

МЕТРОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ИЗМЕРИТЕЛЕЙ БОЛЬШОГО УРОВНЯ СВЧ МОЩНОСТИ И ВОПРОСЫ ИХ АТТЕСТАЦИИ

Е. Г. Эпельман, Е. В. Усов, Л. П. Федотенков

Москва

1. Калориметрические измерители мощности

Калориметры с проточной жидкостью, как и другие калориметрические измерители мощности СВЧ, являются измерителями поглощающего типа.

Измеряемая мощность должна в них полностью рассеиваться, превращаясь в тепловую.

Измерение тепловой мощности в современных калориметрических измерителях мощности СВЧ большого уровня производится одним из следующих методов: методом сравнения, замещения, прямого отсчета.

Указанные методы могут иметь различные схемные и конструктивные решения. Однако неотъемлемой частью при различных конструктивных решениях любого рассматриваемого метода является калориметрическая нагрузка.

В связи с тем, что в области измерений больших уровней высокочастотной мощности ГОСТы и методики по аттестации и поверке отсутствуют, составляющие суммарной погрешности предлагается рассматривать следующим образом.

Все погрешности, связанные с определением величины поглощаемой мощности СВЧ нагрузкой, можно разбить на две группы:

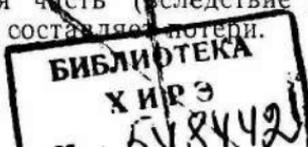
а) погрешности, обусловленные потерей мощности в калориметрической нагрузке, вследствие неполного поглощения мощности СВЧ теплоносителем (водой); эти погрешности систематические; они могут быть найдены путем определения соответствующих мощностей потерь в нагрузке и учтены полностью или частично введением поправок;

б) погрешности, определяемые методом измерения и измерительной схемой.

В зависимости от метода измерения и конструкции измерительной схемы эти погрешности определяются для каждого случая отдельно.

На вход калориметрической нагрузки поступает высокочастотная мощность $P_{\text{вх}}$.

подавляющая часть этой мощности рассеивается в нагрузке, превращаясь в тепловую, и входит в результат измерения. Остальная, сравнительно малая часть (следствие неполного поглощения ее теплоносителем), составляет потери.



По закону сохранения энергии получим

$$P_{\sim} = P_{\text{погл}} + P_{\text{пот}},$$

где $P_{\text{погл}}$ — мощность СВЧ, поглощаемая теплоносителем калориметрической нагрузки;

$P_{\text{пот}}$ — мощность потерь.

В свою очередь

$$P_{\text{пот}} = P_{\text{СВЧ}} + P_{\text{У}} + P_{\text{Т.п}},$$

где $P_{\text{СВЧ}}$ — мощность СВЧ, поглощаемая в стенках волноводной нагрузки (или в сочетании экран — центральная жила шайбы в коаксиальной нагрузке);

$P_{\text{У}}$ — мощность СВЧ, проходящая за пределы нагрузки через отверстия подачи воды, фланцевые соединения и др.;

$P_{\text{Т.п}}$ — мощность или неэквивалентность тепловых потерь в нагрузке в зависимости от применяемого метода.

Мощность потерь в калориметрических нагрузках ($P_{\text{пот}}$) была подробно рассчитана в ряде отчетов НИР и ОКР по данной тематике.

Относительная мощность потерь в стенках для волноводной нагрузки составила 0,2%, для коаксиальной — 0,3%.

Во всех исследованных авторами нагрузках относительная мощность СВЧ, проходящая за пределы нагрузки через отверстия подачи воды $P_{\text{У}}$, представляет собой пренебрежимо малую величину (менее 0,1%).

Относительная мощность тепловых потерь для волноводных нагрузок составляет не более 1%; неэквивалентность тепловых потерь в коаксиальных нагрузках — не более 1,4%.

Работа измерительных схем, реализующих методы сравнения, замещения и прямого отсчета, описана в [1, 2].

Поэтому кратко рассмотрим только основные источники погрешностей.

