

**II. Эталоны. Совершенствование и перспективы развития в областях измерений параметров антенных систем, мощности СВЧ в радиочастотных и волноводных трактах**

УДК 621.317.089.6:621.317.784.023

**ПЕРСПЕКТИВЫ РАЗВИТИЯ ЭТАЛОНОВ  
В ОБЛАСТИ ИЗМЕРЕНИЙ МОЩНОСТИ СВЧ  
В РАДИОЧАСТОТНЫХ ТРАКТАХ**

**В.А. Семёнов, А.В. Коудельный, В.А. Перепёлкин, И.П. Чирков**

*ФГУП «ВНИИФТРИ», Менделеево, Московская обл.  
Chirkov@dst.khv.ru*

*Представлен обзор состояния и перспективы совершенствования эталонной базы, необходимой для воспроизведения и передачи единицы мощности электромагнитных колебаний и комплексных коэффициентов отражений и передачи в СВЧ диапазоне.*

*Ключевые слова: эталонная база, электромагнитные колебания, единицы мощности, СВЧ диапазон, ваттметры, радиочастотный тракт, эталон, поверяемые средства, методы измерений, калибровочный коэффициент.*

**PROSPECTS OF STANDARDS DEVELOPMENT  
IN THE FIELD OF MICROWAVE POWER  
MEASUREMENTS IN RADIO FREQUENCY DUCTS**

**V.A. Semenov, A.V. Koudelny, V.A. Perepyolkin, I.P. Chirkov**

*FSUE "VNIIFTRI", Mendeleevo, Moscow region  
Chirkov@dst.khv.ru*

*An overview of the state and prospects for improvement of the reference base necessary for reproducing and transmitting units of electromagnetic oscillation power and complex reflection and transmission coefficients in the microwave range is presented.*

*Key words: reference base, electromagnetic oscillations, units of power, microwave range, wattmeters, radio frequency path, standard, verifiable means, measurement methods, calibration coefficient.*

Измерения мощности электромагнитных колебаний, распространяющихся в закрытых линиях передачи, позволяют определить абсолютные значения энергетических характеристик электромагнитного излучения.

Точные измерения мощности ВЧ и СВЧ колебаний выполняют ваттметры в диапазоне частот от 30 МГц до 178 ГГц с разделением на поддиапазоны частот применяемых линий передачи. В диапазоне частот до 20 ГГц применяются в основном коаксиальные ваттметры, а на частотах выше — волноводные. Значительная часть активно применяемых в РФ отечественных серийных средств измерений мощности СВЧ производства 70–90-х годов прош-

---

*Альманах современной метрологии, 2019, № 2 (18)*

лого века. Современные отечественные ваттметры выпускаются только в коаксиальном тракте сечением 7/3,04 мм с верхней частотой 18 ГГц.

Ваттметры импортного производства ведущих фирм Boonton, Keysight, Rohde&Schwarz и др. всё чаще применяются при необходимости выполнения измерений в широком диапазоне частот с высокой точностью, поскольку обладают рядом конкурентных преимуществ как технических, так и функциональных. В Государственном реестре средств измерений содержится информация о 42 типах ваттметров иностранного производства, выпускаемых в пяти типах коаксиальных линий передачи с диапазоном частот от 0 до 110 ГГц и четырёх волноводных с диапазоном частот от 26 до 110 ГГц. При этом только один тип волноводных ваттметров, что объясняется широким диапазоном частот коаксиальных ваттметров.

Погрешность измерений мощности электромагнитных колебаний ваттметра на определённой частоте и опорном уровне мощности определяется только сличением с вышестоящим по поверочной схеме эталоном. Это обосновано тем, что единицы мощности когерентного электромагнитного излучения при разных частотах — это единицы одноимённых, но разных по природе несличаемых величин. Поэтому для обеспечения измерений мощности электромагнитных колебаний необходимо воспроизводить единицу первичным эталоном на необходимом количестве частот, предусмотренных стандартом на методы поверки ваттметров.

Одним из способов повышения точности рабочих средств измерений является уменьшение числа разрядов применяемых рабочих эталонов при передаче единицы от первичного эталона к рабочим средствам измерений. Число разрядов применяемых рабочих эталонов определяется из оптимального соотношения общего количества эксплуатируемых в стране рабочих средств измерений и количества поверяемых приборов на первичном эталоне. Число поверяемых на первичном эталоне приборов напрямую связано с временем, необходимым для воспроизведения единицы. Кроме того, в связи с ограниченным числом подключений коаксиальных соединителей, большое число поверяемых на эталоне средств измерений приводит к сокращению ресурса эталонных ваттметров.

Для увеличения числа поверяемых на первичном эталоне ваттметров предложено усовершенствовать структуру первичного эталона. Главное отличие от ранее существовавшего эталона заключается в применении эталонного ваттметра проходного типа, а также ваттметра оконечного типа, у которого первичный измерительный преобразователь не является калориметрическим. Структура первичного эталона единицы мощности СВЧ в коаксиальном тракте 7/3,04 мм приведена на рис. 1.

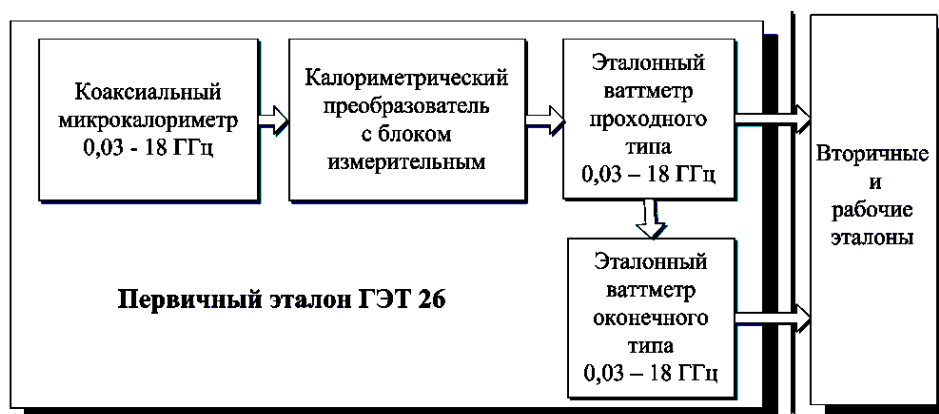


Рис. 1. Воспроизведение и передача размера единицы мощности СВЧ. Структура первичного эталона единицы мощности СВЧ в диапазоне частот от 0,03 до 18 ГГц

За счёт предложенного изменения структуры эталона уменьшается количество измерений с калориметрическими преобразователями мощности, что позволяет при увеличении объёма работ по передаче единицы от первичного эталона сохранить их ресурс, а также повысить точность рабочих средств измерений за счёт уменьшения количества разрядов рабочих эталонов.

