

Рабочий эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–220 ГГц

А. В. Коудельный, И. М. Малай, В. А. Перепёлкин, И. П. Чирков

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений, г. п. Менделеево, Московская область, Российская Федерация, e-mail: akou@vniiftri.ru, malay@vniiftri.ru, prpl@vniiftri.ru, chirkov@vniiftri.ru

Показана возможность применения болометрических преобразователей сверхвысокочастотной мощности из состава Государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах ГЭТ 167-2017 в расширенном до 220 ГГц диапазоне частот. Проведённые исследования полупроводниковых болометрических преобразователей сверхвысокочастотной мощности в расширенном диапазоне частот подтвердили хорошее согласование и гладкие частотные характеристики коэффициента эффективности преобразователей. На основе полученных результатов исследований аттестован Государственный рабочий эталон единицы мощности электромагнитных колебаний 0,1–10 мВт в диапазоне частот от 37,5 до 220 ГГц 3.1.ZZT.0288.2018. Приведены технические характеристики рабочего эталона единицы мощности электромагнитных колебаний, полученные при его аттестации на аппаратуре ГЭТ 167-2017 в диапазоне частот 37,5–220 ГГц.

Ключевые слова: мощность, ваттметр, эталон, сверхвысокая частота.

Введение. Технологии производства средств измерений (СИ) электромагнитных величин динамично развиваются, что позволяет улучшить как функциональные, так и метрологические характеристики СИ. Применение новых технологий и материалов сформировало техническую возможность значительного увеличения верхней частоты ваттметров, анализаторов спектра и сигналов, векторных анализаторов цепей, генераторов сигналов.

Основными параметрами, характеризующими качество приборов, работающих в сверхвысокочастотном диапазоне (СВЧ) диапазоне, являются мощность СВЧ, спектральная плотность мощности шумового радиоизлучения и частота. От этих параметров в значительной степени зависит дальность и устойчивость приёма радиосигналов, качество связи, контроль качества используемых приёмо-передающих устройств, определение характеристик применяемых приборов.

До 2005 г в миллиметровой области спектра частот система государственного обеспечения единства измерений перечисленных величин опиралась на созданные в 1968–1991 гг. первичные эталоны спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения и мощности электромагнитных колебаний: ГЭТ 21-91 «Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот 0,002–178,3 ГГц», ГЭТ 46-73 «Государственный специальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 37,5 до 53,57 ГГц», ГЭТ 115-77 «Государственный специальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 53,57 до 78,33 ГГц» и

ГЭТ 146-85 «Государственный специальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 78,33 до 178,4 ГГц». Данные эталоны обеспечивали воспроизведение и передачу единиц мощности СВЧ и спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в волноводах в диапазоне частот до 178,4 ГГц [1–3].

В 2005 г. в Российской Федерации был разработан и утверждён Государственный первичный эталон единицы мощности СВЧ в диапазоне частот от 37,5 до 53,57 ГГц ГЭТ 167-2005, хранящийся во ВНИИФТРИ [4]. В период 2013–2016 гг. во ВНИИФТРИ проведён цикл работ по совершенствованию указанного эталона с целью улучшения его технических характеристик в части увеличения точности измерений и расширения частотного диапазона. По завершению указанных работ был утверждён Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,50 до 78,33 ГГц ГЭТ 167-2017 [5]. Однако этого оказалось недостаточно для решения задач метрологического обеспечения разработок в области СВЧ на частотах до 220 ГГц [6–8].

Целью настоящей работы является создание рабочего эталона (РЭ) единицы мощности СВЧ в диапазоне частот до 220 ГГц на основе проведённых исследований возможностей эталона ГЭТ 167-2017.

Результаты исследования возможностей ГЭТ 167-2017 в расширенном диапазоне частот. В основу воспроизведения единицы мощности электромагнитных колебаний ГЭТ 167-2017 положен метод замещения, при котором измеряемая поглощённая мощность СВЧ замещается известной мощностью постоянного тока [9]. Воспроизведение единицы

мощности СВЧ осуществляется с помощью эталонного ваттметра. Эталонный ваттметр состоит из комплекта тепловых эталонных преобразователей поглощаемой мощности и системы, обеспечивающей автоматическое замещение мощности СВЧ мощностью постоянного тока. Значение мощности замещения рассчитывается на основе измерений напряжения и сопротивления постоянному току.