1. Погрешности, определяемые методом измерения, построенного по схеме сравнения. Эти погрешности складываются из погрешности измерения разности температур $\left(\frac{\delta\Delta T_I}{\Delta T_I}\right)$, $\left(\frac{\delta\Delta T_{II}}{\Delta T_{II}}\right)$ и погрешности измерения низкочастотной мощности $\left(\frac{\Delta P_{\text{н.ч}}}{P_{\text{н.ч}}}\right)$.

Суммарная погрешность определится по формуле

$$\delta = \pm \sqrt{\left(\frac{\delta\Delta T_I}{\Delta T_I}\right)^2 + \left(\frac{\delta\Delta T_{II}}{\Delta T_{II}}\right)^2 + \left(\frac{\Delta P_{\text{н.ч}}}{P_{\text{н.ч}}}\right)^2},$$

где $\delta\Delta T_I$ и $\delta\Delta T_{II}$ — погрешности измерения разности температур СВЧ и НЧ нагрузок;

$\Delta P_{н.ч}$ — погрешность измерения низкочастотной мощности.

Для измерения непосредственно разности температур используются дифференциальные термопары высокой точности.

Если для измерения разности температур ΔT_I и ΔT_{II} применить дифференциальную термопару с погрешностью $0,03^\circ\text{C}$, то для $\Delta T = 10^\circ\text{C}$ погрешность измерения составит $\approx 0,43\%$, а для $\Delta T = 5^\circ\text{C}$ соответственно $0,85\%$.

Погрешность измерения низкочастотной мощности определяется классом точности ваттметра, применяемого при измерении (например, Д-529, К-50 имеют класс 0,5). Поэтому основной задачей конструирования калориметра является выбор оптимальных расхода жидкости и разности температур.

2. Измерение мощности СВЧ методом замещения имеет следующие основные погрешности: погрешность отсчета мощности калибровки ($\delta P_{н.ч}$); погрешность измерителя разности температур $\left(\frac{\delta \Delta T}{\Delta T}\right)$; погрешность за счет нестабильности расхода жидкости.

Для измерения низкочастотной мощности может применяться прибор класса 0,5, а для измерения ΔT — те же устройства, которые рассмотрены для метода сравнения.

Погрешность за счет нестабильности расхода на основании экспериментальных данных, как правило, не превышает 1% .

3. Погрешности измерителя мощности СВЧ, выполненного по схеме прямого отсчета, состоят из погрешности измерителя расхода жидкости, погрешности измерителей температур T_1 и T_2 и погрешности за счет изменения свойств жидкости.

Первая определяется применяемым расходомером, и для турбинных расходомеров типа ДР, ТДР в комплекте с электронно-счетным частотомером ЧЗ-4А составляет $0,4—0,6\%$.

Погрешность измерения разности температур определяется так же, как и в предыдущих схемах.

Погрешность за счет изменения свойств жидкости (за счет изменения коэффициента k) определяется следующим образом.

Как известно, коэффициент k , определяющий свойства калориметрической жидкости, входит в формулу определения мощности

$$k = 4,18 d C_p,$$

где d — плотность жидкости теплоносителя $г/см^3$;

C_p — теплоемкость жидкости теплоносителя $кал/г \cdot град$.

Известно, что величины d и C_p изменяются от температуры, поэтому коэффициент k также изменяется от температуры.

Погрешность, вносимая в измерение за счет изменения коэффициента k от температуры, определяется выражением

$$\delta k = \frac{k_{\text{макс}} - k_{\text{мин}}}{2k_{\text{ср}}} \cdot 100 \%,$$

где при $T_{\text{вх}} = 20^\circ\text{C}$ и $\Delta T = 40^\circ\text{C}$ — величина $\delta k = \pm 0,8\%$.

Аттестация калориметрических измерителей мощности большого уровня заключается в измерении КСВН нагрузки, измерении суммарных потерь нагрузки, определении погрешности измерительной части прибора.

Рассмотрим отдельно один из возможных методов экспериментального определения неэквивалентности суммарных потерь калориметрической нагрузки.

Известно, что неэквивалентность тепловых потерь равна разности потерь при подаче мощности СВЧ и замещающей ее низкочастотной мощности [2]. Для определения неэквивалентности суммарных потерь создается внешний калориметр путем покрытия наружных поверхностей калориметрической нагрузки каналами теплоносителя.

