
УДК 621.317

В. Б. БЕЛЯВЦЕВ, канд. физ.-мат. наук, *С. Н. ЮДИН*

**ЭФФЕКТИВНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ОТРАЖЕНИЯ ТЕПЛОВОГО
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ МОЩНОСТИ СВЧ С ЭЛЛИПТИЧЕСКИМ
ЧУВСТВИТЕЛЬНЫМ ЭЛЕМЕНТОМ**

Переменная составляющая погрешности рассогласования тепловых преобразователей мощности СВЧ с круглым чувствительным элементом, встроенным в стенку прямоугольного волновода, достигает больших значений в широкой полосе частот [1]. Изменением формы чувствительного элемента уменьшают погрешность рассогласования [2]. В некоторых конструкциях преобразователей эллиптическую форму элемента невозможно заменить на другую. В этом случае, как показано на примере прямоугольного чувствительного элемента, погрешность рассогласования уменьшают оптимальным расположением его на широкой стенке прямоугольного волновода [3]. Аналогичные исследования выполнены для преобразователя с эллиптическим чув-

ствительным элементом. Методика расчета и принятые допущения такие же, как в работах [1; 3].

Формула для вычисления модуля эффективного коэффициента отражения получена в виде

$$|\Gamma_{\text{э}}| = |\Gamma_{\text{э}}|_l \left| \frac{\varphi(h/l) \varphi(\lambda/\lambda_{\text{кр}}) - \varphi(t/a) J_1(\pi h/a)}{\varphi(h/l) - \varphi(\lambda/\lambda_{\text{кр}}) \varphi(t/a) J_1(\pi h/a)} \right|.$$

Здесь h — поперечная ось эллипса; l — продольная ось эллипса; t — расстояние от ребра волновода до центра эллипса; λ — длина волны в свободном пространстве; $\lambda_{\text{кр}}$ — критическая длина волны; a — размер широкой стенки прямоугольного волновода; геометрические размеры h , l , t , a проставлены на рис. 1, а; $|\Gamma_{\text{э}}|_l$ — модуль эффективного коэффициента отражения преобразователя с чувстви-

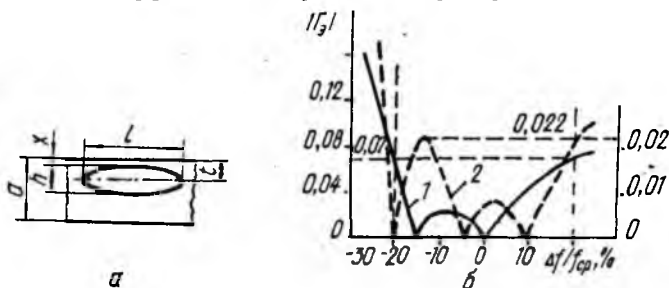


Рис. 1

тельным элементом такой же длины, расположенным на узкой стенке прямоугольного волновода,

$$|\Gamma_{\text{э}}|_l = \left| \frac{J_1(2\pi l/\lambda_{\text{в}})}{\pi l/\lambda_{\text{в}}} \right|; \quad \varphi(h/l) = 0,25 \frac{h}{l};$$

$$\varphi(\lambda/\lambda_{\text{кр}}) = 1 - 2 \frac{\lambda^3}{\lambda_{\text{кр}}^3}; \quad \varphi(t/a) = \frac{\cos 2\pi t/a}{2\pi t/a};$$

J_1 — функции Бесселя первого рода первого порядка [4]. В интегральном представлении Бесселя

$$J_1\left(\frac{2\pi l}{\lambda_{\text{в}}}\right) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda_{\text{в}}} \sin \xi - \xi\right) d\xi;$$

$$J_1\left(\frac{\pi h}{a}\right) = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} \cos\left(\frac{\pi h}{a} \sin \xi - \xi\right) d\xi,$$

а в интегральном представлении Пуассона

$$J_1\left(\frac{2\pi l}{\lambda_{\text{в}}}\right) = \frac{4l}{\lambda_{\text{в}}} \int_0^{\pi/2} \cos\left(\frac{2\pi l}{\lambda_{\text{в}}} \cos \xi\right) \sin^3 \xi d\xi;$$

$$J_1\left(\frac{\pi h}{a}\right) = \frac{2h}{a} \int_0^{\pi/2} \cos\left(\frac{\pi h}{a} \cos \xi\right) \sin^2 \xi d\xi.$$

На узкой стенке значение $|\Gamma_{\vartheta}| = |\Gamma_{\vartheta}|_l$ зависит от нормированной длины $l/\lambda_{в}$ и в интервале $l/\lambda_{в} = 0 - 0,6098$ плавно уменьшается от единицы до нуля. Условие $|\Gamma_{\vartheta}|_l = 0$ выполняется в точках $l/\lambda_{в} = 0,6098; 1,1166; 1,6192; 2,1205; \dots$, в которых функция Бесселя $J_1(2\pi l/\lambda_{в})$ обращается в нуль. В промежутках между этими точками имеются максимумы $|\Gamma_{\vartheta}|_l$, их значения убывают с увеличением $l/\lambda_{в}$ [2].

