**МИНОБРНАУКИ РОССИИ**

**Санкт–Петербургский государственный**

**электротехнический университет**

**«ЛЭТИ» им. В.И. Ульянова (Ленина)**

**Кафедра ЭП**

Курсовая РАБОТА

**по дисциплине «Микроволновая электроника»**

Тема: «Расчет и проектирование пролетного клистрона»

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Студента гр. 8205 |  |  |
| Преподаватель |  | Вьюгинов В.Н. |

Санкт–Петербург

2023

**Аннотация**

Курсовая работа: «Расчет и проектирование пролетного клистрона»

Автор:

На основе учебно-методического пособия, материалов по данной теме и конспекта, рассмотрены: краткое описание принципа действия и устройства разрабатываемого прибора.

**Annotation**

Coursework: "Calculation and design of the spanning klystron".

Author:

Based on the tutorial, materials on this topic and the abstract, the following was considered: a brief description of the principle of operation and device of the device under development.**содержание**

[ВВЕДЕНИЕ 4](#_Toc120870626)

[1. Устройство, принцип работы и методы расчета клистронов 5](#_Toc120870627)

[2. Расчет пролетного клистрона по заданным выходным параметрам 12](#_Toc120870628)

[3. Расчет резонаторов 18](#_Toc120870629)

[ЗАКЛЮЧЕНИЕ 23](#_Toc120870630)

[СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ 24](#_Toc120870631)

# **ВВЕДЕНИЕ**

Актуальность темы обусловлена тем, что без самостоятельной работы студента невозможно освоить необходимое количество материала. Самостоятельная работа студентов в учебном процессе необходима для повышения качества профессиональной подготовки специалистов.

Цели курсового проектирования: закрепление знаний методов расчета параметров и характеристик, развитие навыков проектирования и конструирования микроволновых вакуумных приборов.

# **Устройство, принцип работы и методы расчета клистронов**

Пролетные клистроны являются одними из наиболее распространенных усилительных приборов в диапазоне СВЧ. Они обладают высокими значениями КПД и коэффициента усиления, большим уровнем выходной мощности, стабильностью частоты и фазы усиливаемых колебаний. В пролетном клистроне электронный пучок проходит сквозь электродинамическую систему в виде последовательности объемных резонаторов, где в результате взаимодействия с СВЧ-полем часть энергии электронов передается полю, тем самым осуществляется усиление СВЧ-сигнала. Схематическое устройство клистрона показано на рис. 1.1

Электронный поток, создаваемый электронной пушкой 1, ускоряется в пространстве «катод-анод» высоким положительным напряжением и далее движется по инерции от входного резонатора 9 до коллектора 4. Высокочастотные колебания во входном резонаторе создаются за счет мощности усиливаемого сигнала, поступающей в резонатор через ввод энергии 8. Резонаторный блок состоит из объемных резонаторов, резонансная частота которых может меняться с помощью механизмов перестройки 2. Взаимодействие электронов с высокочастотными полями происходит в зазорах 10. Между резонаторами электроны движутся в металлических трубах, так называемых пространствах дрейфа 7. Радиус трубы дрейфа должен быть таким, чтобы для рабочей длины волны труба являлась запредельным волноводом. Следовательно, в пространстве дрейфа отсутствует СВЧ-поле и на электроны действуют только электростатические (кулоновские) силы расталкивания.

С помощью входного и промежуточных резонаторов однородный по плотности электронный пучок преобразуется в последовательность электронных уплотнений (сгустков), частота следования которых совпадает с частотой входного сигнала. Электронные сгустки возбуждают в выходном резонаторе 6 СВЧ-поле той же частоты, тормозятся этим полем и отдают ему свою энергию, которая выводится в нагрузку через вывод 5.

