

## РАДИАЛЬНЫЙ КЛИСТРОН

*А. И. Терещенко*

Электровакuumные приборы клистронного типа находят самое широкое применение в различных областях техники сверхвысоких частот. По данным зарубежной печати, в настоящее время серийно производится около 800 марок клистронов. Клистроны выпускаются для работы на длинах волн от 1,5 м до 0,2 мм. Мощности, генерируемые в непрерывном режиме, в зависимости от диапазона частот, назначения прибора и других параметров, колеблются в пределах от милливатт до нескольких киловатт. Одни мощностные импульсных клистронов в 10-сантиметровом диапазоне достигают десятков мегаватт.

Благодаря своим положительным качествам клистроны успешно конкурируют с другими типами генераторов и усилителей сверхвысоких частот. Тем не менее существует ряд направлений, по которым может идти дальнейшее усовершенствование клистронов, ведущее к улучшению их параметров. Одним из таких направлений является переход от обычной линейной конструкции с аксиальным электронным потоком к так называемому радиальному клистрону, использующему электронный поток в плоскости диска, где электроны движутся по радиусам. Это позволяет, не увеличивая габариты прибора и используя сравнительно легкий режим работы катоды, существенно повысить выходную мощность.

Идея создания радиального клистроны возникла вскоре после того, как принцип модуляции электронного потока по скорости нашел свое полное воплощение в конструкции пролетного, а затем отражательного клистроны. Начиная с 1939—1940 гг., учеными ряда стран патентуются различные конструкции радиальных и других клистронов [1—11], отличающиеся одна от другой. Что же касается их обобщающего характера, а также публикаций теоретических или экспериментальных исследований, то они появились значительно позже, чем многочисленные. В их числе можно назвать доклад Лобашевского [12], затем обзор путей улучшения приборов клистронного типа, приведенный в 37-й главе монографии Варнеке и Гвенара [13]. Содержание этого обзора в основном повторено в докладе Варнеке, русский перевод которого имеется в сборнике «Миллиметровые и субмиллиметровые волны» [14]. В работе [13] дан библиографический перечень работ, а также кратко рассмотрены отдельные конструкции радиальных клистронов.

Первым из них, видимо, является первое сообщение по радиальному клистрону, где указаны геометрические размеры, электрические режимы работы и описаны некоторые конструктивные особенности ламп, опубликовано Голубковым и соавторами [15]. Полученные ими результаты

можно оценить как весьма обнадеживающие, тем более, что они достигнуты в процессе лабораторных исследований не окончательно обработанных макетов. Из работ этой школы только в статье А. М. Максимовой [16] дана кинематическая теория радиального клистрона с дополнительной тормозящей сеткой перед отражателем, подтвержденная экспериментами на макете в дециметровом диапазоне волн.

Этим исчерпывается список известной нам литературы по радиальным клистроном. Во всех работах подчеркиваются достоинства приборов с радиальным электронным потоком и ничего не говорится о каких-либо неблагоприятных факторах. Однако, вопрос о практической целесообразности создания радиальных клистронов оставлен открытым, и никаких сообщений об их серийном производстве не имеется. Можно предполагать, что основные причины такого положения — недостаточная разработка инженерных методов расчета резонатора и электроники этого типа приборов, а также конструктивная сложность некоторых узлов.

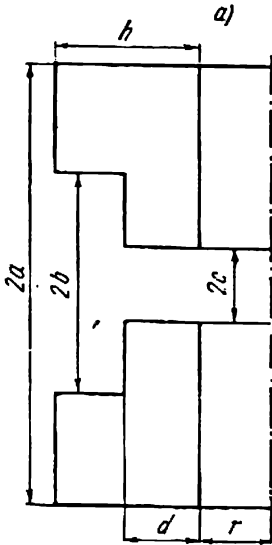


Рис. 1.

В связи с работами по исследованию влияния формы граничных поверхностей на характеристики некоторых типов волноводно-резонаторных систем, нами в последние годы изучались кольцевые резонаторы, образованные сворачиванием и замыканием на себя волноводов сложной формы поперечного сечения. При этом обращалось внимание на применение таких резонаторов в электровакуумных приборах, в частности в клистромах. Вначале был использован приближенный метод расчета с помощью эквивалентной схемы [17], основанный на рассмотрении кольцевого резонатора как квазистационарной системы. Для резонатора в виде кольца из волновода П-образного сечения были получены следующие формулы, позволяющие определить собственную длину волны:

$$\lambda = 2\pi \sqrt{r \left( \frac{b-c}{d} + \frac{2}{\pi} \ln \frac{h}{d} \right) \left[ (a-b) \ln \frac{r+h}{r} + b \ln \frac{r+d}{r} \right]} \quad (1)$$

и добротность:

$$Q_0 = \frac{9,32 \cdot 10^9}{\sqrt{\lambda}} \cdot \frac{(a-b) \ln \frac{r+h}{r} + b \ln \frac{r+d}{r}}{\frac{a-c}{r} + \frac{b-c}{r+d} + \frac{a-b}{r+h} + \ln \frac{r+h}{r} + \ln \frac{r+d+h}{r+d}} \quad (2)$$

Примененные в этих формулах обозначения ясны из рис. 1.

