

## О ПОНДЕРОМОТОРНЫХ СИЛАХ, ДЕЙСТВУЮЩИХ НА СТЕНКИ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ВОЛНОВОДА ПРИ НЕСОГЛАСОВАННОЙ НАГРУЗКЕ

*В. Г. Орлов, В. Д. Кукуш*

Закономерности пондеромоторного действия электромагнитной волны на стенки волноводной линии передач изучались рядом авторов [1, 2, 3]. Однако ни в одной из указанных работ нет анализа тех изменений в распределении сил, которые связаны с работой линии передач на несогласованную нагрузку. Этот вопрос имеет, по-видимому, не только познавательный интерес; изучение распределения сил при несогласованной нагрузке позволит расширить область практического применения пондеромоторных эффектов электромагнитного поля.

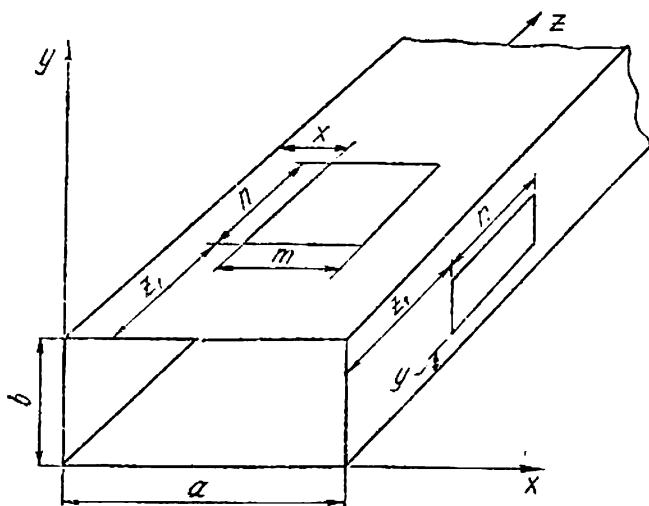


Рис. 1. Изображение рассматриваемой системы.

Настоящее исследование ограничим случаем волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе (рис. 1), стенки которого обладают большой проводимостью. Сущность понятия «большая проводимость» заключается в том, что распределение поля не должно существенно отличаться от идеального при бесконечно большой проводимости стенок.

При этих условиях величина давления на стенки волновода будет численно равна плотности электромагнитной энергии у поверхности стенок. Необходимо только учитывать, что силы, обусловленные электрической и магнитной составляющей поля, действуют во взаимно противоположных направлениях.

Учитывая сказанное, среднее за период СВЧ колебаний давление на горизонтальную стенку волновода выразится так:

$$q_r = \frac{1}{T} \int_0^T \left[ \frac{\mu (H_x^2 + H_z^2)}{2} - \frac{\varepsilon E_y^2}{2} \right] dt = \frac{1}{4} \left[ \mu (H_{x_0}^2 + H_{z_0}^2) - \varepsilon E_{y_0}^2 \right], \quad (1)$$

где  $H_x$ ,  $H_z$ ,  $E_y$  — мгновенные значения напряженности электрического и магнитного поля в точке горизонтальной стенки;

$H_{x_0}$ ,  $H_{z_0}$ ,  $E_{y_0}$  — амплитудные значения составляющих поля;

$\mu$ ,  $\varepsilon$  — магнитная и диэлектрическая проницаемости среды.

Распределение амплитуды колебаний вдоль волновода при несогласованной нагрузке подчиняется закону [4]:

$$\begin{aligned} E_{y_0} &= E_{y_0}^+ (1 + |\rho|^2 - 2|\rho| \cos 2\beta z)^{1/2}; \\ H_{x_0} &= H_{x_0}^+ (1 + |\rho|^2 + 2|\rho| \cos 2\beta z)^{1/2}; \\ H_{z_0} &= H_{z_0}^+ (1 + |\rho|^2 - 2|\rho| \cos 2\beta z)^{1/2}, \end{aligned} \quad (2)$$

где  $E_{y_0}^+$ ,  $H_{x_0}^+$ ,  $H_{z_0}^+$  — составляющие поля, связанные с падающей волной;

$\rho$  — коэффициент отражения нагрузки;

$z$  — расстояние от минимума электрического поля до рассматриваемой точки поля по оси  $oz$ ;

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda_B}.$$

Учтем теперь распределение амплитуд составляющих поля, обусловленных падающей волной, в поперечном сечении волновода:

$$\begin{aligned} E_{y_0}^+ &= E \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right); \\ H_{x_0}^+ &= E \frac{\beta}{\mu \omega} \sin\left(\frac{\pi x}{a}\right); \\ H_{z_0}^+ &= E \frac{\pi}{\omega \mu a} \cos\left(\frac{\pi x}{a}\right), \end{aligned} \quad (3)$$

где

$$E = 2 \sqrt{\frac{P Z_0}{ab}};$$

$P$  — мощность падающей волны,

$Z_0$  — характеристическое сопротивление волновода.

