласования комплексных низкоомных нагрузок.

**Ключевые слова:** широкополосные согласующие цепи, комплексный импеданс, низкоомная нагрузка.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Для цитирования.** Наумович Н.М., Юбка А.П., Давыдов М.В., Малыцев О.С. Широкополосный трансформатор для согласования низкоомных нагрузок в диапазоне метровых длин волн. Доклады БГУИР. 2019; 7–8(126): 43-49.

## WIDEBAND TRANSFORMER FOR MATCHING OF LOW-IMPEDANCE LOADS IN VERY HIGH FREQUENCY RANGE

NICOLAI M. NAUMOVICH, ALEXSANDR P. JOUBKO, MAXIM V. DAVYDOV,  
OLEG S. MALTSEV

*Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Minsk, Republic of Belarus*

*Submitted 24 May 2019*

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

**Abstract** The article presents the results of preliminary research in the wideband transformer development for matching low-ohms loads in the very high frequency band with the use of a coupled transmission lines. The transmission line was produced with the using of a polyimide in the form of flexible printed circuit board. This way may be useful for wideband matching different cascades with custom values of input and output impedance in the wide band of frequencies and powers with use of a defining impedance capability with a load character in mind. On the first stage, the computer simulation of transformer with a transformer ratio 4:1 in the band (40–240 MHz) was completed for limiting values of input and output resistances – 50 and 12,5 Ohms respectively. Results of simulation give us the data about constructive parameters of the transmission line. The measurement technique for insertion loss was worked out. The reason of that is an impossibility of appliance standard methods with using a network vector analyzer. The prototyping was done and values of the standing wave ratio and inserting losses were obtained for different levels of the input power. According to received data, it can be affirmed, that the manufactured transformer provides the standing wave ratio better (lower) than two. Inserting losses vary from 0,02 to 1,54 dB depending from a input power level (1–1000 mW). The obtained results afford ground for working continuation in this field – a development of wideband transformers for matching of low-ohms loads.

**Keywords:** wideband matching networks, complex impedance, low-impedance load

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

**For citation.** Naumovich N.M., Joubko A.P., Davydov M.V., Maltsev O.S. Wideband transformer for matching of low-impedance loads in very high frequency range. Doklady BGUIR. 2019; 7–8(126): 43-49.

### Введение

В настоящее время актуальной тенденцией при разработке новых радиотехнических систем является увеличение рабочей полосы частот. Это позволяет достичь большей универсальности, расширить функционал и, в конечном итоге, повысить эффективность работы устройств. Существует множество методов, позволяющих обеспечить требуемое качество согласования источника сигнала и полезной нагрузки в широкой полосе частот. Их выбор зависит от ряда критериев: диапазон частот, ширина полосы согласования, предельный КСВ в данной полосе. В то же время количество исследований, посвященных широкополосному согласованию низкоомных нагрузок, ограничено. При этом разработка ряда функциональных устройств, например, акустооптических, зачастую требует решения задачи широкополосного согласования низкоомных нагрузок. Расширение полосы рабочих частот до нескольких октав достигается применением цепей со сосредоточенными параметрами [1], но для работы в VHF диапазоне геометрические размеры таких цепей не позволяют воспользоваться преимуществами данного подхода в полной мере. Однако возможна разработка согласующих цепей, которые сочетают достоинства этих двух подходов.

Цель настоящей работы – предложить решение задачи обеспечения согласования низкоомной активной нагрузки в VHF диапазоне, при этом обеспечить минимизацию размеров согласующей цепи и широкий диапазон рабочих мощностей.

### Теоретический анализ

Рассмотрим задачу широкополосного согласования стандартного выхода источника сигнала ( $50 \Omega$ ) и низкоомной полезной нагрузки (антенна или пьезопреобразователь). На практике эти нагрузки характеризуются комплексным импедансом, поэтому на данном этапе примем упрощение, что полезная нагрузка представляет собой активную нагрузку, а мнимой частью допустимо пренебречь.