В основе тепловых преобразователей мощности могут использоваться термопары или болометры [10, 11]. Применение термопарных преобразователей для прецизионных измерений требует поддержания температуры преобразователя и рассеиваемой в нём мощности для исключения нелинейности термопары, что, одновременно со снижением согласования таких преобразователей с ростом частоты, осложняет их использование. Болометры в виде термисторов имеют узкий диапазон частот, в котором удаётся обеспечить удовлетворительное согласование.

Как показали проведённые исследования, полупроводниковые болометрические преобразователи в составе ГЭТ 167-2017 имеют исключительно гладкие частотные характеристики коэффициента эффективности и хорошее согласование в диапазоне частот волновода [12, 13]. В настоящей работе авторы выполнили дополнительные исследования с целью определения возможности применения болометрических преобразователей на частотах, значительно превышающих верхнюю частоту 78,33 ГГц.

Качественное рассмотрение работы преобразователя при одномодовом режиме свидетельствует о плавной зависимости коэффициента эффективности от частоты падающей электромагнитной волны. Однако в расширенном диапазоне частот в волноводе возбуждаются высшие типы волн. Такие волны при взаимодействии с чувствительным элементом преобразователей мощности СВЧ могут приводить к появлению немонотонной зависимости вносимых потерь от частоты падающей электромагнитной волны. При этом вид частотной зависимости коэффициента эффективности может иметь более сложную форму. Характер данной частотной зависимости определяется перераспределением энергии между модовыми составляющими электромагнитной волны, которая распространяется в области волновода, частично заполненного полупроводником.

Следовательно, необходимо экспериментально оценить частотные коэффициенты исследуемых преобразователей мощности. Ваттметр поглощаемой мощности на частоте измерений характеризуется калибровочным коэффициентом K_k , который определяется

как отношение показаний ваттметра N к действительному значению мощности $P_{\text{СВЧ}}$ на входе этого ваттметра:

$$P_{\text{СВЧ}} = N / K_k.$$

Для тепловых ваттметров справедливо равенство [2]:

$$K_k = K_3 (1 - |\Gamma|^2),$$

где $|\Gamma|$ – коэффициент отражения входа приёмного преобразователя на данной частоте; K_3 – коэффициент эффективности, определяющий степень эквивалентности реакции преобразователя на воздействие одинаковой мощности СВЧ и мощности постоянного тока или тока низкой частоты.

Для измерений коэффициента эффективности K_3 полупроводниковых болометрических преобразователей в расширенном диапазоне частот авторы предложили использовать установку калориметрическую, входящую в состав ГЭТ 167-2017. Калориметрическую установку дополнили генератором СВЧ, работающим в миллиметровом диапазоне длин волн, и соответствующим волноводным переходом. Блок-схема установки приведена на рис. 1.

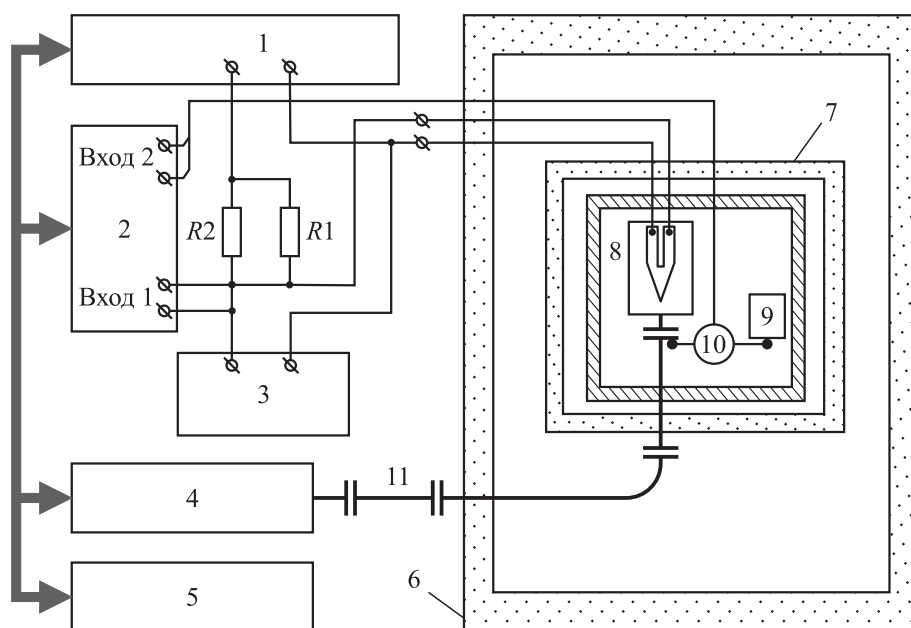


Рис. 1. Схема калориметрической установки:

1 – калибратор постоянного напряжения; 2 – нановольтметр; 3 – магазин сопротивлений; 4 – генератор сигналов СВЧ; 5 – компьютер; 6 – теплоизолированная камера; 7 – микрокалориметрический компаратор; 8 – полупроводниковый болометрический преобразователь; 9 – тело сравнения; 10 – чувствительный детектор разности температур; 11 – волноводно-волноводный переход на сечение 3,6×1,8 мм

Fig. 1. Calorimetric setup diagram:

1 – constant voltage calibrator; 2 – nanovoltmeter; 3 – resistance store; 4 – microwave signal generator; 5 – computer; 6 – thermally insulated chamber; 7 – microcalorimetric comparator; 8 – semiconductor bolometric converter; 9 – body comparison; 10 – sensitive temperature difference detector; 11 – waveguide-waveguide transition to a section of 3,6×1,8 mm

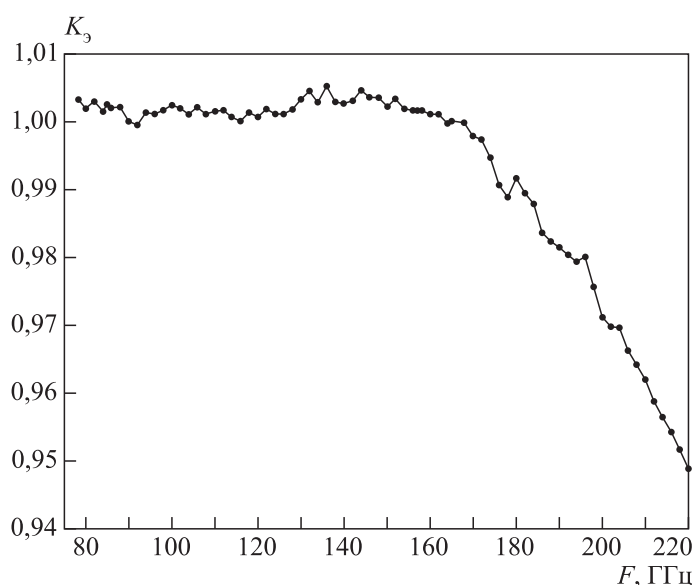


Рис. 2. Частотная зависимость K_3 приёмного преобразователя в диапазоне частот 78,33–220 ГГц

Fig. 2. The frequency dependence of the K_3 of the receiving converter in the frequency range from 78,33 to 220 GHz

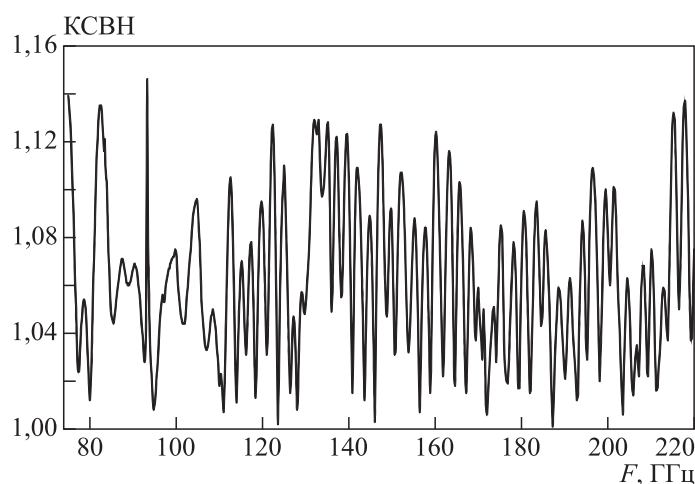


Рис. 3. Коэффициент стоячей волны по напряжению (КСВН) преобразователя в расширенном диапазоне частот

Fig. 3. Voltage standing wave ratio (VSWR) in an extended frequency rang

Автоматическое замещение мощности СВЧ, рассеянной в болометре преобразователя, реализуется с помощью мостовой схемы, которая образована прецизионными резисторами R_1 , R_2 , магазином сопротивлений 3 и чувствительным элементом (болометром) преобразователя мощности СВЧ 8. Постоянное напряжение на питающую диагональ моста подаётся с прецизионного источника. Напряжение сигнальной диагонали моста подаётся на вход Вход 1 нановольтметра 2. Управление калибратором напряжения 1 и нановольтметром осуществляется с помощью

