

## К ВОПРОСУ О ПОГРЕШНОСТИ РАССОГЛАСОВАНИЯ ПОЛЯРИЗАЦИОННОГО ПОНДЕРОМОТОРНОГО ВАТТМЕТРА

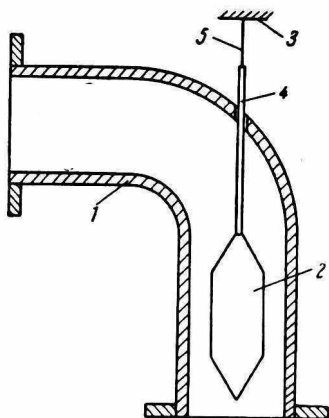
Исследование пондеромоторного действия эллиптически поляризованной волны на пробное тело, осуществляющее трансформацию плоскости ее поляризации, имеет как физическое, так и прикладное значение.

Теоретически этот вопрос рассматривается в работах [1, 2, 3], где показана возможность создания пондеромоторного поляризованного ваттметра и вычислен момент, действующий на подвижный элемент такого ваттметра. В работе [4] описана конструкция и приводятся основные характеристики построенного авторами поляризованного пондеромоторного крутиль-

ного ваттметра поглощающего типа, в работе [5] приводятся конструкции и основные характеристики разработанных под руководством автора поляризационных пондеромоторных крутильных ваттметров проходного типа.

Целью настоящей работы является определение и исследование погрешности рассогласования поляризационных пондеромоторных крутильных ваттметров проходного типа, возникающей за счет рассогласования нагрузки, подключенной к выходному плечу ваттметра, что необходимо для оптимального конструирования таких ваттметров.

Поляризационный пондеромоторный крутильный ваттметр проходного типа, схематично представленный на рисунке, состоит из отрезка 1 круглого волновода Г-образной формы, содержащий внутри «плоский» подвижный диэлектрический или металлический элемент 2, который подвешен к крутильной головке 3 с помощью диэлектрического, например, кварцевого стержня 4, и нити подвеса 5.



Эллиптически поляризованная волна, поступающая на вход волновода 1, создает пондеромоторный момент, заставляющий подвижный элемент 2, трансформирующий плоскость ее поляризации, поворачиваться вокруг своей оси на угол, определяемый проходящей по волноводу мощностью СВЧ и жесткостью кручения нити подвеса 5. Угол поворота, отсчитываемый по лимбу крутильной головки, и является мерой проходящей по волноводу мощности СВЧ.

В работе [2] приведено следующее выражение для пондеромоторного момента  $T_{\text{согл}}$  эллиптически поляризованной волны типа  $H_{11}$ , действующего на «плоский» подвижный элемент в согласованной линии передачи в предположениях, что подвижный элемент не вносит отражений и что потери при трансформации поляризации отсутствуют:

$$T_{\text{согл}} = \frac{2r}{1+r^2} \left( 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1-r^2}{2r} \sin \theta \sin 2\beta \right) \frac{P}{\omega} \quad (1)$$

(обозначения аналогичны принятым в работе [2]).

Пусть поляризационный пондеромоторный ваттметр, изображенный на рисунке, работает на несогласованную нагрузку с коэффициентом отражения  $|\Gamma|$ , остающимся постоянным для волны любой поляризации, падающей на эту нагрузку, и пусть выход генератора согласован. Допустим также, что уголкового Г-образный поворот волновода ваттметра не изменяет коэффици-

ента эллиптичности и углового положения эллипса поляризации падающей на подвижный элемент ваттметра эллиптически поляризованной волны, а сам «плоский» подвижный элемент ваттметра согласован и не имеет потерь.

Тогда выражение для пондеромоторного момента  $T_{\text{рассогл}}$ , действующего на подвижный элемент ваттметра со стороны электромагнитного поля волны в рассогласованной линии передачи, когда коэффициент отражения  $|\Gamma|$  нагрузки ваттметра не равен нулю, будет иметь вид

$$T_{\text{рассогл}} = (T_{\text{пад}_1} - T_{\text{отр}_1}) - (T_{\text{пад}_2} - T_{\text{отр}_2}), \quad (2)$$

где  $T_{\text{пад}_1}$ ,  $T_{\text{отр}_1}$  — угловые электромагнитные моменты падающей и отраженной эллиптически поляризованных волн в области до подвижного момента;  $T_{\text{пад}_2}$ ,  $T_{\text{отр}_2}$  — угловые электромагнитные моменты падающей и отраженной эллиптически поляризованных волн в области за подвижным элементом.