Между входом и выходом теплоносителя внешнего калориметра включается дифференциальная термопара высокой чувствительности. Затем в нагрузку подается измеряемая мощность СВЧ и отмечается показание дифференциальной термопары внешнего калориметра $\Delta T_{\text{СВЧ}}$; при этом отмечается показание мощности СВЧ по шкале собственно калориметрического ваттметра P_1 .

Далее мощность СВЧ снимается и подается замещающая низкочастотная мощность, величина которой регулируется до тех пор, пока показание дифтермопары внешнего калориметра не будет равно $\Delta T_{\text{СВЧ}}$, т. е. $\Delta_{\text{НЧ}} = \Delta T_{\text{СВЧ}}$.

При этом отсчитывается также показание мощности по шкале собственно калориметра P_2 .

Неэквивалентность суммарных потерь определяется как разность показаний:

$$\Delta P_{\text{н.э}} = P_2 - P_1.$$

2. Измерители мощности проходящего типа

Для измерения проходящей мощности СВЧ большого уровня в настоящее время применяются ваттметры с использованием направленных ответвителей, измерители мощности с поглощающей стенкой, лондеромоторные ваттметры и ваттметры с использованием в СВЧ-тракте различных датчиков (ферритовых датчиков, полупроводниковых термопар и т. д.).

Пондеромоторные ваттметры являются абсолютными измерителями. Они обладают высокой точностью, малой инерционностью и имеют незначительные потери.

Особенно проявляется преимущество пондеромоторных ваттметров при измерении больших уровней мощности.

Лучшие образцы таких ваттметров большого уровня СВЧ мощности имеют погрешность 3—5%.

Наиболее широкое применение для измерения мощности СВЧ большого уровня нашли ваттметры с использованием направленного ответвителя (НО) в тракте СВЧ.

Погрешность ваттметра определяется несовершенством параметров направленного ответвителя (конечной направленностью, наличием отражений от основного и вторичного каналов), погрешностью измерителя малой мощности и погрешностью калибровки ответвителя по коэффициенту передачи.

Калибровка такого ваттметра на большом уровне мощности в настоящее время не представляется возможной ввиду отсутствия калориметрических ваттметров необходимой точности.

Ослабление ответвителей, используемых в ваттметрах СВЧ, которые работают при больших уровнях мощности, находится в пределах 40—80 дБ. Точное измерение таких ослаблений связано с определенными трудностями.

Поэтому погрешность калибровки НО по коэффициенту передачи может быть доминирующей частной составляющей ваттметра.

Необходимо также учитывать, что наличие в СВЧ-тракте волн высших типов может явиться источником ошибок в определении мощности волны основного типа ввиду того, что ответвитель имеет различные ослабления для разных типов волн.

Исследованиям направленного ответвителя в многоволновом волноводе и влиянию высших типов волн на погрешность измерения мощности посвящена работа [3].

Ниже описывается способ измерения больших переходных ослаблений НО, позволяющий уменьшить погрешность калибровки НО и погрешность рассогласования.

Калибровка НО на установке Д1-2 по предлагаемой схеме производится двумя ступенями с использованием вспомогательного НО.

Схема измерения первой ступенью приведена на рис. 1. В этом случае происходит поочередное подключение смесителя к выходам 5 и 6, в результате чего определяется отношение напряжений

$$\frac{|U_5^+|}{|U_6^+|} = A_1.$$

Ослабление вспомогательного НО подбирается таким, чтобы $20 \lg A = 50$ дБ.

Схема измерения второй ступенью изображена на рис. 2.

В этом случае нагрузка с выхода вторичного канала калибруемого ответвителя подключается к выходу его основного канала, а аттенюатор — к выходу вторичного канала.

