

УДК 621.372.812

ИЗМЕРИТЕЛИ КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ ВОЛНОВОДНЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ ДВУХКАНАЛЬНОГО ДВУХДЕТЕКТОРНОГО ВОЛНОВОДНО-ЩЕЛЕВОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

И.Л. АФОНИН, И.В. ЛАЩЕНКО, П.А. БУГАЁВ

Рассматриваются измерители комплексного коэффициента отражения и комплексного коэффициента передачи, построенные на основе двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя. Исключается влияние на результат измерения мешающего воздействия собственных констант СВЧ части прибора путем проведения предложенных калибровочных операций.

Ключевые слова: комплексный коэффициент передачи, комплексный коэффициент отражения, двухканальный двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь.

ВВЕДЕНИЕ

Разработке измерителей комплексных коэффициентов отражения (ККО) и передачи (ККП) волноводных устройств для различных направляющих систем всегда уделялось и продолжает уделяться большое внимание. При этом комплексные параметры определяют качественные показатели антенно-волноводных трактов радиотехнических систем и радиоизмерительных приборов, и от их состояния зависит качество и самих систем, и средств измерения.

Современные методы исследования волноводных трактов подразумевают расчленение тракта на простые элементы, определение характеристик элементов и решение задачи расчета параметров волноводного тракта через характеристики элементов [1]. Существует два подхода при решении подобных задач:

- с позиций электродинамической теории [2],
- с позиций теории линейных цепей [3].

Электродинамические методы предполагают решение уравнений Максвелла и решают задачи расчета волноводного тракта, содержащих несколько элементов или неоднородностей. В основе методов теории линейных цепей лежат законы Кирхгофа. Волноводные тракты могут быть описаны уравнениями, связывающими падающие и отраженные волны, действующие на входах (выходах) тракта. Для волноводных трактов с большим количеством элементов широкое распространение получили параметры рассеяния (S -параметры и параметры проводимости Y -параметры).

Широкое распространение параметров рассеяния для исследования волноводных трактов обусловлено тем, что они могут быть непосредственно измерены и имеют ясный физический смысл. Например, элемент волноводного тракта (четыреполюсник) полностью характеризуется волновой матрицей рассеяния

$$[\dot{S}] = \begin{bmatrix} \dot{S}_{11} & \dot{S}_{12} \\ \dot{S}_{21} & \dot{S}_{22} \end{bmatrix},$$

где \dot{S}_{11} , \dot{S}_{22} — ККО входа и выхода, \dot{S}_{12} , \dot{S}_{21} — ККП в прямом и обратном направлениях.

Как видно из приведенного выше выражения, параметры с одинаковыми индексами \dot{S}_{ii} являются комплексными коэффициентами отражения, а с разными индексами \dot{S}_{ij} — комплексными коэффициентами передачи из плеча j в плечо i .

Квадраты модулей коэффициентов $|\dot{S}_{ij}|^2$ показывают часть отраженной ($i = j$) или прошедшей ($i \neq j$) мощности при единичной мощности на входе элемента. Параметры рассеяния определяются при согласованном режиме работы всех входов устройства. Если какой-либо вход или группа входов волноводного тракта нагружены на рассогласованные нагрузки, то имеем дело уже с новым устройством с другими параметрами рассеяния.

Параметры проводимости не имеют такого ясного физического смысла. На СВЧ можно достаточно просто измерить только Y -параметры с одинаковыми индексами, обеспечив на всех входах, кроме измеряемого, режим короткого замыкания. При этом параметр Y_{ii} можно рассматривать как входную проводимость [4].

Таким образом, волноводный тракт, например, в режиме передачи, можно рассматривать как систему в виде нагруженных на генератор n элементов. При этом элементы, входящие в тракт между генератором и антенной, будем рассматривать в виде обобщенных четырехполюсников с матрицами рассеяния $[\dot{S}_{mn}]_i$, расположенных на расстоянии l_i друг от друга, а антенну как оконечный двухполюсник. Аналогично можно рассматривать и работу волноводного тракта в режиме приема.

