

# ПОНДЕРОМОТОРНЫЙ СВЧ-ВАТТМЕТР С АВТОМАТИЧЕСКИ СТАБИЛИЗИРОВАННОЙ ЧУВСТВИТЕЛЬНОЙ СИСТЕМОЙ

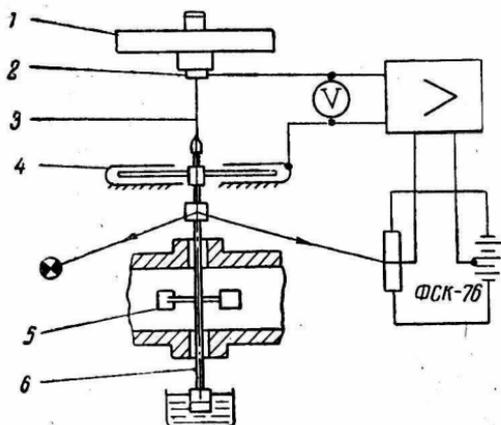
В. С. Жилков, А. Ф. Серeda, А. Т. Акулов

Харьков

Пондеромоторные ваттметры крутильного типа нашли применение в качестве образцовых устройств для проверки и градуировки рабочих измерителей среднего и большого уровня [3, 4, 5].

Являясь абсолютно калибруемыми приборами, имея слабую зависимость результатов измерения от фазы коэффициента отражения нагрузки в широком диапазоне частот и отличаясь сравнительно большим динамическим диапазоном, эти приборы вместе с тем имеют ряд существенных недостатков.

В работе [2] для устранения недостатков предлагается электрически демпфировать подвижную систему прибора путем введения отрицательной обратной связи. Ниже приводятся результаты исследований пондеромоторного ваттметра, подвижная система которого стабилизи-



руется с помощью автоматической системы регулирования. Крепление подвижной части прибора осуществляется на подвесе, благодаря чему повышается точность измерения жесткости упругой нити.

Подвижная часть ваттметра (см. рис.) состоит из обратного преобразователя 4, чувствительного элемента 6, кварцевого стержня 5, платино-серебряного подвеса 3 и эталонного грузика 2. Последний крепится в центральной втулке оптического квадранта 1, который служит для измерения угла поворота подвижной системы при электрической калибровке прибора.

В процессе измерения чувствительный элемент испытывает действие вращающего момента, и подвижная система поворачивается на некоторый угол. Изменение углового положения зеркальца вызывает перераспределение светового потока на фоторезисторах, их сопротивление изменяется, вызывая разбаланс мостовой схемы. Сигнал разбаланса усиливается и подается на обратный преобразователь, выполненный на базе электростатического измерительного механизма. Момент, создаваемый обратным преобразователем, который является элементом системы автоматической компенсации углового смещения, возвращает подвижную часть ваттметра в исход-

ное состояние, а измерение мощности сводится к измерению напряжения на обратном преобразователе. Таким образом, в установившемся состоянии чувствительный элемент всегда находится под углом  $\theta$  относительно оси волновода, соответствующим наибольшей чувствительности.

Фактически подвижная часть пондеромоторного ваттметра испытывает действие трех моментов: СВЧ-момента  $M_{\text{СВЧ}}$ , уравновешивающего момента обратного преобразователя  $M_{\text{Э}}$  и противодействующего момента упругой нити  $M_{\text{П}}$ .

В этом случае

$$M_{\text{СВЧ}} = M_{\text{Э}} + M_{\text{П}} = M_{\text{Э}} \left( 1 + \frac{M_{\text{П}}}{M_{\text{Э}}} \right) = M_{\text{Э}} (1 + \gamma). \quad (1)$$

Отношение  $\gamma = \frac{M_{\text{П}}}{M_{\text{Э}}}$  характеризует статическую погрешность ваттметра от неполной компенсации момента. Для уменьшения этой погрешности необходимо, чтобы момент подвеса был во много раз меньше момента обратного преобразователя.

Момент, создаваемый действием пондеромоторных сил, определяем из выражения

$$M_{\text{СВЧ}} = K_e P_{\text{СВЧ}}, \quad (2)$$

где  $K_e$  — электрический калибровочный коэффициент прибора;  $P_{\text{СВЧ}}$  — мощность, проходящая по волноводу в нагрузку.

Момент обратного преобразователя

$$M_{\text{Э}} = \frac{1}{2} \frac{dC}{da} \cdot U^2 = K_u U^2, \quad (3)$$

где  $K_u$  — градуировочный коэффициент обратного преобразователя;  $U$  — напряжение на обратном преобразователе.

Из (1) — (3) получим выражение для мощности СВЧ:

$$P_{\text{СВЧ}} = \frac{K_u}{K_e} U^2 (1 + \gamma). \quad (4)$$

Таким образом, при известных  $K_u$  и  $K_e$  вольтметр, измеряющий напряжение на обратном преобразователе, может быть градуирован в значениях мощности СВЧ. Из выражения (4) также видно, что шкала прибора нелинейна. Ее линейризация может быть осуществлена изменением  $K_u$  за счет выбора формы подвижной и неподвижной части обратного преобразования.

Остановимся подробнее на анализе погрешностей. Погрешность измерения мощности определяется погрешностью определения  $K_e$ ,  $K_u$ ,  $\gamma$  и погрешностью измерения напряжения.

Электрический калибровочный коэффициент обычно определяют экспериментально по методике, предложенной Калленом [5]. При тщательном эксперименте погрешность в определении  $K_e$  менее 1%.

