

# К РАСЧЕТУ РЕЗОНАТОРОВ ДЛЯ РАДИАЛЬНЫХ КЛИСТРОНОВ

*А. И. Терещенко, А. Ф. Гребенюк*

Харьков

Кольцевые резонаторы, построенные на базе волноводов  $H$ - и  $P$ -образной формы поперечного сечения, могут применяться в приборах СВЧ [1, 2], в частности, с изгибом в плоскости  $E$  — в так называемых радиальных клистродах, а с изгибом в плоскости  $H$  — в клистродах с трубчатым пучком электронов.

Известны многочисленные патенты на приборы с использованием таких резонаторов [1], однако сведений о промышленном выпуске подобных приборов в известной нам литературе нет. Использование же в электронных приборах кольцевых резонаторов, обладающих рядом ценных качеств, представляется весьма перспективным.

Вопросы теории и расчета основных параметров кольцевых резонаторов освещены в ряде статей. Так, в работе [3] приведены полученные на основании метода эквивалентных схем приближенные формулы для определения частоты и добротности.

В работе [4] эти же параметры и волновое сопротивление определяются в общем случае электродинамическим методом. Наконец, в работе [5] приводятся результаты экспериментальной проверки теоретических формул для некоторых конструкций кольцевых резонаторов. Однако материалы указанных исследований не позволяют достаточно определенно выяснить зависимость параметров резонаторов от их геометрических размеров для конфигураций, применяемых в реальных приборах СВЧ.

Цель данной работы — преобразование ранее полученных уравнений для кольцевых резонаторов  $H$ - и  $P$ -образного поперечного сечения с изгибом в  $E$ -плоскости и определение по полученным соотношениям параметров резонаторов с помощью ЭЦВМ в широком интервале вариаций относительных геометрических размеров.

## I. Основные расчетные соотношения

Параметрами кольцевого резонатора, как и всякой резонансной системы, являются собственная резонансная частота  $f_0$ , собственная добротность  $Q_0$  и полная активная проводимость при резонансе  $G_0$ .

В работах [4, 5] используется параметр  $R_0/Q_0 = 1/G_0Q_0$ , который является волновым сопротивлением резонатора. При выводе дальнейших формул



$$\eta_1 = \frac{R_1}{r_1}; \quad \eta_2 = \frac{R_2}{r_2}; \quad q_1 = \frac{a_1}{r_1}; \quad q_2 = \frac{2a_2}{r_2}; \quad \xi = \frac{r_2}{r_1}$$

— относительные геометрические размеры (рис. 1);

$$Q_1 = \alpha_{01}^{(1)} r_1; \quad Q_2 = \alpha_{01}^{(2)} r_2,$$

$\alpha_{01}^{(i)}$  вычисляется, согласно [6], по формуле

$$\alpha_{01}^{(i)} = \frac{\varepsilon_{01}^{(i)}}{R_i - r_i},$$

где значения величин  $\varepsilon_{01}^{(i)}$  приведены в таблицах [6];

$x = kr_1$  — параметр частоты;

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

Формула для собственной добротности резонатора имеет следующий вид:

$$Q_0 = \frac{P_1 x \left\{ \frac{A_1^2 q_1}{x^2 \sin^2(q_1 x)} + \frac{2A_1^2}{x^2} \operatorname{ctg}^2(xq_1) + \frac{2A_2^2}{x^2 - Q_1^2} \cdot \operatorname{ctg}^2(q_1 \sqrt{x^2 - Q_1^2}) - \frac{2}{x^2} \operatorname{ctg} \left( \frac{xq_2 \xi}{2} \right) + \frac{A_2^2}{(x^2 - Q_1^2) \sin^2(q_1 \sqrt{x^2 - Q_1^2})} \times \right.}{\frac{2 \operatorname{ctg}^2 \left( \frac{q_2}{2} \sqrt{\xi^2 x^2 - Q_2^2} \right)}{x^2 - \frac{Q_2^2}{\xi^2}} + \frac{4A_2^2 \left[ q_1 + \frac{\sin(2q_1 \sqrt{x^2 - Q_1^2})}{2 \sqrt{x^2 - Q_1^2}} \right]}{\eta_1^2 (x^2 - Q_1^2) \sin^2(q_1 \sqrt{x^2 - Q_1^2})} \times \left. \times \left[ q_1 + \frac{Q_1^2 \sin(2q_1 \sqrt{x^2 - Q_1^2})}{x^2 2q_1 \sqrt{x^2 - Q_1^2}} \right] + \right.} \\ \times [\eta_1 u_1^2(Q_1 \eta_1) + u_1^2(Q_1)] + \frac{2 \left[ \frac{\sin(q_2 \sqrt{\xi^2 x^2 - Q_2^2})}{q_2 \sqrt{\xi^2 x^2 - Q_2^2}} \right]}{\eta_2^2 \left( x^2 - \frac{Q_2^2}{\xi^2} \right) \sin \left( \frac{q_2}{2} \sqrt{\xi^2 x^2 - Q_2^2} \right)} \times \\ + \frac{q_2 \xi}{2x^2 \sin^2 \left( \frac{xq_2 \xi}{2} \right)} \\ \times [\eta_2 u_1^2(Q_2 \eta_2) + u_1^2(Q_2)] + \frac{\left( \frac{1 + \eta_1}{\eta_1} \right) A_1^2 \left( q_1 \frac{\sin(2q_1 x)}{2x} \right)}{x^2 \ln \eta_1 \sin^2(q_1 x)} + \\ \left. + \frac{q_2 \xi + \frac{Q_2^2 \sin(q_2 \sqrt{\xi^2 x^2 - Q_2^2})}{\xi x^2 \sqrt{\xi^2 x^2 - Q_2^2}}}{2 \left( x^2 - \frac{Q_2^2}{\xi^2} \right) \sin^2 \left( \frac{q_2}{2} \sqrt{\xi^2 x^2 - Q_2^2} \right)} \right\} \\ + \frac{\left( \frac{\eta_2 + 1}{\eta_2 \xi} \right) \left[ q_2 \xi + \frac{\sin(x \xi q_2)}{x} \right]}{x^2 \ln \eta_2 \sin^2 \left( \frac{q_1 \xi x}{2} \right)},$$

где 
$$P_1 = \frac{\sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}}{R_s}, \quad R_s = \sqrt{\frac{\omega \mu_{ст}}{2\sigma_{ст}}}, \quad (2a)$$

$\mu_0, \epsilon_0$  — магнитная и диэлектрическая проницаемость вакуума;  
 $\mu_{ст}$  и  $\sigma_{ст}$  — магнитная проницаемость и удельная проводимость стенок резонатора.

Волновое сопротивление определяем по формуле

$$\rho = \frac{P_2 \ln \eta_2}{x^3 \sin^2 \left( \frac{q_2 \xi}{2} \right) \left\{ \frac{A_1^2 q_1^2}{x^2 \sin(xq_1)} + \frac{2A_2^2 \left[ q_1 + \frac{Q_1^2 \sin(2q_1 \sqrt{x^2 - Q_1^2})}{x^2 \sqrt{x^2 - Q_1^2}} \right]}{(x^2 - Q_1^2) \sin^2(q_1 \sqrt{x^2 - Q_1^2})} \right\} + \frac{q_2 \xi}{x^2 \sin^2 \left( \frac{xq_2 \xi}{2} \right)} + \frac{\xi^2 \left( q_2 \xi + \frac{Q_2^2 \sin(q_2 \sqrt{\xi^2 x^2 - Q_2^2})}{x^2 \xi \sqrt{\xi^2 x^2 - Q_2^2}} \right)}{(\xi^2 x^2 - Q_2^2) \sin^2 \left( \frac{q_2}{2} \sqrt{\xi^2 x^2 - Q_2^2} \right)}, \quad (3)$$

где  $P_2 = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{\mu_0}{\epsilon_0}}$ .

Как показала экспериментальная проверка [4, 5] расчет значений  $Q_0$  и  $\rho$  по формулам (2), (3) и эксперимент обнаруживают значительное расхождение, обусловленное потерями на излучение энергии через щели высокочастотного зазора, а также потерями в местах соединения частей резонаторов.

Для уточнения расчета определим эти потери для реальной конструкции, имеющей сетки в щелях высокочастотного зазора.

Найдем эквивалентную активную проводимость  $q_c$ , учитывающую потери, связанные с протеканием высокочастотных токов в сетках для случая, когда емкостная часть резонатора полностью выполнена в виде сеток плетеной конструкции (рис. 2). Ячейки сетки — квадратные, со стороной  $h_c$ ; диаметр провода  $2r_c$ .

Удельное поверхностное сопротивление сетки, согласно работе [7], равно

$$\vec{R}_c \approx 0,045 \sqrt{\frac{2n}{\lambda_0}} \frac{2h_c}{\pi r_c}, \quad (4)$$

где  $n$  — отношение удельного сопротивления (на постоянном токе) материала сетки к удельному сопротивлению меди.