Снова производится поочередное подключение смесителя установки к выходу 6 вторичного канала вспомогательного НО

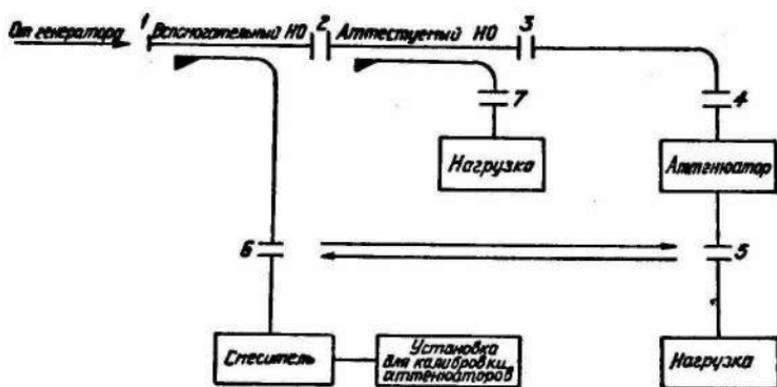


Рис. 1.

и к выходу 5 аттенюатора. Когда смеситель подключен к выходу 6, уровень генератора повышается до выравнивания сигналов по индикатору установки, а показания по шкале образцового аттенюатора должны находиться в пределах 10—20 дб.

В результате определяется величина

$$\frac{|U_5^{1+}|}{|U_6^{1+}|} = A_2.$$

Если ослабление калибруемого ответвителя лежит в пределах 80—90 дб, то $20 \lg A \leq 40$ дб. По результатам двух измерений определяем коэффициент передачи калибруемого ответвителя

$$A = \frac{A_1}{A_2}.$$

Используя метод сигнальных графов для определения $|U_5^+|$, $|U_6^+|$, $|U_5^{1+}|$ и $|U_6^{1+}|$, высший порядок малости A будем определять выражением (величина ослабления аттенюатора выбирается более 10 дб):

$$A = \frac{A_1}{A_2} = \left[\frac{(1 - \Gamma_{э.всп} \Gamma_H)(1 - S_{77} \Gamma_{атт})}{(1 - \Gamma_{э.осн} \Gamma_H)(1 - \Gamma_{атт} \Gamma_{э.осн})} \right] \frac{|S_{32}|}{|S_{72}|}, \quad (1)$$

где $\Gamma_{\text{э.всп}}$ — эффективный коэффициент отражения вспомогательного НО;

$\Gamma_{\text{н}}$ — коэффициент отражения нагрузки, помещенной к выходу основного плеча аттестуемого НО (см. рис. 2);

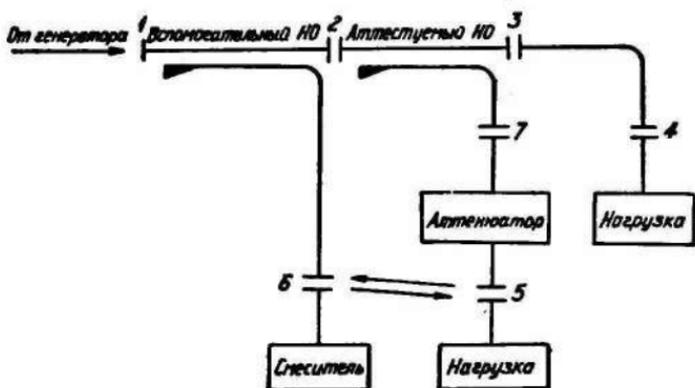


Рис. 2.

S_{77} — коэффициент отражения выхода вторичного канала аттестуемого НО;

$\Gamma_{\text{атт}}$ — коэффициент отражения аттенюатора;

$\Gamma_{\text{э.осн}}$ — эффективный коэффициент отражения выхода аттестуемого НО;

$$\Gamma_{\text{э.осн}} = S_{33} - \frac{S_{32} - S_{73}}{S_{72}};$$

$$\Gamma_{\text{э.всп}} = S_{22} - \frac{S_{21} S_{62}}{S_{61}}.$$

Формула (1) дает возможность определить погрешность измерения величины A .

Так как величина $\frac{|S_{32}|}{|S_{72}|}$ есть действительное значение коэффициента передачи НО, отличие члена, заключенного в фигурные скобки, от единицы характеризует погрешность, связанную с несовершенством параметров НО и элементов, которые применяются в схеме измерения.

В формулу (1) не входит коэффициент отражения со стороны генератора. Поэтому вместо согласованного развязывающего аттенюатора можно включить ферритовый вентиль, что позволяет наиболее полно использовать мощность измери-

тельного генератора. Это особенно важно при измерении больших ослаблений.

