

Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–118,1 ГГц ГЭТ 167-2021

Александр Владимирович Коудельный^{1✉}, Иван Михайлович Малай^{2✉}, Алексей Игоревич Матвеев³,
Владимир Анатольевич Перепелкин⁴, Игорь Петрович Чирков⁵

1, 2, 3, 4, 5 Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических и радиотехнических измерений,
г. п. Менделеево, Московская обл., Россия

¹akou@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-2895-8408>

²malay@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3148-7336>

³mtvv@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6916-1035>

⁴prpl@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5665-405X>

⁵chirkov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7722-2184>

Аннотация. Рассмотрены вопросы измерения мощности электромагнитных колебаний как основного параметра, характеризующего интенсивность электромагнитного излучения на сверхвысоких частотах в закрытых передающих трактах. Измерения мощности электромагнитных колебаний в диапазоне миллиметровых длин волн широко применяются в радиосвязи, радионавигации, радиолокации. С целью обеспечения единства измерений мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 78,33–118,1 ГГц усовершенствован Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот от 37,5 до 78,33 ГГц ГЭТ 167-2017. Для увеличения верхней частоты ГЭТ 167-2017 разработан комплект болометрических измерительных преобразователей в волноводных трактах 2,4×1,2 и 2,54×1,27 мм (WR10), калориметрическая и компарирующая установки. Приведены структурная схема, технические характеристики и результаты метрологических исследований Государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот 37,5–118,1 ГГц ГЭТ 167-2021. С учётом особенностей, вызванных уменьшением сечения волноводного тракта, уточнены методики оценки составляющих погрешностей воспроизведения и передачи единицы мощности электромагнитных колебаний. Результаты исследований подтвердили высокие показатели точности эталона, который теперь занимает лидирующую позицию среди аналогичных национальных эталонов.

Ключевые слова: мощность электромагнитных колебаний, первичный эталон, микрокалориметр, ваттметр

Для цитирования: Коудельный А. В., Малай И. М., Матвеев А. И., Перепелкин В. А., Чирков И. П. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 37,5–118,1 ГГц ГЭТ 167-2021 // Измерительная техника. 2022. № 6. С. 3–8.
<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-6-3-8>

State primary standard of the unit of power of electromagnetic oscillations in the frequency range from 37.5 to 118.1 GHz GET 167-2021

Alexander V. Koudelny^{1✉}, Ivan M. Malay^{2✉}, Alexey I. Matveev³, Vladimir A. Perepelkin⁴, Igor P. Chirkov⁵

1, 2, 3, 4, 5 Russian Metrological Institute of Technical Physics and Radio Engineering, Mendeleevo, Moscow region, Russia

¹akou@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-2895-8408>

²malay@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0003-3148-7336>

³mtvv@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-6916-1035>

⁴prpl@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-5665-405X>

⁵chirkov@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7722-2184>

Abstract. Radio frequency power is the main parameter characterizing the intensity of electromagnetic radiation at microwave frequencies in closed transmission paths. Measurement of the RF power in the millimeter wavelength range is widely used in radio communications, radio navigation, and radar. In order to ensure the uniformity of measurements of the RF power in the frequency range from 78.33 to 118.1 GHz, the State Primary Standard of the unit of RF power in waveguide paths in the frequency range from 37.5 to 78.33 GHz GET 167-2017

has been improved. To ensure the possibility of increasing the upper frequency of the GET 167-2017, the development of sets of bolometric measuring transducers in waveguide paths 2.4×1.2 and 2.54×1.27 mm (WR10), calorimetric and comparing installations. The block diagram, technical characteristics and results of metrological studies of the State primary standard of the unit of RF power in waveguide paths in the frequency range of 37.5–118.1 GHz GET 167-2021 are given. Taking into account the features caused by a decrease in the cross section of the waveguide path, methods for estimating error components are refined. reproduction and transmission of a unit of RF power. The research results confirmed the high accuracy of the standard, which now occupies a leading position among similar national standards.

