

Усовершенствование государственного первичного эталона единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения

В. И. АДЕРИХИН, Ю. А. БУРЕНКОВ, М. В. САРГСЯН, Р. И. УЗДИН

Всероссийский научно-исследовательский институт физико-технических
и радиотехнических измерений, Менделеево, Россия, e-mail: l120@vniiftri.ru

Приведены результаты усовершенствования государственного первичного эталона ГЭТ 21—2011. Описаны устройство и характеристики созданной эталонной аппаратуры для диапазона частот 1,0 — 26,5 ГГц.

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

The results of improvement of the State primary standard SPS 21—2011 are given. The structure and characteristics of the created standard equipment for the frequency range 1,0 — 26,5 GHz are described.

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

Радиоприемные устройства высоких (ВЧ) и сверхвысоких (СВЧ) частот применяют в системах дальней и сверхдальней связи, радионавигации, радиолокации, научных исследованиях, 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 при помощи 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 ГШ с достаточно гладким частотным спектром характеризуют эквивалентной шумовой температурой (ЭШТ) $T = G/k$, где k — постоянная Больцмана.

С целью достижения единства ВЧ (СВЧ) шумовых измерений в национальных метрологических институтах ряда развитых стран уже 40—45 лет существуют национальные эталоны единицы СПМШ (ЭШТ). В них применяется наиболее точный метод воспроизведения единицы эталонными мерами СПМШ, основанный на законе теплового электромагнитного излучения абсолютно черного тела [1]. Передача размера единицы от эталонных мер рабочим эталонам и рабочим средствам измерений осуществляется при помощи компараторов — чувствительных радиометрических приемников [2]. Постоянно ведущаяся модернизация эталонов обусловлена прогрессом радиоэлектроники.

Во ВНИИФТРИ работы по измерению СПМШ с наивысшей точностью, начавшиеся в 1957 г. с диапазона частот 2,6—17,4 ГГц, постоянно продолжают с расширением диапазона измерений в сторону как метровых, так и миллиметровых волн [3—10]. До последнего времени эти исследования велись в диапазоне частот 2 МГц — 178,3 ГГц на девяти

ти эталонных установках государственного эталона ГЭТ 21—91, основная аппаратура которого создана 20 — 30 лет назад для коаксиальных и прямоугольных волноводов ныне устаревших сечений.

В 2007—2011 гг. в результате модернизации эталона создана основа для увеличения точности поверки и калибровки ГШ на современной коаксиальной линии сечением 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 ГШ 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 сечением 7,0/3,04 мм.

Первичная эталонная мера (ПЭМ) единицы СПМШ (или ЭШТ). Излучатель современных ПЭМ представляет собой согласованную СВЧ-нагрузку, охлаждаемую до температуры, близкой к точке кипения азота. Шумовое излучение такой нагрузки передается на выход ПЭМ по теплоизолирующей линии передачи.

В коаксиальной ПЭМ, разработанной в NIST для диапазона 1,0 — 12,4 ГГц [11], охлаждаемая нагрузка и теплоизолирующая коаксиальная линия (ТКЛ) установлены в стандартном криостате (сосуде Дьюара) вертикально, вверх выходным соединителем. Значительные размеры криостата определили способ коммутации измеряемых объектов и компаратора: выход ПЭМ соединен непосредственно со входом одного из каналов прецизионного коаксиального переключателя, к другим каналам которого подсоединены исследуемый рабочий эталон, «комнатная» согласованная нагрузка и вход компаратора. В результате такого решения существенно увеличена скорость пересоединения измеряемых объектов. Однако по данным изготовителя потери в каналах переключателя и их неповторяемость на частотах до 26,5 ГГц