Для примера укажем, что при достаточно легко достижимых величинах $|\Gamma_{э.всп}| = |\Gamma_{э.осн}| = 0,05$ (направленность ≈ 26 дБ); $|\Gamma_n| = |\Gamma_{ват}| = 0,05$ и $|S_{77}| = 0,1$ максимальное значение погрешности рассогласования не превышает 2%.

К этой погрешности добавляется погрешность измерителя ослаблений.

Как показано в [4], при градуировке двумя ступенями исключается погрешность из-за нелинейности смесителя, так как уменьшается максимальная мощность, подаваемая на него, а также погрешность в результате собственных шумов измерителя ослаблений.

Воспользовавшись [4] и [5], можно показать, что погрешность измерения коэффициента передачи НО в пределах 90 дБ описанным выше методом не будет превышать 0,15—0,2 дБ.

Предельное значение суммарной погрешности измерения мощности, падающей на нагрузку, ваттметром проходящего типа на основе НО рассчитывается по формуле

$$\Delta_n = \sqrt{\Delta_A^2 + \Delta_{им}^2} + \gamma \Delta_p, \quad (2)$$

где Δ_A — предельная относительная погрешность (в процентах) аттестации направленного ответвителя по коэффициенту передачи;

$\Delta_{им}$ — предельная относительная погрешность измерителя малой мощности;

Δ_p — погрешность рассогласования, вычисляемая по формуле

$$\Delta_p = 2 (|\Gamma_{э.осн}| |\Gamma_n| + |S_{77}| |\Gamma_{ват}|); \quad (3)$$

$|\Gamma_n|$ — модуль коэффициента отражения рабочей нагрузки, помещенной на выходе основного тракта НО;

$|\Gamma_{ват}|$ — модуль коэффициента отражения измерителя малой мощности;

γ — весовой коэффициент; при его определении использованы таблицы, приведенные в [6].

Формула (3) справедлива для случая, если ослабление НО больше 10—20 дБ.

Закон распределения погрешностей Δ_A и $\Delta_{им}$ принимается близким к нормальному, так как эти погрешности сами характеризуются значительным числом частных составляющих.

Поэтому результирующее действие этих погрешностей, определяемое формулой (2), в данном случае справедливо.

Перспективными ваттметрами с точки зрения использования их для измерения большой мощности СВЧ являются ваттметры, использующие зависимость разности температур поверхности передающей линии между участками с большим и ма-

лым сопротивлениями токам высокой частоты от уровня СВЧ мощности в передающем тракте.

Одним из таких приборов, нашедших применение на практике, можно назвать измеритель проходящей мощности, в котором участком с большим сопротивлением является поверхностный поглощающий слой терморезистивных полупроводниковых датчиков (ТПД). Конструкция полупроводниковых термоэлементов и физические основы их работы подробно описаны в [7, 8].

Через поглощающий слой один конец терморезистивной пары нагревается токами высокой частоты, текущими по стенке волновода, второй конец имеет температуру волноводного тракта за счет контакта с массой волновода. Вследствие разности температур возникает термо-э. д. с., пропорциональная проходящей мощности СВЧ. Для уменьшения зависимости э. д. с. от длины волны и фазы коэффициента отражения нагрузки в волноводной секции устанавливается несколько термоэлементов (рис. 1). Ваттметры данного типа обладают рядом достоинств: простотой конструкции, малыми габаритами и весом, высокой надежностью, отсутствием дополнительных источников питания.

Проведем анализ и расчет основных составляющих погрешностей такого ваттметра. Выведем выражение для погрешности рассогласования при использовании четырех датчиков (рис. 1), включенных в тракт с рассогласованными генератором и нагрузкой. Допустим, что датчики идентичны и обозначим их коэффициент передачи через k . Кроме того, будем считать, что любые изменения в индикаторных цепях, связанных с датчиками, не влияют на передачу энергии в линии СВЧ.

Отражениями от датчиков и потерями в них также можно пренебречь (т. е. принять $|S_{11}| \approx 0$, $|S_{12}| \approx 0$), так как в результате проведенных экспериментов оказалось, что $|S_{11}| \leq 0,01$ при погружении датчиков на 0,5 мм вглубь волновода, а $|S_{12}| \geq 0,995$.

