

УДК 621.317.757

СПОСОБ АТТЕСТАЦИИ СОБСТВЕННЫХ S-ПАРАМЕТРОВ АНАЛИЗАТОРА ЦЕПЕЙ СВЧ

Мильченко Д. Н.¹

S-PARAMETERS CERTIFICATION METHODS FOR MICROWAVE NETWORKS ANALYZERS

Milchenko D. N.

S-parameters certification methods of input measurement ports for microwave networks analyzers are considered. In order to increase measurement accuracy of the reflection coefficients of tested devices, S-parameters of networks analyzers are proposed to determine on the base of two series of measurements of short-circuit, open-circuit and matched etalon loads, connected to measurement port under certification once directly and another time through the transmission line with calibrated length.

Keywords: S-parameters, transmission ratio, reflection coefficient, microwave four-terminal network, calculation of parameters.

В [1, 2] показано, что при измерении комплексных коэффициентов модуля и фазы передачи и отражения испытуемых четырёхполосников СВЧ анализаторами цепей должны учитываться собственные S-параметры их измерительных портов, между которыми включается испытуемый четырёхполосник СВЧ.

Основной проблемой измерений комплексных коэффициентов отражения устройств СВЧ являются погрешности, причина которых — неточности измерения и вычисления собственных S-параметров измерительных портов анализаторов цепей СВЧ. Для определения этих S-параметров порты измерителей подвергают режиму аттестации, в процессе которой на основании измерений коэффициентов отражений эталонных нагрузок короткого замыкания (КЗ), холостого хода (ХХ) и согласованной нагрузки (СН), зависимости модуля и фазы которых от частоты известны и занесены в калибровочные таблицы, вычисляют собственные S-параметры аттестуемого порта [2].

Все способы определения собственных S-параметров основаны на использовании известного уравнения, связывающего коэффициенты отражения одной пары полюсов четырёхполосника СВЧ — $\Gamma_{\text{вх}}$ с коэффициен-

тами отражения нагрузки $\Gamma_{\text{н}}$, присоединенной к другой паре полюсов, через собственные S-параметры матрицы рассеяния характеризующей этот четырёхполосник [3]

$$\Gamma_{\text{вх}} = S_{11} + \frac{S_{12}S_{21}\Gamma_{\text{н}}}{1 - S_{22}\Gamma_{\text{н}}}. \quad (1)$$

Здесь S_{11} , S_{22} — коэффициенты отражения входа и выхода четырёхполосника соответственно, S_{12} и S_{21} — его коэффициенты передачи в обоих направлениях. Измеряют три эталонные нагрузки КЗ, ХХ и СН, поочередно присоединяя их к аттестуемому измерительному порту. На основании измеренных коэффициентов отражений эталонных нагрузок КЗ — $\Gamma_{\text{КЗ}}^{\text{и}}$, ХХ — $\Gamma_{\text{ХХ}}^{\text{и}}$, СН — $\Gamma_{\text{СН}}^{\text{и}}$ и этих же значений, взятых из калибровочных таблиц, для нагрузок КЗ — $\Gamma_{\text{КЗ}}^{\text{э}}$, ХХ — $\Gamma_{\text{ХХ}}^{\text{э}}$, СН — $\Gamma_{\text{СН}}^{\text{э}}$, используя формулу (1), составляют систему из трех уравнений, решая которую, получают общие формулы для вычисления собственных S-параметров в виде

$$S_{11} = \left(\Gamma_{\text{ХХ}}^{\text{и}} \Gamma_{\text{КЗ}}^{\text{и}} \Gamma_{\text{СН}}^{\text{э}} (\Gamma_{\text{ХХ}}^{\text{э}} - \Gamma_{\text{КЗ}}^{\text{э}}) - \Gamma_{\text{ХХ}}^{\text{и}} \Gamma_{\text{СН}}^{\text{и}} \Gamma_{\text{КЗ}}^{\text{э}} (\Gamma_{\text{ХХ}}^{\text{э}} - \Gamma_{\text{СН}}^{\text{э}}) - \Gamma_{\text{ХХ}}^{\text{э}} \Gamma_{\text{СН}}^{\text{и}} \Gamma_{\text{КЗ}}^{\text{и}} (\Gamma_{\text{СН}}^{\text{э}} - \Gamma_{\text{КЗ}}^{\text{э}}) \right) N^{-1}, \quad (2)$$

