

Vo Ba Au – Southern Federal University; e-mail: bvo@sfedu.ru; Taganrog, Russia; phone: +78634371634; the Department Antenna and Radio Transmitter; postgraduate.

Bobkov Ivan Nikolaevich – e-mail: ibobkov@sfedu.ru; the Department Antenna and Radio Transmitter; postgraduate.

Yukhanov Yury Vladimirovich – e-mail: yu_yukhanov@mail.ru; the Department Antenna and Radio Transmitter; head of the department; dr. of eng. sc.; professor.

УДК 621.376.4

DOI 10.18522/2311-3103-2024-4-196-203

В.В. Сердюков, К.С. Коротков**К ВОПРОСУ ОПРЕДЕЛЕНИЯ ФАЗОВЫХ СДВИГОВ В СМЕСИТЕЛЕ**

Целью исследования является оценка проблемы влияния на результаты измерений абсолютных фазовых сдвигов, возникающих в смесителе, нелинейности фазовых сдвигов гармоник при умножении частоты и погрешностей в различных методах измерений этих сдвигов в смесителе при гетеродинном преобразовании частоты входного высокочастотного- (ВЧ) или сверхвысокочастотного- (СВЧ) сигнала. Ввиду того, что сигнал на входе ВЧ- или СВЧ- смесителя и сигнал промежуточной частоты на его выходе лежат в разных диапазонах частот, невозможно традиционными способами измерить сдвиг фаз, вносимый нелинейным элементом смесителя в сигнал промежуточной частоты, в процессе гетеродинного преобразования частоты входного ВЧ- или СВЧ- сигнала. Проблемой, рассмотренной в данном исследовании, является выявление погрешности измерений абсолютных фазовых сдвигов, возникающих в смесительном диоде при гетеродинном преобразовании частоты из-за его нелинейности. Эта погрешность может оказать значительное влияние на точность измерений, и поэтому ее учет и компенсация являются важными задачами в радиотехнике и связи. В данной статье демонстрируется важная разница фазовых сдвигов гармоник, умноженных на фазовый сдвиг другого сигнала, используемых в методах измерений абсолютных фазовых сдвигов смесителей. Нами также был предложен метод, лишенный указанных погрешностей измерений, который позволяет учесть нелинейность смесительного диода и обеспечить снижение погрешности измерения. Результаты данного исследования имеют большое значение для повышения точности измерений в радиотехнике и связи. Предложенный метод, лишенный указанных погрешностей, может существенно повысить точность измерений абсолютных фазовых сдвигов смесителей при гетеродинном преобразовании частоты. Это инновационное решение позволяет учесть нелинейность смесительного диода и обеспечить увеличение точности измерения, что может быть весьма полезно при создании приборов, способных измерять сдвиг фаз испытуемого смесителя СВЧ и векторных вольтметров на базе программируемых логических интегральных схем (ПЛИС).

Смеситель сигналов; сдвиг фаз; гетеродинное преобразование частоты; определение фазы.

V.V. Serdukov, K.S. Korotkov**ON THE ISSUE OF DETERMINING PHASE SHIFTS IN THE MIXER**

The aim of the study is to solve the problem of the influence of the nonlinearity of phase shifts of harmonics during frequency multiplication on the measurement results of absolute phase shifts occurring in mixers and errors in various measurement methods of these shifts in the mixer during heterodyne frequency conversion of the input ultrahigh frequency (microwave) signal. Since the signal at the input of the microwave mixer and the intermediate frequency signal at its output lie in different frequency ranges, it is impossible by traditional methods to measure the phase shift introduced by the nonlinear element of the mixer into the intermediate frequency signal during the heterodyne frequency conversion of the input microwave signal. The problem that we have considered in this study is to identify the measurement error of absolute phase shifts that occur in a mixing diode during heterodyne frequency conversion due to its nonlinearity. This error can have a significant impact on the accuracy of measurements, and therefore its accounting and compensation are important tasks in radio engineering and communications. This scientific article demonstrates the important inequality of the phase shifts of harmonics multiplied by the phase shift of the multiplied signal used in the measurement methods of absolute phase shifts of mixers. We also proposed an innovative method devoid of these measurement errors, which allows us to take into account

the nonlinearity of the mixing diode and provide more accurate measurements. The results of this study are of great importance for accurate measurements in radio engineering and communications. The proposed method, devoid of these errors, can significantly increase the accuracy of measurements of absolute phase shifts of mixers with heterodyne frequency conversion. This innovative solution allows you to take into account the nonlinearity of the mixing diode and provide accurate measurements, which can be very useful when creating devices capable of measuring the phase shift of the microwave mixer under test and vector voltmeters based on programmable logic integrated circuits (FPGAs).

