

ТРЕХЧАСТОТНЫЙ РЕЗОНАТОР С ПЕРЕМЕННЫМ П-ОБРАЗНЫМ ПОПЕРЕЧНЫМ СЕЧЕНИЕМ

В. М. Дмитриев, Н. В. Ляпунов, В. М. Седых

Целый ряд современных радиотехнических устройств СВЧ (параметрические, квантовомеханические приборы и др.) нуждается в резонаторах, которые могли бы резонировать одновременно на двух или более частотах. Сложная волноводная система (рис. 1) как раз представляет собой

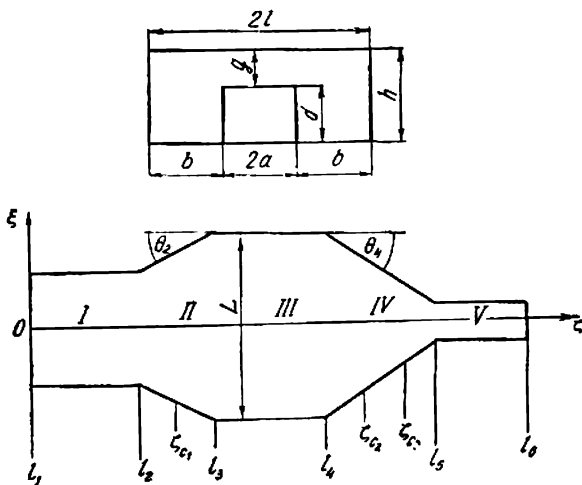


Рис. 1.

такой резонатор. Первый резонанс возникает тогда, когда резонирует объем между критическими сечениями ζ_{c_1} и ζ_{c_2} , которые работают как отражающие стенки. Это самый длинноволновый резонанс. При укороченной длине волны поле проникает к сечению l_1 , отражаясь от критического сечения ζ_{c_2} . Если между этими сечениями укладывается целое число полуволн, наступает второй резонанс. При дальнейшем укорочении длины волны поле проникает к сечению l_6 ; образуется резонансный объем между сечениями l_1 и l_6 . Легко

видеть, что второй из названных резонансных объемов может настраиваться путем перемещения сечения l_1 , не влияя на первый резонанс, а объем между сечениями l_1 и l_6 — перемещением сечения l_6 , не влияя на первые два резонанса. Резонатор легко настраивается на три нужные частоты, разнесенные на необходимый интервал, который определяется широкополосностью применяемых волноводов.

В работе [1] рассмотрена система (рис. 1), выведены общие формулы для резонансных частот, а также формулы для расчета резонансных частот такого резонатора в случае круглого и прямоугольного поперечного сечений, для которых известен явный вид зависимости критической длины волны от размеров. Недавно найден явный вид зависимости λ_c от размеров в случае П-волноводов для волны H_{10} [2], что позволяет получить простые выражения для расчета системы (рис. 1) в случае П-образного поперечного сечения.

В качестве исходных воспользуемся выражениями из [1].

Случай 1. Резонируют области II, III, IV между двумя критическими сечениями ζ_c и ζ_{c_1} . Для H - и E -волн имеем:

$$\operatorname{tg} \varphi_3 + \frac{\left[\frac{1}{4} v_2 + t_2 v_2' \right] v_4 + \left(\frac{t_2}{t_4} \right)^{\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{4} v_4 + t_4 v_4' \right] v_2}{(-t_4)^{-\frac{3}{2}} \left[\frac{1}{4} v_2 + t_2 v_2' \right] \left[\frac{1}{4} v_4 + t_4 v_4' \right] - (-t_2)^{\frac{3}{2}} v_2 v_4} = 0, \quad (1)$$

где

$$\varphi_3 = k_3(l_4 - l_3), \quad k_3 = \frac{2\pi}{\lambda_{g_3}}; \quad \frac{2}{3}(-t_2)^{\frac{3}{2}} = \int_{\zeta_{c_1}}^{l_2} V \rho(\zeta) d\zeta;$$

$$\frac{2}{3}(-t_4)^{\frac{3}{2}} = \int_{l_4}^{\zeta_{c_2}} V \rho(\zeta) d\zeta; \quad \rho(\zeta) = k^2 \left[1 - \frac{x^2 \zeta}{k^2} \right]; \quad k = \frac{2\pi}{\lambda_0}; \quad x(\zeta) = \frac{2\pi}{\lambda_c(\zeta)};$$

$v(t)$ и $v'(t)$ — функция Эйри и ее первая производная [3].

