

РАДИОТЕХНИКА, СИСТЕМЫ ТЕЛЕКОММУНИКАЦИЙ, АНТЕННЫ И УСТРОЙСТВА СВЧ

УДК 621.372.812

И.Л. Афонин, П.А. Бугаёв, В.И. Носкович

АНАЛИЗАТОР КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ-УСТРОЙСТВ

Севастопольский национальный технический университет

Рассматривается анализатор комплексных параметров СВЧ-устройств, построенный на основе двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя. Исключается влияние на результат измерения мешающего воздействия собственных констант СВЧ-части анализатора путем проведения предложенных калибровочных операций.

Ключевые слова: анализатор, СВЧ-параметры, комплексный коэффициент передачи, комплексный коэффициент отражения.

Введение

В настоящее время микроволновые методы находят все большее применение в системах измерения параметров цепей, параметров материалов, а также в системах технологического контроля различных производственных процессов.

Целью данной работы является разработка и создание анализатора комплексных параметров микроволновых устройств для применения в различных отраслях производства, в частности, анализаторов комплексных параметров микроволновых устройств радиолокационных, телекоммуникационных и навигационных систем.

К современным анализаторам предъявляются следующие основные требования:

- малые габариты и масса, что позволит встраивать анализаторы в труднодоступные места;
- высокая точность результатов, обеспечивающая высокую достоверность контроля;
- широкополосность, обеспечивающая проведение анализа в различных участках частотного диапазона.

Для достижения поставленной цели необходимо решить задачи:

- разработка методов построения и анализ математических моделей радиочастотных преобразователей электрических и неэлектрических величин;
- разработка алгоритмов обработки измерительной информации радиочастотного преобразователя;
- разработка структурой и функциональной схемы анализатора;
- проведение метрологических исследований.

Наиболее полно удовлетворяют перечисленным требованиям радиометрические анализаторы параметров СВЧ-цепей, построенные на основе калибруемых волноводно-щелевых преобразователей (ВЩП) [1, 2].

С уменьшением длины волны трудности конструирования ВЩП возрастают и возникают проблемы размещения датчиков мощности в ограниченном пространстве [2]. Этот не-

достаток можно преодолеть, уменьшая число датчиков мощности. Поэтому в работе исследован метод построения радиометрического анализатора комплексных коэффициентов отражения (ККО) и передачи (ККП) микроволновых устройств на основе двухдетекторного ВЩП [3, 4].

Двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь

Двухдетекторный микроволновый преобразователь выполнен в виде отрезка волновода прямоугольного сечения с прорезанными в его широкой стенке двумя щелями, связывающими волноводы детекторных головок (датчиков мощности) с основным трактом (рис. 1). Одна из щелей – поперечная, другая – продольная. Поперечная щель возбуждается поперечной составляющей напряженности магнитного поля, продольная щель – продольной [2]:

$$\dot{H}_x = j\dot{H}_0 \frac{2a}{\lambda_B} \sin \frac{\pi x}{a} \exp(j(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda_B})),$$

$$\dot{H}_z = \dot{H}_0 \cos \frac{\pi x}{a} \exp(j(\omega t - \frac{2\pi z}{\lambda_B})),$$

где λ_B – длина волны в волноводе.

Центры щелей связи расположены в одной поперечной плоскости. Фазовый сдвиг между ответвляемыми волнами, как следует из приведенных уравнений, равен 90° на любой частоте диапазона волновода [2].

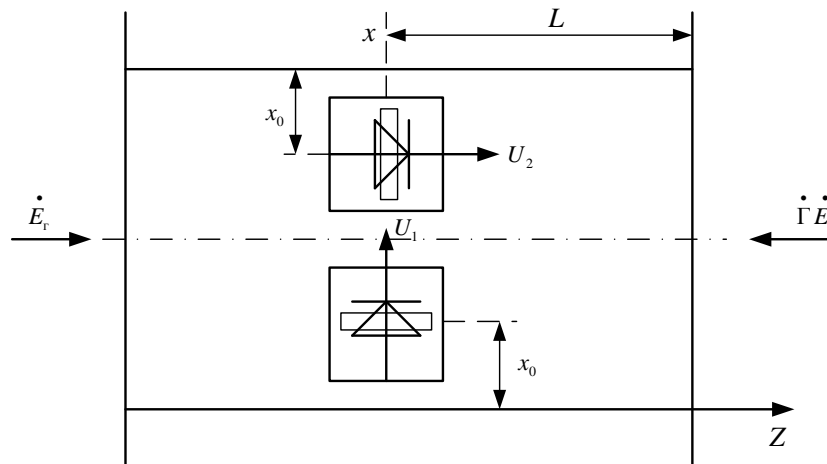


Рис. 1. Двухдетекторный ВЩП

Измеритель комплексных параметров СВЧ-устройств

Основным структурным элементом анализатора является калибруемый двухканальный двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь.