Signal mixer; phase shift; heterodyne frequency conversion; phase detection.

Введение. В последнее время, для передачи информации широкое распространение получил способ фазовой модуляции радиосигналов, как наиболее крипто- и помехозащищенный. При этом подавляющее число устройств для приема таких радиосигналов использует принцип гетеродинного преобразования частоты с применением смесителей радиосигналов, построенных на основе диодов, которые вносят дополнительный сдвиг фаз и в принципе являющийся паразитным, искажающим передаваемую информацию. Это связано с тем, что каждый диод имеет эквивалентную индуктивность, объем полупроводника L_s , по которому протекает сигнал, и барьерную емкость C_b p-n перехода, которые, как всякая реактивность, вносят в протекающий через них сигнал время задержки, что эквивалентно дополнительному сдвигу фаз, особенно в диапазоне СВЧ.

Физика процесса сдвига фаз в смесителе. Теоретический расчет сдвига фаз, происходящий в смесителе, весьма сложен и не всегда возможен из-за отсутствия информации о молекулярной структуре материала полупроводника. Поэтому широкое распространение получили инструментальные методы измерений сдвигов фаз, вносимых смесительным диодом в сигнал промежуточной частоты (ПЧ) при гетеродинном преобразовании частоты, например, патент РФ № 2524049 [1]. Однако, из-за разных частот сигналов на входе и выходе смесителя, измерить вносимый ими сдвиг фаз традиционными способами не представляется возможным. Поэтому были найдены и разработаны инструментальные способы, специально предназначенные для измерения сдвига фаз, возникающего в смесителе при гетеродинном преобразовании частоты, физика которого состоит в следующем: общий фазовый сдвиг, вносимый полупроводниковым смесительным диодом в сигнал ПЧ — $\varphi_{\text{общ}}$. В процессе гетеродинного преобразования входного сигнала с частотой ω_1 , как известно [2], образуется из фазовых сдвигов: входного сигнала φ_1 и фазового сдвига гетеродина φ_2 с частотой ω_2 в виде их суммы ($\varphi_1 + \varphi_2$) или разности ($\varphi_1 - \varphi_2$) в зависимости от типа преобразования «вверх» или «вниз» по частоте. Одновременно с этим в сигнал ПЧ, с частотой $\omega_{\text{пч}}$ также протекающий через смесительный диод, вносится дополнительный фазовый сдвиг $-\Delta\varphi_{\text{пч}}$, определяемый его реактивностями индуктивностью L_s и барьерной емкостью C_b , в результате чего общий фазовый сдвиг сигнала ПЧ — $\varphi_{\text{пч общ}}$ — складывается из фазовых сдвигов входного сигнала φ_1 , гетеродина φ_2 и дополнительного фазового сдвига $-\Delta\varphi_{\text{пч}}$, и определяется выражением (1):

$$\varphi_{\text{пч общ}} = (\varphi_1 \pm \varphi_2) + \Delta\varphi_{\text{пч}}. \quad (1)$$

Для выяснения причин и последствий возникновения дополнительного фазового сдвига $-\Delta\varphi_{\text{пч}}$, проанализируем электрическую схему однодиодного смесителя с эквивалентной схемой полупроводникового смесительного диода приведенную на рис. 1 [3].

