

## ИССЛЕДОВАНИЕ ПОНДЕРОМОТОРНОГО ДЕЙСТВИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ВОЛНЫ НА ТЕЛА ПРАВИЛЬНОЙ ФОРМЫ В ПРЯМОУГОЛЬНОМ ВОЛНОВОДЕ \*

*Р. Р. Валитов, В. С. Жилков, А. Н. Магда, Н. И. Украинец*  
Харьков

В настоящее время известен лишь один способ калибровки пондеромоторных ваттметров, разработанный А. Л. Калленом [1]. Точность аттестации измерителя мощности, а следовательно, и достоверность ее результатов существенно повышаются при выполнении этой операции двумя независимыми способами. В качестве второго предлагается расчетный способ.

Обоснованию метода расчета момента вращения для некоторых тел правильной формы в прямоугольном волноводе, что фактически является обоснованием так называемой электрической калибровки пондеромоторных ваттметров, а также экспериментальной проверке полученных соотношений и посвящена настоящая статья.

---

\* Работа докладывалась на XXV Всесоюзной научной сессии. Москва. 1969 г.

### Расчет вращающего момента, действующего на диск в прямоугольном волноводе

Из электростатистики известно, что механический момент вращения диэлектрического эллипсоида, помещенного в поле [2] равен

$$\vec{T} = [\vec{P} \cdot \vec{E}], \quad (1)$$

где  $\vec{P}$  — дипольный момент эллипсоида;

$\vec{E}$  — напряженность внешнего невозмущенного электрического поля.

Этим соотношением можно воспользоваться для вычисления среднего во времени момента сил, действующего на эллипсоид вращения. Эллипсоид помещен в прямоугольный волновод, в котором распространяется только основной тип волны  $H_{10}$ , при этом длина волны велика по сравнению с линейными размерами подвижного элемента. Усреднение по времени производится автоматически, если воспользоваться обычной записью полей и считать

$$\vec{T} = \frac{1}{2} [\vec{P} \vec{E}^*]. \quad (2)$$

На рис. 1 показано расположение эллипсоида вращения в прямоугольном волноводе. Легко заметить, что вектор дипольного момента  $\vec{P}$  имеет только две компоненты  $P_y$  и  $P_z$ , отличные от нуля. Волна  $H_{10}$  имеет  $E_y$ -составляющую электрического поля.

Согласно (2), вращающий момент, действующий на эллипсоид вращения, имеет единственную компоненту  $T_x$ , отличную от нуля:

$$T_x = \frac{1}{2} [P_y E_z - P_z E_y]. \quad (3)$$

Из рис. 1 следует, что составляющие электрического поля, связанные с системой координат эллипсоида вращения, имеют вид

$$E_y = E_{y\text{вол}} \sin \theta; \quad (4)$$

$$E_z = E_{y\text{вол}} \cos \theta, \quad (5)$$

где  $\theta$  — угол между осью  $z$  и осью эллипсоида вращения.

Дипольный момент эллипсоида вращения  $\vec{P}$  можно записать в виде

$$P_y = E_y \frac{a^2 c}{3} \frac{1}{n^{(y)}}; \quad (6)$$

$$P_z = E_z \frac{a^2 c}{3} \frac{1}{n^{(z)}}, \quad (7)$$

где  $a$ ,  $c$  — полуоси эллипсоида вращения;  
 $n^{(y)}$ ,  $n^{(z)}$  — коэффициенты деполяризации, которые зависят только от формы эллипсоида и не зависят от его объема.

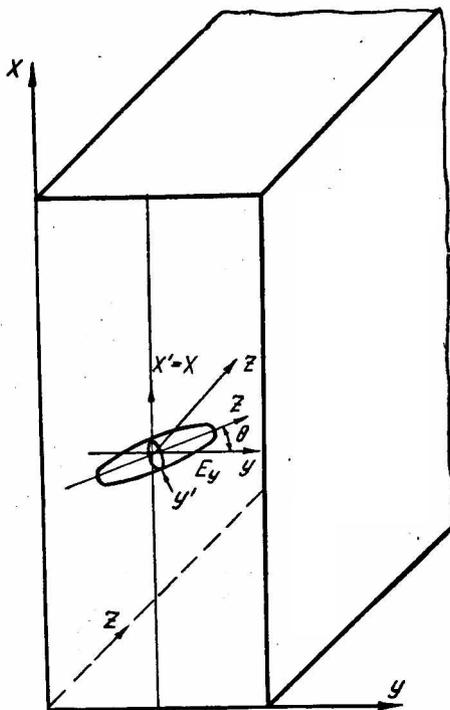


Рис. 1. К расчету вращающегося момента, действующего на тела в прямоугольном волноводе.

Для диэлектрического диска и для сплюснутого эллипсоида вращения ( $a = b \gg c$ ) коэффициенты деполаризации имеют вид

$$n^{(z)} = \frac{1 + e^2}{e^3} (e - \operatorname{arctg} e); \quad (8)$$

$$n^{(y)} = \frac{1}{2} (1 - n^{(z)}), \quad (9)$$

где  $e$  — эксцентриситет диэлектрического диска.