Рассмотрим работу анализатора комплексных параметров СВЧ-устройств [5].

Функциональная схема анализатора приведена на рис. 2.

Измеритель состоит из ПЭВМ 1, устройства сопряжения 2, СВЧ-генератора с дискретной перестройкой частоты 3, двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя (ДДВЩП) 4, исследуемого элемента или устройства ИУ 5, отрезка регулярного волновода 7, U-образного 180° -ного изгиба 6 и согласованной нагрузки СН 8.

Двухканальный двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь состоит из двух отрезков прямоугольного волновода, связанных между собой двумя отрезками запрядельных волноводов с симметрично расположенным в них СВЧ-диодами, которые возбуждается двумя идентичными парами щелей связи I — III и II — IV. Верхний канал нагружен согласованной нагрузкой 8. Исследуемый четырехполюсник подключается между каналами

преобразователя с помощью U -образного 180° -ного изгиба 6. Центры продольных щелей I, III и поперечных — II и IV находятся в одной поперечной плоскости. Однако для наглядности изображения детекторные головки Д1 и Д2 на рисунке разнесены на электрическое расстояние, соответствующее 90° сдвигу волн между ними. Измеритель может работать как в режиме измерения комплексного коэффициента отражения, так и в режиме измерения комплексного коэффициента передачи.

На вход одного из волноводов двухдетекторного ВЩП поступает СВЧ-сигнал от генератора с электронной дискретной перестройкой частоты. К выходному фланцу этого волновода подключается исследуемый четырехполюсник, модуль Γ и аргумент φ ККО, а также модуль T и аргумент ψ (ККП) которого подлежат определению. Сигналы с датчиков мощности ВЩП через устройство сопряжения поступают на компьютер, где они обрабатываются, а результаты измерения Γ и φ , T и ψ отображаются на экране дисплея.

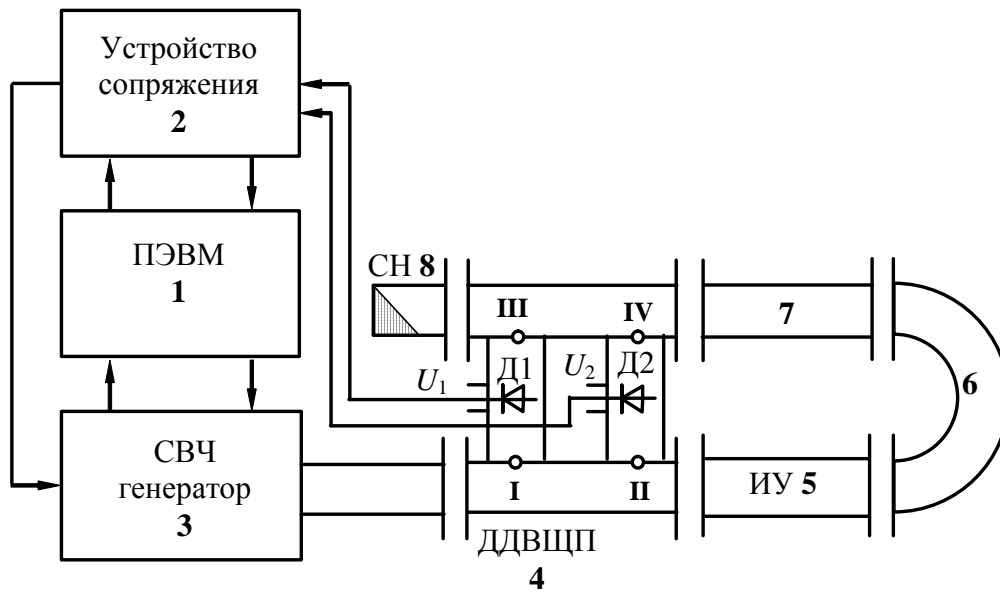


Рис. 2. Функциональная схема анализатора

Исследование анализатора комплексных параметров в режиме измерения модуля и фазы комплексного коэффициента отражения

При измерении комплексного коэффициента отражения к выходу исследуемого четырехполюсника присоединяется согласованная нагрузка.

Рассмотрим работу анализатора ККО для случая, когда выход генератора идеально согласован. В соответствии с математической моделью двухдетекторного ВЩП, учитывая 90° фазовый сдвиг между волнами, ответвляемыми щелями, и квадратичное детектирование СВЧ-сигналов диодами датчиков мощности, выражения для напряжений, снимаемых с диодов, имеют вид

$$\begin{aligned} U_1 &= k_1 E_r^2 \left(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} \right) \right); \\ U_2 &= k_2 E_r^2 \left(1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos \left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} \right) \right), \end{aligned} \quad (1)$$

где k_1, k_2 — коэффициенты передачи детекторных головок;

E_r^2 — квадрат модуля комплексной нормированной амплитуды волны генератора;

L — расстояние от центра щелей связи до выходного фланца;

λ_B — длина волны в волноводе.

