



**КАФЕДРА СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОЙ И  
КВАНТОВОЙ РАДИОТЕХНИКИ (СВЧиКР)**

**Ж.М. Соколова**

# **Микроволновые приборы и устройства**

**Учебно-методическое пособие по организации  
самостоятельной работы студентов  
специальности 210105  
«Электронные приборы и устройства»**

**2010**

Министерство образования и науки Российской Федерации

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ (ТУСУР)**

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой радиотехники  
(СВЧ и КР)

Утверждаю  
Зав. кафедрой СВЧ и КР  
С.Н. Шарангович  
" " \_\_\_\_\_ 2010г.

## **Микроволновые приборы и устройства**

Учебно-методическое пособие по организации  
самостоятельной работы студентов  
специальности 210105  
«Электронные приборы и устройства»

Разработчик: доцент кафедры СВЧ и КР  
\_\_\_\_\_ Ж.М. Соколова

УДК 621.382.63

Рецензент:  
проф. каф. СВЧ и КР

А.Е.Мандель

### **Ж.М.Соколова**

**Микроволновые приборы и устройства:** учебно-методическое пособие по организации самостоятельной работы студентов специальности 210105 - «Электронные приборы и устройства»/ Соколова Ж.М.- Томск: ТУСУР, 2010. - 97с.

Самостоятельная работа формирует важнейшие социально профессиональные компетенции студента.

Цель, преследуемая в данном пособии, достаточно полно и содержательно рассмотреть все виды самостоятельной работы при изучении дисциплины «Микроволновые приборы и устройства».

В пособии приводятся

- программа курса, его цели и задачи. Каждый раздел программы заканчивается методическими указаниями со ссылками на список литературы; темы натуральных лабораторных занятий; вопросы применения балльно-рейтинговой системы к дисциплине; перечень предлагаемых индивидуальных заданий по пяти разделам рабочей программы (банк вопросов и задач прилагаются к методическим указаниям), выполняемых в качестве работ для оценки по БРС. Для успешного выполнения в каждом задании даны некоторые вопросы теории, позволяющие оценить основные рассчитываемые параметры приборов и примеры решения некоторых задач;

-список экзаменационных вопросов;

- учебно – методические материалы по дисциплине;

-приложения, необходимые для выполнения индивидуальных заданий.

Методические указания предназначены для студентов очной, заочной и дистанционной форм обучения и могут быть использованы студентами, обучающимися по направлениям подготовки бакалавриата специальности 210105 - «Электронные приборы и устройства».

УДК 621.382.63

© Томск. гос. ун-т систем упр. и  
радиоэлектроники, 2010

© Соколова Ж.М., 2010

## Оглавление

ВВЕДЕНИЕ .....	5
1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ.....	6
2. СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА.....	9
3. ЛАБОРАТОРНЫЕ ЗАНЯТИЯ.....	14
4.САМОСТОЯТЕЛЬНАЯ РАБОТА.....	15
5.ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ .....	15
5.1.Индивидуальное задание №1 Общие вопросы микроволновых приборов.....	16
5.2.Индивидуальное задание №2 Клинтроны .....	40
5.3.Индивидуальное задание №3 Лампа бегущей волны и лампа обратной волны О - типа .....	49
5.4.Индивидуальное задание №4 Приборы типа М .....	59
5.5.Индивидуальное задание №5 Полупроводниковые приборы и применение СВЧ энергии.....	70
6. МЕТОДИКА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ....	86
7.ГРАФИК РАБОТ ИНДИВИДУАЛЬНЫХ И РАСЧЕТНЫХ ЗАДАНИЙ.....	87
8. ЭКЗАМЕНАЦИОННЫЕ ВОПРОСЫ.....	89
9. УЧЕБНО-МЕТОДИЧЕСКИЕ МАТЕРИАЛЫ ПО ДИСЦИПЛИНЕ.....	90
Приложение А. Основные параметры полупроводниковых материалов.....	92
Приложение Б. Некоторые физические константы.....	93
Приложение В. Данные по величинам функций Бесселя.....	94
Приложение Г. Параметры $\epsilon_r$ , $tq\delta$ и теплоемкости веществ.....	95
Приложение Д. Темы рефератов для презентаций.....	96

## ВВЕДЕНИЕ

Самостоятельная работа студентов является неотъемлемой частью учебного процесса в подготовке квалифицированных специалистов, способных самостоятельно и творчески решать стоящие перед ними задачи.

