

# РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ КЛИСТРОНОВ С ТРУБЧАТЫМ ПУЧКОМ

*А. И. Терещенко, А. Ф. Гребенюк, А. Д. Животков*  
Харьков

Рассматриваемые резонаторы являются частным случаем коаксиально-секторных резонаторов, когда угол сектора равен  $2\pi$  и торцевые стенки удалены. Они могут быть представлены как изогнутый в  $H$ -плоскости и замкнутый сам на себя волновод  $H$ - или  $\Pi$ -образной формы поперечного сечения. Первый из этих вариантов показан в сечении на рис. 1. В таких резонаторах основным видом колебаний является  $TM_{010}$ , а ближайшим к нему —  $TM_{110}$  [1].

Для расчета основных параметров резонатора преобразуем основные соотношения, полученные в работе [1], к расчетным инженерным формулам.

Введем следующие безразмерные величины:

$$\eta_1 = \frac{r_{23}}{r_{21}}; \quad \eta_2 = \frac{r_2}{r_1}; \quad \xi = \frac{r_{21}}{r_1}; \quad q_1 = \frac{b_1}{r_1}; \quad q_2 = \frac{b_2}{r_{21}}. \quad (1)$$

Заметим, что

$$\eta_2 = \xi(\eta_1 + 1) - 1.$$

Если ограничиться двумя членами ряда, выражение для собственной частоты колебаний на основном виде будет следующим:

$$\frac{I_1(x\xi) + Q^{(1)}I_0(x\xi)}{N_1(x\xi) + Q^{(1)}N_0(x\xi)} = \frac{I_1(x\eta_1\xi) + Q^{(3)}I_0(x\eta_1\xi)}{N_1(x\eta_1\xi) + Q^{(3)}N_0(x\eta_1\xi)}, \quad (2)$$

где

$$Q^{(1)} = \frac{u_0^{(1)}(x\xi)}{u_0^{(1)}(x\xi)} \frac{q_2}{q_1} \xi; \quad Q^{(3)} = \frac{u_0^{(1)}(x\eta_1\xi)}{u_0^{(1)}(x\eta_1\xi)} \frac{q_2}{q_1} \xi;$$

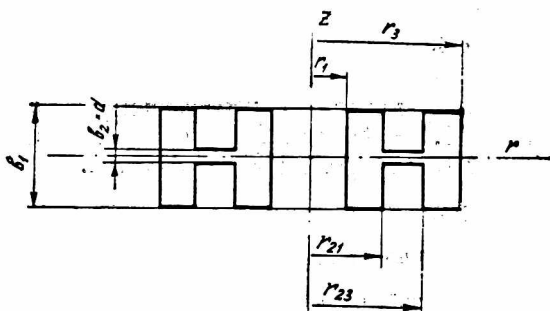


Рис. 1. Кольцевой резонатор с изгибом в плоскости Н.

$$u_0^{(1)}(x\xi) = \frac{I_1(x\xi)}{I_0(x\xi)} - \frac{N_1(x\xi)}{N_0(x\xi)};$$

$$u_0^{(1)}(x\xi) = \frac{N_0(x\xi)}{N_0(x\xi)} - \frac{I_0(x\xi)}{I_0(x\xi)};$$

$$u_0^{(1)}(x\eta_1\xi) = \frac{I_1(x\eta_1\xi)}{I_0(x\eta_1\xi)} - \frac{N_1(x\eta_1\xi)}{N_0(x\eta_1\xi)};$$

$$u_0^{(1)}(x\eta_1\xi) = \frac{N_0(x\eta_1\xi)}{N_0(x\eta_1\xi)} - \frac{I_0(x\eta_1\xi)}{I_0(x\eta_1\xi)};$$

$x = kr_1$  — параметр частоты;

$k = \frac{2\pi}{\lambda_0}$  — волновое число;

$I_m, N_m$  ( $m = 0, 1$ ) — функции Бесселя первого и второго рода.

