

УДК 006.91:621.317

ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ПЕРВИЧНЫЙ ЭТАЛОН ЕДИНИЦЫ СПЕКТРАЛЬНОЙ ПЛОТНОСТИ МОЩНОСТИ ШУМОВОГО РАДИОИЗЛУЧЕНИЯ ГЭТ 21-2011

Ю.А. Буренков

ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.
burenkov@vniiftri.ru

Приведены результаты совершенствования Государственного первичного эталона ГЭТ 21–2011, описаны устройство и характеристики модернизированной и вновь созданной эталонной аппаратуры

The results of the improvement of the State primary standard GET 21–2011 are given, the device and characteristics of the modernized and newly developed standard equipment are described.

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

Key words: standard, spectral density of noise radio emission power, equivalent noise temperature.

Радиоприёмные устройства высоких и сверхвысоких частот применяют в системах дальней и сверхдальней связи, радионавигации, радиолокации, в научных исследованиях, в телевидении и радиовещании, при измерении внеполосных излучений. Чувствительность таких устройств (и их компонентов — усилителей, преобразователей, транзисторов и т.п.), зависящая от уровня шумовых электромагнитных колебаний, возникающих внутри устройств, наиболее точно и просто может быть проконтролирована с помощью мер спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения (или эквивалентной шумовой температуры) — измерительных генераторов шума (ГШ).

Для применяемых на практике ГШ спектральная плотность мощности шумового радиоизлучения (СПМШ) G обычно находится в пределах $1 \cdot 10^{-21} — 4 \cdot 10^{-19}$ Вт/Гц. Из-за неудобства использования таких величин измерительные генераторы шума с достаточно гладким частотным спектром характеризуются эквивалентной шумовой температурой (ЭШТ) $T = G / k$, где k — постоянная Больцмана.

С целью достижения единства ВЧ/СВЧ шумовых измерений в национальных метрологических институтах (НМИ) ряда развитых стран уже 40–45 лет существуют национальные эталоны единицы СПМШ (ЭШТ). В эталонах используется наиболее точный метод воспроизведения единицы эталонными мерами СПМШ, основанный на законе теплового электромагнитного излучения абсолютно чёрного тела [1]; передача размера единицы

от эталонных мер к рабочим эталонам и рабочим средствам измерений осуществляется при помощи компараторов — чувствительных радиометрических приёмников [2]. Постоянно ведущаяся модернизация эталонов обусловлена прогрессом радиоэлектроники.

Во ВНИИФТРИ работы по измерению СПМШ с наивысшей точностью, начавшиеся в 1957 г. под руководством Л.А. Биргера и Б.Н. Швецова с диапазона частот 2,6–17,4 ГГц, постоянно продолжаются с расширением диапазона измерений в сторону как метровых, так и миллиметровых волн [3–9]. До последнего времени эти работы велись в диапазоне частот от 2 МГц до 178,3 ГГц на девяти эталонных установках Государственного эталона ГЭТ 21-91, основная аппаратура которого создана более 30 лет назад для коаксиальных и прямоугольных волноводов.

В 2007–2011 годах в результате модернизации эталона под руководством Р.И. Уздина была создана основа для увеличения точности поверки и калибровки ГШ на современной коаксиальной линии сечения 3,5/1,52 мм и тем самым для существенного повышения качества изготовления в радиоприборостроении СВЧ элементов и узлов нового поколения. Разработанная установка состоит из первичной эталонной меры и шести компараторов, перекрывающих диапазон частот 1,0–26,5 ГГц. Верхняя граница частотного диапазона при поверках и калибровках коаксиальных генераторов шума расширена с 12,44 до 26,5 ГГц, полученные при этом метрологические характеристики в 1,5–2 раза лучше обеспечиваемых аппаратурой, созданной ранее для коаксиальной линии сечения 7,0/3,04 мм. Для увеличения верхней границы частотного диапазона ПЭМ с 12,42 до 26,5 ГГц было выбрано сечение коаксиальной линии до 3,5/1,52 мм с вертикальной ориентацией и расположением выходного соединителя ПЭМ под днищем криостата. Такое конструктивное решение создало возможность уравновешенной подвески ПЭМ, что уменьшает неповторяемость потерь в паре соединителей между ПЭМ и входом компаратора. Дополнительным преимуществом по сравнению с [10] является независимость шумовой температуры от изменения уровня азота в криостате в значительных пределах.

