



<http://dx.doi.org/10.35596/1729-7648-2019-124-6-50-54>

Оригинальная статья
Original paper

УДК 621.317.3

ИЗМЕРИТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС ПОВЕРКИ И КАЛИБРОВКИ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ МОЩНОСТИ В МИЛЛИМЕТРОВОМ ДИАПАЗОНЕ ДЛИН ВОЛН

ГУСИНСКИЙ А.В.

Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, Республика Беларусь

Поступила в редакцию 14 декабря 2018

© Белорусский государственный университет информатики и радиоэлектроники, 2019

Аннотация. Приведена структура построения измерительного комплекса поверки и калибровки измерителей мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Рассмотрена возможность коррекции одной из доминирующих составляющих погрешности измерения мощности – погрешности рассогласования при использовании векторного анализатора цепей.

Ключевые слова: измеритель мощности, миллиметровый диапазон длин волн, калибровка, погрешность рассогласования.

Конфликт интересов. Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Для цитирования. Гусинский А.В. Измерительный комплекс поверки и калибровки измерителей мощности в миллиметровом диапазоне длин волн. Доклады БГУИР. 2019; 6(124): 50-54.

MEASURING COMPLEX OF TESTING AND CALIBRATION OF POWER METERS IN THE MILLIMETER RANGE OF WAVES LENGTH

GUSINSKY A.V.

Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, Republic of Belarus

Submitted 14 December 2018

© Belarusian State University of Informatics and Radioelectronics, 2019

Abstract. The structure of the construction of the calibration measuring complex and calibration of the power meters in the millimeter wavelength range is given. The possibility of correcting one of the dominant components of the power measurement error, the mismatch error when using a vector network analyzer, is considered.

Keywords: power meter, millimeter wavelength range, calibration, error of mismatch.

Conflict of interests. The author declares no conflict of interests.

For citation. Gusinsky A.V. Measuring complex of testing and calibration of power meters in the millimeter range of waves length. Doklady BGUIR. 2019; 6(124): 50-54.

Конструктивно приборы для измерения СВЧ мощности – СВЧ ваттметры – выполняются в виде двух отдельных узлов: приемного преобразователя (или комплекта таких преобразователей) и измерительного блока [1]. К наиболее эффективным методам измерения мощности, которые можно использовать в миллиметровом диапазоне длин волн (МДДВ), относятся методы с использованием диодных, термоэлектрических и калориметрических преобразователей, при этом калориметрические преобразователи характеризуются следующими достоинствами: большим динамическим и широким частотным диапазонами, а также возможностью обеспечения высокой точности измерения мощности – до $\pm (0,51,0) \%$ без учета погрешности из-за рассогласования [2–4].

К характеристикам, определяющим качество приемных преобразователей (ПП), относят коэффициент преобразования $K_{\text{п}}$ и коэффициент эффективности $K_{\text{э}}$. На практике наиболее употребим коэффициент эффективности $K_{\text{э}}$, который является безразмерной величиной, в основном, зависит от частоты и определяется из отношения

$$K_{\text{э}} = P_{\text{зам}} / P_{\text{и}}, \quad (1)$$

где $P_{\text{зам}}$ – замещающая мощность на постоянном токе или переменном токе на низкой частоте;
 $P_{\text{и}}$ – мощность на входе ПП.

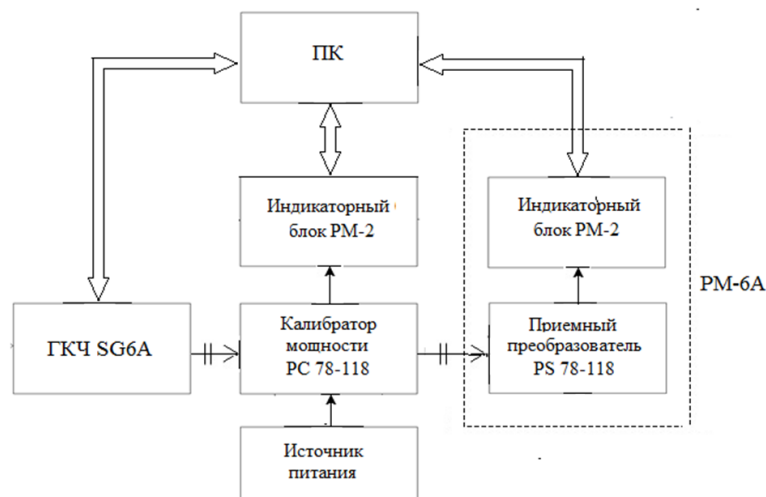
Тогда измеряемую мощность определяют как

