

### ИССЛЕДОВАНИЕ КОЛЕБАНИЙ В КОЛЬЦЕВОМ РЕЗОНАТОРЕ ДЛЯ МНОГОЛУЧЕВЫХ КЛИСТРОНОВ

В настоящей работе исследуются колебания в резонаторной системе, представляющей собой кольцевой резонатор, полученный изгибом в  $H$ -плоскости и замыканием самого на себя волновода прямоугольного сечения, периодически нагруженного ем-

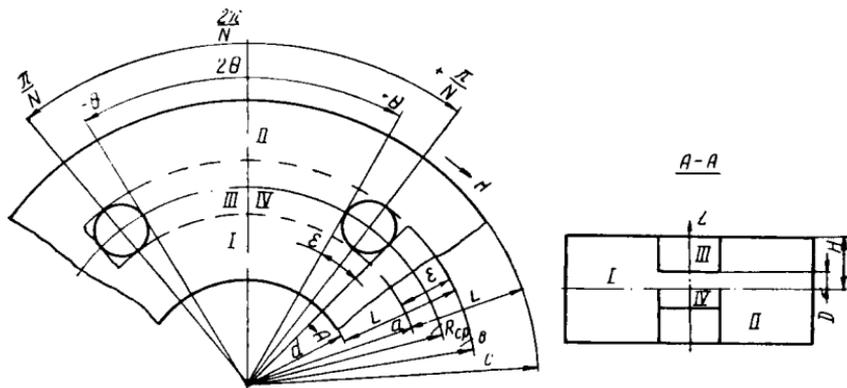


Рис. 1. Схематичное изображение периода системы.

костными штырями. Штыри выполняют роль активных (трубки дрейфа) и пассивных (сплошные стержни) элементов. Такая резонаторная система может найти применение, например, в сверхмощных [1] или широкополосных клистронах.

Схема исследуемого резонатора представлена на рис. 1; слева показан период системы, справа — его поперечное сечение.

Представляет интерес получить дисперсионные характеристики такого резонатора на основном и ближних видах колебаний, а также дать количественную оценку разделению по частоте

те между видами колебаний. Из [2] видно, что в системах подобного типа отдельные резонансы находятся вблизи друг от друга, а это, как известно, играет существенную роль при разработке широкополосных приборов.

Точный расчет спектра частот исследуемой резонаторной системы невозможен вследствие сложности граничных условий, при которых решается волновое уравнение.

Введем следующие упрощающие предположения.

1. Поперечное сечение активных и пассивных элементов представим в виде сектора со стороной  $\epsilon$  (допущение основано на малости  $\epsilon$  по сравнению с длиной волны).

2. Решение ограничиваем типами колебаний, не имеющими вариаций электрических составляющих поля по оси  $z$ .

3. Металлические поверхности резонаторной системы считаем идеально проводящими.

Проведем решение для  $TM$ -колебаний в цилиндрической системе координат.

Воспользовавшись периодичностью системы по азимутальной координате, выделим один период системы и условно разобьем его на простые области (рис. 1). Решения уравнений Максвелла для каждой области следующие:

Область I.

$$E_z^I = \sum_m A_m k Z_\gamma(kr) e^{i\gamma\varphi}; \quad (1)$$

$$H_\varphi^I = j\omega\epsilon_0 \sum_m A_m Z'_\gamma(kr) e^{i\gamma\varphi},$$

где

$$Z_\gamma(kr) = I_\gamma(kr) - \frac{I_\gamma(kd)}{N_\gamma(kd)} N_\gamma(kr);$$

$Z'_\gamma(kr)$  — производная от функции  $Z_\gamma(kr)$  по аргументу;

$I_\gamma(kr)$ ,  $N_\gamma(kr)$  — функции Бесселя I и II рода соответственно;

$$\gamma = \eta + mN;$$

$\eta$  — номер вида колебаний;

$m$  — номер пространственной гармоники ( $m = 0; \pm 1; \pm 2 \dots$ );

$N$  — число активных и пассивных элементов;

$k = \frac{2\pi}{\lambda}$  — волновое число в свободном пространстве.

Область II.

$$E_z^{II} = \sum_m B_m k R_\gamma(kr) e^{i\gamma\varphi};$$

$$H_\varphi^{II} = j\omega\epsilon_0 \sum_m B_m R'_\gamma(kr) e^{i\gamma\varphi}, \quad (2)$$

где

$$R_{\gamma}(kr) = I_{\gamma}(kr) - \frac{I_{\gamma}(kr)}{N_{\gamma}(kc)} N_{\gamma}(kr).$$

Область III.

$$E_z^{III} = k \sum_n [C_n I_p(kr) + D_n N_p(kr)] \sin p(\varphi - \theta);$$

$$H_{\varphi}^{III} = j\omega\varepsilon_0 \sum_n [C_n I'_p(kr) + D_n N'_p(kr)] \sin p(\varphi - \theta), \quad (3)$$

