

Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21-2021

Владимир Ильич Адерихин¹, Иван Михайлович Малай², Мария Сергеевна Маркова^{3✉}, Мелик Вардкесович Саргсян⁴, Максим Игоревич Фартушин⁵

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

¹avi@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3313-3945>

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

³markova_ms@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3367-3442>

⁴mcrmi121@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3849-7740>

⁵fartushin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7311-2041>

Аннотация. В 2021 г. утверждён Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21-2021. В качестве первичных эталонных мер в состав ГЭТ 21-2021 введены низкотемпературные генераторы шума. Исследованы спроектированные и изготовленные первичные эталонные меры: два коаксиальных низкотемпературных генератора шума в диапазонах частот 0,002–4,0 ГГц, 4,0–12,05 ГГц и три волноводных низкотемпературных генераторов шума в диапазонах частот 12,05–17,44 ГГц, 17,44–25,86 ГГц, 25,86–37,5 ГГц. Исследованы и рассчитаны эквивалентные шумовые температуры первичных эталонных мер. Воспроизводимое значение эквивалентной шумовой температуры для коаксиальных низкотемпературных генераторов шума составило 77,5–84,82 К и волноводных низкотемпературных генераторов шума – 78,4–80,53 К. Разработаны и изготовлены компараторы – приёмники шумового сигнала в пяти диапазонах: в двух коаксиальных трактах 0,002–4,0 ГГц и 4,0–12,05 ГГц; в трёх волноводных трактах 12,05–17,44 ГГц; 17,44–25,86 ГГц и 25,86–37,5 ГГц. Увеличен динамический диапазон измерений и уменьшена погрешность передачи единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения. Суммарная погрешность воспроизведения единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения составила 0,24–0,30 К, расширенная неопределённость передачи единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения вторичным эталонам и рабочим эталонам 1-го разряда – 0,4–0,8 К, погрешность измерений спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения уменьшилась в 1,5 раза. Проведён сравнительный анализ неопределённостей при передаче единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения от первичных эталонных мер вторичным эталонам и рабочим эталонам 1-го разряда.

Результаты данной работы применимы в радиопромышленности при измерении шумовых параметров. Значения чувствительности приборов и устройств, работа которых зависит от уровня шумовых электромагнитных колебаний, контролируются мерами спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения – измерительными генераторами шума.

Ключевые слова: эталон, спектральная плотность мощности шумового радиоизлучения, эквивалентная шумовая температура

Для цитирования: Адерихин В. И., Малай И. М., Маркова М. С., Саргсян М. В., Фартушин М. И. Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21-2021 // Измерительная техника. 2022. № 12. С. 3–9. <https://doi.org/10.32446/0368-1025it.2022-12-3-9>

State primary standard of the unit of power spectral density of noise radio emission in the frequency range from 0.002 to 178.3 GHz GET 21-2021

Vladimir I. Aderikhin¹, Ivan M. Malay², Mariya S. Markova^{3✉}, Melik V. Sargsyan⁴, Maksim I. Fartushin⁵

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

¹avi@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0003-3313-3945>

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

³markova_ms@vniiftri.ru✉, <https://orcid.org/0000-0002-3367-3442>

⁴mcrmi121@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-3849-7740>

⁵fartushin@vniiftri.ru, <https://orcid.org/0000-0002-7311-2041>

Abstract. In 2021, the State primary standard unit of power spectral density of noise radio emission in the frequency range from 0.002 to 178.3 GHz GET 21-2021 passed the approval. GET 21-2021 introduced low-temperature noise generators as primary reference measures. Preferred and manufactured primary reference measures were investigated: two coaxial low temperature noise generators in the frequency range 0.002–4.0 GHz, 4.0–12.05 GHz and three waveguide low temperature noise generators in the frequency range 12.05–17.44 GHz, 17.44–25.86 GHz, 25.86–37.5 GHz. Noise temperatures of primary reference measures are investigated and calculated. The reproducible value of the equivalent noise temperature was 77.5–84.82 K for coaxial low-temperature noise generators and 78.4–80.53 K for waveguide low-temperature noise generators, 4.0 GHz and 4.0–12.05 GHz; three waveguide 12.05–17.44 GHz; 17.44–25.86 GHz and 25.86–37.5 GHz. The dynamic range of measurements is increased and the error of unit transmission is reduced. The results of measurements of the power spectral density of noise radio emission with the following characteristics are obtained: the total error in reproducing the unit of the spectral power density of noise radio emission from 0.24 to 0.30 K; expanded uncertainty when transferring a unit of power spectral density of noise radio emission to secondary standards and working standards of the 1st category, from 0.4 to 0.8 K; the measurement error of the power spectral density of noise radio emission decreased by 1.5 times. A comparative analysis of uncertainties in the transfer of a unit of the power spectral density of noise radio emission from primary reference measures to secondary standards and working standards of the 1st category is carried out.