$$P_{\text{и}} = P_{\text{зам}} / K_{\text{э}} = P_{\text{в}} / K_{\text{э}}, \quad (2)$$

где $P_{\text{в}}$ – показание ваттметра СВЧ.

В МДДВ для калориметрических преобразователей проявляется сильная зависимость значений коэффициента эффективности от частоты.

Автором был разработан измерительный комплекс поверки и калибровки измерителей мощности в МДДВ. В качестве примера приведена структура построения измерительного комплекса для поддиапазона частот 78,33–118,1 ГГц (рисунок) в случае калибровки измерителя мощности РМ-6А [5].



Структура построения измерительного комплекса для калибровки измерителя мощности РМ-6А
Structure of the construction of the measuring complex for calibration of the power meter RM-6A

Калибратор мощности РС78-118, с одной стороны, соединен с индикаторным блоком РМ-2, а с другой – с ПП PS78-118. Калибратор обеспечивает:

– измерение мощности на волновом выходе с отображением результата: в Вт, мВт, мкВт; в децибелах относительно уровня мощности 1 мВт (дБм); в децибелах относительно заданного уровня мощности (дБ);

- ручное, автоматическое или дистанционное управление работой калибратора;
- автоматическое переключение пределов измерения;
- возможность предварительной записи в память калибратора его калибровочных коэффициентов с целью использования их в процессе измерения для автоматической коррекции результатов измерения;
- расчет и отображение статистической информации по проведенным измерениям;
- обмен информацией с внешними устройствами через интерфейсы;
- возможность установки опорного уровня мощности при отображении результатов измерения в дБ;
- компенсацию смещения нуля в автоматическом или ручном режимах.

Принцип действия калибратора основан на разделении входного СВЧ сигнала на два сигнала, один из которых подается на вход калибруемого измерителя мощности. Второй сигнал, получающийся путем ответвления с помощью направленного ответвителя части мощности входного СВЧ сигнала, преобразуется в напряжение, пропорциональное мощности входного СВЧ сигнала, которое измеряется при использовании второго индикаторного блока РМ-2.

Частотная характеристика калибратора, зависящая от параметров направленного ответвителя, снимается предварительно при использовании векторного анализатора цепей и заносится во внутреннюю энергонезависимую память.

Благодаря подключению к персональному компьютеру с помощью интерфейсов измерительных блоков РМ-2 удается полностью автоматизировать процесс проведения калибровки.

Программное обеспечение комплекса позволяет:

- указывать частотные точки в пределах рабочего диапазона частот калибруемого измерителя мощности, в которых необходимо определить калибровочные коэффициенты;
- устанавливать на генераторе качающейся частоты необходимые частоты и снимать показания мощности на выходах первого и второго индикаторных блоков;
- вычислять коэффициент эффективности калибруемого измерителя мощности.

Одной из доминирующих составляющих погрешности при измерении мощности в СВЧ диапазоне является погрешность из-за отличия волновых сопротивлений измерительного тракта (ИТ) и ПП (погрешность рассогласования). В общем случае с учетом комплексных коэффициентов отражения ПП $\Gamma_{пп}$ и ИТ со стороны генератора $\Gamma_{ит}$ связь между действительным P и измеренным P_i следующая [6]:

$$P = P_i \frac{|1 - \Gamma_{пп} \Gamma_{ит}|^2}{(1 - |\Gamma_{пп}|^2)}. \quad (3)$$