Одним из путей решения этой задачи является использование трансформаторов импеданса с требуемым коэффициентом трансформации по сопротивлению. В настоящее время широко применяются трансформаторы, в основе которых лежит схема трансформатора Гуанелла [2] с использованием двух связанных линий передачи мощности. В качестве связанных линий передачи могут применяться  $n$ -филярная катушка или коаксиальные кабели. На рабочую полосу такого трансформатора накладываются низкочастотный и высокочастотный пределы [3]. Низкочастотный предел – это нижняя рабочая полоса АЧХ трансформатора по уровню  $-3$  дБ:

$$f_{\min} \geq \frac{Z_{\text{вх}}}{4\pi L_m}, \quad (1)$$

где  $Z_{\text{вх}}$  – сопротивление источника сигнала, а  $L_m$  – индуктивность намагничивания, которая определяется длиной линии передачи. Для коаксиального кабеля индуктивность намагничивания [2] имеет вид

$$L_m = 2l \left[ \ln \left( \frac{2l}{r} \right) - 1 \right], \quad (2)$$

где  $r$  – диаметр внешнего проводника, относительно его внешней поверхности, а  $l$  – длина кабеля. Также трансформатор может иметь в своем составе феррит, характеризующийся низкими потерями и высокой магнитной проницаемостью для увеличения индуктивности намагничивания ( $L_m$ ), что позволяет расширить рабочую полосу в области низких частот [4, 5] и уменьшить общую длину линии передачи. Зачастую это трансформаторы для малых сигналов, а для увеличения мощности необходимо использовать ферритовые материалы большего размера [6]. Однако применение таких материалов может накладывать ограничения на конструкцию в связи с размерами ферритового сердечника, а также неравномерностью зависимости магнитной проницаемости материала от частоты.

С другой стороны, во избежание возникновения резонансных явлений, как правило, на длину кабеля или иной линии передачи накладывается ограничение [4] – высокочастотный предел:

$$l \leq \frac{\lambda_{\min}}{8}. \quad (3)$$

Кроме того, для максимального расширения полосы рабочих частот характеристический импеданс линий передачи следует выбирать соответствующим среднему геометрическому импедансов источника сигнала и полезной нагрузки [4]:

$$Z_{\text{ЛП}} = \sqrt{Z_{\text{вх}} Z_{\text{вых}}}. \quad (4)$$

Из формулы (4) видно, что реализация широкополосного трансформатора для работы с низкоомными нагрузками с использованием коаксиального кабеля представляется возможной в узком диапазоне частот. Это связано с тем, что его характеристический импеданс имеет ряд строго определенных значений и наиболее используемые:  $50, 75 \Omega$ , а для рассматриваемого случая согласования  $50\text{--}12,5 \Omega$  требуемое значение импеданса линии передачи составит  $25 \Omega$ .

В ряде работ, посвященных широкополосному согласованию на частотах свыше  $100$  МГц, используются связанные полосковые линии. Зачастую такие трансформаторы реализуются за счет топологии на печатной плате [7]. Однако существует возможность рассчитать и изготовить «гибридную» реализацию подобного трансформатора

для VHF диапазона, где линией передачи мощности является участок коаксиального кабеля [8]. В качестве альтернативы коаксиальному кабелю предлагается использовать связанные отрезки полосковых линий типа «Broadside coupled lines». В этом случае используется двусторонняя печатная плата с минимально возможной толщиной диэлектрика.

Необходимыми конструктивными и электромагнитными свойствами обладает гибкая печатная плата (ГПП) на базе полиимида (рис. 1). Свойство гибкости ГПП дополнительно позволяет решать также задачи оптимизации конструкции.

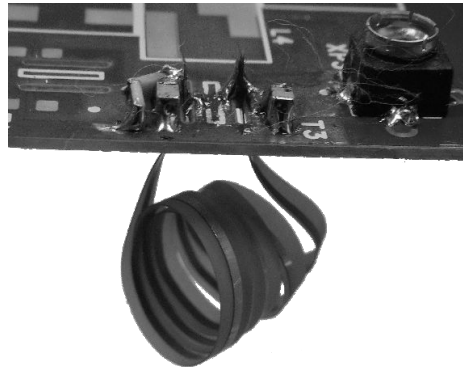


Рис. 1. Общий вид конструкции (трансформатор 4:1 (50–12,5 Ом))  
Fig. 1. Construction Overview (transformer 4:1 (50–12,5 Ohm))

### Моделирование

Моделирование трансформатора со связанными полосковыми линиями с коэффициентом трансформации 4:1 (50–12,5 Ом) было проведено в пакете моделирования СВЧ устройств CST Studio с учетом топологии печатной платы в диапазоне частот 30–300 МГц. Была собрана схема электрическая (рис. 2, а), где моделируемый ТК (50–12,5 Ом) представлен четырехполюсником TV1, порт 1 имеет сопротивление 50 Ом, порт 2–12,5.