Случай 2. Резонируют области I, II, III, IV между сечениями l_1 и ζ_{c_1} . Тогда в случае H -волн

$$\operatorname{tg}(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) + \frac{v_4}{\frac{1}{4} v_4 + t_4 v_4'} (-t_4)^{\frac{3}{2}} = 0, \quad (2)$$

в случае E -волн

$$\operatorname{ctg}(\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3) - \frac{v_4}{\frac{1}{4} v_4 + t_4 v_4'} (-t_4)^{\frac{3}{2}} = 0, \quad (3)$$

где

$$\varphi_1 = k_1 l_2; \quad k_1 = \frac{2\pi}{\lambda_{g_1}}; \quad \varphi_2 = \int_{l_2}^{l_3} V \rho(\zeta) d\zeta.$$

Случай 3. Резонирует весь объем между сечениями l_1 и l_6 . Для H - и E -волн

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_4 + \varphi_5 = m\pi, \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

где

$$\varphi_4 = \int_{l_4}^{l_5} V \rho(\zeta) d\zeta; \quad \varphi_5 = k_5(l_6 - l_5); \quad k_5 = \frac{2\pi}{\lambda_{g_5}}.$$

Для того, чтобы выражениями (1—4) можно было пользоваться в случае Π -образного поперечного сечения, необходимо найти интегралы в выражениях для l_2 , t_4 , φ_2 , φ_4 . Непосредственное интегрирование приводит к довольно громоздким выражениям, поэтому воспользуемся формулой Гаусса [4] для приближенного вычисления интегралов.

Рассмотрим интеграл

$$\frac{2}{3}(-t_2)^{\frac{3}{2}} = \int_{\zeta_{c_1}}^{l_2} V \rho(\zeta) d\zeta.$$

В соответствии с формулой Гаусса, надо отрезок $[\xi_{c_1}, l_3]$ преобразовать в отрезок $[-1, +1]$. Произведем замену

$$\zeta = \zeta_{c_1} + \frac{1+x}{2}(l_3 - \zeta_{c_1}), \quad (5)$$

тогда

$$\int_{\xi_{c_1}}^{l_3} \sqrt{\rho(\zeta)} d\zeta = \frac{1}{2}(l_3 - \zeta_{c_1}) \int_{-1}^{+1} \sqrt{\rho(x)} dx = \frac{l_3 - \zeta_{c_1}}{2} \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} \sqrt{\rho(x_k^{(n)})}$$

и окончательно

$$(-t_2)^{\frac{3}{2}} = \frac{3}{4}(l_3 - \zeta_{c_1}) \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} \sqrt{\rho(x_k^{(n)})}. \quad (6)$$

Таким же образом находим:

$$(-t_4)^{\frac{3}{2}} = \frac{3}{4}(\zeta_{c_2} - l_4) \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} \sqrt{\rho(x_k^{(n)})}; \quad (7)$$

$$\varphi_2 = \frac{1}{2}(l_3 - l_2) \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} \sqrt{\rho(x_k^{(n)})}; \quad (8)$$

$$\varphi_4 = \frac{1}{2}(l_5 - l_4) \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} \sqrt{\rho(x_k^{(n)})}. \quad (9)$$

Для случая 2 в выражении (7) вместо ζ_{c_2} нужно взять ζ_{c_1} . Значения $A_k^{(n)}$ и $x_k^{(n)}$ даны в [4] для n от 1 до 16.

Найдем $\rho(x_k^{(n)})$. Для волны H_{10} в П-волноводе можно получить [2]

$$\kappa_{10}^2 = \frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{\frac{\pi d}{2l} \sin \frac{\pi b}{l}}{g l + d' b + \frac{l}{\pi} \sin \frac{\pi b}{l}} - \left[\frac{\pi^2}{4l^2} - \frac{\frac{\pi}{2l} \sin \frac{\pi b}{l}}{b + \frac{l}{\pi} \sin \frac{\pi b}{l}} \right] \frac{d^2}{h^2}, \quad (10)$$

где $\kappa_{10} = \frac{2\pi}{\lambda_{c_{10}}}$; $\kappa_{10} = \kappa_{10}(\zeta)$, если все или один из размеров зависит от ζ .

Используя подстановку, аналогичную (5), получаем зависимость κ_{10} от x .

Следовательно, выражения (1, 2, 4, 6—10) дают возможность найти резонансные частоты резонатора (рис. 1) для волны H_{10} в случае П-образных поперечных сечений.