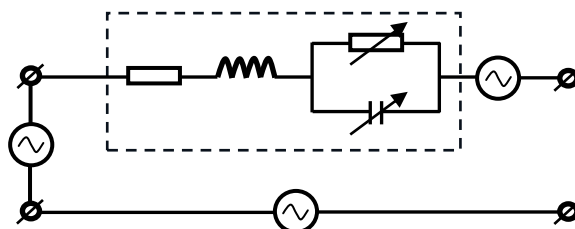


Рис. 1. Эквивалентная схема однодиодного смесителя

где (1-1') вход смесителя, E_c – ЭДС входного сигнала, 1 – эквивалентная схема полупроводникового смесительного диода, в которой: r_s – сопротивление объема полупроводника, L_s – индуктивность объема полупроводника, r_n – активное сопротивление p-n перехода, C_6 – барьерная емкость p-n перехода, $E_{пч}$ – эквивалентная ЭДС сигнала ПЧ, 2-2' выход смесителя, E_g – ЭДС сигнала гетеродина.

Комплексное сопротивление смесительного диода Z_d на рис. 1 описывается выражением (2) вида:

$$Z_d = \frac{r_n \cdot \frac{1}{j\omega C_6}}{r_n + \frac{1}{j\omega C_6}} + j\omega L_s r_s = \frac{r_n + r_s(r_n^2 \omega^2 C_6^2)}{r_n^2 \omega^2 C_6^2 + 1} + j \frac{\omega L_s(r_n^2 \omega^2 C_6^2 + 1) - r_n^2 \omega C_6}{r_n^2 \omega^2 C_6^2 + 1}. \quad (2)$$

Это сопротивление вносит сдвиг фаз в протекающие через них сигналы любых частот ω_1 , в том числе и сигнал ПЧ с частотой $\omega_{пч}$, величина которого рассчитывается по формуле (3), полученной из (2) как отношение её действительной и мнимой частей:

$$\Delta\varphi_{пч} = \arctg \frac{\omega_{пч} L_s(r_n^2 \omega_{пч}^2 C_6^2 + 1) - r_n^2 \omega_{пч} C_6}{r_n + r_s(r_n^2 \omega_{пч}^2 C_6^2 + 1)}. \quad (3)$$

Из формулы (3) видно, что сдвиг фаз, вносимый смесительным диодом, должен носить нелинейный характер, так как функция $\arctg$ в математике принципиально нелинейна и определяется его реактивностями L_s и C_6 . При этом, если L_s величина постоянная и не зависит от амплитуды сигнала, то величина барьерной емкости C_6 зависит от амплитуды сигнала, приложенного к p-n переходу.

Как показали лабораторные инструментальные исследования абсолютных сдвигов фаз смесительных диодов, основную величину этих сдвигов вносит барьерная емкость C_6 p-n перехода.

Комплексное сопротивление p-n перехода Z_n с параллельным соединением емкости C_6 и активного сопротивления r_n имеет вид [4]:

$$Z_n = \frac{r_n \cdot \frac{1}{j\omega C_6}}{r_n + \frac{1}{j\omega C_6}} = \frac{\frac{r_n}{\omega_{пч}^2 C_6} + j \frac{r_n}{\omega_{пч} C_6}}{r_n^2 + \frac{1}{\omega_{пч}^2 C_6^2}} = \frac{r_n}{r_n^2 \omega_{пч}^2 C_6^2 + 1} - j \frac{r_n \omega_{пч} C_6}{r_n^2 \omega_{пч}^2 C_6^2 + 1}. \quad (4)$$

Таким образом, главным источником переменного сдвига фаз $\Delta\varphi_{пч \text{ пер.}}$ на ПЧ является параллельное соединение барьерной ёмкости C_6 и барьерного сопротивления r_n p-n перехода, который описывается выражением (5) полученным из (4) как отношение её действительной и мнимой частей в виде:

$$\tan^{-1} \Delta\varphi_{пч \text{ пер.}} = \frac{-r_n^2 C_6 \omega_{пч}}{r_n} = r_n \omega C_6 = 2\pi f r_n. \quad (5)$$

В работе [5] показано, что сдвиг фаз, вносимый барьерной ёмкостью – есть величина нелинейная.

Известно [6, 7], что инженерный расчёт величины барьерной ёмкости весьма трудоёмкий и сложный процесс, требующий знания параметров материала, из которого изготовлен диод, которые известны только на заводе-изготовителе.

