

УДК 3621.385

**ИССЛЕДОВАНИЕ РАЗЛИЧНЫХ СПОСОБОВ НАСТРОЙКИ
МНОГОКАНАЛЬНЫХ ОДНОАЗОРНЫХ РЕЗОНАТОРОВ НА
КРАТНЫЕ РЕЗОНАНСНЫЕ ЧАСТОТЫ**

В. А. Сенчуров, В. А. Царев

**Саратовский государственный технический университет, кафедра «Электронные
приборы и устройства»**

Получена 8 сентября 2011 г.

Аннотация. Приведены результаты расчета по двумерным и трехмерной программам клистронных многоканальных одноазорных резонаторов разной формы, настроенных на кратные частоты, соответствующие основному и первому высшему видам колебаний. Найдена оптимальная форма резонаторов, соответствующая максимуму отношения эффективного характеристического сопротивления на единицу длины резонатора.

Ключевые слова: многоканальные одноазорные резонаторы, клистронные одноазорные резонаторы, многолучевой клистрон.

Abstract. Calculation results are conducted on two-dimensional and three-dimensional programs for the klystron multi-channel one-gap resonators of different forms, each with multiple frequencies, corresponding to the main and first higher types of oscillations. An optimal form of resonators is found, corresponding to the maximum of the relationship of effective characteristic resistance per unit length of the resonator.

Keywords: multi-channel one-gap resonators, klystron one-gap resonators, multibeam klystron.

В настоящее время в радиоэлектронике ведется активная разработка электровакуумных СВЧ-приборов клистронного типа [1], предназначенных для получения СВЧ-мощности на двух кратных частотах. Данный тип приборов может быть использован в радиолокации, радиопротиводействии и в других областях техники. Одним из основных требований, предъявляемым к мощным

усилительным клистроном, является получение высокого КПД ~70-80%. Высокий КПД таких приборов достигается за счет несинусоидальной скоростной модуляции, которая реализуется при введении в конструкцию многорезонаторной системы двух дополнительных однозачорных резонаторов, имеющих собственные частоты, равные удвоенной частоте основного сигнала. Это увеличивает габариты и массу такого устройства. Устранить этот недостаток можно за счет применения вместо двух резонаторов одного однозачорного резонатора, настроенного на две кратные резонансные частоты.

Однако для многолучевых конструкций приборов СВЧ такие резонаторы пока не исследовались и не применялись. Поэтому основной задачей настоящей работы является поиск оптимальной формы и размеров однозачорных резонаторов при работе на основном и первом высшем виде колебаний с кратными резонансными частотами, а также оценка эффективности применения этих систем в многолучевых приборах.

В работе [2] описана методика синтеза ступенчато-неоднородного коаксиального однозачорного резонатора, настраиваемого на основную частоту и ее вторую гармонику. Конструкция такого резонатора показана на рис. 1. Эта методика положена в основу программы синтеза многолучевых резонаторов с кратными резонансными частотами [3].