The results of this work are applicable in the radio industry when measuring noise parameters. The sensitivity values of instruments and devices that depend on the level of noise electromagnetic oscillations, are controlled by measures of the power spectral density of noise radio emission – measuring noise generators.

Keywords: standard, spectral density of noise radiation power, equivalent noise temperature

Введение. Радиоприёмные устройства, применяемые в телевидении, системах радиосвязи, радионавигации, радиолокации, а также полупроводниковая электроника, радиоастрономия диктуют требования к технике измерений параметров мощности шума радиочастотного излучения – некогерентного излучения в широком спектральном диапазоне – и к соответствующим эталонам, обеспечивающим единство измерений параметров этого вида излучения.

В настоящее время большинство средств измерений параметров мощности шума радиочастотного излучения (полупроводниковые генераторы шума и измерители коэффициента шума) работают в диапазоне частот 0,01–37,5 ГГц. Характеристики Государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения ГЭТ 21-2011 в данном частотном диапазоне не соответствовали возросшим требованиям указанных выше отраслей. Возникла необходимость усовершенствования ГЭТ 21-2011 с целью повышения эффективности проводимых поверочных и калибровочных работ, уменьшения погрешности передачи единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения (СПМШ), а также улучшения параметров компаратора шумовых сигналов.

Чувствительность радиоустройств и их компонентов контролируется мерами СПМШ – измерительными генераторами шума [1]. Основные объекты поверки в области шумового излучения в радиодиапазоне – измерительные приёмники и радиометры, а также источники (меры) радиошума – тепловые источники [2], газоразрядные и диодные генераторы шума.

Цель исследования – улучшение точности воспроизведения единицы СПМШ в диапазоне частот 0,002–37,5 ГГц.

История создания эталона. Работы по обеспечению единства измерений слабых шумовых сигналов начались во ВНИИФТРИ в 1957 г. Результатом этих работ стало создание

в период 1971–1976 гг. трёх государственных эталонов: первичного эталона в диапазоне частот 1,04–37,5 ГГц, а также двух специальных эталонов единицы СПМШ в диапазонах частот 125–1000 МГц и 2–125 МГц. В 1981 г. три эталона были объединены в один эталонный комплекс в диапазоне частот 0,002–37,5 ГГц. В дальнейшем работы по совершенствованию эталона СПМШ были связаны с расширением частотного диапазона до 178,3 ГГц. В 1991 г. в состав эталона СПМШ включена образцовая установка для поверки низкотемпературных генераторов шума (НГШ), работающая в диапазоне частот 37,5–178,3 ГГц.

В настоящее время Государственный первичный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц ГЭТ 21-2021¹ состоит из следующих технических средств, вспомогательных устройств и специальных инженерных сооружений:

тепловых НГШ в волноводных трактах сечениями 23×10; 16×8; 11×5,5; 7,2×3,4; 5,2×2,6; 3,6×1,8; 2,4×1,2; 1,6×0,8 мм и в коаксиальных трактах 7/3,04; 3,5/1,52 мм;

компарирующих установок в волноводных трактах ЭУ 12,05–17,44 ГГц, ЭУ 17,44–25,95 ГГц, ЭУ 25,95–37,5 ГГц, ЭУ 37,5–53,57 ГГц, ЭУ 53,57–78,33 ГГц, ЭУ 78,33–118,1 ГГц, ЭУ 118,1–178,3 ГГц и в коаксиальных трактах ЭУ 0,002–0,2 ГГц, ЭУ 0,2–1,0 ГГц, ЭУ 1,0–12,1 ГГц, ЭУ 1–26,5 ГГц;

вспомогательных средств измерений и оборудования, необходимых для контроля стабильности работы эталона при передаче единицы СПМШ.

Первичная эталонная мера единицы СПМШ. Основная составляющая часть ГЭТ 21-2021 – первичные тепловые НГШ (эталонные меры единицы СПМШ). Эталон воспроизводит единицу СПМШ на основе формулы Планка, применение которой в идеальном случае изотермической системы, состоящей из излучателя на основе абсолютно чёрного тела, нагруженного на бесконечную (или неотражающую)

¹ Приказ Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 2 февраля 2021 г. № 67 «Об утверждении Государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот от 0,002 до 178,3 ГГц».

одномоновую линию передачи, даёт выражение для расчёта СПМШ [3]:

$$G = hf / (e^{hf/(kT)} - 1), \quad (1)$$

где $h = 6,6261 \cdot 10^{-34}$ Дж·с – постоянная Планка; f – частота излучения; $k = 1,3807 \cdot 10^{-23}$ Дж·К⁻¹ – постоянная Больцмана; T – термодинамическая температура излучателя [4, 5].