Момент  $T_{\text{пад}_1}$  определяется формулой (10) [2]:

$$T_{\text{пад}_1} = \frac{e_x}{e_0} \cdot \frac{e_y}{e_0} \sin \delta \frac{P}{\omega}. \quad (3)$$

Тогда

$$T_{\text{пад}_2} = \frac{e_x}{e_0} \cdot \frac{e_y}{e_0} \sin(\delta - \theta) \frac{P}{\omega}; \quad (4)$$

$$T_{\text{отр}_2} = \frac{e_x}{e_0} \cdot \frac{e_y}{e_0} \sin(\delta - \theta) |\Gamma|^2 \frac{P}{\omega}; \quad (5)$$

$$T_{\text{отр}_1} = \frac{e_x}{e_0} \cdot \frac{e_y}{e_0} \sin(\delta - 2\theta) |\Gamma|^2 \frac{P}{\omega}. \quad (6)$$

Подставляя выражения (3)—(6) в уравнение (2) с учетом формул (15), (18) и (19) работы [2], получаем выражение для момента  $T_{\text{рассогл}}$ :

$$T_{\text{рассогл}} = \frac{2r}{1+r^2} \cdot \frac{P}{\omega} \left\{ 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1-r^2}{2r} \sin \theta \sin 2\beta + |\Gamma|^2 \left[ \cos \theta - \right. \right. \\ \left. \left. - \cos 2\theta + \frac{1-r^2}{2r} (\sin 2\theta - \sin \theta) \sin 2\beta \right] \right\}. \quad (7)$$

Исходя из формулы (1), записываем вращающий момент  $T_{\text{погл}}$ , соответствующий мощности, поглощаемой в нагрузке:

$$T_{\text{погл}} = \frac{2r}{1+r^2} \left( 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1-r^2}{2r} \sin \theta \sin 2\beta \right) \frac{P}{\omega} (1 - |\Gamma|^2). \quad (8)$$

Тогда относительную погрешность рассогласования при измерении проходящей мощности получим в виде

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{T_{\text{рассогл}} - T_{\text{погл}}}{T_{\text{погл}}} =$$

$$= \frac{|\Gamma|^2}{1 - |\Gamma|^2} \frac{2 \sin^2 \theta + \frac{1-r^2}{2r} \sin 2\theta \sin 2\beta}{2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + \frac{1-r^2}{2r} \sin \theta \sin 2\beta} \quad (9)$$

Как видим, формула (9) для погрешности рассогласования является сложной функцией от коэффициента отражения  $|\Gamma|$ , углов  $\beta$  и  $\theta$ , коэффициента эллиптичности  $r$ .

Представляют интерес два частных практически важных случая построения поляризационных ваттметров.

1. Когда линейно поляризованная волна падает на подвижный «плоский» элемент, осуществляющий трансформацию ее поляризации. В этом случае коэффициент эллиптичности  $r=0$  и формула (9) принимает вид

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{2|\Gamma|^2}{1 - |\Gamma|^2} \cos \theta. \quad (10)$$

Из формулы (10) видим, что здесь погрешность рассогласования не зависит от угла  $\beta$ , а для угла  $\theta=90^\circ$  погрешность рассогласования равна нулю.

2. Когда кругово поляризованная волна падает на подвижный «плоский» элемент, также осуществляющий трансформацию ее поляризации. В этом случае коэффициент эллиптичности  $r=1$  и формула (9) принимает вид

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{4|\Gamma|^2}{1 - |\Gamma|^2} \cos^2 \frac{\theta}{2}. \quad (11)$$

В формуле (11) погрешность рассогласования также не зависит от угла  $\beta$  и равна нулю при угле  $\theta=180^\circ$ .

Сравнение соотношений (10) и (11) показывает, что с точки зрения погрешности рассогласования и минимальной зависимости величины этой погрешности от угла  $\theta$  более благоприятным является случай падения на подвижный элемент линейно поляризованной волны.

Рассмотрим теперь общий случай падения на подвижный элемент эллиптически поляризованной волны, определяемый уравнением (9).

Чтобы устранить в формуле (9) зависимость от угла  $\beta$ , используем, как это рекомендовано в работе [2] и видно из соотношения (1), измерение среднего значения момента  $T_{\text{согл ср}}$ , измеренного как полусумма двух произвольно выбранных угловых положений крутильной головки поляризационного ваттметра, отличающихся друг от друга на  $90^\circ$ .