Сигналы с диодов несут информацию о модуле Γ и аргументе φ ККО. Однако из-за множителей $k_1 E_\Gamma^2$ и $k_2 E_\Gamma^2$, которые неизвестны, решение уравнений (1) невозможно. Величины этих множителей можно определить, если провести калибровку анализатора по согласованной нагрузке, для которой $\Gamma = 0$. При этом получим два калибровочных уравнения:

$$U_{1к} = k_1 E_\Gamma^2; \quad U_{2к} = k_2 E_\Gamma^2. \quad (2)$$

Совместное решение измерительных (1) и калибровочных (2) уравнений позволяет определить модуль и аргумент ККО исследуемого устройства. Разделив U_1 и U_2 на $U_{1к}$ и $U_{2к}$ соответственно, получим

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_{1к}} &= 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right); \\ \frac{U_2}{U_{2к}} &= 1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

откуда

$$\begin{aligned} \Gamma &= \sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{U_1}{U_{1к}} + \frac{U_2}{U_{2к}}\right) - 1}; \\ \varphi &= \arccos\left(\frac{\frac{1}{4}\left(\frac{U_1}{U_{1к}} - \frac{U_2}{U_{2к}}\right)}{\sqrt{\frac{1}{2}\left(\frac{U_1}{U_{1к}} + \frac{U_2}{U_{2к}}\right) - 1}}\right) - \frac{4\pi L}{\lambda_B}. \end{aligned}$$

Таким образом, для определения модуля и аргумента ККО необходимо измерить сигналы с датчиков мощности при подключении к ВЦП исследуемого устройства и согласованной нагрузки.

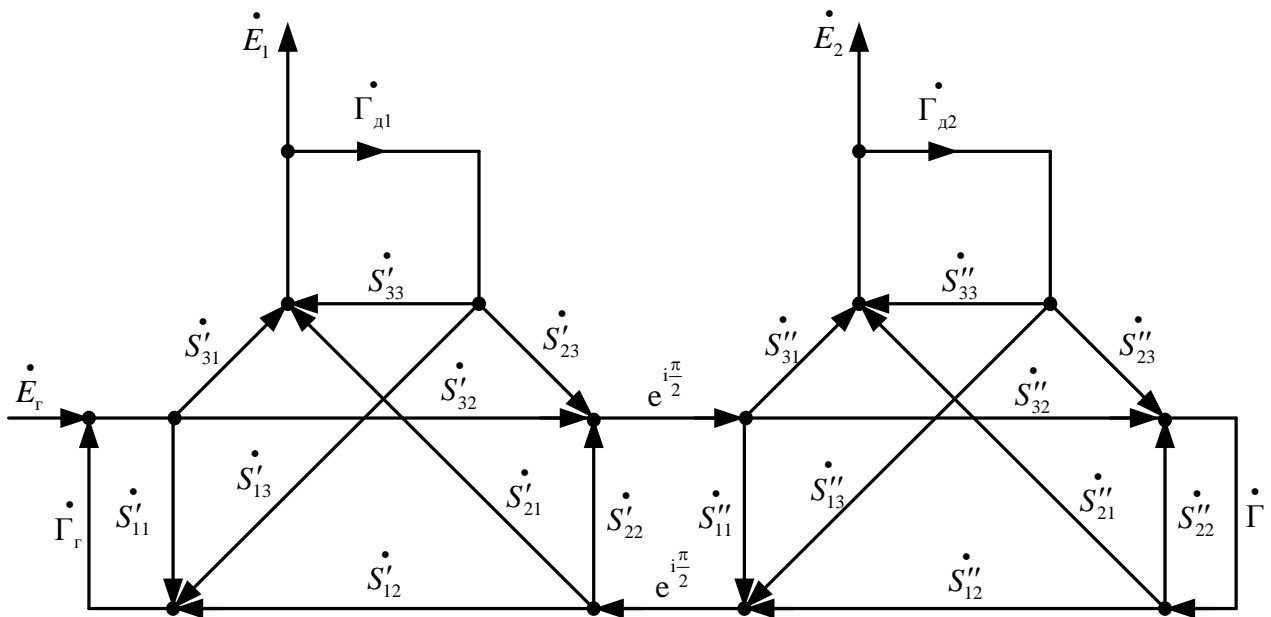


Рис. 3. Ориентированный граф микроволновой части анализатора ККО

Проанализируем работу анализатора для случая, когда ККО выхода генератора отличен от нуля.

Топологической моделью микроволновой части анализатора ККО, построенного на базе двухдетекторного ВЦП, является ориентированный граф, изображенный на рис. 3.