Подставляя в (1) выражения (2) с учетом (3), после очевидных преобразований имеем

$$\begin{aligned} q_r &= \frac{P}{c} \frac{\lambda_0 \lambda_B}{\lambda_{кр}^2} \frac{1}{ab} \left\{ (1 + |\rho|^2) \left[ 1 - 2 \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right] + \right. \\ &\left. + 2|\rho| \cos 2\beta z \left[ \left( 2 \frac{\lambda_{кр}^2}{\lambda_0^2} - 1 \right) \sin^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) - \cos^2\left(\frac{\pi x}{a}\right) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (4)$$

Рассуждая аналогично, можно получить выражение для давления на вертикальную стенку волновода:

$$q_B = \frac{P}{c} \frac{\lambda_0 \lambda_B}{\lambda_{кр}^2} \frac{1}{ab} |1 + |\rho|^2 - 2|\rho| \cos 2\beta z|. \quad (5)$$

Для  $|\rho| = 1$ , т. е. при чисто стоячей волне, имеем:

$$q_r = \frac{2P}{c} \frac{\lambda_0 \lambda_B}{\lambda_{кр}^2} \frac{1}{ab} \left[ 1 - 2 \sin^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right) + \cos 2\beta z \left( 2 \frac{\lambda_{кр}^2}{\lambda_0^2} \sin^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right) - 1 \right) \right]; \quad (6)$$

$$q_B = \frac{4P}{c} \frac{\lambda_0 \lambda_B}{\lambda_{кр}^2} \frac{1}{ab} \sin^2 \beta z. \quad (7)$$

Для согласованной нагрузки

$$q_r = \frac{P}{c} \frac{\lambda_0 \lambda_B}{\lambda_{кр}^2} \frac{1}{ab} \left( 1 - 2 \sin^2 \left( \frac{\pi x}{a} \right) \right); \quad (8)$$

$$q_B = \frac{P}{c} \frac{\lambda_0 \lambda_B}{\lambda_{кр}^2} \frac{1}{ab}. \quad (9)$$

Распределение давления на стенки волновода показано на рис. 2 (а, б, в); мощность генератора — 1 вт.

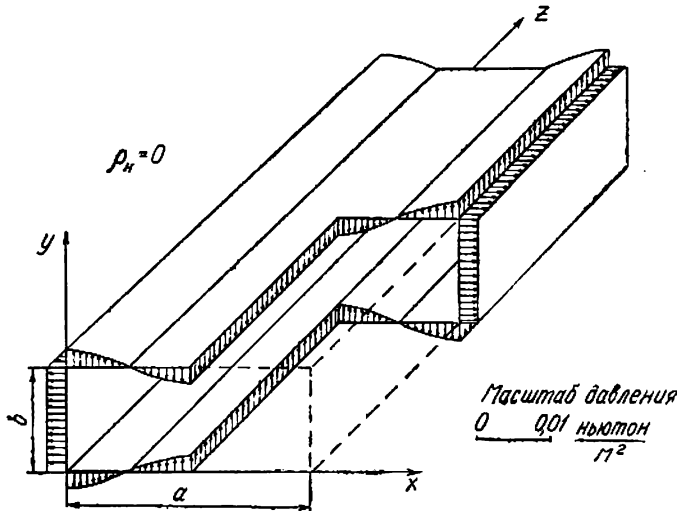


Рис. 2а Распределение давления на стенки прямоугольного волновода при передаче энергии СВЧ от генератора в нагрузку: нагрузка согласована ( $\rho_H = 0$ ).

Представляет интерес определить равнодействующую сил, действующих на прямоугольный участок горизонтальной стенки. Пусть координаты вершин углов будут —  $x, z$ ;  $x + m, z$ ;  $x, z + n$ ;  $x + m, z + n$ .

Интегрируя по  $x$  (4) в пределах от  $x$  до  $x + m$  и по  $z$  от  $z$  до  $z + n$ , получим:

$$F_r^{\square} = \int_x^{x+m} \int_z^{z+n} q_r dx \cdot dy = \frac{2P}{c} \frac{\lambda_0 \lambda_B}{\lambda_{кр}^2} \frac{mn}{\pi ab} \left[ \frac{|\rho| \lambda_B \psi(z)}{n} \left( \frac{\lambda_{кр}^2}{2\lambda_0^2} + \frac{\lambda_{кр}^2 \alpha \varphi(x)}{4\lambda_0^2 m \pi} - 1 \right) - \frac{a}{m} (1 + |\rho|^2) \varphi(x) \right]; \quad (10)$$

$$\varphi(x) = \sin \left( \frac{2\pi x}{a} \right) - \sin \left[ \frac{2\pi(x+m)}{a} \right];$$