Передача размера единицы мощности от Государственного первичного эталона мощности электромагнитных колебаний в коаксиальных и волноводных трактах ГЭТ 26-2010 осуществляется методом непосредственного сличения двух ваттметров: проходного и оконечного типов. При измерениях в тракте между сличаемыми ваттметрами возникают переотражения электромагнитной волны. Погрешность из-за рассогласования является доминирующей погрешностью передачи единицы мощности СВЧ. Исключение влияния погрешности из-за рассогласования на результат измерений является наиболее важной насущной задачей. Её решение позволило значительно повысить точность передачи единицы мощности СВЧ в коаксиальных трактах.

Уменьшение погрешности рассогласования реализовано применением уравнения измерений, учитывающего комплексные коэффициенты отражения сличаемых ваттметров, для расчёта действительных значений мощности.

Основными составляющими погрешности измерений коэффициента передачи  $\alpha$  эталонного ваттметра проходного типа при его исследовании с учётом комплексных коэффициентов отражения являются:

- неисклѐнная систематическая погрешность измерений мощности СВЧ ваттметром с калориметрическим преобразователем  $\delta P_{\text{ЭТ}}$  из-за погрешностей измерений мощности замещения  $\delta_r$  и коэффициента эффективности  $\delta(K_{\text{Э}})$ ;
- неисклѐнные систематические погрешности измерений  $\Delta|\dot{\Gamma}_{\text{КВ}}|$ ,  $\Delta|\dot{\Gamma}_{\text{Э}}|$  модулей коэффициентов отражения ваттметров  $|\dot{\Gamma}_{\text{КВ}}|$  и  $|\dot{\Gamma}_{\text{Э}}|$ ;

- случайная погрешность в ряде измерений  $\delta_{\text{сл}}$ ;
- случайная погрешность из-за неповторяемости потерь в соединителе  $\delta_{\text{фл}}$ .

Доверительные границы погрешности значения коэффициента передачи эталонного ваттметра проходного типа  $\alpha$ , измеренного по калориметрическому преобразователю, вычисляются в соответствии с требованиями по формулам:

$$\Delta(\alpha) = \pm S_{y\Sigma} K_{\Sigma}, \quad (1)$$

где  $K_{\Sigma} = \frac{t \cdot S_y + \Theta_y}{S_y + S_{\Theta_y}}$ ;  $t$  — коэффициент Стьюдента, соответствующий дове-

рительной вероятности  $P = 0,95$ ;  $S_y$  — среднее квадратическое отклонение случайных погрешностей:

$$S_y = \sqrt{\delta_{\text{сл}}^2 + \delta_{\text{фл}}^2}; \quad (3)$$

$\Theta_y$  — граница неисключенной систематической погрешности:

$$\Theta_y = 1,1 \cdot \sqrt{2 \cdot \delta_p^2 + \delta^2(K_{\Sigma}) + 2 \cdot \left[ \left( |\dot{\Gamma}_{\Sigma}|^2 + |\dot{\Gamma}_{\text{KB}}|^2 \right) \cdot \Delta |\dot{\Gamma}_{\text{BO}}|^2 + |\dot{\Gamma}_{\text{KB}}|^2 \cdot \Delta |\dot{\Gamma}_{\Sigma}|^2 \right]};$$

$S_{\Theta_y}$  — среднее квадратическое отклонение систематической погрешности:

$$S_{\Theta_y} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \Theta_y;$$

$S_{y\Sigma}$  — среднее квадратическое отклонение случайных и систематической погрешностей:

$$S_{y\Sigma} = \sqrt{S_y^2 + S_{\Theta_y}^2}.$$

Таким образом, на основе уравнения измерений получена формула для оценки доверительных границ погрешности значений калибровочного коэффициента ваттметра проходного типа путём сличения с калориметрическими преобразователями мощности из состава первичного эталона единицы мощности СВЧ при учёте комплексных коэффициентов отражения ваттметров в модели измерений.

Для передачи единицы мощности СВЧ от первичного эталона применяются рабочие эталоны в соответствующих волноводных и коаксиальных трактах. Передавать размер единицы при одной и той же частоте необходимо ваттметрам, предназначенным для измерений в различных типах передающих линий. Например, в государственном реестре СИ имеются измерители мощности для частот от 2,5 до 18 ГГц с восемью типами коаксиальных соединителей и таким же числом волноводных сечений.

В соответствии с разработанной схемой построения первичных государственных эталонов единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне СВЧ при воспроизведении единица устанавливается с применением предпочтительно одного вида (волноводного или коаксиального) теплового

компаратора [6]. Хранение, воспроизведение и передача единицы осуществляется созданными и введёнными в состав эталона ваттметрами проходного и оконечного типов, что позволило уменьшить как время воспроизведения и передачи единицы мощности за счёт выполнения продолжительных во времени измерений в микрокалориметре вне этих процедур, так и погрешность передачи единицы за счёт увеличения количества передач единицы непосредственно от первичного эталона.

В каждом типе стандартизованного коаксиального тракта разработаны эталонные ваттметры проходного и оконечного типов. Для определения их калибровочного коэффициента используются калориметрические преобразователи и соответствующие согласующие переходы. Измерения калибровочного коэффициента  $\alpha$  ваттметра проходного типа проводятся с применением имеющихся калориметрических преобразователей мощности и согласующих переходов. Уравнение измерений при этом можно представить в виде:

$$\alpha = \frac{P_{\text{КВ}}}{P_{\text{ВП}}} \cdot \frac{1}{K_{\text{Э}} \cdot (1 - |\dot{\Gamma}_{\text{КВ}}|^2)} \cdot \frac{|\dot{S}_{21}|^2}{1 - |\dot{S}_{11}|^2} \cdot \frac{|1 - \dot{S}_{22} \cdot \dot{\Gamma}_{\text{КВ}}|}{|1 - \dot{\Gamma}'_{\text{КВ}} \times \dot{\Gamma}_{\text{Э}}|^2}, \quad (2)$$

где  $\dot{\Gamma}'_{\text{КВ}}$  — коэффициент отражения калориметрического ваттметра, соединённого с применяемым согласующим переходом;  $P_{\text{КВ}}$ ,  $P_{\text{ВП}}$  — мощность, измеренная калориметрическим преобразователем и эталонным ваттметром соответственно;  $\dot{S}_{11}$ ,  $\dot{S}_{22}$ ,  $\dot{S}_{21}$  — коэффициенты матрицы рассеивания перехода;  $\dot{\Gamma}_{\text{Э}}$  — комплексный эффективный коэффициент отражения выхода ваттметра проходного типа.

