

УДК 621.317

АВТОМАТИЗАЦИЯ ПРОЦЕДУРЫ ОПРЕДЕЛЕНИЯ КОМПЛЕКСНЫХ ПАРАМЕТРОВ МИКРОВОЛНОВЫХ УСТРОЙСТВ НА ОСНОВЕ КВАДРАТУРНОГО СПОСОБА ИЗМЕРЕНИЯ

Ю. Б. Гимпилевич, С. Е. Зебек

Севастопольский государственный университет,
299053, Севастополь, ул. Университетская, 33

Статья поступила в редакцию 21 июля 2019 г.

Аннотация. Предложена новая структура автоматического измерителя комплексных параметров микроволновых двухполюсников на основе квадратурного способа измерения. Измеритель построен на основе двух квадратурных детекторов с инвариантными входами. Разработана математическая модель измерительной процедуры, которая представляет собой избыточную систему нелинейных измерительных уравнений. Предложен алгоритм аналитического решения системы измерительных уравнений и получены формулы для точного определения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения и уровня падающей мощности в СВЧ тракте. Показана целесообразность использования численного решения системы нелинейных измерительных уравнений, которое обеспечивает минимизацию среднеквадратической ошибки в случае наличия невязок в этой системе, порождаемых погрешностями измерительной процедуры.

Ключевые слова: квадратурный метод измерения, комплексный коэффициент отражения, амплитудное распределения поля, фазовое распределение поля, квадратурный детектор.

Abstract. A new structure for an automatic meter of complex parameters of microwave two-terminal networks based on a quadrature measurement method is proposed. The meter is designed on the basis of two quadrature detectors with invariant inputs. A mathematical model of a measurement procedure as a redundant system of nonlinear measurement equations is developed. An algorithm for analytic solution of the system of measuring equations is proposed. Formulas for the exact

determination of the modulus and argument of the complex reflection coefficient and the incident power level in a microwave path are obtained. An applicability of the numerical solution of the nonlinear measuring equations system is shown for minimization of a square error in case of residuals, which present in the system because of the errors of the measurement procedure.

Key words: the quadrature measurement method, the complex reflection coefficient, amplitude field distribution, phase field distribution, quadrature detector.

Введение

В практике СВЧ измерений широкое распространение получил метод, основанный на анализе амплитудного распределения поля в линии передачи [1, 2]. При этом амплитудное распределение поля получают путем квадратичного амплитудного детектирования СВЧ сигналов, ответвляемых из линии передачи с помощью ненаправленных зондов. Недостаток этого метода связан с малым динамическим диапазоном (порядка 40 дБ) квадратичного участка вольт - амперной характеристики СВЧ диодов, применяемых для амплитудного детектирования [3]. Это приводит к существенным погрешностям при измерении больших значений КСВН и невозможности использования измерителя в условиях, при которых мощность СВЧ генератора может изменяться в широких пределах, например, при встроенном контроле параметров СВЧ трактов радиоэлектронных систем.

Значительно лучшими характеристиками обладает предложенный авторами этой статьи квадратурный способ измерения комплексных параметров микроволновых устройств, основанный на одновременном анализе как амплитудного, так и фазового распределений электромагнитного поля в линии передачи с помощью ненаправленных зондов [4-6]. Способ реализуется путем использования квадратурного детектирования ответвляемых сигналов, что обеспечивает возможность проведения измерений в динамическом диапазоне порядка 70 дБ. Реализация этого способа позволяет также повысить точность измерений за счет возникающей избыточности путем усреднения

результатов. Автоматизация измерительной процедуры при использовании этого способа может быть осуществлена, в частности, путем применения многозондовой измерительной линии [1-2]. В работе [7] авторами этой статьи рассмотрена возможность автоматизации квадратурного способа измерения на основе четырехзондовой измерительной линии. Структурная схема предложенного в этой работе автоматического измерителя комплексного коэффициента отражения (ККО) микроволнового двухполюсника представлена на рис. 1.