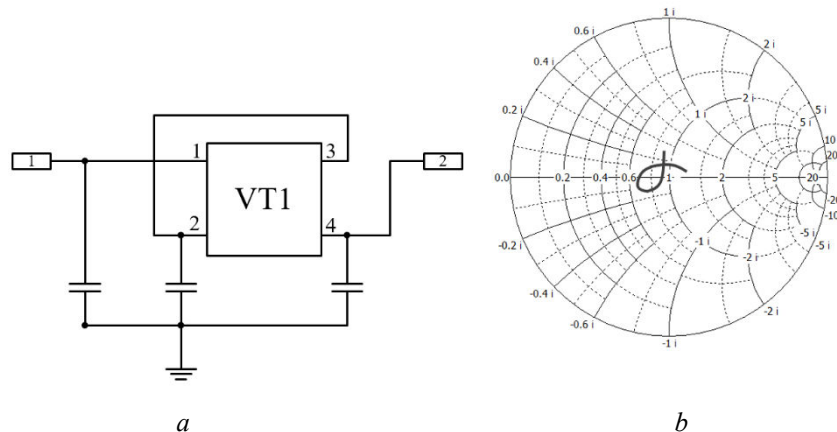


Рис. 2. Результаты моделирования: а – схема электрическая; б – импеданс модели на диаграмме Смита  
Fig. 2. Simulation results: а – circuit schematic; б – Smith plot for the model

Конденсаторы С1–С3 введены для коррекции высокочастотного и низкочастотного участков характеристики результирующего импеданса. Из рис. 2, б видно, что КСВ во всей расчетной полосе не превышает 2.

Моделированием была подтверждена возможность реализации такого устройства, а также были сформированы требования к гибким печатным платам, выступающим в качестве линий передачи, к общей печатной плате, где размещены все элементы схемы.

### Методика измерений параметров широкополосных трансформаторов для согласования низкоомных нагрузок

В общем трансформатор импеданса характеризуется следующими параметрами: рабочий диапазон частот, предельный КСВ в диапазоне частот, предельные значения входного и выходного сопротивления, вносимые потери.

Для измерения КСВ в диапазоне частот необходимо:

1. Задать расчетный диапазон рабочих частот и дискретность частоты для векторного анализатора цепей (ВАЦ).

2. Выполнить калибровку ВАЦ в этом диапазоне для измерения коэффициента отражения от входа исследуемой цепи.

3. Подключив к выходу трансформатора полезную нагрузку ( $R_n$ ), а ко входу – векторный анализатор, измерить коэффициент отражения и сохранить данные в формате touchstone.

Для определения вносимых потерь необходимо выполнить следующую последовательность действий:

1. Установить величину входной мощности  $P_{вх}$  (1; 10; 100; 1000 мВт).

2. Выполнить измерения среднеквадратического напряжения ( $V_{скв}$ ) на входе полезной нагрузки для различных частот в пределах исследуемого частотного диапазона. Рекомендуемое число наблюдений при измерении значения параметра  $N = 10$ . Числовые значения результатов наблюдений регистрируются без округления, а затем усредняются для каждого значения частоты.

3. При известной величине коэффициента отражения от входа схемы рассчитать величину отраженной мощности:  $P_{отр} = P_{вх} \left[ -20 \lg \left( \frac{КСВ - 1}{КСВ + 1} \right) \right]$ .

4. Для известной величины мощности на выходе источника сигнала и значения коэффициента отражения от входа для исследуемого ТК рассчитать величину мощности, поступившей в нагрузку ( $P_n$ ):  $P_n = P_{вх} - P_{отр}$ .

5. Вычислить величины рассеиваемой на полезной нагрузке мощности для каждой частотной точки по формуле  $P_{расс} = \frac{V_{скв}^2}{R_n}$ .

6. Рассчитать величину потерь, вносимых трансформатором, для каждой частотной точки по формуле  $Loss_{ins} = 10 \log_{10} (P_{расс} / P_{вх})$ .