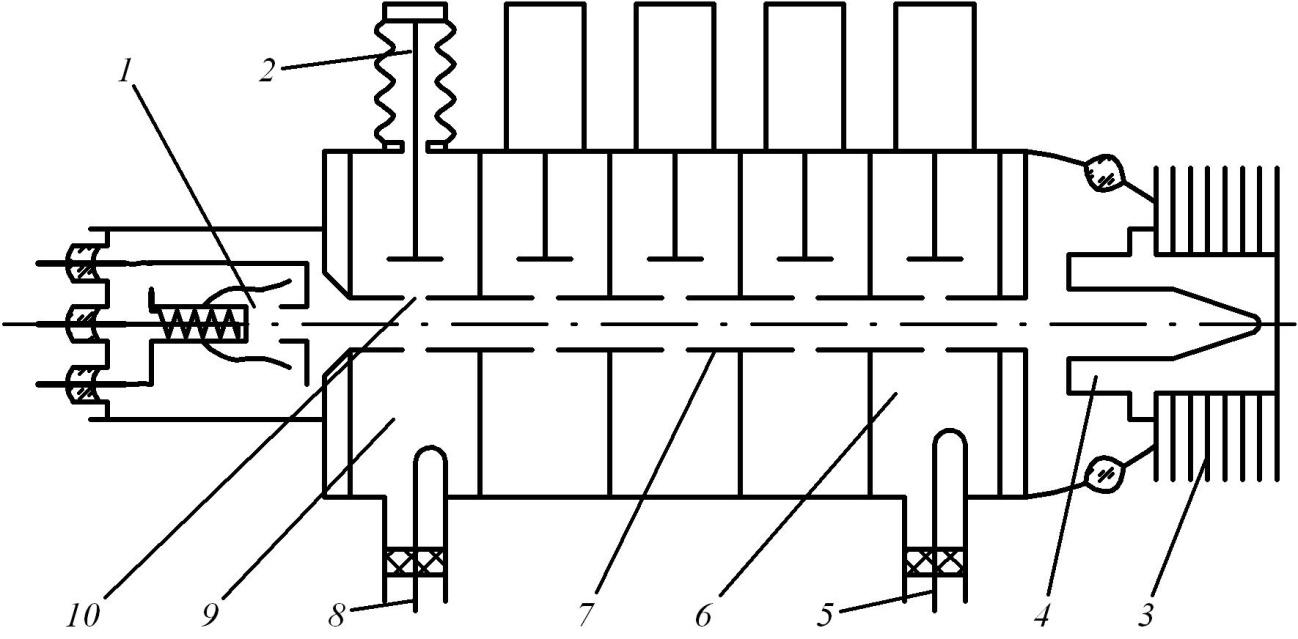
****

Рис. 1.1

Отдав значительную часть энергии полю выходного резонатора, электроны попадают в коллектор 4, в котором остаток энергии превращается в тепло и рассеивается в окружающем пространстве, чему способствует наличие радиатора 3. Для лучшего отвода тепла может быть применено дополнительное принудительное воздушное или водяное охлаждение.

Для того чтобы электронный пучок мог пройти от катода до коллектора без заметного рассеяния на пролетных трубах, используются магнитные или электростатические фокусирующие системы. Чаще применяются магнитные фокусирующие поля, направленные вдоль оси потока и создаваемые либо соленоидом, либо с помощью постоянных магнитов.