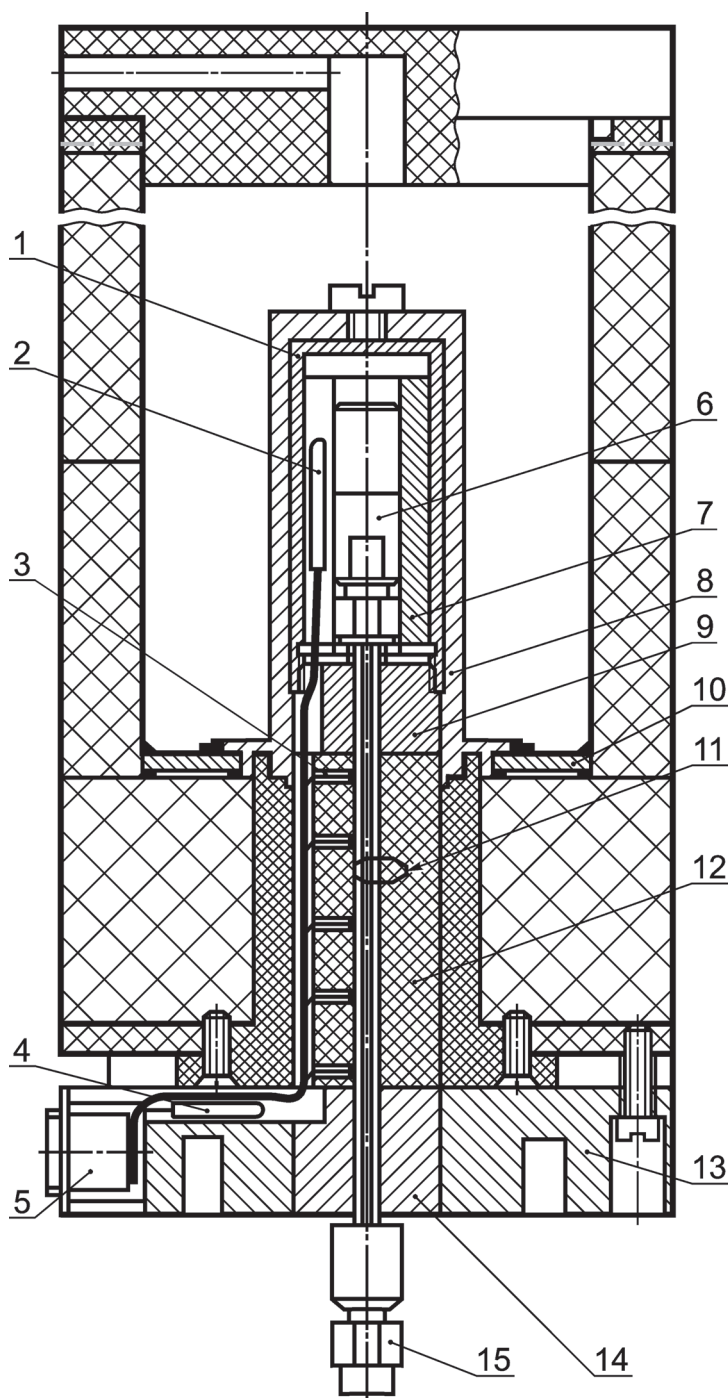


Рис. 1. Конструкция первичной эталонной меры
1.0 — 26.5 ГГц:

1 — крышка; 2, 4 — термометры; 3 — термопара (5 шт.); 5 — разъем; 6 — излучатель; 7 — втулка разрезная (латунь); 8 — стакан; 9, 14 — втулки (латунь); 10 — днище криостата; 11 — теплоизолирующая коаксиальная линия; 12 — втулка (пенополистирол); 13 — радиатор; 15 — соединитель

находятся в пределах 0,3 — 0,7 дБ и $\pm 0,03$ дБ, соответственно. Асимметрия плеч переключателя является одним из трудно контролируемых источников погрешности измерений.

В более компактной конструкции криостата ПЭМ из состава эталона ГЭТ 21—91 для частот 0,002 — 12,42 ГГц (коаксиальная линия сечением 7/3,04 мм) предусмотрена возможность вывода радиоизлучения охлаждаемой нагрузки по горизонтально ориентированной ТКЛ [8]. При этом передача размера единицы от ПЭМ рабочему эталону ведется без СВЧ-переключателя прямым подсоединением измеряемых объектов ко входу компаратора. Однако горизонтальное перемещение криостата с ПЭМ из-за несоосности сопрягаемых соединителей повышает неповторяемость потерь и погрешность компарирования.

Для увеличения верхней границы частотного диапазона ПЭМ с 12,42 до 26,5 ГГц необходимо уменьшить вдвое сечение коаксиальной линии до 3,5/1,52 мм, при этом отмеченные выше трудности пересоединения ПЭМ возрастут.