¹Мильченко Дмитрий Николаевич, соискатель Кубанского государственного университета, генеральный директор ОАО «Компания «РИТМ»», г. Краснодар; e-mail: ritm@mail.kuban.ru.

$$S_{12}S_{21} = \left((\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}})(\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{\text{сн}}^{\text{и}}) \times \right. \\ \times (\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{\text{кз}}^{\text{э}})(\Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}} - \Gamma_{\text{кз}}^{\text{э}}) \times \\ \left. \times (\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{\text{кз}}^{\text{и}})(\Gamma_{\text{сн}}^{\text{и}} - \Gamma_{\text{кз}}^{\text{и}}) \right) N^{-1}, \quad (3)$$

$$S_{22} = \left((\Gamma_{\text{сн}}^{\text{и}} - \Gamma_{xx}^{\text{и}})\Gamma_{\text{кз}}^{\text{э}} + (\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{\text{кз}}^{\text{и}})\Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}} - \right. \\ \left. - (\Gamma_{\text{сн}}^{\text{и}} - \Gamma_{\text{кз}}^{\text{и}})\Gamma_{xx}^{\text{э}} \right) N^{-1}, \quad (4)$$

$$N = \Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}}\Gamma_{\text{кз}}^{\text{э}}(\Gamma_{\text{сн}}^{\text{и}} - \Gamma_{\text{кз}}^{\text{и}}) - \\ - \Gamma_{xx}^{\text{э}}\Gamma_{\text{кз}}^{\text{э}}(\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{\text{кз}}^{\text{и}}) + \\ + \Gamma_{xx}^{\text{э}}\Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}}(\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{\text{сн}}^{\text{и}}).$$

В формулу (1) и её модификации параметры S_{12} , S_{21} всегда входят в виде произведения, что позволяет составлять три уравнения. Из формул (2)–(4) видно, что погрешности определения собственных S-параметров зависят только от точности численных величин измеряемых коэффициентов отражения эталонных нагрузок. Отсюда следует, что найденные собственные S-параметры измерительного порта содержат ошибки, связанные с погрешностями определения самих численных величин эталонных нагрузок ХХ и СН, которые, в свою очередь, приводят к погрешностям определения собственных S-параметров в процессе аттестации, а следовательно и к неточности измерения коэффициентов отражения испытуемых устройств СВЧ. Для повышения точности измерений комплексных коэффициентов отражения устройств СВЧ разработана следующая методика, позволяющая учитывать погрешности определения эталонных нагрузок.

Вторую серию измерений коэффициентов отражения эталонных нагрузок КЗ, ХХ и СН проводят, присоединяя их к аттестуемому измерительному порту через линию передачи с волновым сопротивлением, равным сопротивлению порта, калиброванной длины, равной или кратной четверти длины волны на частоте измерений и имеющей коэффициент передачи около единицы — меру волнового сопротивления (МВС).

Используя найденные собственные S-параметры и измеренные совместно с МВС коэффициенты отражений КЗ — $\Gamma_{\text{кз}}^{\text{им}}$, ХХ — $\Gamma_{xx}^{\text{им}}$, СН — $\Gamma_{\text{сн}}^{\text{им}}$, на базе формулы (1) составляют выражения для расчёта коэффициен-

тов отражения каждой из трёх эталонных нагрузок, соединённых вместе с ЭМВ в виде

$$\Gamma_{\text{кз}}^{\text{эм*}} = \frac{\Gamma_{\text{кз}}^{\text{им}} - S_{11}}{S_{22}(\Gamma_{\text{кз}}^{\text{им}} - S_{11}) - S_{12}S_{21}}, \quad (5)$$

$$\Gamma_{xx}^{\text{эм*}} = S_{11}^{\text{ост}} + \frac{S_{12}^{\text{ост}}S_{21}^{\text{ост}}\Gamma_{xx}^{\text{эм*}}M}{1 - S_{22}^{\text{ост}}\Gamma_{xx}^{\text{эм*}}M}, \quad (6)$$

$$\Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм*}} = S_{11}^{\text{ост}} + \frac{S_{12}^{\text{ост}}S_{21}^{\text{ост}}\Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм*}}M}{1 - S_{22}^{\text{ост}}\Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм*}}M}. \quad (7)$$

Знак «*» обозначает, что коэффициенты отражений содержат погрешности калибровки.