Для определения рабочего частотного диапазона необходимо рассчитать полосу частот, в которой КСВ меньше либо равен двум, а вносимые потери находятся в пределах уровня –3 дБ.

### Экспериментальные исследования

Экспериментальная часть состоит из трех этапов. На первом этапе изготавливается плата печатная и собирается трансформатор. На втором этапе проводятся измерения согласно представленной выше методике, а на третьем – выполняется обработка полученных данных, графики характеристик представлены на рис. 3–5.

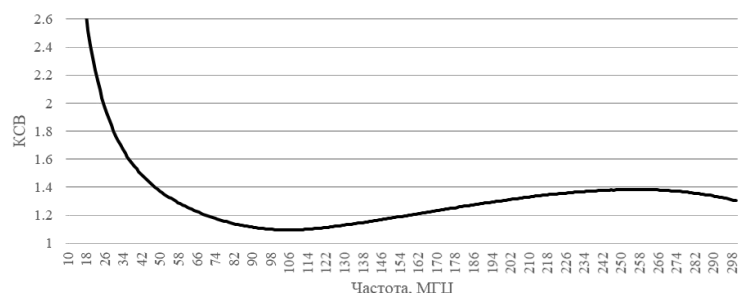


Рис. 3. Коэффициент стоячей волны относительно входа трансформатора  
Fig. 3. SWR relatively the transformer input

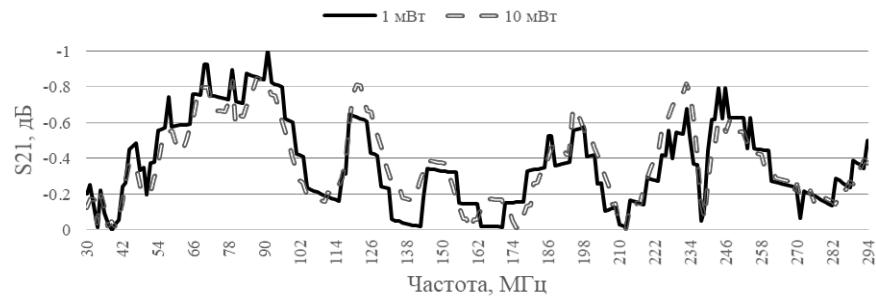


Рис. 4. Вносимые потери при уровнях входной мощности 1 и 10 мВт  
Fig. 4. Insertion losses with the level of input power 1 and 10 mW

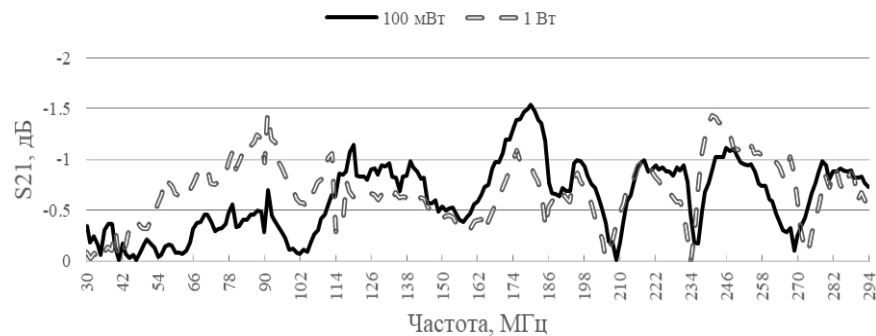


Рис. 5. Вносимые потери при уровнях входной мощности 100 и 1 Вт  
Fig. 5. Insertion losses with the level of input power 100 and 1 W

### Результаты и их обсуждение

На основании предложенного подхода к разработке и изготовлению широкополосных трансформаторов разработан образец со следующими характеристиками:

- 1) коэффициент трансформации импеданса – 4:1;
- 2) предельное входное сопротивление: 5  $\Omega$ , предельное выходное сопротивление – 12,5  $\Omega$ ;
- 3) полоса рабочих частот при предельном КСВ = 2 – 30–300 МГц (рис. 3);
- 4) вносимые потери имеют зависимость от уровня входной мощности. При работе с малыми уровнями мощности (1–10 мВт) диапазон величин вносимых потерь от –0,02 до –1 дБ (рис. 4). При работе с уровнями мощности 0,1–1 Вт – от –0,015 до –1,54 дБ (рис. 5).