В связи с изложенным при разработке новой ПЭМ был выбран вариант с вертикальной ориентацией и расположением выходного соединителя под днищем криостата. Такое конструктивное решение создало возможность уравновешенной подвески ПЭМ, что уменьшает неповторяемость потерь в паре соединителей между ПЭМ и входом компаратора. Дополнительное преимущество по сравнению с разработкой NIST [11] — независимость шумовой температуры от изменения уровня азота в криостате в значительных пределах.

Устройство первичной эталонной меры ПЭМ-3,5 приведено на рис. 1. Распределение температуры вдоль ТКЛ 11 измеряется в трех зонах: криогенной — термометром 2, переходной — пятью термопарами 3 (вдоль наружного проводника ТКЛ) и комнатной — термометром 4. В центральную часть днища 10 криостата через стакан 8 введен излучатель 6 — коаксиальная согласованная нагрузка, соединенная со входом ТКЛ и защищенная герметизирующей крышкой 1. Температурный градиент между корпусом излучателя 6 и жидким азотом не превышает 0,02 К благодаря установке внутри крышки 1 латунной втулки 7 с продольным пазом для термометра 2. В качестве излучателя применена согласованная нагрузка НС3-20-13, разработанная в НПО «МИКРАН» (Томск).

Проводники ТКЛ 11 сечением 3,5/1,52 мм представляют собой прецизионные тонкостенные трубы из нержавеющей стали, изготовленные в ЗАО «Трубопрофиль» (Москва). Латунные втулки 9 и 14, припаянные к внешнему проводнику ТКЛ, используются для монтажа СВЧ-соединителей и обеспечивают надежные тепловые контакты ТКЛ со стаканом 8, омываемым азотом, и радиатором 13, находящимся при температуре, близкой к комнатной. Для СВЧ-контакта ТКЛ с выходом излучателя 6 служит бесшайбовый соединитель (розетка). Теплоизоляция ТКЛ в переходной температурной зоне достигается применением втулки 12 из пенополистирола. Для вывода на разъем 5 проводников термометра 2 и термопар 3 в комнатную зону предусмотрены продольные пазы на поверхностях втулок 9, 12 и 14. На выходе ТКЛ оканчивается стандартным соединителем 15 — вилкой типа 3,5 по стандарту [12].

Предварительные исследования показали, что температурный градиент между внешним и внутренним проводниками в переходной зоне ТКЛ достигает 1 — 2 К. Чтобы ввести поправку на этот градиент при отсутствии доступа к внутреннему проводнику ТКЛ, создан дополнительный экземпляр ПЭМ — тепловой эквивалент (ТЭ), в котором при сохранении тепловых потоков измерение градиента обеспечивается за счет изменения конструкции излучателя и внутреннего проводника ТКЛ. На рис. 2 обозначения измененных элементов дополнены буквой «Э». К внешнему проводнику ТКЛ вместо излучателя 6 подсоединен его тепловой эквивалент 6Э — втулка, в корпусе которой имеется сквозное отверстие для удлиненного внутреннего проводника ТКЛ 11Э. Введение описанных изменений позволило разместить в переходной температурной зоне (во внутреннем проводнике ТКЛ 11Э) термозонд — пять дополнительных термодпар, выводы 2Э которых проведены через паз во втулке 7 и далее к разъему 5 вместе с проводами термометра 2 и термодпар 3.

Чтобы уравнивать тепловые потоки через коаксиальные линии ПЭМ и ТЭ, внутри и снаружи коаксиальных проводников ПЭМ имеются дополнительные отрезки проводников термодпар (на рис. 1 не показаны), являющиеся тепловым эквивалентом пяти дополнительных термодпар, размещенных в ТЭ описанным выше способом. Продольные координаты рабочих спаев дополнительных термодпар ТЭ и их тепловых эквивалентов во внутреннем проводнике ТКЛ ПЭМ совпадают с координатами рабочих спаев термодпар на наружных проводниках коаксиальных линий ПЭМ и ТЭ с погрешностью $\pm 0,5$ мм.

Таким образом, достигается идентичность переходных температурных зон ТЭ и ПЭМ, создается возможность учета поправки на поперечный температурный градиент между проводниками ТКЛ ПЭМ по результатам измерений этого градиента с помощью ТЭ в реальном масштабе времени при воспроизведении единицы СПМШ и передаче ее размера вторичным эталонам.