Амплитуда высокочастотного тока, протекающего через сосредоточенную емкость зазора, равна

$$I_1 = u_1 \omega c = \frac{u_1 z}{120 \lambda_0 \eta_2}. \quad (5)$$

Тогда мощность потерь на кольцевом участке сетки радиуса  $r$  и высоты  $dz$

$$dP_c = \frac{I_1^2}{2} R_c ds. \quad (6)$$

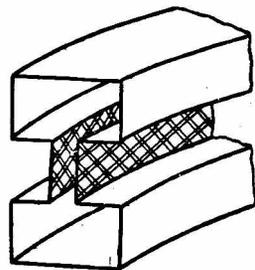


Рис. 2. Сетки высокочастотного зазора кольцевого резонатора типа E.

Так как

$$ds = \frac{\xi r_1 dz (\tau_{12} + 1)}{\pi},$$

общие потери на двух сетках резонатора

$$P_c = \frac{2u_1^2 a_2^3 r_1 R_c z^2 (\tau_{12} + 1)}{1,08 \cdot 10^4 \pi \lambda_0^2 (\ln \tau_{12})^2}. \quad (7)$$

Учитывая, что

$$P_c = \frac{q_c \cdot u_1^2}{2}.$$

имеем

$$q_c = \frac{3 \cdot 10^{-5} q_2^3 z^2 r_1^2}{\pi^2 \lambda_0^2 (\ln \tau_{12})^2} \sqrt{\frac{n}{\lambda_0}} \frac{h_c}{r_c}. \quad (8)$$

Все геометрические размеры показаны на рис. 1 и 2.

Для нахождения максимальной высоты высокочастотного зазора, а следовательно и сеток, воспользуемся соотношениями [8], позволяющими определять амплитуду высокочастотного напряжения  $v(z)$  в любом сечении высокочастотного зазора

$$v(z) = A c u_{e0(n)}^{(2)} \sqrt{\frac{\ln \tau_{12}}{2\pi}} \frac{\sin k(z - z_2)}{\sin k(z_{21} - z_2)} \quad (9)$$

и максимальную амплитуду высокочастотного напряжения  $v_m$

$$v_m = A c u_{e0(n)}^{(2)} \sqrt{\frac{\ln \tau_{12}}{2\pi}} \frac{1}{\sin k(z_{21} - z_2)}. \quad (10)$$

Полагая, что изменение  $v(z)$  на краю зазора должно быть не менее 0,7 максимального значения, находим  $2a_{2/\max} = \frac{\lambda_0}{4}$ .

Таким образом, максимальное значение высоты высокочастотного зазора, т. е. емкостной части, в кольцевом резонаторе равно диаметру емкостной части тороидального резонатора обычного клистрона.

## 2. Результаты расчета

Для нахождения  $f_0$ ,  $Q_0$  и  $G_0$  уравнения (1), (2), (3) были решены на ЭЦВМ типа М-20 в широком интервале изменений относительных геометрических размеров:

$$\eta_1 = 1,5 - 2,7 \text{ (с шагом } 0,2\text{);}$$

$$\eta_2 = 1,05 - 1,25 \text{ (с шагом } 0,3\text{);}$$

$$q_1 = 0,1 - 1,7 \text{ (с шагом } 0,4\text{);}$$

$$q_2 = 0,3 - 1,3 \text{ (с шагом } 0,2\text{);}$$

$$\xi = 1 - 2,1 \text{ (с шагом } 0,2\text{).}$$

Заметим, что при  $\xi = 1$  поперечное сечение резонатора П-образное а при  $\xi > 1$  — Н-образное.

По результатам счета были составлены таблицы и построены графики, которые позволяют легко находить по заданным размерам параметры

резонаторов или по требуемым параметрам — необходимые геометрические размеры.

На рис. 3 приведены графики, с помощью которых можно определить резонансную частоту  $f_0$ . Так как параметр  $\eta_2$  характеризует ширину  $d$  высокочастотного зазора не однозначно, на графиках построены кривые одинаковой относительной ширины высокочастотного зазора  $d/\lambda_0$ . Значения  $d/\lambda_0$  выбраны такими же, как и в работе [9] для сравнения параметров тороидальных и кольцевых резонаторов.