где  $I'_p(kr)$ ,  $N'_p(kr)$  — производные от функций Бесселя по аргументу;

$$p = \frac{n\pi}{2\theta} \text{ — постоянная распространения в азимутальном направлении } (n = 1, 2, 3\dots).$$

Область IV.

$$E_z^{IV} = k \sum_m [F_m I_{\gamma}(kr) + \Phi_m N_{\gamma}(kr)] e^{j\gamma\varphi};$$

$$H_{\varphi}^{IV} = j\omega\varepsilon_0 \sum_m [F_m I'_{\gamma}(kr) + \Phi_m N'_{\gamma}(kr)] e^{j\gamma\varphi}, \quad (4)$$

где  $A_m$ ,  $B_m$ ,  $C_m$ ,  $D_m$ ,  $F_m$ ,  $\Phi_m$  — неизвестные постоянные коэффициенты.

Для нахождения неизвестных коэффициентов, входящих в (1) — (4), воспользуемся условиями непрерывности касательных к границам раздела составляющих электрического и магнитного полей [3]:

$$E_{\tau i} = E_{\tau j}; \quad H_{\tau i} = H_{\tau j}. \quad (5)$$

Записав для соответствующих областей условия (5), получим систему уравнений относительно неизвестных коэффициентов, которую легко преобразовать к виду

$$\sum_n C_n a_{in} + \sum_n D_n b_{in} = 0;$$

$$\sum_n C_n c_{in} + \sum_n D_n d_{in} = 0, \quad (6)$$

где

$$a_{in} = \sum_m M_{mni} [I_p(ka) Z_1(a_1b) + I_p(kb) Z_2(a_1a)] - \delta_{in} I'_p(ka);$$

$$b_{in} = \sum_m M_{mni} [N_p(ka) Z_1(a_1b) + N_p(kb) Z_2(a_1a)] - \delta_{in} N'_p(ka); \quad (7)$$

$$c_{in} = \sum_m M_{mni} [(I_p(ka) Z_3(b_1b) + I_p(kb) Z_4(b_1a))] - \delta_{in} I'_p(kb);$$

$$d_{in} = \sum_m M_{mni} [N_p(ka) Z_3(b_1b) + N_p(kb) Z_4(b_1a)] - \delta_{in} N'_p(kb);$$

$$\delta_{in} = \begin{cases} 0, & \text{если } i \neq n; \\ 1, & \text{если } i = n; \end{cases}$$

$$M_{mni} = \frac{N(H-D) Q_{mi}^* Q_{mn}}{2\pi\theta U(a_1b)}; \quad (8)$$

$$Q_{mi}^* = \int_{-\theta}^{\theta} e^{i\gamma\varphi} \sin \frac{i\pi}{2\theta} (\varphi - \theta) d\varphi; \quad Q_{mn} = \int_{-\theta}^{\theta} e^{-i\gamma\varphi} \sin p(\varphi - \theta) d\varphi;$$

$$Z_1(a_1b) = I'_\gamma(ka) N'_\gamma(kb) y(b) - I'_\gamma(kb) N'_\gamma(ka) x(b);$$

$$Z_2(a_1a) = I'_\gamma(ka) N'_\gamma(ka) [x(a) - y(a)];$$

$$Z_3(b_1b) = I'_\gamma(kb) N'_\gamma(kb) [x(b) - y(b)]; \quad (9)$$

$$Z_4(b_1a) = I'_\gamma(ka) N'_\gamma(kb) x(a) y(b) - I'_\gamma(kb) N'_\gamma(ka) y(a);$$

$$U(a_1b) = I'_\gamma(ka) N'_\gamma(kb) x(a) y(b) - I'_\gamma(kb) N'_\gamma(ka) x(b) y(a). \quad (10)$$

$$x(a) = H \frac{Z_\gamma(ka)}{Z'_\gamma(ka)} - D \frac{I_\gamma(ka)}{I'_\gamma(ka)}; \quad y(a) = H \frac{Z_\gamma(ka)}{Z'_\gamma(ka)} - D \frac{N_\gamma(ka)}{N'_\gamma(ka)}; \quad (11)$$

$$x(b) = H \frac{R_\gamma(kb)}{R'_\gamma(kb)} - D \frac{I_\gamma(kb)}{I'_\gamma(kb)}; \quad y(b) = H \frac{R_\gamma(kb)}{R'_\gamma(kb)} - D \frac{N_\gamma(kb)}{N'_\gamma(kb)}.$$

Система уравнений (6) была решена с использованием ЭВМ М-222 для следующих относительных размеров:

$$\frac{H}{R_{cp}} = 0,02 \div 0,06;$$

$$\frac{D}{R_{cp}} = 0,13;$$

$$\frac{\varepsilon}{R_{cp}} = \frac{\pi}{60}$$

при  $k \cdot R_{\text{ср}} = 16 \div 25; N = 24.$

В результате вычислений определяется параметр  $L$  (с точностью до  $10^{-5}$ ). При этом учитывались семь пространственных гармоник ( $m=0, \pm 1; \pm 2; \pm 3$ ) для трех видов колебаний: основного  $\pi/2$  вида ( $\eta = N/4$ ) и ближайших к нему,  $10/24\pi$ ;  $14/24 \pi$  вида ( $\eta = \frac{N}{4} - 1, \eta = \frac{N}{4} + 1$ ) соответственно, а также три вариации поля между штырями ( $n = 1, 2, 3$ ).