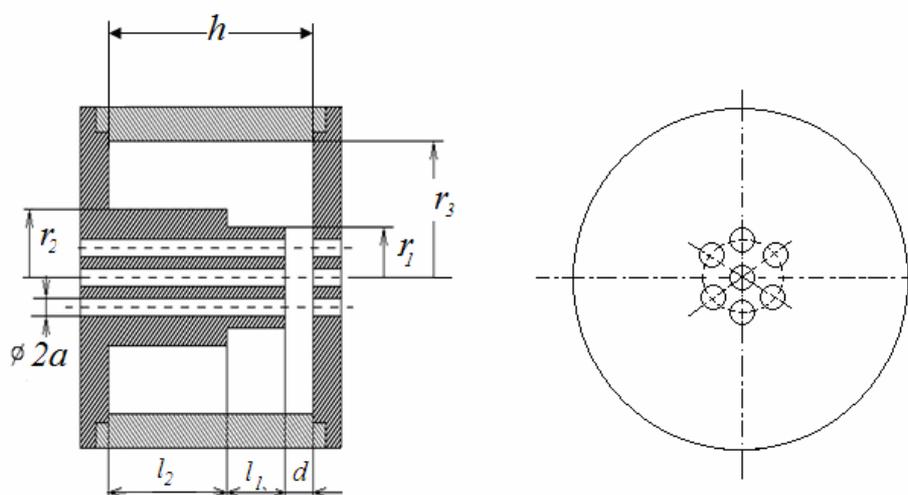


Рис. 1. Конструкция многоканального резонатора клистрона.

С помощью этой программы можно найти оптимальные соотношения основных геометрических размеров, определяющих резонанс одновременно на двух частотах f_1 и $f_2 = 2f_1$, соответствующих основной и первой высшей моде электромагнитных колебаний. Для решения задачи синтеза использовался метод эквивалентной схемы с полураспределенными параметрами [4], согласно которому резонатор можно было представить в виде эквивалентной ступенчато-неоднородной длинной линии, образованной отрезками l_1 и l_2 с волновыми сопротивлениями Z_1 и Z_2 . Эта линия замкнута на одном конце, а на другом конце она нагружена на емкость зазора C_0 (рис.2). Емкость скачка волнового сопротивления представлена на схеме емкостью C_n .

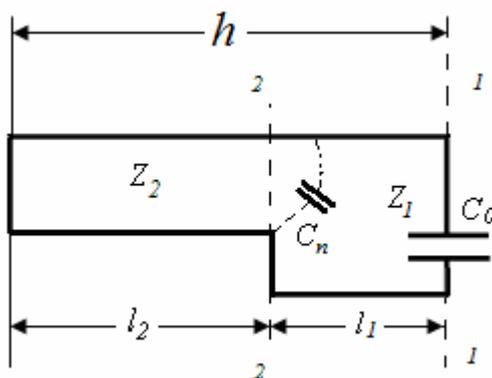


Рис.2 Эквивалентная схема резонатора

Входная проводимость короткозамкнутого отрезка линии в сечении 2-2

$$b_{2(\text{коакс})} = -\frac{1}{Z_2 T_2} + \omega \cdot C_n, \quad (1)$$

где $T_2 = \text{tg} \frac{2\pi l_2}{\lambda}$.

В сечении 1-1 входную проводимость отрезка линии, нагруженной на реактивную проводимость b_2 , можно рассчитать с помощью уравнения:

$$b_{1(\text{коакс})} = \frac{1}{Z_{01}} \cdot \frac{Z_{01}b_2 + T_1}{1 - Z_{01}b_2T_1}, \quad (2)$$

где $T_1 = tg \frac{2\pi l_{01}}{\lambda}$.

Условие резонанса для такой линии может быть записано как сумма реактивных проводимостей в сечении 1-1.

$$\Sigma b_i = b_{1(\text{коакс})} - \omega C_0 = 0. \quad (3)$$

Суммарная нормированная проводимость в сечении 1-1 может быть записана в виде

$$(\Sigma b_i)Z_{01} = Y_{cn} - \frac{1}{mT_2} - \frac{T_1/Y_{c0} + 1}{T_1 - 1/Y_{c0}} = 0. \quad (4)$$

Используя метод подобия, с помощью уравнения (4) можно перейти от коаксиальной формы конструкции резонатора к другим геометрическим формам, отличающимся уменьшенными продольными размерами.