При подаче СВЧ-мощности во входной резонатор на его зазоре возникает переменное продольное электрическое поле, изменяющееся с частотой сигнала. Следующие друг за другом с постоянной скоростью электроны, пролетая через зазор в разные моменты времени (фазы поля), испытывают ускорение либо замедление. На выходе из зазора скорости электронов оказываются различными, причем различие в скоростях тем больше, чем больше амплитуда поля в зазоре. Этот процесс называется скоростной модуляцией электронного потока. При дальнейшем движении в пространстве дрейфа передние (замедленные) и задние (ускоренные) электроны приближаются к центральному (непромодулированному) электрону, пролетавшему через зазор в момент времени, когда напряжение на нем равно нулю. Таким образом, однородный по плотности электронный поток за счет скоростной модуляции в зазоре резонатора при дальнейшем движении оказывается промодулированным по плотности. В результате образуются электронные сгустки, следующие друг за другом с частотой сигнала. Процесс образования сгустков носит название группировки электронного потока. Если бы не было сил кулоновского расталкивания, то все частицы двигались бы только по инерции и в какой-то плоскости сошлись бы вместе (этот случай называется кинематический приближением). Однако за счет сил расталкивания группировка происходит медленнее, и, начиная с некоторого момента, сгустки могут начать расплываться. Благодаря образованию сгустков, в пучке появляется переменная составляющая конвекционного тока, которая обусловливает возникновение наведенного тока в промежуточных резонаторах. Поскольку их сопротивление достаточно велико, наведенный ток вызывает появление СВЧ-полей с амплитудами, существенно большими, чем во входном резонаторе. В результате происходят дополнительная модуляция и подгруппировка электронных уплотнений по мере их движения.

Основными параметрами, характеризующими работу клистрона, являются:

− коэффициент усиления по мощности, измеряемый в децибелах:

,

где  и  – входная и выходная СВЧ-мощности;

− коэффициент полезного действия, определяемый отношением выходной мощности к мощности электронного потока  и при одинаковых потенциалах резонаторов и коллектора равный

,

где  − ток катода,  − ускоряющее напряжение;

− полоса пропускания, определяемая в процентах по отношению к средней частоте сигнала . Величина  находится обычно по уровню половинной мощности.

Необходимо отметить, что для осуществления эффективной подгруппировки промежуточные резонаторы, и в первую очередь предвыходной резонатор, обычно расстраиваются в область высоких частот по отношению к частоте усиливаемого сигнала. В таком режиме КПД прибора максимален, но коэффициент усиления уменьшается по сравнению с режимом синхронной настройки, когда все резонаторы настраиваются на частоту сигнала.

На рис. 1.2 и 1.3 качественно показаны основные характеристики пролетного клистрона. На рис. 1.2 представлены зависимости выходной мощности от входной на центральной частоте усиливаемого сигнала  (амплитудные характеристики). Кривая 1 − синхронная настройка, кривая 2 соответствует случаю расстройки резонаторов в область высоких частот.