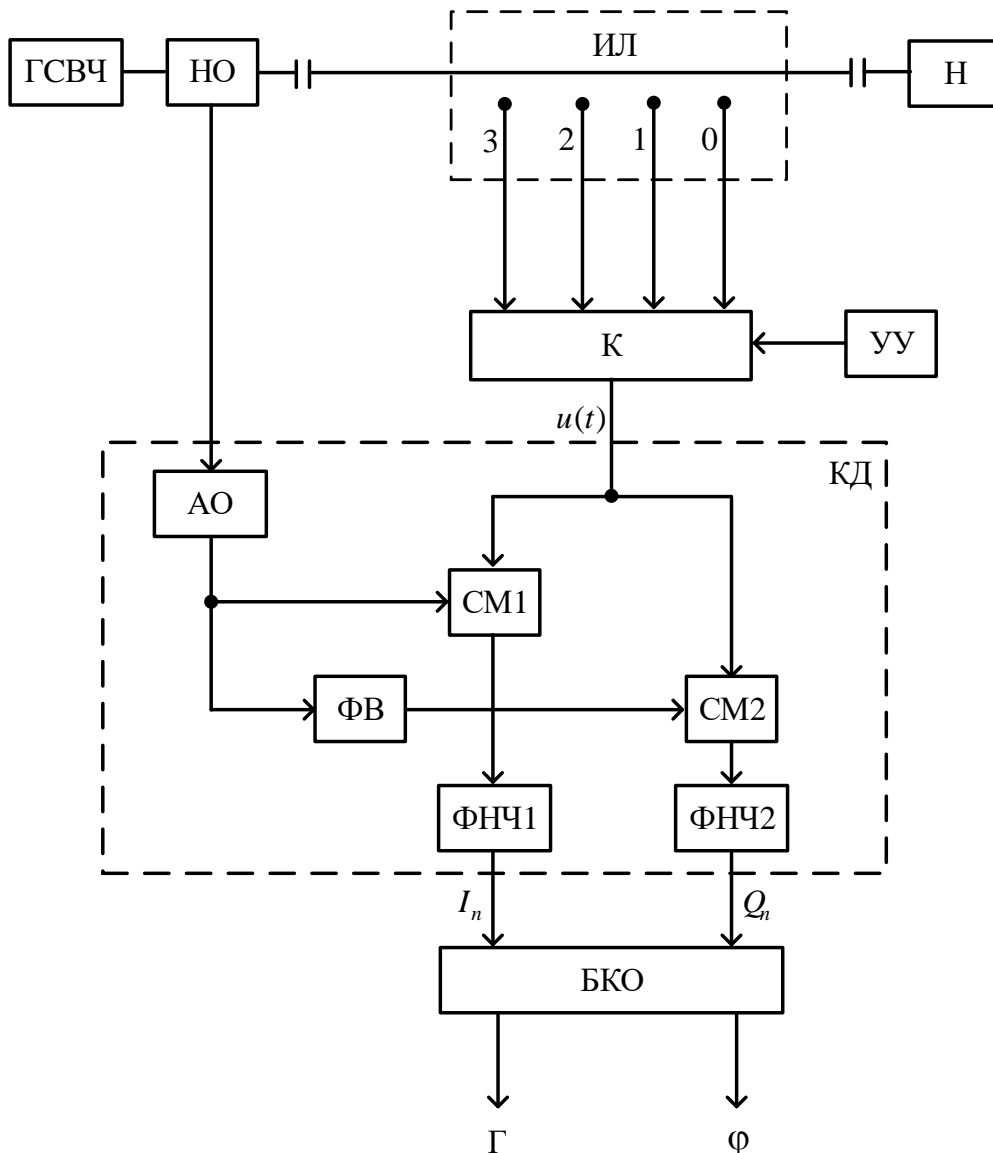


Рис. 1. Автоматический измеритель комплексного коэффициента отражения.

Колебание от СВЧ генератора (ГСВЧ) поступает в нагрузку (Н), ККО которой необходимо измерить. В СВЧ тракт между генератором ГСВЧ и нагрузкой Н встроена четырехзондовая измерительная линия (ИЛ). Расстояние

между зондами выбрано равным $\lambda/8$ (λ — длина волны в линии передачи). СВЧ сигналы, частоты которых равны ω_0 , с зондов ИЛ поступают на входы четырехканального СВЧ коммутатора (К). Устройство управления (УУ) обеспечивает поочередное подключение ответвленных из линии передачи сигналов на выход СВЧ коммутатора К.

Напряжение $u(t)$ с выхода СВЧ коммутатора К подается на первые входы двух смесителей (СМ1 и СМ2), на вторые входы которых через амплитудный ограничитель (АО) поступает опорное колебание постоянной амплитуды с той же частотой ω_0 . Опорное колебание получают с помощью направленного ответвителя (НО). При этом в спектре тока смесителей СМ1 и СМ2 появляются комбинационные составляющие нулевой частоты, то есть обеспечивается прямое преобразование частоты. Причем подаваемый на смеситель СМ2 опорный сигнал сдвигается по фазе относительно опорного сигнала, подаваемого на смеситель СМ1, на величину 90° с помощью фазовращателя (ФВ). Это обеспечивает квадратурное детектирование ответвленных сигналов. Фазовращатель ФВ, смесители СМ1 и СМ2, фильтры ФНЧ1 и ФНЧ2 образуют так называемый квадратурный детектор (КД), который может быть реализован на основе одной интегральной схемы [8]. При поочередном переключении СВЧ коммутатора К на выходах фильтров нижних частот ФНЧ1 и ФНЧ2 получаем четыре пары квадратурных составляющих I_n и Q_n , где $n=0,1,2,3$ — номер зонда. Составляющие I_n и Q_n поступают в блок квадратурной обработки (БКО), в котором рассчитываются амплитуды и начальные фазы ответвленных сигналов в четырех сечениях линии передачи. Далее по полученным в работе [7] формулам в БКО осуществляется расчет оценок модуля Γ и аргумента φ ККО измеряемой нагрузки Н, исходя как из амплитудного, так и фазового распределений электромагнитного поля в линии передачи. На последнем этапе осуществляется усреднения этих оценок.