Самостоятельная работа - способ активного, целенаправленного приобретения студентом новых для него профессиональных знаний и умений без участия в этом процессе преподавателей. Особое значение самостоятельная работа имеет для студентов дистанционного, заочного и вечернего обучения. В ходе самостоятельной работы формируются важнейшие социально-профессиональные знания будущего специалиста.

Предметно и содержательно самостоятельная работа студентов определяется **образовательным стандартом ГОС ВПО** по специальности 210105 (200300) - Электронные приборы и устройства - М. 2001г. и **рабочей программой по дисциплине** «Микроволновые приборы и устройства», утвержденной в ТУСУРе, содержанием учебников, учебных пособий и методических руководств.

К видам самостоятельной работы относятся:

- систематическое чтение и конспектирование литературы;
- выполнение индивидуальных расчетных заданий;
- подготовка к лабораторным занятиям;
- самостоятельное углубленное изучение узловых вопросов, отмеченных в рабочей программе;
- написание рефератов по отдельным разделам курса;
- изготовление презентаций по новейшим вопросам курса, недостаточно полно представленным и в учебной литературе;

Преподаватель знакомит студентов с рабочей программой курса, списком литературы, методикой работы над литературой, методикой составления тезисов, докладов и рефератов, составлением презентаций.

Кафедра, обеспечивающая указанную дисциплину, организует консультации, приглашает студентов на обсуждение рефератов, в которых освещаются проблемные материалы, на выставки рекомендованной литературы, пропагандирует наглядные пособия, стенды, видеофильмы. В пользование студентам представляются библиографические списки, в том числе в электронном виде, отечественные и зарубежные. Кафедра организует лекции с приглашением специалистов - практиков и посещение предприятий, владеющих современными технологиями и аппаратурой по эксплуатации и измерениям микроволновых приборов.

Для реализации самостоятельной работы студентам предлагаются:

- информационные ресурсы (справочники, учебные пособия);
- методические материалы (описания лабораторных работ, банк задач);
- контролирующие материалы (тесты);
- материальные ресурсы (ПК, измерительное оборудование);
- консультации преподавателей;
- возможность публичного обсуждения теоретических или практических результатов, полученных студентом самостоятельно (коллоквиум, конференции, олимпиады, конкурсы);

Контролируемая самостоятельная работа направлена на углубление и закрепление знаний студентов, развитие аналитических навыков по проблематике курса.

Пособие разработано в соответствии с рекомендациями по организации самостоятельной работы студентов (письмо Минобразования РФ от 27.11.2002 - "Об активизации самостоятельной работы студентов высших учебных заведений").

## **1. ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ ДИСЦИПЛИНЫ.**

### **1.1 Цели и задачи дисциплины**

**Целью** изучения дисциплины является знакомство студентов с особенностями конструктивного оформления микроволновых приборов, широко применяющихся в диапазоне длин волн от нескольких дециметров до 0,1 миллиметра в качестве генераторов, усилителей, преобразователей частоты и мощности; с принципами работы различных видов микроволновых приборов, их характеристиками, методами расчета и оптимизации параметров. Рассматриваются эксплуатационные характеристики.

**Основные задачи** изучения дисциплины – формирование профессиональных компетенций будущих инженеров посредством изучения общих принципов, положенных в основу работы типовых микроволновых приборов (формирование электронными пушками или катодами конвекционных токов; создание и способы увеличения наведенных токов, электромагнитные поля в электродинамических системах; отбор энергии этими СВЧ полями у электронных потоков).