В уравнение измерений входят характеристики калориметрического преобразователя и согласующего перехода, а также составляющие, связанные с переотражением электромагнитной волны между приборами. Погрешность рассогласования, возникающая при измерениях, исключается путём учёта комплексных коэффициентов отражения.

Комплексные коэффициенты отражения ваттметров поглощаемой мощности, которым передаётся единица мощности электромагнитных колебаний, определяются прямыми измерениями при помощи векторного анализатора цепей. Поэтому в состав вспомогательного оборудования эталона необходимо включить такие средства измерений.

В результате выполненной оценки погрешности воспроизведения единицы мощности электромагнитных колебаний в малогабаритных трактах обосновано, что при таком построении эталона одной из доминирующих погрешностей измерений является погрешность измерения модуля коэффициента передачи переходов. Известные методы измерений модуля коэффициента передачи переходов обеспечивают точность 0,01–0,06. При измерениях

мощности СВЧ эта составляющая погрешности оценивается от 1 до 6 % и значительно превышает погрешность измерения коэффициента эффективности калориметрических преобразователей мощности.

Разработаны методы уменьшения погрешностей измерений модуля коэффициента передачи четырёхполосника с малыми потерями в схемах однопортовых измерений и отношений мощностей. Погрешности исследованных двух методов измерений модуля коэффициента передачи переходов не коррелированы, так как применяются разные принципы, средства измерений и методы сравнения с мерой. Что позволяет измерения двумя методами рассматривать как независимые. В результате практических исследований подтверждены теоретические предположения об уменьшении влияния погрешности из-за рассогласования на результаты измерений путём их аппроксимации в диапазоне частот с учётом априорных сведений о гладкости функций зависимости фаз коэффициентов отражения мер и переходов. Кроме того, обоснована возможность компенсации частотно зависимых погрешностей применяемых мер за счёт разработанных алгоритмов измерений.

Показана возможность адаптации исследованных методов измерений модуля коэффициентов передачи четырёхполосников с малыми потерями для согласующих переходов. Двумя независимыми методами измерений модуля коэффициента передачи согласующих переходов получены сходящиеся результаты за счёт применения разработанных моделей измерений. Разработанный метод измерений модуля коэффициента передачи согласующих переходов, необходимых для использования калориметрического преобразователя мощности в разных типах коаксиальных трактов, позволил в 2–5 раз уменьшить доверительные границы составляющей погрешности измерений мощности СВЧ из-за погрешности значений модуля коэффициента передачи переходов.

Измерены коэффициенты отражения и передачи 40 переходов, необходимых для определения калибровочных коэффициентов ваттметров в коаксиальных трактах 3,5/1,52 мм, 2,92/1,26 мм, 2,4/1,04 мм и 1,85/0,8 мм. При этом двумя методами получены близкие друг к другу значения модуля коэффициента согласующих переходов, что подтвердило корректность измерений этими методами и позволило уменьшить погрешность измерений за счёт усреднения результатов.

Внедрение ваттметров импортного производства в области измерений, связанное с приоритетными направлениями развития науки, технологий и техники Российской Федерации, показало необходимость приведения в соответствие нормируемые изготовителями метрологические характеристики требованиям действующей нормативной базы.

Методы и средства поверки ваттметров СВЧ в соответствии с ГОСТ 8.569-2000 [5] предполагают проведение комплектной поверки ваттметров в целом, в то время как в большинстве случаев для импортных ваттметров

нормируются метрологические характеристики на измерительный блок и преобразователь мощности отдельно: погрешность значений калибровочных коэффициентов, погрешность измерений мощности на опорном уровне мощности в диапазоне частот; погрешность опорного источника с частотой 50 МГц и мощностью 1 мВт, нелинейность показаний от уровня измеряемой мощности, погрешность из-за переключения диапазонов измерений и т.д. Соответственно, возникает ряд измерительных задач по определению метрологических характеристик измерительных блоков и преобразователей мощности как при испытаниях с целью утверждения типа средств измерений, так и при их поверке. Требуется определение характеристик приборов с точностью, достижение которой невозможно при помощи имеющихся рабочих эталонов. Основные из них рассмотрены далее.

В РФ эксплуатируется порядка 60 комплектов волноводных калибраторов мощности серии М1 и 15 комплектов серии М1-ХБ. Рабочих эталонов ВПО-1 – ВПО-4, Я2М-23, Я2М-24, используется не более 20 комплектов. Калибраторы мощности Я2М-21, Я2М-22 исключены из государственного реестра средств измерений, физически и морально устарели, а средства их поверки вышли из строя и не применяются. По статистике в силу физического и морального устаревания при периодической поверке бракуется один из десяти калибраторов.

Реализованные в первичных эталонах возможности измерений комплексного эффективного коэффициента отражения выхода ваттметров проходного типа, контроля его стабильности обеспечили возможность испытаний с целью утверждения типа современных калибраторов мощности, имеющих достаточную долговременную стабильность модуля и фазы эффективного коэффициента отражения выхода для учёта в уравнении измерений комплексных коэффициентов отражения ваттметров при передаче единицы мощности. Такие ваттметры ранее не применялись в отечественной метрологии в качестве рабочих эталонов. За счёт учёта действительных значений коэффициентов отражения ваттметров удастся существенно снизить требования к максимальному допустимому значению модуля эффективного коэффициента отражения выхода. При внедрении таких приборов в органы Госстандарта в технической документации необходимо указывать не только максимальное значение комплексного эффективного коэффициента отражения выхода, но и пределы допускаемых погрешностей его значений модуля и фазы [7].

При испытаниях с целью утверждения типа зачастую нормируют калибровочный коэффициент ваттметра и погрешность его значений. Калибровочный коэффициент ваттметра — это поправочный множитель для учёта систематической погрешности измерений мощности на опорном уровне в диапазоне частот и определяется методами и средствами, описание которых приводилось выше. Термин «погрешность калибровочного коэффици-

ента» выражает неопределённость измерений калибровочного коэффициента, и при необходимости его нормирования для конкретного типа средств измерений следует оценивать доверительные границы погрешности значений калибровочного коэффициента. Однако для большинства рабочих средств измерений мощности правильнее эту погрешность отдельно не выделять, а учитывать при определении пределов допускаемой погрешности.