Учитывая, что  $c$  мало, коэффициенты  $n^{(z)}$  и  $n^{(y)}$  будут следующими:

$$n^{(z)} = 1 - \frac{c}{a} \frac{\pi}{2} \approx 1; \quad (10)$$

$$n^{(y)} = \frac{\pi c}{4a}. \quad (11)$$

Подставляя в (3) выражения (4) и (5) с учетом (10) и (11), получим выражение для вращающего момента в случае диэлектрического диска

$$T_x = \frac{1}{3\pi} a^3 E_y^2 \sin 2\theta. \quad (12)$$

Выразим теперь  $E_y^2$  через поток мощности  $S$ . Компоненты падающей волны в точке  $x = x_0$ ,  $y = y_0$  и  $z = 0$ , где расположен диск радиуса  $a$ , согласно работе [3] имеют вид

$$H_z = H_0 \cos \frac{\pi x_0}{d};$$

$$H_x = \frac{ik_3}{k_1} H_0 \sin \frac{\pi x_0}{d};$$

$$H_y = -\frac{ik}{k_1} H_0 \sin \frac{\pi x_0}{d},$$

где  $d$  — ширина широкой стенки волновода;

$h$  — ширина узкой стенки волновода;

$k$  — волновое число;

$k_1 = \frac{\pi}{d}$  — поперечное волновое число;

$k_3$  — постоянная распространения вдоль оси  $z$ .

Поток мощности в комплексной форме имеет вид

$$S = \frac{c}{8\pi} \int_s E_y H_x ds. \quad (13)$$

Подставив в (13) выражения для  $E_y$  и  $H_x$ , получим

$$S = \frac{c}{16\pi} \frac{kk_3}{k_1^2} H_0^2 dh. \quad (14)$$

И, наконец, подставив в (12) вместо  $E_y^2$  выражение для  $H_0^2$ , которое получаем из (14), получим искомое выражение для момента вращения

$$T_x = \frac{16}{3} a^3 \frac{S}{cdh} \frac{1}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2d}\right)^2}}. \quad (15)$$

где  $\lambda$  — длина волны в свободном пространстве.

Таким образом, вращающий момент, действующий на диэлектрический диск в прямоугольном волноводе, прямо пропорционален кубу радиуса диска  $a$ .

Выражение для вращающего момента (15) было получено при такой ориентации подвижного элемента (диска), когда электрическое поле  $E$  в прямоугольном волноводе находилось в одной плоскости с осью симметрии данного элемента. Иначе, при подобном расположении таких элементов основной вклад во вращающий момент электромагнитного поля вносит поляризационный эффект, который мы и учитывали выше. При другой ориентации чувствительного элемента основной вклад в механический момент дает индукционный эффект.

Конечная формула для вращающего момента может быть положена в основу абсолютного способа измерения проходящей мощности на высоких частотах, при котором измеряемая величина определяется по длине  $L$ , массе  $M$  и времени  $T$ .

### Экспериментальное исследование пондеромоторного действия волны $H_{10}$ на тела правильной формы в прямоугольном волноводе

Для экспериментальной проверки полученного выше соотношения (15) был использован косвенный метод измерения вращающего момента  $T$ , разработанный А. Л. Калленом [1]. Согласно работе [1], можно определить коэффициент пропорциональности  $K_e$  между мощностью  $P$  и вращающим моментом  $T$ , действующим на пробное тело произвольной геометрии в прямоугольном волноводе. В соответствии с методикой, изложенной в данной работе, были проведены косвенные измерения вращающего момента  $T$ , действующего на подвижный элемент в прямоугольном волноводе. При этом использовались диски и кольца, изготовленные из металла и диэлектрика. При исследовании использовались металлические диски с диаметром 2 и 6 мм, а также диэлектрические диски таких же диаметров. Толщина дисков составляла 0,3 мм. Металлические диски были изготовлены из посеребренной латуни, диэлектрические — из титаната бария ( $\varepsilon \cong 90$ ).

Результаты измерений приведены в виде графиков на рис. 2.

Здесь показаны зависимости вращающего момента  $T$  от радиуса для металлических дисков (кривая 1) и диэлектрических дисков (кривая 2).

Помимо этих двух кривых, снятых экспериментальным путем, приведена также кривая (пунктирная), построенная по расчетной формуле (15). Как показали исследования, отличие в определении момента вращения  $T$  для диэлектрических дисков расчетным и экспериментальным способами не превышает 6%. В металлических дисках совпадение расчетных и измеренных значений вращающего момента хуже, чем для диэлектрических. Это объясняется следующим обстоятельством.

