

УДК 621.317

В.В. Саламатин, доцент, канд. техн. наук,**Г.А. Лукьянчук, канд. техн. наук,****Г.В. Лемешко***Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская, д.33, Севастополь, 99053, Украина;**E-mail: rt.sevgtu@sevastopol.ua***РЕЗОНАТОРНЫЙ ИЗМЕРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ
ВОЛНОВОДНЫХ ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКОВ**

Предложен и исследован метод построения измерителя комплексных параметров волноводных четырехполосников на основе резонатора бегущих волн с двусторонним возбуждением. Рассмотрена методика определения этих параметров по результатам измерения комплексных коэффициентов отражения входа и выхода резонатора.

Ключевые слова: резонатор бегущей волны, измерение комплексных коэффициентов отражения четырехполосников.

Резонаторы бегущей волны (РБВ) находят применение в микроволновой технике для построения разнообразных волноводных устройств: формирователей радиоимпульсов малой длительности, направленных фильтров, измерителей направленности ответвителей и других. Еще большими возможностями обладает предложенный авторами резонатор бегущих волн с двусторонним возбуждением, который проанализирован в статье [1]. Там же рассмотрено и его применение для формирования наносекундных радиоимпульсов повышенной мощности. В данной работе обсуждается еще одно применение РБВ.

В работе [2] рассмотрен измеритель коэффициента отражения, основным структурным элементом которого является волноводно-щелевой преобразователь (ВЩП) интерференционного типа. Однако такой измеритель не позволяет измерять комплексные коэффициенты передачи (ККП). Для измерения последних необходимо использовать приборы другого типа. Таким образом, определение комплексных параметров волноводных четырехполосников осуществляется двумя типами измерителей, что приводит к существенному увеличению времени измерения. Оно еще больше увеличивается при измерении параметров невзаимных четырехполосников, которые необходимо переориентировать, в процессе измерения, так как их коэффициенты передачи и отражения различны.

Целью данной работы является исследование предложенного измерителя, построенного на основе РБВ с двухсторонним возбуждением и упомянутого ВЩП, который позволяет по измеренным значениям модулей и аргументов ККО входа и выхода РБВ одновременно определить все комплексные параметры исследуемого четырехполосника, включенного в кольцевой тракт резонатора бегущих волн. Функциональная схема микроволновой части предложенного измерителя, реализованная на волноводе сечением 23×10 мм, и ее граф изображены на рисунках 1, а и 1, б.

Система симметричного возбуждения направленного ответвителя (НО) РБВ мощностью волны СВЧ генератора (ГСВЧ) включает делитель мощности (ДМ) и две последовательные цепи, состоящие из вентилей (B_1, B_2), фазовращателей (Φ_1, Φ_2), переменных прецизионных аттенуаторов (A_1, A_2), волноводно-щелевых преобразователей ($ВЩП_1, ВЩП_2$). Вентили обеспечивают развязку плеч ДМ, а аттенуаторы и фазовращатели выравнивают амплитуды и фазы волн, подводимых к плечам НО. Исследуемый четырехполосник (ИЧ), встроенный симметрично в кольцевой резонатор, вместе с РБВ с ИЧ представляет собой эквивалентный четырехполосник. Сигналы, снимаемые с волноводно-щелевых преобразователей, содержат информацию о комплексных коэффициентах отражения (ККО) и комплексных коэффициентах передачи (ККП) этого эквивалентного четырехполосника.

На рисунке 1, б приняты следующие обозначения: $\dot{E}_{Г1}, \dot{E}_{Г2}$ – комплексные амплитуды волн в плечах 1 и 2 НО, исходящих от генератора, $\dot{E}_{Г10}, \dot{E}_{Г20}$ – подходящих к этим плечам, $\dot{E}_{31}, \dot{E}_{41}, \dot{E}_{32}, \dot{E}_{42}$ – комплексные амплитуды волн, исходящих и подходящих к плечам 3 и 4 НО, $\dot{S}_{11}, \dot{S}_{22}, \dot{S}_{21}, \dot{S}_{12}$ – комплексные параметры исследуемого четырехполосника, $\dot{S}_{ij}$ – S-параметры НО, $\tau \cdot e^{i\varphi}$ – ККП кольцевого резонатора, $\dot{\Gamma}_1, \dot{\Gamma}_2$ – ККО выходов аттенуаторов.