Из рис. 1 следует, что рассмотренный вариант автоматизации измерительной процедуры обладает рядом недостатков, связанных с

необходимостью применения СВЧ коммутатора К, устройства управления УУ и направленного ответвителя НО. Применение этих узлов существенно увеличивает габариты, массу и стоимость СВЧ части измерителя, а также усложняет процедуру калибровки. Кроме того, из-за неидеальной развязки каналов СВЧ коммутатора возникает дополнительная погрешность измерения. Целью данной статьи является устранение этих недостатков.

1. Автоматизация на основе двух квадратурных детекторов

Ниже рассматривается вариант автоматизации измерительной процедуры, лишенный указанных недостатков. Структурная схема предлагаемой измерительной установки, реализующей этот вариант автоматизации, представлена на рис. 2.

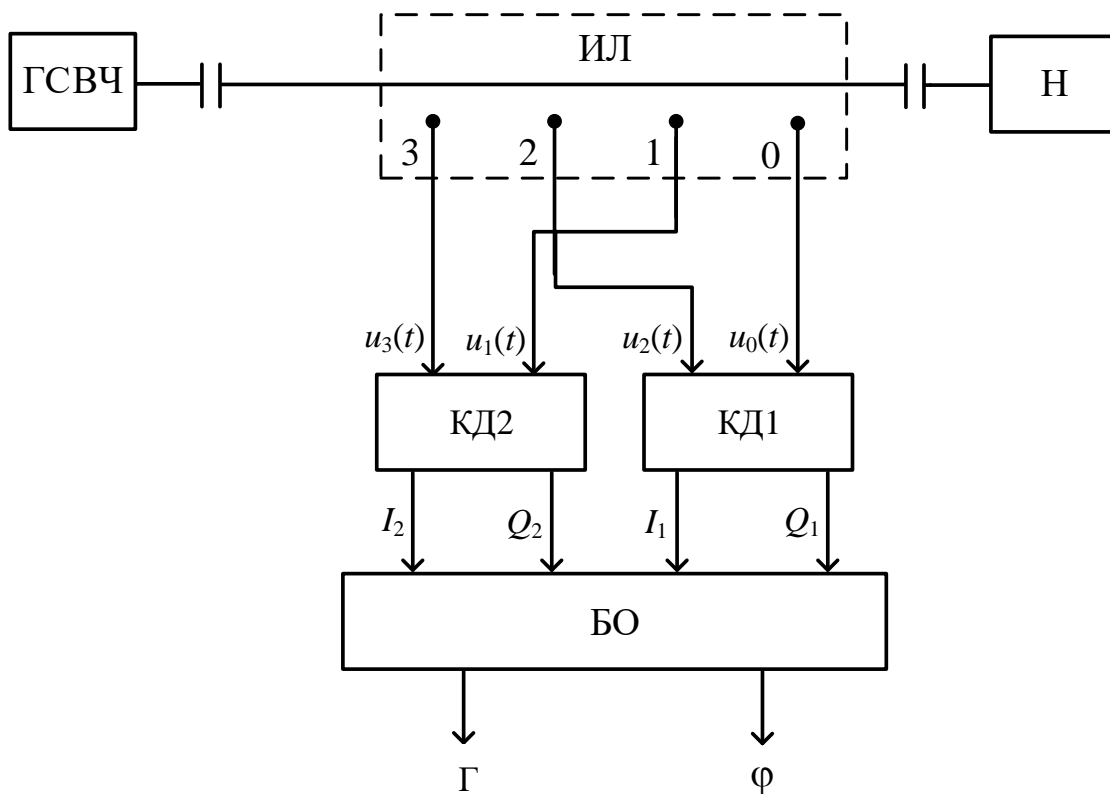


Рис. 2. Автоматический измеритель ККО на основе двух квадратурных детекторов.

В предлагаемой структурной схеме на рис. 2 (в отличие от структурной схемы на рис. 1) отсутствуют СВЧ коммутатор, устройство управления и направленный ответвитель. При этом в предлагаемой структурной схеме

используется не один, а два квадратурных детектора КД1 и КД2. Существенным отличием принципа действия предлагаемого автоматического измерителя является то, что из-за исключения направленного ответвителя вместо опорного сигнала постоянной амплитуды предложено использовать сигналы, ответвляемые зондами измерительной линии ИЛ. При этом на первые входы смесителей квадратурных детектора КД1 и КД2 подаются СВЧ сигналы с первого и третьего зондов соответственно, а на вторые входы — со второго и четвертого зондов соответственно. Поскольку амплитуды и начальные фазы ответвленных сигналов не постоянны, а зависят от измеряемых параметров и могут изменяться в широких пределах, то это требует применения квадратурных детекторов КД1 и КД2 с инвариантными (равнозначными) входами, что достигается исключением из схем этих детекторов амплитудных ограничителей АО. При этом на выходе квадратурных детекторов получаем две пары составляющих I_1, Q_1 и I_2, Q_2 , которые связаны как с амплитудным, так и с фазовым распределением поля в линии передачи и несут информацию о модуле и аргументе комплексного коэффициента отражения измеряемой нагрузки N . Составляющие I_1, Q_1 и I_2, Q_2 , поступают в блок обработки БО, в котором осуществляется расчет оценок модуля и аргумента ККО нагрузки N .