Собственная добротность

$$Q_0 = \frac{\pi P_1 x \left[ \xi^2 \left[ u_0^{(1)2}(x\xi) + u_1^{(1)2}(x\xi) - \frac{u_0^{(1)}(x\xi) u_1^{(1)}(x\xi)}{x\xi} \right] - \right.}{-2\xi u_1^{(1)2}(x\xi) + 2u_1^{(1)2}(x) + \xi^2 \left[ u_1^{(1)2}(x\xi) - u_0^{(1)}(x\xi) u_2^{(1)}(x\xi) - \right.}{- u_1^{(1)2}(x) + A_1 \left[ \frac{q_1 \eta_1^2 \xi}{q^2} \left( u_0^{(2)2}(x\xi \eta_1) + u_1^{(2)2}(x\xi \eta_1) - \right.}{- \frac{1}{q_1} u_1^{(1)2}(x) \right] - A_1 \left[ - \frac{2q_2 \eta_1}{q_2} u_1^{(2)2}(x\xi \eta_1) - \frac{2q_1}{q_2} u_1^{(2)2}(x\xi) + \right.}{- \frac{u_0^{(2)}(x\eta_1\xi) u_1^{(2)}(x\xi \eta_1)}{x\eta_1\xi} \right] - \frac{q_1 \xi}{q_2} \left( u_0^{(2)2}(x\xi) + \right.}{+ \frac{q_1 \eta_1^2}{q_2} \left( u_1^{(2)2}(x\eta_1\xi) - u_0^{(2)}(x\eta_1\xi) u_2^{(2)}(x\eta_1\xi) \right) - \frac{q_1}{q_2} \left( u_1^{(2)2}(x\xi) - \right.}{+ u_1^{(2)2}(x\xi) - \frac{u_0^2(x\xi) u_1^{(2)}(x\xi)}{x\xi} \left. \right) + A_2 \left[ \eta_2^2 u_1^{(3)2}(x\eta_2) - \right.}{- u_0^{(2)}(x\xi) u_2^{(2)}(x\xi) \left. \right] + A_2 \left[ 2\eta_2 u_1^{(3)2}(x\eta_2) + 2\eta_1 \xi u_1^{(3)2}(x\eta_1\xi) + \right.}{- \eta_1^2 \xi^2 \left( u_0^{(3)2}(x\eta_1\xi) + u_1^{(3)2}(x\eta_1\xi) - \frac{u_0^{(3)}(x\eta_1\xi) u_1^{(3)}(x\eta_1\xi)}{x\eta_1\xi} \right) \left. \right] \left. \right]}{+ \frac{\eta_2^2}{q_1} u_1^{(3)2}(x\eta_2) - \frac{\eta_1^2 \xi^2}{q_1} \left( u_1^{(3)2}(x\eta_1\xi) + u_0^{(3)}(x\eta_1\xi) - u_2^{(3)}(x\eta_1\xi) \right) \left. \right]} \quad (3)$$

где

$$A_1 = \frac{u_1^{(1)*}(x\xi)}{u_1^{(2)*}(x\xi)};$$

$$A_2 = \frac{u_1^{(1)*}(x\xi)}{u_1^{(3)*}(x\xi\eta_2)};$$

$$P_1 = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{R_s};$$

$\mu_0$  и  $\epsilon_0$  — магнитная и диэлектрическая проницаемость вакуума;  
 $R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_{ст}}{2\sigma_{ст}}}$  — активная составляющая поверхностного сопротивления проводника;  
 $\mu_{ст}$  и  $\sigma_{ст}$  — магнитная проницаемость и удельная проводимость материала стенок резонатора.

Волновое сопротивление, обозначенное в работе [1] как отношение  $\frac{R_0}{G_0}$ , выразим следующим образом:

$$\rho = \frac{P_2 q_2^2 u_0^{(2)}(x\xi x)}{x \left\{ \frac{q_2^2 \xi^2}{q_1} \left[ u_0^{(1)*}(x\xi) + u_1^{(1)*}(x\xi) - \frac{u_0^{(1)}(x\xi) u_1^{(1)}(x\xi)}{x\xi} \right] - \right.}$$

$$- \frac{q_2^2}{q_1} u_1^{(1)*}(x) + q_2 \xi \eta_1^2 \left[ u_0^{(2)*}(x\eta_1\xi) + u_1^{(2)*}(x\eta_1\xi) - \right.$$

$$\left. \left. - \frac{u_0^{(2)}(x\eta_1\xi) u_1^{(2)}(x\eta_1\xi)}{x\eta_1\xi} \right] - \xi q_2 \left[ u_0^{(2)*}(x\xi) + u_1^{(2)*}(x\xi) - \right.$$

$$\left. - \frac{u_0^{(2)}(x\xi) u_1^{(2)}(x\xi)}{x\xi} \right] + \frac{q_2^2}{q_1} u_1^{(3)*}(x\eta_2) - \frac{q_2^2 \xi^2 \eta_1^2}{q_1} \left[ u_0^{(3)*}(x\eta_1\xi) + \right.$$

$$\left. \left. + u_1^{(3)*}(x\eta_1\xi) + \frac{u_0^{(3)}(x\eta_1\xi) u_1^{(3)}(x\eta_1\xi)}{x\eta_1\xi} \right] \right\}, \tag{4}$$

