

## О ВОЗМОЖНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ ПОНДЕРОМОТОРНЫХ ВАТТМЕТРОВ В МНГОВОЛНОВЫХ ВОЛНОВОДАХ ПРЯМОУГОЛЬНОГО СЕЧЕНИЯ

При исследованиях СВЧ узлов и приборов, работающих в многоволновых линиях передачи возникает необходимость измерения мощности, переносимой основным типом волны, интегральной мощности всех видов колебаний и мощности, переносимой на гармонических частотах. Для указанных случаев интересно рассмотреть возможность применения пондеромоторных ваттметров, которые характеризуются простотой конструкции, достаточно хорошо разработанной методикой аттестации, а также большим частотным и динамическим диапазонами.

На практике наиболее широкое применение нашли ваттметры крутильного типа [1]. В них, как правило, используются датчики, у которых чувствительные элементы расположены симметрично относительно линии подвеса, в результате чего практически невозможно измерить суммарную мощность нескольких типов колебаний, так как вращающие моменты для разных типов волн направлены в различные стороны [2]. При распространении по передающему тракту нескольких типов колебаний каждый из них, взаимодействуя с чувствительным элементом, создает вращающий момент, знак которого определяется конфигурацией соответствующей волны, т. е. суммарный вращающий момент определяется алгебраической суммой моментов, обусловленных взаимодействием чувствительного элемента с отдельными видами колебаний [3].

Для обеспечения измерения суммарной мощности различных видов колебаний наиболее целесообразно применять пондеромоторные датчики давления — проводящие пластины, ориентированные в плоскости поперечного сечения волновода и имеющие единственную степень свободы вдоль оси линии передачи. Принципиальную возможность применения таких датчиков для указанных целей можно выяснить на основании теоретического расчета пондеромоторных сил типов волн и экспериментального определения электрического калибровочного коэффициента различных видов колебаний.

Пондеромоторные датчики давления используются в ваттметрах, работающих на эффекте давления СВЧ поля на стенки линии передачи. Для оценки чувствительности указанных датчиков наиболее целесообразным методом расчета давления электромагнитных волн на отражающие пластины является метод максвелловского тензора натяжений, предложенный для наход-

дения давления на стенки передающего тракта [4]. Однако при этом не учитывается возможность преобразования типов колебаний.

В направлении распространения СВЧ-энергии сила определяется через соответствующую компоненту тензора натяжений [5]:

$$\vec{T}_z = \vec{i} T_{xz} + \vec{j} T_{yz} + \vec{k} T_{zz}, \quad \vec{k} T_{zz},$$

где  $T_{ij}$  — слагающая по оси  $i$  силы  $T_j$ .

Силы давления СВЧ-поля определяются тангенциальными составляющими магнитного поля и нормальной составляющей электрического, т. е. выражение для среднего за период давления имеет вид

$$q = -T_{zz} = \frac{\mu}{4} (H_x^2 + H_y^2) - \frac{\epsilon}{4} E_z^2.$$

Подставляя в полученную формулу компоненты поля различных типов волн и интегрируя по площади пластины, получим выражение для силы, действующей на отражающую пластину, расположенную в плоскости поперечного сечения волновода. В частности, при идеально согласованном волноводе для  $H$ -волны имеем

$$F_{mn} = \delta_{mn} \frac{P_{mn}}{2c} \frac{\lambda_0}{\lambda_{bmn}} \frac{ls}{ab} \left\{ 1 - \frac{ab}{ls} \frac{\varphi(x)\varphi(y)}{4mn\pi^2} - \frac{m^2b^2 - n^2a^2}{m^2b^2 + n^2a^2} \left[ \frac{a}{l} \frac{\varphi(x)}{2m\pi} - \frac{b}{s} \frac{\varphi(y)}{2n\pi} \right] \right\},$$

где  $P_{mn}$  — мощность, переносимая волной;

$a \times b$  — размеры поперечного сечения волновода;