компьютера 5 через USB-интерфейс. Микрокалориметрический компаратор 7 размещён в теплоизолированной камере 6. Регистрирующая аппаратура и генератор сигналов СВЧ 4 находятся вне этой камеры для минимизации тепловых воздействий на компаратор. Процесс автоматического замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока производится под управлением компьютерной программы. Во время работы микрокалориметра программа, кроме автобалансировки мостовой схемы, осуществляет непрерывные измерения сигнала с чувствительного детектора разности температур 10, включённого между фланцем полупроводникового болометрического преобразователя и телом сравнения 9.

Измерения производили микрокалориметром с сечением волновода $3,6 \times 1,8$ мм. Такой микрокалориметр применяется в ГЭТ 167-2017 в диапазоне частот 53,57–78,33 ГГц. К входу микрокалориметра с помощью переходов 11 присоединяли высокочастотные генераторы сигналов с сечениями волноводных трактов $2,4 \times 1,2$ и $1,6 \times 0,8$ мм, а также волновод типа WR5 сечением $1,295 \times 0,648$ мм. Диапазоны частот указанных приборов составили соответственно 78,33–118,1; 118,1–178,4; 140–220 ГГц.

Потери мощности СВЧ в тепловой развязке микрокалориметра приводят к дополнительному нагреву исследуемого преобразователя мощности и не могут учитываться микрокалориметром. Введение поправки на влияние потерь мощности СВЧ в тепловой развязке микрокалориметра уменьшает погрешность измерений. В уравнении измерений используется коэффициент тепловой развязки. Этот коэффициент связывает мощность, падающую на вход аттестуемого болометрического преобразователя, с той частью выделившейся в развязке мощности, которая вносит вклад в отклик микрокалориметра. Для экспериментального определения влияния коэффициента тепловой развязки применяют метод короткого замыкания выхода тепловой развязки с одновременным контролем падающей на короткозамыкатель мощности СВЧ [14–16]. Контроль падающей мощности при измерениях потерь в тепловой развязке осуществляли ваттметром, подключённым к боковому плечу направленного ответвителя. При этом точность измерений была ограничена эффективным коэффициентом отражения выхода направленного ответвителя.

Использование микрокалориметра в расширенном диапазоне частот с учётом проведённых дополнительных исследований влияния потерь в тепловой развязке на результаты измерения K_3 на частотах до 220 ГГц позволили внести поправки в результаты измерений и найти коэффициент эффективности преобразователя мощности в расширенном диапазоне частот.

На рис. 2 показана экспериментально определённая частотная зависимость коэффициента эффективности приёмного преобразователя мощности в диапазоне частот 78,33–220 ГГц. На рис. 3 приведены результаты измерения коэффициента стоячей волны по напряжению (КСВН) входа болометрического преобразователя, выполненного в тракте $3,6 \times 1,8$ мм, в расширенном диапазоне частот с применением волноводных пирамидальных переходов « $3,6 \times 1,8$ » WR10»,

«WR10>WR6» и «WR10>WR5». Для оценки влияния переходов на результаты измерений КСВН определили коэффициенты отражения S_{11} и передачи S_{21} пары переходов, соединённых между собой со стороны сечения $3,6 \times 1,8$ мм.

Таким образом, на основе измеренных значений коэффициента эффективности K_3 , коэффициентов отражения S_{11} , S_{22} и коэффициентов передачи S_{12} , S_{21} переходов, используемых при измерениях в трактах сечений $2,4 \times 1,2$ мм, $1,6 \times 0,8$ мм и WR5, можно определить калибровочный коэффициент преобразователя:

$$K_K = K_3 (1 - |\Gamma|^2) \frac{|S_{21}|^2}{|(1 - S_{22})\Gamma|^2} \cong K_3 (1 - |\Gamma|^2) |S_{21}|^2,$$

где $|\Gamma|$ – коэффициент отражения преобразователя с переходом.

