

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОГРЕШНОСТЕЙ ВАТТМЕТРОВ ПРОХОДЯЩЕЙ МОЩНОСТИ СВЧ ПРИ ГРАДУИРОВКЕ С ПОМОЩЬЮ ОБРАЗЦОВОГО ПРИБОРА

В. Д. Кукуш, В. Н. Жендубаев

Харьков

Известно два принципиально различных способа градуировки измерителей проходящей мощности СВЧ.

1. **Способ самокалибровки**, т. е. проведение калибровки путем прямых измерений определенных физических величин, но не проходящей мощности (постоянного или низкочастотного тока, напряжения, сопротивления, ослабления и т. д. [1]). Самокалибровка, которая сводится к прямым измерениям массы, длины и времени, а также к использованию физических констант,

называется абсолютной калибровкой. Примером может служить калибровка пондеромоторных ваттметров, которая в настоящее время выполняется с весьма высокой точностью [2, 3].

2. Способ калибровки по образцовому ваттметру СВЧ, при которой проводятся прямые измерения проходящей мощности СВЧ.

Анализ погрешностей ваттметров проходящей мощности и пути их определения при самокалибровке освещены в работах

[1, 2, 3]. Что же касается определения погрешностей при градуировке по образцовому прибору, здесь мы имеем случай апостериорного исследования погрешностей, который применительно к ваттметрам проходящей мощности СВЧ в литературе не рассматривался.

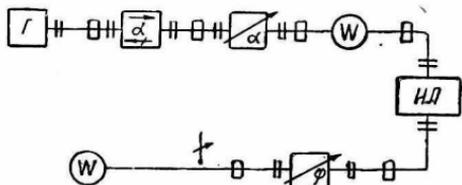


Рис. 1. Схема градуировки с образцовым ваттметром оконечного типа.

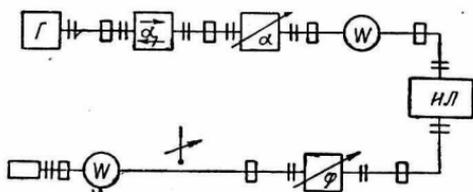


Рис. 2. Схема градуировки с образцовым ваттметром проходящего типа.

Задача состоит в том, чтобы выделить составляющие основной погрешности, указать методику их определения и оценить практически предельную погрешность. При этом необходим общий подход независимо от конкретной схемы и принципа действия измерителя.

Пусть градуировка прибора производится по блок-схеме рис. 1 или рис. 2 (в зависимости от типа образцового ваттметра) при согласованном входе образцового прибора (к. с. в. н. $\leq 1,03 - 1,04$). При этом производятся многократные измерения мощности ($n \geq 10$) при различных значениях фазы коэффициента отражения (обычно интервал значений фаз, распределенных от 0 до 2π , разбивается на ряд равных участков), поскольку все значения фазы равновероятны.

Показания рабочего прибора поддерживаются постоянными, а по образцовому измеряются отклонения уровня мощности. Определяется среднее арифметическое значение показаний образцового прибора и среднеквадратичное отклонение от среднего. Эта средняя величина приписывается данному делению градуируемого прибора.

Практически предельная погрешность прибора [4]

$$\xi_0 = \gamma_0 \pm m\sigma_0,$$

где γ_0 — относительная систематическая погрешность;

σ_0 — относительная среднеквадратичная погрешность;

m — число, величина которого зависит от закона распределения и доверительной вероятности (при нормальном законе распределения случайной погрешности и доверительной вероятности 0,95 $m = 2$).

Независимо от типа измерителя проходящей мощности можно выделить следующие составляющие погрешности:

а) погрешность, обусловленную образцовым прибором, который используется при градуировке

$$\xi_{\text{обр}} = \gamma_{\text{обр}} \pm m_1 \sigma_{\text{обр}};$$

б) погрешность градуировки, обусловленную случайной погрешностью градуируемого прибора и неидеальным согласованием входа образцового прибора при градуировке $\sigma_{\text{ок}}$;

в) погрешность, обусловленную несогласованной нагрузкой в пределах допустимых к. с. в. н. при произвольной фазе коэффициента отражения в диапазоне частот прибора;

г) погрешности, обусловленные отклонением климатических условий (температура, влажность, давление) от нормальных и изменением питающих напряжений, — γ_{01} , γ_{02} , γ_{03} , γ_{04} . Первые три погрешности относятся к основной погрешности, погрешности по пункту г) — к дополнительным.

Рассмотрим подробнее составляющие погрешности и способы их определения.

Погрешность, обусловленная образцовым прибором, фактически полностью переносится на калибруемый прибор и определяется по паспортным данным на образцовый прибор. Лишь варьирующаяся часть случайной погрешности образцового прибора в случае многократных измерений при калибровке может быть уменьшена до величин погрешности среднего арифметического. Структура погрешности образцового прибора редко хорошо известна, однако это уменьшение погрешности обычно очень мало.