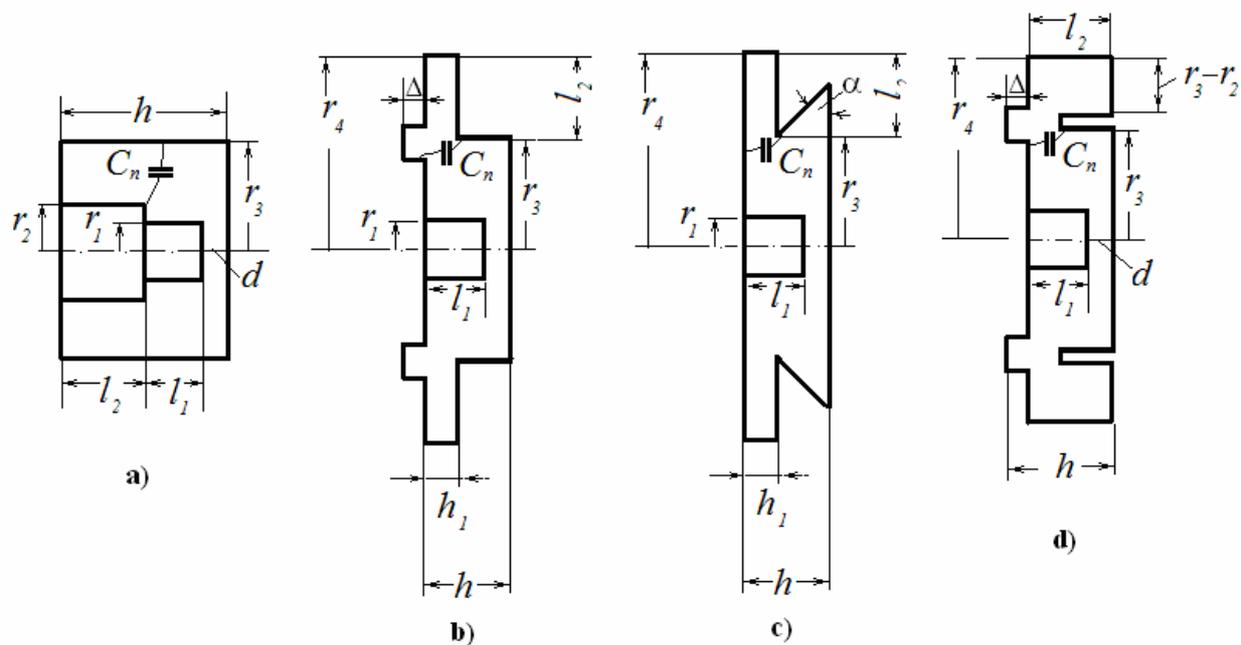


Рис. 3. Четыре типа конструкции многолучевых одноззорных резонаторов.

В резонаторе на рис. 3б участок l_1 , такой же, как и в коаксиальном резонаторе-прототипе на рис. 3а. Коаксиальный участок l_2 заменен на короткозамкнутый отрезок радиальной линии, имеющей такую же проводимость $b_{2(\text{рад})}$, как и в коаксиальной линии.

$$b_{2(\text{рад})} = \omega C_n - \frac{1}{Z_2} \text{ctg}(mr_3, mr_4), \quad (5)$$

где $m = \frac{2\pi}{\lambda}$ - волновое число, ωC_n - емкостная проводимость скачка волнового сопротивления,

$Z_2 = \frac{60h}{r_3}$ - входное волновое сопротивление радиальной линии, имеющей внутренний радиус r_3 , внешний радиус r_4 и высоту h ,

$\text{ctg}(mr_3, mr_4)$ - малый радиальный котангенс, определяемый из уравнения:

$$\text{ctg}(mr_3, mr_4) = \frac{J_1(mr_3)N_0(mr_4) - N_1(mr_3)J_0(mr_4)}{J_0(mr_3)N_0(mr_4) - N_0(mr_3)J_0(mr_4)}, \quad (6)$$

где $J_{0,1}(mr), N_{0,1}(mr)$ - соответствующие функции Бесселя и Неймана нулевого и первого порядка.