Учитывая, что геометрическая длина МВС известна, её комплексный коэффициент передачи — M может быть точно рассчитан в любой точке. На этом основании, используя (2)–(4), получены следующие соотношения:

$$\Gamma_{\text{кз}}^{\text{эм*}} = S'_{11} + \frac{S'_{12}S'_{21}\Gamma_{\text{кз}}^{\text{эм*}}M}{1 - S'_{22}\Gamma_{\text{кз}}^{\text{эм*}}M}, \quad (8)$$

$$\Gamma_{xx}^{\text{эм*}} = S'_{11} + \frac{S'_{12}S'_{21}\Gamma_{xx}^{\text{эм*}}M}{1 - S'_{22}\Gamma_{xx}^{\text{эм*}}M}, \quad (9)$$

$$\Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм*}} = S'_{11} + \frac{S'_{12}S'_{21}\Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм*}}M}{1 - S'_{22}\Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм*}}M}. \quad (10)$$

Если в качестве S-параметров в них использовать величины, найденные по формулам (2)–(4), то выражения (8)–(10) должны обратиться в тождества. Однако, как показывает эксперимент, это не так.

Отсюда следует вывод, что S'_{11} , $S'_{12}S'_{21}$, S'_{22} представляют собой элементы матрицы абсолютных погрешностей, которая гипотетически постоянно присутствует между измерительным портом и любой испытуемой нагрузкой Γ_x при определении её коэффициента отражения, которые называют остаточными $S^{\text{ост}}$ -параметрами. Остаточные $S^{\text{ост}}$ -параметры с целью повышения точности измерений следует вычислить и учесть в виде дополнительных коэффициентов, принимая во внимание их знак, при найденных собственных S-параметрах.

Присутствие остаточных S-параметров можно представить в виде гипотетического четырёхполюсника погрешностей, включенного между собственными параметрами измерительного порта и испытуемым устройством СВЧ с коэффициентом отражения Γ_x в режиме его испытаний «на отражение», который приведен на рис. 1.

Из рис. 1 видно, что собственные S-параметры входного порта измерителя характеристик четырёхполюсников СВЧ есть

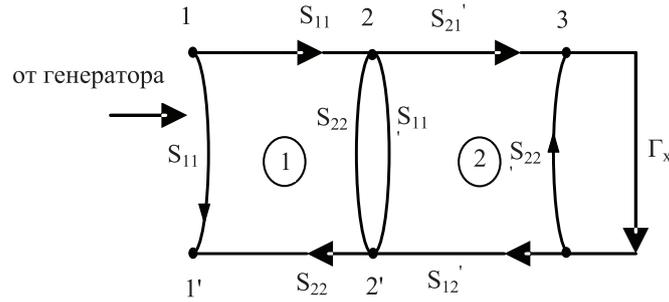


Рис. 1. Граф измерительного порта (1) и матрицы погрешностей (2) остаточных S -параметров, включенный последовательно с испытуемой нагрузкой Γ_x

. 1 — источник испытательного сигнала СВЧ

результат перемножения элементов матрицы собственных S -параметров самого измерительного порта и матрицы элементов остаточных $S^{\text{ост}}$ -параметров. Численные значения самих остаточных $S^{\text{ост}}$ -параметров малоинтересны, главная задача состоит в расчёте с их помощью численных величин истинных значений коэффициентов отражений эталонных нагрузок $XX - \Gamma_{xx}^{\text{э}}$ и согласованной нагрузки $\Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}}$, на основании которых могут быть найдены действительные значения собственных S -параметров любого измерительного порта измерителя характеристик четырёхполюсников СВЧ. При этом коэффициент отражения эталонной нагрузки $K3$ считают идеальным и равным единице.

Основываясь на том, что сами формулы (2)–(4) отражают точные равенства измеренных и измеряемых (эталонных) коэффициентов отражения через собственные S -параметры, единственным источником погрешностей должны быть только неточные знания численных величин коэффициентов отражения самих эталонных нагрузок XX и $СН$. На этом основании из уравнений (8)–(10) получают формулы, для численного расчёта остаточных $S^{\text{ост}}$ -параметров в виде:

$$S_{11}^{\text{ост}} = (\Gamma_{xx}^{\text{эм}} \Gamma_{k3}^{\text{эм}} \Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}} (\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{k3}^{\text{э}}) - \Gamma_{xx}^{\text{эм}} \Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм}} \Gamma_{k3}^{\text{э}} (\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}}) - \Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм}} \Gamma_{k3}^{\text{эм}} \Gamma_{xx}^{\text{э}} (\Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}} - \Gamma_{k3}^{\text{э}})) K^{-1}, \quad (11)$$