Рассмотрим, какую погрешность следует приписать калибруемому ваттметру — $\epsilon_{\text{обр}}$, $2\epsilon_{\text{обр}}$ или $3\epsilon_{\text{обр}}$. Очевидно, погрешность в $\epsilon_{\text{обр}}$ может быть приписана, и в дальнейшем обоснована, если при периодических поверках использовать тот же экземпляр образцового прибора, что и при калибровке. Если при поверках использован прибор такой же точности, но не тот же экземпляр, то погрешность $\epsilon_{\text{обр}}$ может не быть обоснованной (возможна относительная разность показаний в $2\epsilon_{\text{обр}}$). Следовательно, калибруемому прибору в этом случае нужно приписать погрешность $2\epsilon_{\text{обр}}$. Погрешность же в $3\epsilon_{\text{обр}}$ приписывают из тех соображений, что в соответствии с критерием малости, справедливым при случайных погрешностях, погрешность образцового прибора должна быть пренебрежимо малой по сравнению с погрешностью поверяемого. Это упростит процесс поверки, но существенно снизит точность калибруемого прибора.

Случайная погрешность при калибровке включает в себя случайную погрешность рабочего прибора, обусловленную вариацией показаний выходного прибора, нестабильностями, имеющими место в его схеме, а также переменную систематическую погрешность, обусловленную взаимодействием отражений от неидеально согласованного прибора.

На рис. 1 и рис. 2 показаны блок-схемы установок, применяемых при градуировке и исследовании измерителей проходящей мощности. Блок-схема, показанная на рис. 1, использует образцовый измеритель поглощаемой мощности; блок-схема рис. 2 — образцовый измеритель проходящей мощности.

Существенным при градуировке является тщательное согласование входа образцового ваттметра, которое выполняется с помощью согласующего трансформатора, включаемого в тракт, а также наличие развязывающего вентиля на выходе генератора.

Если удастся выполнить согласование до к. с. в. н. $\leq 1,03 \div 1,04$, то погрешностью, обусловленной отражениями от измерителей при градуировке, можно пренебречь. Методика определения этой погрешности не отличается от методики, используемой в случае несогласованной нагрузки. При тщательном согласовании входа образцового прибора до к. с. в. н. $= 1,03 - 1,04$ погрешность может быть исключена.

Погрешность, обусловленная несогласованной нагрузкой при произвольной фазе коэффициента отражения в диапазоне частот. Основные особенности методики определения погрешности состоят в следующем. Частота в рабочем диапазоне изменяется перестройкой генератора и контролируется волномером. С помощью расогласователя и измерительной линии устанавливается к. с. в. н., при котором требуется определить погрешность. Фазовращателем устанавливается ряд ($n \geq 10$) значений фазы коэффициента отражения через равные промежутки по фазе (в общих пределах 360°).

Проходящая мощность поддерживается постоянной с помощью аттенюатора и образцового измерителя мощности.

Для каждого положения фазовращателя снимаются показания рабочего и образцового измерителя. По результатам измерений определяется систематическая погрешность γ_r (разность среднего арифметического значения показаний рабочего измерителя проходящей мощности и значения проходящей мощности, измеряемого по образцовому прибору) и среднеквадратичная погрешность ряда измерений σ_r .

Следует отметить, что градуировка ваттметра проходящей мощности, предназначенного для работы в диапазоне значений к. с. в. н. нагрузки, может быть выполнена с определенным фиксированным значением к. с. в. н. При этом исключается систематическая погрешность $\gamma_{ог1}$, однако следует проверить величину систематической погрешности при других значениях Γ_n и частоты. На графиках рис. 3 (а, б, в) приведена зависимость показаний рабочего прибора ИПМШ-2 [5] от фазы коэффициента отражения в диапазоне частот 8390 ± 820 мгц ($\Delta f = \pm 5\%$). Графики приведены для средней частоты (б) и крайних частот (а, в). Показания образцового прибора представлены сплошной линией. Погрешности прибора и их численные значения приведены для четырех типов приборов [5, 6] в таблице. Предельная погрешность приборов на основании экспериментальных результатов

определяется по формуле (1) при доверительной вероятности 0,95.

Закон распределения погрешностей прибора является композицией нормального закона и закона \arcsin . При доверительной вероятности $p = 0,95$ величина m будет лежать в пределах $m = 2 \div 1$.