Keywords: radio frequency power, primary standard, microcalorimeter, power meter

Введение. Наблюдаемый за последние десятилетия рост количества новых разработок радиотехнических систем и устройств, работающих в диапазоне миллиметровых волн, создал соответствующий спрос на точные измерения на частотах от 40 до 300 ГГц. При разработке и эксплуатации таких систем решение задач метрологического обеспечения испытаний и контроля качества потребовало применения широкого спектра измерительных приборов: генераторов сигналов, ваттметров сверхвысокой частоты (СВЧ), анализаторов спектра, векторных анализаторов, аттенюаторов и т. д. Требования к диапазонам частот и мощностей составляют основу метрологических характеристик радиотехнических систем, что определяет необходимость прослеживаемости измерений этих величин к национальным первичным эталонам. В этом контексте разработки первичных эталонов мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот 75–110 ГГц и исследования возможности прослеживаемости измерений мощности к эталонам на более высоких частотах, выполненные в последние годы в ведущих национальных метрологических институтах [1–3], оказались вполне обоснованными, а исследования по разработке средств измерений (СИ) мощности электромагнитных колебаний в диапазоне сверхвысоких частот весьма актуальными.

Во ВНИИФТРИ разработана аппаратура высшей точности для измерений мощности электромагнитных колебаний миллиметровых длин волн. Основная цель разработки аппаратуры – обеспечение единства измерений мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах сечениями 2.4×1.2 и 2.54×1.27 мм (тракт WR10), обеспечение метрологической прослеживаемости к национальному эталону Российской Федерации при калибровке и поверке ваттметров СВЧ, измерительных генераторов и приёмников, используемых в радиолокационной и радионавигационной технике, технике связи, радиовещании и телевидении. Достигнутая точность позволяет воспроизводить единицу мощности СВЧ в диапазоне 78,33–118,1 ГГц и передавать её рабочим эталонам и СИ мощности в указанном диапазоне частот.

Созданная аппаратура использована при совершенствовании Государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах ГЭТ 167-2017 [4] и обеспечивает увеличение его верхней частоты с 78,33 ГГц до 118,1 ГГц. В результате проведённых

исследований и разработок утверждён Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 118,1 ГГц ГЭТ 167-2021¹.

Состав ГЭТ 167-2021. Основу практически всех национальных эталонов единицы мощности СВЧ как в коаксиальных, так и в волноводных трактах составляют приёмные тепловые преобразователи (термисторные, болометрические, термоэлектрические), работающие по принципу замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока [5–7]. Воспроизведение единицы мощности СВЧ в микрокалориметре обеспечивает совпадение (единство) ватта электромагнитного излучения и ватта электрической мощности постоянного тока, связывая единицу мощности СВЧ с эталонами основных единиц Международной системы единиц.

ГЭТ 167-2021 включает в себя калориметрическую и компарирующую установки, эталонные ваттметры, комплект вспомогательных СИ и оборудования.

Состав калориметрической установки: микрокалориметрические компараторы в волноводных трактах $5,2 \times 2,6$; $3,6 \times 1,8$; $2,4 \times 1,2$ мм и $2,54 \times 1,27$ мм (WR10); первичные болометрические измерительные преобразователи ПБП-5, ПБП-3, ПБП-2.4, ПБП-WR10; нановольтметр; устройство управления.

Компарирующая установка предназначена для сличения эталонных ваттметров, входящих в состав ГЭТ 167-2021, а также для передачи единицы мощности рабочим эталоном. Установка работает в диапазоне частот 37,5–118,1 ГГц и состоит из компараторов в трактах $5,2 \times 2,6$; $3,6 \times 1,8$; $2,4 \times 1,2$ мм и WR22, WR15, WR10.