Параметр $|\Gamma_{\vartheta}|_{th} = |\Gamma_{\vartheta}|/|\Gamma_{\vartheta}|_l$ характеризует уменьшение модуля эффективного коэффициента отражения преобразователя с эллиптическим чувствительным элементом на широкой стенке по сравнению с преобразователем, в котором эллиптический поглощающий участок такой же длины расположен на узкой стенке. Например, если $l/\lambda_{в. ср} = 0,6098$ ($|\Gamma_{\vartheta}|_l = 0$ на средней частоте $f_{ср}$), $|\Gamma_{\vartheta}|_{l макс} = 0,44$ в диапазоне частот $\pm 20\%$. Выбрав $x = 0$, $h/a = 0,4291$, что обеспечивает выполнение равенства $|\Gamma_{\vartheta}|_{th} = 0$ на той же средней частоте, получим $|\Gamma_{\vartheta}|_{макс} = 0,194$. Максимальное значение $|\Gamma_{\vartheta}|$ в рабочей полосе частот прямоугольного волновода уменьшено примерно в 2 раза. В обоих случаях $|\Gamma_{\vartheta}|$ максимально на нижней частоте, при увеличении частоты от f_n до $f_{ср}$ $|\Gamma_{\vartheta}|$ плавно уменьшится до нуля, а затем возрастает, достигнув на частоте $f_{в} = 1,2f_{ср}$ значений, меньших, чем на частоте f_n .

В рассмотренном примере условия $|\Gamma_{\vartheta}|_l = 0$, $|\Gamma_{\vartheta}|_{th} = 0$ выполняются на средней частоте. Варьируя параметрами l , h , t , минимизируем зависимость $|\Gamma_{\vartheta}|$ от частоты. Кривая 1 на рис. 1, б построена при $l/\lambda_{в. ср} = 0,6098$ ($|\Gamma_{\vartheta}|_l = 0$ на частоте $f_{ср}$) и $x = 0$, $h/a = 0,5672$ ($|\Gamma_{\vartheta}|_{th} = 0$ на частоте $0,85f_{ср}$). На нижней и верхней частотах достигается максимальное в диапазоне частот значение $|\Gamma_{\vartheta}|_{макс} = 0,07$, в 2,8 раза меньшее, чем в предыдущем случае. Длина чувствительного элемента не изменилась.

Если выбрать $l/\lambda_{в. макс} = 0,6098$, где $\lambda_{в. макс}$ — максимальная длина волны в диапазоне частот, то на нижней частоте $|\Gamma_{\vartheta}|_{th} = 0$. Зависимость $|\Gamma_{\vartheta}|$ от частоты минимизируется выбором $h/a = 0,4656$ ($x = 0$) на частоте $0,95f_{ср}$. Значение $|\Gamma_{\vartheta}|_{макс} = 0,022$ достигается в первом максимуме и на частоте $f_{в}$ (рис. 1, б, кривая 2).

В общем случае геометрические размеры, обеспечивающие условие $|\Gamma_{\vartheta}|_{th} = 0$ на фиксированной частоте, находятся из уравнения

$$\frac{\lambda}{\lambda_{кр}} = \sqrt{\frac{1}{2} - \cos\left(2\pi \frac{t}{a}\right) \frac{J_1(\pi h/a)}{\pi h/a}},$$

решения которого представлены на рис. 2, а, б. Из графиков видно, что в диапазоне рабочих частот волновода $\lambda/\lambda_{кр} \simeq 0,5 \div 0,8$ сравнительно легко выбрать размеры h , x . С увеличением ширины чувствительного элемента интервал соответствующих значений $0 \leq x/a \leq (1 - h/a)/2$ и набор частот, на которых выполняется равенство $|\Gamma_{\vartheta}|_{th} = 0$, уменьшаются. Смещение нуля в коротковолновую область приводит либо к уменьшению h при неизменном x , к уменьшению x при фиксированном h либо к увеличению одного из размеров и к уменьшению другого.

В таблице приведены данные для сопоставления характеристик преобразователей, у которых зависимости $|\Gamma_{\vartheta}|$ от частоты сформиро-

ваны разными способами. Выбор варианта зависит от совокупности требований к характеристикам разрабатываемого преобразователя. Основными являются чувствительность, потери, габаритные размеры, погрешность рассогласования.