$$S_{22}^{\text{ост}} = ((\Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм}} - \Gamma_{xx}^{\text{эм}}) \Gamma_{k3}^{\text{э}} + (\Gamma_{xx}^{\text{эм}} - \Gamma_{k3}^{\text{эм}}) \Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}} - (\Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм}} - \Gamma_{k3}^{\text{эм}}) \Gamma_{xx}^{\text{э}}) (MK)^{-1}, \quad (12)$$

$$S_{12}^{\text{ост}} S_{21}^{\text{ост}} = ((\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм}}) (\Gamma_{xx}^{\text{эм}} - \Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм}}) \times (\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{k3}^{\text{э}}) (\Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}} - \Gamma_{k3}^{\text{э}}) (\Gamma_{xx}^{\text{эм}} - \Gamma_{k3}^{\text{эм}}) \times (\Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм}} - \Gamma_{k3}^{\text{эм}})) (M^2 K^2)^{-1}, \quad (13)$$

$$K = \Gamma_{xx}^{\text{эм}} \Gamma_{xx}^{\text{э}} (\Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}} - \Gamma_{k3}^{\text{э}}) + \Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}} \Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм}} (\Gamma_{k3}^{\text{э}} - \Gamma_{xx}^{\text{э}}) + \Gamma_{k3}^{\text{э}} \Gamma_{k3}^{\text{эм}} (\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}}), \quad (14)$$

В формулах (11)–(13) используют расчётные (истинные) значения комплексных коэффициентов передачи МВС — M , вычисляемые по формуле

$$M = \text{МВС} = 2Al \exp\left(\varphi \frac{F_a}{10^3}\right), \quad (15)$$

где A — потери в МВС за счёт скин-эффекта, определяемые соотношением

$$A = 10 - \frac{0,06 \sqrt{\frac{\Gamma}{180^\circ}}}{20 \text{ дБ}}, \quad (16)$$

где Γ — частота измерений в МГц, φ — сдвиг фаз, вносимый МВС и равный

$$\varphi = \frac{2\pi l}{\lambda}. \quad (17)$$

Здесь l — геометрическая длина волны на частоте измерений F .

При получении формул (8)–(10) считают, что в идеальном случае $\Gamma_{xx}^{\text{э}} M = \Gamma_{xx}^{\text{эм}}$, $\Gamma_{k3}^{\text{э}} M = \Gamma_{k3}^{\text{эм}}$, $\Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}} M = \Gamma_{\text{сн}}^{\text{эм}}$, откуда следует, что $S^{\text{ост}}$ — это параметры, отличающиеся от S -параметров идеального согласованного по входу и выходу четырёхполюсника без потерь (у которого в общем виде S_{11} и S_{22} равны нулю, а произведение $S_{12} S_{21}$ равно единице) на величину погрешностей аттестации, включающую как величину погрешностей калибровки коэффициентов отражения эталонных нагрузок $XX - \Gamma_{xx}^{\text{э}}$, $СН - \Gamma_{\text{сн}}^{\text{э}}$, так и разницу расчётного коэффициента передачи МВС — M реального измеренного M^* .

Знаки «*» при коэффициентах, как и ранее, обозначают, что они содержат погрешности калибровки.

Если бы погрешности калибровки отсутствовали, то $S_{22}^{\text{ост}}$ и $S_{11}^{\text{ост}}$, как указано выше, должны были быть равны нулю, а произведение $S_{12}^{\text{ост}} \cdot S_{21}^{\text{ост}}$ — единице.

С учётом этого в формулы (5)–(7) вместо S_{11} , S_{22} , $S_{12}S_{21}$ подставляют их общие выражения (2)–(4) — без погрешностей калибровки и получают общие уравнения для расчёта Γ_{xx} , Γ_{kz} , Γ_{ch} :

$$\Gamma_{kz}^{\text{эм}} = -\frac{\Delta_{11}}{\Delta_{12}}, \quad (18)$$

$$\Gamma_{xx}^{\text{эм}} = -\frac{\Delta_{21}}{\Delta_{22}}, \quad (19)$$

$$\Gamma_{ch}^{\text{эм}} = -\frac{\Delta_{31}}{\Delta_{32}}. \quad (20)$$

При этом

$$\Delta_{11} = B(\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{kz}^{\text{им}}) + C(\Gamma_{ch}^{\text{и}} - \Gamma_{kz}^{\text{им}}) + A(\Gamma_{kz}^{\text{и}} - \Gamma_{kz}^{\text{им}}),$$