### **Формирование социально-профессиональных компетенций в ходе изучения дисциплины.**

В ходе самостоятельного решения учебных задач формируются важнейшие социально-профессиональные компетенции будущего специалиста: умение работать с информацией, принимать решения, планировать свою деятельность, осуществлять необходимые социальные взаимодействия.

В рамках личностного блока единой социально-профессиональной компетентности у студентов формируются такие качества, как ответственность, самостоятельность, организованность, целенаправленность, социальная адаптивность и способность к решению нестандартных задач (креативность).

В рамках социального блока развиваются информационно – технологическая компетенция, а также коммуникативная и компетенция социального взаимодействия. Особое внимание уделяется развитию собственно профессиональных компетенций.

Профессиональный блок предполагает развитие у студентов умений адекватно решать технические, расчетно-проектные, экспериментально - исследовательские и эксплуатационные задачи в области микроволновых приборов.

В результате самостоятельной работы по дисциплине у студентов формируется структура профессиональной компетентности, включающая знания, опыт,

умения и навыки, а также ценностное – смысловое отношение к будущей профессиональной деятельности.

## 1.2 Требования к уровню освоения содержания дисциплины

В результате изучения дисциплины студенты должны:

- *иметь представление* о наиболее перспективных микроволновых приборах для применения в конкретных условиях;
- *знать* современные тенденции развития микроволновых приборов, их конструкции, параметры и характеристики, основы технической эксплуатации;
- *уметь* использовать полученные знания для расчета и проектирования систем с микроволновыми приборами с учетом требований быстродействия, надежности, технологичности и удобства технической эксплуатации;
- *приобрести навыки* работы с приборами и СВЧ аппаратурой;
- *сформировать* позитивное смысловое отношение к использованию микроволновых приборов в системах различного назначения.

## 1.3. Перечень обеспечивающих дисциплин.

Данная дисциплина базируется на знаниях, полученных студентами в процессе изучения следующих дисциплин: «Физика», «Высшая математика», «Микроволновая электродинамика», «ТОЭ», «Электронные и полупроводниковые приборы», «Технология ЭВП» и др..

## 1.4 Объем дисциплины и виды учебной работы

Дисциплина изучается в 8-м семестре.

Вид учебной работы	Всего часов
Общая трудоемкость дисциплины	140
Лекции	48
Лабораторные занятия	16
Самостоятельная работа	76
Вид итогового контроля	Экзамен

## 1.5 Разделы дисциплины и виды занятий

№ п/п	Раздел дисциплины	Лекции (48 час)	Лаб. занятия (16 час)
1	Введение. Микроволновый электронный	3	

	прибор – преобразователь энергии		
2	Методы управления потоками заряженных частиц. ЭОС	3	
3	Отбор энергии от потока заряженных частиц. Электродинамические системы микроволновых приборов .	6	
4	Микроволновый прибор как элемент схемы. Понятие о компьютерном моделировании	4	
5	Клистроны пролетные - усилительные, генераторные, умножители частоты. Перспективы развития.	6	4
6	Лампы бегущей и обратной волны типа -О в разных режимах работы.	6	4
7	Магнетрон – резонансный прибор типа – М с замкнутым электронным потоком.	6	4
8	Не резонансные приборы типа – М с разомкнутым и замкнутым электронным потоком	4	
9	Полупроводниковые диоды с отрицательным динамическим сопротивлением	6	4
10	Полупроводниковые диоды с положительным сопротивлением	2	
11	Биполярные и полевые транзисторы.	2	

## 2. СОДЕРЖАНИЕ ЛЕКЦИОННОГО КУРСА

### 2.1. Введение – 1 час.

Определение микроволнового диапазона и задачи, стоящие перед дисциплиной. Основные особенности и классификация приборов по типам электродинамических систем, по режимам работы, по типам электромагнитных полей. Применение СВЧ энергии.

*Методические указания к разделу «Введение».* Необходимо четко представлять особенности микроволнового диапазона и конструктивные особенности микроволновых приборов, и вопросы применения СВЧ энергии.

Материал следует изучать, используя [1, 2, 3, 4].