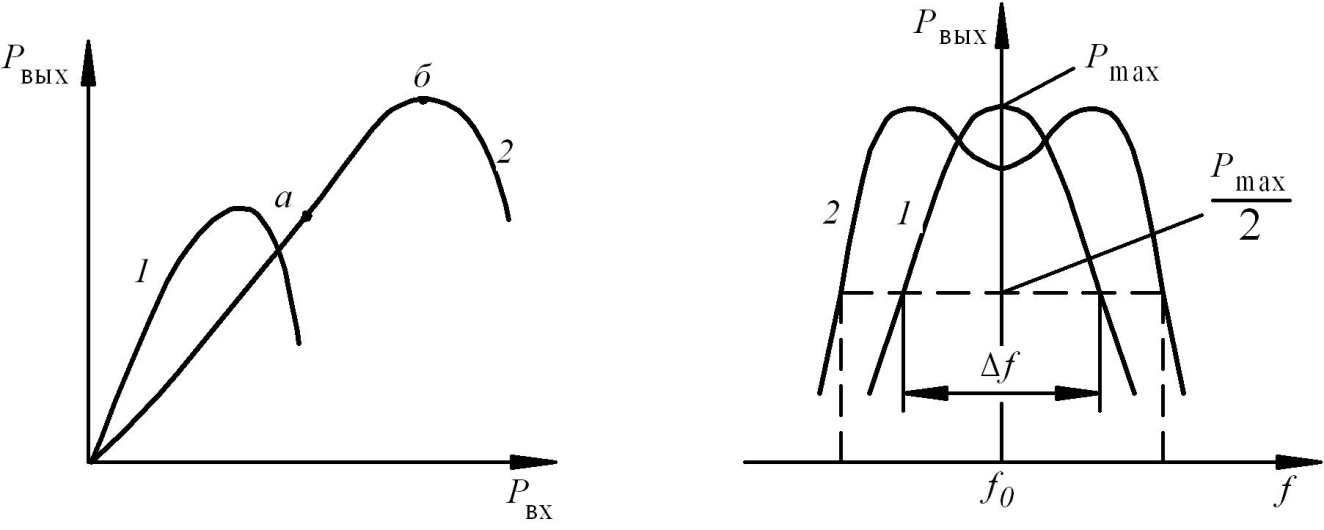


Рис. 1.2 Рис. 1.3

На рис. 1.3 представлены зависимости выходной мощности от частоты усиливаемого сигнала (частотные характеристики). Вид частотной характеристики зависит от величины . Кривые 1 и 2 соответствуют точкам *а* и *б* рис. 1.2. С ростом  начинается перегруппировка (обгон) электронов прежде всего на центральной частоте , в результате чего на частотной характеристике появляется провал, а полоса пропускания несколько увеличивается.

Современные клистроны отличаются высокими значениями КПД: 20−40% − для маломощных клистронов и 60−90% − для мощных приборов, а также большими коэффициентами усиления  дБ. Однако полосы пропускания сравнительно невелики и составляют 0,1…1%. Увеличения полосы пропускания можно добиться путем соответствующих расстроек промежуточных резонаторов, либо за счет использования специальных широкополосных электродинамических систем. В качестве примера можно назвать фильтровые системы, состоящие из двух связанных между собой резонаторов, один из которых (активный) пронизывается электронным потоком, второй − пассивный − служит для расширения полосы.

Следует отметить, что КПД клистрона может быть повышен не только за счет увеличения эффективности группирования и энергоотбора, но и за счет рекуперативного торможения электронов на коллекторе. При этом на коллектор подается более низкое постоянное напряжение, чем на блок резонаторов, в результате чего остаточная энергия электронов, не полностью заторможенных полем выходного резонатора, не рассеивается коллектором, а возвращается в источник питающего постоянного напряжения.

Основным физическим процессом, определяющим работу клистрона, является группирование электронов в пролетных трубах. Существуют многочисленные методы расчета этого процесса.

Простейшие методы не учитывают взаимодействия электронов, движущихся в пролетных трубах, и связанных с этим изменений их скорости. Скорость электронов определяется исключительно ускоряющим напряжением электронной пушки и модулирующим напряжением в зазоре резонатора (кинематическое приближение).

Учет сил электростатического расталкивания между электронами (учет сил объемного заряда в пучке) приводит к существенной корректировке в описании процесса группирования, поскольку силы объемного заряда препятствуют слетанию электронов в сгустки малой протяженности. Силы взаимодействия между электронами возрастают по мере их сближения, поэтому сгусток ведет себя аналогично упругой среде, и его динамика может быть описана уравнением колебаний. Решая уравнение колебаний, можно рассчитать изменение протяженности электронного уплотнения (сгустка) при его движении в пролетной трубе, а также изменение скорости электронов. Подобный подход является одним из аналитических методов решения задачи группирования электронов в клистроне.

К достоинствам аналитических методов можно отнести физическую наглядность и сравнительную простоту решения. В силу этого аналитические методы имеют существенного значение на начальном этапе проектирования прибора.

Более строгое решение, с учетом большего числа факторов, может быть получено численными методами с использованием ЭВМ. В этом случае электронный поток представляется в виде совокупности крупных заряженных частиц, и решаются уравнения движения каждой из частиц с учетом воздействия на неё электрических полей, создаваемых всеми остальными частицами. При курсовом проектировании используется аналитический метод расчета процесса группирования, основанный на решении уравнения колебаний.

Если промодулированный электронный поток движется вдоль оси  со скоростью , то за счет сил электростатического взаимодействия между электронами в нем возможно возникновение колебаний, которые в подвижной системе координат (движущейся со скоростью ) могут быть описаны уравнением:

, где  − частота колебаний электронного потока бесконечного сечения (плазменная частота),  − заряд и масса электрона,  − электрическая постоянная,  − плотность объемного заряда.