Условия подобия резонаторов можно записать в следующем виде:

$$b_{2(\text{рад})} = b_{2(\text{коакс})}, \quad C_{n(\text{рад})} = C_{n(\text{коакс})}. \quad (7)$$

При выполнении этих условий резонаторы будут иметь одинаковые резонансные частоты. Для того, чтобы обеспечить равенство емкостей $C_{n(\text{рад})} = C_{n(\text{коакс})}$ в конструкции резонатора, показанного на рис. 3б, предусмотрены пазы в стенке резонатора. Изменяя глубину паза, можно изменять емкость $C_{n(\text{рад})}$. В конструкции, показанной на рис. 3с, подбор

величины емкости может быть осуществлен путем изменения угла α . Конструкция резонатора, показанная на рис. 3 d, имеет вид свернутой коаксиальной линии. Место стыка линий с разными волновыми сопротивлениями представляет собой кольцевой выступ, емкость которого также можно регулировать изменением глубины паза, расположенного на другой стенке резонатора.

Для подтверждения возможности создания резонаторов, показанных на рис. 3, были проведены численные расчеты с помощью программ «BEZONE» [3], «AZIMUTH»[5], «HFSS»[6].

Ниже приведены результаты, полученные с помощью программы «AZIMUTH» для резонаторов 3a, 3c, 3d, настроенных на 2 кратные частоты: 2450 МГц и 4900 МГц. На рис. 4 показано распределение электрического поля для основного и первого высшего вида колебаний резонатора 3a. Так как программа двумерная, то отверстия в пролетной трубе не моделировались, то есть рассматривался плоский зазор.

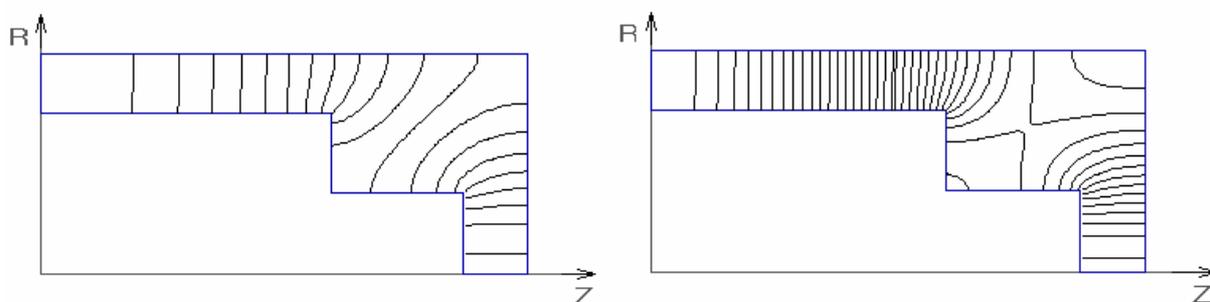


Рис.4. Картина распределения полей для основного и первого высшего видов колебаний резонатора 3a.

Характеристическое сопротивление для резонатора, показанного на рис. 3a, при $R=0$ на основном виде колебаний $\rho=51.2$ Ом, на первом высшем виде колебаний $\rho=21.9$ Ом. Геометрические размеры резонатора: $r_1=6.95$ мм, $r_2=13.78$ мм, $r_3=18.89$ мм, $l_1=8.66$ мм, $l_2=19.14$ мм, $d=4.23$ мм, $a=1.73$ мм.