Также возникают сложности при проверке погрешности источника с частотой 50 МГц и мощностью 1 мВт из-за высоких требований к точности измерений. Пределы допускаемой погрешности установки выходной мощности встроенного калибратора, применяемого для определения и учёта коэффициента преобразования в рабочих условиях измерений, составляют 0,6–1,0 %. Серийные средства измерений для контроля мощности калибратора с точностью лишь на 0,4 % меньше, чем у первичного эталона, отсутствуют. Систематическая погрешность установки выходной мощности калибратора и погрешность из-за рассогласования между преобразователем мощности и опорным калибратором у пары преобразователя мощности и измерительного блока суммируются и входят в погрешность измерений мощности поверяемым ваттметром, определяемой по вышестоящему эталону. Следовательно, эту составляющую погрешности также можно отдельно не выделять, а контролировать погрешность измерений мощности на этой частоте.

Нелинейность показаний ваттметров от уровня измеряемой мощности целесообразно проверять по эталонному измерителю отношений мощностей. Первичные эталоны мощности воспроизводят шкалу единицы мощности и шкалу единицы отношения мощностей, которая служит исходной для построения шкал отношений. Эталонный измеритель отношений воспроизводит интервал отношений 10 дБ при неисключённой систематической погрешности не более 0,003 дБ. Применяемая на первичных эталонах ГЭТ 26-2010 и ГЭТ 167-2017 методика обеспечивает с необходимой точностью передачу единицы отношений мощностей рабочим эталонам в виде измерителей мощности, измерительных приёмников и анализаторов спектра.

Таким образом, для метрологической прослеживаемости измерений мощности СВЧ требуется реализовать передачу единицы мощности от первичных эталонов с использованием рабочих эталонов в линиях передачи современных измерителей мощности: коаксиальные линии 7/3,04 мм, 3,5/1,52 мм, 2,92/1,27 мм, 2,4/1,04 мм, 1,85/0,80 мм, 1,00/0,43 мм и волноводные тракты 5,2×2,6 мм, 3,6×1,8 мм, 2,4×1,2 мм, 1,6×0,8 мм, WR 22, WR 15, WR 10, WR 06, WR 05. Решение данной задачи требует одновременного проведения работ по модернизации первичных эталонов единицы мощности с целью расширения диапазона частот и увеличения числа применяемых линий передачи, а также разработки рабочих эталонов в этих линиях.



Расширение диапазона частот эталона мощности связано с разработкой микрокалориметра и калориметрических преобразователей в волноводных трактах  $3,6 \times 1,8$  и  $2,4 \times 1,2$  мм, работающих в диапазоне частот от 53,57 до 118,1 ГГц. Во всех национальных эталонах мощности СВЧ, независимо воспроизводящих единицу мощности, в качестве эталонных ваттметров используются ваттметры с тепловыми приёмными преобразователями.

Метод, лежащий в основе тепловых преобразователей, — сравнение мощности СВЧ с мощностью постоянного тока или тока низкой частоты — может быть реализован несколькими способами. Широко распространены болометрические и термоэлектрические преобразователи оконечного типа. У первых в качестве чувствительного элемента для сравнения мощности СВЧ и низкочастотной мощности используется болометр — терморезистор с отрицательным (термистор) или положительным (бареттер) температурным коэффициентом расширения. У термоэлектрических преобразователей в качестве чувствительного элемента выступает термопара прямого или косвенного подогрева.

Болометрические преобразователи используются в режиме непрерывного замещения мощности СВЧ мощностью постоянного тока с помощью самобалансирующихся болометрических (термисторных) мостов, поддерживающих постоянное значение сопротивления болометра постоянному току путём автоматического регулирования мощности подогрева постоянного тока. Изменение мощности подогрева при включении мощности СВЧ называется мощностью замещения, которая пропорциональна поглощённой в преобразователе микроволновой мощности. Коэффициент пропорциональности, как правило, близок к единице и отличается от неё из-за потерь мощности СВЧ в подводящих и согласующих структурах преобразователя и из-за неодинакового теплового воздействия тока СВЧ и постоянного тока на чувствительный элемент. Коэффициент, связывающий мощность СВЧ  $P_{\text{СВЧ}}$ , поглощённую в преобразователе, с мощностью замещения  $P_{\text{ЗАМ}}$  называется коэффициентом эффективности  $K_{\text{Э}}$ :

$$P_{\text{СВЧ}} = \frac{P_{\text{ЗАМ}}}{K_{\text{Э}}}. \quad (3)$$

Именно этот коэффициент устанавливается для каждой частоты экспериментальным путём в процессе исследования и аттестации эталона и только после этого, учитывая результаты измерения коэффициента отражения, находится калибровочный коэффициент  $K_{\text{К}}$ , который учитывает также потери мощности СВЧ на отражение:

$$K_{\text{К}} = K_{\text{Э}} \cdot (1 - |\Gamma_{\text{ВХ}}|^2), \quad (4)$$

где  $\Gamma_{\text{ВХ}}$  — коэффициент отражения входа преобразователя.

В национальных эталонах США (NIST), Германии (PTB), Великобритании (NPL), Франции (LNE) в составе эталонных ваттметров используются болометрические преобразователи. В эталоне ГЭТ 26-2010 наряду с болометрическими используются коаксиальные термоэлектрические преобразователи прямого подогрева [1–3].

Одна из основных погрешностей воспроизведения единицы мощности СВЧ возникает при измерениях коэффициента эффективности тепловых преобразователей мощности. Эта погрешность включает в себя ряд составляющих, конкретный состав которых и степень их влияния на результирующую погрешность измерения коэффициента эффективности зависит от конструкции микрокалориметрического компаратора, качества его составных частей, методов исследования характеристик его узлов и методов обработки результатов измерений.

Под микрокалориметрическим компаратором понимается вся система, обеспечивающая прослеживаемость единицы мощности СВЧ, воспроизводимой эталонным ваттметром, к единицам напряжения и сопротивления на постоянном токе. Таким образом, название этой системы отражает основной принцип её работы — компарирование неизвестной мощности СВЧ с известной мощностью постоянного тока. Принцип действия микрокалориметрического компаратора поясняется схемой, приведённой на рис. 2.