Диапазон воспроизведения единицы СПМШ G на аппаратуре ГЭТ 21-2021 составляет $1,07 \cdot 10^{-21}$ – $1,17 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц. На практике расчёты с малыми величинами G , например $1,07 \cdot 10^{-21}$, не используют из-за сложности вычислений, поэтому измерительные генераторы шума с достаточно гладким частотным спектром характеризуют эквивалентной шумовой температурой (ЭШТ) в кельвинах. ЭШТ получают при разложении экспоненциального члена в знаменателе формулы (1) в ряд при учёте первых двух или трёх членов ряда:

$$G_1 = kT; \quad (2)$$

$$G_2 = kT(1 - hf/(kT)). \quad (3)$$

Так как G_1 , G_2 вычисляются по приближённым формулам (2), (3), то для оценок их относительных погрешностей δG_1 , δG_2 используем следующие выражения:

$$\delta G_1 = hf/(2kT); \quad \delta G_2 = -\frac{1}{12} \left(\frac{hf}{2kT} \right)^2.$$

Расчёты по формуле Релея-Джинса (2) при температуре 77,4 К дают погрешность не более 0,1 % лишь на частотах ниже 3 ГГц, поэтому для частот выше 3 ГГц применяется формула (3), обеспечивающая такую же погрешность вплоть до 180 ГГц.

В качестве первичной эталонной меры СПМШ используются НГШ в коаксиальных и волноводных трактах (рис. 1). НГШ представляет собой криостат, состоящий из корпуса 2, крышки 1, теплоизоляции 3 и стакана для азота 4. Излучатель представляет собой согласованную нагрузку 6, охлаждаемую до температуры кипения жидкого азота ($T_{\text{и}} = 77,4$ К), с теплоразвязывающей коаксиальной или волноводной линией 7. Коаксиальная (волноводная) линия заканчивается выходным разъёмом (фланцем) 8 и радиатором 9. Основание 10 криостата снабжено регулируемыми винтами.

В изотермической системе ЭШТ $T_{\text{ЭШТ}}$ совпадает с физической температурой излучателя $T_{\text{и}}$. НГШ не является изотермической системой, так как температура его выходной линии передачи изменяется по всей длине от температуры излучателя $T_{\text{и}}$ до температуры T_0 на конце линии, близкой к комнатной температуре (рис. 2, кривая $T(z)$). При аттестации

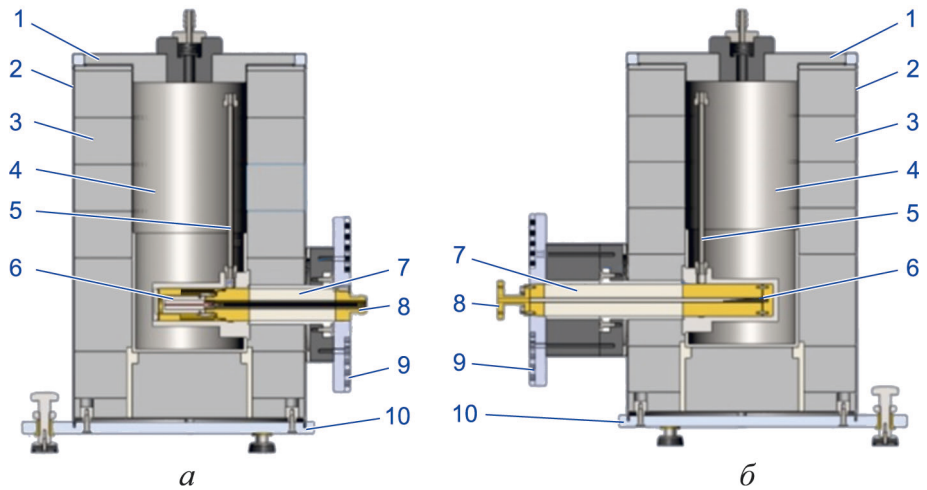


Рис. 1. Коаксиальный (а) и волноводный (б) низкотемпературные генераторы шума: 1 – крышка; 2 – корпус криостата; 3 – теплоизоляция; 4 – стакан для азота; 5 – трубка подачи паров азота в теплоизолирующую коаксиальную (волноводную) линию; 6 – согласованная нагрузка теплоразвязывающей коаксиальной (волноводной) линии; 7 – теплоразвязывающая коаксиальная (волноводная) линия; 8 – выходной разъём (фланец); 9 – радиатор теплоразвязывающей коаксиальной (волноводной) линии; 10 – основание с регулируемыми винтами

Fig.1. Heat-insulating coaxial (a) and waveguide (b) low temperature noise generators: 1 – cover; 2 – cryostat case; 3 – thermal insulation; 4 – glass for nitrogen; 5 – a tube for supplying nitrogen vapor to a heat-insulating coaxial (waveguide) line (HICL, HIWL); 6 – broadband load HICL, HIWL; 7 – HICL (HIWL); 8 – output connector (flange); 9 – radiator HICL, HIWL; 10 – base with adjusting screws