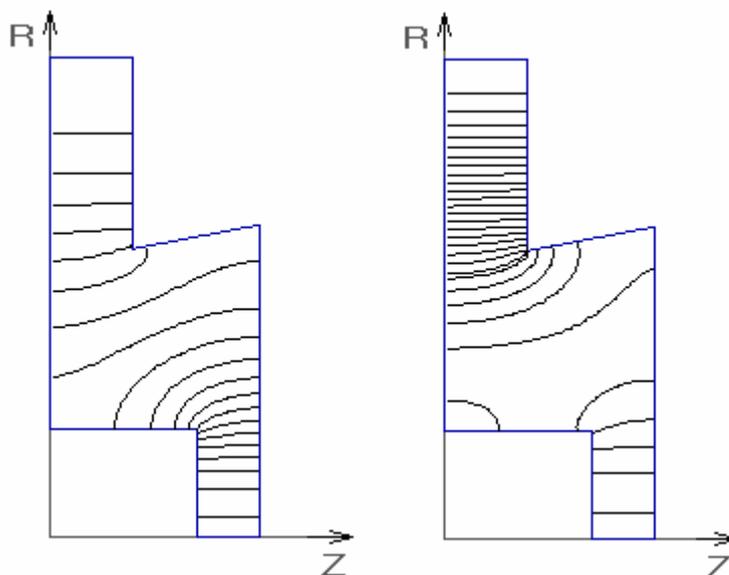


Рис.5. Картина распределения полей для основного и первого высшего видов колебаний резонатора 3с.

Характеристическое сопротивление для резонатора, показанного на рисунке 3с, при $R=0$ на основном виде колебаний $\rho=51.9$ Ом, на первом высшем виде колебаний $\rho=5.8$ Ом. Геометрические размеры резонатора с углом следующие: $r_1=8.83$ мм, $r_3=23.61$ мм, $r_4=39.3$ мм, $l_1=9.24$ мм, $h=13.14$ мм, $d=3.9$ мм, $a=2.05$ мм.

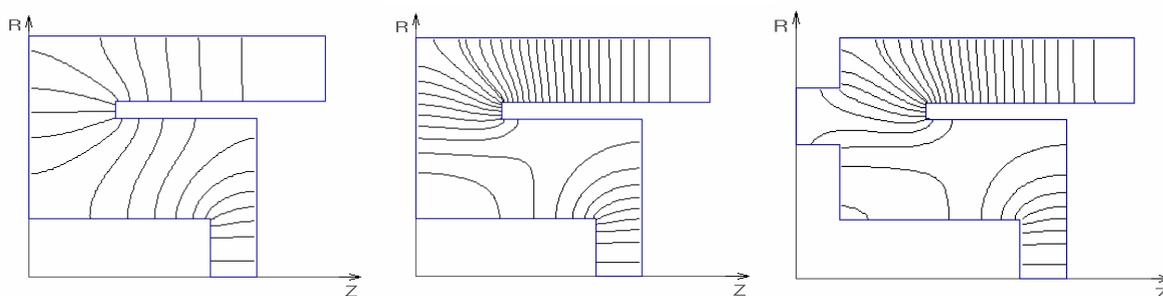


Рис.6. Картина распределения полей для основного и первого высшего видов колебаний резонатора типа 3d).

Характеристическое сопротивление для резонатора, показанного на рисунке 3d, при $R=0$ на основном виде колебаний $\rho=60.47$ Ом, на первом высшем виде

колебаний $\rho=19.9$ Ом. Геометрические размеры резонатора: $r_1=5.22$ мм, $r_3=14.2$ мм, $r_4=21.52$ мм, $h=20.4$ мм, $l_1=12.51$ мм, $d=3.18$ мм, $a=1.15$ мм.

Был проведен сравнительный анализ эффективности взаимодействия 3-х типов резонаторов с электронным пучком для основного ($f_1=2450$ МГц) и первого высшего вида колебаний ($f_2=4900$ МГц) по критерию [7]:

$$K = \frac{\rho M^2}{h/\lambda}, \quad (8)$$

где ρ - характеристическое сопротивление,

$$M = \frac{\sin(\theta/2)}{\theta/2} - \text{коэффициент эффективности взаимодействия,}$$

где $\theta = \frac{\omega d}{v_0}$ - невозмущенный угол пролета электронов через зазор

резонатора d со скоростью v_0

h – продольная длина резонаторов,

λ - длина волны.