Воспроизведение единицы основано на измерениях следующих величин:

ослабления А, дБ, вносимого теплоизолирующей соединительной линией передачи ПЭМ при комнатной температуре;

температур излучателей ПЭМ и ТЭ;

распределения температуры $T(x)$ вдоль линий передачи ПЭМ и ТЭ с введением поправки на поперечный температурный градиент между проводниками ТКЛ.

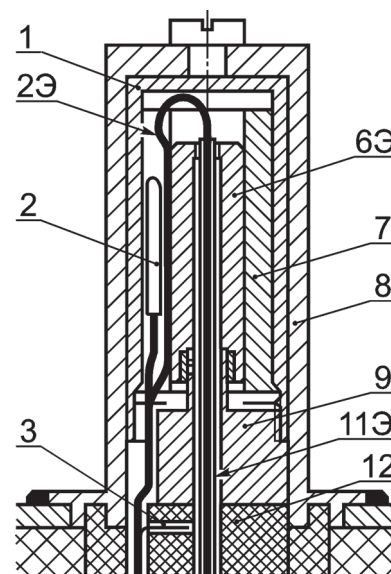
По результатам измерений А и $T(x)$ с учетом известного температурного коэффициента удельного электрического сопротивления материала линии передачи рассчитывается зависимость постоянной затухания линии $\alpha(x)$, дБ/м, после чего значение ЭШТ T_s на выходе ПЭМ определяется с использованием волноводной формы закона Кирхгофа для i -го участка линии [9]. Переход от ЭШТ к СПМШ выполняется с использованием формулы Релея—Джинса: $G = kT$.

Основные характеристики ПЭМ-3,5:

частотная зависимость ЭШТ T_s и погрешности воспроизведения ее единицы — неисключенные систематические по-

Рис. 2. Изменения в конструкции теплового эквивалента первичной эталонной меры:

6Э — втулка, тепловой эквивалент излучателя; 11Э — удлиненный внутренний проводник ТКЛ; 2Э — выводы пяти дополнительных термодпар из внутреннего проводника 11Э; 1, 2, 3, 7, 8, 9 — то же, что на рис. 1



грешности (НСП) Θ и средние квадратические отклонения (СКО) S , приведенные в табл. 1 и 2. Значения T_s указаны для нормальных температур кипения азота $T_{N_2} = 77,4$ К и комнатной $T_0 = 293,15$ К;

изменение ЭШТ T_s за 10 мин в рабочем режиме не превышает 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 без заливки азота не менее 1,5 ч.

Таблица 1

Частотная зависимость ЭШТ

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

Передача размера единицы СПМШ вторичным эталонам. При выборе метода передачи единицы рассматривались две основные схемы компарирования ГШ. Получаемая в NIST высокая точность измерений с помощью компаратора — радиометра полного сигнала [14] обеспечивается при нестабильности уровня выходного сигнала в пределах 0,001 %/ч. С этой целью температура основных ВЧ(СВЧ)-узлов радиометра стабилизируется охладителем с проточной водой, температура которой поддерживается с погрешностью 0,1 °С; температура в помещении эталона находится в пределах $(23 \pm 0,5)$ °С.

На основе положительного опыта работы с компараторами эталона ГЭТ 21—91 в диапазоне частот 1,0 — 37,5 ГГц была выбрана схема компаратора с опорным шумовым сигналом [8], не требующая громоздкой и дорогой системы термостабилизации, в которой дрейф выходного сигнала в отличие от схемы, описанной в [14], слабо зависит от коэффициента передачи радиометра и определяется, в основном, температурной зависимостью более стабильных характери-