Для электронного потока конечного сечения, ограниченного проводящим экраном (пролетной трубой), часть силовых линий поля объемного заряда замыкается на экран, поэтому силы продольного расталкивания, а следовательно и частота колебаний, уменьшаются, и частоту  следует в уравнении заменить на , где  − частота колебаний электронного потока конечного сечения,  − коэффициент редукции, характеризующий ослабление продольных сил расталкивания.

Уравнение колебаний обычно записывается в безразмерных координатах: .

Здесь  − относительное смещение электрона, ,  − параметр расталкивания,  − круговая частота усиливаемого сигнала,  – начальный момент времени.

Задав в качестве начальных условий смещение и скорость электронов в подвижной системе координат и решая уравнение колебаний, получим зависимости  и . Тем самым находится изменение длины электронного уплотнения (по смещению его крайних слоев) и переменной скорости электронов  по мере движения сгустка в пролетной трубе. В результате можно определить величину переменного тока и остаточную скоростную модуляцию в конце пролетной трубы (в сечении последующего резонатора).

Исследование процессов группирования в пролетных трубах позволяет рассчитать схему клистрона (количество каскадов, длины пролетных труб) по его выходным электрическим параметрам.

# **Расчет пролетного клистрона по заданным выходным параметрам**

Исходные данные для расчета:

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| **Pвых, Вт** | **η** | **µ** | **λ [м]** |
| **90** | **0,5** | **60000** | **0,11** |

По заданным значениям выходной мощности , КПД , коэффициента усиления  и длины волны  можно рассчитать основные параметры клистрона.

В начале расчета зададимся величинами микропервеанса, коэффициента заполнения пролетной трубы электронным потоком, коэффициента токопрохождения и приведенного радиуса пролетных труб:

Микропервеанс p =**1,3** мкА/

Коэффициент токопрохождения δ=**0,85**

Приведенный радиус пролетной трубы =**0,85** рад

Коэффициент заполнения *b/a*=**0,8**

Расчет электрических параметров клистрона:

Так как в исходных данных приведена:

**Вт**

Отсюда, напряжение:

**≈ 1688 В**

Ток пучка:

Исходя из выбранного приведенного радиуса пролетной трубы =**0,85**, найдем радиус пролетной трубы:

,

Где – круговая частота

Немодулированная скорость движения потока:

Справочные данные:

Заряд электрона **e** = 1.602

Масса электрона

Скорость света

Отсюда, радиус пролетной трубы:

Для определения длин пролетных труб необходимо рассчитать величину собственной частоты колебаний электронного потока . Величины  и  вычисляются по следующим формулам:

,

где *,*

*,*

где – функция Бесселя первого рода первого порядка.

радиус электронного потока

Плотность тока пучка:

Круговая плазменная частота:

Функция Бесселя первого рода:

Далее необходимо найти собственную частоту колебаний электронного потока:

**1,5×109 рад/с**

Степень группирования электронного потока характеризуется параметром группирования , где  − коэффициент скоростной модуляции,  – параметр расталкивания. Максимальное значение  достигается при , где  − приведенная длина пролетной трубы ( − расстояние между центрами зазоров соседних резонаторов).

Параметр расталкивания:

В последнем каскаде клистрона, где процесс группирования существенно не линеен, собственная частота меняется в процессе группирования (увеличивается) и для расчета длины последней пролетной трубы необходимо пользоваться условием , где  - усредненное значение параметра расталкивания: , т. е. .

Приведенная длина трубок дрейфа 1,2,3:

Расстояние между центрами зазоров резонаторов:

Количество резонаторов в клистроне определяется общим коэффициентом усиления  и коэффициентом усиления одного каскада . Коэффициент усиления *i*-го каскада равен

,

где  − коэффициент взаимодействия электронного потока с резонатором,  − проводимость электронного потока по постоянному току,  − нагруженное сопротивление резонатора,  − углы расстройки резонаторов.