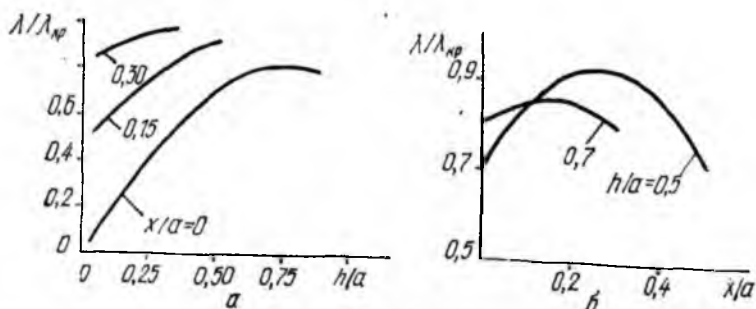


Рис. 2

Результаты исследования, кроме рекомендаций по разработке преобразователей с эллиптическим поглощающим участком, определяют возможность минимизации переменной составляющей

| Вариант формирования зависимости $ \Gamma_{\text{э}} $ от частоты и ее особенности ($x=0$) | $\Delta f / f_{\text{ср}}$, при которой $ \Gamma_{\text{э}} = 0$, % | | h/a | $f/f_{\text{в, макс}}$ | $ \Gamma_{\text{э}} _{\text{макс}}$ | $f_{\text{н}}/f_{\text{к}}$ | $f_{\text{к}}/f_{\text{н}}$ | $ \Gamma_{\text{э}} _{\text{макс}} / \Gamma_{\text{э}} _{\text{макс } l}$ |
|--|--|-------------------------------|--------|------------------------|-------------------------------------|-----------------------------|-----------------------------|--|
| | $ \Gamma_{\text{э}} _{l=0}$ | $ \Gamma_{\text{э}} _{l/h=0}$ | | | | | | |
| Два условия $ \Gamma_{\text{э}} = 0$ выполняются на средней частоте; | 0 | 0 | 0,4291 | 0,3852 | 0,194 | 1,00 | 1,00 | 1,0 |
| $ \Gamma_{\text{э}} = \Gamma_{\text{э}} _{\text{макс}}$ на нижней частоте | —15 | —10,8 | 0,5236 | 0,5307 | 0,084 | 1,24 | 1,38 | 2,3 |
| Равенство $ \Gamma_{\text{э}} = \Gamma_{\text{э}} _{\text{макс}}$ на нижней частоте и во втором максимуме | 0 | —15 | 0,5672 | 0,3852 | 0,070 | 1,32 | 1,00 | 2,8 |
| Равенство $ \Gamma_{\text{э}} = \Gamma_{\text{э}} _{\text{макс}}$ на крайних частотах | —20 | —9 | 0,5023 | 0,6098 | 0,027 | 1,17 | 1,58 | 7,2 |
| Равенство $ \Gamma_{\text{э}} $ в двух первых максимумах; | —18 | 0 | 0,4291 | 0,5797 | 0,025 | 1,00 | 1,51 | 7,8 |
| $ \Gamma_{\text{э}} = \Gamma_{\text{э}} _{\text{макс}}$ на частоте $f_{\text{н}}$ | —20 | —5 | 0,4656 | 0,6098 | 0,022 | 1,09 | 1,58 | 8,8 |
| Равенство $ \Gamma_{\text{э}} = \Gamma_{\text{э}} _{\text{макс}}$ на частоте $f_{\text{н}}$ и в первом максимуме | | | | | | | | |
| Равенство $ \Gamma_{\text{э}} = \Gamma_{\text{э}} _{\text{макс}}$ в первом максимуме и на частоте $f_{\text{в}}$ | | | | | | | | |

погрешности рассогласования тепловых преобразователей с разными формами чувствительных элементов, а также преобразователей, в основу работы которых положены другие физические явления, в частности давление электромагнитных волн.

Список литературы: 1. *Белявцев В. Б., Юдин С. Н.* Эффективный коэффициент отражения преобразователей мощности СВЧ с круглыми квазисосредоточенными тепловыми чувствительными элементами, встроенными в стенку волновода // *Радиотехника.* — 1985. — Вып. 75. — С. 47—50. 2. *Белявцев В. Б., Шпагин Ю. В.* Эффективный коэффициент отражения волноводных преобразователей давления мощности СВЧ с чувствительными элементами разных форм // *Метрология.* — 1985. — № 9. — С. 56—60. 3. *Белявцев В. Б.* Определение погрешности рассогласования при измерении проходящей мощности СВЧ с помощью ваттметра с поглощающей широкой стенкой // *Метрология.* — 1984. — № 6. — С. 40—44. 4. *Янке Е., Эмде Ф., Лёш Ф.* Специальные функции. — М.: Наука. — 1968. — С. 221—222.

Поступила в редколлегию 06.05.86