На рис. 3 приняты следующие обозначения:

\dot{E}_r – нормированная комплексная амплитуда волны генератора;

\dot{E}_1, \dot{E}_2 – нормированные комплексные амплитуды волн, ответвляемых щелями связи;

$\dot{\Gamma}, \dot{\Gamma}_r, \dot{\Gamma}_{d1}, \dot{\Gamma}_{d2}$ – ККО исследуемого устройства, выхода генератора, детекторных головок соответственно;

\dot{S}_{ij} – элементы матриц рассеяния шестиполюсников, образуемых щелевыми ответвителями;

\dot{S} – параметры микроволнового преобразователя, представленные в топологической модели (рис. 3), весьма сложно определить, поэтому для дальнейшего анализа используем приведенный граф (рис. 4).

Обозначим $\dot{S}'_{31} = \dot{S}'_{21} = \dot{S}'_1$; $\dot{S}''_{31} = \dot{S}''_{21} = \dot{S}''_2$.

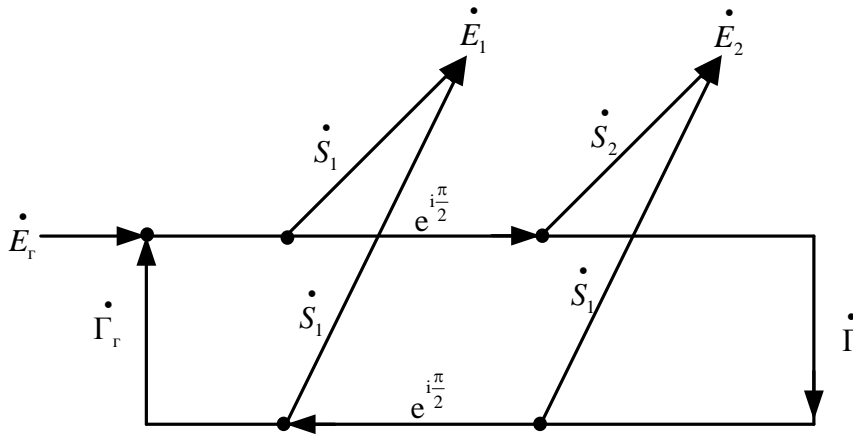


Рис. 4. Преобразованный граф микроволновой части анализатора ККО

Коэффициенты передачи \dot{S}'_1, \dot{S}''_2 щелей связи могут быть сравнительно легко измерены. При составлении приведенного графа учтено, что отражения от щелей малы, кроме того, из-за сдвига фаз ответвляемых волн, равного девяносто градусов, происходит взаимная компенсация отраженных от щелей сигналов. Переходное затухание щелей достигает 30 дБ и более, поэтому влиянием головок друг на друга можно пренебречь, а также не учитывать реакцию падающей и отраженной волн в основном тракте преобразователя на отражения от детекторных головок.

Применяя формулу Мезона [6], найдем решение ориентированного графа (рис. 4) относительно амплитуд волн \dot{E}_1, \dot{E}_2 :

$$\dot{E}_1 = \dot{S}'_1 \dot{E}_r \frac{1 + \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}_r \dot{\Gamma} e^{i\pi}}; \quad (4)$$

$$\dot{E}_2 = \dot{S}''_2 \dot{E}_r e^{i\pi/2} \frac{1 - \dot{\Gamma}}{1 - \dot{\Gamma}_r \dot{\Gamma} e^{i\pi}}. \quad (5)$$

После квадратичного детектирования сигналов (4), (5) имеем:

$$U_1 = k_1 E_r^2 \frac{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_r \Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}; \quad (6)$$

$$U_2 = k_2 E_r^2 \frac{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_r \Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}, \quad (7)$$

где U_1, U_2 – напряжения, снимаемые с диодов детекторных головок;

Γ_r, φ_r – модуль и аргумент ККО выхода генератора.

Аргумент ККО выхода генератора приведен к плоскости расположения центров щелей связи.

Совместное решение измерительных (6), (7) и калибровочных (2) уравнений позволяет исключить множители $k_1 E_r^2$ и $k_2 E_r^2$. Измерительные уравнения приобретают вид

$$\frac{U_1}{U_{1к}} = \frac{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_r \Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}; \quad (8)$$

$$\frac{U_2}{U_{2к}} = \frac{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_r \Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}. \quad (9)$$

В полученных двух уравнениях содержатся четыре неизвестные величины: измеряемые параметры Γ, φ и две константы микроволновой части — $\Gamma_r, \varphi_r(f) > 0$. Для решения уравнений относительно Γ и φ необходимо определить модуль Γ_r и фазу φ_r ККО выхода генератора.