Проведённые авторами исследования подтвердили возможность применения полупроводниковых болометрических преобразователей мощности СВЧ в расширенном диапазоне частот. Измеренные технические характеристики полупроводниковых болометрических преобразователей, аналогичных по конструкции преобразователям из состава ГЭТ 167-2017, такие как слабая частотная зависимость коэффициента эффективности K_3 , хорошее согласование с трактом СВЧ, отсутствие потерь на излучение и приемлемое время установления показаний, позволяют измерять мощность СВЧ на любой произвольной частоте в диапазоне частот 53,57–220 ГГц.

Метрологические характеристики РЭ единицы мощности СВЧ в диапазоне частот 37,5–220 ГГц. На основании выполненных исследований был разработан и аттестован РЭ единицы мощности электромагнитных колебаний 0,1–10 мВт в диапазоне частот 37,5–220 ГГц, регистрационный номер 3.1.ZZT.0288.2018.

Метрологические характеристики
РЭ 3.1.ZZT.0288.2018 в диапазоне частот
37,5–220 ГГц

Диапазон измерения мощности.....	0,1–10 мВт
Диапазон частот	37,5–220 ГГц
Модуль коэффициента отражения.....	не более 0,10
Доверительные границы относительной погрешности результатов измерений при доверительной вероятности 0,95 в поддиапазонах частот	
37,5–78,33 ГГц.....	$\pm 0,8$ %
78,33–118,1 ГГц.....	$\pm 3,0$ %
118,1–178,4 ГГц.....	$\pm 4,0$ %
178,4–220 ГГц.....	$\pm 5,0$ %

Проанализировав данные характеристики РЭ 3.1.ZZT.0288.2018, можно сделать вывод, что в расширенном диапазоне частот точность измерений снижается в 4–6 раз. Основные источники погрешности связаны с измерениями коэффициента эффективности в микрокалориметре и измерением коэффициента передачи использованных переходов.

Заключение. Проведённые исследования болометрических преобразователей мощности позволили оценить их метрологические характеристики в расширенном диапазоне частот, а также разработать рабочий эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–220 ГГц РЭ 3.1.ZZT.0288.2018. Рабочий эталон обеспечивает поверку и калибровку таких СИ, как ваттметры, анализаторы спектра, генераторы сигналов. Однако полученные результаты не могут в полной мере обеспечить потребности в метрологическом обеспечении измерений СВЧ-мощности предприятий, выпускающих продукцию в области сверхвысоких частот с длинами волн 2–3 мм, что связано с заметным снижением точности измерений мощности с ростом частоты. В связи с этим разработка высокоточных СИ мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот до 220 ГГц является актуальной задачей, решение которой позволит:

обеспечить единство измерений мощности электромагнитных колебаний в этом диапазоне частот при решении задач метрологического обеспечения существующих и перспективных радиотехнических систем, а также при контроле параметров изделий электронной компонентной базы;

создать технологический задел в области производства ваттметров миллиметрового диапазона длин волн в целях обеспечения электронной промышленности СИ мощности отечественного производства;

обеспечить в Российской Федерации единую методическую основу в области измерений мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот до 220 ГГц.

Список литературы

1. Тищенко В. А., Балаханов М. В., Лукьянов В. И., Перепёлкин В. А., Чирков И. П., Колотыгин С. А., Мильников А. В. Создание и совершенствование эталонной базы в области радиочастотных электромагнитных измерений. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2013. С. 112–135.
2. Билько М. И., Томашевский А. К., Шаров П. П., Баймуратов Е. А. Измерение мощности на СВЧ. М.: Советское Радио, 1976. 168 с.
3. Ахизер А. Н., Данильченко В. П., Сенько А. П., Терехов М. В., Гордеев К. К., Калиберда Л. Г., Терзова В. П. Государственный специальный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот 53,57–78,33 ГГц // Измерительная техника. 1979. № 7. С. 3–5.
4. Российская Метрологическая Энциклопедия. Второе издание / Под редакцией В. В. Окрепилова. В двух томах. Том 1. СПб.: Лики России, 2015. 565 с.
5. Перепёлкин В. А., Семёнов В. А., Чирков И. П., Павлов А. В., Жогун М. В., Коудельный А. В. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 78,33 ГГц ГЭТ 167-2017 // Измерительная техника. 2018. № 10. С. 3–6. DOI: 10.32446/0368-1025it.2018-10-3-6
6. Малай И. М. Задачи развития системы метрологического обеспечения в области радиотехнических измерений //

Сборник докладов XI Всероссийской научно-технической конференции «Метрология в радиоэлектронике». В 2-х томах, Менделеево, 19–21 июня 2018. Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018. С. 5–18.