Решения графа позволили получить аналитические выражения для комплексных коэффициентов отражения и передачи исследуемого четырехполосника, встроенного в кольцевой резонатор, однозначно связанные с измеряемыми коэффициентами отражения входа и выхода РБВ при трех режимах работы измерителя. При симметричном возбуждении плеч первичного канала НО измеряются ККО как со

стороны плеча 1, так и со стороны плеча 2. При асимметричном – сначала с одной стороны, а затем с другой. Каждая из цепей отключается с помощью аттенюатора введением полного затухания.

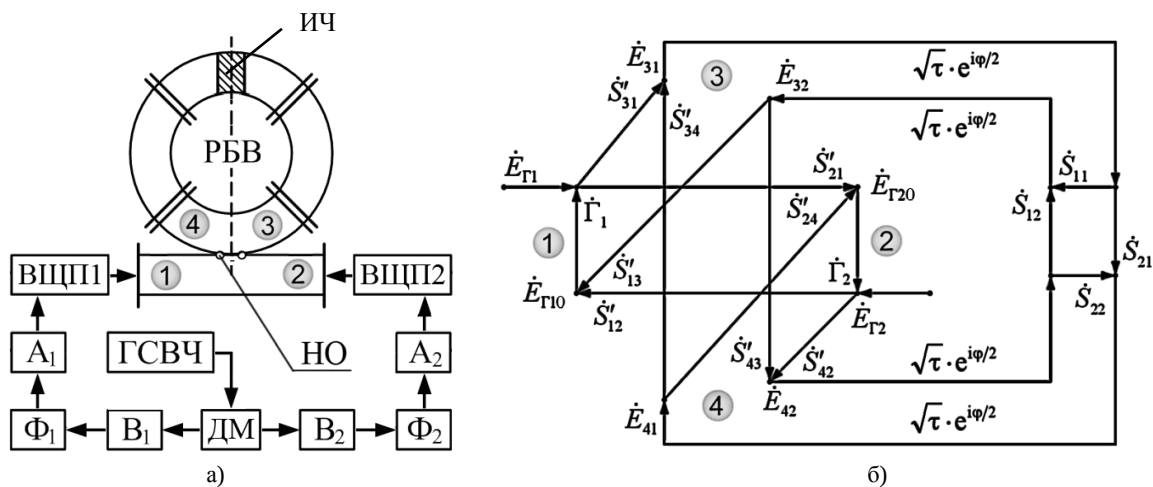


Рисунок 1 – Микроволновая часть измерителя: а) функциональная схема, б) ориентированный граф РБВ

Таким образом, измерение ККО осуществляется в три этапа.

1. Аттенюатором A_2 отключается от генератора второе плечо НО, при этом считаем $\dot{E}_{\Gamma 2} = 0$, $\dot{\Gamma}_2 = 0$, так как затухание, вносимое аттенюатором достаточно велико, и он хорошо согласован. Решение графа для ККО РБВ со стороны плеча 1 определяется выражением

$$\dot{\Gamma}_{11} = \frac{\dot{S}'_{31} \cdot \dot{S}'_{11} \cdot \dot{S}'_{13} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi}}{(1 - \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{43} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}'_{34} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi})} \quad (1)$$

2. С помощью аттенюатора A_1 от генератора отключается плечо 1 НО. Амплитуда волны $\dot{E}_{\Gamma 1}$ становится равной нулю. Аттенюатор A_2 возвращается в исходное состояние. Выражение для ККО РБВ со стороны второго плеча будет иметь вид

$$\dot{\Gamma}_{21} = \frac{\dot{S}'_{42} \cdot \dot{S}'_{22} \cdot \dot{S}'_{24} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi}}{(1 - \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{43} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}'_{34} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi})} \quad (2)$$

3. Оба плеча НО подключены к генератору. Рассмотрим РБВ в виде эквивалентного четырехполосника, граф которого показан на рисунке 2.