2. Разработка математической модели

В связи с существенным отличием предложенного способа формирования составляющих I_1, Q_1 и I_2, Q_2 от известного, проведем разработку математической модели новой процедуры автоматического измерения, которая реализуется схемой, представленной на рис. 2. При этом будем считать, что СВЧ генератор ГСВЧ согласован с линией передачи, зонды идентичны и не влияют на процессы в линии передачи. Эти ограничения не являются принципиальными при рассмотрении принципа действия измерителя. В этом случае напряжения $u_0(t) — u_3(t)$ на выходах четырех ненаправленных зондов можно записать в следующем виде [7]:

$$\begin{aligned}
 u_0(t) &= K_1 E_n \sqrt{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \cos\varphi} \cdot \cos(\omega_0 t + \psi_0); \\
 u_1(t) &= K_1 E_n \sqrt{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \sin\varphi} \cdot \cos(\omega_0 t + \psi_1); \\
 u_2(t) &= K_1 E_n \sqrt{1 + \Gamma^2 - 2\Gamma \cos\varphi} \cdot \cos(\omega_0 t + \psi_2); \\
 u_3(t) &= K_1 E_n \sqrt{1 + \Gamma^2 + 2\Gamma \sin\varphi} \cdot \cos(\omega_0 t + \psi_3),
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

где K_1 — коэффициент передачи ненаправленного зонда; E_n — амплитуда падающей волны; Γ — модуль ККО нагрузки Н; φ — аргумент ККО нагрузки Н; ω_0 — круговая частота микроволнового колебания; t — текущее время; $\psi_0 \dots \psi_3$ — начальные фазы ответвляемых сигналов относительно плоскости подключения нагрузки Н.

Используя формулу, полученную в [4], и, учитывая, что расстояния между ближайшими зондами равно $\lambda/8$, запишем выражения для начальных фаз $\psi_0 \dots \psi_3$ ответвляемых СВЧ сигналов в следующем виде:

$$\left\{ \begin{aligned}
 \psi_0 &= \varphi_0 - \operatorname{arctg} \frac{\Gamma \sin(\varphi_0 - \varphi)}{1 + \Gamma \cos(\varphi_0 - \varphi)} ; \\
 \psi_1 &= \varphi_0 + \pi/4 - \operatorname{arctg} \frac{\Gamma \cos(\varphi_0 - \varphi)}{1 - \Gamma \sin(\varphi_0 - \varphi)} ; \\
 \psi_2 &= \varphi_0 + \pi/2 + \operatorname{arctg} \frac{\Gamma \sin(\varphi_0 - \varphi)}{1 - \Gamma \cos(\varphi_0 - \varphi)} ; \\
 \psi_3 &= \varphi_0 + 3\pi/4 + \operatorname{arctg} \frac{\Gamma \cos(\varphi_0 - \varphi)}{1 + \Gamma \sin(\varphi_0 - \varphi)} ,
 \end{aligned} \right.
 \tag{2}$$

где φ_0 — удвоенный набег фазы от плоскости подключения нагрузки до плоскости подключения первого зонда, который не зависит от параметров измеряемой нагрузки Н и определяется при калибровке измерителя.

При этом на выходах квадратурных демодуляторов КД1 и КД2 формируются квадратурные составляющие, которые с учетом [9, 10] можно записать в виде:

$$\left\{ \begin{array}{l} I_1 = K_2 \sqrt{(1 + \Gamma^2)^2 - 4\Gamma^2 \cos^2 \varphi} \cos \left[\operatorname{arctg} \frac{2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_0)}{1 - \Gamma^2} \right]; \\ Q_1 = K_2 \sqrt{(1 + \Gamma^2)^2 - 4\Gamma^2 \cos^2 \varphi} \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_0)}{1 - \Gamma^2} \right]; \\ I_2 = K_2 \sqrt{(1 + \Gamma^2)^2 - 4\Gamma^2 \sin^2 \varphi} \cos \left[\operatorname{arctg} \frac{2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_0)}{1 - \Gamma^2} \right]; \\ Q_2 = K_2 \sqrt{(1 + \Gamma^2)^2 - 4\Gamma^2 \sin^2 \varphi} \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_0)}{1 - \Gamma^2} \right], \end{array} \right. \quad (3)$$

где $K_2 = K_1^2 K_{\text{кд}} E_{\text{п}}^2$ — величина, прямо пропорциональная уровню мощности в линии передачи, которая в дальнейшем рассматривается как неизвестная переменная, поскольку уровень мощности в линии передач может существенно изменяться; $K_{\text{кд}}$ — коэффициент преобразования квадратурного демодулятора.

Система измерительных уравнений (3) является нелинейной (трансцендентной) относительно модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения. Для данной системы возможно, как аналитическое, так и численное решение относительно искомых параметров.