Поэтому в работе [6] для оценочных расчётов барьерной ёмкости, как для диодов с p-n переходом, так и с барьером Шоттки рекомендована формула:

$$C_6 = 10^{-12} a_k \left(\frac{1}{\varphi_k - U} \right)^n, \quad (6)$$

в которой a_k – зависит от типа диода, φ_k – термический потенциал, U – напряжение приложенное к p-n переходу. Для иллюстрации поведения барьерной ёмкости в работе [8, с. 265] при $U > \varphi_k$, на рис. 2 и 3 приведены её графики в диапазоне изменений напряжений «ноль» и «плюс 1В» приложенного к p-n переходу. Из графиков виден достаточно нелинейный характер ёмкости в зависимости от напряжения U приложенного к p-n переходу.

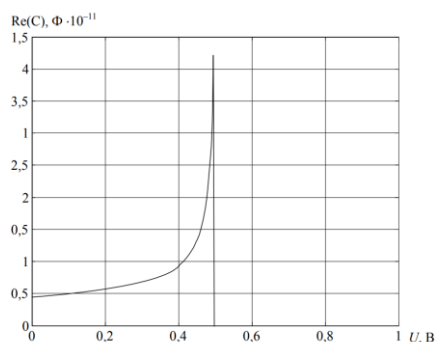


Рис. 2. График поведения барьерной ёмкости $C_b = 10^{-12} a_k \left(\frac{1}{\varphi_k - U} \right)^n$ в зависимости от напряжения U

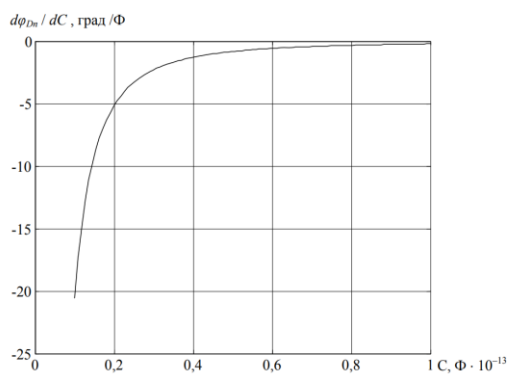


Рис. 3. График измерения $\frac{\partial \varphi_{Dn}}{\partial C_b}$

Из проведённого анализа следует главный вывод – при использовании диодов для умножения частоты, сдвиг фаз гармоник не равен произведению номера гармоники, умноженной на фазовый сдвиг умножаемого сигнала, требуется коррекция [9].

Анализ погрешностей измерения при определении сдвигов фаз смесителей известными методами. Как было показано выше, в настоящее время разработаны шесть инструментальных способов определения (измерения с последующим вычислением результатов) сдвигов фаз, возникающих в смесителе при гетеродинном преобразовании частоты.

Метод трёх смесителей [7], когда последовательно измеряются сдвиги фаз трёх смесителей, один из которых испытуемый, а два других вспомогательные с последующим вычислением по результатам измерений сдвига фаз испытуемого смесителя [10, с. 557].

Метод двойного преобразования частоты [10, с. 534], в котором с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) измеряют общий сдвиг фаз двух последовательно соединённых испытуемых смесителя, включённых один в прямом, а второй в обратном направлениях с общим для обоих гетеродином, а полученный результат делят пополам и приписывают каждому из испытуемых смесителей.

Метод отражения [10, с. 557], при котором через испытуемый смеситель пропускается сигнал в прямом направлении, который на его выходе отражается от нагрузки с известным коэффициентом отражения и опять возвращается через смеситель на его вход. На входе смесителя и измеряют сдвиг фазы между прямым и отражённым сигналами, который, в свою очередь, равен сдвигу фаз испытуемого смесителя [10, с. 560].

Метод фазовой опоры, в котором используют ВАЦ-содержащий генератор комбинационных частот вырабатывающих гармоники путём умножения частоты опорного кварцевого генератора 10 МГц с дискретностью гармоник 10 МГц. Эти гармоники используют для получения испытательного сигнала исследуемого смесителя и опорного сигнала ПЧ, который сравнивают по фазе с выходным сигналом ПЧ этого же смесителя, в результате чего и измеряют их фазовый сдвиг [10, с. 564].

Сигнал гетеродина также сравнивают по фазе с соответствующей ему гармоникой и измеряют фазовый сдвиг между ними. Затем вычитают этот фазовый сдвиг из измеренного фазового сдвига сигнала ПЧ, в результате чего получают фазовый сдвиг смесителя, вносимый им в сигнал ПЧ при гетеродинном преобразовании частоты входного сигнала.