Впоследствии был произведен электродинамический расчет кольцевых резонаторов [18], образованных сворачиванием в кольцо волноводов Н- и крестообразного поперечного сечения, изогнутых в Е- либо Н-плоскости. Для нахождения общего решения использовался предложенный А. Я. Яшкиным [19, 20, 21] метод разбиения сложного объема на простые области с прямоугольными поперечными сечениями.

Материалы работы [18] могут быть непосредственно использованы для расчета резонаторов, обычно применяемых в радиальных клистромах. В этой работе, в частности, приводится система характеристических

для ТМ-колебаний в кольцевом резонаторе, образованном на себя Н-волновода, изогнутого в  $E$ -плоскости:

$$\frac{\operatorname{ctg} \nu_{p0}^{(2)} (z_{2j} - \zeta_2)}{\nu_{p0}^{(2)}} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\operatorname{ctg} \nu_{pm}^{(j)} (z_{2j} - z_j) (K_{pm0}^{(j, 2)})^2}{\nu_{pm}^{(j)} K_{pm}^{(j)} K_{p0}^{(2)}}. \quad (3)$$

$\nu_{pm}^{(j)} = \sqrt{k^2 - (\alpha_{pm}^{(j)})^2}$  — постоянная распространения вдоль оси  $z$ .

Резонансная постоянная распространения находится из уравнения

$$u_p (\alpha_{pm}^{(j)} R_j) = 0;$$

для резонаторов, симметричных относительно плоскости  $z=0,5(z_{21}+z_{23})$ ,

$$z = 0,5(z_{21} + z_{23}) - \frac{\pi}{2\nu_{p0}^{(2)}};$$

$$K_{pm}^{(j, 2)} = \frac{(\alpha_{pm}^{(j)})^2}{(\alpha_{pm}^{(j)})^2 - (\alpha_{pn}^{(2)})^2} [\alpha_{pn}^{(2)} u_{pm}^{(j)} (u_{pn}^{(2)})']_{\rho=R_n}^{\rho=R_n};$$

$$K_{pm}^{(j)} = \frac{1}{2} \{ [\alpha_{pm}^{(j)} (u_{pm}^{(j)})']_{\rho=R_i}^{\rho=R_i} \};$$

$j = 1, 2, 3$ ,  $j = 1; 3$  — номер области

прямоугольного поперечного сечения.

Обозначения (3) поясняются рис. 2.

Резонансная частота основного вида колебаний является минимальным корнем уравнения (3) при  $p=0$ , которое в случае симметричных кольцевых резонаторов на П-волноводе (рис. 2) принимает вид:

$$\frac{u_0}{r} = \sum_{m=0}^{\infty} \frac{\operatorname{ctg} \nu_{0m}^{(j)} (a-b) (K_{0m0}^{(j, 2)})^2}{\nu_{0m}^{(j)} K_{0m}^{(j)} \ln \frac{r+d}{r}}. \quad (4)$$

Здесь

$$K_{0m0}^{(j, 2)} = \frac{1}{\alpha_{0m}^{(j)}} [u_0 (\alpha_{0m}^{(j)})]_{\rho=r}^{\rho=r+d};$$

$$K_{000}^{(j, 2)} = \ln \frac{r+d}{r};$$

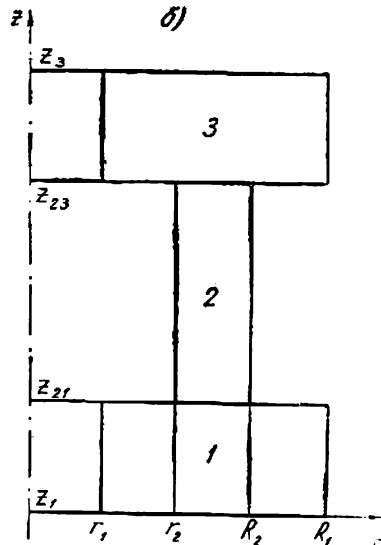


Рис. 2.