Для узкополосного клистрона с одинаковыми длинами пролетных труб при синхронной настройке всех резонаторов, кроме предпоследнего, т. е. при настройке резонаторов на частоту сигнала , общее число резонаторов, необходимое для получения заданного коэффициента усиления по мощности , может быть рассчитано по формуле:

.

Число следует дополнить до ближайшего целого числа.

Для определения величины необходимо предварительно рассчитать значения  и . В случае бессеточного зазора резонатора длиной **:**

Коэффициент взаимодействия электронного потока с резонатором:

, где

- коэффициент, учитывающий ослабление поля в зазоре за счет отсутствия сеток,  − модифицированные функции Бесселя нулевого и первого порядка,  − приведенная длина зазора,  − приведенный радиус электронного потока. Коэффициент  учитывает ослабление поля в зазоре за счет отсутствия сеток.

Приведенный радиус электронного потока:

Длина зазора  выбирается из условия минимального относительного провисания электрического поля.

Приведенная длина зазора:

Модифицированная функция Бесселя первого порядка от величины приведенного радиуса электронного потока:

=0,37

Модифицированная функция Бесселя нулевого порядка от величины приведенного радиуса пролетной трубы:

=1,19

Коэффициент, учитывающий ослабление поля в зазоре за счет отсутствия сеток:

, следовательно

Коэффициент взаимодействия электронного потока с резонатором:

Проводимость электронного потока по постоянному току:

Ом-1

Шунтирующая проводимость электронного потока:

= Ом-1

Сопротивление нагрузки резонатора:

Общее число резонаторов:

Число n следует дополнить до ближайшего целого числа.

Величина однородного магнитного поля, обеспечивающего продольную фокусировку электронного пучка от пушки до коллектора, может быть рассчитана по формуле:

,

где  − микропервеанс пучка;  − ускоряющее напряжение, В;  − радиус пучка, см.

# **Расчет резонаторов**

Считаем, что резонаторы стоят вплотную к друг другу, т.е. между резонаторами удвоенная толщина стенок , и используем тороидальные резонаторы с бессеточным зазором.

Толщина стенки пролетной трубы ,

Толщина стенки резонатора

выбрано 0,1 см

Из расчетов известны:

-Радиус пролетной трубы

-Длина зазора

-Расстояние между центрами резонаторов

Для проектирования резонатора необходимо найти:

-Длину резонатора h:

-Радиусы труб образующей резонатор линии :

a/

Этот резонатор можно представить в виде эквивалентной схемы, состоящей из параллельно соединенных индуктивностей и ёмкостей . Так как у нас тороидальный резонатор, можно привести следующие значения эквивалентных индуктивности (нГн) и ёмкости (пФ):

;

;

;

;

;

*.*

Из формул выше получим уравнение:

,

где

где - коэффициент, учитывающий вид зазора.

Коэффициент , был определен из рисунка 2 при параметрах a/r1=0,5 и d/a=0,8.

Вычисляя отдельно левую и правую части последней формулы, как функции отношения и построив их графики, получим графическое решение уравнения в месте пересечения кривых.