Волноводный тракт должен быть хорошо согласован, т.е. коэффициент отражения от его входа должен быть минимальным. Увеличение же коэффициента отражения приводит к таким нежелательным явлениям:

- уменьшению коэффициента полезного действия тракта η [5]

$$\eta = e^{-2\alpha l} \frac{1 - \Gamma_H^2}{1 - \Gamma_H^2 e^{-4\alpha l}},$$

где l — длина волноводного тракта; α — коэффициент затухания; Γ_H — модуль комплексного коэффициента отражения;

— нестабильности уровня мощности и частоты генератора. При согласовании тракта, т.е. в случае, когда сопротивление нагрузки Z_H равно волновому сопротивлению ρ , коэффициент отражения равен нулю. В случае несогласованной нагрузки входное сопротивление в конце тракта равно

$$Z_H = \rho \frac{1 + \dot{\Gamma}_H}{1 - \dot{\Gamma}_H}.$$

Реактивная составляющая сопротивления влияет на частоту генератора (например, магнетрона [6]), а отличие активной составляющей от волнового сопротивления приводит к изменению мощности;

— возможности пробоя линии передачи [7]

$$E_{\max} = \sqrt{\frac{4PZ_c}{ab}} (1 + \Gamma_H),$$

где P — мощность в тракте; Z_c — характеристическое сопротивление волновода; a и b — поперечные размеры волновода; E_{\max} — максимальная амплитуда напряженности электрического поля в волноводе.

В пучностях напряженности падающей E_n и отраженной E_o волн складываются, т.е. $E_{\max} = E_n + E_o$. Следовательно, возможность пробоя волноводного тракта в этих местах возрастает;

— искажению сигнала за счет возникновения высших типов волн на неоднородностях тракта.

Таким образом, параметр согласования входа и выхода элемента может быть выбран в качестве основного, несущего информацию о состоянии волноводного тракта в любой момент времени.

В работе приводятся результаты исследований измерителя комплексного коэффициента передачи и комплексного коэффициента отражения. Измерители реализованы на основе калибруемого двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя (ДДВЩП) (рис. 1).

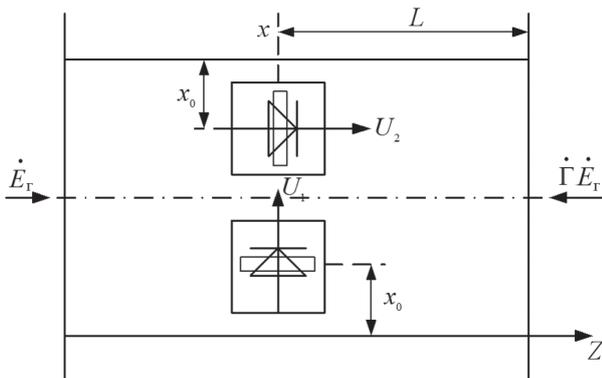


Рис. 1. Щели связи двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя

ДДВЩП выполнен на базе двух отрезков волновода прямоугольного сечения с прорезанными в их широких стенках по паре щелей, связывающих волноводы детекторных головок (датчиков мощности) с волноводами измерительного тракта. Одна из щелей — поперечная, другая — продольная. Центры щелей связи расположены в одной поперечной плоскости. Фазовый сдвиг между ответвляемыми волнами (электрическое расстояние) равен 90° на любой частоте диапазона волновода. Датчики мощности построены на отрезках прямоугольных запердельных волноводов, установленных торцом на отрезках волноводов измерительного тракта. Диоды СВЧ расположены симметрично относительно концов отрезков, расположенных между базовыми волноводами, возбуждаются электрической составляющей поля и находятся в ее максимуме (в центре широких стенок запердельных волноводов).

1. ИЗМЕРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСНОГО КОЭФФИЦИЕНТА ПЕРЕДАЧИ

Функциональная схема измерителя приведена на рис. 2 [8:]