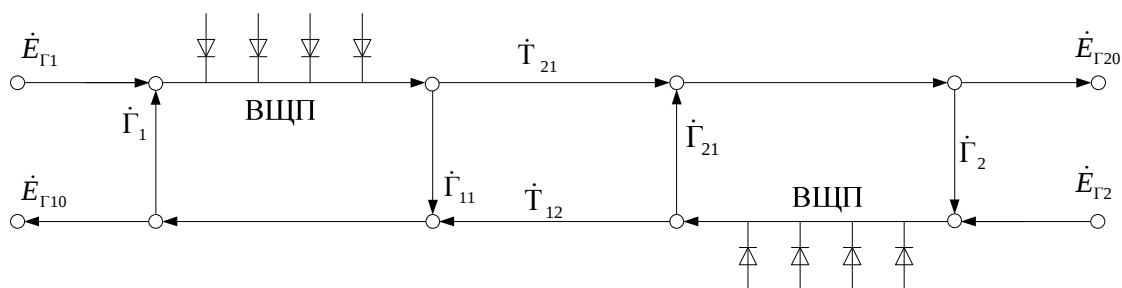


Рисунок 2 – Граф эквивалентного четырехполосника

Комплексные коэффициенты отражения, измеряемые четырехдетекторными волноводно-щелевыми преобразователями ВЦП₁ и ВЦП₂, определяются соотношениями:

$$\dot{\Gamma}_{12} = \frac{\dot{E}_{\Gamma 10}}{\dot{E}_{\Gamma 1}} = \frac{\dot{\Gamma}_{11} \cdot (1 - \dot{\Gamma}_{21} \cdot \dot{\Gamma}_2) + \dot{T}_{21} \cdot \dot{T}_{12} \cdot \dot{\Gamma}_2 + \dot{T}_{12}}{1 - \dot{\Gamma}_1 \cdot \dot{\Gamma}_{11} - \dot{\Gamma}_{21} \cdot \dot{\Gamma}_2 - \dot{\Gamma}_1 \cdot \dot{T}_{21} \cdot \dot{T}_{12} \cdot \dot{\Gamma}_2 + \dot{\Gamma}_1 \cdot \dot{\Gamma}_{11} \cdot \dot{\Gamma}_{21} \cdot \dot{\Gamma}_2}; \quad (3)$$

$$\dot{\Gamma}_{22} = \frac{\dot{E}_{\Gamma 20}}{\dot{E}_{\Gamma 2}} = \frac{\dot{\Gamma}_{21} \cdot (1 - \dot{\Gamma}_{11} \cdot \dot{\Gamma}_2) + \dot{T}_{21} \cdot \dot{T}_{12} \cdot \dot{\Gamma}_1 + \dot{T}_{21}}{1 - \dot{\Gamma}_1 \cdot \dot{\Gamma}_{11} - \dot{\Gamma}_{21} \cdot \dot{\Gamma}_2 - \dot{\Gamma}_1 \cdot \dot{T}_{21} \cdot \dot{T}_{12} \cdot \dot{\Gamma}_2 + \dot{\Gamma}_1 \cdot \dot{\Gamma}_{11} \cdot \dot{\Gamma}_{21} \cdot \dot{\Gamma}_2}, \quad (4)$$

где $\dot{T}_{21}$ и $\dot{T}_{12}$ – ККП эквивалентного четырехполосника.

Из решений графа (рисунок 1, б) находим выражения для $\dot{T}_{21}$ и $\dot{T}_{12}$

$$\dot{T}_{21} = \frac{\dot{S}'_{21} \cdot (1 - \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{43} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}'_{34} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi})}{(1 - \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{43} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}'_{34} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi})} + \frac{\dot{S}'_{31} \cdot \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}'_{24} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi} \cdot (1 - \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{43} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi})}{(1 - \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{43} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}'_{34} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi})}, \quad (5)$$

$$\dot{T}_{12} = \frac{\dot{S}'_{12} \cdot (1 - \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{43} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}'_{34} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi})}{(1 - \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{43} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}'_{34} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi})} + \frac{\dot{S}'_{42} \cdot \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{13} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi} \cdot (1 - \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{43} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi})}{(1 - \dot{S}_{12} \cdot \dot{S}'_{43} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \dot{S}'_{34} \cdot \tau \cdot e^{i\varphi})}. \quad (6)$$

В выражениях (1), (2), (5), (6) произведем замену обозначений:

$$\dot{S}'_{31} = \dot{S}'_{13} = \dot{S}'_{42} = \dot{S}'_{24} = ik; \quad \dot{S}'_{21} = \dot{S}'_{12} = \dot{S}'_{34} = \dot{S}'_{44} = \sqrt{1-k^2}, \quad \varphi = 2\pi n,$$

где k — коэффициент связи каналов НО, n — целое число.