Применяя правило некасающихся контуров для определения напряжений U_1 ; U_2 ; U_3 и U_4 на выходе датчиков, получим

$$\begin{aligned}
 U_1 &= \frac{E_k}{\Delta} \left(k + e^{-2j\beta l_1} e^{-2j\beta (l_2 - \Delta l)} \Gamma_H k \right) = \\
 &= \left(1 + e^{-2j\beta (l_1 + l_2 - \Delta l)} |\Gamma_H| \right) \frac{E_r k}{\Delta}; \\
 U_2 &= \frac{E_r}{\Delta} \left(e^{-j\beta (l_1 - \Delta l)} k + e^{-j\beta (l_1 - \Delta l)} e^{-2j\beta l_2} \Gamma_H k \right) = \\
 &= e^{-j\beta (l_1 - \Delta l)} \left(1 + e^{-2j\beta l_2 - j\varphi_H} |\Gamma_H| \right) \frac{E_r k}{\Delta}; \quad (4)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 U_3 &= \left(e^{-j\beta l_1} k + e^{-j\beta l_1} e^{-2j\beta(l_2 - \Delta l)} \Gamma_n k \right) \frac{E_r}{\Delta} = \\
 &= e^{-j\beta l_1} \left(1 + e^{-2j\beta(l_2 - \Delta l) - j\varphi_n} |\Gamma_n| \right) \frac{E_r k}{\Delta}; \\
 U_4 &= \left(e^{-j\beta l_1} e^{-j\beta(l_2 - \Delta l)} k + e^{-j\beta l_1} e^{-j\beta(l_2 - \Delta l)} \Gamma_n k \right) \frac{E_r}{\Delta} = \\
 &= e^{-j\beta(l_1 + l_2 - \Delta l)} \left(1 + |\Gamma_n| e^{-j\varphi_n} \right) \frac{E_r}{\Delta} k.
 \end{aligned}$$

Комплексная амплитуда волны, падающей на нагрузку, будет иметь следующий вид:

$$U_n = \frac{e^{-j\beta l_1} e^{-j\beta(l_2 - \Delta l)}}{\Delta} E_r = \frac{e^{-j\beta(l_1 + l_2 - \Delta l)}}{\Delta} E_r. \quad (5)$$

В этих выражениях введены такие обозначения:

Δ — общий знаменатель полученных выражений (определитель графа);

E_r — амплитуда волны, поступающей от генератора;

$|\Gamma_n|$ — модуль коэффициента отражения нагрузки ваттметра;

φ_n — фазовый угол коэффициента отражения нагрузки;

β — постоянная распространения $\left(\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \right)$.

Величина проходящей мощности принимается равной среднему арифметическому из показаний четырех датчиков.

В этом случае формула для погрешности рассогласования имеет вид

$$\delta_p = \frac{1}{4k^2} \frac{(|U_1|^2 + |U_2|^2 + |U_3|^2 + |U_4|^2 - U_n|^2 (1 - |\Gamma_n|^2))}{(1 - |\Gamma_n|^2) |U_n|^2}. \quad (6)$$

Подставив в формулу (6) выражения зависимостей (4) — (5), после преобразования получим

$$\begin{aligned}
 \delta_p &= \frac{2 |\Gamma_n|^2}{(1 - |\Gamma_n|^2)} + 2 |\Gamma_n| \left\{ \frac{1}{4} [\cos [2\beta (l_1 + l_2 - \Delta l) + \varphi_n] + \right. \\
 &\left. + \cos (2\beta l_2 + \varphi_n) + \cos [2\beta (l_2 - \Delta l) + \varphi_n] + \cos \varphi_n \right\}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

Выражение в фигурных скобках есть выражение для эффективного коэффициента отражения ваттметра Γ_s .