$$\Delta_{12} = D(\Gamma_{kz}^{\text{и}} - \Gamma_{kz}^{\text{им}}) + E(\Gamma_{ch}^{\text{и}} - \Gamma_{kz}^{\text{им}}) + F(\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{kz}^{\text{им}}),$$

$$\Delta_{21} = A(\Gamma_{xx}^{\text{им}} - \Gamma_{kz}^{\text{и}}) + B(\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{xx}^{\text{им}}) + C(\Gamma_{ch}^{\text{и}} - \Gamma_{xx}^{\text{им}}),$$

$$\Delta_{22} = F(\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{xx}^{\text{им}}) + E(\Gamma_{ch}^{\text{и}} - \Gamma_{xx}^{\text{им}}) + D(\Gamma_{kz}^{\text{и}} - \Gamma_{xx}^{\text{им}}),$$

$$\Delta_{31} = A(\Gamma_{ch}^{\text{им}} - \Gamma_{kz}^{\text{и}}) + B(\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{ch}^{\text{им}}) + C(\Gamma_{ch}^{\text{и}} - \Gamma_{ch}^{\text{им}}),$$

$$\Delta_{32} = F(\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{ch}^{\text{им}}) + E(\Gamma_{ch}^{\text{и}} - \Gamma_{ch}^{\text{им}}) + D(\Gamma_{kz}^{\text{и}} - \Gamma_{ch}^{\text{им}}),$$

$$A = \Gamma_{ch}^{\text{э}} \Gamma_{xx}^{\text{э}} (\Gamma_{ch}^{\text{и}} - \Gamma_{xx}^{\text{и}}),$$

$$B = \Gamma_{ch}^{\text{э}} \Gamma_{kz}^{\text{э}} (\Gamma_{ch}^{\text{и}} - \Gamma_{kz}^{\text{и}}),$$

$$C = \Gamma_{xx}^{\text{э}} \Gamma_{kz}^{\text{э}} (\Gamma_{kz}^{\text{и}} - \Gamma_{xx}^{\text{и}}),$$

$$D = \Gamma_{kz}^{\text{э}} (\Gamma_{xx}^{\text{и}} - \Gamma_{ch}^{\text{и}}),$$

$$E = \Gamma_{ch}^{\text{э}} (\Gamma_{kz}^{\text{и}} - \Gamma_{xx}^{\text{и}}),$$

$$F = \Gamma_{xx}^{\text{э}} (\Gamma_{ch}^{\text{и}} - \Gamma_{kz}^{\text{и}}).$$

Из (11)–(13) $S_{11}^{\text{ост}} = S_{22}^{\text{ост}} = 0$, а $S_{12}^{\text{ост}} S_{21}^{\text{ост}} = 1$, что эквивалентно минимизации погрешности калибровки. При этом присутствующие коэффициенты отражений $\Gamma_{ch}^{\text{эм}}$, $\Gamma_{xx}^{\text{эм}}$, $\Gamma_{kz}^{\text{эм}}$ находят из уравнений (18)–(20), в результате чего получают системы уравнений:

$$0 = (\Gamma_{xx}^{\text{эм}} \Gamma_{kz}^{\text{эм}} \Gamma_{ch}^{\text{э}} (\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{kz}^{\text{э}}) - \Gamma_{xx}^{\text{эм}} \Gamma_{ch}^{\text{эм}} \Gamma_{kz}^{\text{э}} (\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{ch}^{\text{э}}) - \Gamma_{ch}^{\text{эм}} \Gamma_{kz}^{\text{эм}} \Gamma_{xx}^{\text{э}} (\Gamma_{ch}^{\text{э}} - \Gamma_{kz}^{\text{э}})) K^{-1}, \quad (21)$$

$$1 = (\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{ch}^{\text{эм}}) (\Gamma_{xx}^{\text{эм}} - \Gamma_{ch}^{\text{эм}}) \times (\Gamma_{xx}^{\text{э}} - \Gamma_{kz}^{\text{э}}) (\Gamma_{ch}^{\text{э}} - \Gamma_{kz}^{\text{э}}) \times (\Gamma_{xx}^{\text{эм}} - \Gamma_{kz}^{\text{эм}}) (\Gamma_{ch}^{\text{эм}} - \Gamma_{kz}^{\text{эм}}) M^{-2} K^{-2}, \quad (22)$$

$$0 = (\Gamma_{ch}^{\text{эм}} - \Gamma_{xx}^{\text{эм}}) \Gamma_{kz}^{\text{э}} + (\Gamma_{xx}^{\text{эм}} - \Gamma_{kz}^{\text{эм}}) \Gamma_{ch}^{\text{э}} - (\Gamma_{ch}^{\text{эм}} - \Gamma_{kz}^{\text{эм}}) \Gamma_{xx}^{\text{э}} (MK)^{-1}. \quad (23)$$