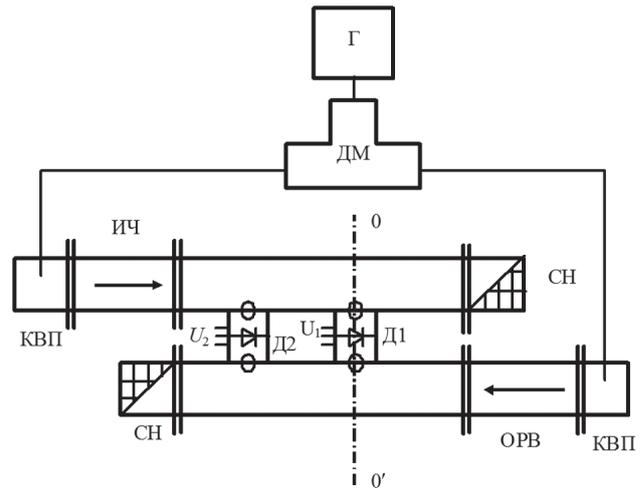


Рис. 2. Функциональная схема измерителя ККП четырехполюсника: Γ — генератор СВЧ; КВП — коаксиально-волноводный переход; Д1, Д2 — детекторные головки; ДМ — делитель мощности; ОРВ — отрезок регулярного волновода; ИЧ — исследуемый четырехполюсник; СН — согласованная нагрузка

Сигнал от генератора СВЧ с дискретной электронной перестройкой частоты через делитель мощности и коаксиально-волноводные переходы поступает в измерительный и опорный каналы, нагруженные согласованными нагрузками. В измерительный канал включается исследуемый четырехполюсник. Двухканальный двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь связан с помощью щелей как с измерительным, так и с опорным каналами. Фазовый сдвиг между сигналами, ответвляемыми щелями в волноводы датчиков мощности Д1 и Д2, равен 90° . Опорная плоскость $0 - 0'$, проходящая

через центры щелей связи детекторной головки Д1, равноудалена от боковых плеч делителя мощности. Поэтому сдвиг фаз между опорной и измерительной волнами равен фазовому сдвигу ψ , вносимому исследуемым четырехполюсником [9].

В результате интерференции волн, ответвляемых как из опорного, так и измерительного каналов в детекторные головки (датчики мощности), напряжения U_1 и U_2 , снимаемые с диодов СВЧ, определяются соотношениями:

$$U_1 = k_{10}^2 E_r^2 + k_{1и}^2 E_r^2 T^2 + 2k_{10}k_{1и} E_r^2 T \cos \psi; \quad (1)$$

$$U_2 = k_{20}^2 E_r^2 + k_{2и}^2 E_r^2 T^2 - 2k_{20}k_{2и} E_r^2 T \cos \psi, \quad (2)$$

где k_{10} , $k_{1и}$, k_{20} , $k_{2и}$ — модули комплексных коэффициентов передачи детекторных головок Д1 и Д2 со стороны опорного и измерительного каналов, соответственно; E_r — модуль комплексной амплитуды волны генератора; T — модуль ККП исследуемого четырехполюсника; ψ — фазовый сдвиг, вносимый исследуемым четырехполюсником.

Уравнения (1) и (2) представляют собой математическую модель измерителя комплексного коэффициента передачи.

Вследствие квадратичного детектирования, напряжение U_1 , снимаемое с диода головки Д1, равно сумме квадратов модулей комплексных амплитуд волн, ответвленных из опорного — $k_{10}^2 E_r^2$ и измерительного — $k_{1и}^2 E_r^2 T^2$ каналов, плюс удвоенное произведение модулей на косинус сдвига фаз. Аналогично определяется и напряжение U_2 ; только знак минус перед удвоенным произведением модулей обусловлен тем, что сдвиг фаз между ответвляемыми волнами изменился на 180° .

Измеренные значения напряжений с детекторных головок зависят от параметров исследуемого четырехполюсника — T и ψ и собственных эквивалентных констант микроволновой части измерителя. Для решения системы уравнений (1) и (2) относительно T и ψ сначала необходимо определить эти константы. Определение собственных констант осуществлено в результате проведения двух калибровочных операций.

Первая калибровочная операция. От измерительного канала отсоединяется КВП, к нему подсоединяется согласованная нагрузка. На диоды головок поступают волны, ответвленные только из опорного канала. Выражения для напряжений с диодов головок $U_{1к1}$ и $U_{2к1}$ в этом случае имеют вид:

$$U_{1к1} = k_{10}^2 E_r^2, \quad U_{2к1} = k_{20}^2 E_r^2. \quad (3)$$

Вторая калибровочная операция. От опорного канала отсоединяется КВП, к которому подсоединяется согласованная нагрузка. На диоды головок поступают волны, ответвленные только из измерительного канала. При этом вместо