где

$$P_2 = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{\pi} \cong 120,2;$$

$$u_p^{(1)}(x) = \frac{N_p(x)}{N_0(x)} - \frac{I_p(x)}{I_0(x)};$$

$$u_p^{(1)}(x\xi) = \frac{N_p(x\xi)}{N_0(x)} - \frac{I_p(x\xi)}{I_0(x)};$$

$$u_p^{(2)}(x\xi) = \frac{N_p(x\xi)}{N_0(x\xi\gamma)} - \frac{I_p(x\xi)}{I_0(x\xi\gamma)};$$

$$u_p^{(2)}(x\eta_1\xi) = \frac{N_p(x\eta_1\xi)}{N_0(x\xi\gamma)} - \frac{I_p(x\eta_1\xi)}{I_0(x\xi\gamma)};$$

$$u_p^{(3)}(x\eta_2) = \frac{N_p(x\eta_2)}{N_0(x\eta_2)} - \frac{I_p(x\eta_2)}{I_0(x\eta_2)};$$

$$u_p^{(3)}(x\eta_1\xi) = \frac{N_p(x\eta_1\xi)}{N_0(x\eta_2)} - \frac{I_p(x\eta_1\xi)}{I_0(x\eta_2)};$$

( $p = 0; 1; 2$ )

Параметры  $\chi = \frac{r_2}{r_{21}}$ ;  $\gamma = \frac{r_m}{r_{21}}$  определяются из уравнений

$$\frac{I_0(x\gamma\xi)}{N_0(x\gamma\xi)} = \frac{I_1(x\xi) - Q_1^{(1)}I_0(x\xi)}{N_1(x\xi) - Q_1^{(1)}N_0(x\xi)} \quad (5)$$

и 
$$\frac{I_1(x\xi\gamma)}{N_1(x\xi\gamma)} = \frac{I_0(x\xi\gamma)}{N_0(x\xi\gamma)}, \quad (6)$$

где 
$$u_0(x\xi\gamma) = \frac{N_0(x\xi\gamma)}{N_0(x\xi)} - \frac{I_0(x\xi\gamma)}{I_0(x\xi)}.$$

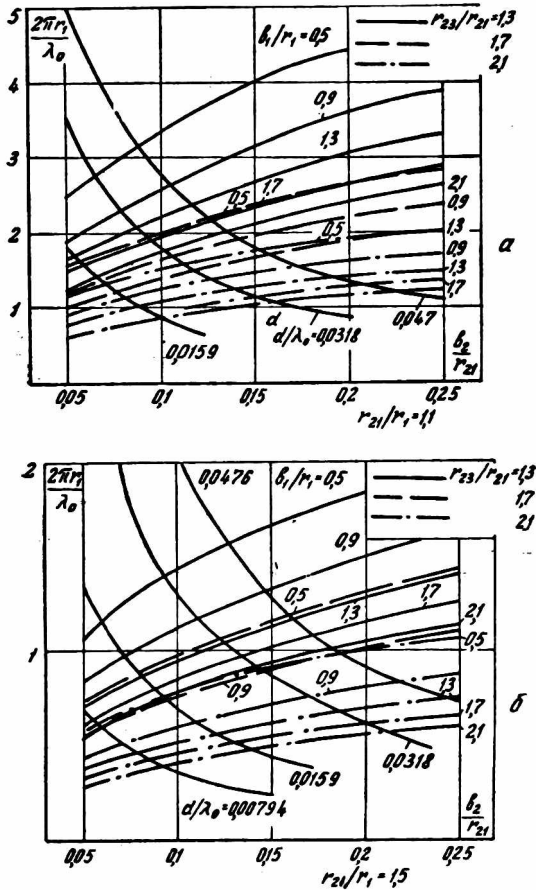


Рис. 2. Графики зависимости собственной частоты колебаний резонаторов от относительных геометрических размеров.

Собственная частота колебаний на основном виде  $f_0$ , собственная добротность  $Q_0$  и волновое сопротивление  $\rho$  резонаторов, в соответствии с уравнениями (2) — (4), были вычислены с помощью ЭЦВМ М-20 для следующих интервалов изменения относительных геометрических размеров:

- $\xi = 1,1 - 2,7$  (с шагом 0,4);
- $\eta_1 = 1,1 - 2,3$  (с шагом 0,2);
- $q_1 = 0,1 - 2,9$  (с шагом 0,4);
- $q_2 = 0,05 - 0,25$  (с шагом 0,05).

По результатам счета построены графики зависимостей, которые позволяют находить параметры резонаторов при заданных размерах или, наоборот, по требуемым параметрам выбирать соответствующую форму и размеры резонатора. На рис. 2.3 и 4 в качестве иллюстрации приведены некоторые из таких графиков.