Если решить эту систему аналитически относительно трёх неизвестных $\Gamma_{ch}^{\text{э}}$, $\Gamma_{xx}^{\text{э}}$ и M — истинных значений коэффициентов отражения нагрузок холостого хода, согласованной нагрузки и истинной величины коэффициента передачи МВС — M , получим двадцать четыре набора решений, для каждой частотной точки измерений. Только единственный вариант из них содержит действительные значения искомых коэффициентов $\Gamma_{ch}^{\text{э}}$, $\Gamma_{xx}^{\text{э}}$ и M . С целью сокращения таких расчётов численными методами значения $\Gamma_{ch}^{\text{э}}$, $\Gamma_{xx}^{\text{э}}$ — ищут в окрестностях их эталонных значений, взятых из калибровочных таблиц, и расчётных величин модулей и сдвигов фаз МВС, найденных теоретически.

В зависимости от ширины рабочего диапазона частот конкретного измерителя характеристик четырёхполосников СВЧ и количества частотных точек калибровки все вышеизложенные вычисления, например, для диапазона от 1 до 40 ГГц необходимо проводить в 1700 точках. В результате таких вычислений получают величины истинных значений коэффициентов отражений эталонных нагрузок холостого хода, согласованной нагрузки и коэффициента передачи от частоты. Однако в этих вычислениях присутствуют погрешности, связанные с переходом фазы сигнала на частоте измерений через ноль. При этом сравнение рассчитываемых величин проводят по амплитуде и фазе отдельно. Вид этих характеристик приведён на рис. 2 и 3.