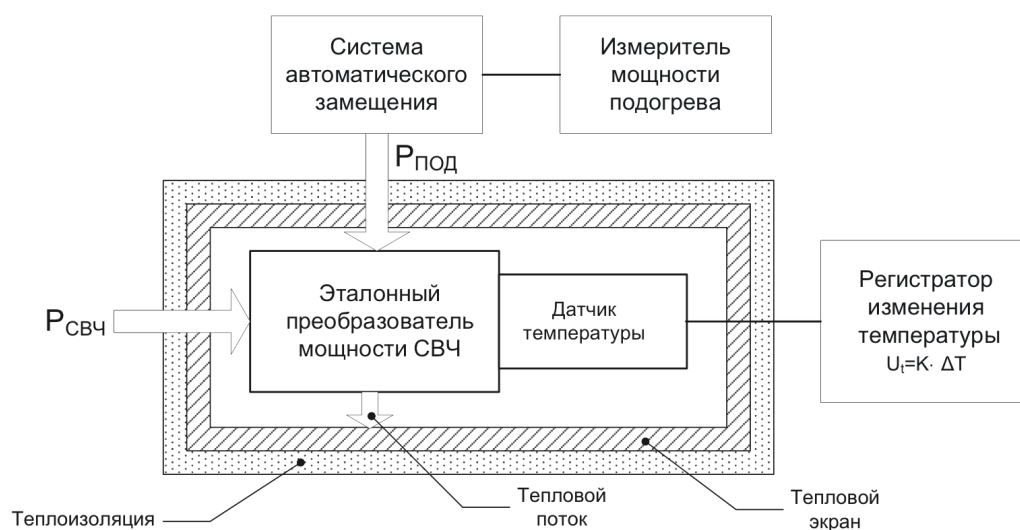


Рис. 2. Принцип действия микрокалориметрического компаратора

Аттестуемый преобразователь мощности СВЧ помещается в теплоизолированный от окружающей среды объём, состоящий из тепловыравнивающего экрана и тепловой изоляции. При этом обеспечивается возможность подачи на преобразователь мощности СВЧ и мощности подогрева постоянного

тока. Система автоматического замещения обеспечивает, путём регулировки мощности подогрева, постоянное значение контролируемого параметра. Для болометрических преобразователей таким параметром является сопротивление болометра, для термоэлектрических преобразователей — выходное напряжение термопары. Выделяемая в преобразователе мощность подогрева  $P_{\text{под1}}$  приводит к повышению его температуры, что вызывает появление теплового потока от преобразователя к теплового экрану. После наступления теплового равновесия устанавливается постоянное значение температуры  $T_1$  преобразователя, фиксируемое находящимся с ним в тепловом контакте датчиком температуры. При включении мощности СВЧ система автоматического замещения уменьшает мощность подогрева до величины  $P_{\text{под2}}$ , чтобы сохранить неизменным значение контролируемого параметра. Разность  $P_{\text{под1}} - P_{\text{под2}}$  называется мощностью замещения  $P_{\text{зам}}$ .

После установления теплового равновесия датчиком температуры фиксируется новое значение  $T_2$ . Изменение температуры  $\Delta T = T_2 - T_1$  при линейных механизмах теплопередачи пропорционально изменению  $\Delta P_{\Sigma}$  суммарной мощности СВЧ и постоянного тока, выделяемой в преобразователе. Выходным сигналом регистратора температуры обычно является напряжение постоянного тока, пропорциональное изменению температуры. В этом случае можно ввести такой параметр как чувствительность микрокалориметра  $K_T$ , равную отношению изменения выходного напряжения  $\Delta U_T$  к изменению суммарной мощности  $\Delta P_{\Sigma}$ . Учитывая, что мощность СВЧ, поглощённая в преобразователе, связана с мощностью замещения выражением (3), можно написать выражения для значений суммарной мощности  $P_{\Sigma1}$  и  $P_{\Sigma2}$ , соответствующих отсутствию и наличию мощности СВЧ на входе преобразователя:

$$P_{\Sigma1} = P_{\text{под1}}; \quad (5)$$

$$P_{\Sigma2} = P_{\text{под2}} + \frac{P_{\text{зам}}}{K_{\Sigma}}. \quad (6)$$

Вычитая (4) из (3) и учитывая  $\Delta P_{\Sigma} = P_{\Sigma2} - P_{\Sigma1}$  и  $P_{\text{зам}} = P_{\text{под1}} - P_{\text{под2}}$ :

$$\frac{\Delta P_{\Sigma}}{P_{\text{зам}}} = \frac{1}{K_{\Sigma}} - 1. \quad (7)$$

Учитывая, что  $\Delta P_{\Sigma} = \Delta U_T / K_T$ , получим выражение для  $K_{\Sigma}$ :

$$K_{\Sigma} = \left[ 1 + \frac{\Delta U_T}{K_T \cdot P_{\text{зам}}} \right]^{-1}. \quad (8)$$

Выражение (8) описывает работу идеального микрокалориметра, не имеющего других тепловых потерь, кроме как в аттестуемом преобразователе, а также при условии полной эквивалентности воздействия на датчик температуры выделяемых в преобразователе мощности СВЧ и мощности постоянного тока.

Для учёта реально существующей неэквивалентности и дополнительных потерь в числителе выражения (8) вместо единицы ставится поправочный множитель  $g$ , значение которого путём оптимизации микрокалориметра стараются максимально приблизить к единице. Нахождение значения множителя  $g$  является предметом исследований, выполняемых при аттестации первичного эталона.

В случае применения болометрических преобразователей, работающих по методу замещения, можно преобразовать выражение (8) к классическому виду, приведённому, например, в [2]:

$$K_9 = g \cdot \left[ 1 - \left( \frac{V_2}{V_1} \right)^2 \right] \left[ \frac{U_{T2}}{U_{T1}} - \left( \frac{V_2}{V_1} \right) \right]^{-2}, \quad (9)$$

где  $U_{T1}$  и  $U_{T2}$  — напряжение на выходе датчика температуры;  $V_1$  и  $V_2$  — напряжение на болометре (индексы 1 и 2 соответствуют отсутствию и наличию мощности СВЧ на входе преобразователя соответственно). При этом принимаем линейную зависимость напряжения на выходе датчика температуры от значения рассеиваемой в преобразователе мощности во всём динамическом диапазоне от 0 до максимального значения мощности подогрева.

Датчики температуры могут быть включены в одну мостовую схему, работающую от источника постоянного тока. В этом случае выходной сигнал с диагонали моста эквивалентен сигналу с выхода термопары. Другим способом использования датчиков температуры является включение каждого датчика в свой измерительный мост, что позволяет контролировать температуру рабочего и опорного преобразователя по отдельности. В этом случае появляются дополнительные возможности исследования свойств микрокалориметра в процессе его аттестации. Упрощённая схема индикации микрокалориметра показана на рис. 3.

Необходимо отметить, что тепловые процессы в микрокалориметре занимают много времени. Например, установление показаний датчика температуры микрокалориметра занимает от 15 до 90 минут в зависимости от массы аттестуемого преобразователя мощности СВЧ. Возможные в это время изменения температуры окружающей среды приводят к искажению результатов измерений. Поэтому микрокалориметр размещается в термостатированном объёме, в то время как все остальные устройства и средства измерений находятся вне его. Это делается для того, чтобы выделяемое работающими приборами тепло не влияло на микрокалориметр.