Сигналы всех гармоник когерентны между собой. Поэтому считают, что их фазовые сдвиги соответствуют фазе исходного сигнала опорного кварцевого генератора умноженной на номер гармоники

Но как было показано ранее, фазы гармоник отличаются друг от друга на величину $\Delta\varphi_n$, разную для каждой отдельной гармоники, что является прямой погрешностью измерений, так как измеряется не истинный фазовый сдвиг испытываемого смесителя, а его реплика, отличающаяся от истинного сдвига фаз на величину $\Delta\varphi_n$. Поэтому необходима таблица индивидуальной коррекции сдвигов фаз с дискретностью, равной частоте опорного кварцевого генератора.

Все вышеперечисленные методы испытаний смесителей имеют существенные недостатки [11, 12].

В методе трёх смесителей главная и существенная погрешность при измерении фазы возникает из-за согласования входных сопротивлений смесителей, собранных в пару между собой и входами каждой пары смесителей и входами ВАЦ, к которым они присоединяются для испытаний. Как показывает практика, погрешность измерения фазы при КСВ входов смесителей 1,5–2,0 может достигать 10–15 градусов.

Метод отражения применим для измерения параметров смесителей, в том числе и фазы, только в случае, когда потери преобразования смесителя в прямом и обратном направлении равны и, кроме того, не превышают 10 дБ.

Метод двойного преобразования частоты пригоден только для измерений двух совершенно идентичных по параметрам смесителей и совершенно непригоден для двух последовательно соединённых смесителей с разными потерями преобразования и, следовательно, с разными собственными сдвигами фаз [13]. Кроме того, даже при двух совершенно идентичных по параметрам смесителях, соединённых последовательно в пару, амплитуда испытательного сигнала на входе второго смесителя пары будет меньше, чем амплитуда испытательного сигнала на входе первого смесителя пары на величину его потерь преобразования. Это неизбежно приводит к разным сдвигам фаз у первого и второго смесителей пары.

В методе фазовой опоры главный недостаток состоит в том, что из-за нелинейности фазовых сдвигов между гармониками фазовой опоры, производятся измерения не самого фазового сдвига вносимого смесителем при гетеродинном преобразовании в сигнал ПЧ, а его реплики, отличающейся от истинного сдвига фаз на величину $\Delta\varphi_n$, разную для разных гармоник.

Все испытательные сигналы в таком методе являются когерентными, так как получены на основе частоты опорного кварцевого генератора 10 МГц.

В то же время известен метод измерения абсолютного сдвига фаз смесительного диода, лишенный вышеперечисленных недостатков. Этот метод [14] состоит в том, что одновременно измеряют сумму и разность сдвигов фаз двух смесителей, один из которых опорный, а другой испытываемый при общем гетеродине для обоих смесителей. При измерении суммы сдвига фаз испытываемой и опорной смесители соединяются вместе последовательно выходами ПЧ. На вход испытываемого смесителя подают испытательный сигнал,

который в результате прямого преобразования частоты в испытуемом смесителе и обратного преобразования частоты в опорном смесителе снимают с его выхода с частотой равной частоте входного испытательного сигнала. Далее его подают на один из двух входов фазометра, а на другой вход поступает входной испытательный сигнал, в результате чего измеряют общий сдвиг фаз (сумму) двух смесителей в виде:

$$\Sigma \varphi = (\varphi_1 + \varphi_2),$$

где φ_1 – сдвиг фаз испытуемого, а φ_2 – сдвиг фаз опорного смесителей. Затем измеряют разность сдвигов фаз между включёнными параллельно смесителями в диапазоне их промежуточных частот, в результате чего получают $\Delta\varphi$:

$$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2.$$

После чего вычисляют истинные сдвиги фаз испытуемого смесителя φ_1 , по формуле:

$$\varphi_1 = \frac{\Sigma \varphi + \Delta\varphi}{2}, \quad (7)$$

и опорного смесителя φ_2 по формуле:

$$\varphi_2 = \frac{\Sigma \varphi - \Delta\varphi}{2}. \quad (8)$$

Заключение Проанализирован сдвиг фаз, вносимый полупроводниковым смесительным диодом в процессе гетеродинного преобразования частоты входного сигнала в сигнал ПЧ. Показано, что этот сдвиг является нелинейным в заданном диапазоне частот, а величина сдвига определяется постоянным активным и индуктивным сопротивлениями объёма полупроводника и переменной барьерной ёмкостью р-п перехода, теоретический инженерный расчёт которой весьма сложен и не всегда возможен.