### 2.2. Общие физические процессы в микроволновых приборах -14 час

#### 2.2.1. Микроволновый электронный прибор – преобразователь



энергии – 3час.

Основные уравнения, характеризующие взаимодействие заряженных частиц с электромагнитными полями. Пролетные явления как фактор, ограничивающий быстродействие твердотельных приборов и определяющий конструкцию электродинамической системы микроволновых приборов. Наведенные токи во внешней цепи при движении свободных зарядов. Возможность использования статических вольтамперных характеристик при анализе твердотельных приборов.

#### 2.2.2. Электроннооптические системы формирования потоков заряженных частиц - 2час.

Электронные пушки – системы, формирующие длинные электронные потоки, заданных форм поперечного сечения, плотности тока и скорости на выходе. Особенности пушек Пирса, Мюллера, Тренивой, пушек короткой оптики для приборов М-типа. Фокусировки в электронных потоках.

#### 2.2.3. Методы управления потоками заряженных частиц —2часа

Метод электростатического (квазистатического) управления потоками заряженных частиц (триоды, полупроводниковые СВЧ диоды). Метод динамического управления. Скоростная модуляция в электронных потоках. Группировка носителей заряженных частиц. Преобразования в потоках. Спектральный состав конвекционного тока, позволяющий использовать для разных режимов работы один и тот же прибор.

#### 2.2.4. Отбор энергии от потока заряженных частиц —2час.

Условия отбора энергии от потока заряженных частиц. Требования к параметрам электродинамических систем в приборах резонансного и не резонансного типов для наилучшей отдачи потоками энергии.

#### 2.2.5. Электродинамические системы микроволновых приборов – 2час.

Резонаторы с зазорами и их модификации, резонаторы бегущих волн – основные типы колебательных систем резонансных микроволновых приборов. Параметры резонаторов и их эквивалентные схемы.

Замедляющие системы (ЗС) – электродинамические системы приборов с длительным взаимодействием. Параметры и характеристики ЗС, определяющие работу микроволнового прибора. Типы ЗС и их применение. Возбуждение электродинамических систем потоками заряженных частиц.

#### 2.2.6. Микроволновый прибор как элемент схемы— 3час.

Эквивалентные схемы микроволновых приборов и их анализ. Баланс фаз и баланс амплитуд. Электронная проводимость и ее определяющая роль в работе прибора. Проводимость нагрузки и ее влияние на выходные параметры. Нагрузочные характеристики приборов и методы их экспериментального исследования. Особенности работы приборов не резонансного типа. Основные характеристики и параметры генераторов и усилителей.

### 2.2.7. Компьютерное моделирование и проектирование микроволновых приборов и устройств -2 час.

Обзор методов, применяемых для моделирования на ПК микроволновых приборов. Расчет траекторий электронов, группировка их в нелинейном режиме. Оптимизация выходных параметров. Пример расчета СВЧ генератора или усилителя.

#### **Методические указания к разделу 2.2.:**

В результате изучения этого раздела студенты должны **усвоить**:

- как в любом микроволновом приборе происходит преобразование энергии постоянного источника в энергию СВЧ колебаний;
- что для преобразования энергии требуется поток заряженных частиц (ПЗЧ), электродинамическая система, имеющая определенное сопротивление или проводимость, внешняя нагрузка;
- понятие и выражение наведенного тока, текущего во внешней цепи электродинамической системы и отстающего на определенный угол от переменного напряжения;
- что для отбора энергии у ПЗЧ необходимо тормозящее поле и сгруппированный поток носителей;
- научиться составлять эквивалентные схемы приборов и уметь проводить их анализ, получая оптимальные параметры прибора;
- понимать методы, применяемые для моделирования на ПК микроволновых приборов.

Это очень важный для усвоения последующих разделов курса материал.

Необходимо понять физику и математическую основу описания процессов взаимодействия переменных электромагнитных полей и потоков электронов (ПЗЧ). Материал можно изучать, используя основную [1], а также дополнительную любую литературу [2, 3, 4, 6, 12, 15, 16, 17].