$$K_{0m}^{(j)} = \frac{1}{2} [\rho^2 u_1^2 (\alpha_{0m}^{(j)})]_{\rho=r}^{\rho=r+h}; \quad K_{00}^{(j)} = \ln \frac{r+h}{r};$$

$$u_n (\alpha_{0m}^{(j)}) = \frac{I_n (\alpha_{0m}^{(j)})}{I_0 (\alpha_{0m}^{(j)} r)} - \frac{N_n (\alpha_{0m}^{(j)})}{N_0 (\alpha_{0m}^{(j)} r)};$$

$$n = 0; 1; \quad j = 1; 3.$$

Экспериментальная проверка результатов электродинамического расчета на резонаторах П-образного сечения в 10-сантиметровом диапазоне

показала, что расхождение измеренной длины волны и расчетной составляет доли процента.

При расчете резонатора, используемого в электровакуумном приборе, кроме собственной длины волны  $\lambda$ , необходимо знать собственную добротность  $Q_0$  и активное сопротивление при резонансе  $R_0$ . Исследование этого вопроса [18 и 22] показало, что потери в контактах сборной конструкции кольцевого резонатора, а также наличие по окружности резонатора щели для прохождения электронного потока приводят к существенному расхождению между теоретическими и экспериментальными данными. Ввиду этого было предложено рассчитывать не  $Q_0$  и  $R_0$  в отдельности, а их отношение. Соответствующая формула для случая кольцевого резонатора Н-образного сечения с изгибом в плоскости  $E$  для колебаний типа ТМ при  $p = 0$  имеет вид:

$$\frac{R_0}{Q_0} = \sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}} \cdot \frac{\left(\ln \frac{R_2}{r_2}\right)^2}{\pi k M}, \quad (5)$$

где

$$M = 2 \left( \xi_1^2 b \ln \frac{R_1}{r_1} + a \ln \frac{R_2}{r_2} \right),$$

$$\xi_1 = \frac{\cos kb \ln (R_2/r_2)}{\sin k(a-b) \ln (R_1/r_1)}.$$

Произведя расчет  $R_0/Q_0$  по формуле (5), можно далее экспериментально измерить  $Q_0$  резонатора (что не представляет особых трудностей) и затем вычислить  $R_0$ . Экспериментальная проверка подтвердила целесообразность такого пути определения параметров резонатора.

Приведем некоторые данные о влиянии соотношения размеров на характеристики кольцевого резонатора П-образного сечения. Для этого упростим (4), полагая, что члены, стоящие в правой части под знаком суммы, мало влияют на величину  $\lambda$ . После преобразований получим:

$$\operatorname{tg} kb \cdot \operatorname{tg} k(a-b) = \frac{\ln \left( \frac{r+d}{r} \right)}{\ln \left( \frac{r+h}{r} \right)}, \quad (6)$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda}.$$

Для дальнейшего удобно ввести новые параметры:

$$y = ka, \quad \Theta = \frac{d}{h}, \quad \xi = \frac{h}{r}, \quad \eta = 1 - \frac{b}{a}$$

и преобразовать (6) в уравнение

$$\operatorname{tg} \eta y \cdot \operatorname{tg} (1-\eta) y = \frac{\ln (1+\Theta\xi)}{\ln (1+\xi)}. \quad (7)$$

С помощью этого уравнения исследовалось влияние соотношения размеров кольцевого резонатора на его собственную длину волны  $\lambda$ . На рис. 3 показана зависимость  $y = f(\eta)$  при  $a = \text{const}$  и различных  $\Theta$  и  $\xi$ . Кривые 2 и 4 соответствуют практически предельным значениям параметра  $\xi$ , кривые 1 и 5 — параметра  $\Theta$ . При  $\eta = 0$ ,  $a = b$  резонатор вырождается в тор прямоугольного сечения размером  $d \times 2a$ ; при  $\eta = 1$ ,  $b = 0$  — в тор прямоугольного сечения размером  $h \times 2a$ . Оптимальное

соотношение размеров —  $a = 2b$ , т. е.  $\eta_{\text{опт.}} = 0,5$ . При этом параметр  $y$  имеет минимальное значение, что соответствует максимальной длине резонансной волны.

Поскольку на основании рис. 2  $\eta_{\text{опт.}} = 0,5 = \text{const}$ , построим зависимость  $y = f(\theta)$  при данном  $\eta$  и при  $\xi = 1$ . Она приведена на рис. 4 и показывает, что с ростом  $\theta$  величина  $y$  монотонно увеличивается (асимптотически стремясь к  $y = 1,57$ ).