Градуировочный коэффициент  $K_u$  определяют сравнением механического момента, создаваемого подвесом, и момента обратного преобразователя, так как

$$M_{\Pi} = M_{\Sigma}; K_M \alpha = K_u U^2; K_u = \frac{K_M}{U^2} \alpha, \quad (5)$$

где  $K_M$  — удельный момент кручения нити подвеса;  
 $\alpha$  — угол поворота подвеса.

Из выражения (5) видно, что для определения  $K_u$  необходимо знать  $K_M$ ,  $\alpha$  и  $U$ .

Удельный момент кручения нити подвеса  $K_M$  определяется по измерению периода и декремента свободных колебаний, эталонного — по моменту инерции груза, который определяется расчетным путем с высокой точностью. Погрешность определения  $K_M$ , согласно методике, описанной в [1], не превышает 0,15%.

Угол поворота подвеса  $\alpha$  измеряется при помощи статического квадранта КО-10, предельная абсолютная погрешность которого  $10''$ .

Напряжение измерялось цифровым ваттметром Щ1411, погрешность его  $\pm 0,05$ .

Определение выполнялось по следующей методике. Поворотом редуктора квадранта подвес закручивался на угол  $\alpha$ . Возникающий при этом момент уравнивался моментом обратного преобразователя при подаче на него напряжения  $U$ . Индикация равенства моментов осуществлялась с помощью фотоэлектрического преобразователя.

Результаты экспериментальных данных определения  $K_u$  для обратного преобразователя, выполненного на базе электростатического механизма типа С 50, приведены в таблице.

$\alpha^{\circ}$	0	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	3,5
$U, \text{ в}$	0	1,5	3,0	4,5	6,0	7,5	9,0	10,5
$K_{u10^{-3}} \text{ дин-см/в}^2$	0	0,468	0,234	0,155	0,116	0,093	0,078	0,066

Погрешность определения градуировочного коэффициента обратного преобразователя  $\sigma_{ku}$  представляет собой сумму погрешности расчетной формулы (6) и погрешности, обусловленной неточностью определения, входящих в эту формулу параметров:

$$\sigma_{ku} = \sqrt{\left[ \frac{\partial K_u / \partial \alpha}{K_u} \sigma_{\alpha} \right]^2 + \left[ \frac{\partial K_u / \partial U}{K_u} \sigma_U \right]^2 + \left[ \frac{\partial K_u / \partial K_M}{K_u} \sigma_K \right]^2}. \quad (6)$$

В результате анализа, проведенного по методике (6), погрешность определения градуировочного коэффициента обратного преобразователя составила 0,5%.

Статическая погрешность  $\gamma$  от некомпенсации момента в значительной мере определяется коэффициентом усиления  $K$  усилителя.

В результате экспериментальных исследований для  $K = 2000$  величина ее составила 0,05%. Уменьшение статической погрешности достигается увеличением коэффициента усиления усилителя (при этом система становится неустойчивой) или путем уменьшения жесткости подвеса, что делает систему чувствительной к механическим воздействиям. Эта погрешность может быть учтена при градуировке, поэтому уменьшать ее величину перечисленными методами нецелесообразно.

Относительная среднеквадратическая погрешность измерения мощности автоматическим ваттметром [6]

$$\sigma_p = \sqrt{\sigma_{ки}^2 + \sigma_{ке}^2 + \sigma_v^2}$$

составила 1,5%.

Определялось  $\sigma_p$  без учета погрешностей, вносимых звеньями, которые охвачены обратной связью, так как, согласно [7], эти погрешности малы.

Таким образом, по своим метрологическим показателям автоматический ваттметр незначительно уступает существующим образцовым пондеромоторным измерителям мощности с ручным уравниванием, но значительно превосходит их по своим технико-эксплуатационным показателям.

Автоматический ваттметр отличается удобством отсчета, нечувствителен к вибрациям, время установления показаний не превышает 5 сек; при этом отпадает необходимость в операторе, что особенно важно при измерениях больших уровней мощности.

## ЛИТЕРАТУРА

1. В. А. Валитов, В. Н. Сретенский. Радиотехнические измерения. Изд-во «Советское радио», 1970, с. 324—330.
2. А. Ф. СерEDA, А. Г. Акулов. К вопросу о выборе структурной схемы автоматических пондеромоторных измерителей мощности. Сб. «Радиотехника», вып. 23. Изд-во ХГУ, Харьков, 1972, с. 81—84.
3. В. С. Жилков, В. Д. Кукуш, В. И. Проненко, А. И. Самойлович. Стационарная пондеромоторная установка для градуировки и проверки ваттметров СВЧ. Сб. «Радиотехника», вып. 11. Изд-во ХГУ, Харьков, 1969, с. 89—95.
4. В. С. Жилков и др. Стационарная пондеромоторная установка для измерения мощности СВЧ в трехсантиметровом диапазоне. Отчет по НИР № 68—88; регист. номер БО62842, 1969.
5. A. L. Cullen. A General Method for the Absolute Measurement of Microwave Power. Proc. IEE, 99, part IV, № 2, 112—120, 1952.
6. Б. Е. Рабинович. Методика суммирования частных погрешностей в области радиотехнических измерений. Труды институтов Комитета стандартов, вып. 57 (117), 1962, с. 19—33.
7. Л. А. Островский. Основы общей теории электроизмерительных устройств. Изд-во «Энергия», 1971, с. 405—413.