## **2.3. Микроволновые приборы, использующие динамическое управление электронным потоком — 22 час.**

### 2.3.1. Клистроны - 6 час.

Особенности клистронов и их разновидности. Пролетные 2-х резонаторные клистроны: принцип действия, элементарная кинематическая теория, выходная мощность. Применение клистронов в качестве усилителя, умножителя частоты, генератора. Характеристики и параметры. Многорезонаторные пролетные клистроны: конструкции и перспективы развития \*.

Отражательные клистроны. Принцип действия, краткая теория, технические характеристики и параметры отражательного клистронов (КПД, зоны генерации, электронная настройка). Конструкции отражательных клистронов \*.

### 2.3.2. Лампы бегущей волны и лампа обратной волны типа -О - 6 час.

Схема устройства ЛБВ и ЛОВ типа -О (ЛБВО и ЛОВО). Принцип действия. Линейная теория. Характеристики и параметры ЛБВО и ЛОВО. Коэффициент по-

лезного действия и способы его повышения. Миниатюризация ламп\*. Основные конструкции и их характеристики.

### 2.3.3. Магнетрон – резонансный прибор типа – М с замкнутым электронным потоком –6 час.

Классификация магнетронов. Виды колебаний в резонаторной системе магнетронов. Разделение видов колебаний Структура электромагнитного поля в пространстве взаимодействия и группировка ПЗЧ. Режимы работы и условия самовозбуждения магнетрона. Основные характеристики и параметры, их зависимость от конструкций прибора и режима питания. Коаксиальные, обращенные магнетроны и митроны, особенности конструкций и изменения в выходных параметрах приборов.\*

### 2.3.4. Не резонансные приборы типа – М с разомкнутым и замкнутым потоком –4 час.

Схема устройства ЛБВ и ЛОВ типа М. Принцип действия. Методы анализа, характеристики и параметры ЛБВМ и ЛОВМ. Основные конструкции и их особенности\*. Каскадирование ЛБВМ и ЛОВМ.

Платинотроны – мощные приборы, работающие в режиме насыщения, с катодом в пространстве взаимодействия. Условия работы. Дисперсионная характеристика прибора в горячем режиме. Полоса рабочих частоты перестройка частоты напряжением.

### *Методические указания к разделу 2.3.*

В результате изучения этого раздела студенты должны **знать** устройство микроволновых приборов;

**понимать и различать** особенности принципов действия усилителей (клинотроны, платинотроны, ЛБВ) и генераторов (магнетроны, ЛОВ, клинотроны);

**понимать**, как работает в них принцип динамического управления электронными потоками, как осуществляется взаимодействие потоков с электромагнитными полями электродинамических систем и передача энергии;

**уметь оценивать** выходные параметры одного и того же прибора, работающего в разных режимах (усиление, генерация и умножение частоты),

**понимать** способы оптимизации параметров;

**понимать** определяющую связь конструкции прибора и выходных параметров и видеть, например, за счет чего получают высокие КПД и выходные мощности ( $P_{\text{вых}}$ ) в приборах М - типа;

**понимать** энергетические возможности процессов модификации в микроволновых приборах с динамическим управлением.

Основная [1] и дополнительная литература [2, 3, 4, 5, 6, 9, 11, 13, 14, 18], в которой достаточно хорошо излагаются вопросы этого раздела программы.

### 2.4. Микроволновые приборы с квазистатическим управлением электронным потоком –12 час.

2.4.1. Полупроводниковые диоды с положительным динамическим сопротивлением—2 час.

Детекторные и смесительные приборы СВЧ. Схемы включения. Основные параметры и характеристики. Переключательные и р-і-п диоды. Особенности работы в схемах. Требования к параметрам в случае различных схем включения.

2.4.2. Полупроводниковые диоды с отрицательным динамическим сопротивлением—6 час.

Лавинно пролетные диоды в режиме генерации. Эквивалентные схемы диода и генератора. Наведенный и пусковой токи. Выходная мощность и способы ее повышения.