В качестве примера рассчитываем резонатор, содержащий резонансные области IV и V . В сечении l_4 помещена металлическая диафрагма, через которую резонатор возбуждается. Область IV представляет собой переход с П-образного сечения на прямоугольное путем линейного уменьшения размера d и увеличения размера h , т. е.

$$d(\zeta) = d - \zeta \operatorname{tg} \theta; \quad h(\zeta) = h + \zeta \operatorname{tg} \theta';$$

$\operatorname{tg} \theta$ и $\operatorname{tg} \theta'$ характеризуют уменьшение d и увеличение h соответственно. Область V имеет прямоугольное поперечное сечение. Поперечные размеры в сечении l_4 следующие: $2l = 35$ мм; $2a = 17$ мм; $b = 9$ мм; $g = 0,9$ мм; $h = 10$ мм; $d = 9,1$ мм. Поперечные размеры в сечении l_5 — $2l = 35$ мм; $h = 15$ мм; $d = 0$; $l_5 - l_4 = 300$ мм; $l_6 - l_5 = 170$ мм.

1. Резонанс между сечениями l_4 и z_{c_2} . В этом случае необходимо воспользоваться выражением (1), положив

$$\operatorname{tg} \varphi_3 = v_2 |z - z_{c_1}| = v_4 |z - z_{c_2}| = 0;$$

l_4 , при которых $v_4 |z - z_{c_2}| = 0$, обозначим через τ_s^0 [5] и получим выражение для резонансных частот

$$(-\tau_s^0)^{\frac{3}{2}} = \frac{3}{4} (z_{c_2} - l_4) \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} \sqrt{\rho(x_k^{(n)})}, \quad (11)$$

где $s = 1, 2, 3, \dots$ — номер колебания; z_{c_2} находится из условия равенства резонансной длины волны λ_0 критической длине волны $\lambda_{c_{1s}}$.

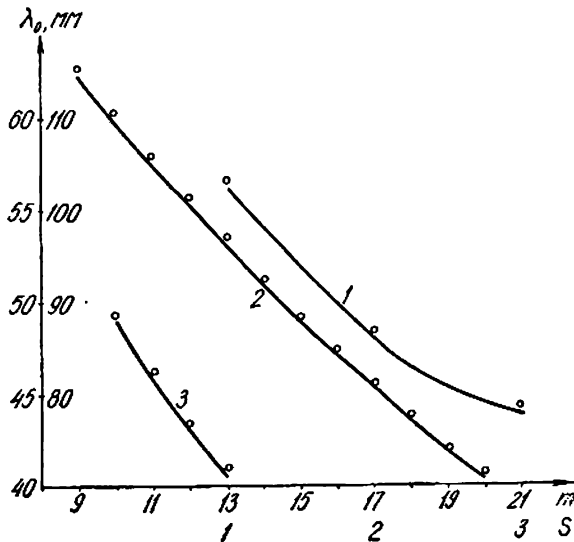


Рис. 2.

2. Резонанс между сечениями l_4 и l_5 . В сечение l_5 помещена отражающая металлическая стенка. Критические сечения отсутствуют. Из выражения (4) при

$$\varphi_1 + \varphi_2 + \varphi_3 + \varphi_5 = 0$$

находим: $\varphi_4 = m\pi$, т. е.

$$\frac{1}{2} (l_5 - l_4) \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} \sqrt{\rho(x_k^{(n)})} = m\pi. \quad m = 1, 2, 3, \dots \quad (12)$$

3. Резонанс между сечениями l_4 и l_6 . В этом случае из (4) имеем: $\varphi_4 + \varphi_5 = m\pi$, т. е.

$$\frac{1}{2} (l_5 - l_4) \sum_{k=1}^n A_k^{(n)} \sqrt{\rho(x_k^{(n)})} + k_5 (l_6 - l_5) = m\pi. \quad (13)$$

Результаты расчета по формулам (11, 12, 13) представлены на рис. 2 кривыми 1, 2, 3 соответственно. При расчете $\rho(x_k^{(n)})$ учитывалось 7 членов, $n = 7$. Крестиками нанесены экспериментальные точки.

Видно хорошее совпадение расчета с экспериментом.

Заметим, что полученные выражения применимы и к Н-волноводам, образованным зеркальным отображением данного П-волновода.

ЛИТЕРАТУРА

1. В. М. Дмитриев, В. М. Седых, Д. С. Денисов. Некоторые типы волноводных резонаторов с переменным поперечным сечением. «Тр. II Межвузовской конференции по радиофизике и спектроскопии», М., 1965.
 2. Н. В. Ляпунов, В. М. Дмитриев, В. М. Седых. Применение метода возмущений к расчету критических частот волноводов сложной формы поперечного сечения. «Тез. доклада на научно-технической конференции НТОРиЭ им. А. С. Попова, посвященной 70-летию со дня изобретения радио А. С. Поповым». К, 1965.
 3. В. А. Фок. Таблицы функций Эйри, М., 1946.
 4. В. И. Крылов. Приближенное вычисление интегралов, М., Физматгиз, 1959.
 5. А. Л. Гутман. Резонансные области в волноводах с плавным изменением сечения, «Радиотехника и электроника», 4, 12, 1959.
-