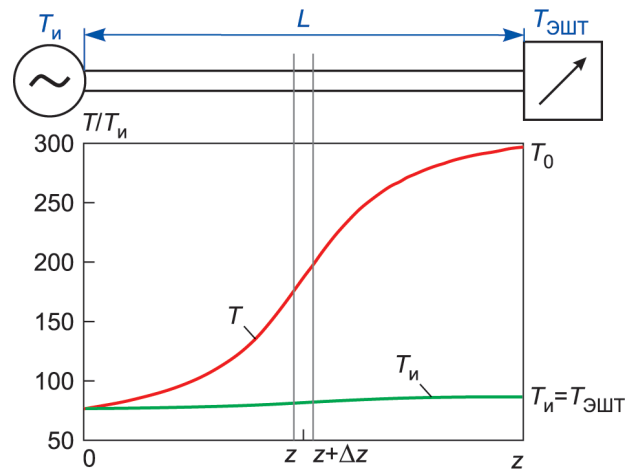


Рис. 2. Принцип воспроизведения единицы СПМШ

Fig. 2. The principle of reproduction of the unit spectral density of noise radiation power

НГШ определяется добавка $\Delta T_{\text{и}}$ к $T_{\text{и}}$, обусловленная излучением стенок или проводников выходной линии, зависящая от вида кривой $T(z)$ и потерь в линии. Примерный вид зависимости результирующей ЭШТ в линии от координаты z , полученный расчётным способом, показывает, что кривая $T_{\text{и}}(z)$ проходит существенно ниже кривой $T(z)$ [6].

Задача воспроизведения и передачи единицы СПМШ с наивысшей точностью в коаксиальной линии сечением

7/3,04 мм и волноводах сечениями 16×8; 11,0×5,5; 7,2×3,4 мм решена в результате разработки эталонных установок с поддиапазонами частот: 0,002–0,2; 0,2–1,0; 1,0–12,1; 12,05–17,44; 17,44–25,95 и 25,95–37,5 ГГц. Эталонные установки состоят из 5 первичных эталонных мер и 13 компараторов, перекрывающих диапазон частот 0,002–37,5 ГГц.

Под воспроизведением единицы СПМШ понимается совокупность операций и косвенных измерений, в результате которых определяется значение СПМШ (или единицы ЭШТ – кельвина) на выходе первичной эталонной меры. Воспроизведение единицы СПМШ (ЭШТ) для всех первичных эталонных мер основано на измерениях, выполняемых как при аттестации эталона, так и непосредственно при воспроизведении единицы [1, 3]. Для определения единицы СПМШ необходимо выполнить следующие процедуры:

измерить ослабление, вносимое теплоразвязывающей линией передачи при комнатной температуре;

измерить температуры излучателя $T_{\text{и}}$ и выходного соединителя первичной эталонной меры при комнатной температуре T_0 ;

определить распределение температуры $T(z)$ вдоль теплоразвязывающей линии передачи первичной эталонной меры;

рассчитать ЭШТ $T_{\text{ЭШТ}}$ и её погрешности на выходе первичной эталонной меры;

передать с помощью компараторов единицу СПМШ (ЭШТ) от первичной эталонной меры рабочим эталонам и средствам измерений.

Методика расчёта ЭШТ приведена в [1, 2]. Теплоразвязывающая коаксиальная или волноводная линия НГШ

разбивается на короткие отрезки Δz . Шумовая температура на выходе k -го отрезка вычисляется по формуле

$$T_{k+1} = T_k + 0,23\alpha_k \Delta z_k (T_{\Delta k} - T_k), \quad (4)$$

где T_k – шумовая температура на входе k -го отрезка волновода; $T_{\Delta k}$ – средняя физическая температура отрезка; Δz_k – длина отрезка; $\alpha_k = \alpha_{T_0} \sqrt{1 - \gamma(T_0 - T_{\Delta k})}$ – постоянная затухания k -го отрезка при температуре $T_{\Delta k}$, α_{T_0} – постоянная затухания при комнатной температуре T_0 , γ – температурный коэффициент удельного электрического сопротивления внутренней поверхности волновода.

Выходная шумовая температура НГШ $T_{\text{ЭШТ}}$ определяется в результате последовательного расчёта T_{k+1} по формуле (4) для каждого отрезка Δz_k волновода. На рис. 2 приведены типовые характеристики распределения температуры вдоль теплоизолирующей линии длиной L .

Расчёт ЭШТ НГШ производится в широком диапазоне частот для различных стандартизованных типов линии передачи высокой и сверхвысокой частот, что вызывает необходимость применения набора из пяти первичных эталонных мер (ПЭМ) (табл. 1), каждая из которых перекрывает часть частотного диапазона: два коаксиальных НГШ (обозначение К); три волноводных НГШ (обозначение В).

Диапазон значений ЭШТ НГШ 77,5–84,8 К. Характеристики ПЭМ по типам трактов приведены в табл. 1, где $T_{\text{ЭШТ}}$ – воспроизводимое значение ЭШТ.