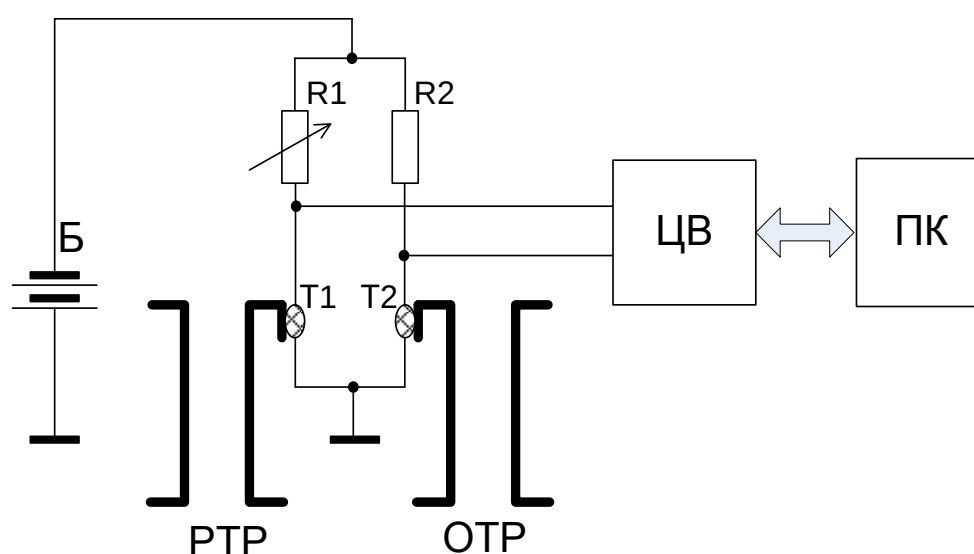


Рис. 3. Схема индикации микрокалориметра

Измеритель разности температур формирует напряжение постоянного тока, пропорциональное разности температур болометрического преобразователя и тела сравнения  $\Delta T$ . Так как мощности, рассеиваемые в микрокалориметре, незначительны и температура болометрического преобразователя не сильно отличается от температуры внешнего контура, то процессы теплопереноса в микрокалориметре линейны. В этом случае разность температур  $\Delta T$  является линейной функцией мощности СВЧ и мощности постоянного тока, выделяемых в микрокалориметре.

Исследование линейности датчика разности температур микрокалориметров проводилось в составе калориметрической установки. Для этого выполнялась запись процесса установления показаний датчика с помощью управляющей программы калориметрической установки. В микрокалориметр устанавливался болометрический преобразователь и после установления теплового равновесия запускался процесс записи. Затем включалась система автозамещения с заданием рабочего сопротивления болометра, при котором обеспечивалась мощность подогрева около 10 мВт. После завершения времени установления рабочее сопротивление увеличивалось на величину, обеспечивающую приращение мощности подогрева на 10 мВт. Это пошаговое увеличение рабочего сопротивления продолжалось до достижения мощности подогрева 85 мВт. Записанные процессы установления выходного напряжения датчика разности температур  $U_{\text{дт}}$  и соответствующих им значений мощности подогрева болометра  $P_{\text{под}}$  для микрокалориметра в тракте  $3,6 \times 1,8$  мм приведены на рис. 4.

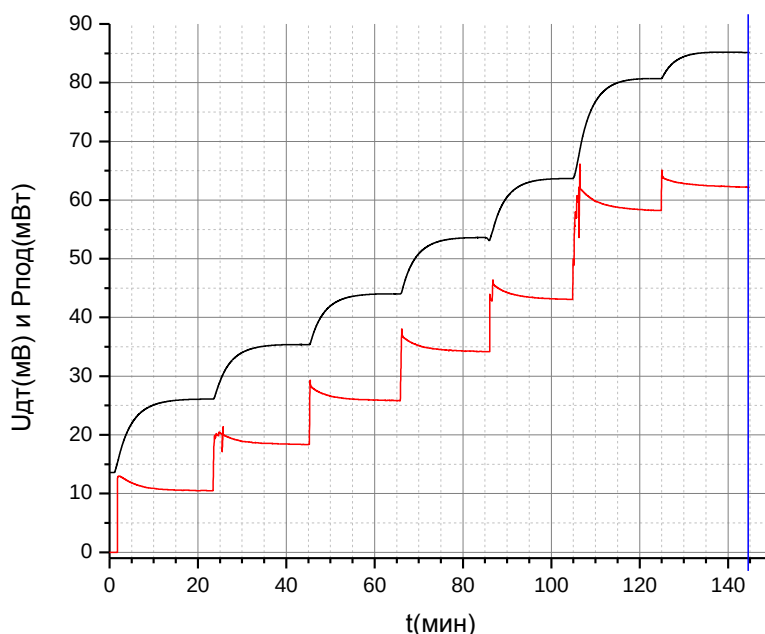


Рис. 4. Процессы установления выходного напряжения датчика разности температур и мощности подогрева болометра

Для такого микрокалориметра изменение выходного напряжения датчика температуры микрокалориметра  $\Delta U_{\text{ДТ}}$  можно записать в виде линейной функции мощности замещения постоянного тока  $P_{\text{ЗАМ}}$  и мощности СВЧ, поглощённой внутри внешнего контура микрокалориметра. Последняя состоит из нескольких слагаемых, обусловленных потерями в различных частях микрокалориметра и болометрического преобразователя. Учитывая, что эти слагаемые могут иметь различную степень влияния на результирующую разность температур, можно аналогично записать следующее выражение для  $\Delta U_{\text{ДТ}}$ :

$$\Delta U_{\text{ДТ}} = K_{\text{ДТ}} \cdot [P_{\text{ЗАМ}} - (k_{\text{б}} \cdot P_{\text{б}} + k_{\text{ст}} \cdot P_{\text{СТ}} + k_{\text{тр}} \cdot P_{\text{ТР}})], \quad (10)$$

где  $K_{\text{ДТ}}$  — коэффициент преобразования датчика температуры;

$P_{\text{б}}$  — мощность СВЧ, поглощённая в болометре;

$P_{\text{СТ}}$  — мощность СВЧ, поглощённая в стенках преобразователя;

$P_{\text{ТР}}$  — мощность СВЧ, поглощённая в тепловой развязке;

$k_{\text{б}}, k_{\text{ст}}, k_{\text{тр}}$  — коэффициенты, учитывающие отличие степени влияния  $P_{\text{б}}, P_{\text{СТ}}$  и  $P_{\text{ТР}}$  на  $\Delta U_{\text{ДТ}}$  по сравнению с  $P_{\text{ЗАМ}}$ .

