

УДК 621.037.372.(075.8)

## МОДЕЛИРОВАНИЕ S-ПАРАМЕТРОВ ДЕЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ УИЛКИНСОНА

Р.А. ЖЕРНОСЕКОВ, В.Т. ПЕРШИН

*Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь*

*Поступила в редакцию 3 мая 2017*

**Аннотация.** Делители мощности Уилкинсона (ДМУ) в настоящее время успешно конкурируют с другими устройствами, так как исследования новых особенностей их конструкции позволяют обеспечить выбор новых технологий для различных приложений. В статье анализируется выполнение ДМУ, основанное на изучении вносимых потерь, потерь на распространение, а также изоляции между выходными портами в диапазоне рабочих частот до 3 ГГц. Анализ моделирования потерь в микрополосковой линии передачи, как S-параметров ДМУ, выполнен с помощью программного обеспечения Antenna Magus 2017.0, разработанного компанией Magus (Pty), для чего предложена реализация ДМУ, удобная для использования выбранного программного обеспечения. Получены точные характеристики ДМУ в достаточно широкой полосе частот исследуемого диапазона.

**Ключевые слова:** делитель мощности Уилкинсона, вносимые потери, потери на распространение, изоляция между выходными портами.

**Abstract.** Wilkinson power divider (WPD) currently compete successfully with other devices, as study new features of their designs provide the selection of new technologies for various applications. This article examines the performance of WPD, based on the study of insertion loss, return loss distribution, as well as isolation between the output ports in the operating frequency range to 3 GHz. Analysis of modeling of losses in microstrip transmission lines, such as S-parameters, WPD, performed using software Antenna Magus 2017.0 developed by Magus (Pty), which proposed the implementation of a WPD, convenient to use selected software. Exact characteristics of WPD in a fairly wide band of frequencies investigated range were received.

**Keywords:** Wilkinson power divider, microstrip line, insertion loss, return loss, isolation between the output ports.

**Doklady BGUIR. 2017, Vol. 108, No. 6, pp. 17-21**

**The simulation of S-parameters of the Wilkinson power divider**

**R.A. Zhernosekov, V.T. Pershin**

### Постановка задачи

Делитель мощности Уилкинсона – это трехпортовая схема, которая при согласованных портах, практически не имеет потерь. При этом рассеивается только отраженная мощность. Сфера применения этих устройств, несмотря на то что впервые они были описаны в 1960 г. [1], постоянно расширяется, особенно это относится к неравномерному распределению мощности по независимым каналам [2, 3]. Популярность ДМУ объясняется также наличием эффективно применяющегося и достаточно глубоко обоснованного математически анализа этой конструкции, называемого четно-нечетной модой анализа (even-odd mode). Так как используемая конструкция ДУ содержит много симметрии в своей структуре, то на практике возбуждение ее реализуется в двух специфических конфигурациях: симметричной и антисимметричной, а затем полученные результаты используются для получения общего решения задачи в виде S-параметров конкретной схемы [4]. Процедура выполнения такого анализа является достаточно простой, однако в настоящее время уже

появилось программное обеспечение, при использовании которого получают значительно лучшие по точности результаты анализа. Входную мощность можно расщепить на несколько синфазных каналов с одинаковыми амплитудами. Устройство с равными амплитудами, расщепленными на уровне 3 дБ, состоит из 2-х параллельных микрополосковых линий передачи. Вход присоединяется к обоим полосковым линиям, а выходы определяются системными импедансами моста между ними. Выходные импедансы полностью согласованы, когда все входные сигналы имеют одинаковые амплитуды и фазы на любом входе устройства. При этом отсутствуют отражения от выходных портов и вся подводимая к ним мощность концентрируется на выходных портах конструкции.

Изоляцию между любыми двумя произвольными портами можно оценить с помощью выражения для  $S$ -параметра  $S_{kj} = -10 \lg \left( \frac{1}{N^2} \frac{N^2 - 1}{2N - 1} \right)$ , где  $N$  – число входных портов и  $k, j = 2 \dots N + 1$ .

В данной работе проводится анализ функционирования делителя мощности Уилкинсона, выполненный на основе исследования вносимых потерь и потерь на распространение, а также изучения степени изоляции между выходными портами в диапазоне частот до 3 ГГц с использованием разработанного компанией Magus (Pty) программного обеспечения проектирования ВЧ и СВЧ антенн Antenna Magus 2017.0 для моделирования  $S$ -параметров ДМУ.