Для данного случая

$$T_{\text{согл. ср}} = \frac{1}{2} (T_{\text{согл.}_1} + T_{\text{согл.}_2}) = \frac{4r}{1+r^2} \frac{P}{\omega} \sin^2 \frac{\theta}{2}. \quad (12)$$

Тогда

$$T_{\text{погл. ср}} = \frac{4r}{1+r^2} \frac{P}{\omega} \sin^2 \frac{\theta}{2} (1 - |\Gamma|^2). \quad (13)$$

Рассмотрим момент  $T_{\text{рассогл. ср}}$ , учтя формулу (7):

$$\begin{aligned} T_{\text{рассогл. ср}} &= \frac{1}{2} (T_{\text{рассогл.}_1} + T_{\text{рассогл.}_2}) = \\ &= \frac{2r}{1+r^2} \frac{P}{\omega} \left[ 2 \sin^2 \frac{\theta}{2} + |\Gamma|^2 (\cos \theta - \cos 2\theta) \right]. \end{aligned} \quad (14)$$

Из формулы (14) легко видеть, что для случая, когда коэффициент эллиптичности  $r=0$ , т. е. случая падения на подвижный элемент линейно поляризованной волны, момент  $T_{\text{рассогл. ср}} = T_{\text{согл. ср}} = 0$ , что согласуется и с физическими представлениями, так как в случаях расположения «плоского» подвижного элемента ваттметра под углом  $\beta$  и под углом  $\beta \pm 90^\circ$  на выходе пондеромоторного ваттметра возникают эллиптически поляризованные волны с противоположными направлениями вращения их круговых составляющих.

Для случая  $0 < r \leq 1$  будут иметь место выражения, приведенные ниже:

а. при коэффициенте отражения  $|\Gamma|=0$  формула (14) совпадает с формулой (12), так как в этом случае проходящая мощность равна падающей;

б. при угле  $\Theta = 90^\circ$

$$T_{\text{рассогл. ср}} = \frac{2r}{1+r^2} \frac{P}{\omega} (1 + |\Gamma|^2)$$

(здесь момент увеличивается с увеличением коэффициента отражения  $|\Gamma|$ ; при  $|\Gamma|=1$  момент  $T_{\text{рассогл. ср}} = \frac{2P}{\omega}$ );

в. при угле  $\Theta = 180^\circ$

$$T_{\text{рассогл. ср}} = \frac{4r}{1+r^2} \frac{P}{\omega} (1 - |\Gamma|^2)$$

(здесь момент уменьшается с увеличением  $|\Gamma|$ ; при  $|\Gamma|=1$  момент  $T_{\text{рассогл. ср}} = 0$ ).

Рассмотрим погрешность рассогласования при измерении момента  $T_{\text{рассогл. ср}}$  с учетом формул (13) и (14):

$$\left( \frac{\Delta P}{P} \right)_{\text{ср}} = \frac{T_{\text{рассогл. ср}} - T_{\text{погл. ср}}}{T_{\text{погл. ср}}} = \frac{4|\Gamma|^2}{1 - |\Gamma|^2} \cos^2 \frac{\theta}{2}. \quad (15)$$

Из сопоставления формул (9), (11) и (15) видно, что формула (15) совпадает с формулой (11) и является частным случаем формулы (9) при угле  $\beta=0^\circ$  или при коэффициенте эллиптичности  $r=1$ , т. е. случае падения на подвижный элемент кругово поляризованной волны.

Проанализируем полученные формулы погрешностей рассогласования для двух методов измерения мощности поляризационным пондеромоторным ваттметром крутильного типа: прямоотсчетного метода, определяемого формулами (1) и (7), и метода среднего момента, определяемого формулами (12) и (14).

Сравнение формул (9)—(11) и (15) произведем с учетом трех возможных режимов работы рассматриваемого поляризационного пондеромоторного ваттметра, когда на подвижный элемент ваттметра падает а) линейно поляризованная волна, б) кругово поляризованная волна, в) эллиптически поляризованная волна.

Это сравнение с учетом формул (12) и (14) показывает, что при работе в режиме а) возможно применение только прямоотсчетного метода измерения мощности; при работе в режиме б) возможно применение прямоотсчетного метода и метода среднего момента, при работе же в режиме в) налицо все преимущества метода среднего момента. Поэтому в дальнейшем при анализе работы ваттметра в режиме в) будем иметь в виду измерение мощности поляризационным пондеромоторным ваттметром только с помощью метода среднего момента.