Погрешность воспроизведения ЭШТ

Составляющие погрешности	Обозначение погрешности	Оценка погрешности, мК, на частотах f , ГГц		
		1,0	8,0	26,5
Погрешность измерения температуры излучателя, включая погрешности градуировки термометра измерителя, из-за градиента температуры между излучателем и термометром	Θ_1 S_1	58 50	58 50	58 50
Погрешность измерения температуры выходного соединителя, включая погрешности градуировки термометра измерителя, из-за градиента температуры между соединителем и термометром	Θ_2	0	3	7
Погрешность измерения температурного распределения $T(x)$ вдоль ТКЛ, включая погрешности градуировки термопар, измерения термоЭДС, из-за невоспроизводимости показаний термопар, неидентичности распределения $T(x)$ для ПЭМ и ТЭ, аппроксимации $T(x)$	Θ_3 S_3	22 4	65 10	119 20
Погрешность измерения затухания ТКЛ при комнатной температуре	Θ_4	14	52	113
Погрешность определения потерь в выходном соединителе	Θ_5	21	44	95
Погрешность зависимости электрического сопротивления проводников ТКЛ от температуры	Θ_6	6	18	33
Результирующие погрешности воспроизведения единицы ЭШТ [13]: НСП СКО результата измерений при пяти наблюдениях	Θ_0 S_0	95 50	157 53	280 60

стик компаратора, таких как уровень сигнала опорного ГШ и коэффициент шума входного усилителя. Структурная схема эталонной установки приведена на рис. 3.

Диапазон частот 1,0 — 26,5 ГГц перекрывается шестью сменными СВЧ-трактами. В качестве измерителя отношений шумовых СВЧ-сигналов используется измеритель коэффициента шума (ИКШ), работающий на фиксированной час-

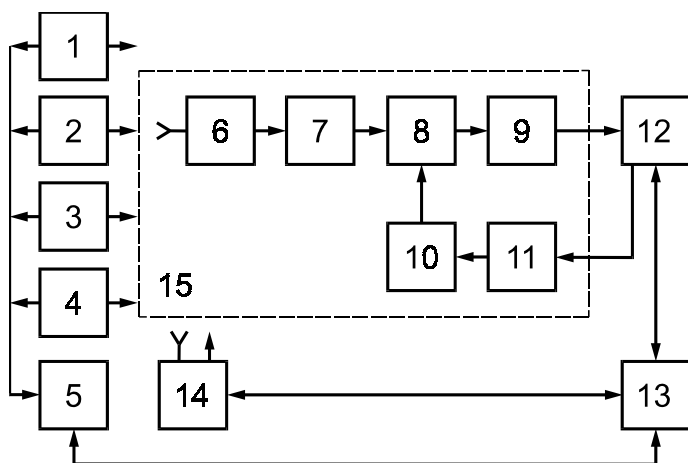


Рис. 3. Структурная схема усовершенствованной эталонной установки:

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

тоте гетеродина при передаче размера единицы СПМШ от ПЭМ к измеряемому ГШ, вторичному эталону.

При поочередном подсоединении ко входу компаратора трех объектов — ПЭМ, так называемой «комнатной» согласованной нагрузки с известными ЭШТ $T_s \approx 80$ К, $T_a \approx 300$ К и измеряемого ГШ с неизвестной ЭШТ T_x — измеритель регистрирует для каждого ГШ последовательность эквивалентных коэффициентов шума

$$F_i = N_R / [P(T_i, T_n, T_R) / P(T_i, T_n) - 1],$$

где i — индексы s, a, x объектов на входе компаратора; T_R , 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 включенному и выключенному состояниям опорного ГШ.

Уравнение измерения для искомой ЭШТ T_x , учитывающее реальные коэффициенты отражений на входе компаратора, имеет вид

$$T_x = T_a + Q (T_s - T_a) (F_x - F_a) / (F_s - F_a),$$

где $Q = \frac{1 - |\Gamma_s|^2 |1 - \Gamma_x \Gamma_{BX}|^2}{1 - |\Gamma_x|^2 |1 - \Gamma_s \Gamma_{BX}|^2}$ — коэффициент рассогласова-

ния; Γ_x , Γ_s , Γ_{BX} — комплексные коэффициенты отражения (ККО) соответственно выходов измеряемого ГШ, ПЭМ и входа компаратора.