### Матрица рассеяния делителя мощности Уилкинсона

Прежде чем обсуждать процессы в делителе мощности целесообразно рассмотреть матрицу рассеяния и понять, как ее можно использовать для анализа характеристик делителя мощности. Матрица рассеяния, называемая  $S$ -матрицей, описывает отношения напряжений на входном порте устройства к напряжениям на отражающих портах устройства, принимая во внимание и амплитуду, и фазу этих напряжений.  $S$ -матрица в терминах отраженных волн  $V^{\text{отп}}$  и случайными напряжениями на входе можно описать в следующем виде:

$$\begin{bmatrix} V_1^{\text{отп}} \\ V_2^{\text{отп}} \\ \cdot \\ \cdot \\ V_N^{\text{отп}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} \dots & S_{1N} \\ S_{21} & S_{22} \dots & S_{2N} \\ \cdot & \cdot & \dots \\ \cdot & \cdot & \dots \\ S_{N1} & S_{N2} \dots & S_{NN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_1 \\ V_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ V_N \end{bmatrix}.$$

Используя это соотношение, значение каждого элемента  $S$ -матрицы можно установить в зависимости от соответствующих входных и отраженных напряжений. Общее уравнение

для элемента  $S$ -матрицы можно определить как  $S_{kj} = \frac{V_k^{\text{отп}}}{V_j} \Big|_{V_n=0 \text{ для } n \neq j}$ . Анализируемая модель

делителя мощности приведена на рис. 1. Существенно, что сигнал, воздействующий на порт  $j$ , и отраженная волна напряжения существуют на порте  $k$ , где отношение отраженной волны к падающей обеспечивает значение элемента  $S_{kj}$   $S$ -матрицы. Для измерения этих параметров обычно используют векторный анализатор. Когда устройство согласуется со всеми портами, то предполагается, что входные импедансы на каждом порту равны характеристическому импедансу системы. Применяя общее уравнение для элемента  $S$ -матрицы к согласованному порту и зная, что отраженная волна равна нулю, можно положить, что этот элемент  $S$ -матрицы также должен быть равным нулю. Кроме того, предполагая, что устройство согласуется с каждым портом, можно считать, что диагональные элементы  $S$ -матрицы стремятся к нулю.

### $S$ -матрица трехпортового делителя мощности

Идеальный делитель мощности обладал бы чрезвычайно низкими потерями, характеризовался взаимностью свойств и легко согласовывался бы с каждым портом. Однако такой делитель мощности построить невозможно. Чтобы продемонстрировать это рассмотрим трехпортовый делитель мощности, характеризующийся  $S$ -матрицей

$$[S] = \begin{bmatrix} S_{11} & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & S_{22} & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & S_{33} \end{bmatrix}.$$

Сначала допустим, что это устройство согласовано со всеми портами и взаимно. Тогда  $S$ -матрицу для трехпортового делителя мощности можно упростить, придав ей вид

$$[S] = \begin{bmatrix} 0 & S_{12} & S_{13} \\ S_{21} & 0 & S_{23} \\ S_{31} & S_{32} & 0 \end{bmatrix}.$$

Так как потери в этой матрице отсутствуют, то матрица является унитарной и должна удовлетворять равенствам:

$$[S_{12}]^2 + [S_{13}]^2 = 1, \quad S_{13}^* S_{23} = 0,$$

$$[S_{12}]^2 + [S_{23}]^2 = 1, \quad S_{23}^* S_{12} = 0,$$

$$[S_{13}]^2 + [S_{23}]^2 = 1, \quad S_{12}^* S_{13} = 0.$$

Это значит, что элементы  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  и  $S_{23}$  должны быть такими, чтобы каждые два из этих трех параметров должны равняться нулю, чтобы можно было удовлетворить требованиям  $S_{13}^* S_{23} = 0$  и  $S_{12}^* S_{13} = 0$ . Таким образом, параметры  $S_{12}$  и  $S_{13}$  должны быть равны нулю. Однако, полагая эти  $S$ -параметры, равными нулю, нельзя удовлетворить первому соотношению этой группы равенств. Следовательно, когда два из трех элементов  $S_{12}$ ,  $S_{13}$  и  $S_{23}$  равны нулю, одно из уравнений не будет выполняться, делая таким образом согласованную, взаимную трехпортовую схему без потерь нереализуемой.