3. Аналитическое решение системы измерительных уравнений

С целью нахождения аналитического решения системы измерительных уравнений (3), преобразуем её к виду:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{Q_1}{I_1} = \frac{2\Gamma \sin(\varphi + \varphi_0)}{1 - \Gamma^2}; \\ I_1^2 + Q_1^2 = K_2^2 [(1 + \Gamma^2)^2 - 4\Gamma^2 \cos^2(\varphi + \varphi_0)]; \\ \frac{Q_2}{I_2} = \frac{2\Gamma \cos(\varphi + \varphi_0)}{1 - \Gamma^2}; \\ I_2^2 + Q_2^2 = K_2^2 [(1 + \Gamma^2)^2 - 4\Gamma^2 \sin^2(\varphi + \varphi_0)]. \end{array} \right. \quad (4)$$

Введем новые переменные X и Y , которые представляют собой действительную и мнимую части ККО нагрузки в плоскости подключения первого зонда [11]:

$$X = \Gamma \cos(\varphi + \varphi_0); \quad (5)$$

$$Y = \Gamma \sin(\varphi + \varphi_0). \quad (6)$$

При этом учтем очевидное равенство, вытекающее из (5) и (6):

$$\Gamma^2 = X^2 + Y^2 \quad (7)$$

В результате замены переменных в (4) в соответствии с (5) — (7) приходим к следующей системе уравнений:

$$\begin{cases} \frac{Q_1}{I_1} = \frac{2Y}{1 - (X^2 + Y^2)} ; \\ I_1^2 + Q_1^2 = K_2^2 \left[(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4(X^2 + Y^2) \cos^2(\varphi + \varphi_0) \right] ; \\ \frac{Q_2}{I_2} = \frac{2X}{1 - (X^2 + Y^2)} ; \\ I_2^2 + Q_2^2 = K_2^2 \left[(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4(X^2 + Y^2) \sin^2(\varphi + \varphi_0) \right] . \end{cases} \quad (8)$$

Система уравнений (8) состоит из четырех трансцендентных уравнений с тремя неизвестными (X , Y и K_2), то есть обладает избыточностью. Чтобы решить эту систему уравнений относительно X , Y и K_2 поступим следующим образом. Разделим первое уравнение системы (8) на третье уравнение этой же системы. В результате получим

$$\frac{Q_1/I_1}{Q_2/I_2} = \frac{Y}{X}. \quad (9)$$

Выразим из (9) неизвестное Y

$$Y = X \frac{Q_1/I_1}{Q_2/I_2}. \quad (10)$$

Подставляя (10) в третье уравнение системы (8), получаем

$$\frac{Q_2}{I_2} = \frac{2X}{1 - X^2 \left[1 + \left(\frac{Q_1/I_1}{Q_2/I_2} \right)^2 \right]}. \quad (11)$$

Преобразовав (11), приходим к следующему квадратному уравнению относительно переменной X :

$$X^2 + \frac{2(Q_2/I_2)}{(Q_1/I_1)^2 + (Q_2/I_2)^2} X - \frac{(Q_2/I_2)^2}{(Q_1/I_1)^2 + (Q_2/I_2)^2} = 0 \quad (12)$$

Решая это уравнение относительно X , получаем следующие значения корня, имеющее физический смысл

$$X = \frac{(Q_2/I_2) \left(\sqrt{1 + (Q_1/I_1)^2 + (Q_2/I_2)^2} - 1 \right)}{(Q_1/I_1)^2 + (Q_2/I_2)^2}. \quad (13)$$

Подставляя (13) в (10) находим Y по формуле

$$Y = \frac{(Q_1/I_1) \left(\sqrt{1 + (Q_1/I_1)^2 + (Q_2/I_2)^2} - 1 \right)}{(Q_1/I_1)^2 + (Q_2/I_2)^2}. \quad (14)$$

Зная X и Y , определим модуль и аргумент ККО нагрузки по очевидным формулам, вытекающим из соотношений (5) — (7) [12]:

$$\Gamma = \sqrt{X^2 + Y^2}; \quad (15)$$

$$\varphi = \text{angle}(X, Y) - \varphi_0, \quad (16)$$

где символом angle обозначена операция определения аргумента комплексного числа по известным действительной (X) и мнимой (Y) частям в диапазоне от 0 до 2π .

Для того, чтобы найти третье неизвестное K_2 , которое часто необходимо знать для осуществления контроля уровня мощности в СВЧ тракте, просуммируем второе и четвертое уравнения системы (8). В результате получаем

$$I_1^2 + Q_1^2 + I_2^2 + Q_2^2 = 2K_2^2 [1 + (X^2 + Y^2)^2]. \quad (17)$$

Решая (17) относительно K_2 получаем

$$K_2 = \sqrt{\frac{I_1^2 + Q_1^2 + I_2^2 + Q_2^2}{2 [1 + (X^2 + Y^2)^2]}}. \quad (18)$$

Таким образом, получено аналитическое решение системы измерительных уравнений, позволяющее определить модуль и аргумент ККО нагрузки и уровень падающей мощности в СВЧ тракте по результатам квадратурного детектирования с использованием формул (13) — (16), (18).