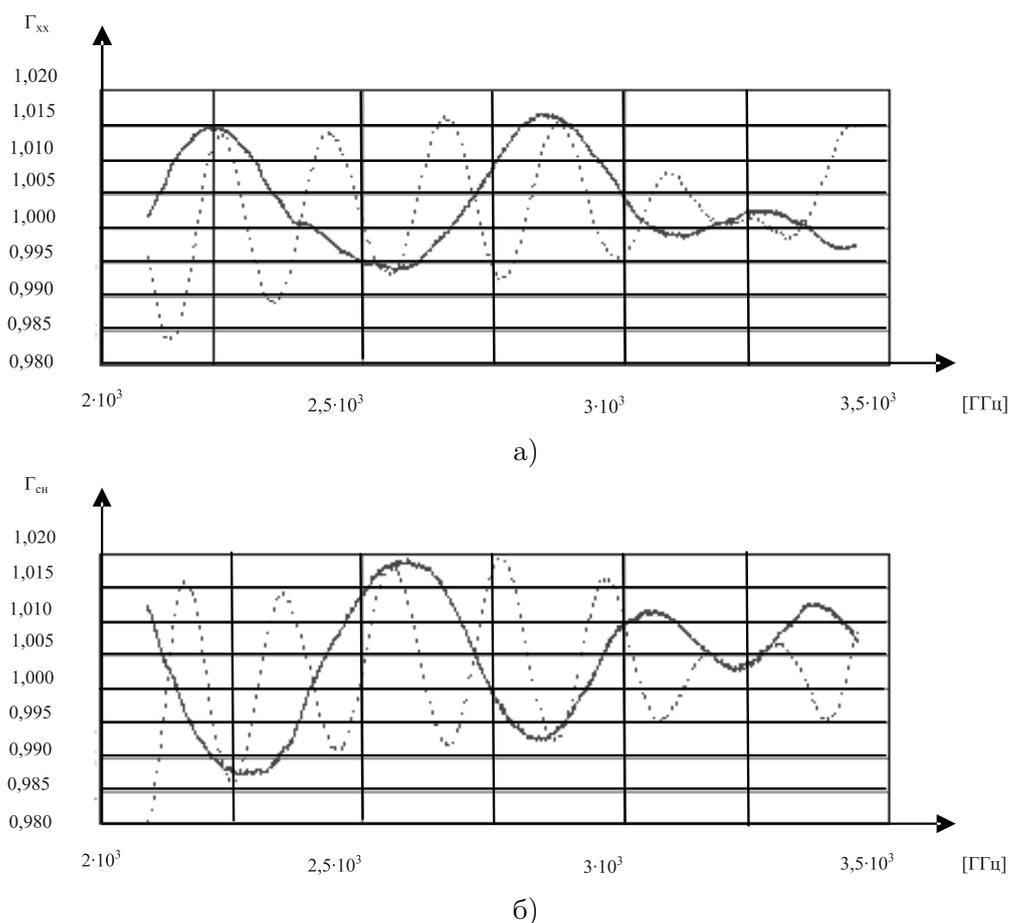


Рис. 2. Зависимости коэффициентов отражения от частоты:
а) для нагрузки ХХ б) для нагрузки СН

Как видно из рис. 2 и 3, предлагаемая коррекция модулей коэффициентов отражения эталонных нагрузок ХХ и СН (сплошная линия на рисунках) позволяет достичь отличия их истинных значений от идеальных на уровнях «минус 55 дБ» – «минус 60 дБ» и погрешностей фазовых сдвигов не превышающих 3° – 5° . Резкие выбросы на характеристиках соответствуют точкам разрыва, наблюдаемым на тех частотах, где геометрическая длина МВС точно равна четверти длины волны испытательного сигнала СВЧ. Отсюда следует, что измерив достаточно точно частоту и соответствующую ей длину волны в точке разрыва, можно практически точно вычислить геометрическую длину применяемой МВС, необходимую для расчёта фазовых сдвигов на разных частотах.

В связи с тем, что электрическая длина МВС содержит несколько полных периодов длин волн в рабочем диапазоне измерителя характеристик четырёхполюсников СВЧ, амплитудные зависимости имеют разрывы

функций в нескольких точках, когда электрическая длина МВС относительно длины волны становится равной $\lambda/2$, где λ – длина волны на частоте измерений. Вместе с тем, известно, что амплитудно-частотные зависимости коэффициентов отражения эталонных нагрузок холостого хода и согласованной нагрузки описываются гладкими функциями.

Поэтому выбирают значения коэффициентов отражений эталонных нагрузок в окрестности частот, для которых электрическая длина МВС кратна четверти длины волны, исключая точки разрыва, где электрическая длина МВС кратна $\lambda/2$. По выбранным значениям аппроксимируют амплитудно-частотные зависимости модулей коэффициентов отражения каждой их эталонных нагрузок ХХ и СН. Подобным же способом, но учитывая периодичность фазы, аппроксимируют и фазочастотные зависимости. Таким способом получают окончательные значения истинных величин модуля и фазы коэффициентов отражений эта-