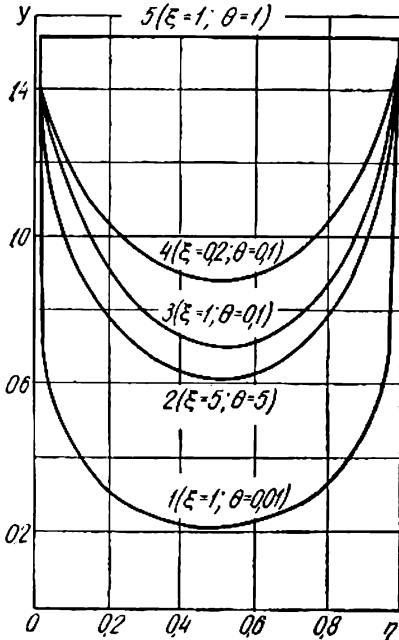


Рис. 3.

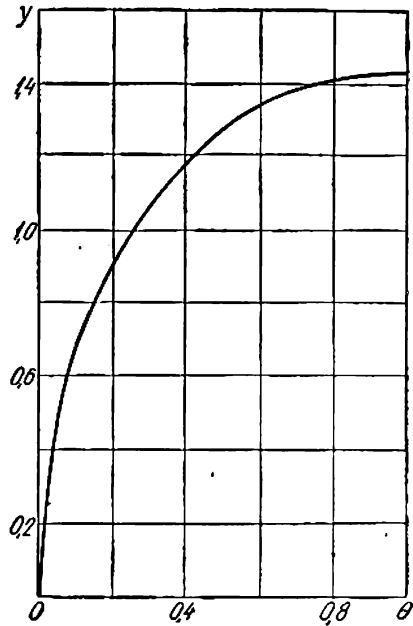


Рис. 4.

Более интересен приведенный на рис. 5 график зависимости  $y = f(\xi)$  для различных  $\theta$ , позволяющий наиболее наглядно представить влияние размеров резонатора на  $\lambda$ . С ростом  $\xi$  значение  $y$  увеличивается, стремясь в общем к пределу  $y = 1,57$ .

Для оценки пригодности расчетной формулы (6) был изготовлен кольцевой резонатор на волноводе П-образного сечения, имеющий размеры  $2b = 0,86 \text{ см}$ ;  $2a = 2,56 \text{ см}$ ;  $2c = 0,06 \text{ см}$ ;  $r = 1,05 \text{ см}$ ;  $d = 0,1 \text{ см}$ ;  $h = 1,0 \text{ см}$ . Для этого резонатора собственная длина волны, определенная по формуле (6), получилась равной  $10,94 \text{ см}$ . Уточнение этой формулы посредством добавления в правой части еще одного члена суммы (с индексом  $m = 1$ ), т. е. переход к первому приближению, дает  $\lambda = 11,7 \text{ см}$ . Экспериментально измеренная величина  $\lambda = 12,3 \text{ см}$ . Для получения лучшего совпадения расчетных и экспериментальных данных, очевидно, необходимо учитывать несколько членов суммы. Но и при этом расхождение результатов должно иметь место, так как формула (6) не учитывает наличия в резонаторе щелевого зазора для прохождения электронного пучка.

Остановимся кратко на исследовании макета отражательного радиального клистрона, в котором применен описанный выше кольцевой резонатор.

Клистрон был выполнен в виде разборной конструкции, позволяющей производить замену деталей, смонтирован на металлической плите под вакуумным колпаком и работал при непрерывной откачке. Цилиндрический оксидный катод диаметром 0,52 см был снабжен фокусирующими электродами в виде плоских колец для создания дискообразного пучка электронов. Отражатель имел форму кольца диаметром 3,0 см с отогнутыми бортиками. Форма фокусирующих электродов и отражателя определялась при помощи моделирования на электролитической ванне.

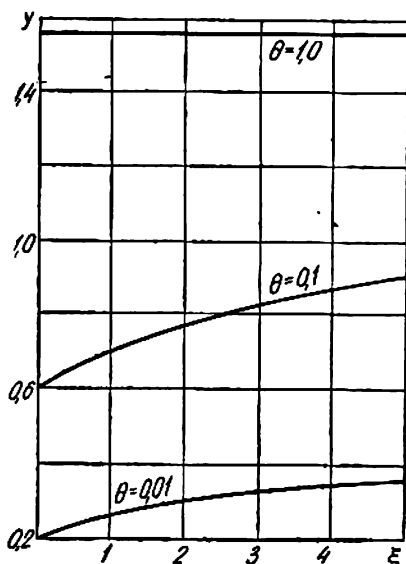


Рис. 5.