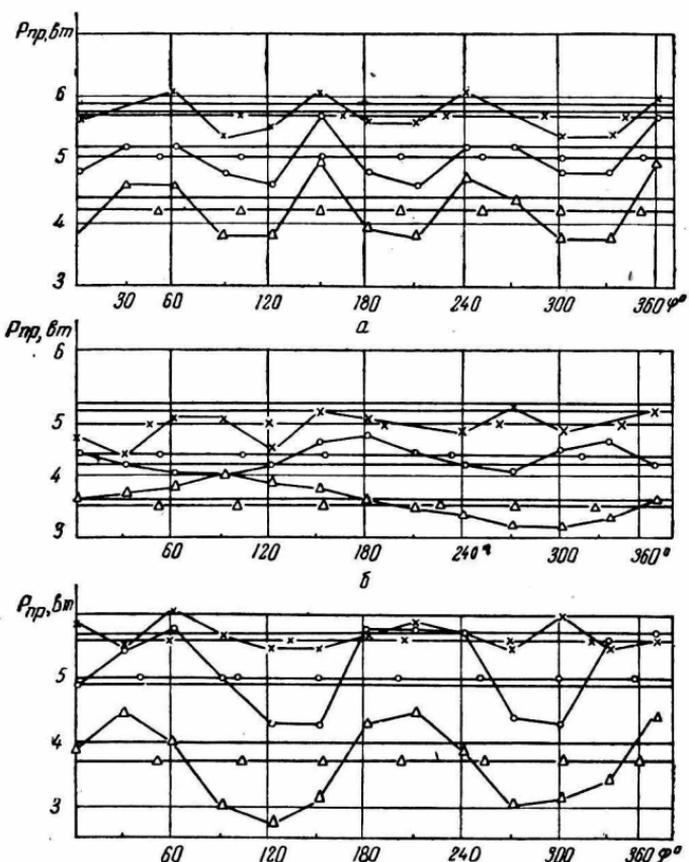


Рис. 3. Зависимость показаний рабочего прибора ИПМШ-2 от фазы отраженной волны при рассогласовании нагрузки в диапазоне частот.

Следует отметить, что погрешности, определенные экспериментально для измерителя ИПМШ-2 в диапазоне частот $\Delta f = \pm 5\%$ и при к. с. в. н. = 3 могут быть существенно уменьшены, если производить перестройку прибора на каждой частоте измерения. Зависимость от фазы и уровня отраженной волны обусловлена фазовыми сдвигами сигналов, пропорциональных поперечным компонентам поля [5]. Суммарный фазовый сдвиг между сигналами изменяется в зависимости от частоты, он может быть

устранен введением в цепь обработки сигналов фазовращателя. Систематическую погрешность, возникающую за счет изменений в диапазоне частот модулей коэффициентов передачи зондов устраняют введением аттенюатора и потенциометра регулировки произведения. Погрешность измерения в этом случае по диапазону частот не превысит погрешности на средней частоте диапазона. Подобные меры приводят к уменьшению погрешности в приборах ИПМ-1В и ИПМ-3К.

Погрешности измерителей проходящей мощности

Тип прибора		ИПМ-1В	ИПМШ-2	ИПМ-3К	ИПМ-4К	
		$r=1,05 \div$ 3,0 $\Delta f =$ $\pm 1\%$	$r=1,05 \div$ 3,0 $\Delta f =$ $\pm 5\%$	$r=1,05 \div$ 2,4 $\Delta f =$ $\pm 2\%$	$r=1,05 \div$ 1,85 $\Delta f =$ $\pm 2\%$	
Основная погрешность	1. Погрешность образцового прибора	$\gamma_{обп} \%$	0,05	0,05	0,05	0,05
		$\sigma_{обр} \%$	± 3	± 3	± 2	± 2
	2. Погрешность, обусловленная изменением фазы коэффициента отражения при градуировке в условиях согласованной нагрузки (к. с. в. н. $\leq 1,05$)	$\sigma_{раб} \%$	0,5	0,5	0,5	0,5
	3. Погрешность обусловленная несогласованной нагрузкой при изменении фазы коэффициента отражения в диапазоне частот	$\gamma_{фр} \%$	-0,5	-3	± 2	-1
		$\sigma_{фр} \%$	± 4	± 6	± 7	$\pm 2,5$
	Предельная погрешность приборов	$\epsilon_{пр} \%$	10	16	16	5

ЛИТЕРАТУРА

1. В. И. Проненко. Анализ погрешностей микрокалориметра с проточной жидкостью. Труды институтов Комитета стандартов мер и измерительных приборов при Совете Министров СССР, вып. 48 (108), 1960.
2. Р. А. Валитов, В. Д. Кукуш, В. Г. Орлов. Применение пндеромоторных эффектов электромагнитного поля для измерения мощности СВЧ. «Вопросы радиоэлектроники», серия 6, радиоизмерительная техника, вып. 1, 1960.
3. В. С. Жялков, В. Д. Кукуш, В. И. Проненко, А. И. Самойлович. Стационарная измерительная пндеромоторная установка для градуировки и поверки ваттметров СВЧ. Сб. «Радиотехника», вып. 11. Харьков, Изд-во ХГУ, 1969.
4. Б. Е. Рабинович. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. «Вопросы радиоэлектроники», серия 6, 1971.

5. В. Н. Жендубаев, В. Д. Кукуч. Датчик проходящей мощности: для несогласованных волноводных трактов. «Вопросы радиоэлектроники», серия 6, радиоизмерительная техника, вып. 3, 1971.

6. В. Н. Жендубаев, В. Д. Кукуч, И. И. Зозуля. Измеритель проходящей мощности со смешанными индуктивно-емкостными связями. Сб. «Радиотехника», вып. 17. Харьков. Изд-во ХГУ, 1971.