Генераторы на диодах Ганна. Условия возбуждения. Режимы работы, рабочая частота и выходная мощность.

Усилители на полупроводниковых диодах, особенности схемы усилителей и условий работы. Коэффициент усиления и его оптимизация\*.

Схемы генераторов и усилителей на туннельном диоде. Особенности и характеристики.

2.4.3. Биполярные и полевые транзисторы—2 час.

Устройство и эквивалентные схемы транзисторов СВЧ. Микроволновые схемы и основные характеристики приборов на транзисторах. Перспективы развития и применения.

**Методические указания к разделу 2.4.** При изучении материала этого раздела студенту необходимо

**получить** представление об устройствах генераторов и усилителей на полупроводниковых приборах с квазистатическим управлением носителями зарядов, имеющих отрицательное динамическое сопротивление;

**знать и понимать** требования, предъявляемые к размерам и электрическим параметрам диодов. Уметь применять их для оценки работоспособности в разных режимах генерации и на разных частотах.

**иметь** понятие о способах расчета выходных параметров активных устройств на диодах. представление о конструктивных особенностях транзисторов СВЧ и некоторых схемах микроволновых устройств их использующих, особенностях работы и областях применения. Достаточно подробно эти вопросы изложены в [1, 2, 3, 6].

### **3. Лабораторные работы - 16 часов**

Целью проведения и выполнения лабораторных работ являются:

– углубленное освоение студентами теоретических положений изучаемой дисциплины «МВП и У»;

– изучение особенностей схем экспериментального исследования и функционирования микроволновых приборов и устройств;

- освоение приемов, методов измерения параметров МВП и У;
- усвоение приемов, методов и способов обработки, представления и интерпретации результатов проведенных исследований.

При выполнении лабораторной работы студент должен продемонстрировать:

- владение соответствующими понятиями и терминологией;
- знание основных параметров и режимных характеристик приборов и устройств по тематике лабораторной работы;
- знакомство с учебно-методической и дополнительной литературой по данной теме, и с образцами основных типов микроволновых приборов.

### Список натуральных лабораторных работ

3.1.	Исследование отражательного клистрона	4 часа.
3.2	Исследование усилителя на ЛБВО	4 часа.
3.3.	Исследование генератора на ЛБВО	4 часа.
3.4.	Исследование генератора на ЛОВО	4 часа.
3.5.	Исследование магнетрона	4 часа.
3.6.	Исследование генератора на диоде Ганна	4 часа.

Выполняется любые четыре работы.

Продолжительность каждой работы указана.

**Методические указания к лабораторным работам [10]** и требования к отчетам хорошо описаны в каждом пособии по выполнению. Материалы представлены в локальной сети кафедры СВЧ и КР в разделе с методическими материалами по курсу МВП и У и в библиотеке ТУСУР а.

Для студентов дистанционной формы обучения предложены две компьютерные контрольные работы вместо лабораторных работ, включающие каждая по четыре теоретических вопроса и шесть задач. Компьютерные контрольные работы включают отдельные вопросы установок и методик экспериментального исследования параметров приборов.

### 4. Самостоятельная работа - 76 часов.

№ п/п	Наименование работ	Кол-во часов	Форма контроля
1.	Проработка лекционного материала	24	Рейтинг. Экзамен.
2.	Подготовка к лабораторным работам и выполнение отчетов	12	Отчет. Рейтинг.
3.	Изучение вопросов теории, отданных на самостоятельную проработку (отмечены значком * в разделе 2 программы).	12	Реферат. Рейтинг - контроль. Экзамен.
4	Выполнение индивидуальных заданий	28	Инд. отчеты в

	(упражнений, задач, вопросов по теории или разработка материалов для компьютерных лабораторных исследований некоторых характеристик микроволновых приборов или устройств, или разработка тестовых вопросов по указанной тематике для промежуточного компьютерного контроля знаний).		письменной форме, разработанные электронные варианты. Реферат. Рейтинг.
	Всего часов самостоятельной работы по дисциплине	76	

Формой отчетности по разделам самостоятельной работы (п.п. 2 - 4) является отчет, реферат, материалы в электронном виде. Объем реферата от 8 до 10 печатных страниц, отчета – произвольное число.