Тогда относительная систематическая погрешность из-за рассогласования может быть оценена по формуле

$$\delta_{sp} = -\frac{P_i - P}{P} = \frac{(1 - |\Gamma_{пп}|^2)}{|1 - \Gamma_{пп} \Gamma_{ит}|^2} - 1. \quad (4)$$

В формуле (4) можно выделить две составляющие погрешности. Запишем их с учетом того, что можно пренебречь погрешностями 2-го порядка малости:

$$\delta_{sp} \approx -|\Gamma_{пп}|^2 + 2|\Gamma_{пп}| |\Gamma_{ит}| \cos \alpha, \quad (5)$$

где α – фазовый сдвиг между комплексными величинами $\Gamma_{пп}$ и $\Gamma_{ит}$.

С учетом возможных значений модулей коэффициентов отражений ПП и ИТ в МДДВ (эти значения соответствуют $K_{сти} = (1,2-1,5)$), систематическая погрешность из-за рассогласования в МДДВ может составлять от ± 3 до ± 12 %.

Для уменьшения систематической погрешности из-за рассогласования можно использовать либо определение скалярной величины $|\Gamma_{пп}|$ с помощью скалярного анализатора

цепей (САЦ), либо определение векторных величин $\Gamma_{\text{пп}}$ и $\Gamma_{\text{ит}}$ с помощью векторного анализатора цепей (ВАЦ) и применение соответствующих поправочных множителей.

В общем случае

$$P = P_{\text{и}} \mu, \quad (6)$$

где μ – поправочный множитель.

В случае использования САЦ поправочный множитель μ_1 , используемый для уменьшения систематической погрешности из-за рассогласования, имеет вид

$$\mu_1 = \frac{1}{(1 - |\Gamma_{\text{пп}}|^2)}. \quad (7)$$

Тогда предельные значения неисключенных остатков систематической погрешности из-за рассогласования составляет значения от 2 до 8 % (погрешностью из-за использования САЦ для коррекции как погрешностью второго порядка малости можно пренебречь), т. е. погрешность рассогласования уменьшается вдвое.

Для случая использования ВАЦ поправочный множитель μ_2 имеет вид

$$\mu_2 = \frac{|1 - \Gamma_{\text{пп}} \cdot \Gamma_{\text{ит}}|^2}{(1 - |\Gamma_{\text{пп}}|^2)}. \quad (8)$$

Обозначив через $\Gamma_{\text{ппс}}$, $\Gamma_{\text{ппс}}$ и $\Gamma_{\text{итс}}$, $\Gamma_{\text{итс}}$ измеренные с помощью ВАЦ действительные и мнимые составляющие комплексных величин $\Gamma_{\text{пп}}$ и $\Gamma_{\text{ит}}$, получаем

$$\mu_2 = \frac{(1 - \Gamma_{\text{ппс}} \cdot \Gamma_{\text{итс}} + \Gamma_{\text{ппс}} \Gamma_{\text{итс}})^2 + (\Gamma_{\text{ппс}} \cdot \Gamma_{\text{итс}} + \Gamma_{\text{ппс}} \Gamma_{\text{итс}})^2}{1 - \Gamma_{\text{ппс}}^2 - \Gamma_{\text{итс}}^2}. \quad (9)$$

При использовании поправочного множителя μ_2 предельные значения неисключенных остатков систематической погрешности из-за рассогласования можно оценить, исходя из точности определения комплексных значений $\Gamma_{\text{пп}}$ и $\Gamma_{\text{ит}}$ (предельные значения погрешностей можно принять не более $\pm 5,0$ %). Тогда предельные значения погрешностей из-за рассогласования составляют не более от $\pm 0,15$ до $\pm 0,6$ %.

Таким образом, применение ВАЦ и учет комплексных параметров $\Gamma_{\text{пп}}$ и $\Gamma_{\text{ит}}$ в поправочном множителе μ_2 позволяет снизить погрешность рассогласования более чем на порядок и сделать ее соизмеримой со всеми другими составляющими погрешностями при измерении мощности в МДДВ.