Выражения (3) и (4) приобретают вид:

$$\dot{\Gamma}_{11} = \frac{-k^2 \cdot \dot{S}_{11} \cdot \tau}{(1 - \dot{S}_{12} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2})}; \quad (7)$$

$$\dot{\Gamma}_{21} = \frac{-k^2 \cdot \dot{S}_{22} \cdot \tau}{(1 - \dot{S}_{12} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2})}; \quad (8)$$

$$\dot{T}_{21} = \sqrt{1-k^2} - \frac{k^2 \cdot \tau \cdot \dot{S}_{21}}{1 - \dot{S}_{21} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2}} = \frac{\sqrt{1-k^2} - \tau \cdot \dot{S}_{21}}{1 - \dot{S}_{21} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2}}; \quad (9)$$

$$\dot{T}_{12} = \sqrt{1-k^2} - \frac{k^2 \cdot \tau \cdot \dot{S}_{12}}{1 - \dot{S}_{12} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2}} = \frac{\sqrt{1-k^2} - \tau \cdot \dot{S}_{12}}{1 - \dot{S}_{12} \cdot \tau \cdot \sqrt{1-k^2}}. \quad (10)$$

Зная параметры РБВ — коэффициенты k и τ , а также $\dot{\Gamma}_{11}$, $\dot{\Gamma}_{22}$, из системы уравнений (3), (4), (7) и (8) можно вычислить ККО и ККП исследуемого четырехполюсника: $\dot{S}_{11}$, $\dot{S}_{22}$, $\dot{S}_{21}$, $\dot{S}_{12}$.

Если прецизионные аттенюаторы A_1 и A_2 хорошо согласованы, то величиной ККО их выходов можно пренебречь, и считать, что $\dot{\Gamma}_{11} \approx \dot{\Gamma}_{22} \approx 0$. Выражения (3) и (4) в этом случае приобретают вид

$$\dot{\Gamma}_{12} = \dot{\Gamma}_{11} + \dot{T}_{12}; \quad \dot{\Gamma}_{22} = \dot{\Gamma}_{21} + \dot{T}_{21}.$$

Откуда ККП эквивалентного четырехполюсника могут быть определены по результатам измерения $\dot{\Gamma}_{11}$, $\dot{\Gamma}_{12}$, $\dot{\Gamma}_{21}$, $\dot{\Gamma}_{22}$

$$\dot{T}_{12} = \dot{\Gamma}_{12} - \dot{\Gamma}_{11}, \quad (11)$$

$$\dot{T}_{21} = \dot{\Gamma}_{22} - \dot{\Gamma}_{21}. \quad (12)$$

Решая совместно уравнения (9), (10), и (11), (12), определяем комплексные коэффициенты передачи $\dot{S}_{21}$ и $\dot{S}_{12}$ исследуемого четырехполюсника

$$\dot{S}_{12} = \frac{\sqrt{1-k^2} - (\dot{\Gamma}_{22} - \dot{\Gamma}_{21})}{\tau \cdot [1 - (\dot{\Gamma}_{22} - \dot{\Gamma}_{21}) \cdot \sqrt{1-k^2}]}, \quad (13)$$

$$\dot{S}_{21} = \frac{\sqrt{1-k^2} - (\dot{\Gamma}_{11} - \dot{\Gamma}_{12})}{\tau \cdot [1 - (\dot{\Gamma}_{11} - \dot{\Gamma}_{12}) \cdot \sqrt{1-k^2}]}. \quad (14)$$