При напряжении на резонаторе  $U_0 = 550$  в и на отражателе  $U_R = -25$  в относительно катода была получена генерация колебаний с длиной волны 12,4 см при мощности в несколько милливольт.

Предварительные исследования показали, что макет работает неудовлетворительно ввиду наличия ряда конструктивных недостатков. В нем не предусмотрено охлаждение, что обуславливает тепловой уход параметров прибора. Необходимо улучшить согласование коаксиального вывода энергии с резонатором. Катодный узел требует доработки с целью обеспечить больший ток эмиссии и лучшую фокусировку электронного пучка.

В настоящее время произведен расчет и разработана конструкция отпаянного радиального отражательного клистрона, в которой делается попытка учесть и устранить недостатки первого макета. Результаты испытаний, а также соображения по оптимизации отдельных узлов и всего прибора будут приведены в последующих публикациях.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. W. W. Hansen, R. H. Varian and J. R. Woodyard. Патент США № 2.259.690 от 20 апреля 1939 г., серийный номер 268.898.
2. J. Müller. Немецкий патент № 739.206 от 10 июня 1939 г. (фирма Telefunken).
3. G. V. Litton. Патент США № 2.298.949 от 20 апреля 1940 г., серийный номер 330.662.
4. G. Vezy. Французский патент № 871.924 от 16 июля 1940 г. (фирма S. F. R.).
5. Французский патент № 867.826 от 28 ноября 1940 г. (приоритет в Англии от 13 сентября и 22 декабря 1939 г.).
6. Французский патент № 868.173 от 18 декабря 1940 г. (приоритет в Германии от 12 августа 1939 г.).
7. R. Warnecke et M. Lortie. Французский патент № 874.552 от 10 апреля 1941 г. (фирма C. S. F.).
8. W. C. Brown. Патент США № 1.402.983 от 26 ноября 1941 г., серийный номер 420.555.
9. J. R. Woodyard and W. W. Hansen. Патент США № 2.446.067 от 7 декабря 1942 г., серийный номер 468.307.
10. R. Warnecke et P. Guenard. Французский патент № 489.356 от 25 марта 1944 г. (фирма C. S. F.).

11. R. Liot. Французский патент № 969.671 от 31 июля 1948 г. (фирма C. S. F.).
  12. C. G. Lob and D. F. Holshouser. Radial beam velocity modulated micro-wave tube. Proc. of the national electronic conference, Chicago, Sept. 1949, p. 403.
  13. R. Warnecke et P. Guenard. Les tubes electroniques á commande par modulation de vitesse, Paris, 1951.
  14. Миллиметровые и субмиллиметровые волны (сборник статей под ред. Р. Г. Мирманова). ИЛ, М, 1959.
  15. П. В. Голубков, Ю. Г. Альтшулер, Б. М. Заморозков, В. Н. Шевчик, Л. Э. Бахрах. «Отражательный клистрон с радиальным электронным потоком». Труды НИИ МЭ и ЭП СССР, вып. 2 (13), 69, 1953.
  16. А. М. Максимова «Результаты исследования модифицированного отражательного клистрона». Изв. ВУЗ МВССО СССР, серия «Радиофизика», 2, № 1, 111, 1959.
  17. А. И. Терещенко и В. И. Милько. «Кольцевой резонатор для радиального клистрона». ЖТФ, 29, № 11, 1415, 1959.
  18. А. И. Терещенко и А. Ф. Зоркин. «Кольцевые резонаторы на волноводах сложной формы поперечного сечения». Радиотехника и электроника, 9, № 7, 1206, 1964 г.
  19. А. Я. Яшкин. «П-, Т-волноводы, равномерно-изогнутые в плоскости Н». Радиотехника и электроника, 4, № 11, 1931, 1959.
  20. А. Я. Яшкин. «Равномерный изгиб П-, Т-волноводов в плоскости Е». Радиотехника и электроника, 6, № 1, 67, 1961.
  21. А. Я. Яшкин. «Расчет собственных частот резонаторов сложной формы в цилиндрических функциях». Радиотехника, № 5, 1961.
  22. А. Ф. Зоркин и А. И. Терещенко. «Параметры кольцевых резонаторов на Н- и крестообразных волноводах, изогнутых в плоскости Е». Межведомственный республиканский сборник «Радиотехника», № 2, Харьков, 1964 (в печати).
-