При оценке **вашего** труда преподавателя интересует:

- -соответствие содержания заданной теме;
- -глубина проработки материала;
- -оригинальность компьютерных решений и предложений;
- -правильность и полнота использования источников;
- разумные пояснения при решении индивидуальных задач;
- выводы по результатам;
- оформление реферата.

## 5.ИНДИВИДУАЛЬНЫЕ РАСЧЕТНЫЕ ЗАДАНИЯ

**Индивидуальное расчетное задание имеет цель:** закрепление и проверка знаний, получаемых в течение семестра, по основным разделам лекционного курса и возможность их применения при решении практических задач. Это домашняя контрольная работа, включающая вопрос по теории и задачу по разделу.

При написании контрольной работы удобнее всего пользоваться рекомендованными преподавателем (в программе курса) учебниками и конспектами лекций, так как вопросы и задачи контрольной составляются на основе стандартной программы курса обучения.

Индивидуальное задание еще не предполагает навыков исследовательского умения, ответы на вопросы должны демонстрировать добротные знания и понимание существа рассматриваемых вопросов. Решение задач дает возможность оценить последовательность расчета параметров и их величину.

Номера индивидуальных заданий из банка заданий выдаются преподавателем после прохождения соответствующей темы на лекциях. Материал для выполнения расчетного задания достаточно подробно изложен в указанной литературе к каждому разделу программы [1 - 18].

Студент, по своему желанию, может выполнять одну из тем реферата для презентации (приложение Д, поскольку она представляет полный расчет прибора) вместо трех индивидуальных работ. Но при этом помнить, что работа должна

иметь три периода контроля. Студенту требуется составить календарный план работ по выбранной теме, включающий отчетные этапы и согласовать его с преподавателем. Результат каждого этапа оценивается перед первой контрольной точкой, второй и в конце семестра.

Особое значение индивидуальное расчетное задание приобретает для студентов дистанционного образования и заочной формы обучения, так как требует сосредоточенной работы над вопросами изучаемого курса, что помогает включиться в круг проблем данной дисциплины.

## 5.1. Индивидуальное задание №1

### Общие вопросы микроволновых приборов - раздел программы - 2.2.

#### 5.1.1. Основные вопросы теории

К общим вопросам, касающимся любого СВЧ прибора, следует отнести процессы преобразования в электронных потоках (носителях заряда), которые происходят при движении последних в постоянных и переменных электрических и магнитных полях. Изменяются при этом скорости электронов (носителей заряда) траектории движения; плотность их в потоке, время и угол пролета в пространствах взаимодействия. Во внешних цепях приборов при движении электронов возникают и изменяются наведенные токи, что определяет выходные параметры прибора. Внешние цепи это электродинамические системы с электромагнитными полями: разнообразные резонаторы и замедляющие структуры, имеющие свои определенные параметры, которые входят в выходные параметры приборов. Ниже приводятся некоторые основные расчетные соотношения, касающиеся параметров движения электрона в электромагнитных полях [1,2,4], которые студенты должны знать, чтобы решать задачи этого задания.

**Уравнение движения заряженной частицы**, движущейся в электромагнитных полях, имеет вид

$$\frac{d(M \cdot \bar{V})}{dt} = q \{ \bar{E} + [\bar{V} \cdot \bar{B}] \} = \bar{F}_e + \bar{F}_m . \quad (1.1)$$

Уравнение характеризует действие электрической  $\bar{F}_e$  и магнитной  $\bar{F}_m$  сил на заряд  $q$  массой  $M$ . Для одиночного электрона следует положить  $q = -e$ ,  $M = m$ .