$l \times s$  — размеры пластины;

$$\varphi(x) = \sin \frac{2m\pi}{a} (x + l) - \sin \frac{2m\pi}{b} x;$$

$$\varphi(y) = \sin \frac{2n\pi}{b} (y + s) - \sin \frac{2n\pi}{b} y;$$

$$\delta_{mn} = \begin{cases} 1/2 & \text{при } m(n) = 0; \\ 1 & \text{при } m, n \neq 0. \end{cases}$$

Численный расчет сил, действующих на пластину, перекрывающую все поперечное сечение волновода  $a \times b = 48 \times 24$  мм<sup>2</sup>, представлен в табл. 1.

Таблица 1

Результаты численного расчета ponderомоторных сил  $H$ -волн  
( $l \times s = a \times b = 48 \times 24$  мм<sup>2</sup>,  $f = 10$  ГГц)

Волна	$H_{10}$	$H_{01}$	$H_{20}$	$H_{11}$	$H_{21}$	$H_{30}$
$\lambda_{кр}$ , см	9,6	4,8	4,8	4,3	3,4	3,2
$F_{mn} \cdot 10^8$ , н	0,159	0,130	0,130	0,120	0,079	0,057

Результаты расчетов показывают, что при арифметическом усреднении сил, обусловленных пондеромоторным действием всех возможных колебаний (без учета преобразования типов волн) ошибка усреднения будет иметь значительную величину.

Погрешность усреднения уменьшается, если предположить, что в линии передачи не возбуждается колебаний, критические частоты которых находятся вблизи частоты отсечки. Последнее указывает на теоретическую возможность построения пондеромоторного ваттметра для многоволновых волноводов с погрешностью менее 1 дБ, чувствительный элемент которого перекрывает все поперечное сечение волновода. Практическую реализацию такого устройства осуществить довольно трудно.

Интересно оценить дисперсионную зависимость пондеромоторных сил типов волн в волноводе увеличенных размеров. Численные расчеты представлены в табл. 2. Из таблицы следует, что при помещении пондеромоторного датчика давления в волноводе с увеличенными размерами поперечного сечения погрешность измерения суммарной мощности распространяющихся типов волн, обусловленная дисперсией, будет очень малой. Это указывает на принципиальную возможность построения интегрального пондеромоторного ваттметра для многоволновых волноводов.

В экспериментальной части работы исследовалась возможность абсолютной калибровки датчика на разных типах волн. При этом не ставилась задача сопоставления экспериментальных исследований с теоретическими расчетами, так как осуществление электрической калибровки датчика давления, перекрывающего все поперечное сечение волновода, сопряжено со значительными трудностями.

Анализ известных конструкций пондеромоторных датчиков показал, что их чувствительность к различным видам колебаний существенно зависит от формы чувствительного элемента и его положения в плоскости поперечного сечения [1]. Кроме того, ввиду симметричного расположения чувствительных элементов относительно линии подвеса вращающие моменты, обусловленные действием различных типов волн, имеют различные знаки.

Экспериментально исследовался датчик, выполненный в виде узкой пластины, ориентированной в плоскости поперечного сечения волновода и расположенной вдоль диагонали его поперечного сечения. Методика калибровки изложена в работах [1, 6]. При определении электрического калибровочного коэффициента  $k_e$  исследуемый датчик подключался к выходу преобразователя типа волн. Результаты экспериментального определения  $k_e$  для нескольких типов волн представлены в табл. 3.

Из таблицы следует, что исследуемый датчик может быть применен для определения мощности типов волн с погрешностью менее 1 дБ, если известен преобладающий вид колебаний ( $m, n$ ), а суммарная мощность других видов колебаний не превышает  $0,3 P_{mn}$ .