Отраженная волна, возникающая в рассогласованном тракте, вторично отражается от выхода генератора, оказывая существенное дестабилизирующее воздействие на работу радиоэлектронных средств СВЧ, в том числе на работу ВЦП анализатора параметров волноводных устройств. Чтобы нейтрализовать это воздействие или учитывать его, необходимо знать величину комплексного коэффициента отражения выхода генератора. Существуют различные методы его измерения. Рассмотрим метод калибруемого шестиполосника, представляющего собой датчик мощности, возбуждаемый щелью связи с основным волноводом двухщелевого ВЦП. Использование одной из детекторных головок ВЦП и получение результатов определения модуля и аргумента ККО выхода генератора в явном виде является значительным преимуществом этого метода.

Сигнал, снимаемый с детекторной головки с учетом калибровки по согласованной нагрузке, представлен выражением (8):

$$\frac{U_1}{U_{1к}} = \frac{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(1 + \Gamma_r^2 \Gamma^2 - 2\Gamma_r \Gamma \cos\left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)\right)}.$$

В качестве калибровочной нагрузки использован подвижный короткозамыкатель с параметрами $\Gamma = 1, \varphi = 180^\circ$. При первой калибровке подсоединяют короткозамыкающую пластину к выходному фланцу МВП. Величина отношения $\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_1$, станет равной

$$\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_1 = \frac{2\left(1 - \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)\right)}{1 + \Gamma_r^2 + 2\Gamma_r \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)} = \frac{4\sin^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 + 2\Gamma_r \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}. \quad (10)$$

Сместив пластину подвижного короткозамыкателя на электрическое расстояние, соответствующее 180° , при второй калибровке получаем

$$\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_2 = \frac{4\cos^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{1 + \Gamma_r^2 - 2\Gamma_r \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right)}. \quad (11)$$

Совместное решение уравнений (10) и (11) позволяет найти значения модуля Γ_r и аргумента φ_r . Перепишем уравнения в несколько иной форме:

$$1 + \Gamma_r^2 + 2\Gamma_r \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right) = \frac{4\sin^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_1}; \quad (12)$$

$$1 + \Gamma_r^2 - 2\Gamma_r \cos\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B} + \varphi_r\right) = \frac{4\cos^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_2}. \quad (13)$$

Просуммировав эти уравнения, находим модуль Γ_r :

$$\Gamma_r = \sqrt{\left(\frac{2\sin^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_1} + \frac{2\cos^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_2}\right) - 1}. \quad (14)$$

Вычитая из уравнения (12) уравнение (13) и преобразовав полученный результат, определим значение аргумента φ_r

$$\varphi_r = \arccos \left(\frac{\frac{\sin^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_1} - \frac{\cos^2\left(\frac{4\pi L}{\lambda_B}\right)}{\left(\frac{U_1}{U_{1к}}\right)_2}}{\Gamma_r} \right) - \frac{4\pi L}{\lambda_B}. \quad (15)$$

При вычислении φ_r в уравнение (15) следует подставить значение Γ_r , найденное из уравнения (14).

Таким образом, решение уравнений (14) и (15) определяет величины модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения выхода генератора. Подстановка их в уравнения (8) и (9) дает возможность вычислить значения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения исследуемого устройства. При этом точное решение системы этих

уравнений исключает погрешность при определении искомым параметров Γ и φ , вызванную отражением волны от выхода генератора.

Для упрощения решения уравнений (8) и (9) перепишем их в несколько измененном виде:

$$A_1(X^2 + Y^2) + B_1X - C_1Y + D_1 = 0, \quad A_2(X^2 + Y^2) - B_2X - C_2Y + D_2 = 0.$$

Здесь введены следующие обозначения: $X = \Gamma \cos \varphi$; $Y = \Gamma \sin \varphi$;

$$A_1 = (1 - U_{1н} \Gamma_r^2); \quad A_2 = (1 - U_{2н} \Gamma_r^2); \quad B_1 = 2(1 + U_{1н} \Gamma_r \cos \varphi_r); \quad B_2 = 2(1 - U_{2н} \Gamma_r \cos \varphi_r);$$

$$C_1 = 2U_{1н} \Gamma_r \sin \varphi_r; \quad C_2 = 2U_{2н} \Gamma_r \sin \varphi_r; \quad D_1 = (1 - U_{1н}); \quad D_2 = (1 - U_{2н});$$

$$U_{1н} = \frac{U_1}{U_{1к}}; \quad U_{2н} = \frac{U_2}{U_{2к}}.$$

При этом $\frac{4\pi L}{\lambda_{в}} = 2\pi n$, где n — целое число.