Недостатком предложенного алгоритма аналитического решения является то, что из-за невязок в системе измерительных уравнений, вызванных погрешностями, возможно получение решений, не соответствующих физическому смыслу. Моделирование ситуации на ЭВМ для случая, когда погрешности определения квадратурных составляющих I_1 , Q_1 , I_2 , Q_2 превышали несколько процентов, подтвердило это предположение. В частности, в результате аналитического решения, для модуля ККО получали комплексные значения, что противоречит физическому смыслу.

4. Численное решение системы измерительных уравнений

Указанный выше недостаток аналитического решения системы измерительных уравнений (3) можно исключить, применив итерационный алгоритм решения систем нелинейных уравнений. Существует ряд итерационных алгоритмов, которые реализуются в пакетах прикладных математических программ и обеспечивают численное решение систем уравнений. В данной работе использовались итерационные алгоритмы на основе метода Ньютона. При наличии невязок в системе измерительных уравнений (на практике невязки всегда существуют из-за погрешностей измерительной процедуры) наиболее целесообразно использовать оптимальные методы решения, обеспечивающие минимум среднеквадратической ошибки результата. При этом в блоке решения использовалась процедура, которая обеспечивает условие завершения работы при достижении минимума среднеквадратической ошибки.

Особенностью численного решения является необходимость задания начальных приближений. Попытки численного решения системы нелинейных измерительных уравнений (3) относительно модуля и аргумента ККО показали, что начальные приближения на искомые параметры в этом случае должны

задаваться с высокой точностью. Реализовать это требование на практике невозможно, поскольку измеряемые величины заранее неизвестны. В процессе исследования найден алгоритм численного решения, свободный от указанного недостатка. Суть этого алгоритма заключается в нахождении квадратурных составляющих ККО (X и Y) путем решения модифицированной системы нелинейных измерительных уравнений и последующем расчете модуля и аргумента ККО по формулам (15) и (16). Проведем замену переменных в системе измерительных уравнений (3) с использованием (5) — (7). В результате получим модифицированную систему:

$$\begin{cases} I_1 = K_2 \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4X^2} \cos \left[\operatorname{arctg} \frac{2Y}{1 - X^2 - Y^2} \right]; \\ Q_1 = K_2 \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4X^2} \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{2Y}{1 - X^2 - Y^2} \right]; \\ I_2 = K_2 \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4Y^2} \cos \left[\operatorname{arctg} \frac{2X}{1 - X^2 - Y^2} \right]; \\ Q_2 = K_2 \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4Y^2} \sin \left[\operatorname{arctg} \frac{2X}{1 - X^2 - Y^2} \right], \end{cases} \quad (19)$$

Путем множества численных экспериментов установлено, что система уравнений (19) допускает решение при нулевых начальных приближениях для всех переменных (X , Y и K_2) в широком диапазоне изменения этих переменных.

На рис. 3 показан пример решения при отсутствии невязок. Сравнивая исходные данные с результатами решения, приходим к выводу о том, что в этом случае найденное решение является точным.

Проведем моделирование решения системы при наличии невязок. При этом будем считать, что квадратурные составляющие являются случайными величинами с равновероятным законом распределения. Математические ожидания квадратурных составляющих возьмем из примера, который иллюстрируется рис. 3, а среднеквадратические отклонения (СКО) будем задавать в процессе моделирования. Моделирование проведено с помощью

генератора случайных чисел, что позволило определить наихудшие сочетания случайных параметров при заданных значениях СКО. На рис. 4 показан пример решения для наихудшего сочетания при наличии невязок при заданном значении СКО.

Блок 1 - Задание исходных данных:

$$\underline{\Gamma} := 0.33 \quad \underline{K2} := 0.25 \quad \underline{\varphi0} := 0 \quad \underline{\varphi} := \frac{3\pi}{2} = 4.712$$

Блок 2 - Расчет квадратурных составляющих

$$I1 = K2 \cdot \sqrt{(1 + \Gamma^2)^2 - 4 \cdot (\Gamma \cdot \cos(\varphi))^2} \cdot \cos \left[\text{atan} \left[\frac{2(\Gamma \cdot \sin(\varphi - \varphi0))}{1 - \Gamma^2} \right] \right]$$

$$Q1 = K2 \cdot \sqrt{(1 + \Gamma^2)^2 - 4 \cdot (\Gamma \cdot \cos(\varphi))^2} \cdot \sin \left[\text{atan} \left[\frac{2(\Gamma \cdot \sin(\varphi - \varphi0))}{1 - \Gamma^2} \right] \right]$$

$$I2 = K2 \cdot \sqrt{(1 + \Gamma^2)^2 - 4 \cdot (\Gamma \cdot \sin(\varphi))^2} \cdot \cos \left[\text{atan} \left[\frac{2(\Gamma \cdot \cos(\varphi - \varphi0))}{1 - \Gamma^2} \right] \right]$$

$$Q2 = K2 \cdot \sqrt{(1 + \Gamma^2)^2 - 4 \cdot (\Gamma \cdot \sin(\varphi))^2} \cdot \sin \left[\text{atan} \left[\frac{2(\Gamma \cdot \cos(\varphi - \varphi0))}{1 - \Gamma^2} \right] \right]$$