Волна	$H_{10}$	$H_{01}$	$H_{20}$	$H_{11}$	
$a \times b = 48 \times 24 \text{ м.м}^2$	$\lambda_{кр}, \text{ см}$	9,60	4,80	4,30	4,30
	$F_{mn} \cdot 10^8, \text{ н}$	0,163	0,151	0,151	0,149
	$\frac{ F_{mn} - T_{cp} }{F_{cp}}, \%$	41	30	30	28
$a \times b = 3(48 \times 24) \text{ м.м}^2$	$\lambda_{кр}$	28,80	14,40	14,40	12,90
	$F_{mn} \cdot 10^8, \text{ н}$	0,166	0,165	0,165	0,165
	$\frac{ F_{mn} - F_{cp} }{F_{cp}}, \%$	2,5	1,9	1,9	1,9

Таблица 3

Результаты экспериментального определения  $K_e$   
( $a \times b = 48 \times 24 \text{ м.м}^2$ ;  $f = 10 \text{ Ггц}$ )

Волна	$H_{10}$	$H_{01}$	$H_{20}$	$H_{11}$
$K_e \cdot 10^4, \text{ дин.см/вт}$	0,400	0,880	0,740	0,835

Предполагается, что при определении коэффициента передачи возбудителей типов волн погрешность измерения мощности на выходе возбудителя можно уменьшить до 0,5 дБ и менее. Для этого необходимо выполнить калибровку по методу Каллена совместно с исследуемым возбудителем, при этом погрешность электрической калибровки не будет превышать  $\pm 5\%$ .

Выполнение абсолютной калибровки пондеромоторных датчиков на различных типах волн открывает возможность определения пондеромоторным методом мощности отдельных видов колебаний. Для этого необходимо выполнить ряд измерений углов поворота:

$$\theta_i = \sum_{m,n} \frac{P_{mn}}{K_{mn}}$$

Н-волн ( $\lambda_0 = 2 \text{ см}$ ,  $l \times s = a \times b$ )

$H_{21}$	$H_{30}$	$H_{31}$	$H_{02}$	$H_{40}$	$H_{12}$	$H_{41}$	$H_{22}$
3,40	3,20	2,67	2,40	2,40	2,34	2,115	2,15
0,135	0,130	0,110	0,093	0,093	0,087	0,063	0,062
17	12	5	20	20	25	47	47
10,20	9,60	8,00	7,20	7,20	7,00	6,45	6,45
0,164	0,163	0,161	0,160	0,160	0,160	0,159	0,159
1,3	0,7	0,7	1,3	1,3	1,3	1,9	1,9

( $K_{mn}$  — калибровочный коэффициент волны с индексами  $m, n$ ), обусловленных взаимодействием всех распространяющихся типов волн с чувствительным элементом подвесной системы. Мощность, переносимую основным и каждым в отдельности высшим типом колебаний, можно определить из решения линейной системы алгебраических уравнений.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Жилков В. С. Исследование и разработка образцовых пондеромоторных измерителей мощности СВЧ. Автореф. канд. дис., Харьков, 1969. 20 с.
2. Жилков В. С., Сиротников А. И., Хижняк Н. А. О погрешности однопластинчатого пондеромоторного ваттметра, обусловленной высшими типами волн. — Сб. «Радиотехника». Вып. 21. Харьков, 1972, с. 165—169.
3. Жилков В. С., Сиротников А. И. О погрешности двухпластинчатого пондеромоторного ваттметра, обусловленной высшими типами волн. — Сб. «Радиотехника». Вып. 22. Харьков, 1972, с. 100—103.
4. Билык Б. Г., Валитов Р. А. К вопросу об измерении высоких уровней мощности. — Тр. радиофиз. ф-а Харьк. ун-та, 1959, т. 3, с. 35—41.
5. Тамм И. Е. Основы теории электричества. М., Гостехиздат, 1957. 620 с.
6. Кукуш В. Д., Орлов В. Г. Повышение точности электрической калибровки пондеромоторных измерителей мощности СВЧ. — Измерительная техника, 1960, № 2, с. 45—46.