В компарирующей установке можно выделить две функциональные части – генераторную и индикационную. Генераторная часть обеспечивает требуемые значения мощности и частоты сигнала. Заданная частота поддерживается в процессе измерений с помощью модуля фазовой автоподстройки частоты. Индикационная часть обеспечивает необходимые режимы работы приёмных преобразователей мощности СВЧ и преобразовывает измеряемую мощность СВЧ в цифровой код. Обе части работают согласованно под управлением компьютера со специализированным программным обеспечением. В качестве ваттметров проходного типа используются специально отобранные направленные ответвители с преобразователями мощности в боковом плече.

¹ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 февраля 2021 г. № 66 «Об утверждении Государственного первичного эталона единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 118,1 ГГц ГЭТ 167-2021».

Вспомогательные средства измерений и оборудование – это средства контроля окружающей температуры, давления, влажности, волноводно-волноводные и волноводно-коаксиальные переходы, управляемые выключатели мощности СВЧ и пр.

Принцип работы ГЭТ 167-2021. Основа ГЭТ 167-2021 – эталонные ваттметры, для определения характеристик которых применяется калориметрическая установка, а передача единицы мощности СВЧ происходит с помощью модернизированной компарирующей установки.

Эталонный ваттметр из состава ГЭТ 167-2021 аналогичен по конструкции эталонному ваттметру из состава ГЭТ 167-2017 [7, 9] и состоит из автобалансной мостовой схемы и болометрического преобразователя мощности СВЧ. Чувствительный элемент преобразователя изготовлен в виде V-образного поглощающего клина из монокристаллического кремния с разрезом вдоль продольной оси [9]. К контактам, сформированным на концах V-образного поглощающего элемента, припаяны проволочные выводы для подключения поглощающего элемента к системе автоматического замещения. Конструкция преобразователя позволяет добиться хорошего согласования чувствительного элемента с трактом СВЧ, модуль коэффициента отражения входа ваттметра находится в диапазоне 0,01–0,07.

Работа преобразователя мощности СВЧ основана на методе замещения. В исходном состоянии мостовая схема уравновешена в результате подачи на преобразователь напряжения U_0 , приводящего к установлению рабочего сопротивления R_6 болометра. При этом в чувствительном элементе преобразователя рассеивается мощность смещения U_0^2/R_6 . При подаче мощности СВЧ значительная её часть поглощается в чувствительном элементе и вызывает дополнительный нагрев болометра. Изменение сопротивления болометра, вызванное нагревом чувствительного элемента, приводит к разбалансу болометрического моста. При подаче мощности СВЧ мост автоматически уменьшает мощность подогрева постоянным током на значение, необходимое для сохранения баланса. По окончании переходного процесса напряжение постоянного тока, подаваемое на преобразователь, уменьшается до значения U_p и на чувствительном элементе рассеивается мощность U_p^2/R_6 .

Мощность замещения постоянного тока P_{3M} и мощность СВЧ, поглощённую в преобразователе $P_{СВЧ}$, рассчитаем соответственно по формулам

$$P_{3M} = (U_0^2 - U_p^2) / R_6; \quad (1)$$

$$P_{СВЧ} = P_{3M} / K_{эфф}, \quad (2)$$

где $K_{эфф}$ – коэффициент эффективности преобразователя, определяемый в микрокалориметре.

Мощность СВЧ, падающую на вход преобразователя P_n , определим как

$$P_n = \frac{P_3}{K_{эфф}(1 - |\Gamma|^2)} = \frac{P_3}{K_k}, \quad (3)$$

где Γ – коэффициент отражения входа преобразователя мощности СВЧ; K_k – калибровочный коэффициент преобразователя.