исследуемого четырехполюсника в измерительный канал подключается равный ему по длине отрезок регулярного волновода ($T = 1$). Вторые калибровочные уравнения имеют вид:

$$U_{1к2} = k_{1и}^2 E_r^2, \quad U_{2к2} = k_{2и}^2 E_r^2. \quad (4)$$

Как легко заметить, константа — $2k_{10}k_{1и} E_r^2$ в третьем члене уравнения (1) равна

$$2k_{10}k_{1и} E_r^2 = 2\sqrt{k_{10}^2 E_r^2 k_{1и}^2 E_r^2} = 2\sqrt{U_{1к1} U_{1к2}}. \quad (5)$$

Константа — $2k_{20}k_{2и} E_r^2$ в третьем члене уравнения (2) равна

$$2k_{20}k_{2и} E_r^2 = 2\sqrt{k_{20}^2 E_r^2 k_{2и}^2 E_r^2} = 2\sqrt{U_{2к1} U_{2к2}}. \quad (6)$$

Таким образом, в результате проведения двух калибровочных операций определены присутствующие в уравнениях (1) и (2) собственные константы микроволновой части измерителя, и эти уравнения могут быть предоставлены с учетом (3) ... (6) в следующем виде:

$$U_1 = U_{1к1} + U_{1к2} T^2 + 2\sqrt{U_{1к1} U_{1к2}} T \cos \psi, \quad (7)$$

$$U_2 = U_{2к1} + U_{2к2} T^2 - 2\sqrt{U_{2к1} U_{2к2}} T \cos \psi. \quad (8)$$

Из полученных уравнений определяются неизвестные величины T^2 и $T \cos \psi$.

Для определения T^2 величину $T \cos \psi$ находим из (7) и подставляем ее в (8):

$$T = \frac{\frac{U_1 - U_{1к1}}{2\sqrt{U_{1к1} U_{1к2}}} + \frac{U_2 - U_{2к1}}{2\sqrt{U_{2к1} U_{2к2}}}}{\sqrt{\frac{U_{1к2}}{2\sqrt{U_{1к1} U_{1к2}}} + \frac{U_{2к2}}{2\sqrt{U_{2к1} U_{2к2}}}}}. \quad (9)$$

Перепишем (7) относительно ψ и, подставив T , находим значение аргумента комплексного коэффициента передачи

$$\psi = \arccos \left(\frac{U_1 - U_{1к1} - U_{1к2} T^2}{2\sqrt{U_{1к1} U_{1к2}} T} \right). \quad (10)$$

Таким образом, для определения модуля и аргумента ККО необходимо измерить сигналы с датчиков мощности при подключении к ДДВЩП исследуемого устройства и при проведении калибровок.

2. ИЗМЕРИТЕЛЬ КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ СВЧ УСТРОЙСТВ

В практике микроволновых измерений часто встречается необходимость аттестации четырехполюсников по всем четырем комплексным параметрам — комплексным коэффициентам отражения и передачи входа и выхода устройства. В большинстве случаев измерение одного параметра осуществляется на одном приборе, другого — на другом. Это усложняет процесс измерения, удорожает его, так как не всегда в наличии

имеется соответствующая аппаратура. Поэтому представляется весьма целесообразной и актуальной разработка прибора, позволяющего измерять как ККО, так и ККП [10].

Прибор может быть реализован на любом типе волновода, в том числе и на базе плоского металлодиэлектрического волновода. Основным структурным элементом, как и в вышерассмотренном измерителе комплексного коэффициента передачи, является калибруемый двухканальный двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь.

Функциональная схема измерителя приведена на рис. 3.

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

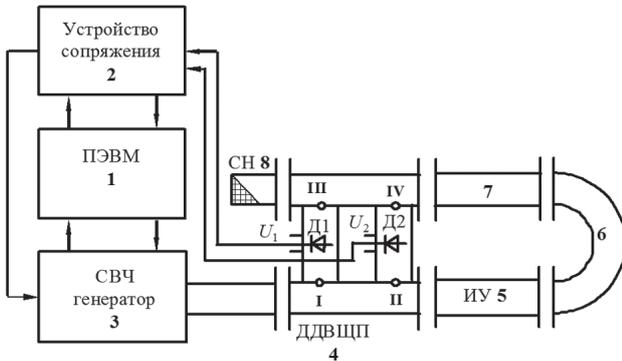


Рис. 3. Функциональная схема измерителя

Двухканальный двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь состоит из двух отрезков прямоугольного волновода, связанных между собой двумя отрезками запердельных волноводов с симметрично расположенными в них СВЧ диодами, которые возбуждаются 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° -го 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.