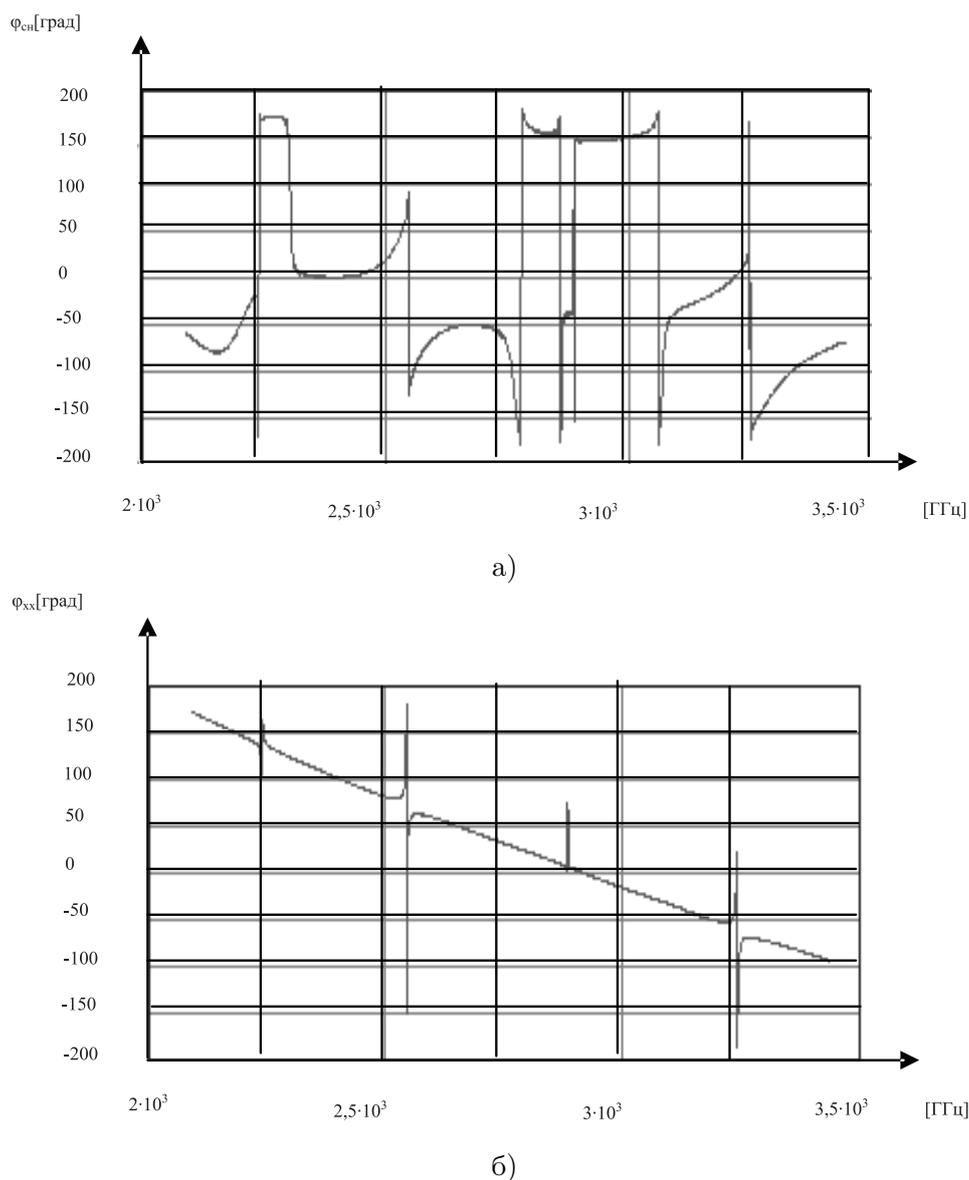


Рис. 3. Зависимости фазы коэффициентов отражения от частоты: а) для нагрузки ХХ б) для нагрузки СН

лонных нагрузок ХХ и СН в каждой частотной точке калибровки измерителя характеристик четырёхполюсников СВЧ. Эти окончательные значения истинных величин модуля и фазы коэффициентов отражения эталонных нагрузок вместе с вычисленной истинной величиной комплексного коэффициента отражения нагрузки КЗ используют в формулах (2)–(4) для вычисления истинных собственных S -параметров в каждой частотной точке аттестуемого измерительного порта измерителя характеристик четырёхполюсников СВЧ, которые затем используют при измерениях испытуемых четырёхполюс-

ников СВЧ. Всю матобработку проводят с использованием программы Mathcad-140.

При измерениях «на проход» найденные собственные S -параметры измерительных портов могут автоматически использоваться при математической обработке результатов измерений, что исключает необходимость начальной калибровки анализатора цепей СВЧ.

Предлагаемая методика прошла апробацию и успешно применяется в контроллере «Измерителя комплексных коэффициентов передачи и отражения (S -параметров)» РК4-46.

Литература

1. *Абубакиров Б. А., Гудков К. Г., Нечаев Э. В.* Измерение параметров радиотехнических цепей. М.: Радио и связь, 1984. 248 с.
2. *Гатченко М. А., Коротков К. С., Левченко А. С., Мильченко Д. Н.* Особенности измерения S-параметров с помощью рефлектометров в диапазоне СВЧ // Экологический вестник научных центров Черноморского экономического сотрудничества. 2010. № 3. С. 21–24.
3. *Фельдштейн А. Л., Явич Л. Р., Смирнов В. П.* Справочник по элементам волноводной техники. М.: Советское радио, 1967. 651 с.
4. *Силаев М. А., Брянцев Е. Ф.* Приложение матриц и графов к анализу СВЧ устройств. М.: Советское радио, 1970. 248 с.

Ключевые слова: S-параметры, коэффициент передачи, коэффициент отражения, четырёхполюсники СВЧ, расчёт параметров.

Статья поступила 8 сентября 2011 г.
Кубанский государственный университет, г. Краснодар
ОАО «Компания «РИТМ»»
© Мильченко Д. Н., 2012