Оценка погрешностей. Расчётно-экспериментальными методами получены следующие составляющие неисключённой систематической погрешности (НСП) воспроизведения единицы СПМШ [8]: погрешность измерения температуры вдоль коаксиальной или волноводной линии НГШ Θ_{01} ; погрешность распределения температуры вдоль коаксиальной или волноводной линии НГШ Θ_{02} ; погрешность измерения потерь в коаксиальной или волноводной линии НГШ Θ_{03} ; погрешность из-за теплового коэффициента сопротивления Θ_{04} ; погрешность измерения потерь в короткой волноводной линии НГШ Θ_{05} .

Также определены случайные погрешности измерения потерь в коаксиальной или волноводной линии НГШ S_{01} и во внешнем волноводном отрезке с выходным фланцем S_{02} , результирующая погрешность воспроизведения ЭШТ Θ .

Полученные значения составляющих НСП для коаксиальных и волноводных НГШ и значения НСП ГЭТ 21-2021 приведены в табл. 2, 3 соответственно.

Бюджет неопределённости результатов измерений приведён в табл. 4, где u_A – стандартная неопределённость типа А, u_B – стандартная неопределённость типа В, U_c – суммарная стандартная неопределённость, U_p – расширенная неопределённость, k – коэффициент охвата.

Эталонный компаратор. Устройство, принцип работы.

Эталонные компараторы предназначены для передачи единицы СПМШ от первичной эталонной меры вторичным эталонам и рабочим эталонам 1-го разряда методом сравнения путём поочередного подсоединения объектов измерения к входу компаратора. При этом компаратор представляет

Таблица 1

Характеристики комплекта первичных эталонных мер

ПЭМ	Диапазон частот, ГГц	Сечение коаксиала / волновода, мм	$T_{\text{ЭШТ}}$, К
К7-4	0,002–4,0	К-7/3,04	77,50–83,90
К7-18	4,0–18,0	К-7/3,04	80,73–84,82
В16×8	12,05–17,44	В-16×8 (WR-62)	79,18–78,43
В11×5,5	17,44–25,86	В-11×5,5 (WR-42)	78,75–78,07
В7,2×3,4	25,86–37,5	В-7,2×3,4 (WR-28)	80,53–80,19

Таблица 2

Составляющие погрешности измерений при воспроизведении единицы СПМШ (ЭШТ), К, коаксиальными НГШ

Составляющие погрешности	Оценка на частоте, ГГц	
	0,002–4,0	4,0–18,0
Θ_{01} , К	0,03	0,03
Θ_{02} , К	0,02	0,02
Θ_{03} , К	0,12	0,12
Θ_{04} , К	0,01	0,01
S_{01} , К	0,04	0,05
Θ , К	0,24	0,27

собой модуляционный супергетеродинный приёмник радиометрического типа, функционально и конструктивно разделяющийся на сверхвысокочастотный (или высокочастотный) тракт и систему индикации.

Каждый сверхвысокочастотный (или высокочастотный) тракт обеспечивает:

в диапазоне частот 0,002–0,225 ГГц введение коэффициента рассогласования в результате измерения комплексных коэффициентов отражения выходного разъёма первичной эталонной меры, вторичных эталонов, рабочих эталонов 1-го разряда и входа тракта приёмника;

в диапазоне частот 0,225–37,5 ГГц согласование между выходами первичных эталонных мер, вторичных эталонов, рабочих эталонов 1-го разряда и входом приёмника с помощью трансформатора полных сопротивлений;

введение модулированного опорного сигнала (пилот-сигнала);

частотную селекцию и предварительное усиление входных сигналов маломушумящим усилителем.

Уравнение передачи единицы ЭШТ имеет вид

$$T_{ВЭ} = (T_{ПЭМ} - T_0)nQ + T_0,$$

где $T_{ПЭМ}$, $T_{ВЭ}$, T_0 – шумовые температуры первичной эталонной меры, вторичных эталонов и согласованной нагрузки при комнатной температуре; n – измеренное на выходе компаратора отношение $(T_{ВЭ} - T_0)/(T_0 - T_{ПЭМ})$, соответствующее поочередным подсоединениям к входу компаратора первичной эталонной меры, вторичных эталонов и согласованной нагрузки; Q – поправочный коэффициент, учитывающий значения комплексных коэффициентов отражения $\Gamma_{ПЭМ}$, $\Gamma_{ВЭ}$, $\Gamma_{ВХ}$ первичной эталонной меры, вторичных эталонов и входа компаратора соответственно. Здесь

$$Q = \frac{1 - |\Gamma_{ВЭ}|^2}{1 - |\Gamma_{ПЭМ}|^2} \frac{|1 - \Gamma_{ПЭМ}\Gamma_{ВХ}|^2}{|1 - \Gamma_{ВЭ}\Gamma_{ВХ}|^2}.$$

Для передачи единицы СПМШ используется два метода: метод двух отсчётов или модуляционный метод.