2.1 Исследование измерителя комплексных параметров в режиме измерения модуля и фазы ККО

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

Рассмотрим работу измерителя 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:

$$\begin{aligned} U_1 &= k_1 E_r^2 \left(1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} \right) \right); \\ U_2 &= k_2 E_r^2 \left(1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos \left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} \right) \right), \end{aligned} \quad (11)$$

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 $k_1 E_r^2$ и $k_2 E_r^2$, которые неизвестны, решение уравнений (11) невозможно. Величины этих множителей можно определить, если провести калибровку измерителя по согласованной нагрузке, для которой $\Gamma = 0$. При этом получим два калибровочных уравнения:

$$U_{1к} = k_1 E_r^2; \quad U_{2к} = k_2 E_r^2. \quad (12)$$

Совместное решение измерительных (11) и калибровочных (12) уравнений позволяет определить модуль и аргумент ККО исследуемого устройства. Разделив U_1 и U_2 на $U_{1к}$ и $U_{2к}$ соответственно, получим:

$$\begin{aligned} \frac{U_1}{U_{1к}} &= 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} \right); \\ \frac{U_2}{U_{2к}} &= 1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos \left(\varphi + \frac{4\pi L}{\lambda_B} \right), \end{aligned} \quad (13)$$

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 ВЩП исследуемого устройства и согласованной нагрузки.

2.2 Исследование измерителя комплексных параметров в режиме измерения модуля и фазы ККП

Сигнал от генератора 3, пройдя через исследуемое устройство 5, поступает в верхний канал ДДВЩП 4. На диоды СВЧ щелями связи, прорезанными в широкой стенке верхнего волновода, ответвляются сигналы пропорциональные амплитуде прошедшей волны. Кроме того, при работе измерителя в данном режиме на диоды датчиков мощности воздействуют еще два СВЧ сигнала: один пропорциональный амплитуде падающей волны, другой — отраженной.

Рассмотрим работу измерителя ККП для идеализированного случая, когда выход генератора идеально согласован.

Выражения для напряжений U_{1T} и U_{2T} , снимаемых с диодов, имеют вид:

$$U_{1T} = k_1 E_r^2 (1 + \Gamma^2 + T^2 + 2\Gamma \cos \varphi + 2T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi)); \quad (14)$$

$$U_{2T} = k_2 E_r^2 (1 + \Gamma^2 + T^2 - 2\Gamma \cos \varphi - 2T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi)), \quad (15)$$

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 (14), (15) и калибровочных (12) уравнений позволяет исключить множители $k_1 E_r^2$ и $k_2 E_r^2$. Измерительные уравнения приобретают вид:

$$\frac{U_{1T}}{U_{1к}} = 1 + \Gamma^2 + T^2 + 2\Gamma \cos \varphi + 2T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi); \quad (16)$$

$$\frac{U_{2T}}{U_{2к}} = 1 + \Gamma^2 + T^2 - 2\Gamma \cos \varphi - 2T \cos \psi + 2\Gamma T \cos(\varphi - \psi). \quad (17)$$

Учитывая (13), имеем

$$\frac{U_1}{U_{1к}} = 1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos \varphi; \quad (18)$$

$$\frac{U_2}{U_{2к}} = 1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos \varphi, \quad (19)$$

где $\frac{U_1}{U_{1к}}$, $\frac{U_2}{U_{2к}}$ — результаты измерений сигналов с датчиков мощности при работе измерителя в режиме измерения ККО, уравнения (16) и (17) с учетом (18) и (19) приобретают вид:

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

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

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, т.е.

$$\left(\frac{U_{1T}}{U_{1к}} - \frac{U_1}{U_{1к}}\right) + \left(\frac{U_{2T}}{U_{2к}} - \frac{U_2}{U_{2к}}\right) = 2T^2 + 4\Gamma T \cos(\varphi - \psi); \quad (20)$$

$$\left(\frac{U_{1T}}{U_{1к}} - \frac{U_1}{U_{1к}}\right) - \left(\frac{U_{2T}}{U_{2к}} - \frac{U_2}{U_{2к}}\right) = 4T \cos \psi. \quad (21)$$