Скорость электронов v_0 рассчитывалась из закона сохранения энергии при ускоряющем напряжении $U_0=10$ кВ, соответствующем невозмущенному углу пролета $\theta=1$.

Результаты расчета критерия эффективности 3-х исследованных типов резонаторов приведены в таблице 1.

Таблица 1.

№ резонатора	K_1 , Ом	K_2 , Ом
3а	177.1	55.1
3с	445	38
3d	347.7	94.7

K_1 и K_2 - критерии эффективности для основного и первого высшего видов колебаний соответственно. Видно, что наибольшее характеристическое

сопротивление на единицу длины резонатора при взаимодействии электронного пучка с электромагнитным полем в резонаторе на основном виде колебаний достигается в резонаторе 3с, но при этом у него худшее взаимодействие на первом высшем виде колебаний. Наиболее оптимальным для использования на двух кратных частотах является резонатор 3d, поскольку у него больший критерий эффективности взаимодействия на первом высшем виде колебаний, чем у остальных типов резонаторов.

Исследована возможность подстройки резонатора 3с на кратные частоты за счет изменения подстроечного угла α (см. рис. 3с). Для оценки погрешности, связанной с не учетом провисания поля в пролетных каналах при расчетах по программе «AZIMUTH», проводился также расчет по трехмерной программе «HFSS». Результаты расчетов приведены в таблице 2.

Таблица 2. Сравнение результатов расчета резонатора 3с в программе «HFSS» и программе «AZIMUTH».

$\alpha, ^\circ$	$f_{1HFSS},$ МГц	$f_{1AZIM},$ МГц	$f_{2HFSS},$ МГц	$f_{2AZIM},$ МГц	$\epsilon_1, \%$	$\epsilon_2, \%$
0	2426	2529	4883	5014	4.24	2.68
7.11	2461	2516	4907	5013	2.23	2.16
14.01	2454	2503	4901	5006	1.99	2.14
20.53	2443	2491	4886	5002	1.96	2.37
26.54	2431	2479	4877	4998	1.94	2.42
31.97	2434	2466	4882	4994	0.9	2.36

$\alpha, ^\circ$ - подстроечный угол,

f_{1HFSS} , f_{2HFSS} - основной и первый высший тип колебаний, рассчитанный в программе «HFSS»,

f_{1AZIM} , f_{2AZIM} - основной и первый высший тип колебаний, рассчитанный в программе «AZIMUTH».

ϵ_1 , ϵ_2 - погрешность между результатами расчета двух программ для основного и первого высшего типа колебаний, соответственно.

Из таблицы 2 следует, что наибольшая погрешность расчетов частоты основного вида колебаний (около 4%) наблюдается при малых углах α . При углах пролета больше 30° погрешность пренебрежимо мала. На первом высшем виде колебаний погрешность составляет примерно 2%.

Установлено, что за счет оптимального выбора подстроечного угла α можно настроить резонатор на кратные частоты.

На рис. 7 показан график зависимости f_{1HFSS} и $f_{2HFSS}/2$ от подстроечного угла α . Точки, где две кривые пересекаются, соответствуют достижению кратности частот в резонаторе.

График зависимости основного и первого высшего видов колебаний от изменения угла в резонаторе.