Коэффициент эффективности $K_{эфф}$ болометрического преобразователя измеряют в сухом дифференциальном микрокалориметре теплового потока. Это общепризнанный способ определения $K_{эфф}$, применяемый национальными метрологическими институтами для независимого воспроизведения единицы мощности СВЧ. Выделяемые мощность СВЧ и мощность замещения, преобразованные в приращение температуры преобразователя, сравнивают с помощью детекторов разности температур – чувствительных чип-термисторов, расположенных на опорных плоскостях симметричных теплоизолированных каналов микрокалориметра.

Схематичное изображение узлов микрокалориметра приведено на рис. 1. В конструкции двойного микрокалориметра использована симметричная тепловая схема, содержащая два идентичных измерительных канала (тепловые развязки) – рабочий и опорный. Тепловые развязки должны быть максимально близки по тепловым свойствам и служат для тепловой изоляции аттестуемого преобразователя от теплового экрана при сохранении возможности подачи мощности СВЧ на вход преобразователя. Одна развязка обеспечивает тепловой поток от аттестуемого преобразователя к теплового экрана и служит подводящим волноводом, вторая соединяет опорный преобразователь с тепловым экраном. Таким

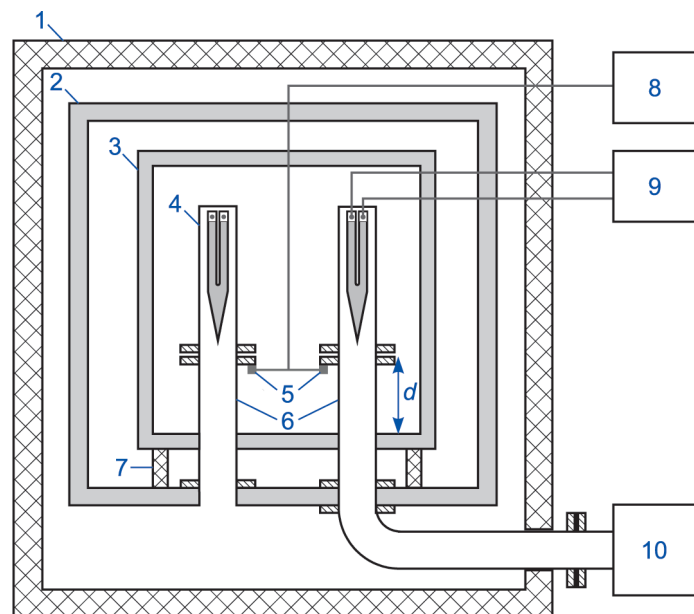


Рис. 1. Схема микрокалориметра, работающего в диапазоне частот 75–118,1 ГГц:

1 – теплоизолированный отсек; 2, 3 – тепловые экраны соответственно I, II; 4 – болометрические преобразователи; 5 – термисторные датчики температуры; 6 – тепловые развязки (d – рабочая длина тепловой развязки); 7 – регулируемые опоры; 8 – цифровой вольтметр; 9 – система измерения мощности замещения; 10 – генератор СВЧ

Fig. 1. Schematic representation of microcalorimeter nodes with a range of operating frequencies from 75 to 118.1 GHz:

1 – insulated compartment; 2 – heat shield I; 3 – heat shield II; 4 – bolometric converters; 5 – thermistor temperature sensors; 6 – thermal isolation (d – working length of thermal isolation); 7 – adjustable support; 8 – digital voltmeter; 9 – power measurement system; 10 – microwave generator

образом, обе развязки создают симметричную по отношению к тепловым потокам схему, обеспечивающую минимальное воздействие колебаний температуры окружающей среды на сигнал, регистрирующий разность температур рабочего и опорного преобразователей. Волноводы тепловых развязок выполнены методом гальванопластики. После припайки фланцев тепловые развязки покрыты серебром. В конструкции микрокалориметра применена оригинальная система крепления внутреннего теплового экрана, обеспечивающая возможность регулировки длины тепловой развязки и соответственно изменение чувствительности системы индикации.