Блок 3 - Решение модифицированной системы уравнений

Задание начальных приближений

$$\underline{X} := 0 \quad \underline{Y} := 0 \quad \underline{K2} := 0$$

Given

$$K2 \cdot \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4 \cdot X^2} \cdot \cos \left[\text{atan} \left[\frac{2Y}{1 - X^2 - Y^2} \right] \right] = I1$$

$$K2 \cdot \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4 \cdot X^2} \cdot \sin \left[\text{atan} \left[\frac{2Y}{1 - X^2 - Y^2} \right] \right] = Q1$$

$$K2 \cdot \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4 \cdot Y^2} \cdot \cos \left[\text{atan} \left[\frac{2X}{1 - X^2 - Y^2} \right] \right] = I2$$

$$K2 \cdot \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4 \cdot Y^2} \cdot \sin \left[\text{atan} \left[\frac{2X}{1 - X^2 - Y^2} \right] \right] = Q2$$

$$\begin{pmatrix} \underline{X} \\ \underline{Y} \\ \underline{K2} \end{pmatrix} := \text{Minerr}(X, Y, K2) = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.33 \\ 0.25 \end{pmatrix}$$

Блок 4 - Расчет искоемых параметров

$$\underline{\Gamma} := \sqrt{X^2 + Y^2} = 0.33$$

$$\underline{\varphi} := \text{angle}(X, Y) - \varphi0 = 4.712$$

$$K2 = 0.25$$

Рис. 3. Пример решения при отсутствии невязок.

Из приведенного на рис. 4 примера следует, что при СКО квадратурных составляющих I_1, Q_1, I_2, Q_2 , равном $\sigma = 3\%$, в наихудшем случае относительная погрешность измерения модуля ККО составляет $\Delta\Gamma/\Gamma, \% = 2,77\%$, абсолютная погрешность измерения аргумента ККО — $\Delta\varphi = 0,63^0$, а относительная погрешность измерения уровня падающей мощности — $\Delta K_2/K_2, \% = 2,59\%$.

5. Заключение

В работе исследован процесс автоматизации процедуры определения комплексных параметров микроволновых устройств на основе квадратурного способа измерения. При этом предложена новая схема четырехзондового автоматического прибора на основе двух квадратурных детекторов.

Блок 1 - Задание исходных данных:

$$I1 := 0.223 \quad Q1 := -0.165 \quad I2 := 0.223 \quad Q2 := 0 \quad \sigma := 3$$

Блок 2 - Расчет квадратурных составляющих с учетом погрешности

$$\alpha1 := \text{runif}\left(1, 1 - \frac{\sigma}{100}, 1 + \frac{\sigma}{100}\right) = (0.976)$$

$$\alpha2 := \text{runif}\left(1, 1 - \frac{\sigma}{100}, 1 + \frac{\sigma}{100}\right) = (0.984)$$

$$\alpha3 := \text{runif}\left(1, 1 - \frac{\sigma}{100}, 1 + \frac{\sigma}{100}\right) = (1.025)$$

$$\alpha4 := \text{runif}\left(1, 1 - \frac{\sigma}{100}, 1 + \frac{\sigma}{100}\right) = (1.01)$$

$$I1 := I1 \cdot \alpha1 = (0.218) \quad I2 := I2 \cdot \alpha3 = (0.229)$$

$$Q1 := Q1 \cdot \alpha2 = (-0.162) \quad Q2 := Q2 \cdot \alpha4 = (0)$$

Блок 3 - Решение модифицированной системы уравнений

Задание начальных приближений

$$X := 0 \quad Y := 0 \quad K2 := 0$$

Given

$$K2 \cdot \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4 \cdot X^2} \cdot \cos\left[\text{atan}\left[\frac{2Y}{1 - X^2 - Y^2}\right]\right] = I1$$

$$K2 \cdot \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4 \cdot X^2} \cdot \sin\left[\text{atan}\left[\frac{2Y}{1 - X^2 - Y^2}\right]\right] = Q1$$

$$K2 \cdot \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4 \cdot Y^2} \cdot \cos\left[\text{atan}\left[\frac{2X}{1 - X^2 - Y^2}\right]\right] = I2$$

$$K2 \cdot \sqrt{(1 + X^2 + Y^2)^2 - 4 \cdot Y^2} \cdot \sin\left[\text{atan}\left[\frac{2X}{1 - X^2 - Y^2}\right]\right] = Q2$$

$$\begin{pmatrix} X \\ Y \\ K2 \end{pmatrix} := \text{Minerr}(X, Y, K2) = \begin{pmatrix} 0 \\ -0.324 \\ 0.247 \end{pmatrix}$$

Блок 4 - Расчет искомых параметров

$$\Gamma := \sqrt{X^2 + Y^2} = 0.324 \quad K2 = 0.249$$

$$\varphi := \text{angle}(X, Y) = 4.712$$

$$\delta\Gamma := \left| 100 - \frac{\Gamma}{0.33} \cdot 100 \right| = 1.73 \quad \Delta\varphi := |4.712 - \varphi| = 3.89 \times 10^{-4}$$

$$\delta K2 := \left| 100 - \frac{K2}{0.25} \cdot 100 \right| = 0.558$$

Рис. 4. Пример решения при наличии невязок.