7. Семёнов В. А., Коудельный А. В., Перепёлкин В. А., Чирков И. П. Перспективы развития эталонов в области измерений мощности СВЧ в радиочастотных трактах // Альманах современной метрологии. 2019. № 2. С. 46–64.

8. Ronald A. Ginley., *Traceability for microwave power measurements: Past, present, and future*, Proceedings of the 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON-2015), Cocoa Beach, FL, USA, April 13–15, 2015, Cocoa Beach, IEEE, 2015, pp. 1–5. DOI:10.1109/WAMICON.2015.7120431

9. Fantom A. E., *Radio frequency and Microwave Power Measurements*, ed. A. E. Bailey, Dr. O. C. Jones, Dr. A. C. Lynch, London, Peter Peregrinus Ltd., 1990, 278 p. DOI: 10.1049/pbel007e

10. By Xiaohai Cui, Yu Song Meng, Yueyan Shan and Yong Li, *Microwave Power Measurements: Standards and Transfer Techniques*, URL: <https://www.intechopen.com/books/new-trends-and-developments-in-metrology/microwave-power-measurements-standards-and-transfer-techniques> (дата обращения: 05.12.2019). DOI: 10.5772/60442

11. Rolf H. Judaschke, Karsten Kuhlmann, Thomas M. Reichel and Werner Perndl, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, vol. 64, no. 12, pp. 3440–3450. DOI: 10.1109/TIM.2015.2454632

12. Коудельный А. В., Мильников А. В., Перепёлкин В. А. Разработка и исследование полупроводниковых болометрических преобразователей мощности СВЧ оконечного типа. Исследования в области радиотехнических измерений // Сборник научных трудов. М.: ВНИИФТРИ, 1987. С. 27–34.

13. Chirkov I. P., Perepyolkin V. A., Semyonov V. A. *Pervichnyj etalon moshchnosti elektromagnitnykh kolebanij Rossii*, Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2014) "Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor", Rio de Janeiro, Brazil, August 24–29, 2014, Rio de Janeiro, Brazil IEEE, 2014, pp. 166–167. DOI: 10.1109/CPEM.2014.6898311

14. Weihai Fang, Growley T. R., *Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor*, Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2014) "Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor", Rio de Janeiro, Brazil, August 24–29, 2014, Rio de Janeiro, Brazil, IEEE, 2014, pp. 746–747. DOI: 10.1109/CPEM.2014.6898601

15. Rolf Judaschke, J. Urgan Ruhaak, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58, no. 4, pp. 1104–1108. DOI 10.1109/TIM.2008.2012381

16. Xiaohai Cui, T. P. Crowley, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60(7). 2011, vol. 60, no. 7, p. 2690–2695. DOI: 10.1109/TIM.2011.2130990

References

1. Tishchenko V. A., Balakhanov M. V., Luk'yanov V. I., Perepelkin V. A., Chirkov I. P., Kolotygin C. A., Myl'nikov A. V., *Sozдание i sovershenstvovanie etalonnnoy bazy v oblasti radiochastotnykh elektromagnitnykh izmerenii*, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2013, pp. 112–135 (in Russian).

2. Bil'ko M. I., Tomashevskii A. K., Sharov P. P., Baimuratov E. A., *Izmerenie moshchnosti na SVCh*, Moscow, Sovetskoe Radio Publ., 1976 (in Russian).

3. Akhiezer A. N., Danil'chenko V. P., Sen'ko A. P., Terekhov M. V., Gordeev K. K., Kaliberda L. G., Terzhova V. P., *Measurement Techniques*, 1979, vol. 22, no. 7, pp. 767–771.

4. *Rossiiskaya Metrologicheskaya Entsiklopediya*, ed. V. V. Okrepilov, T. 1, Sankt-Peterburg, Liki Rossii Publ., 2015, 565 p. (in Russian).

5. Perepelkin V. A., Semenov V. A., Chirkov I. P., Pavlov A. V., Zhogun M. V., Koudel'nyi A. V. *Measurement Techniques*, 2018, vol. 60, no. 7, pp. 973–978. DOI: 10.1007/s11018-018-1303-y

6. Malai I. M. *Zadachi razvitiya sistemy metrologicheskogo obespecheniya v oblasti radiotekhnicheskikh izmerenii*, Proceedings of the All-Russian XI Scientific and Technical Conference "Metrology in radio electronics", Mendeleevo, Russia, June, 19–21, 2018. Mendeleevo, FGUP "VNIIFTRI", 2018. pp. 5–18.