Расчет показывает, что для заданной рабочей частоты неопределенность введения поправки на коэффициент рассогласования не превысит 0,2 — 0,3 %, если модули Γ_x , Γ_s ,

Таблица 3

Погрешности передачи единицы ЭШТ

Источник погрешности	Обозначение погрешности	Оценка погрешностей в диапазонах частот, ГГц				
		1,0—4,0	4,0—8,0	8,0—12,0	12,0—18,0	18,0—26,5
Отражения от выходов компарируемых ГШ и входа компаратора	$\Theta_{\varepsilon 1}$, К $\Theta_{0\varepsilon 1}$, %	0,2 0,5	0,3 0,7	0,4 0,8	0,5 0,9	0,6 1,0
Зависимость собственного шума компаратора и шумов опорного ГШ от ККО компарируемых ГШ	$\Theta_{\varepsilon 2}$, К	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01
Неточность измерения температуры «комнатной» нагрузки	$\Theta_{\varepsilon 3}$, К $\Theta_{0\varepsilon 3}$, %	0,01 0,1	0,01 0,1	0,01 0,1	0,01 0,1	0,01 0,1
Нелинейность сквозной передаточной характеристики компаратора	$\Theta_{0\varepsilon 4}$, %	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
Неповторяемость результатов наблюдений из-за собственных шумов измерителя, флуктуационного характера индицируемых сигналов, внешних помех, температурного дрейфа*	S_{ε} , К $S_{0\varepsilon}$, %	0,1 0,1	0,2 0,15	0,3 0,2	0,4 0,3	0,6 0,4
Суммарная погрешность передачи размера единицы** [13]	$S_{\varepsilon \Sigma}$, К $S_{0\varepsilon \Sigma}$, %	0,18 0,34	0,28 0,5	0,39 0,56	0,52 0,65	0,71 0,74

* СКО результата измерений при пяти наблюдениях; ** с учетом погрешностей ПЭМ-3,5.

$\Gamma_{\text{вх}}$ не превышают 0,1 — 0,15 и измерены с неопределенностями не более 0,01 по модулю и 5° по фазе. Эти условия обеспечиваются при измерениях векторным анализатором цепей Agilent 8363B.

Результаты исследования метрологических характеристик шести эталонных компараторов, перекрывающих частотный диапазон 1,0 — 26,5 ГГц, приведены в табл. 3 для двух случаев передачи единицы ЭШТ от ПЭМ вторичным

эталонам, где НСП $\Theta_{\varepsilon j}$, СКО S_{ε} соответствуют передаче единицы низкотемпературному эталону ($T_x \approx 80$ К); $\Theta_{0\varepsilon j}$, $S_{0\varepsilon}$ — передаче единицы высокотемпературному эталону ($T_x \approx 10000$ К).

При совершенствовании эталона для достижения высокой точности измерений была поставлена задача одновременного воспроизведения единицы СПМШ и передачи ее рабочему эталону. С этой целью автоматизированы следующие процессы, большей частью совмещенные во времени:

измерение температуры излучателя ПЭМ и комнатной согласованной нагрузки;

измерение температурных распределений вдоль теплоизолирующих коаксиальных линий ПЭМ и ее теплового эквивалента (19 датчиков температуры), расчет по полученным результатам измерений значения ЭШТ на выходе ПЭМ;

измерение ККО выходов ПЭМ, измеряемого ГШ и входа компаратора;

управление измерительным циклом измерителя коэффициента шума, обработка данных с его выхода с введением поправки на коэффициент рассогласования Q;

обработка данных всех перечисленных процессов и их накопление, необходимое для определения частотной зависимости ЭШТ (СПМШ) измеряемого ГШ.

В табл. 4 приведены оценки неопределенностей воспроизведения единицы СПМШ при обработке результатов измерений согласно [15], где k — коэффициент охвата, в табл. 5 — их сравнение с оценками, полученными для других эталонов.

Таблица 4

Оценки неопределенностей воспроизведения единицы СПМШ

Диапазон частот, ГГц	Неопределенность воспроизведения единицы			Расширенная неопределенность ($k = 2$) при передаче единицы вторичным эталонам	
	стандартная типа A u_A , К	стандартная типа B u_B , К	суммарная стандартная u_{Σ} , К	низкотемпературному U , К	высокотемпературному U_0 , %
1,0—8,0	0,1	0,07	0,09	0,36	0,7—1,0
8,0—12,42	0,1	0,07—0,12	0,09—0,13	0,4—0,8	1,0—1,1
12,42—26,5	0,1	0,12—0,4	0,13—0,55	0,8—1,5	1,2—1,5

Таблица 5

Расширенная неопределенность для коаксиальных эталонов сравнения

Национальный метрологический институт, страна	U_0 , %, для частоты, 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	—

Как следует из табл. 4, 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 точностью лучших зарубежных аналогов.