Основные характеристики ПЭМ-3,5

Частотная зависимость ЭШТ T_s и погрешности воспроизведения единицы ЭШТ даны в табл. 1 и 2. Значения T_s приведены для нормального значения температуры кипения азота $T_{N_2} = 77,4$ К и нормальной комнатной температуры $T_0 = 293,15$ К.

Изменение ЭШТ T_s за 10 мин в рабочем режиме не более 0,05 К.

Время установления рабочего режима: не более 1,5 ч после первоначальной заливки азота и не более 15 мин после дозаливки азота в рабочем режиме. Продолжительность работы ПЭМ — не менее 1,5 ч.

Таблица 1

Частота, ГГц	1,0	2,0	4,0	8,0	12,0	19,0	26,5
ЭШТ, К	79,72	80,57	81,77	83,47	84,58	87,18	88,14

Таблица 2

Источники погрешностей θ_i, S_i	Составляющие погрешности			
	обозначение	оценки на частотах f , ГГц, мК		
		1,0	8,0	26,5
1. Погрешность измерения температуры излучателя T_N , включая погрешности: градуировки термометра T_N ; измерителя T_N ; из-за градиента температуры между излучателем и термометром	θ_1 S_1	58 50		
2. Погрешность измерения температуры выходного соединителя T_C , включая погрешности: градуировки термометра T_C ; измерителя T_C ; из-за градиента температуры между соединителем и термометром	θ_2	0	3	7
3. Погрешность измерения температурного распределения $T(x)$ вдоль ТКЛ, включая погрешности: градуировки термопар; измерения термоэДС; из-за невоспроизводимости показаний термопар; из-за неидентичности распределения $T(x)$ для ПЭМ и ТЭ; аппроксимации $T(x)$	θ_3 S_3	22 4	65 10	119 20
4. Погрешность измерения затухания ТКЛ при комнатной температуре	θ_4	14	52	113
5. Погрешность определения потерь A_{Ci} в выходном соединителе	θ_5	21	44	95
6. Погрешность зависимости электросопротивления проводников ТКЛ от температуры	θ_6	6	18	33

Продолжение таблицы 2

Источники погрешностей θ_i , S_i	Составляющие погрешности			
	обозначение	оценки на частотах f , ГГц, мК		
		1,0	8,0	26,5
7. Результирующие погрешности воспроизведения единицы ЭШТ [11]: НСП СКО результата измерений при 5 наблюдениях	θ_0	95	157	280
	S_0	50	53	60

Принимая во внимание положительный опыт работы с компараторами эталона ГЭТ 21-91 в диапазоне частот 1,0–37,5 ГГц, нами была выбрана схема компарирования генераторов шума с опорным шумовым сигналом [8], не требующая громоздкой и дорогой системы термостабилизации, в которой дрейф выходного сигнала в отличие от схемы [12] слабо зависит от коэффициента передачи радиометра и определяется в основном температурной зависимостью более стабильных характеристик компаратора, таких как уровень сигнала опорного ГШ и коэффициент шума входного усилителя. Структурная схема эталонной установки приведена на рис. 1.