7. Semenov V. A., Koudel'nyi A. V., Perepelkin V. A., Chirkov I. P., *Al'manakh sovremennoi metrologii*, 2019, no. 2, pp. 46–64 (in Russian).

8. Ronald A. Ginley, *Traceability for microwave power measurements: Past, present, and future*, Proceedings of the 16th Annual Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON-2015), Cocoa Beach, FL, USA, April 13–15, Cocoa Beach, IEEE, 2015, pp. 1–5. DOI:10.1109/WAMICON.2015.7120431

9. Fantom A. E., *Radio frequency and Microwave Power Measurements*, ed. A. E. Bailey, Dr. O. C. Jones, Dr. A. C. Lynch, London, Peter Peregrinus Ltd., 1990, 278 p. DOI: 10.1049/pbel007e

10. By Xiaohai Cui, Yu Song Meng, Yueyan Shan and Yong Li, *Microwave Power Measurements: Standards and Transfer Techniques*. available at: <https://www.intechopen.com/books/new-trends-and-developments-in-metrology/microwave-power-measurements-standards-and-transfer-techniques> (accessed: 05.12.2019). DOI: 10.5772/60442

11. Rolf H. Judaschke, Karsten Kuhlmann, Thomas M. Reichel and Werner Perndl, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2013, vol. 64, no. 12, pp. 3440–3450. DOI: 10.1109/TIM.2015.2454632

12. Koudel'nyi A. V., Myl'nikov A. V., Perepelkin V. A., *Razrabotka i issledovanie poluprovodnikovyykh bolometricheskikh preobrazovatelei moshchnosti SVCh okonechnogo tipa*, Issledovaniya v oblasti radiotekhnicheskikh izmerenii. Collection of proceedings, Mendeleevo, VNIIFTRI, 1987, pp. 27–34 (in Russian).

13. Igor Chirkov, Vladimir Perepelkin, Vadim Semenov, *Russian Primary standards of microwave power*, Proceedings of

the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2014), "Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor", Rio de Janeiro, Brazil, August 24–29, 2014, Rio de Janeiro, Brazil IEEE, 2014, pp. 166–167. DOI: 10.1109/CPEM.2014.6898311

14. Weihai Fang, Growley T. R., *Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor*, Proceedings of the Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM-2014) "Improvement in the Evaluation of a Rectangular Waveguide Microcalorimeter Correction Factor", Rio de Janeiro, Brazil, August 24–29, 2014,

Rio de Janeiro, Brazil, IEEE, 2014, pp. 746–747. DOI: 10.1109/CPEM.2014.6898601

15. Rolf Judaschke, J. Urgan Ruhaak, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 2009, vol. 58, no. 4, pp. 1104–1108. DOI 10.1109/TIM.2008.2012381

16. Xiaohai Cui, T. P. Crowley, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement* 60(7). 2011, vol. 60, no. 7, pp. 2690–2695. DOI: 10.1109/TIM.2011.2130990

Дата поступления: 20.10.2019.

Дата принятия: 25.11.2019.

The working standard of the unit of power of electromagnetic waves in the frequency range from 37,5 to 220 GHz

A. V. Koudelny, I. M. Malay, V. A. Perepelkin, I. P. Chirkov

Russian metrological institute of technical physics and radio engineering measurements, Mendeleev, Moscow region, Russian Federation, e-mail: akou@vniiftri.ru, malay@vniiftri.ru, prpl@vniiftri.ru, chirkov@vniiftri.ru

The possibility of using bolometric converters of microwave power from the State primary standard of the unit of power of electromagnetic waves in waveguide and coaxial paths GET 167-2017, which has a frequency range from 37,5 to 78,33 GHz, in an extended frequency range up to 220 GHz, is shown. Studies of semiconductor bolometric converters of microwave power in an extended frequency range have confirmed good agreement and smooth frequency characteristics of the effective efficiency factor of the converters. Based on the research results, the State working standard of the unit of power of electromagnetic waves of 0,1–10 mW in the frequency range from 37,5 to 220 GHz 3.1.ZZT.0288.2018 was approved. The technical characteristics of the working standard of the unit of power of electromagnetic oscillations in an extended frequency range from 37,5 to 220 GHz are given.

Key words: power, power meter, standard, ultrahigh frequency.