Комплексные коэффициенты отражения $\dot{S}_{11}$ и $\dot{S}_{22}$ определяем из соотношений (7) и (8)

$$\dot{S}_{11} = \frac{\dot{\Gamma}_{11}(1 - \dot{S}_{12} \cdot \tau \cdot \sqrt{1 - k^2}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \tau \cdot \sqrt{1 - k^2})}{k^2 \cdot \tau}, \quad (15)$$

$$\dot{S}_{22} = \frac{\dot{\Gamma}_{21}(1 - \dot{S}_{12} \cdot \tau \cdot \sqrt{1 - k^2}) \cdot (1 - \dot{S}_{21} \cdot \tau \cdot \sqrt{1 - k^2})}{k^2 \cdot \tau}. \quad (16)$$

Подставив в (15) и (16) значения ККП $\dot{S}_{21}$ и $\dot{S}_{12}$ из (13) и (14), получим уравнения для $\dot{S}_{11}$ и $\dot{S}_{22}$, в правых частях которых будут измеренные величины ККО: $\dot{\Gamma}_{11}$, $\dot{\Gamma}_{12}$, $\dot{\Gamma}_{21}$, $\dot{\Gamma}_{22}$, а также коэффициент связи k каналов НО и модуль коэффициента передачи τ кольцевого резонатора. Коэффициент связи k определяется переходным ослаблением направленного ответвителя

$$C = 10 \lg(1/k^2),$$

которое обычно известно. Модуль τ ККП кольцевого резонатора можно рассчитать по его известной длине, или определить экспериментально, удалив исследуемый четырехполосник из кольца. При отсутствии четырехполосника ($\dot{S}_{11} = \dot{S}_{22} = 0$, $\dot{S}_{21} = \dot{S}_{12} = 1$) из выражений (1)...(4), (9)...(12) следует

$$\dot{\Gamma}_{110} = \dot{\Gamma}_{210} = 0, \quad \dot{\Gamma}_{120} = \dot{T}_{120} = \dot{\Gamma}_{220} = \dot{T}_{210}, \quad \dot{T}_{120} = \frac{\sqrt{1 - k^2} - \tau}{1 - \tau \cdot \sqrt{1 - k^2}},$$

откуда

$$\tau = \frac{\dot{\Gamma}_{21} - \sqrt{1 - k^2}}{\dot{\Gamma}_{21} \cdot \sqrt{1 - k^2} - 1}.$$

Нулевой индекс показывает, что измеренные значения ККО входа и выхода РБВ производились в отсутствие исследуемого четырехполосника.

Определение комплексных параметров исследуемых четырехполосников осуществлялось на собственных частотах f_{PC} резонатора, когда его длина L кратна соответствующим λ_{BC} длинам волн в волноводе:

$$L = n \lambda_{BC};$$

$$f_{PC} = \frac{c}{4 \cdot a \cdot L} \cdot \sqrt{4 \cdot a^2 \cdot n^2 + L^2},$$

где c – скорость света, a – размер широкой стенки волновода.

Использование резонатора бегущих волн с двухсторонним возбуждением позволяет определить все комплексные параметры четырехполосника одним измерителем, при этом можно измерять параметры как взаимных, так и невзаимных устройств. Не требуется перестановка исследуемого четырехполосника при измерении его ККО и ККП.

В качестве исследуемого четырехполосника может быть использован отрезок волновода, заполненный определенным материалом. Измеренные S-параметры этого четырехполосника однозначно связаны с электромагнитными параметрами материала. Определение их составит предмет дальнейших исследований в данном направлении.

Бibliографический список

1. Саламатин В.В. Резонатор бегущей волны с двухсторонним возбуждением и формирователь наносекундных радиоимпульсов СВЧ на его основе / В.В.Саламатин, Г.А. Лукьянчук, Г.В. Лемешко // Изв. вузов. Сер. Радиоэлектроника. — 2007. — № 149. — С. 24–32.
2. Лашенко И.В. Исследование четырехдетекторного волноводно-щелевого преобразователя калибруемого измерителя коэффициента отражения / И.В. Лашенко, В.И. Носкович, П.П. Овчаров // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии. (КрыМиКо-2008): материалы 18-ой междунар. конф., Севастополь, 8-17 сент. 2008 г. — Севастополь, 2008. — С. 696–697.

Поступила в редакцию 12.10.2009 г.