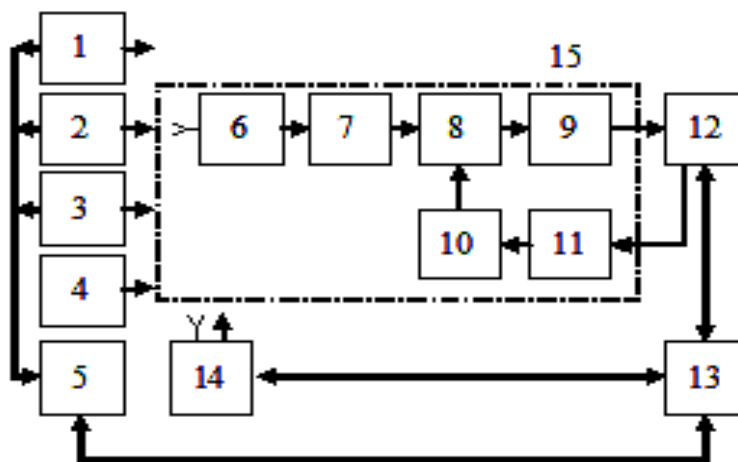


Рис. 1. Структурная схема усовершенствованной эталонной установки: 1 — тепловой эквивалент ПЭМ; 2 — ПЭМ, T_s ; 3 — согласованная нагрузка, T_a ; 4 — исследуемый вторичный эталон, T_x ; 5 — измеритель температур МИТ8.10; 6, 7 — вентили; 8 — направленный ответвитель; 9 — СВЧ усилитель; 10 — вентиль; 11 — опорный ГШ; 12 — ИКШ; 13 — ПЭВМ; 14 — векторный анализатор цепей; 15 — сменные СВЧ тракты, 6 шт.

Диапазон частот 1,0–26,5 ГГц перекрывается шестью сменными СВЧ трактами. В качестве измерителя отношений СВЧ шумовых сигналов используется измеритель коэффициента шума (ИКШ), работающий на фиксированной частоте гетеродина при передаче размера единицы СПМШ от ПЭМ к измеряемому ГШ, вторичному эталону. При поочерёдном подсоединении к входу компаратора двух эталонных ГШ с шумовыми температурами $T_S \approx 80$ К, $T_A \approx 300$ К (так называемая «комнатная» согласованная нагрузка) и измеряемого ГШ с неизвестной ЭШТ T_X ИКШ регистрирует для каждого ГШ последовательность эквивалентных коэффициентов шума:

$$F_i = \frac{N_R}{\frac{P(T_i, T_n, T_R)}{P(T_i, T_n)} - 1}, \quad (1)$$

где $i = S, A, X$ — индексы объектов на входе компаратора; T_R и N_R — абсолютная и избыточная относительная шумовые температуры опорного ГШ; T_n — эквивалентная шумовая температура входа компаратора; $P(T_i, T_n, T_R)$, $P(T_i, T_n)$ — интенсивности выходных сигналов, соответствующие включённому и выключенному состояниям опорного ГШ.

Уравнение измерения для искомой ЭШТ T_X , учитывающее реальные коэффициенты отражений на входе компаратора:

$$T_X = T_A + (T_S - T_A) \cdot \frac{(F_X - F_A)}{(F_S - F_A)} \cdot Q, \quad (2)$$

где $Q = \frac{1 - |\Gamma_S|^2}{1 - |\Gamma_X|^2} \cdot \frac{|1 - \Gamma_X \Gamma_{in}|^2}{|1 - \Gamma_S \Gamma_{in}|^2}$ — коэффициент рассогласования; Γ_X , Γ_S , Γ_{in} —

комплексные коэффициенты отражения (ККО) выходов измеряемого ГШ, ПЭМ и входа компаратора соответственно.

Расчёт показывает, что для заданной рабочей частоты неопределённость введения поправки на коэффициент рассогласования не превысит 0,2–0,3 %, если модули ККО Γ_X , Γ_S , Γ_{in} не превышают 0,1–0,15 и ККО измерены с неопределённостями не более 0,01 по модулю и 5° по фазе. Эти условия обеспечиваются при измерениях векторным анализатором цепей Agilent 8363В.

Результаты исследования МХ шести эталонных компараторов, перекрывающих частотный диапазон 1,0–26,5 ГГц, приведены в табл. 3 для двух случаев передачи единицы ЭШТ от ПЭМ к вторичным эталонам ВЭ: погрешности θ_{ei} , S_e соответствуют передаче единицы низкотемпературному ВЭ ($T_X \approx 80$ К); погрешности θ_{0ei} , S_{0ei} соответствуют передаче единицы высокотемпературному ВЭ ($T_X \approx 10\,000$ К).

