

ИССЛЕДОВАНИЕ РЕЗОНАНСНЫХ СИСТЕМ НА БАЗЕ КОЛЬЦЕВЫХ РЕЗОНАТОРОВ С ИЗГИБОМ В E -ПЛОСКОСТИ

А. И. Терещенко, А. Ф. Гребенюк

Харьков

Кольцевые резонаторы H - или Π -образного поперечного сечения с изгибом в плоскости E могут быть использованы в радиальных клистронах. Одним из основных преимуществ таких приборов СВЧ является увеличенный диапазон электронной перестройки и большой уровень выходной мощности в результате использования пучков с большой электронной проводимостью.

Выводу основных уравнений, характеризующих параметры кольцевых резонаторов, посвящены работы [1—4]. В [1] эти уравнения получены методом эквивалентных схем, в [2]—[4] произведен электродинамический расчет. Следует отметить, что в работе [2] основные соотношения, характеризующие параметры кольцевых резонаторов, выводились в предположении отсутствия взаимодействия волн TE и TM в частичных областях, т. е. учитывались лишь волны одного типа относительно оси z (TE или TM).

В дальнейшем в работе [4] данная задача была решена более строго, с учетом взаимодействия типов волн TE и TM в частичных областях. Однако при этом было показано, что в случае $p = 0$ (вариант резонаторов, который рассматривается нами) взаимодействие между типами волн TE и TM отсутствует.

Целью настоящей работы является составление справочного материала для определения основных характеристик кольцевых резонаторов H - и Π -образной формы поперечного сечения с изгибом в плоскости E и учетом потерь, обусловленных наличием сеток в высокочастном зазоре.

При использовании формул, выведенных в работе [4], на ЭЦВМ М-20 были проведены расчеты собственной частоты, собственной добротности и эквивалентной активной проводимости кольцевых резонаторов H - и Π -образной формы поперечного сечения с изгибом

в плоскости E для широкого диапазона изменения относительных геометрических размеров:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 1,5 - 2,7 && \text{с шагом } 0,2; \\ \eta_2 &= 1,05 - 1,25 && \text{с шагом } 0,05; \\ q_1 &= 0,1 - 1,7 && \text{с шагом } 0,4; \\ q_2 &= 0,3 - 0,9 && \text{с шагом } 0,2; \\ \xi &= 1,0 - 2,1 && \text{с шагом } 0,2, \end{aligned}$$

где

$$\eta_1 = \frac{R_1}{r_1}; \quad \eta_2 = \frac{R_2}{r_2}; \quad q_1 = \frac{a_1}{r_1}; \quad q_2 = \frac{2a_2}{r_2}; \quad \xi = \frac{r_2}{r_1}. \quad (1)$$

Обозначения ясны из рис. 1.

Данные расчета позволили построить графики зависимостей f_0 , Q_0 , G_0 от относительных геометрических размеров.

По известным значениям Q_0 и G_0 можно найти волновое сопротивление:

$$\rho = 1/G_0 Q_0. \quad (2)$$

Если в высокочастотном зазоре расположены сетки, то при определении G_0 необходимо к ее значению, приведенному в графиках, прибавить эквивалентную проводимость сеток.

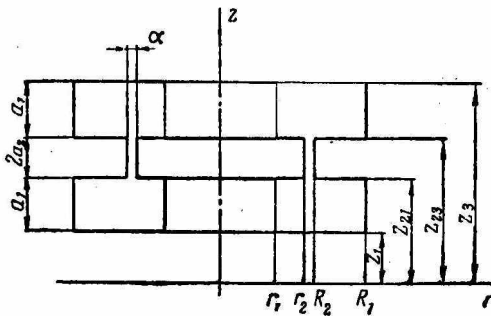


Рис. 1.

ток, определяемую следующим выражением:

$$q_c = \frac{3 \cdot 10^{-5} (\eta_2 + 1) q_2^3 \xi^2 r_1}{\lambda_0^2 \pi^2 (\ln \eta_2)^2} \sqrt{\frac{N}{\lambda_0} \frac{h_c}{r_c}}, \quad (3)$$

где h_c , r_c — шаг и диаметр проволоки сетки плетеного типа, см; N — отношение удельного сопротивления (при постоянном токе) материала сетки к удельному сопротивлению меди.

Предполагается, что сетки полностью закрывают высокочастотный зазор.