Выразим  $P_{\text{б}}, P_{\text{СТ}}$  и  $P_{\text{ТР}}$  в виде частей полной мощности СВЧ  $P_{\text{СВЧ}}$ , поглощённой в болометрическом преобразователе:

$$\Delta U_{\text{ДТ}} = K_{\text{ДТ}} \cdot [P_{\text{ЗАМ}} - P_{\text{СВЧ}} \cdot (k_{\text{б}} \cdot q_{\text{б}} + k_{\text{ст}} \cdot q_{\text{СТ}} + k_{\text{тр}} \cdot q_{\text{ТР}})]. \quad (11)$$

Выражение в круглых скобках для данной конструкции микрокалориметра и болометрического преобразователя является константой. Обозначив её через  $g$ , получим

$$\Delta U_{\text{ДТ}} = K_{\text{ДТ}} \cdot (P_{\text{ЗАМ}} - g \cdot P_{\text{СВЧ}}). \quad (12)$$

Учитывая определение коэффициента эффективности  $K_{\text{Э}} = \frac{P_{\text{ЗАМ}}}{P_{\text{СВЧ}}}$ , можно преобразовать (10) к виду:

$$K_{\text{Э}} = g \cdot \frac{1}{1 - \frac{\Delta U_{\text{ДТ}}}{K_{\text{ДТ}} \cdot P_{\text{ЗАМ}}}}. \quad (13)$$

Коэффициент  $g$  представляет собой сумму трёх слагаемых:

$$g = k_{\text{б}} \cdot q_{\text{б}} + k_{\text{ст}} \cdot q_{\text{ст}} + k_{\text{тр}} \cdot q_{\text{тр}}. \quad (14)$$

Уровень мощности СВЧ при определении коэффициента эффективности болометрических преобразователей не менее 10 мВт. Коэффициент преобразования датчиков разности температур микрокалориметрических компараторов находится в пределах 0,8–1,2 мВ/мВт, что превышает аналогичный параметр для микрокалориметров действующего эталона более чем в 10 раз при сравнимом уровне шумов. Время измерения на калориметрической установке сокращено в 1,4 раза по сравнению с действующим эталоном. Составляющая систематической погрешности воспроизведения мощности СВЧ, обусловленная параметрами микрокалориметрических компараторов, не превышает 0,3 %.

Разработка микрокалориметров в волноводных трактах 3,6×1,8 мм и 2,4×1,2 мм позволила провести исследования преобразователей мощности на основе монокристаллического кремния в диапазоне частот от 53,57 до 118,1 ГГц. Эти технические устройства легли в основу совершенствуемого Первичного эталона единицы мощности в волноводных трактах ГЭТ 167. При этом показана принципиальная возможность применения технологических заделов для разработки и исследований характеристик преобразователей мощности в диапазоне частот от 118 до 220 ГГц. Дальнейшие шаги по модернизации эталона в части миллиметровых волн связаны с разработкой комплекта эталонной аппаратуры для измерений мощности СВЧ высшей точности в диапазоне частот от 118,1 до 178,4 ГГц, а также ваттметров в диапазоне частот от 118,1 до 178,4 ГГц с погрешностью от 6 до 12 %.

Дальнейшее повышение точности измерений интенсивности электромагнитных волн в закрытых трактах связано с возможностями уточнения комплексных коэффициентов отражения в уравнении измерений. Современные анализаторы цепей позволяют определять комплексные коэффициенты отражения в коаксиальных трактах. При этом точность измерений в диапазоне

частот до 67 ГГц обеспечивается прослеживаемостью к Государственному первичному эталону единицы волнового сопротивления в коаксиальных волноводах ГЭТ 75.

В волноводных трактах сформировался дисбаланс между требуемыми точностями измерений и возможностями их подтвердить ввиду отсутствия средств измерений утверждённого типа, первичного эталона единиц комплексных коэффициентов отражения и передачи. Существующие исходные эталоны комплексного коэффициента отражения в диапазоне частот от 2,59 до 37,5 ГГц на основе установки высшей точности УВТ-33, коэффициента стоячей волны в полых прямоугольных волноводах в диапазоне частот от 2,59 до 78,33 ГГц на основе настраиваемых рефлектометров способны только частично удовлетворить современные потребности промышленности. Да и первичный эталон ослабления не позволяет определить фазу коэффициента передачи. Соответственно, существующая эталонная база в области комплексных коэффициентов отражения и передачи в волноводных трактах не позволяет потребителям использовать подходы, методы и математический аппарат, заложенные в современные анализаторы цепей.

Таким образом, для обеспечения повышения точности измерений интенсивности электромагнитных колебаний, параметров СВЧ трактов перед ФГУП «ВНИИФТРИ» стоит цель по созданию системы метрологического обеспечения единства измерений комплексных коэффициентов отражения и передачи в полых прямоугольных волноводах. Для её достижения предстоит кропотливая работа, начиная от уточнения определения измеряемых величин, методов и средств их воспроизведения, методов и средств их передачи, способных обеспечить требуемую точность рабочих средств измерений до уточнения государственных стандартов на волноводные соединители.

Применение анализаторов цепей, измерительных приёмников, анализаторов спектра и сигналов позволяют существенно снизить количество применяемых в метрологической службе средств измерений. Такие приборы являются многофункциональными средствами измерений, позволяющими проводить измерения не одной, а нескольких величин: частота, мощность, отношение мощностей, коэффициент гармоник, коэффициент амплитудной модуляции, параметры частотной модуляции, параметры цифровой модуляции, фазовый шум и другие. Соответственно, для поверки таких устройств должен применяться целый комплекс эталонов более высокой точности, что приводит к значительным временным затратам. Например, если время измерений на одном первичном эталоне достигает одной недели, то чистое время поверки многофункционального средства измерений может достигать шести–восьми недель. С учётом временных затрат на транспортировку это приводит к снижению эффективности применения таких приборов на 30–40 %.

Актуальна разработка систем передачи нескольких единиц радиотехнических величин многофункциональным измерительным приборам и комплек-



сам, в том числе в автоматическом режиме. При этом следует рассматривать возможность создания транспортируемых мер для поверки и калибровки сложных, дорогостоящих приборов на месте их постоянной эксплуатации. Кроме того, для реализации измерений параметров согласования измерителей мощности СВЧ требуется разработка эталонов комплексных коэффициентов отражения и передачи в волноводных линиях с сечениями  $5,2 \times 2,6$  мм,  $3,6 \times 1,8$  мм,  $2,4 \times 1,2$  мм,  $1,6 \times 0,8$  мм, WR 22, WR 15, WR 10, WR 06, WR 05.