Метод двух отсчётов предполагает прямое измерение СПМШ первичной эталонной меры $T_{ПЭМ}$, согласованной нагрузки при комнатной температуре T_0 и высокотемпературного генератора шума $T_{ВЭ}$. По результатам измерения $T_{ПЭМ}$, T_0 , $T_{ВЭ}$ рассчитывается отношение измерения Y -фактора.

При модуляции пилот-сигналом на вход компаратора через переходное ослабление направленного ответвителя поступает излучение от опорного генератора шума $\Delta T_{о.г.}$, работающего в импульсном режиме с частотой модуляции.

При подключении на вход измерительного тракта компаратора последовательно измеряются $Y_{ПЭМ}$, Y_0 , $Y_{ВЭ}$ первичной эталонной меры в виде НГШ, согласованной нагрузки при комнатной температуре и вторичной эталонной меры в виде высокотемпературного генератора шума. Значения $Y_{ПЭМ}$, Y_0 , $Y_{ВЭ}$ выражаются следующими отношениями:

Таблица 3

Составляющие погрешности измерений при воспроизведении единицы СПМШ (ЭШТ), К, волноводными НГШ

Составляющие погрешности	Оценка на частоте, ГГц (сечение волновода, мм)		
	12,5–17,0 (16×8)	18,0–25,0 (11×5,5)	26,0–37,5 (7,2×3,4)
Θ_{01}	0,03	0,03	0,03
Θ_{02}	0,01	0,01	0,01
Θ_{03}	0,08	0,09	0,09
Θ_{04}	0,01	0,01	0,01
Θ_{05}	0,08	0,09	0,095
S_{01}	0,04	0,04	0,04
S_{02}	0,04	0,04	0,04
Θ	0,29	0,30	0,30

Таблица 4

Неопределённости результатов измерений при воспроизведении единицы СПМШ (ЭШТ)

Диапазон частот, ГГц	Сечение, мм	u_A , К	u_B , К	u_C , К	U_p ($k=2$), К
0,002–1,000	К-7/3,04	0,09	0,12	0,15	0,30
1,00–8,15	К-7/3,04	0,09	0,12	0,15	0,30
8,15–12,42	К-7/3,04	0,09	0,12	0,15	0,30
12,05–17,44	В-16×8	0,1	0,07	0,12	0,24
17,44–25,86	В-11×5,5	0,1	0,08	0,13	0,26
25,86–37,50	В-7,2×3,4	0,1	0,11	0,15	0,30

$$Y_{ПЭМ} = (T_{ПЭМ} + T_{ВХ} + \Delta T_{о.г.}) / (T_{ПЭМ} + T_{ВХ}),$$

$$Y_0 = (T_0 + T_{ВХ} + \Delta T_{о.г.}) / (T_0 + T_{ВХ}),$$

$$Y_{ВЭ} = (T_{ВЭ} + T_{ВХ} + \Delta T_{о.г.}) / (T_{ВЭ} + T_{ВХ}),$$

где $T_{ВХ}$ – собственная ЭШТ измерительного тракта компаратора.

Таким образом, измеренное на выходе компаратора отношение n примет вид

$$n_M = \frac{T_{ВЭ} - T_0}{T_0 - T_{ПЭМ}} = \left(\frac{Y_0 - 1}{Y_{ВЭ} - 1} - 1 \right) \left(1 - \frac{Y_0 - 1}{Y_{ПЭМ} - 1} \right)^{-1}.$$

В уравнение передачи единицы СПМШ кроме отношения n входит поправочный коэффициент Q , учитывающий рассогласование комплексных коэффициентов отражения используемых при измерениях объектов. Перед измерением отношения n или непосредственно после необходимо измерить модуль и фазу комплексных коэффициентов отражения $\Gamma_{ПЭМ}$, $\Gamma_{ВЭ}$, $\Gamma_{ВХ}$ с использованием векторного анализатора цепей. С учетом измеренных модулей $\Gamma_{ПЭМ}$, $\Gamma_{ВЭ}$, $\Gamma_{ВХ}$ и фаз $\varphi_{ПЭМ}$, $\varphi_{ВЭ}$, $\varphi_{ВХ}$ формула поправочного коэффициента примет вид

$$Q = \frac{1 - |\Gamma_{ВЭ} e^{j\varphi_{ВЭ}}|^2}{1 - |\Gamma_{ПЭМ} e^{j\varphi_{ПЭМ}}|^2} \frac{|1 - \Gamma_{ПЭМ} \Gamma_{ВХ} e^{j\varphi_{ВХ}}|^2}{|1 - \Gamma_{ВЭ} \Gamma_{ВХ} e^{j\varphi_{ВХ}}|^2}.$$

Таблица 5

Расширенная неопределённость передачи единицы СПМШ (коэффициент охвата $k=2$)

Национальный метрологический институт	Частота, ГГц				
	0,002	8,0	12,4	26,5	37,5
NPL, Великобритания	1,1	1,1	1,1	1,1	1,0
NIST, США	1,0	1,5	2,0	1,0	1,6
ВНИИФТРИ, РФ (ГЭТ 21-2011)	0,7	1,0	1,1	1,3	1,5
ВНИИФТРИ, РФ (ГЭТ 21-2021)	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8