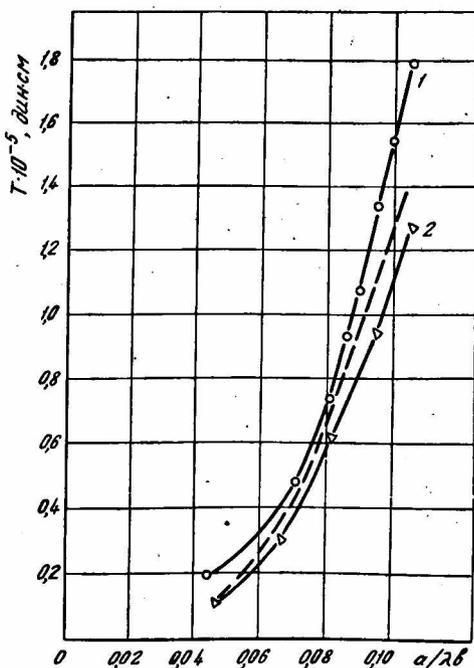


Рис. 2. Зависимость момента вращения  $T$  от радиуса диска. Расчетная кривая — — —. Экспериментальные кривые: —○—○— металл, —△—△— диэлектрик.

Переход к металлу, как известно, состоит из предельного перехода  $\epsilon \rightarrow \infty$  и  $\mu = 0$ . В нашем случае учитывается только электрический дипольный момент и совсем не учитывается магнитный момент, соответствующий взаимодействию индуцированных в диске токов с магнитным полем падающей волны. Формулы квазистатического приближения не позволяют однозначно учесть одновременное взаимодействие электрического и магнитного дипольных моментов с полем бегущей волны.

Наряду с дисками экспериментально исследовались и металлические кольца таких же диаметров, что и диски. Результаты измерений с коль-

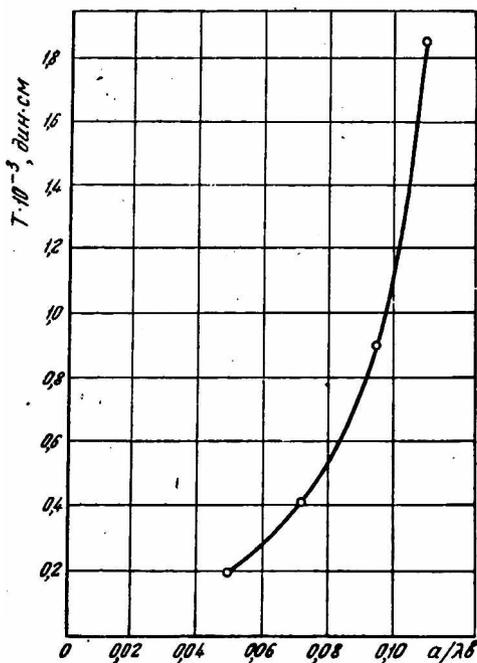


Рис. 3. Зависимость момента вращения от радиуса кольца.

цами приведены в виде графика на рис. 3. Сравнивая эту зависимость с предыдущей (металлический диск), можно сделать следующий вывод: эффект механического действия электромагнитного поля на металлические диск и кольцо равных диаметров, помещенных в прямоугольный волновод, практически одинаков, хотя основную роль играет поляризационный эффект.

Следует отметить, что аналогичная ситуация отмечалась при другой ориентации подвижного элемента, когда основную роль играл индукционный эффект. Такую эквивалентность можно объяснить с позиций магнитостатики: главный вклад дает магнитный момент, обусловленный индукционными токами в подвижном элементе. В квазистатическом приближении величина индуцированного тока в заданном переменном магнитном поле определяется самоиндукцией этого элемента. Самоиндукция тонкого кольца практически равна самоиндукции

сплошного диска того же диаметра, поэтому общий индуцированный ток в кольце и диске одинаков.

Результирующая погрешность измерения коэффициента пропорциональности  $K_e$  по методу Каллена [4], не превышает 3%. Погрешность расчетной формулы (15) определяется квазистатическим соотношением между длиной волны и диаметром диска. В нашем случае эксперимент проводился на длине волны 3,2 см, а наибольший диаметр исследуемого диска составлял 6 мм.

Можно с уверенностью утверждать, что в более длинноволновой области СВЧ диапазона эта погрешность станет меньше, т. е. точность калибровки пондеромоторных ваттметров расчетным способом достаточна высока.

Пользуясь известными соотношениями электростатики, можно получить расчетные формулы для вращающих моментов и других тел эллипсоидальной геометрии (диполь, плоский эллипс), применяемых в качестве чувствительных элементов в ваттметрах волноводного типа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. A. L. Cullen. A General Method, for the Absolute Measurement of Microwave Power Proc JEE 99, part IV, p 112, 1952,
2. Л. Д. Ландау, Е. М. Лифшиц. Электродинамика сплошных сред. ГИИТЛ, 1957.
3. Н. А. Хижняк. Рассеяние электромагнитных волн на малых телах в волноводах. Сб. «Радиотехника», вып, 4. Изд-во ХГУ, Харьков, 1967.
4. В. С. Жилков. Разработка и исследование образцовых пондеромоторных измерителей мощности. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1969.