Таблица 3

Погрешности передачи единицы ЭШТ

Источники и обозначения погрешностей		Оценки погрешностей $\theta_{\varepsilon i}, S_{\varepsilon i}; \theta_{0\varepsilon i}, S_{0\varepsilon i}$ в диапазонах частот, ГГц				
		1,0– 4,0	4,0– 8,0	8,0– 12,0	12,0– 18,0	18,0– 25,6
1. Отражения от выходов компарируемых ГШ и входа компаратора	$\theta_{\varepsilon 1}, K$	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6
	$\theta_{0\varepsilon 1}, \%$	0,5	0,7	0,8	0,9	1,0
2. Зависимость собственного шума компаратора и шумов опорного ГШ от ККО компарируемых ГШ	$\theta_{\varepsilon 2}, K$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
3. Неточность измерения температуры «комнатной» нагрузки	$\theta_{\varepsilon 3}, K$	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
	$\theta_{0\varepsilon 3}, \%$	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1
4. Нелинейность сквозной передаточной характеристики компаратора	$\theta_{0\varepsilon 4}, \%$	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
5. Неповторяемость результатов наблюдений из-за собственных шумов измерителя, флуктуационного характера индицируемых сигналов, внешних помех, температурного дрейфа	S_{ε}^*, K	0,1	0,2	0,3	0,4	0,6
	$S_{0\varepsilon}^*, \%$	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
Суммарная погрешность передачи размера единицы**, [11]	$S_{\varepsilon \Sigma}, K$	0,18	0,28	0,39	0,52	0,71
	$S_{0\varepsilon \Sigma}, \%$	0,34	0,5	0,56	0,65	0,74

* СКО результата измерений при 5 наблюдениях.

** С учётом погрешностей ПЭМ-3,5.

Оценки неопределённостей результатов измерений согласно [13]:

Таблица 4

Диапазон частот, ГГц	Неопределённость воспроизведения единицы			Расширенная неопределённость ($k = 2$) при передаче единицы вторичным эталонам ¹	
	стандартная типа A u_A, K	стандартная типа B u_B, K	суммарная стандартная u_{Σ}, K	НТ	ВТ
				U, K	$U_0, \%$
1,0–8,0	0,1	0,07	0,09	0,36	0,7–1,0
8,0–12,42		0,07–0,12	0,09–0,13	0,4–0,8	1,0–1,1
12,42–26,5		0,12–0,4	0,13–0,55	0,8–1,5	1,2–1,5

¹ Вид вторичного эталона: НТ — низкотемпературный; ВТ — высокотемпературный.

Как следует из таблицы 5, созданная эталонная установка для диапазона частот 1,0–26,5 ГГц при передаче размера единицы СПМШ высокотемпературным ГШ в современной коаксиальной линии 3,5/1,52 мм обеспечивает точность, практически совпадающую с лучшими зарубежными аналогами.

Таблица 5

Расширенная неопределённость U_0 , %, для коаксиальных эталонов сравнения

Национальный метрологический институт, страна	Частота, ГГц					
	1,0	8,0	12,4	18,0	26,5	40,0
NPL, Великобритания	1,1	1,1	1,1	1,1	2,0	2,5
NIST, США	1,0	1,5	2,0	1,2	1,3	1,7
ВНИИФТРИ, РФ (2001 г.)	0,8	1,2	1,4	1,6	—	—
ВНИИФТРИ, РФ (2011 г.)	0,7	1,0	1,1	1,3	1,5	—

В период с 2015 по 2016 год во ВНИИФТРИ был создан макет ПЭМ на базе низкотемпературного генератора шума и компаратора для воспроизведения и передачи единицы спектральной плотности мощности шума в диапазоне частот от 140 до 220 ГГц.