Рассмотрены известные инструментальные методы измерения сдвигов, вносимых смесительным диодом в сигнал ПЧ при гетеродинном преобразовании частоты, и показаны их недостатки [9, 19, 20].

Приведено описание нового способа измерений, который позволяет определять сдвиг фаз смесительного диода при преобразовании частоты без описанных ранее недостатков [19, 21].

Показано, что в случае применения диода для умножения частоты, сдвиги фаз каждой из гармоник не равны сдвигу фаз исходного сигнала, и их величина индивидуальна для каждой гармоники.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Патент РФ на изобретение № 2524049. Устройство для измерения комплексных коэффициентов передачи и отражения СВЧ-устройств с преобразованием частоты / *Коротков К.С., Левченко А.С., Мильченко Д.Н., Фролов Д.Р.*; опубликовано: 27.07.2014 г.
2. Радиоприёмные устройства: учебник / под общей ред. В.И. Сифорова. – М.: Советское радио, 1974. – С. 502-507.
3. *Стриха В.И., Бузанева Е.В., Радзиевский Е.А.* Полупроводниковые приборы с барьером Шоттки. – М.: Советское радио, 1974. – С. 130-134.
4. *Валиев К.А. Паминцев Ю.И. Петров Г.В.* Применение контакта металл–полупроводник в электронике. – М.: Радио и связь, 1981. – 86 с.
5. *Медведев В.В. Пругло В.П. Уэдзин Р.И.* Методы и аппаратура для измерения параметров СВЧ-смесителей // Сб. ВИИФТРИ. Серия «Радиотехнические измерения». – М., 1973.
6. Полупроводниковые диоды. Параметры, методы измерений / под ред. Н.Н. Горюнова, Ю.Ю. Носова. – М.: Советское радио, 1968. – С. 196-198.
7. *Епифанов Е.И., Новиков В.А., Чемес Е.А.* Экспериментальные исследования радиочастотных смесителей // Радиотехника. – 1988. – № 10.
8. *Коротков К.С.* Методы определения комплексных коэффициентов передачи и отражения СВЧ-устройств и преобразованием частоты: дисс. ... д-ра техн. наук. – Таганрог, 2002.
9. Диоды полупроводниковые СВЧ. Методы измерения электрических параметров. ГОСТ 19656.9-79. – М., 1987.

10. Дансмор Джозель П. Настольная книга инженера. Измерения параметров СВЧ-устройств с использованием передовых методик векторного анализа цепей: пер. с англ. и научная редакция Е.Ю. Харитоновой [и др.]. – М.: Техносфера, 2019. – 735 с. – (Мир радиоэлектроники / Минпромторг России; XVII–32). – ISBN 978-5-94836-505-3.
11. А.с. СССР № 1475347 G01R 27/28 с приоритетом от 13.12.86. Способ определения сдвига фаз четырехполосников с преобразователем частоты / Коротков К.С., Малышков В.Е., Суровенный В.Г.; Зарегистр. 22.12.86.
12. Chacran Jay, Tenenhltr R. Recent advances in microwave mixers // IRE Intern. Conv. Rec. – 1961. – Vol. 9, No. 3.
13. А.с. 1475347 СССР, МКИ G01 R 27/28. Способ определения сдвига фаз четырёхполосников с преобразованием частоты / Коротков К.С., Малышков В.Е., Суровенный В.Г.; заявл. 13.12.86.
14. Радиоизмерительные приборы 90/91. Каталог. Изделия промышленности средств связи. – 26-е изд. – М.: ЭКОС, 1989.
15. Панорамный измеритель разности фаз коэффициентов передачи и разности коэффициентов передачи четырехполосников. РРК4–001/РРК4–003. Техническое описание и инструкция по эксплуатации XB1.405.032. – Краснодар, 1984.
16. Double Balanced Waveguide Mixer // Marki Microwave Company. E-mail mixers@markimicrowave.com, 2000.
17. Broad Band Mixers // Lorch Microwave Company. E-mail lorchsales@lorch.com, 2000.
18. Accurate Mixer Measurements Using the ENA RF Networks Analyzers' Frequency–Offset Mode / Application Note 5989–1420EN // Keysight Technologies. – 2014.
19. Korotkov K.S., Frolov D.R. A New Method of Measuring The Complex Parameters of Microwave // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 57, Issue 6.
20. Patent Application US 2012/0295548 A1 United States of America, Int. Cl. H 04 B 17/00. System For Characterizing Mixer or Converter Response / Joel P. Dunsmore (USA); assignee Agilent Technologies Inc. – 13/110,129; filed May 18, 2011; pub. Date Nov 22, 2012.
21. Vyzulin S.A., Korotkov K.S. To the New Phase Shifts in Mixer Measurement Method // Nato Advanced Research Workshop Microwave Physics and Technique. 30 sept – 5 oct, Sozopol Bulgaria, 1996.
22. Agilent 8510 Network Analyzer. Microwave Component Measurements – Amplitude and Phase Measurements of Frequency Translation Devices Using the Agilent 8510C Network Analyzer / Product Note 8510–7A // Agilent Technologies, Inc. – 2006.