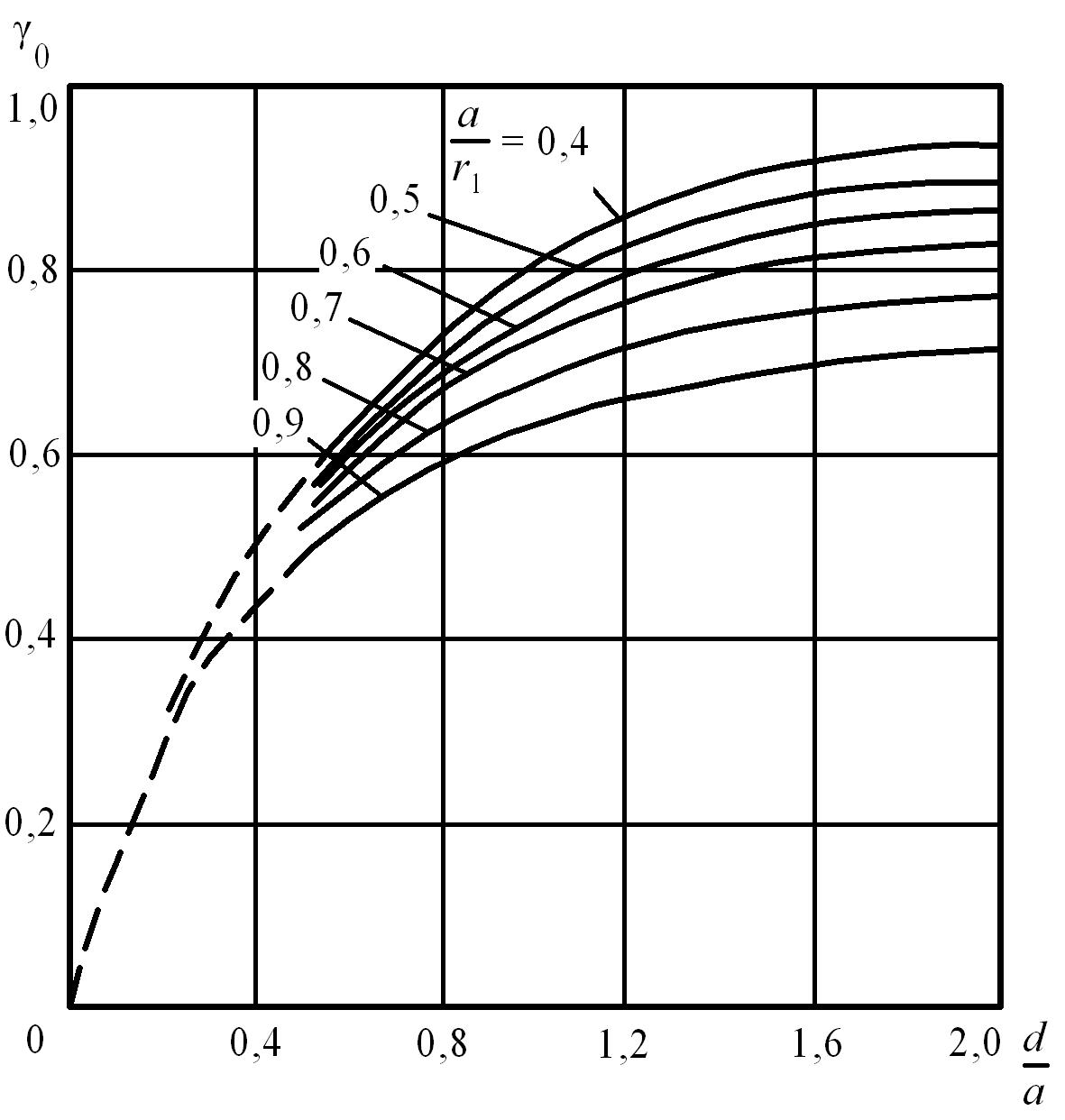


Рисунок 2 - Коэффициент **=** 0,72

Обозначим

Рассчитанные значения представлены в Таблице 1:

ln(**X**) – вторая строка и B(**X**) – третья строка:

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 | 13 |
| 0,693 | 1,099 | 1,386 | 1,609 | 1,792 | 1,946 | 2,079 | 2,197 | 2,303 | 2,485 | 2,639 | 2,772 |
| 2,888 | 2,863 | 2,83 | 2,796 | 2,756 | 2,72 | 2,682 | 2,648 | 2,619 | 2,563 | 2,515 | 2,474 |

По данным Таблицы 1 графики пересекаются при аргументе X=r2/r1 = 11,9.