Из работ [6, 7] известно, что погрешность рассогласования согласованного многопластинчатого пондеромоторного крутильного ваттметра без потерь, построенного на основе прямоугольного волновода, как и погрешность рассогласования многопластинчатого пондеромоторного ваттметра давления, имеет вид

$$\frac{\Delta P}{P} = \frac{2|\Gamma|^2}{1-|\Gamma|^2}. \quad (16)$$

Сравнение формул (10), (15) и (16) показывает, что:

1) при углах  $\Theta < 90^\circ$  для режимов б) и в) погрешность рассогласования поляризационного ваттметра больше погрешности рассогласования многопластинчатых ваттметров, построенных на основе прямоугольного волновода;

2) при угле  $\Theta = 90^\circ$  для режимов б) и в) соответствующие погрешности равны;

3) при углах  $\Theta > 0^\circ$  для режима а) и  $\Theta > 90^\circ$  для режимов б) и в) погрешность рассогласования поляризационного ваттметра меньше погрешности рассогласования многопластинчатых ваттметров, построенных на основе прямоугольного волновода;

4) при углах  $\Theta = 90^\circ$  для режима а) и  $\Theta = 180^\circ$  для режимов б) и в) погрешность рассогласования поляризационного пондеромоторного ваттметра равна нулю;

5) при изменении угла  $\Theta$  погрешность для режима а) знакопеременная, для режимов б) и в) всегда положительна;

б) погрешность рассогласования для режима в) совершенно не зависит от коэффициента эллиптичности падающей на подвижный элемент эллиптически поляризованной волны;

Экспериментальная проверка полученных автором формул показала, что их результаты совпадают с приведенными выше выводами.

Итак, получены формулы для погрешностей рассогласования измерения мощности с помощью поляризационного пондеромоторного ваттметра для двух методов измерения мощности этим ваттметром: прямоотсчетного метода и метода среднего момента.

Установлено, что погрешность рассогласования поляризационного ваттметра равна нулю а) для угла  $\Theta=90^\circ$  при использовании линейно поляризованной волны типа  $H_{11}$ , падающей на вход такого ваттметра для прямоотсчетного метода измерения, б) для угла  $\Theta=180^\circ$  при использовании кругово поляризованной волны, падающей на вход ваттметра для прямоотсчетного метода измерения и метода среднего момента, в) для угла  $\Theta=180^\circ$  при использовании эллиптически поляризованной волны, поступающей на вход ваттметра для метода среднего момента.

Показано, что погрешность рассогласования поляризационного ваттметра в большом диапазоне изменений угла  $\Theta$  меньше погрешности рассогласования многопластинчатых пондеромоторных ваттметров, построенных на основе прямоугольного волновода.

Автор приносит благодарность В. Д. Кукушу за постановку задачи и ряд полезных советов и замечаний.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Ronchi L., di Francia G. T. Calcolo del momento di rotazione del campo elettromagnetico in una guida d'onda. — *Alta frequenza*, 1955, vol. 24, № 3, p. 204—218.
2. Силаев М. А. Пондеромоторное действие эллиптически поляризованной электромагнитной волны на «плоский» фазосдвигающий элемент в круглом волноводе. — *Тр. радиотехн. ф-та Харьк. ун-та*, 1959, вып. 3, с. 25—33.
3. di Francia G. T. Trasporto di momento angolare in una guida d'onda. — *Alta frequenza*, 1960, vol. 29, № 2, p. 148—153.
4. Steven D. H., Cullen A. L. Angular momentum wattmeter for the 8 mm waveband. — *Proc. IEE*, 1963, vol. 110, part. B, № 11, p. 1968—1974.
5. Barlow H. M. Some new high — frequency wattmeters operated by forces arising from a rate of change of electromagnetic momentum. — *IEEE Trans. on Instrum. and Measurement*, 1966, vol. IM — 15, № 4, p. 333—337.
6. Валитов Р. А., Кукуш В. Д., Орлов В. Г. Пондеромоторный измеритель мощности. — *Измерительная техника*, 1962, № 7, с. 32—37.
7. О возможности построения многоэлементного датчика давления электромагнитного поля. — *Сб. «Радиотехника»*. Вып. 22. Харьков. 1972, с. 97—100. Авт.: И. Ф. Демьянков, В. С. Жилков, В. Д. Кукуш и др.