На графиках рис. 2—5 приведены зависимости добротности и эквивалентной активной проводимости в функции относительных геометрических размеров для двух значений относительной ширины зазоров $d/\lambda_0 = 0,0079$ и $0,0159$, которые выбраны такими же, как в работе [6], в целях сравнения характеристик тороидальных и кольцевых резонаторов. Значения добротности и собственной эквивалентной проводимости даны для медных резонаторов. При другом материале необходимо вместо коэффициента 6,85 под корнем поставить

$$6,85 \cdot \frac{\sigma_{ст. м}}{\sigma_{ев}},$$

где $\sigma_{ст. м}$ — удельная проводимость меди;

$\sigma_{ст}$ — удельная проводимость используемого материала.

Наиболее сильная зависимость резонансной частоты от геометрических размеров наблюдается у тех резонаторов, у которых относительная высота индуктивной части резонатора a_1/r_1 соизмерима с относительной шириной зазора d/λ_0 :

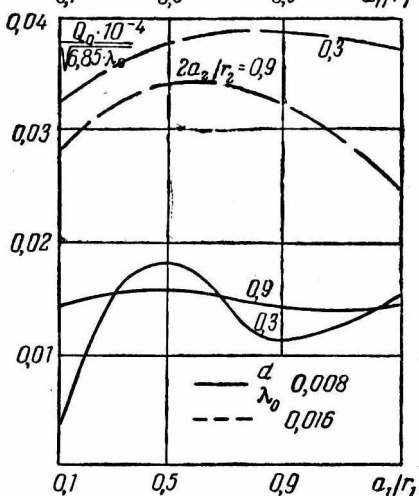
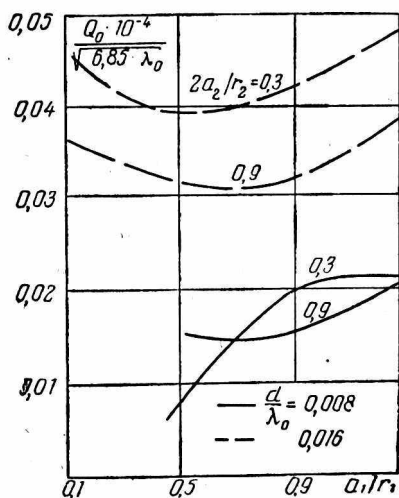
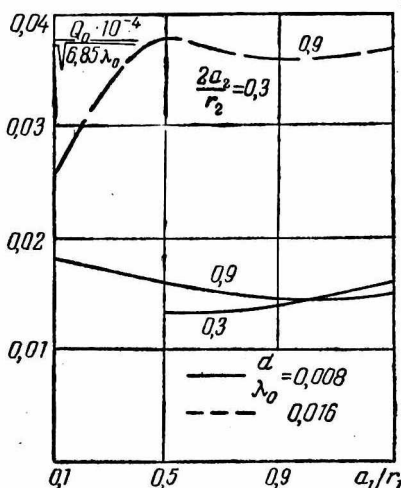
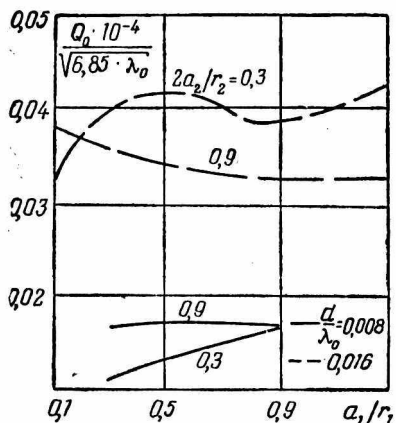


Рис. 2.

Рис. 3.

Из графиков рис. 2—3 видно, что собственная добротность кольцевых резонаторов, как и тороидальных, сильно зависит от ширины d/λ_0 и высоты $2a_2/r_2$ емкостной части резонаторов. Уменьшение d/λ_0 и увеличение $2a_2/r_2$ приводит к уменьшению собствен-

ной добротности, поскольку с ростом емкости увеличиваются токи и собственные потери в резонаторе. Из этих же графиков следует, что собственная добротность кольцевых резонаторов почти не зависит от таких относительных геометрических размеров, как R_1/r_1 и r_2/r_1 , и слабо зависит от параметра a_1/r_1 , причем в большинстве случаев с ростом a_1/r_1 добротность растет, хотя и незначительно.