$$\psi(z) = \sin [2\beta(z+n)] - \sin 2\beta z.$$

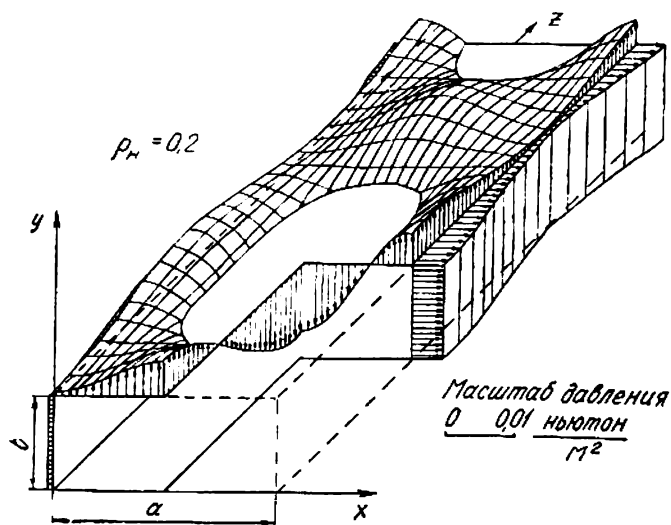


Рис. 2б:  
нагрузка не согласована ( $\rho_H \neq 0$ );

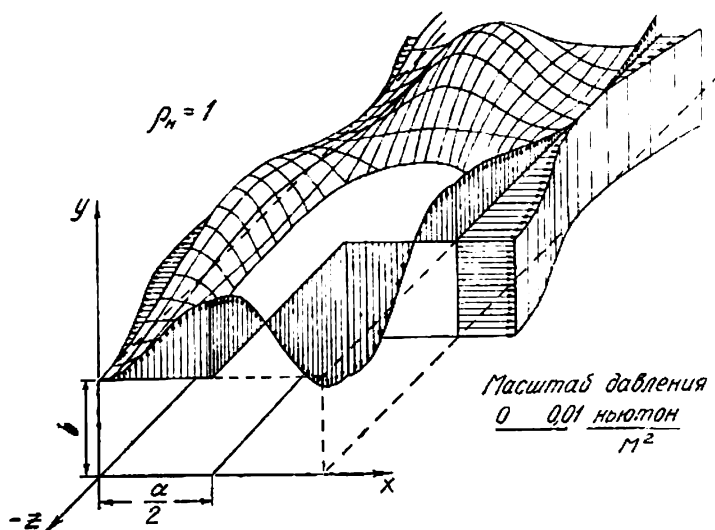


Рис. 2в:  
короткое замыкание ( $|\rho_H| = 1$ ).

Поступая аналогично, можно определить силу, действующую на прямоугольный участок вертикальной стенки с размерами  $k \times n$ :

$$F_{\text{в}}^{\square} = \int_{y'}^{y'+k} \int_{z'}^{z'+n} q_{\text{в}} d_y dz = \frac{4P}{c} \frac{\lambda_{\text{в}}'}{\lambda_{\text{кр}}^2} \frac{kn}{ab} \left[ 1 + |\rho|^2 - |\rho| \frac{\lambda_{\text{в}}}{n} \psi(z) \right]. \quad (11)$$

Анализ (10) и (11) позволяет сделать следующие выводы:

1. Сила, действующая на прямоугольный участок горизонтальной стенки с размерами  $m = a$ ,  $n = \frac{\lambda_{\text{в}}}{2}$ , при любом  $\rho$  равна нулю.

2. Сила, действующая на участок вертикальной стенки с размерами  $k$  и  $n = \frac{\lambda_{\text{в}}}{2}$ , не зависит от фазы коэффициента отражения нагрузки и равна

$$F_{\text{в}}^{\square} = \frac{4P}{c} \frac{\lambda_{\text{в}}'}{\lambda_{\text{кр}}^2} \frac{kn}{2ab} (1 + |\rho|^2).$$

3. Максимальное значение давления имеет место при  $|\rho| = 1$  на середине горизонтальной стенки в точках, соответствующих максимуму электрического поля.

4. Направление силы, действующей на какой-либо участок горизонтальной стенки, изменяется в зависимости от расположения и размеров участка.

5. Направление силы, действующей на какой-либо участок вертикальной стенки, неизменно.

6. При согласованной нагрузке ( $\rho = 0$ ) сила, действующая на участок горизонтальной стенки с размерами  $a$ ,  $n$ , всегда равна нулю.

Следует отметить, что участки горизонтальной стенки волновода при рассогласованной нагрузке испытывают сложные изгибающие усилия, величина и характер которых определяются модулем и фазой коэффициента отражения, размерами и местом расположения данного участка.

Характер и величина механической нагрузки на участки стенок волновода могут быть получены из выражений (4), (5), (10), (11).

В заключение укажем, что полученные результаты могут быть взяты за основу при разработке комплекта измерительной аппаратуры (измеритель проходящей мощности, измеритель к. с. в., длины волны и т. п.) для применения в волноводных трактах с большим уровнем мощности.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. J. E. Norton. Broad — band power — measuring methods at microwave frequencies, Proc IRE, 1949, July, № 7.
2. В. Г. Пенякова. Ваттметры нового типа. «Радиотехника», 1954, № 5.
3. Б. Г. Билык, Р. А. Валитов. К вопросу об измерении высоких уровней мощности. «Тр. радиофизич. ф-та Харьковск. ун-та». 1959, т. 3.
4. Измерения на сверхвысоких частотах, под ред. В. Б. Штейншлейгера, М., изд-во «Сов. радио», 1962.