Определим значение радиуса:

r2=r1×11,9=0,22×11,9=**2,62 см**

= **11,39 нГн**

***пФ***

**см**

**0,17** **пФ**

**пФ**

Погрешность расчета:

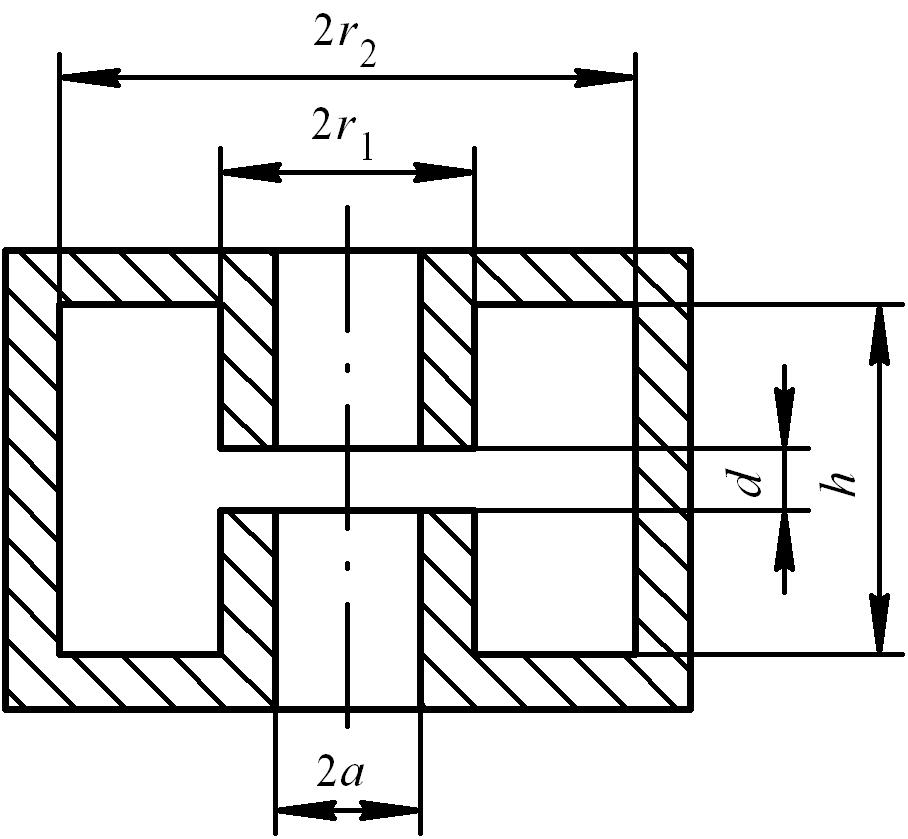
**(λ – λ0)/λ = 2%**

**ВЫВОД**: расчет выполнен верно.

Таблица 2 - Данные необходимые для чертежа резонатора

|  |  |
| --- | --- |
| Данные | мм |
| h | 23 |
| d | 1 |
| 2\*r1 | 4,4 |
| 2\*r2 | 52,4 |
| 2\*а | 2,4 |
| ∆1 | 1,00 |
| ∆2 | 1,00 |

Вид резонатора по расчету:



Конструкция резонаторов:



# **ЗАКЛЮЧЕНИЕ**

В ходе курсового проектирования были закреплены знания методов расчета параметров и характеристик, получены навыки проектирования и конструирования микроволновых вакуумных приборов.

# **СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ**

1. Сушков А. Д. Вакуумная электроника: Учеб. пособие. СПб.: Изд-во «Лань», 2004.
2. Микроволновые приборы и устройства: Методические указания по дисциплине «Микроволновые приборы и устройства» /Сост.: Д. М. Беневоленский, С. М. Мовнин, А. К. Шануренко. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2008.
3. Вакуумные приборы СВЧ: Методические указания к выполнению лабораторных работ / Сост.: Д. М. Беневоленский, Г. П. Гоголев, С. М. Мовнин. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2005.
4. Микроволновые приборы и устройства: Методические указания к лабораторным работам / Сост.: А. Д. Григорьев, В. А. Иванов, А. А. Коломийцев, С. И. Молоковский, В. Б. Янкевич. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2006.