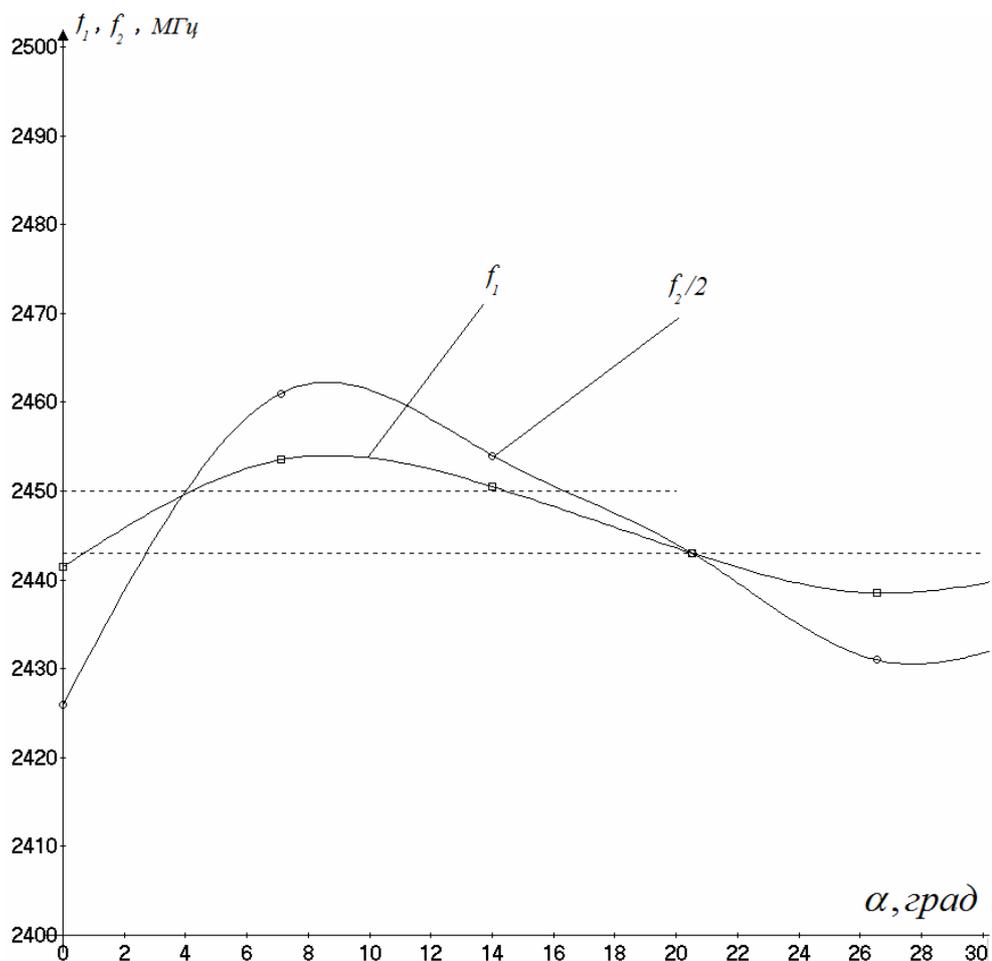


Рис. 7. График зависимости f_{1HFSS} и $f_{2HFSS}/2$ от подстроечного угла α .

В резонаторе 3d подстройка кратности частот была проведена за счет изменения подстроечного паза Δ . Результаты расчета приведены в таблице 3.

Таблица 3.

Δ , мм	f_1 , МГц	f_2 , МГц
3	2393	4856
2	2421	4874
1	2442	4897
0	2451.7	4896

На рис. 8 показан график зависимости f_1 , $f_2/2$ от длины подстроечного паза Δ . Точка, где две кривые пересекаются, соответствуют достижению кратности частот в резонаторе.