Разработана математическая модель измерительной процедуры и сформирована избыточная система измерительных уравнений. Разработан алгоритм аналитического решения системы измерительных уравнений и получены формулы для определения модуля и аргумента ККО и уровня падающей мощности в СВЧ тракте.

Проведено численное решение модифицированной системы измерительных уравнений с использованием процедуры, обеспечивающей минимизацию среднеквадратической ошибки в случае наличия невязок в системе измерительных уравнений. При этом в результате множественных численных экспериментов доказана возможность использования нулевых начальных приближений для новых переменных этой системы уравнений. Приведены результаты численного анализа для случаев отсутствия и присутствия невязок.

Проведенные исследования позволяют разработать недорогие измерительные устройства с небольшими габаритами, массой и достаточно

высокой точностью, что дает возможность применять эти устройства для встроенного контроля параметров микроволновых трактов радиоэлектронных систем и параметров технологических процессов.

Литература

1. Данилин А.А. Измерения в технике СВЧ / А. А. Данилин — М.: «Радиотехника», 2008. — 184 с
2. Дворашкин Б.В. Основы метрологии и радиоизмерения / Б.В. Дворашкин — М.: Радио и связь, 1993. — 320 с.
3. Бондаренко И.К., Дейнега Г.А., Маграчев З.В. Автоматизация измерений параметров СВЧ трактов / И.К. Бондаренко, Г.А. Дейнега, З.В. Маграчев. — М.: Сов. радио, 1969. — 304 с
4. Гимпилевич Ю.Б., Зебек С.Е. Квадратурный метод измерения комплексных параметров СВЧ-двухполюсников / Ю.Б. Гимпилевич, С.Е. Зебек // Известия высших учебных заведений России. Радиоэлектроника. 2019. № 1. — С. 29 — 38.
5. Пат. 2683804 Российская Федерация, МПК G01R 27/28. Способ определения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения микроволнового двухполюсника / Гимпилевич Ю.Б., Зебек С.Е. Заявитель и патентообладатель ФГАООУ ВО «Севастопольский государственный университет». — № 2018108378; заявл. 06.03.2018; опубл. 02.04.19, Бюл. № 10. — 18 с.
6. Пат. 189436 Российская Федерация, МПК G01R 26/06. Устройство для измерения модуля и аргумента комплексного коэффициента отражения микроволнового двухполюсника / Гимпилевич Ю.Б., Зебек С.Е. Заявитель и патентообладатель ФГАООУ ВО «Севастопольский государственный университет». — № 2018128676; заявл. 03.08.2018; опубл. 22.05.19, Бюл. № 15. — 18 с.
7. Gimpilevich Yu.B., Zebek S.E. Automation of the quadrature method of measurement complex parameters of microwave nodes// Proceedings of the 28th

- International Conference «Microwave & Telecommunication Technology, CriMiCo-2018». Sevastopol, Crimea, September 9-15, 2018. — с. 1286-1292.
8. Quadrature Demodulator ADL5382 [Электронный ресурс]. URL: <http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADL5382.pdf>. Дата обращения 15.07.2019.
 9. Gimpilevich Yu.B., Zebek S.E. Mathematical model of the quadrature method of measuring the reflection coefficient based on the demodulator with symmetrical inputs// Proceedings of the 27th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology, CriMiCo-2017». Sevastopol, Crimea, September 10-16, 2017. — pp. 857-859.
 10. Gimpilevich Yu.B., Zebek S.E. The mathematical model of a complex reflection coefficient measuring instrument based on a method of direct frequency conversion. Proceedings of the 24th IEEE International Conference «Microwave & Telecommunication Technology, CriMiCo-2014». — Sevastopol, Crimea, Russia, September 7—13, 2014. — Vol. 2. — pp. 882—883.
 11. Гимпилевич Ю.Б. Измерение и контроль параметров микроволновых трактов / Ю.Б. Гимпилевич — Севастополь: Изд-во СевНТУ, 2009. — 296 с.
 12. Gimpilevich Yu.B., Zebek S.E. Experimental research of amplitude and phase field distribution in the transmission line with using of quadrature processing// Proceedings of the 25th International Conference «Microwave & Telecommunication Technology, CriMiCo-2015». Sevastopol, Crimea, September 6-12, 2015. — pp. 857-859.

Для цитирования:

Ю. Б. Гимпилевич, С. Е. Збек. Автоматизация процедуры определения комплексных параметров микроволновых устройств на основе квадратурного способа измерения. Журнал радиоэлектроники [электронный журнал]. 2019. № 8. Режим доступа: <http://jre.cplire.ru/jre/aug19/1/text.pdf>
DOI 10.30898/1684-1719.2019.8.1