На рис. 4 приведены графики зависимостей добротности, на рис. 5 — эквивалентной проводимости от относительных геометрических размеров для резонаторов из меди. В случае применения другого материала необходимо коэффициент 6,85 умножить на отношение  $\frac{\sigma_{ст\ меди}}{\sigma_{ст}}$ .

Волновую проводимость  $\sigma = G_0 Q_0$  находим перемножением ординат соответствующих графиков рис. 4—5.

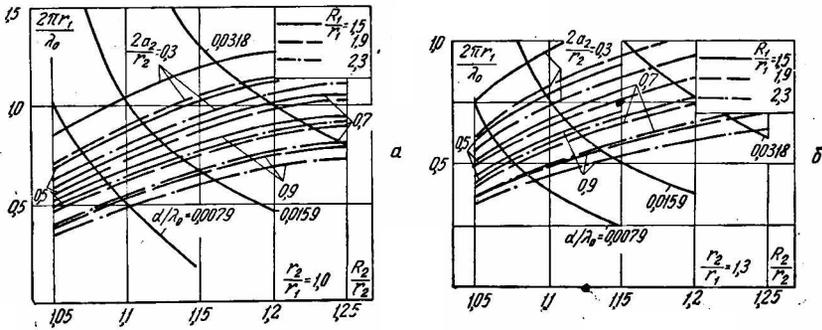


Рис. 3. Графики зависимости параметра частоты от относительных геометрических размеров.

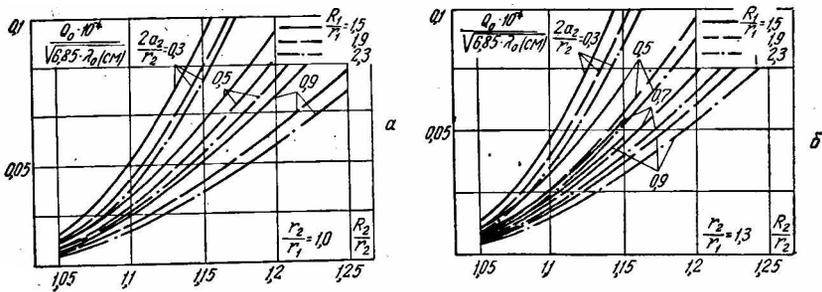


Рис. 4. Графики зависимости собственной добротности кольцевого резонатора типа E от относительных геометрических размеров.

Сравнивая полученные значения добротности и эквивалентной активной проводимости кольцевых и тороидальных резонаторов для одной и той же частоты видим, что они почти одинаковы, хотя в некоторых случаях  $Q$  кольцевых резонаторов могут быть меньше, чем у тороидальных.

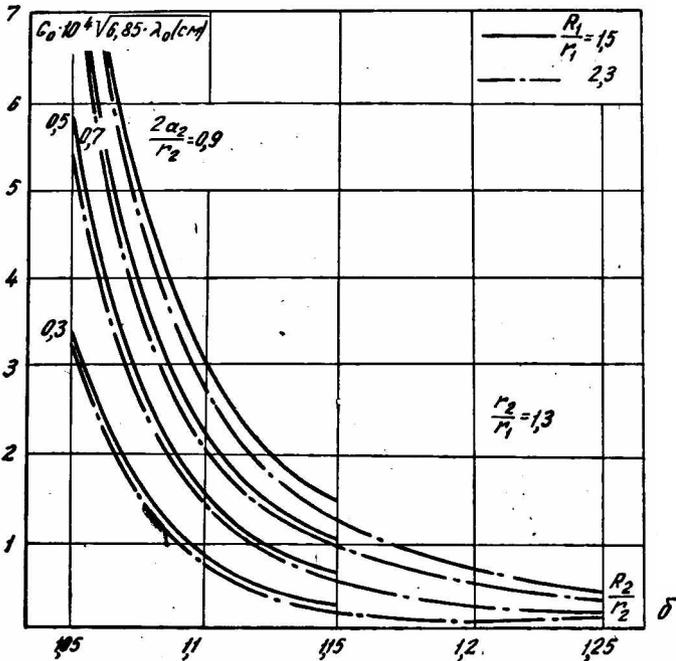
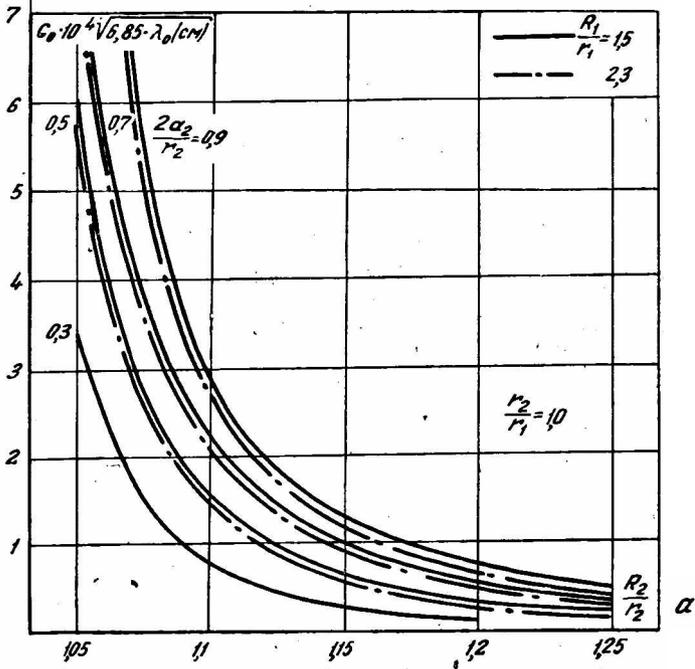