Для сокращения записи введем обозначения левых частей уравнений:

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

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

Константы M и H подставим в уравнения (20) и (21) и проведем их преобразование:

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

$$T \cos \psi = \frac{H}{4}; \quad (22)$$

или

$$M = \frac{H^2}{8} + 2T^2 \sin^2 \psi + H\Gamma \cos \varphi + 4\Gamma T \sin \varphi \sin \psi. \quad (23)$$

Уравнение (23) имеет одну неизвестную величину — $T \sin \psi$. Перепишем это уравнение в виде

$$T^2 \sin^2 \psi + 2\Gamma T \sin \varphi \sin \psi + \frac{H^2}{16} + \frac{H\Gamma \cos \varphi}{2} - \frac{M}{2} = 0.$$

Решение уравнения дает

$$(T \sin \psi)_{1,2} = -\Gamma \sin \varphi \pm \sqrt{\Gamma^2 \sin^2 \varphi - \frac{H^2}{16} + \frac{H\Gamma \cos \varphi}{2} - \frac{M}{2}}. \quad (24)$$

Единственность решения уравнения (24) определяется конкретными значениями найденных параметров: Γ , φ , H , M . Обозначим правую часть равенства (24) символом P , то есть

$$T \sin \psi = P = -\Gamma \sin \varphi \pm \sqrt{\Gamma^2 \sin^2 \varphi - \frac{H^2}{16} + \frac{H\Gamma \cos \varphi}{2} - \frac{M}{2}}. \quad (25)$$

Учитывая (22) и (25), модуль T ККП равен

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

При этом фаза ψ ККП определяется соотношением

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

Таким образом, измеритель, построенный на основе двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя, позволяет измерять не только модуль и фазу ККО, но и модуль, и фазу комплексного коэффициента передачи исследуемого четырехполюсника.

ВЫВОДЫ

В результате приведенных в статье исследований можно сделать следующие выводы:

Предложен и разработан калибруемый двухдетекторный волноводно-щелевой преобразователь интерференционного типа, на основе которого созданы методы построения измерителей основных комплексных параметров микроволновых трактов.

Предложен и исследован метод построения калибруемого измерителя комплексного коэффициента передачи волноводных устройств на основе конструктивно простого двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя. Разработан алгоритм проведения калибровочных операций, позволивший определить по результатам измерения сигналов с датчиков мощности обобщенные собственные константы ВЩП и исключить их влияние на результат измерения модуля и аргумента ККП.

Разработаны и исследованы метод построения калибруемого измерителя комплексных параметров — ККО и ККП — на основе двухканального ВЩП. Предложенная процедура калибровок позволила определить и исключить влияние собственных констант микроволновой части прибора на результат измерения как комплексного коэффициента отражения, так и комплексного коэффициента передачи. Получены аналитические решения систем измерительных и калибровочных уравнений.

Литература

- [1] *Гимпилевич Ю.Б.* Измерение и контроль параметров микроволновых трактов / Ю.Б. Гимпилевич. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2009. — 293 с.
- [2] *Саламатин В.В.* Основы геометрической электродинамики волноводов прямоугольного сечения: учеб. пособие / В.В. Саламатин, И.Л. Афонин, С.Н. Бердышев. — Севастополь: изд-во СевНТУ, 2008. — 220 с.
- [3] *Головка Д.Б.* Основи метрології та вимірювань / Головка Д.Б., Рого К.Г., Скрипник Ю.О. — К.: Либідь, 2001. — 408 с.
- [4] Измерение параметров радиотехнических цепей / Абубакиров Б.А., Гудков К.Г., Нечаев Э.В. и др.; под ред. В.Г. Андрущенко, В.П. Фатеева. — М.: Радио и связь, 1984. — 248 с.
- [5] Микроволновые устройства телекоммуникационных систем / Згуровский М.З., Ильченко М.Е., Кравчук С.А. и др.; под ред. М.Е. Ильченко. — В 2-х томах. — К.: ІВЦ Видавництво Політехніка, 2003. — Т. 1. Распространение радиоволн. Антенны и частотно-избирательные устройства. — 456 с.;

Т. 2. Устройства передающего и приемного трактов. Проектирование устройств и реализация систем. — 616 с.