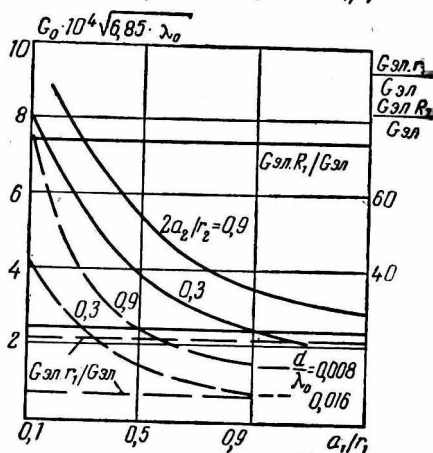
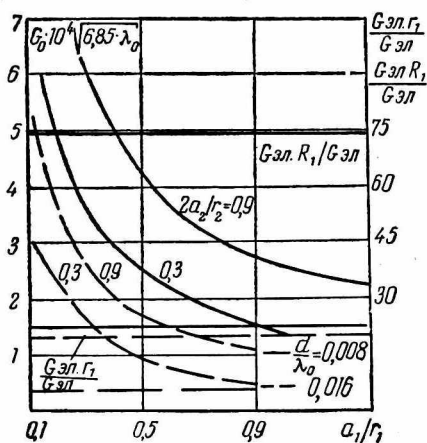
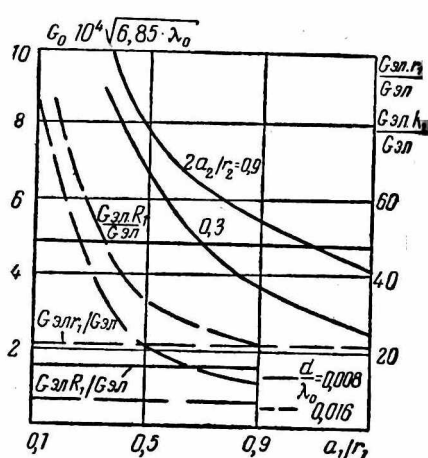
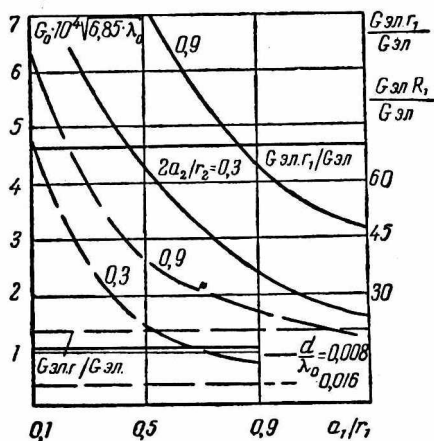


Рис. 4.

Рис. 5.

Интересно отметить, что добротность резонаторов П- и Н-образной формы поперечного сечения почти одинаковы (что можно объяснить равенством поверхностей емкостной части резонаторов). Из графиков рис. 4—5 видно, что с увеличением $2a_2/r_2$ и уменьшением d/λ_0 потери (G_0) в резонаторе значительно увеличиваются; они растут с уменьшением a_1/r_1 и увеличением R_1/r_1 . Эквивалентная активная проводимость G_0 почти не зависит от параметра r_2/r_1 .

при прочих равных относительных геометрических размерах, т. е. как для Н-, так и для П-образного сечения.

С ростом a_1/r_1 и d_0/λ_0 и уменьшением $2a_2/r_2$ волновая проводимость σ уменьшается и может достичь величины порядка $5 \cdot 10^{-3} \text{ мо}$ (при $d/\lambda_0 = 0,00794$), т. е. стать соизмеримой с σ тороидальных резонаторов при такой же величине d/λ_0 [6].

Сравнение значений Q_0 , G_0 и σ для кольцевых резонаторов и обычных тороидальных показывает, что эти величины в основном одного порядка.

На графиках рис. 4, 5 приведены значения отношения электронных проводимостей дисковых пучков для случая внешнего или внутреннего расположения катода к проводимости аксиального электронного пучка, определенные по следующим выражениям: для внутреннего катода

$$\frac{G_{\text{эл. } r_1}}{G_{\text{эл.}}} = \frac{6,4}{q_2};$$

для внешнего катода

$$\frac{G_{\text{эл. } R_1}}{G_{\text{эл.}}} = \frac{9,6\eta_2}{q_2}.$$

При этом считалось, что толщина дискового пучка равна диаметру аксиального пучка, а отношение радиуса катода к радиусу ускоряющего электрода для внутреннего расположения катода равно 0,8, для внешнего — 1,2.

Из рис. 4, 5 видно, что электронная проводимость дисковых пучков, применяемых в кольцевых резонаторах, может быть на один-два порядка больше, чем у аксиальных пучков, применяемых в приборах с тороидальными резонаторами. Это позволяет конструировать приборы с повышенным уровнем выходной мощности и коэффициентом усиления, а также увеличить диапазон электронной перестройки генераторов или широкополосность усилителей благодаря связи такого прибора с низкодобротной нагрузкой.