Результаты исследований согласуются с теоретическими и практическими результатами иных исследований [9].

Предложенная методика оценки параметров разработанных устройств позволяет автоматизировать процесс снятия характеристик и расчета значений параметров. Экспериментально обоснована возможность улучшения эффективности широкополосного согласования для различных величин подводимой мощности (до 1 Вт).

Опыт практического применения позволяет утверждать о возможности создания более сложных широкополосных систем для согласования низкоомных нагрузок, имеющих комплексный характер.

### Список литературы/ References

1. Ranzani L., Spietz L., Popovic Z., Aumentado J. *Transmission-Line Impedance Transformer for Broadband Superconducting Circuits*. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*. 2012;22(5):1500606. DOI: 10.1109/TASC.2012.2202116.
2. Guanella G., *New method of impedance matching in radio-frequency circuits*. *The Brown Boveri Review*. 1944;31:327-329.
3. Grebennikov A. *RF and Microwave Transmitter Design*. John Wiley & Sons, Inc. 2011.
4. Grebennikov A. *Power Combiners, Impedance Transformers and Directional Couplers*. *High Frequency Electronics*. 2007;6(12):20-38.
5. Trask C. *Transmission Line Transformers: Theory, Design and Applications – Part 2*. *High Frequency Electronics*. 2006;5(1):26-32.

6. Trask C. *Designing Wide-band Transformers for HF and VHF Power Amplifiers*. QEX.2005;2:3-15.
7. Fang Z., Wei H., Ji-Xin C. Ke W. *Ultra-Wideband Single and Dual Baluns Based on Substrate Integrated Coaxial Line Technology*. IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 2012;60(10):3062-3070; DOI: 10.1109/TMTT.2012.2209448
8. Smith R. M., Lees J., Tasker P. J., Benedikt J., Cripps S.C. *A 40W Push-Pull Power Amplifier for High Efficiency, Decade Bandwidth Applications at Microwave Frequencies*. IEEE/MTT-S International Microwave Symposium digest (MTT), Montreal, 2012.
9. Sevvick J. *Transmission Line Transformers*, 4ed. Atlanta: Nobel Publishing Corporation; 2001.

### Вклад авторов

Наумович Н.М. провел поиск технологических решений при изготовлении и применении гибких печатных плат.

Юбко А.П., Мальцев О.С. выполнили моделирование и расчет параметров схемы, макетирование, провели измерения и обработали их результаты.

Давыдов М.В. разработал методики измерения и структуру измерительного стенда.

### Authors contribution

Naumovich N.M. conducted a search for technological solutions in the manufacture and use of flexible printed circuit boards.

Joubko A.P., Maltsev O.S. performed modeling and calculation of circuit parameters, prototyping, carried out measurements and processed their results.

Davydov M.V. developed measurement methods and the structure of the measuring stand.

### Сведения об авторах

Наумович Н.М., к.т.н, начальник Научно-конструкторского центра перспективных радиоэлектронных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Юбко А.П., заместитель начальника Научно-конструкторского центра перспективных радиоэлектронных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Давыдов М.В., к.т.н, проректор по учебной работе Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Мальцев О.С., м.н.с Научно-конструкторского центра перспективных радиоэлектронных систем сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

### Information about the authors

Naumovich N.M., PhD, Head of the Scientific and Design Center of Centimeter and Millimeter Wavelengths Prospective Electronic Systems of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Joubko A.P., Deputy Head of the Scientific and Design Center of Centimeter and Millimeter Wavelengths Prospective Electronic Systems of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Davydov M.V., PhD, Vice-Rector for education of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

Maltsev O.S., junior associate researcher the Scientific and Design Center of Centimeter and Millimeter Wavelengths Prospective Electronic Systems of Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics.

### Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,  
г. Минск, ул. П. Бровки, д. 6,  
Белорусский государственный  
университет информатики и радиоэлектроники  
тел. +375-33-358-08-57;  
e-mail: maltsev@bsuir.by  
Мальцев Олег Сергеевич

### Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,  
Minsk, P. Brovka st., 6,  
Belarusian State University  
of Informatics and Radioelectronics  
tel. +375-33-358-08-57;  
e-mail: maltsev@bsuir.by  
Maltsev Oleg Sergeevich