### Устройство и $S$ -матрица ДМУ

В 1960 году Ernst Wilkinson предложил ДМУ, который обеспечивает высокую изоляцию между выходными портами, может быть согласованным со всеми портами и обладает несущественными потерями при хорошем согласовании. Приведенная на рис. 1 эквивалентная схема линии передачи для ДМУ предполагает, что мощность, установленная на двух выходных портах, является одинаковой. Устройство ДМУ состоит из линий передачи, как правило, выполняемых в виде полосковых, микрополосковых или объемных линий, каждая из которых имеет длину, равную  $\lambda/4$ .

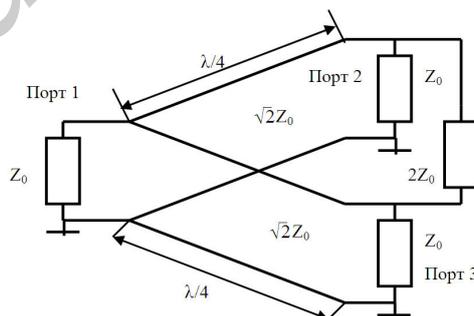


Рис. 1. Модель линии передачи ДМУ

Когда выходы соединяются с согласованными нагрузками, для равного расщепления мощности напряжение вдоль каждой линии передачи имеет одинаковые амплитуды и фазы. Этот механизм обеспечивается связующими резисторами. Необходимый импеданс каждой линии передачи равен характеристическому импедансу входной линии передачи, умноженному на коэффициент  $\sqrt{2}$ . Кроме того, внутренний резистор, связывающий два выходных порта, равен удвоенному характеристическому импедансу входной линии передачи. Идеальная  $S$ -матрица с согласованной нагрузкой суть

$$S = \frac{-1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Эта  $S$ -матрица показывает, что так как мощность поступает на порт 1, то устанавливается равенство разделенных мощностей на портах 2 и 3. Согласованные порты делителя формируют  $S_{11}$ ,  $S_{12}$  и  $S_{23}$ , которые равны нулю. При отсутствии потерь в делителе мощности, когда сигнал прикладывается к порту 1, амплитуда (сумма квадратов каждого формирующего его элемента) первого столбца  $S$ -матрицы равна 1 ввиду свойства унитарности.

Нужно отметить, что когда сигнал прикладывается к порту 2, только половина исходной мощности рассеивается на резисторе, но при этом обеспечивается взаимность устройства ( $S_{21} = S_{12}$ ). Это обуславливает изоляцию между портами 2 и 3, никакой мощности не наблюдается на порте 3, когда мощность прикладывается к порту 2, так как  $S_{23}$  и  $S_{32}$  равны нулю. На рис. 2 показана реализация ДМУ для использования программного обеспечения Antenna Magus 2017.0.

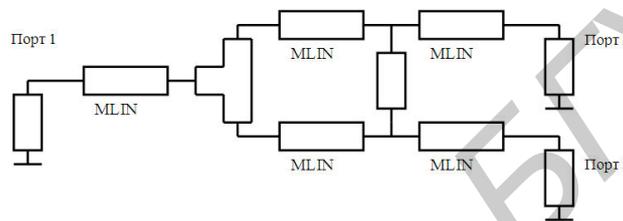


Рис. 2. Реализация ДМУ для использования программного обеспечения Antenna Magus 2017.0

### Результаты моделирования $S$ -параметров ДМУ

Результаты исследования зависимостей потерь на обратное распространение и величины развязки между выходными портами ДМУ в диапазоне рабочих частот до 3 ГГц показаны на рис. 3 и рис. 4. Ввиду высокой развязки между выходными портами, вносимые потери и потери на обратное распространение минимизированы и составляют  $-4,7$  и  $-13,2$  дБ на средней частоте исследуемого диапазона, что является явным преимуществом применения микрополосковых линий передачи в этом диапазоне рабочих частот ДМУ.

На рис. 5 приведены результаты моделирования параметров  $S$ -матрицы в этом диапазоне рабочих частот. Характерной особенностью ДМУ является равномерная зависимость параметра  $S_{21}$  во всем частотном диапазоне. Параметры  $S_{11}$  и  $S_{23}$   $S$ -матрицы изменяются не более, чем на  $-13$  и  $-30$  дБ, испытывая эти изменения только в средней части диапазона. Результаты моделирования с помощью современного программного обеспечения гарантируют надежность полученных результатов специалистам, занятым разработкой конкретных приложений ДМУ.