По кривым рис. 2 можно определить резонансную частоту основного вида колебаний резонатора. На этих же рисунках приведены кривые постоянной относительной ширины высокочастотного зазора  $\frac{d}{\lambda_0}$ , значе-

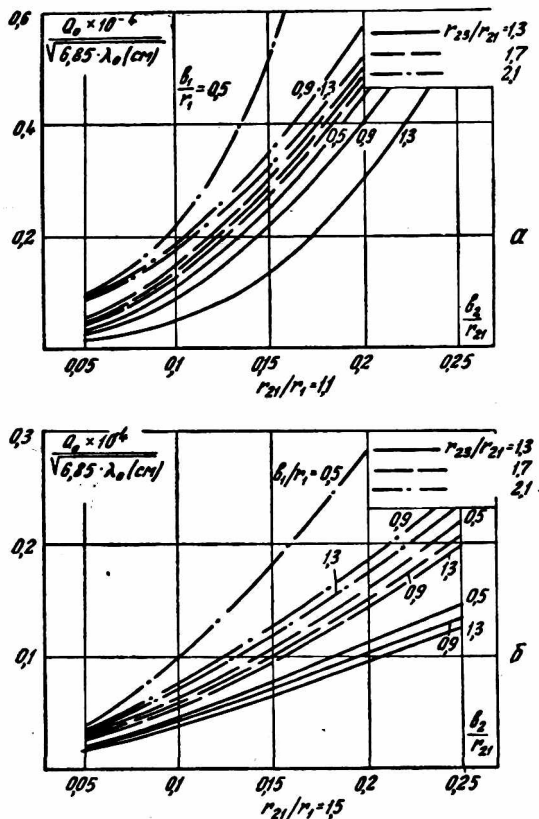


Рис. 3. Графики зависимости собственной добротности резонаторов от относительных геометрических размеров.

ния которой с целью сравнения параметров кольцевых и тороидальных резонаторов выбраны такими же, как в работе [2].

Кривые рис. 3 позволяют определять собственную добротность резонатора на основном виде колебаний, а графики рис. 4 — волновое сопротивление.

По известным значениям собственной добротности и волнового сопротивления можно легко определить эквивалентную проводимость потерь [2]:

$$G_0 = \frac{1}{RQ_0}.$$

Из графиков рис. 2—4 видно, что при варьировании геометрических размеров параметры рассматриваемых кольцевых резонаторов

изменяются аналогично изменению параметров тороидальных резонаторов [2].

Абсолютные значения добротности обоих типов резонаторов почти равны, а волновое сопротивление кольцевых резонаторов ниже, чем тороидальных.

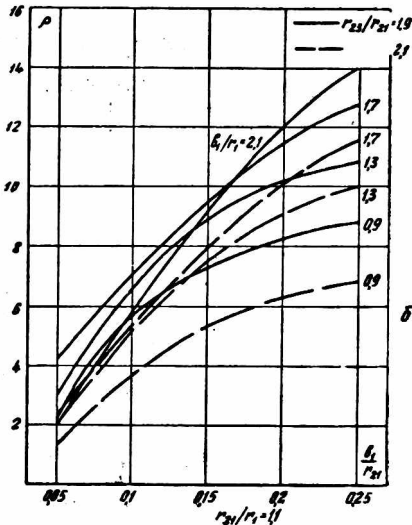
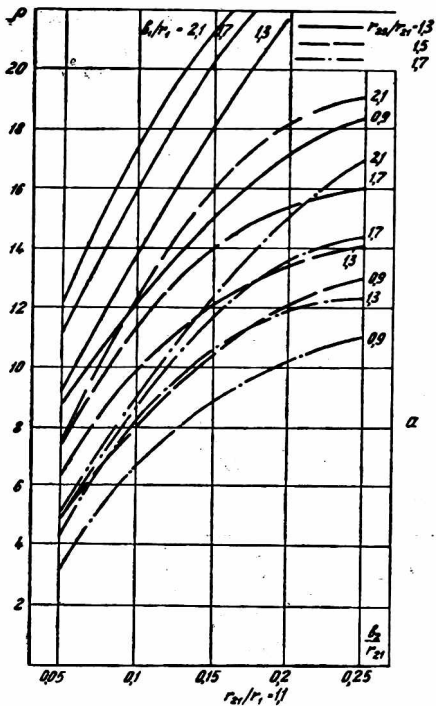


Рис. 4. Графики зависимости волнового сопротивления резонаторов от относительных геометрических размеров.

Электронная проводимость трубчатого пучка, который может быть использован в клистродах с кольцевыми резонаторами, намного выше, чем у аксиального пучка обычных клистронов. Это дает основания предполагать, что клистроны с трубчатым пучком могут превосходить по выходным параметрам обычные клистроны.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Терещенко, А. Ф. Зоркин. Кольцевые резонаторы на волноводах сложной формы поперечного сечения. «Радиотехника и электроника», т. 9, вып. 7, 1964.
2. М. Б. Голант, А. А. Маклаков, М. Б. Шур. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов. Изд-во «Советское радио», 1969.