К первоочередным мероприятиям по внедрению усовершенствованного государственного эталона ГЭТ 21—2011 относятся:

разработка стандарта «Государственная поверочная схема для средств измерений спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот 0,002—178 ГГц»;

создание вторичного эталона единицы СПМШ для диапазона частот 0,002—40 ГГц;

разработка предложений по проведению международных сличений, проводимых под эгидой КОOMET;

продолжение совершенствования эталона в диапазонах частот 0,002 — 1,0 и 26,5 — 40,0 ГГц (волноводы коаксиальные III, IX, N, 3,5; волноводы прямоугольные 16×8; 11×5,5; 7,2×3,4 мм; WR62, WR42, WR28).

При разработке стандарта на государственную поверочную схему будет учтена возможность передачи размера единицы СПМШ генераторам шума с повышенной точностью, появившаяся после выполненного усовершенствования первичного эталона.

К результатам внедрения усовершенствованного первичного эталона следует отнести: рост эффективности поверочных и калибровочных работ, снижение рисков изготовителя и потребителя современной радиоэлектронной аппаратуры, возможность полноценного участия в международных ключевых сличениях эталонов, рост конкурентоспособности отечественных товаров на внешнем рынке.

Л и т е р а т у р а

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. Note 1327. Mar. 1989.

3. **Биргер Л. А., Швецов Б. Н., Соков И. А.** Образцовая установка для градуировки генераторов шума в диапазоне СВЧ // Измерительная техника. 1961. № 1. С. 37—40; **Birger L. A., Shvetsov B. N., Sokov I. A.** Reference equipment for calibrating noise generators in the UHF range // Measurement Techniques. 1961. V. 4. N 1. P. 50—54.

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; **Petrosyan G. G.** Government standards units of spectral density of the power of noise radiation in the range 2,6—17,4 GHz // Measurement Techniques. 1971. V. 14. N 6. P. 886—890.

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. С. 3—6; **Uzdin R. I., Pruglo V. I.** Special state standards for the radiated noise-power spectral-density unit in the range of 125 to 1000 MHz // Measurement Techniques. 1973. V. 16. N 10. P. 1431—1436.

6. **Пругло В. И.** Государственный специальный эталон единицы спектральной плотности мощности шумового радиоизлучения в диапазоне частот 2—125 МГц // Измерительная техника. 1980. № 2. С. 11—12; **Pruglo V. I.** Special State Standard for the spectral power-density unit of radio noise in the range of 2 — 125 MHz // Measurement Techniques. 1980. V. 23. N 2. P. 101—103.

7. **Петросян О. Г. и др.** Низкотемпературный генератор шума миллиметрового диапазона // Измерительная техника. 1984. № 11. С. 60—61; **Petrosyan O. G. et al.** Low-temperature millimeter-band noise generator // Measurement Techniques. 1984. V. 27. N 11. P. 1053—1055.

8. **Резчиков А. А., Ознобишин В. В.** Образцовая установка для аттестации образцовых низкотемпературных генераторов шума // Исследования эталонов сравнения в области радиотехнических измерений: Труды ВНИИФТРИ, 1984. С. 51—56.

9. **Емельянова Л. П.** Низкотемпературный СВЧ-генератор шума // Измерительная техника. 1985. № 9. С. 54—55; **Emel'yanova L. P.** Low-temperature shf noise generator // Measurement Techniques. 1985. V. 28. N 9. P. 788—789.

10. **Петросян О. Г., Саргсян М. В.** Анализ погрешностей комплексного метода аттестации тепловых генераторов шума // Измерительная техника. 1993. № 3. С. 55—57; **Petrosyan O. G., Sargsyan M.V.** Analysis of the overall certification method of thermal noise generators // Measurement Techniques. 1993. V. 36. N 3. P. 335—337.

11. **Daywitt W. C.** A coaxial noise standard for the 1 GHz to 12,4 GHz frequency range // NIST Tech. Note 1074. Mar. 1984.

12. **IEC 169-23.** International standard. Radio-frequency connectors. Pt. 23.

13. **ГОСТ 8.381—2009.** ГСИ. Эталоны. Способы выражения точности.

14. **Grosvenor C. A., Randa J., Billinger R. L.** Design and Testing of NFRad—A New Noise Measurement System // NIST Tech. Note 1518. Mar. 2000.

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

Дата принятия 11.09.2012 г.