Измеритель разности температур между рабочим и опорным каналами микрокалориметра реализован в виде двух термисторов, один из которых имеет тепловой контакт с преобразователем мощности СВЧ, а другой – с телом сравнения. При такой схеме включения отсутствует тепловой поток между преобразователем мощности и телом сравнения. Кроме того, термисторный датчик позволяет контролировать температуру аттестуемого преобразователя.

Перечислим технические решения, позволившие улучшить характеристики микрокалориметра:

применение тепловых развязок в виде тонкостенных (толщина стенок 100 мкм) волноводов, изготовленных из никеля методом гальванопластики, а также чувствительных чип-термисторов, расположенных на опорных плоскостях (фланцах) симметричных теплоизолированных каналов микрокалориметра, позволило получить чувствительность системы индикации микрокалориметра не менее 1 мВ/мВт;

применение конструкции фланца, описанной в [8], обеспечивает хорошую повторяемость результатов при повторном подключении преобразователей мощности;

применение в качестве рабочего и опорного каналов тепловых развязок с близкими размерами сечений (соответственно

2,4×1,2 и 2,54×1,27 мм) позволяет непосредственно определять $K_{эфф}$ преобразователей, работающих в любом из указанных трактов без применения дополнительных волноводно-волноводных переходов, что позволяет измерять $K_{эфф}$ преобразователей мощности СВЧ с одинаковой точностью независимо от сечения тракта;

возможность регулирования длины тепловой развязки подвижным креплением её к корпусу микрокалориметра существенно упрощает сборку микрокалориметра и позволяет экспериментально оценить влияние потерь в тепловой развязке на результат измерения $K_{эфф}$ аттестуемого преобразователя.

Микрокалориметрический компаратор размещён в термоизолированной камере – выделенном в лабораторном помещении блоке с пассивной термоизоляцией. Для минимизации тепловых воздействий на результаты измерений регистрирующая аппаратура и генератор СВЧ находятся вне этой камеры. Конструкция дифференциального микрокалориметра предусматривает двухконтурную защиту от внешней тепловой помехи и обеспечивает чувствительность не менее 1 мВ/мВт.

Измерениями на микрокалориметре управляет компьютерная программа. Современная вычислительная техника и широкий выбор исполнительных устройств и СИ, снабжённых интерфейсами для подключения к компьютерам, позволяют не только регистрировать и обрабатывать результаты измерений, но также дают возможность управлять происходящими в микрокалориметре процессами согласно заданным алгоритмам.

Схема калориметра, а также входящее в состав калориметрической установки оборудование и измерительные приборы позволяют измерять коэффициент эффективности болометрических, термисторных и термоэлектрических преобразователей, работающих в режиме автоматического замещения поглощённой мощности СВЧ, эквивалентной по тепловому воздействию мощностью постоянного тока.

Прослеживаемость воспроизводимой единицы [Вт] мощности электромагнитных колебаний к основным единицам Международной системы единиц обеспечивается за счёт применения нановольтметра и магазина сопротивлений, которые воспроизводят единицы электрического напряжения и сопротивления. Прослеживаемость информативного параметра частота воспроизводимой единицы [Гц] обеспечивается применением калиброванных гармониковых смесителей, опорного генератора сигналов и частотомера, а также системой фазовой автоподстройки частоты. На рис. 2 показан внешний вид микрокалориметра с установленным болометрическим преобразователем.

На рис. 3 приведена типичная частотная зависимость коэффициента эффективности полупроводникового болометрического преобразователя ПБП-2.4, измеренная в калориметре в диапазоне частот 78,33–118,1 ГГц. Зависимость коэффициента эффективности $K_{эфф}$ от частоты f падающей электромагнитной волны имеет плавный характер, что позволяет использовать преобразователь для измерений мощности СВЧ на любой произвольной частоте в диапазоне частот волновода. Аналогичные характеристики получены