Получив из решения этой системы реальную X и мнимую Y составляющие ККО, находят модуль Γ и аргумент φ по формулам

$$\Gamma = \sqrt{X^2 + Y^2}; \quad \varphi = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right).$$

Следует отметить, что при определении аргумента ККО выхода генератора нужно знать не только численное значение φ_r , но и его знак. Данная задача решается путем незначительного изменения частоты измерительного генератора относительно исходной частоты f [2]:

$$\text{если } |\varphi_r(f + \Delta f)| > |\varphi_r(f)|, \text{ то } \varphi_r(f) < 0;$$

$$\text{если } |\varphi_r(f + \Delta f)| < |\varphi_r(f)|, \text{ то } \varphi_r(f) > 0.$$

Таким образом, предложены и исследованы метод построения и математическая модель калибруемого анализатора комплексного коэффициента отражения волноводных устройств, построенного на основе конструктивно простого двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя. Исключение влияния на результат измерения мешающего воздействия собственных констант СВЧ-части прибора осуществлено путем проведения калибровочных операций. Рассмотренная методика определения модуля и фазы ККО выхода генератора позволила уменьшить погрешность прибора, обусловленную переломом волны от генератора. Реализация микроволновой части анализатора может быть осуществлена на базе любого типа металлодиэлектрического волновода.

Исследование анализатора комплексных параметров в режиме измерения модуля и фазы комплексного коэффициента передачи

Благодаря применению двух каналов в микроволновом преобразователе, можно измерять не только ККО, но и комплексный коэффициент передачи (ККП). Волна генератора, пройдя исследуемый четырехполюсник, поступает в верхний канал ВЩП. На диоды СВЧ благодаря щелям связи, прорезанным в широкой стенке верхнего волновода, ответвляются сигналы, пропорциональные амплитуде прошедшей волны. Кроме того, при работе анализатора в данном режиме на диоды датчиков мощности воздействуют еще два СВЧ-сигнала: один, пропорциональный амплитуде падающей волны, другой — отраженной.

Топологической моделью СВЧ-части анализатора в режиме измерения ККП является ориентированный граф, изображенный на рис. 5.

После преобразования графа, рассматривая работу анализатора ККП для идеализированного случая, когда выход генератора идеально согласован, $\Gamma_H = 0$ и заменяя обозначения: S_{11x} на Γ , S_{21x} на T , запишем решение графа.

Результирующие нормированные комплексные амплитуды волн \dot{E}_1 , \dot{E}_2 , ответвленных щелями связи нижнего и верхнего волноводов определяются соотношениями

$$\dot{E}_1 = \dot{S}_1 \dot{E}_r [1 + \dot{\Gamma} + T]; \tag{16}$$

$$\dot{E}_2 = \dot{S}_2 \dot{E}_r e^{\frac{j\pi}{2}} [1 - \dot{\Gamma} - T]. \tag{17}$$