Рис. 5. Графики зависимости эквивалентной проводимости кольцевого резонатора типа E от относительных геометрических размеров.

### 3. Экспериментальная проверка расчетных данных

Для проверки полученных формул при расчете кольцевых резонаторов были изготовлены и испытаны резонаторы радиальных отражательных клистронов  $\Pi$ - и  $H$ -образного поперечного сечения (1 и 2 соответственно) со следующими размерами:

$N^\circ$	$r_1, \text{ см}$	$r_2/r_1$	$R_1/r_1$	$R_2/r_2$	$a_1/r_1$	$2a_2/r_2$
1	0,87	1,0	1,9	1,09	0,9	1,0
2	0,95	1,3	1,7	1,07	0,9	0,7

По графикам рис. 3, а; 4, а; 5, а для резонатора 1  $f_0 = 2790 \text{ МГц}$ ,  $Q_0 = 1120$ ;  $G_0 = 3,5 \cdot 10^{-5} \text{ мо}$ .

Высокочастотный зазор полностью закрыт сетками из вольфрамовой проволоки диаметра 0,003 см с размером ячейки  $h_c = 0,05 \text{ см}$ , поэтому, согласно (8),  $q_c = 2,2 \cdot 10^{-5} \text{ мо}$ . Тогда собственная добротность резонатора  $Q_0 = 750$ .

Для резонатора 2, согласно графикам рис. 3, б; 4, б; 5, б,  $f_0 = 2980 \text{ МГц}$ ;  $Q_0 = 850$ ;  $G_0 = 5,7 \cdot 10^{-5} \text{ мо}$ .

Учитывая потери в сетках из вольфрамовой проволоки ( $q_c = 4,8 \cdot 10^{-5} \text{ мо}$ ), имеем  $Q_0 = 510$ .

Измеренная собственная частота резонатора 1 равнялась 2972 МГц, собственная добротность 730, а резонатора 2 — 2980 МГц и 490, т. е. имеет место совпадение расчетных и экспериментальных данных.

### ЛИТЕРАТУРА

1. R. Warnecke et R. Guenard, Les tubes électroniques a commande par modulation de vitesse., Paris, 1951.

2. Миллиметровые и субмиллиметровые волны. Сб. статей под ред. Мириманова. Изд-во иностр. лит., М. — Л., 1959.

3. А. И. Терещенко, В. Н. Милько. Кольцевой резонатор для радиального клистрона. ЖТФ, т. 29, № 11, 1959.

4. А. И. Терещенко, А. Ф. Зоркин. Кольцевые резонаторы на волноводах сложной формы поперечного сечения. «Радиотехника и электроника», т. 9, № 7, 1964.

5. А. И. Терещенко, А. Ф. Зоркин. Параметры кольцевых резонаторов на  $\Pi$ - и крестообразных волноводах, изогнутых в  $E$ -плоскости. Сб. «Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1964.

6. Справочник по волноводам. Перевод с англ. под ред. Я. Н. Фельда. Изд-во «Советское радио», 1952.

7. В. Ф. Коваленко. Введение в электронику СВЧ. Изд-во «Советское радио», 1955.

8. А. Ф. Зоркин. Исследование изгибов коаксиально-секторных и кольцевых резонаторов на гребневых волноводах. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1967.

9. М. Б. Голант, А. А. Маклаков, М. Б. Шур. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов. Изд-во «Советское радио», 1969.