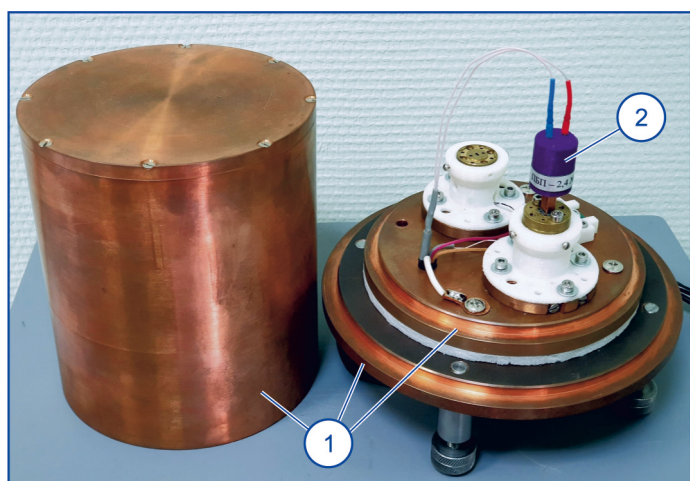


Рис. 2. Внешний вид микрокалориметра с подключённым болометрическим преобразователем:

1 – тепловые экраны; 2 – болометрический преобразователь

Fig. 2. Appearance of a microcalorimeter with a bolometric converter connected:

1 – heat shields; 2 – bolometric converter

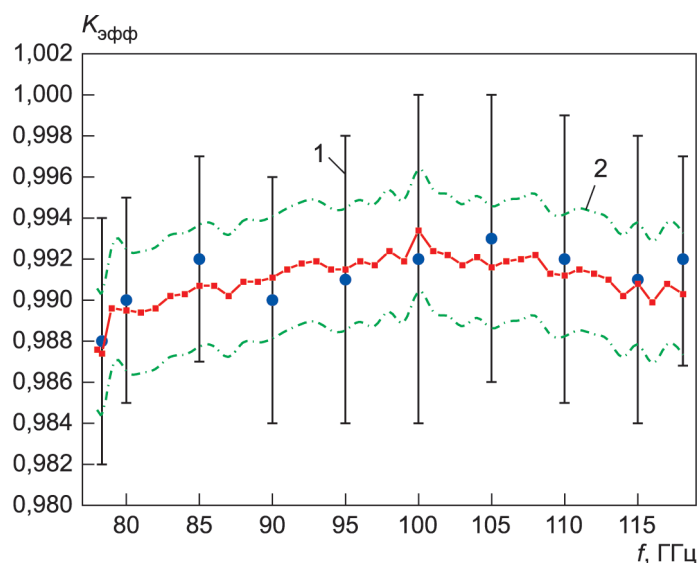


Рис. 3. Частотная зависимость $K_{эфф}(f)$ первичного болометрического измерительного преобразователя в диапазоне частот 78,33–118,1 ГГц в 2019 г. (●) и 2020 г. (■):

1 – границы погрешности измерений коэффициента эффективности $K_{эфф}$; 2 – допустимые границы нестабильности $K_{эфф}$

Fig. 3. Typical frequency dependence of the PBP K_{eff} in the frequency range from 75 to 118.1 GHz in 2019 (●) and 2020 (■):

1 – the limits of the measurement error of the efficiency coefficient of the K_{eff} ; 2 – the permissible limits of the instability of the K_{eff}

для всех болометрических преобразователей мощности СВЧ из состава ГЭТ 167-2021.