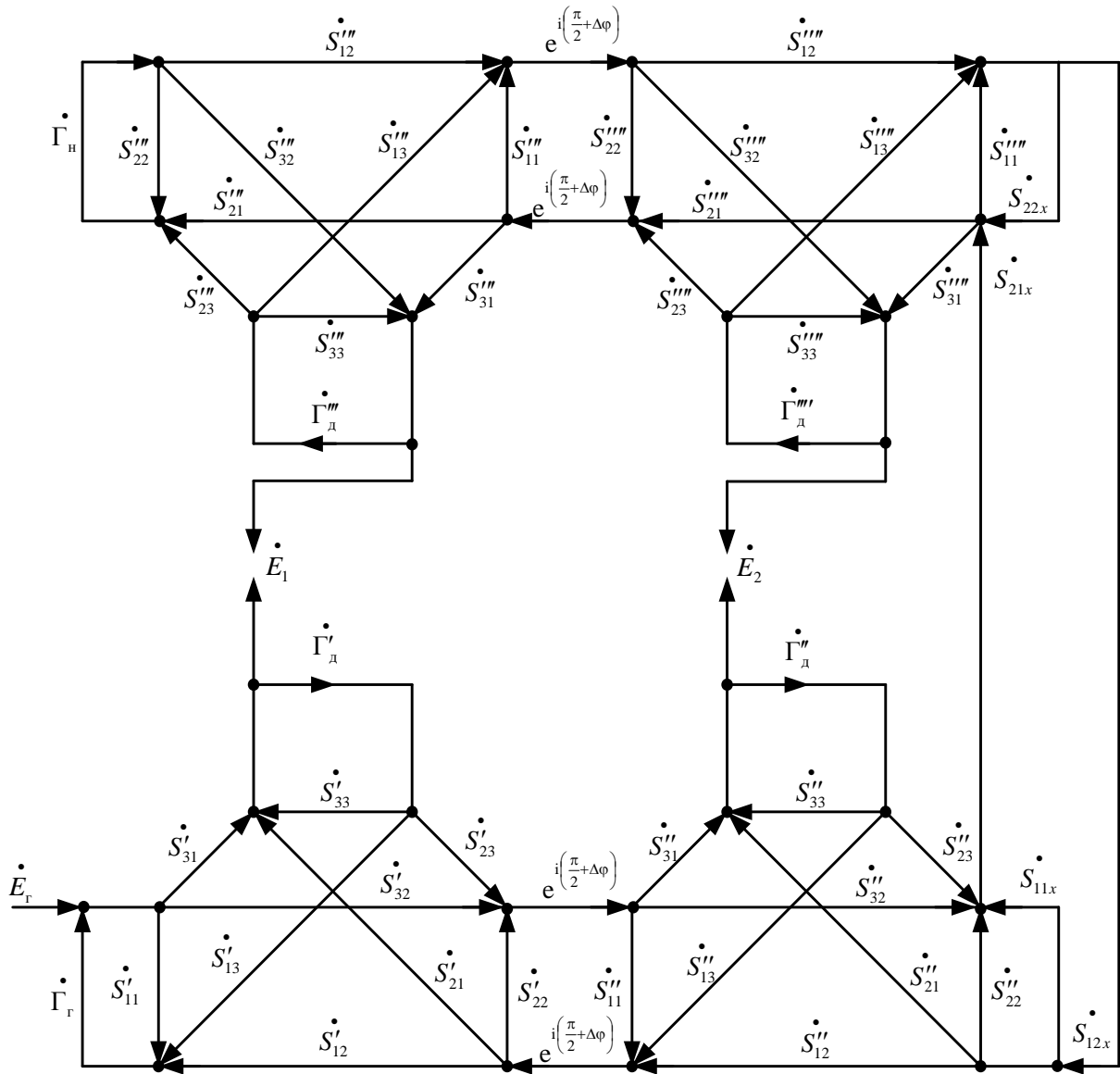


Рис. 5. Ориентированный граф СВЧ-части анализатора в режиме измерения ККП

После квадратичного детектирования сигналов (16), (17) имеем

$$U_{1T} = k_1 E_r^2 (1 + \Gamma^2 + T^2 + 2\Gamma \cos \varphi + 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi)); \tag{18}$$

$$U_{2T} = k_2 E_r^2 (1 + \Gamma^2 + T^2 - 2\Gamma \cos \varphi - 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi)); \tag{19}$$

где U_{1T} , U_{2T} – напряжения, снимаемые с диодов детекторных головок при измерении модуля и аргумента коэффициента передачи;

T и ψ – модуль и аргумент ККП исследуемого четырехполюсника.

Совместное решение измерительных (18), (19) и калибровочных (2) уравнений позволяет исключить множители $k_1 E_r^2$ и $k_2 E_r^2$. Измерительные уравнения приобретают вид

$$\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} = 1 + \Gamma^2 + T^2 + 2\Gamma \cos \varphi + 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi); \quad (20)$$

$$\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} = 1 + \Gamma^2 + T^2 - 2\Gamma \cos \varphi - 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi). \quad (21)$$

Учитывая (3), имеем

$$\frac{U_1}{U_{1\kappa}} = 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \varphi; \quad (22)$$

$$\frac{U_2}{U_{2\kappa}} = 1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos \varphi, \quad (23)$$

где $\frac{U_1}{U_{1\kappa}}$, $\frac{U_2}{U_{2\kappa}}$ – результаты измерений сигналов с датчиков мощности при работе анализатора в режиме измерения ККО, уравнения (20) и (21) с учетом (22) и (23) приобретают вид

$$\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} = \frac{U_1}{U_{1\kappa}} + T^2 + 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi);$$

$$\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} = \frac{U_2}{U_{2\kappa}} + T^2 - 2\Gamma T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi).$$

Поскольку модуль и аргумент ККО уже измерены, неизвестными в этих двух уравнениях являются модуль T и аргумент ψ ККП. Для их определения преобразуем уравнения путем их суммирования и вычитания.

$$\left(\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} - \frac{U_1}{U_{1\kappa}} \right) + \left(\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} - \frac{U_2}{U_{2\kappa}} \right) = 2T^2 + 4\Gamma T \cos(\varphi - \psi); \quad (24)$$

$$\left(\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} - \frac{U_1}{U_{1\kappa}} \right) - \left(\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} - \frac{U_2}{U_{2\kappa}} \right) = 4\Gamma T \cos \psi. \quad (25)$$

Для сокращения записи введем обозначения левых частей уравнений:

$$\left(\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} - \frac{U_1}{U_{1\kappa}} \right) + \left(\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} - \frac{U_2}{U_{2\kappa}} \right) = M;$$

$$\left(\frac{U_{1\Gamma}}{U_{1\kappa}} - \frac{U_1}{U_{1\kappa}} \right) - \left(\frac{U_{2\Gamma}}{U_{2\kappa}} - \frac{U_2}{U_{2\kappa}} \right) = H.$$