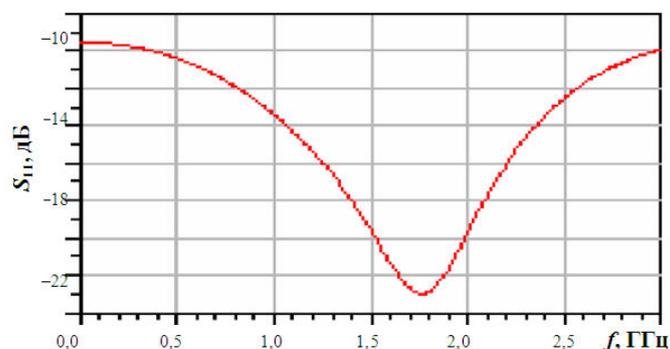


Рис. 3. Потери на обратное распространение  $S_{11}$

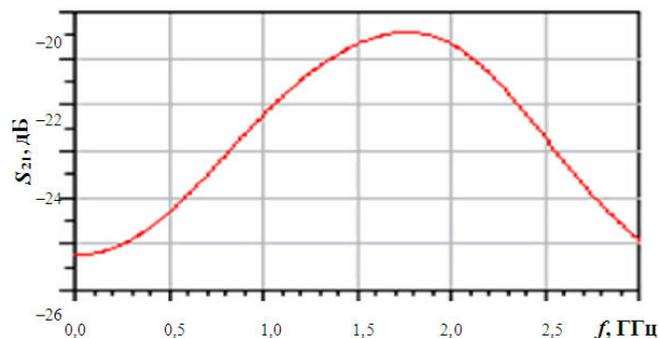


Рис. 4. Вносимые потери  $S_{21}$

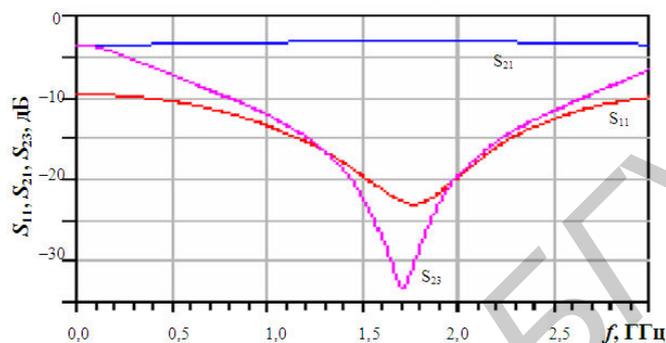


Рис. 5. Моделирование  $S$ -параметров  $S_{11}$ ,  $S_{21}$ ,  $S_{23}$

### Список литературы / References

1. Wilkinson E.J. An N-Way Hybrid Power Divider // IRE Transactions on Microwave Theory and Techniques. 1960. Vol. 8, iss. 1. P. 116–118.
2. Li B., Wu X., Wu W. An 10:1 unequal Wilkinson power divider using coupled lines with two shorts // IEEE Microwave and Wireless Component Letters. 2009. Vol. 19, № 12. P. 789–791.
3. A miniaturized broadband 4:1 unequal Wilkinson power divider / Z. Zhang [et al.] // Journal of Electromagnetics Waves and Application. 2010. Vol. 24, № 4. P. 505–511.
4. Pozar D.M. Microwave Engineering. New York: John Wiley and Son, 2005. P. 318–321

#### Сведения об авторах

Жерносеков Р.А., магистрант кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Першин В.Т., к.т.н., доцент, доцент кафедры информационных радиотехнологий Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

#### Information about the authors

Zhernosekov R.A., master student of information radiotechnology department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

Pershin V.T., PhD, associate professor, associate professor of information radiotechnology department of Belarusian state university of informatics and radioelectronics.

#### Адрес для корреспонденции

210032, Республика Беларусь,  
г. Витебск, ул. Чкалова, д. 32/4, 27  
тел. +375-29-513-75-67;  
e-mail: ew6tt@yandex.ru  
Жерносеков Роман Александрович

#### Address for correspondence

210032, Republic of Belarus,  
Vitebsk, Chkalova str., 32/4, 27  
tel. +375-29-513-75-67;  
e-mail: ew6tt@yandex.ru  
Zhernosekov Roman Alexandrovich