Метрологические и технические характеристики ГЭТ 167-2021. Основные составляющие неисключённой систематической погрешности (НСП) ГЭТ 167-2021 оценены следующими значениями:

$\Theta_1 < 0,15\%$ – составляющая определения $K_{эфф}$ болометрического преобразователя в микрокалориметре из-за потерь в подводящем волноводе тепловой развязки;

$\Theta_2 < 0,1\%$ – составляющая определения $K_{эфф}$ болометрического преобразователя в микрокалориметре из-за неэквивалентности тепловых потерь в корпусе преобразователя;

$\Theta_3 < 0,1\%$ – составляющая определения поправки на отражённую мощность для болометрического преобразователя с модулем коэффициента отражения входа $|\Gamma| < 0,04$ при погрешности измерения коэффициента стоячей волны по напряжению менее 3 %;

$\Theta_4 < 0,06\%$ – составляющая измерения мощности замещения постоянного тока при использовании калибратора тока с погрешностью порядка 0,01 % и магазина сопротивлений класса 0,05;

$3S_{K_{эфф}} < 0,2\%$ – случайная погрешность измерения $K_{эфф}$ в микрокалориметре по результатам обработки рядов по 5–10 наблюдениям.

Технические и метрологические характеристики ГЭТ 167-2021 приведены в таблице.

Международное сотрудничество в рамках сличений. В период 2011–2014 гг. в рамках международных ключевых

Характеристики ГЭТ 167-2021

Характеристика	Значение
Диапазон частот, ГГц	37,5–118,1
Мощность электромагнитных колебаний, Вт	$1 \cdot 10^{-3}$ – $1 \cdot 10^{-2}$
Стандартная неопределённость по типу А	$5 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-3}$
по типу В	$2 \cdot 10^{-3}$ – $5 \cdot 10^{-3}$
Суммарная стандартная неопределённость	$2 \cdot 10^{-3}$ – $6 \cdot 10^{-3}$
Расширенная неопределённость ($k^*=2$)	$4 \cdot 10^{-3}$ – $1,2 \cdot 10^{-2}$
СКО** случайной погрешности воспроизведения	$5 \cdot 10^{-4}$ – $2 \cdot 10^{-3}$
Границы НСП воспроизведения	$5 \cdot 10^{-3}$ – $1,5 \cdot 10^{-2}$

Примечание. * k – коэффициент охвата; **СКО – среднее квадратическое отклонение

сличений CCEM.RF-K25.W–RF power from 33 to 50 GHz in waveguide по измерениям мощности электромагнитных колебаний при участии Консультативного комитета по электричеству и магнетизму Международного бюро мер и весов подтверждена эквивалентность воспроизводимой первичным эталоном единицы в диапазоне частот 38–50 ГГц с расширенными неопределённостями 0,1–1,2 %. В настоящее время проходят международные ключевые сличения CCEM.RF-K27.W–RF power from 50 to 75 GHz in waveguide. Участниками сличений завершены измерения, идет подготовка отчёта к опубликованию. Запланированы пилотные сличения в диапазоне частот 75–110 ГГц.

Заключение. Разработанный комплекс аппаратуры ГЭТ 167-2021 позволяет воспроизводить единицу мощности СВЧ, а также калибровать и поверять используемые в радиолокационной технике и технике связи ваттметры СВЧ, измерительные генераторы и приёмники, обеспечивая единство измерений мощности электромагнитных колебаний в волноводных трактах в диапазоне частот 37,5–118,1 ГГц.

Список источников

- Shimaoka K., Kinoshita M., Fujii K., Tosaka T., Calibration of mm-wave power meters using a broadband calorimeter in the frequency range from 110 GHz to 170 GHz, *2013 38th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz)*, 2013, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2013.6665712>
- He Wei, Zhang Weiwei, Qi Wanquan, Yin Hongcheng, Design of a 110 GHz to 170 GHz calorimeter, *2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition*, 2017, pp. 71–73. <https://doi.org/10.1109/iWEM.2017.7968788>
- Kwon J., Hong Y., Kang N., D-Band Waveguide Microcalorimeter for Millimeter-Wave Power Standard, *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 2018, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501192>

4. Перепелкин В. А., Семенов 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. 2017. № 10. стр. 3–6.