Таблица 6

СКО и НСП при воспроизведении единицы СПМШ (ЭШТ), К

Диапазон частот, ГГц	СКО, К	НСП, К	НСП, %, в диапазоне ЭШТ	
			77,4–153,5 К	153,5–20000 К
0,002–12,05	0,04	0,2–0,3	0,3–0,4	0,5–0,7
1,00–26,50	0,10	0,1–0,3	0,2–0,7	0,3–0,7
12,05–37,50	0,06	0,3	0,5	0,8
37,50–53,57	0,60	0,6	1,4	1,5
53,57–78,33	0,50	0,7	2,0	1,9
78,33–118,10	0,70	1,0	2,0–3,0	1,8
118,1–178,3	0,70	1,0	3,0–4,0	2,2

Таким образом, погрешность передачи единицы СПМШ рабочим эталонам 1-го разряда формируется из следующих составляющих:

погрешности измерения коэффициентов отражения в полосе пропускания компаратора векторным анализатором цепей;

остаточного рассогласования после выравнивания коэффициентов отражения согласующим трансформатором сопротивлений;

вариации потерь в согласующих трансформаторах сопротивлений при выравнивании коэффициентов отражения сравниваемых объектов измерения – генераторов шума;

зависимости собственных шумов и уровня опорного сигнала компараторов от коэффициента отражения сравниваемых объектов генераторов шума;

разности потерь в соединителях сравниваемых генераторов шума;

влияния побочных каналов приёма;

нелинейности сквозной передаточной характеристики измерительных трактов компараторов и погрешность введения поправки на нелинейность;

погрешности отсчётных устройств;

погрешности измерения температуры «комнатной» согласованной нагрузки T_0 из-за погрешности термометра и тепловых переходных процессов;

случайной погрешности результатов измерений из-за неидеальности аппаратуры и внешних помех.

В табл. 5 приведено сравнение неопределённости измерений ГЭТ 21-2021 с лучшими зарубежными аналогами [8–14].

Из табл. 5 следует, что первичные эталонные генераторы шума из состава ГЭТ 21-2021 не уступают по неопределённости лучшим зарубежным аналогам в диапазоне частот 0,002–37,5 ГГц.

Метрологические характеристики ГЭТ 21-2021: диапазон значений номинальной избыточной СПМШ радиоизлучения в диапазоне частот 0,002–178,3 ГГц, в котором воспроизводится единица, составляет $1,07 \cdot 10^{-21}$ – $2,12 \cdot 10^{-21}$ Вт/Гц, что соответствует воспроизведению единицы ЭШТ в диапазоне значений 77,4–153,5 К. Диапазон значений ЭШТ в диапазоне частот 0,002–178,3 ГГц, в котором воспроизводится шкала единицы, составляет 77,4–20000 К.

Среднее квадратическое отклонение (СКО) результата измерений при пяти независимых наблюдениях и НСП воспроизведения единицы СПМШ (ЭШТ) ГЭТ 21-2021 приведены в табл. 6.

Неопределённость измерений при воспроизведении единицы СПМШ: стандартная неопределённость, оцененная по типу А, составила 0,04–0,7 К; стандартная неопределённость, оцененная по типу В 0,1–1,3 К; расширенная неопределённость 0,2–3,1 К при коэффициенте охвата $k=2$.

В рамках проведения работ по внедрению ГЭТ 21-2021 разработана Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот 0,002–178,3 ГГц. При разработке поверочной схемы учтена возможность передачи единицы СПМШ генераторам шума с повышенной точностью.

Заключение. Разработанный комплекс аппаратуры ГЭТ 21-2021 позволяет воспроизводить единицу СПМШ и проводить калибровку, поверку рабочих эталонов единицы СПМШ и рабочих средств измерений высокой точности для нужд информационно-телекоммуникационных систем, систем вооружения, глобального мониторинга, при разработке и применении чувствительных приёмно-усилительных устройств.

Дальнейшие перспективы в части обеспечения единства измерений СПМШ связаны с созданием эталонных НГШ и компараторов в диапазоне миллиметровых длин волн.

Список источников

1. Адерихин В. И., Буренков Ю. А., Саргсян М. В., Уздин Р. И. Усовершенствование государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения // Измерительная техника. 2012. № 12. С. 3–8.
2. Stelzried C. T., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, September 1968, vol. 16, no. 9, pp. 646–655. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1968.1126767>
3. Емельянова Л. П. Низкотемпературный СВЧ-генератор шума // Измерительная техника. 1985. № 9. С. 54–55.
4. Малков М. П., Данилов И. Б., Зельдович А. Г., Фрадков А. Б. Справочник по физико-техническим основам криогеники / Под ред. М. П. Малкова. М.: Энергия, 1973. 392 с.
5. Аверин В. Г., Аронзон Б. А., Бабаев Н. С. Таблицы физических величин. Справочник / Под ред. И. К. Кикоина. М.: Атомиздат, 1976. 1008 с.
6. Петросян О. Г., Абрамова О. С., Гольба В. А., Жданова Т. Я., Юрчук Э. Ф. Низкотемпературный генератор шума

миллиметрового диапазона // Измерительная техника. 1984. № 11. С. 60–61.