Константы M и H подставим в уравнения (24) и (25) и проведем дополнительное их преобразование:

$$M = 2\Gamma^2 \cos^2 \psi + 2T^2 \sin^2 \psi + 4\Gamma T \cos \varphi \cos \psi + 4\Gamma T \sin \varphi \sin \psi;$$

$$T \cos \psi = \frac{H}{4}; \quad (26)$$

$$\text{или } M = \frac{H^2}{8} + 2T^2 \sin^2 \psi + H\Gamma \cos \varphi + 4\Gamma T \sin \varphi \sin \psi. \quad (27)$$

Из уравнения (27) находим — $T \sin \psi$.

$$(T \sin \psi)_{1,2} = -\Gamma \sin \varphi \pm \sqrt{\Gamma^2 \sin^2 \varphi - \frac{H^2}{16} + \frac{H\Gamma \cos \varphi}{2} - \frac{M}{2}}. \quad (28)$$

Единственность решения уравнения (28) определяется конкретными значениями найденных параметров: Γ , φ , H , M . Обозначим правую часть этого равенства символом P , то есть

$$T \sin \psi = P = -\Gamma \sin \varphi \pm \sqrt{\Gamma^2 \sin^2 \varphi - \frac{H^2}{16} + \frac{H\Gamma \cos \varphi}{2} - \frac{M}{2}}. \quad (29)$$

Учитывая (26) и (29), модуль T комплексного коэффициента отражения равен

$$T = \sqrt{T^2 \cos^2 \psi + T^2 \sin^2 \psi} = \sqrt{\frac{H^2}{16} + P^2} .$$

При этом с учетом выражений (26) и (29), фаза ψ ККП определится соотношением

$$\psi = \arctg \left(\frac{4P}{H} \right) .$$

Выводы

Таким образом, разработан и предложен анализатор комплексных параметров СВЧ-устройств, построенный на основе двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя, который позволяет измерять не только модуль и фазу комплексного коэффициента отражения, но и модуль, и фазу комплексного коэффициента передачи исследуемого четырехполюсника. При этом исключение влияния на результат измерения мешающего воздействия собственных констант СВЧ-части анализатора осуществлено путем проведения калибровочных операций.

Библиографический список

1. **Бондаренко, И.К.** Автоматизация измерений параметров СВЧ-трактов / И.К. Бондаренко, Г.А. Дейнега, З.В. Маграчев. – М.: Сов. радио, 1969. – 304 с.
2. **Гимпилевич, Ю.Б.** Калибруемый измеритель комплексного коэффициента отражения на основе двухканального микроволнового преобразователя / Ю.Б. Гимпилевич, В.И. Носкович // Радиотехника. 2006. Вып. 145. С. 130–134.
3. **Афонин, И.Л.** Исследование частотно-фазовой зависимости в волноводно-щелевом ответвителе / И.Л. Афонин, И.В. Лашенко // Академія ВМС ім. П.С. Нахімова: зб. наук. пр. – Севастополь, 2010. Вип. 1 (1). С. 54–57.
4. **Семенов, Н.А.** Техническая электродинамика: учеб. пособ. для вузов / Н.А. Семенов. – М.: Связь, 1973. – 480 с.
5. Пат. 99989 Україна, МПК^{2006.01} G 01 R 27/06. Вимірник комплексних параметрів НВЧ пристроїв / Бугайов П.О., Афонін І.Л., Боков Г.В., Саламатін В.В., заявник та патентовласник Севастопольський національний технічний університет. № а201111329; заявл. 26.09.11; опубл. 25.10.12, Бюл. № 20.
6. **Силаев, М.А.** Приложение матриц и графов к анализу СВЧ-устройств / М.А. Силаев, С.Ф. Брянцев. – М.: Сов. радио, 1970. – 248 с.

Дата поступления
в редакцию 06.05.2013

I.L. Afonin, P.A. Bugayov, V.I. Noskovich

ANALYZER THE COMPLEX PARAMETERS OF MICROWAVE DEVICES

Sevastopol National technical university

Purpose: Creating new analyzer complex parameters of microwave devices based on dual two-detector waveguide-slot drive.
Design / methodology / approach: Analyzer is based on a two-channel two-detector-plane waveguide transducer, in which, the influence on the result of interfering effects of microwave own constants, through calibration operations.
Findings: An analyzer based on waveguide-slot converter is shown in detail.
Research limitations/implications: Analysis of complex parameters of microwave devices.
Originality/value: Using the new analyzer complex parameters of microwave devices simplifies the design and manufacture of waveguide-slot converter reliability paid off for the same functionality, ie, measuring how complex transfer and complex reflection coefficient without increasing measurement error and its bandwidth.

Key words: analyzer, microwave parameters, complex transfer, the complex reflection coefficient.