REFERENCES

1. Korotkov K.S., Levchenko A.S., Mil'chenko D.N., Frolov D.R. Patent RF na izobretenie № 2524049. Ustroystvo dlya izmereniya kompleksnykh koeffitsientov peredachi i otrazheniya SVCh–ustroystv s preobrazovaniem chastoty [Patent RF for invention No. 2524049. A device for measuring complex transmission and reflection coefficients of microwave devices with frequency conversion]; published: 07/27/2014.
2. Radiopriemnye ustroystva: uchebnik [Radio receivers. textbook], under the general ed. V.I. Siforova. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, pp. 502-507.
3. Strikha V.I., Buzaneva E.V., Radzievskiy E.A. Poluprovodnikovye pribory s bar'ером Shottki [Semiconductor devices with a Schottky barrier]. Moscow: Sovetskoe radio, 1974, pp. 130-134.
4. Valiev K.A., Pamintsev Yu.I., Petrov G.V. Primenenie kontakta metall–poluprovodnik v elektronike [Application of metal–semiconductor contact in electronics]. Moscow: Radio i svyaz', 1981, 86 p.
5. Medvedev V.V., Pruglo V.P., Uedzin R.I. Metody i apparatura dlya izmereniya parametrov SVCh-smesiteley [Methods and equipment for measuring parameters of microwave mixers], *Sb. VIIFTRI. Ser. Radiotekhnicheskie izmereniya* [Collection of VIIFTRI. Series "Radio engineering measurements"]. Moscow, 1973.
6. Poluprovodnikovye diody. Parametry, metody izmereniy [Semiconductor diodes. Parameters and measurement methods], ed. by N.N. Goryunova, Yu.Yu. Nosova. Moscow: Sovetskoe radio, 1968, pp. 196-198.
7. Epifanov E.I., Novikov V.A., Chemes E.A. Eksperimental'nye issledovaniya radiochastotnykh smesiteley [Experimental studies of radio frequency mixers], *Radiotekhnika* [Radio engineering], 1988, No. 10.
8. Korotkov K.S. Metody opredeleniya kompleksnykh koeffitsientov peredachi i otrazheniya SVCh–ustroystv i preobrazovaniem chastoty: disc. ... d-ra tekhn. nauk [Methods for determining the complex coefficients of transmission and reflection of microwave devices and frequency conversion: dr. of eng. sc. diss.]. Taganrog, 2002.
9. Diody poluprovodnikovye SVCh. Metody izmereniya elektricheskikh parametrov. GOST 19656.9-79 [Semiconductor microwave diodes. Methods of measuring electrical parameters. GOST 19656.9-79]. Moscow, 1987.