7. Петросян О. Г., Саргсян М. В. Анализ погрешностей комплектного метода аттестации тепловых генераторов шума // Измерительная техника. 1993. № 3. С. 55–57.

8. Daywitt W., (1984), A Coaxial Noise Standard for the 1 GHz to 12.4 GHz Frequency Range, *Technical Note (NIST TN)*, 1074, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (accessed November 11, 2022).

9. Grosvenor C., Randa J., Billinger R., (2000), Design and Testing of NFRad – A New Noise Measurement System, *Technical Note (NIST TN)*, 1518, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=6264 (accessed: 11.11.2022).

10. Слаев В. А. Руководство по выражению неопределенности измерения / Пер. с англ., под ред. В. А. Слаева. СПб: ВНИИМ им. Д. И. Менделеева, 1999. 134 с.

11. Randa J., Gerecht E., Gu D., Billinger R. L., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, March 2006, vol. 54, no. 3, pp. 1180–1189. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.864107>

12. Randa J., Walker D. K., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 2007, vol. 56, no. 2, pp. 551–554. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.891145>

13. Randa J., *84th ARFTG Microwave Measurement Conference*, 2014, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ARFTG.2014.7013402>

14. Rahmati M. M., Banai A., *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1002/mmce.22599>

References

1. Aderikhin V. I., Burenkov Y. A., Sargsyan M. V., Uzdin R. I., *Measurement Techniques*, 2013, vol. 55, pp. 1335–1343. <https://doi.org/10.1007/s11018-013-0131-3>

2. Stelzried C. T., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, September 1968, vol. 16, no. 9, pp. 646–655. <https://doi.org/10.1109/TMTT.1968.1126767>

3. Emel'yanova L. P., *Measurement Techniques*, 1985, vol. 28, pp. 788–789. <https://doi.org/10.1007/BF00862752>

4. Malkov M. P. (ed.), *Handbook of physical and technical fundamentals of cryogenics*, Energoatomizdat Publ., Moscow, 1963, p. 90, 123, 176. (In Russ.)

5. Averin V. G., Aronzon B. A., Babaev N. S., *Tablicy fizicheskikh velichin. Spravochnik [Tables of physical quantities. Directory]*, Ed. by I. K. Kikoina, Moscow, Atomizdat Publ., 1976, 1008 p. (In Russ.)

6. Petrosyan O. G., Abramova O. S., Gol'ba V. A., Zhdanova T. Ya., Yurchuk E. F., *Measurement Techniques*, 1984, vol. 27, pp. 1053–1055. <https://doi.org/10.1007/BF00861834>

7. Petrosyan O. G., Sargsyan M. V., *Measurement Techniques*, 1993, vol. 36, pp. 335–337. <https://doi.org/10.1007/BF01003672>

8. Daywitt W., (1984), A Coaxial Noise Standard for the 1 GHz to 12.4 GHz Frequency Range, *Technical Note (NIST TN)*, 1074, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD (accessed November 11, 2022).

9. Grosvenor C., Randa J., Billinger R., (2000), Design and Testing of NFRad – A New Noise Measurement System, *Technical Note (NIST TN)*, 1518, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD, [online], available at: https://tsapps.nist.gov/publication/get_pdf.cfm?pub_id=6264 (accessed: 11.11.2022).

10. Slaev V. A., *Guidance on the expression of measurement uncertainty*, Translated from English V. A. Slaev (ed.), St. Petersburg, D. I. Mendeleyev Institute for Metrology Publ., 1999, 134 p. (In Russ.)

11. Randa J., Gerecht E., Gu D., Billinger R. L., *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, March 2006, vol. 54, no. 3, pp. 1180–1189. <https://doi.org/10.1109/TMTT.2005.864107>

12. Randa J., Walker D. K., *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, April 2007, vol. 56, no. 2, pp. 551–554. <https://doi.org/10.1109/TIM.2007.891145>

13. Randa J., *84th ARFTG Microwave Measurement Conference*, 2014, pp. 1–8. <https://doi.org/10.1109/ARFTG.2014.7013402>

14. Rahmati M. M., Banai A., *International Journal of RF and Microwave Computer Aided Engineering*, 2021, vol. 31, no. 5, pp. 1–18. <https://doi.org/10.1002/mmce.22599>

Статья поступила в редакцию 20.05.2022; одобрена после рецензирования 08.07.2022; принята к публикации 11.07.2022.
The article was submitted 20.05.2022; approved after reviewing 08.07.2022; accepted for publication 11.07.2022.