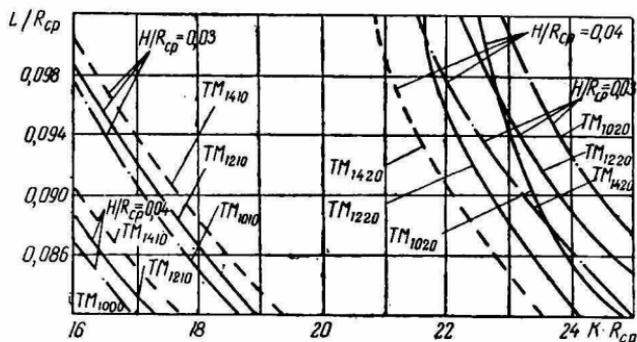


Рис. 2. Графики зависимости параметров системы от геометрических размеров.

На рис. 2 приведены результаты вычислений для случая  $H/R_{\text{ср}} = 0,03$  и  $H/R_{\text{ср}} = 0,04$ . Индексы типов колебаний обозначают: первые две цифры — число вариаций поля по  $\phi$ -координате, третья цифра — по  $r$ -координате, четвертая — по  $z$ -координате.

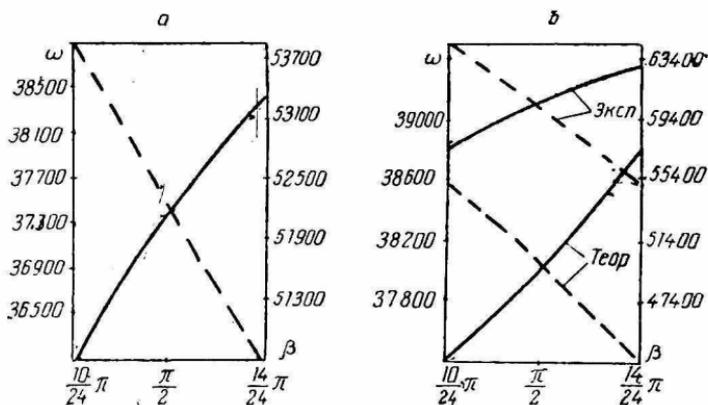


Рис. 3. Дисперсионная характеристика системы.

График зависимости  $\omega(\beta)$ , где  $\beta$  — фазовый сдвиг на один период системы, представлен на рис. 3, из которого видно, что

в системе существуют положительная и отрицательная дисперсии. Положительной дисперсии на рис. 3 соответствуют сплошная линия и отсчет по левой ординате, отрицательной — пунктирная линия и отсчет по правой ординате.

С целью проверки правильности полученных результатов был испытан макет кольцевого резонатора, состоявший из двух основных деталей: конуса и крышки. По параметру в торцовых стенках корпуса и крышки макета через один были ввинчены 12 стержней и 12 трубок. Напротив одного из активных элементов располагалась возбуждающая петля связи, а с диаметрально противоположной стороны через прорезанную в крышке макета узкую щель снималось распределение  $E_z$ -составляющей поля в азимутальном направлении, что позволяло определить вид колебаний.

Относительные размеры макета следующие:

$$L/R_{cp} = 0,088; H/R_{cp} = 0,0367; \epsilon/R_{cp} = 0,0536; D/R_{cp} = 0,028.$$

На рис. 3, б приведены теоретические и экспериментальные зависимости  $\omega(\beta)$ . Сравнения показывают, что расхождения составляют 4—6%.

Проведенные исследования показали, что разделение между типами колебаний в кольцевом резонаторе меньше (между низшим и ближайшим к нему типами колебаний составляют 40—60%), чем в «гладком» коаксиальном резонаторе или в прямоугольном волноводе, а разделение частот между видами колебаний в такой системе несколько больше (3—5%), чем в резонаторе, представляющем собой периодически нагруженный реактивными элементами прямоугольный волновод, закороченный на концах [4].

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Mihran T. G. Etan. Пат. США, 3248598, 26.IV 1966.
2. Русин Ф. С., Петрусеви́ч Ю. М. Исследование стержневых колебаний в резонаторе типа «беличья клетка». — «Электроника больших мощностей». Вып. 3, М., Изд. АН СССР, 1964, с. 116—125.
3. Кисунько Г. В. Электродинамика полых систем. Л., Изд-во ВКАС, 1949. 233 с.
4. Bayd M. R. «The Multiple-Beam Klystron». IRE Trans. on Elektron Devices., 1969, vol. ED-9, No. 3, p. 86—93.