Определим модуль эффективного коэффициента отражения. С этой целью преобразуем выражение в фигурных скобках формулы (7):

$$\begin{aligned}\bar{\Gamma}_e &= \sum_{i=1}^3 (\cos 2\beta a_i \cos \varphi - \sin 2\beta a_i \sin \varphi) + \sin \varphi = \\ &= \left(\sum_{i=1}^3 \cos 2\beta a_i + 1 \right) \cos \varphi + \sum_{i=1}^3 \sin 2\beta a_i \sin \varphi,\end{aligned}$$

где

$$a_1 = l_1 + l_2 - \Delta l, \quad a_2 = l_2 - \Delta l, \quad a_3 = l_2.$$

Следовательно,

$$|\Gamma_e| = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^3 \cos 2\beta a_i + 1 \right)^2 + \left(\sum_{i=1}^3 \sin 2\beta a_i \right)^2}.$$

Подставив значение a_i , после преобразований получим

$$\begin{aligned}|\Gamma_e| &= \frac{1}{2} \sqrt{4 + 2[\cos 2\beta (l_1 - \Delta l) + \cos 2\beta l_1 + \\ &+ \cos 2\beta (\Delta l) + \cos 2\beta (l_1 + l_2 - \Delta l) + \cos 2\beta l_2 + \cos 2\beta (l_2 - \Delta l)].}\end{aligned}\quad (8)$$

Можно показать, что при $\Delta l = 0$ $l_1 = l_2 = \frac{\lambda_{ср}}{4}$, $|\Gamma_e| \leq 0,025$

в полосе частот $\pm 10\%$ (в случае идентичных по чувствительности датчиков).

Тогда максимальное значение погрешности рассогласования будет иметь вид

$$\delta_{p\max} = \frac{2|\Gamma_n|^2}{(1 - |\Gamma_n|^2)} + 2|\Gamma_n||\vartheta|. \quad (9)$$

Второй основной составляющей погрешностью ваттметра на основе ТПД является погрешность за счет разброса чувствительностей ТПД.

Допустим, что при калибровке ТПД оказались в таких точках стоячей волны, что создаваемые ими токи различаются наибольшим образом. Это возможно, если один из ТПД (например, первый) окажется в пучности стоячей волны, другой — в узле, а третий — снова в пучности, и т. д.

Наибольшая ошибка в этом случае будет тогда, когда при измерениях картина изменится, т. е. те ТПД, которые находились при калибровке в узле, окажутся в пучности, и наоборот.

Задавая соответствующее значение φ_n в уравнениях (5), можно найти выражение для показаний выходного прибора в двух указанных случаях. Разность этих показаний и будет характеризовать максимальную погрешность за счет разброса чувствительностей ТПД.

Как показывают расчеты, разброс датчиков по чувствительности является источником значительной погрешности.

Так, при разбросе $\pm 20\% \delta = \pm 16\%$, при разбросе $\pm 10\% \delta = 6\%$ и при разбросе $\pm 5\% \delta = 3\%$.

Таким образом, влияние фазы нагрузки на показания прибора определяется не только расположением датчиков по широкой стенке волновода, но и разбросом их чувствительностей.

Формула (9) выведена в предположении, что датчики идентичны. В реальном случае вместо $|\Gamma_9|$ необходимо подставить действительное значение $|\Gamma_{9д}|$, учитывающее также и разброс датчиков по чувствительности. Ниже приводится методика экспериментальной оценки $|\Gamma_{9д}|$.

Определение модуля эффективного коэффициента отражения производится на рабочем стенде по схеме, изображенной на рис. 2.

Последовательность операций при этом следующая:

а) мощность генератора устанавливается близкой к нижнему граничному значению мощности, измеряемой прибором;

б) с помощью фазовращателя следует последовательно изменять фазу (через $10-15^\circ$ в пределах от 0 до 180°) коэффициента отражения калориметрического измерителя мощности с известным значением КСВН ($2=1,6 \div 2$) и одновременно определять отношение показаний аттестуемого ваттметра $P_{пр}$, отградуированного в поглощенной мощности к показаниям калориметрического измерителя мощности $P_{погл}$;

в) найти максимальное α_{max} и минимальное α_{min} значения этого отношения мощностей

$$\alpha_{max} = \left(\frac{P'_{погл}}{P'_{пр}} \right)_{max},$$

$$\alpha_{min} = \left(\frac{P'_{погл}}{P'_{пр}} \right)_{min}$$

и определить модуль эффективного коэффициента отражения на выходе аттестуемого ваттметра проходящего типа Γ_9 :

$$|\Gamma_9| = \frac{\alpha_{max} - \alpha_{min}}{\alpha_{max} + \alpha_{min}} \frac{1}{2|\Gamma_{ват}|},$$

где $|\Gamma_{ват}| = \frac{r-1}{r+1}$ — значение модуля коэффициента отражения на входе калориметрического измерителя мощности.