Приведенные графики позволяют по известным геометрическим размерам резонаторов находить их собственную частоту, добротность и эквивалентную активную проводимость, и, наоборот, по ранее заданным (выбранным) величинам добротности Q_0 или потерь G_0 для определенной собственной частоты кольцевого резонатора определять его геометрические размеры.

Если необходимо сконструировать клистрон на базе кольцевого резонатора с минимальными потерями, желательно выбирать резонаторы с возможно большим размером индуктивной части a_1 и минимальной высотой высокочастотного зазора.

При конструировании клистронов с максимальной выходной мощностью, усилением, перестройкой и широкополосностью желательно выбирать резонаторы возможно большего радиуса и с большой высотой высокочастотного зазора.

При выборе той или иной формы резонатора необходимо учитывать расположение ближайшего вида колебаний. Но в приведенных выше резонаторах разделение частот основного (TM_{001}) и ближайшего к нему (TE_{111}) видов колебаний весьма велико и составляет 60—70 %.

В настоящей статье приведена лишь небольшая часть графиков, служащих главным образом для иллюстраций общих выводов.

Исследования, произведенные на макетах радиальных отражательных клистронов, сконструированных на базе кольцевых резонаторов Н- и П-образной формы поперечного сечения с применением сеток в высокочастотном зазоре, дают хорошее совпадение параметров резонаторов, определенных по соответствующим графикам и измеренных экспериментально.

Так, собственные резонансные частоты f_0 на основном виде колебаний резонаторов П- и Н-образной формы поперечного сечения с относительными геометрическими размерами $r_2/r_1 = 1,0$; $R_1/r_1 = 1,9$; $1,7$; $R_2/r_2 = 1,09$; $1,07$; $a_1/r_1 = 0,9$; $0,9$, $2a_2/r_2 = 1,0$; $0,7$ и $r_1 = 0,87$; $0,97$ см соответственно, определенные теоретически (2790 и 2980 МГц) и измеренные при эксперименте, практически совпали. У первого резонатора высокочастотный зазор был закрыт сетками стержневого типа, у второго — плетеными.

Следует заметить, что точность вычислений параметров резонаторов меньше для случаев, когда относительная высота индуктивной части a_1/r_1 соизмерима с относительной шириной зазора d/λ_0 . Но такие резонаторы, как и резонаторы с большим радиусом и малым отношением R_1/r_1 , не пригодны для конструирования на их основе клистронов, поскольку у первых большие собственные потери и малое волновое сопротивление, а у второго — малое разделение между основным и ближайшим к нему видом колебаний.

Приведенные материалы свидетельствуют о перспективности применения кольцевых резонаторов в электронных приборах СВЧ.

Измерения собственной добротности кольцевых резонаторов радиальных отражательных клистронов при наличии электронного пучка, но при отсутствии колебаний, дали значения, отличающиеся от результатов «холодных» измерений всего в 1,5-2 раза. У обычных клистронов эта разница больше [5], что, по-видимому, объясняется большей тепловой нагрузкой сеток и стенок резонатора.

ЛИТЕРАТУРА

1. А. И. Терещенко, В. Н. Милько. Кольцевой резонатор для радиального клистрона. ЖТФ, т. 29, № 11, 1959, с. 1442—1449.
2. А. И. Терещенко, А. Ф. Зоркин. Кольцевые резонаторы на волноводах сложной формы поперечного сечения. «Радиотехника и электроника», т. 9, № 7, 1964, с. 1206—1212.
3. А. И. Терещенко, А. Ф. Зоркин. Параметры кольцевых резонаторов на П- и крестообразных волноводах, изогнутых в плоскости E. Сб. «Радиотехника», вып. 2. Изд-во ХГУ, Харьков, 1964, с. 17—24.

4. А. Ф. Зоркин. Исследование изгибов, коаксиально-секторных и кольцевых резонаторов на гребневых волноводах. Автореф. канд. дисс., Харьков, 1967. 27 с.

5. Р. Ф. Быкасова, Т. С. Зернова, Д. М. Петров. Экспериментальные исследования нулевой зоны генерации отражательного клистрона. «Электронная техника», серия 1, «Электроника СВЧ», вып. 9, 1967, с. 73—81.

6. М. Б. Голант, А. А. Маклаков, М. Б. Шур. Изготовление резонаторов и замедляющих систем электронных приборов (под общей ред. академика Н. Д. Девяткова). Изд-во «Советское радио», 1969. 300 с.