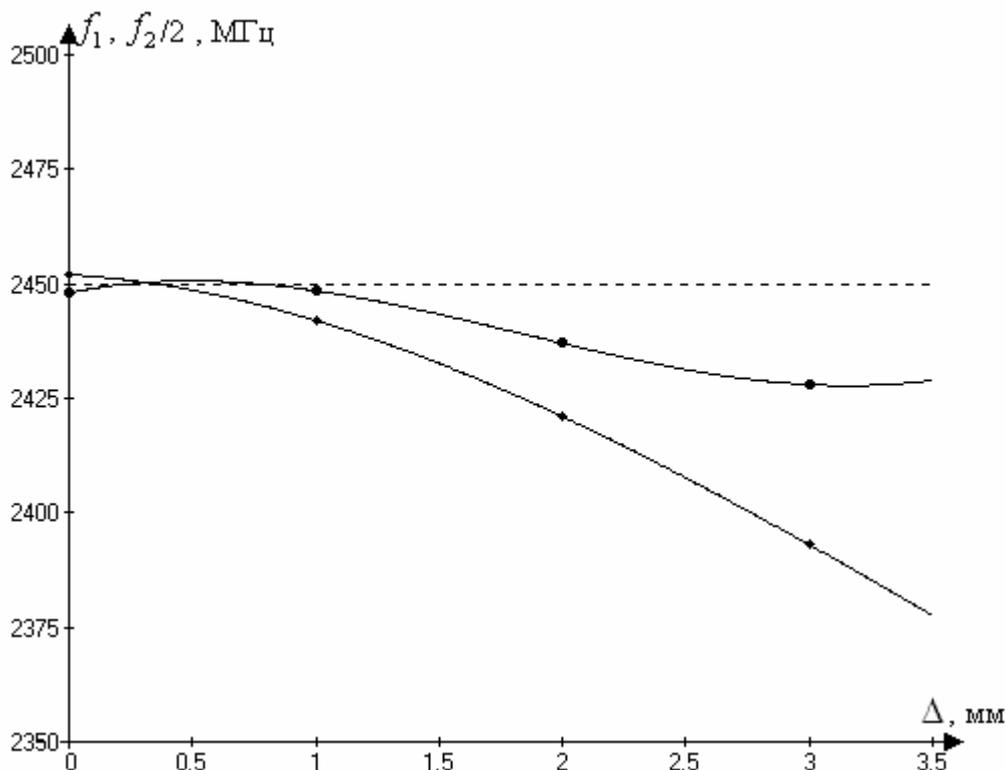


Рис. 8. График зависимости f_1 , $f_2/2$ от длины подстроечного паза Δ .

Заключение.

Найдена оптимальная форма резонаторов, соответствующая максимуму отношения эффективного характеристического сопротивления на единицу длины резонатора.

Дана оценка погрешности расчета резонансной частоты основного и первого высшего видов колебаний по двумерным и трехмерной программам.

Исследованы различные формы подстройки резонаторов на кратные частоты.

Применение таких резонаторов позволит существенно уменьшить массогабаритные параметры высокоэффективных многолучевых клистронов.

Литература

- [1] Королев А. Н., Лямзин В. М., Мамонтов А. В., Симонов К. Г. СВЧ-прибор клистронного типа (варианты). Патент на полезную модель № 2390870, г. Фрязино, 2010.
- [2] Синтез однозачорных резонаторов с кратными резонансными частотами для многолучевых СВЧ приборов клистронного типа/ Царев В.А., Сенчуров В.А. // Материалы Всероссийской науч.-практ. конф., Саратов, 2009, с. 247.-249.
- [3] Царев В.А., Сенчуров В.А. «BEZONE» // Свидетельство об официальной регистрации программы для ЭВМ №2011613602 от 10.05.2011.
- [4] Орлов С.И. Расчет и конструирование коаксиальных резонаторов, Изд-во "Советское Радио", 1970, 256 с
- [5] Григорьев А.Д., Силаев С.А. Расчет электромагнитного поля азимутально неоднородных типов колебаний аксиально-симметричных резонаторов с произвольной формой образующей. Электронная техника. Сер.1, Электроника СВЧ, 1981, вып. 2, стр. 62 -65.
- [6] Ansoft HFSS. Corpo., Pittsburgh, PA, USA, 1999.
- [7] Царев В.А., Мирошниченко А.Ю., Смирнов С.В. Нелинейный критерий подобия тороидальных резонаторов // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: материалы XIX междунар. Крымской конф., 14-18 сент. 2009 г., Севастополь, Крым, Украина. - Севастополь, 2009. - С. 139-140.