Разработан измерительный комплекс поверки и калибровки измерителей мощности в МДДВ с использованием калориметрических преобразователей с сухой нагрузкой и автокомпенсационным транзисторным преобразователем, которые вместе с направленным ответвителем образуют калибраторы мощности для различных поддиапазонов частот. Повышение точности при воспроизведении единицы мощности в комплексе и ее измерении можно добиться при коррекции с помощью поправочных коэффициентов доминирующей составляющей погрешности, обусловленной рассогласованиями в измерительном СВЧ тракте. Оценка этой составляющей погрешности, когда коррекция не производится, показывает, что ее значение может достигать от ± 3 до ± 12 %. Использование скалярных анализаторов цепей и соответствующего поправочного множителя позволяет уменьшить эту составляющую погрешности до уровня от ± 2 до ± 8 %, а применение ВАЦ и соответствующего поправочного множителя – уменьшить уровень до долей процента.

Список литературы

1. Билько М.И., Томашевский А.К. Измерение мощности на СВЧ. М.: Радио и связь. 1986. 168 с.
2. Clark R. Microcalorimeter as a national microwave standard // Proc. IEEE. Jan. 1986. Vol. 74, № 1. P. 102–104.

3. Akhiezer A., Senko A., Seredniy V. Millimeter wave power standards // IEEE Trans. Instr. Meas. Apr. 1997. Vol. 46, № 2. P. 495–498.
4. Создание эталона единицы мощности в диапазоне частот 37,5–178,6 ГГц на базе белорусских радиоизмерительных приборов / А.В. Гусинский [и др.] // Метрология и приборостроение. 2010. № 3. С. 12–20.
5. Калибратор для поверки ваттметров малой мощности в диапазоне частот 37,5–178,6 ГГц / А.В. Гусинский [и др.] // Тез. докл. XVI Международной крымской конференции «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». 2006. С. 809–810.
6. Juroshek J.A. A direct calibration method for measuring equivalent source mismatch // Microwave J. 1997. P. 106–118.

References

1. Bil'ko M.I., Tomashevskij A.K. Izmerenie moshhnosti na SVCh. M.: Radio i svjaz'. 1986. 168 s. (in Russ.)
2. Clark R. Microcalorimeter as a national microwave standard // Proc. IEEE. Jan. 1986. Vol. 74, № 1. P. 102–104.
3. Akhiezer A., Senko A., Seredniy V. Millimeter wave power standards // IEEE Trans. Instr. Meas. Apr. 1997. Vol. 46, № 2. P. 495–498.
4. Sozdanie jetalona edinicuy moshhnosti v diapazone chastot 37,5–178,6 GGc na baze belorusskih radioizmeritel'nyh priborov / A.V. Gusinskij [i dr.] // Metrologija i priborostroenie. 2010. № 3. S. 12–20. (in Russ.)
5. Kalibrator dlja poverki vattmetrov maloj moshhnosti v diapazone chastot 37,5–178,6 GGc / A.V. Gusinskij [i dr.] // Tez. dokl. XVI Mezhdunarodnoj krymskoj konferencii «SVCh tehnika i telekommunikacionnye tehnologii». 2006. S. 809–810. (in Russ.)
6. Juroshek J.A. A direct calibration method for measuring equivalent source mismatch // Microwave J. 1997. P. 106–118.

Сведения об авторах

Гусинский А.В., к.т.н., доцент, начальник Центра 1.9 НИЧ Белорусского государственного университета информатики и радиоэлектроники.

Information about the authors

Gusinsky A.V., PhD, associate professor, head of Center 1.9 of R&D Department of Belarussian State University of Informatics and Radioelectronics.

Адрес для корреспонденции

220013, Республика Беларусь,
г. Минск, ул. П. Бровки, 6,
Белорусский государственный университет
информатики и радиоэлектроники
тел. +375-17-293-84-42;
e-mail: avggus@mail.ru
Гусинский Александр Владимирович

Address for correspondence

220013, Republic of Belarus,
Minsk, P. Brovka st., 6,
Belarusian State University
of Informatics and Radioelectronics
tel. +375-17-293-84-42;
e-mail: avggus@mail.ru
Gusinsky Alexander Vladimirovich