10. *Dansmor Dzhoel' P.* Nastol'naya kniga inzhenera. Izmereniya parametrov SVCh-ustroystv s ispol'zovaniem peredovykh metodik vektornogo analiza tsepey [The Engineer's Handbook. Measurements of parameters of microwave devices using advanced techniques of vector circuit analysis]: translated from English and scientific edition by E.Y. Kharitonov [et al.]. Moscow: Tekhnosfera, 2019, 735 p. (Mir radioelektroniki, Minpromtorg Rossii; XVII–32 [World of Radioelectronics / Ministry of Industry and Trade of Russia; XVII–32]). ISBN 978-5-94836-505-3.
11. *Korotkov K.S., Malyshev V.E., Surovennyy V.G.* A.s. SSSR № 1475347 G01R 27/28 s prioriteto ot 13.12.86. Sposob opredeleniya sdviga faz chetyrekhpolynusnikov s preobrazovatelem chastoty [A.S. USSR No. 1475347 G01R 27/28 with priority from 12/13/86]; Register. 22.12.86.
12. *Chacran Jay, Tenenhltr R.* Recent advances in microwave mixers, *IRE Intern. Conv. Rec.*, 1961, Vol. 9, No. 3.
13. *Korotkov K.S., Malyshev V.E., Surovennyy V.G.* A.s. 1475347 SSSR, MKI G01 R 27/28. Sposob opredeleniya sdviga faz chetyrekhpolynusnikov s preobrazovaniem chastoty [A.S. 1475347 USSR, MKI G01 R 27/28. A method for determining the phase shift of four-pole frequency conversion]; application 13.12.86.
14. Radioizmeritel'nye pribory 90/91. Katalog. Izdeliya promyshlennosti sredstv svyazi [Radio measuring devices 90/91. Catalog. Products of the communications industry]. 26th ed. Moscow: EKOS, 1989.
15. Panoramnyy izmeritel' raznosti faz koeffitsientov peredachi i raznosti koeffitsientov peredachi chetyrekhpolynusnikov. RRK4–001/RRK4–003. Tekhnicheskoe opisanie i instruktsiya po ekspluatatsii HV1.405.032 [Panoramic meter of the phase difference of the transmission coefficients and the difference of the transmission coefficients of four-poles. RRK4–001/RRK4–003. Technical description and operating instructions HV1.405.032]. Krasnodar, 1984.
16. Double Balanced Waveguide Mixer, *Marki Microwave Company*. E-mail mixers@markimicrowave.com, 2000.
17. Broad Band Mixers, *Lorch Microwave Company*. E-mail lorchesales@lorch.com, 2000.
18. Accurate Mixer Measurements Using the ENA RF Networks Analyzers' Frequency–Offset Mode, Application Note 5989–1420EN, *Keysight Technologies*, 2014.
19. *Korotkov K.S., Frolov D.R.* A New Method of Measuring The Complex Parameters of Microwave // Measurement Techniques. – 2014. – Vol. 57, Issue 6.
20. *Joel P. Dunsmore* (USA). Patent Application US 2012/0295548 A1 United States of America, Int. Cl. H 04 B 17/00. System For Characterizing Mixer or Converter Response; assignee Agilent Technologies Inc. – 13/110,129; filed May 18, 2011; pub. Date Nov 22, 2012.
21. *Vyzulin S.A., Korotkov K.S.* To the New Phase Shifts in Mixer Measurement Method, *Nato Advanced Research Workshop Microwave Physics and Technique. 30 sept – 5 oct, Sozopol Bulgaria, 1996*.
22. Agilent 8510 Network Analyzer. Microwave Component Measurements – Amplitude and Phase Measurements of Frequency Translation Devices Using the Agilent 8510C Network Analyzer, Product Note 8510–7A, *Agilent Technologies, Inc.*, 2006.

Статью рекомендовал к опубликованию д.т.н., профессор И.И. Турулин.

Сердюков Владимир Владимирович – Кубанский государственный университет; e-mail: serdyukov-vladimir1996@mail.ru; г. Краснодар, Россия; тел.: 89528524156; преподаватель.

Коротков Константин Станиславович – e-mail: korsar@phys.kubsu.ru; тел.: 89182513055; д.т.н.; профессор.

Serdukov Vladinir Vladimirovich – Kuban State University; e-mail: serdyukov-vladimir1996@mail.ru; Krasnodar, Russia; phone: +79528524156; teacher.

Korotkov Konstantin Stanislavovich – e-mail: korsar@phys.kubsu.ru; phone: +79182513055; dr. of eng. sc.; professor.