В дополнение к перечисленным перспективам развития исходных для страны эталонов в области оценки параметров традиционных коаксиальных и волноводных трактов следует отметить рост потребностей измерений в нестандартизованных линиях передачи на подложке. Задача по оценке точности измерений коэффициентов передачи в таких линиях, а тем более оценке мощности, СПШМ, не решена в мировой практике. Сложившиеся подходы к измерениям в линиях передачи на подложке, позволившие стандартизировать процедуры измерений в разрезе применения измерительного оборудования одного из нескольких производителей, к сожалению, не обеспечивают прослеживаемость измерений к эталонам величин.

С другой стороны, полосковые линии передачи на подложке могут изменить традиционные подходы при разработке и создании первичных эталонов. Например, применяемый в первичных эталонах ГЭТ 26-2010 и ГЭТ 167-2017 метод замещения при измерениях в сухих микрокалориметрах обеспечивает наивысшую точность измерений единицы мощности СВЧ диапазоне частот от 30 МГц до 78,33 ГГц. Калориметрические измерители обеспечивают прослеживаемость единицы мощности СВЧ к основным единицам международной системы единиц. По реализованным в национальных метрологических институтах эталонам США (NIST), Великобритании (NPL), Германии (PTB), Украины («Институт метрологии») можно судить о возможности применения данного метода на частотах до 110–180 ГГц. С увеличением частоты размеры сечения волноводной линии становятся меньше, и, следовательно, становится труднее изготовить калориметры и определить с требуемой точностью поправочные коэффициенты. На более высоких частотах очевидна необходимость исследований как путей построения первичного эталона мощности СВЧ, так и системы её передачи рабочим средствам измерений. Одним из вариантов решения расширения диапазона частот может стать микрокалориметр, реализуемый на подложке, теоретическое ограничение, по верхней частоте которого достигает 3–10 ТГц. Имеющиеся возможности интеграции в структуру на подложке термочувствительных элементов позволяют реализовывать метод замещения прямо на объекте измерений [8], и он уже частично реализуется в серийных средствах измерений мощности на частотах до 110 ГГц.

Однако при таком подходе используемая для подведения тестового сигнала зондовая станция вносит реальную проблему при определении точности характеристики перехода от линии на подложке к высокочастотному соединителю.

Другие возможные реализации исходного эталона мощности СВЧ могут быть основаны на возможностях использования квантовых эффектов для измерений напряжённости электрического поля на частотах до 500 ГГц [9] или использования частоты Раби при измерениях напряжённости магнитного поля [10]. Применение широкополосного поглотителя с исследованной зависимостью коэффициента преобразования мощности СВЧ в изменение температуры также должно быть исследовано [11].

Таким образом, расширение парка средств измерений интенсивности электромагнитных колебаний в диапазоне СВЧ за счёт ваттметров, анализаторов цепей, анализаторов спектра с диапазоном частот до 110 ГГц приводит к необходимости совершенствования эталонной базы РФ:

- разработки рабочих эталонов мощности СВЧ и комплексных коэффициентов отражений в соответствующем диапазоне частот;
- повышения точности измерений за счёт внедрения методик измерений с учётом комплексных коэффициентов отражений и выбора оптимального набора нормируемых метрологических характеристик испытываемых приборов;
- разработки автоматизированных систем передачи единиц нескольких разных величин многофункциональным измерительным приборам;
- усовершенствования Первичных государственных эталонов ГЭТ 26 и ГЭТ 167 с целью улучшения метрологических характеристик, в том числе расширения диапазона частот до 178 ГГц и выше.

Решение данных задач неразрывно связано с исследованием путей создания исходных для страны эталонов мощности, частоты и комплексных коэффициентов отражения в расширенном диапазоне частот.

### **Литература**

1. Перепёлкин В.А., Семёнов В.А., Чирков И.П., Чуйко В.Г. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в волноводных и коаксиальных трактах в диапазоне частот 0,03–37,5 ГГц // Измерительная техника. 2012. № 1. С. 7–9; Measurement Techniques. April 2012, V. 55. I. 1. P. 8–12.
2. Перепёлкин В.А., Семёнов В.А., Чирков И.П., Павлов А.В., Жогун М.В., Коудельный А.В. Государственный первичный эталон единицы мощности электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 37,5 до 78,33 ГГц ГЭТ 167–2017 // Измерительная техника. 2017. № 10. С. 3–6.

3. 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.
4. Пругло В.И. Государственный первичный эталон единицы ослабления электромагнитных колебаний в диапазоне частот от 0 до 178 ГГц ГЭТ 193-2011 // Российская Метрологическая Энциклопедия: в 2 т. / под ред. В.В. Окрепилова. СПб.: 2015. С. 559.
5. ГОСТ 8.569-2000. Государственная система обеспечения единства измерений. Ваттметры СВЧ малой мощности диапазона частот 0,02–178,6 ГГц. Методика поверки и калибровки.
6. Малай И.М., Семёнов В.А., Чирков И.П. Исследование путей создания исходного эталона мощности электромагнитных колебаний в коаксиальных линиях передачи // Измерительная техника. Measurement Techniques. September 2015. V. 58. I. 9. P. 1044–1048.
7. Чирков И.П. Современные коаксиальные калибраторы мощности СВЧ в диапазоне частот до 50 ГГц // Измерительная техника. 2014. № 10. С. 48–54; Measurement Techniques. January 2015. V. 57. I. 10. P. 1189–1196.
8. Ginley Ronald A. Traceability for microwave power measurements: Past, present, and future // Wireless and Microwave Technology Conference (WAMICON). 2015 // IEEE 16th Annual. DOI: 10.1109/WAMICON.2015.7120431
9. Gordon J.A., Holloway C.L., Jefferts S., Heavner T. Quantum-based SI Traceable Electric-field Probe, 2010 // IEEE International Symposium on Electromagnetic Compatibility (EMC). July 2010. P. 321–324.
10. Kinoshita M., Shimaoka K., Komiyama K. Atomic Microwave Power Standard Based on the Rabi Frequency // IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. V. 60. No. 7. July 2011. P. 2696–2701.
11. Dietlein C., Popovic Z., Grossman E.N. Aqueous Black body Calibration Source for Millimeterwave/terahertz Metrology // Applied Optics. V. 47. No. 30. 2008. 20 Oct. P. 5604–5615.