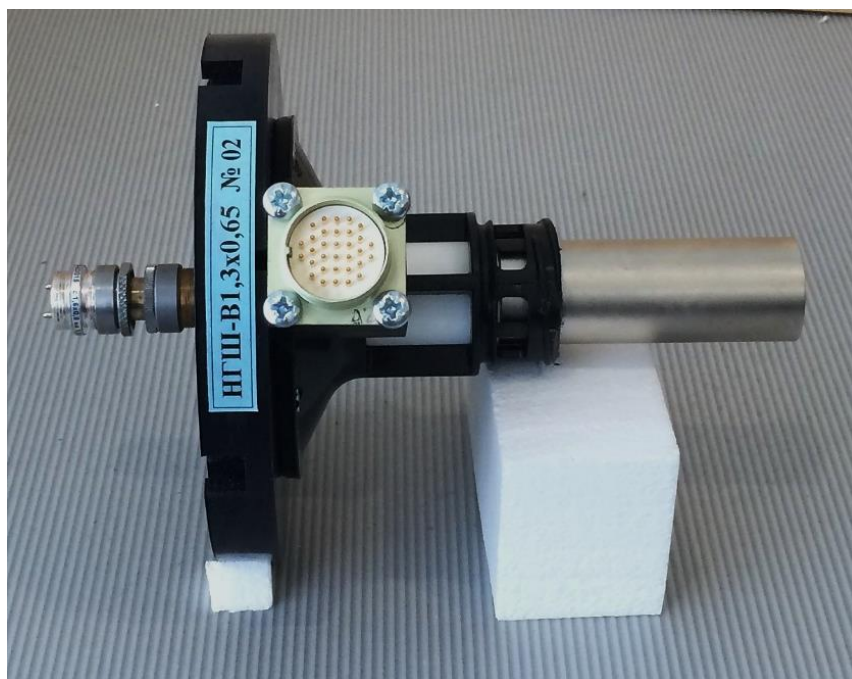


Рис. 2. Низкотемпературный генератор шума НГШ В1,3 × 0,65



Рис. 3. Общий вид НГШ V1,3 × 0,65 с криостатом



Рис. 4. Низкотемпературный генератор шума НГШ V1,3 × 0,65 в рабочем режиме

Таблица 6

Технические характеристики

Параметр	Спецификация	Измеренное значение
Рабочая частота, ГГц	140–220	140–220
Волновод	WR-05	WR-05
Выходной фланец	UG-387/U-M	UG-387/U-M
Выходная шумовая температура, К	120–160	120–160
Неопределённость шумовой температуры не более, К	5–7	5–7
Стабильность за час, К	0,1	0,1
Размер, д/ш/в	150/120/120	150/120/120

В настоящее время во ВНИИФТРИ проводится опытно-конструкторская работа по обновлению материально-технической базы и усовершенствованию Государственного эталона ГЭТ 21-2011 в диапазоне частот от 0,002 до 37,5 ГГц. Планируется разработать и обновить ПЭМ и компараторы в коаксиальном тракте 7/3,04 и в волноводных трактах 16×8; 11×5,5; 7,2×3,4.

Литература

1. Левин М.Л., Рытов С.М. Теория равновесных тепловых флуктуаций в электродинамике. М.: Наука, 1967.
2. Daywitt W.C. Radiometer equation and analysis of systematic errors for the NIST automated radiometers // NIST Tech. 1989, march. Note 1327.
3. Birger L.A., Shvetsov B.N., Sokov I.A. Translated from Izmeritel'naya Tekhnika. 1961. № 1. P. 37–40.
4. Петросян Г.Г. Государственный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне 2,6–17,4 ГГц // Измерительная техника. 1971. № 6. С. 53–56.
5. Уздин Р.И., Пругло В.И. Государственный специальный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот 125–1000 МГц // Измерительная техника. 1973. № 10.
6. Пругло В.И. Государственный специальный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот 2–125 МГц // Измерительная техника. 1980. № 2.
7. Петросян О.Г., Абрамова О.С., Гольба В.А. и др. Низкотемпературный генератор шума миллиметрового диапазона // Измерительная техника. 1984. № 11. С. 60–61.
8. Резчиков А.А., Ознобишин В.В. Образцовая установка для аттестации образцовых низкотемпературных генераторов шума. Исследования этало-

- нов сравнения в области радиотехнических измерений // Сб. научных трудов. Менделеево: ВНИИФТРИ, 1984. С. 51–56.
9. Емельянова Л.П. Низкотемпературный СВЧ генератор шума // Измерительная техника. 1985. № 9. С. 54–55.
10. Daywitt W.C. A coaxial noise standard for the 1 GHz to 12.4 GHz frequency range // NIST Tech. 1984, march. Note 1074.
11. ГОСТ 8.381-2009. ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.
12. Grosvenor C.A., Randa J., Billinger R.L. Design and Testing of NFRad — A New Noise Measurement System // NIST Techn. 2000, march. Note 1518.
13. Руководство по выражению неопределённости измерения: пер. с англ. / под ред. В.А. Слаева. СПб.: ВНИИМ им. Д.И. Менделеева, 1999.