<https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2017-10-3-6>

5. Lau Y. S., Denning T., Oleson C., Millimeter wave power measurement above 110 GHz, *2006 67th ARFTG Conference*, 2006, pp. 97–102. <https://doi.org/10.1109/ARFTG.2006.4734350>

6. Judaschke R. H., Kuhlmann K., Reichel T. M., Perndl W., Millimeter-Wave Thermoelectric Power Transfer Standard, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 12, pp. 3444–3450, Dec. 2015. <https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2454632>

7. Kwon J., Kang T., Kang N., V-band waveguide microcalorimeter for millimeter-wave power standards, *2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, 2016, pp. 1–2, <https://doi.org/10.1109/CPEM.2016.7540466>

8. Семенов В. А. Проект изменения стандарта на присоединительные размеры элементов соединения СВЧ трактов электронных измерительных приборов // Метрология в радиоэлектронике: Тез. докл. XI Всерос. науч.-техн. конф. 19–21 июня 2018 г., Менделеево: ВНИИФТРИ, 2018. С. 116–125.

9. Коудельный А. В., Мыльников А. В., Перепелкин 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.

10. Chirkov I., Perepelkin V., Semenov V., Russian primary standards of microwave power, *29th Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014)*, 2014, pp. 166–167. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2014.6898311>

References

1. Shimaoka K., Kinoshita M., Fujii K., Tosaka T., Calibration of mm-wave power meters using a broadband calorimeter in the frequency range from 110 GHz to 170 GHz, *2013 38th*

International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves (IRMMW-THz), 2013, pp. 1–2.

<https://doi.org/10.1109/IRMMW-THz.2013.6665712>

2. He Wei, Zhang Weiwei, Qi Wanquan, Yin Hongcheng, Design of a 110GHz to 170GHz calorimeter, *2017 International Workshop on Electromagnetics: Applications and Student Innovation Competition*, 2017, pp. 71–73.

<https://doi.org/10.1109/iWEM.2017.7968788>

3. Kwon J., Hong Y., Kang N., D-Band Waveguide Microcalorimeter for Millimeter-Wave Power Standard, *2018 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2018)*, 2018, pp. 1–2. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2018.8501192>

4. 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. 10, pp. 973–978. <https://doi.org/10.1007/s11018-018-1303-y>

5. Lau Y. S., Denning T., Oleson C., Millimeter wave power measurement above 110 GHz, *2006 67th ARFTG Conference*, 2006, pp. 97–102. <https://doi.org/10.1109/ARFTG.2006.4734350>

6. Judaschke R. H., Kuhlmann K., Reichel T. M., Perndl W., Millimeter-Wave Thermoelectric Power Transfer Standard, in *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 64, no. 12, pp. 3444–3450, Dec. 2015. <https://doi.org/10.1109/TIM.2015.2454632>

7. Kwon J., Kang T., Kang N., V-band waveguide microcalorimeter for millimeter-wave power standards, *2016 Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2016)*, 2016, pp. 1–2, <https://doi.org/10.1109/CPEM.2016.7540466>

8. Semenov V. A., *Proc. XI All-Russian Sci.-Tech. conference Metrology in Radio Electronics*, June 19–21, 2018, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 2018, pp. 116–125. (In Russ.)

9. Koudelny A. V., Mylnikov A. V., Perepelkin V. A., Research in the field of radio engineering measurements, *Collection of Scientific Papers*, Mendeleevo, VNIIFTRI Publ., 1987, pp. 27–34. (In Russ.)

10. Chirkov I., Perepelkin V., Semenov V., Russian primary standards of microwave power, *29th Conference on Precision Electromagnetic Measurements (CPEM 2014)*, 2014, pp. 166–167. <https://doi.org/10.1109/CPEM.2014.6898311>

Статья поступила в редакцию 21.04.2022; одобрена после рецензирования 15.05.2022; принята к публикации 20.05.2022.
The article was submitted 21.04.2022; approved after reviewing 15.05.2022; accepted for publication 20.05.2022.