К другим погрешностям прибора необходимо отнести погрешность, связанную с изменением потерь в ТПД и отверстиях связи в диапазоне частот Δf ; погрешность калибровки Δk , определяемую в основном погрешностью образцового прибора (например, типа МЗ-26); погрешность Δ_n , вызванную нелинейностью ваттметра в динамическом диапазоне.

Предельное значение основной относительной погрешности измерения проходящей мощности СВЧ прибором данного типа определяется по формуле

$$\Delta = \pm \sqrt{0,11\Delta^2 k + 0,3\Delta^2 f + 0,3\Delta_n^2 + 0,5\delta_{\rho_{\max}}^2}.$$

Коэффициенты при квадратах предельных погрешностей выбираются из учета закона распределения данных погрешностей [9].

Погрешность, рассчитанная с помощью приведенной формулы для одного из вариантов ваттметра, составляет не более $\pm 10\%$.

ВЫВОДЫ

1. Погрешности калориметрических измерителей большого уровня мощности в общем случае состоят из двух групп: погрешностей, обусловленных калориметрической нагрузкой, и погрешностей измерительной схемы.

2. Погрешности калориметрических нагрузок определяются их конструкцией и могут быть рассмотрены независимо от измерительной схемы ваттметра.

3. Рассмотренные три метода измерений (сравнения, замещения и прямого отсчета) по точности приблизительно одинаковы, т. е. погрешность составляет 5—6%.

4. Погрешности измерения с использованием методов сравнения и замещения возрастают при увеличении уровня измеряемой мощности относительно метода прямого отсчета. Однако на нижнем участке динамического диапазона погрешности соответственно уменьшается.

5. Так как калориметрические ваттметры являются абсолютными измерителями, то предлагаемая методика аттестации является, на наш взгляд, оптимальной.

6. Методика поэлементной калибровки ваттметра проходящего типа для измерения больших мощностей СВЧ получила в настоящее время широкое распространение.

7. Предложена схема калибровки НО по коэффициенту передачи, обеспечивающая более высокую точность измерения в сравнении с существующими схемами для ослаблений более 50 дБ.

8. Приборы для измерения большой мощности СВЧ на основе термпарных датчиков обладают определенными достоинствами. Точность таких приборов может быть повышена.

ЛИТЕРАТУРА

1. Справочник «Измерения в электронике» под ред. Доброхотова Б. А. Изд-во «Энергия», Л., 1965.

2. В. И. Проненко. Анализ погрешностей микрокалориметра с проточной жидкостью. Сб. «Труды института Госстандарта», вып. 48(108), Стандартгиз, 1962.

3. Е. Г. Билык, В. Ю. Лейкин. Измерение переходного ослабления направленного ответвителя на волнах высших типов. «Вопросы радиоэлектроники, серия радиоизмерительная техника», М., 1970.

4. Ф. Н. Петросян. К применению двухступенчатой градуировки в супергетеродинных измерителях ослаблений. Труды институтов Комитета стандартов, вып. 70, 1970.

5. Л. А. Биргер. Погрешности измерения ослаблений супергетеродинных методов. Труды институтов Комитета стандартов, вып. 44(104), 1960.

6. А. И. Механников. Расчет погрешности при некоторых измерениях на СВЧ. «Измерительная техника», 1968, № 7.

7. В. А. Долгов, А. В. Келин. Электронные датчики для автоматических систем контроля. Изд-во «Советское радио», М., 1968.

8. А. Ф. Иоффе. Полупроводниковые термоэлементы. Изд. АН СССР, 1956.

9. Б. Е. Рабинович. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. «Вопросы радиоэлектроники, серия радиоизмерительная техника», вып. 4, 1961.