- [6] Методы измерения характеристик антенн СВЧ / Захарьев Л.Н., Леманский А.А., Турчин В.И. и др.; под ред. Н.М. Цейтлина. — М.: Радио и связь, 1985. — 385 с.
- [7] Микроволновая радиометрия физических и биологических объектов / Скрипник Ю.А., Яненко А.Ф., Манойлов В.Ф. и др.; под ред. Ю.А. Скрипника. — Житомир: Волинь, 2003. — 408 с.
- [8] *Бугаёв П.А.* Измеритель комплексного коэффициента передачи на основе двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя / П.А. Бугаёв, Ф.И. Афонин, И.В. Лашенко, И.Л. Афонин // Академія військово-морських сил імені П.С. Нахімова: зб. наук. пр. — Севастополь: АВМС ім. П.С. Нахімова, 2011. — Вип. 3 (7). — С. 76-82.
- [9] Пат. 99074 Україна, МПК2006.01 G 01 R 27/06. Вимірювач комплексного коефіцієнта передачі / Бугайов П.О., Афонін П.І., Боков Г.В., Лашенко І.В., заявник та патентовласник Севастопольський національний технічний університет. — № а201111330; заявл. 26.09.11; опубл. 10.07.12, Бюл. № 13.
- [10] *Бугаёв П.А.* Измеритель комплексных параметров СВЧ устройств на основе двухканального двухдетекторного волноводно-щелевого преобразователя / П.А. Бугаёв, Ф.И. Афонин, И.В. Лашенко, И.Л. Афонин // Академія військово-морських сил імені П.С. Нахімова: зб. наук. пр. — Севастополь: АВМС ім. П.С. Нахімова, 2011. — Вип. 4 (8). — С. 40-45.

Поступила в редколлегия 04.06.2012

Афонин Игорь Леонидович, профессор, доктор технических наук, профессор кафедры радиотехники и телекоммуникаций Севастопольского национального технического университета. Область научных интересов: судовое оборудование радиосвязи и радионавигации, контроль и диагностика параметров антенно-волноводных систем, радиоизмерительная техника микроволнового диапазона длин волн.



Лашенко Ирина Викторовна, доцент, кандидат технических наук, доцент кафедры радиотехники и телекоммуникаций Севастопольского национального технического университета. Область научных интересов: радиоизмерения в диапазоне СВЧ; радиоэлектронные системы защиты объектов и информации.



Бугаёв Павел Александрович, старший преподаватель кафедры судоводства и безопасности судоводства Севастопольского национального технического университета. Область научных интересов: судовое оборудование радиосвязи и радионавигации, контроль и диагностика параметров судовых антенно-волноводных систем.



УДК 621.372.812

Вимірники комплексних параметрів хвильоводних пристроїв на основі двоканального двохдетекторного хвильоводно-щілинного перетворювача / І.Л. Афонін, І.В. Лашенко, П.О. Бугайов // Прикладна радіоелектроніка: наук.-техн. журнал. – 2012. – Том 11. № 3. – С. 401–407.

Розглядаються вимірники комплексного коефіцієнта відбиття і комплексного коефіцієнта передачі, побудовані на основі двоканального двохдетекторного хвильоводно-щілинного перетворювача. Виключається вплив на результат вимірювання дії власних констант, що заважає, НВЧ частини приладу шляхом проведення запропонованих калібрувальних операцій.

Ключові слова: комплексний коефіцієнт передачі, комплексний коефіцієнт відбиття, двоканальний двохдетекторний хвильоводно-щілинний перетворювач.

Іл. 3. Бібліогр. 12 найм.

UDC 621.372.812

Measuring devices of complex parameters of waveguide devices on the basis of two-channel two-detector slotted waveguide transformer / I.L. Afonin, I.V. Lashenko, P.O. Bugayov // Applied Radio Electronics: Sci. Journ. – 2012. Vol. 11. № 3. – P. 401–407.

The paper examines measuring devices of complex reflectivity and complex transmission coefficient which are built on the basis of a two-channel two-detector slotted waveguide transformer. Influence is eliminated on the result of measuring the mixing effect of own constants of the VHF part of the device by the leadthrough of the offered gauge operations.

Keywords: complex transmittivity, complex reflectivity, two-channel two-detector slotted waveguide transformer.

Fig. 3. Ref. 12 items.