При прохождении электрического поля с потенциальной энергией  $eU_0$  электрон приобретает кинетическую энергию  $0,5 \cdot m \cdot V^2$ . Из равенства этих энергий определяется скорость электрона в постоянном поле:

$$V_0 = \sqrt{2eU_0/m} = 5,95 \cdot 10^5 \sqrt{U_0} , \quad (1.2)$$

где  $U_0$  – постоянное напряжение между электродами, на выходе из которых определена скорость электрона  $V_0$ .

При движении между двумя плоскими электродами, находящимися на расстоянии  $d$  друг от друга, к которым приложено напряжение  $U_0$  в режиме насыщения, электрону потребуется так называемое время пролета

$$\tau = d \cdot \sqrt{\frac{2m}{eU_0}} , \quad (1.3)$$

а с учетом пространственного заряда  $\tau_p = 1,5\tau$ .

Для твердотельных приборов [5,8] в случае дрейфового движения носителей заряда в объеме полупроводника при равномерном распределении электрического поля время пролета равно

$$\tau_{др} = \frac{d}{\mu U_0} = \frac{d^2}{V_{др}}, \quad (1.4)$$

где  $\mu$  – подвижность носителей, (см. приложение 1);  $d$  – протяженность пролетной области. Скорость дрейфового движения носителей заряда равна

$$V_{др} = \frac{\mu U_0}{d} = \mu E. \quad (1.5)$$

При баллистическом (бесстолкновительное) движении носителей заряда в твердотельных приборах время пролета  $\tau_{бал}$  совпадает по форме с (1.3), но  $m$  будет являться эффективной массой носителей заряда.

В случае установившегося диффузионного переноса зарядов за счет неоднородности распределения их концентрации в пространстве твердотельного прибора время пролета  $\tau_{диф}$  имеет вид

$$\tau_{диф} = \frac{d^2}{2D_n} = \frac{d^2 \cdot e}{2\mu_n kT}, \quad (1.6)$$

где  $D_n$  – коэффициент диффузии электронов;  $\mu_n$  – подвижность электронов,  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  Дж/град – постоянная Больцмана;  $T$  – абсолютная температура.

Отношение времени пролета носителей к периоду колебания умноженное на  $2\pi$ , чтобы получить значения в радианах или градусах, называется углом пролета  $\theta$  [3], имеет вид:

$$\theta = 2\pi \frac{\tau}{T} = \omega\tau, \quad [\text{рад}], \quad \theta = 360^\circ \tau/T, \quad [\text{град}]. \quad (1.7)$$

Так как рассматриваемые приборы работают в СВЧ диапазоне, то все переменные величины определяются фазовыми соотношениями  $\omega\tau$  или углом пролета  $\theta$ .

### Токи в микроволновых приборах

Наведенный во внешней цепи любого прибора ток определяется уравнением Шокли – Рамо

$$i_{нав} = q \frac{(\bar{E} \cdot \bar{V})}{U}. \quad (1.8)$$

Для плоского зазора пронизываемого зарядом  $q$ , имеющим скорость  $\bar{V}$ , при напряжении  $U = Ed$ , величина наведенного тока равна

$$i_{нав} = \frac{qV}{d} = \frac{qV}{w}, \quad (1.9)$$

где  $d, w$  – разные и допустимые обозначения ширины зазора.

Полный ток во внешней цепи определяется суммой наведенного и емкостного токов

$$i_{пол} = i_{нав} + C \frac{dU}{dt}, \quad (1.10)$$

где  $C$  – емкость зазора.



Если во внешней цепи двухэлектродного промежутка будет включено активное сопротивление  $R$  при отсутствии сторонней ЭДС, то по закону Ома появится мгновенное наведенное напряжение

$$U_n = i_{\text{нав}} \cdot R = \frac{qV}{d} \cdot R \quad (1.11)$$

Для протекания во внешней цепи зазора тока, необходимо движение в зазоре конвекционного тока  $i_{\text{кон}}$  или объёмного заряда. Объёмная плотность движущихся зарядов должна быть модулирована по плотности с частотой  $\omega$ ,

$$\rho = \rho_0 + \rho_m \sin \omega t,$$

а конвекционный ток, соответственно,

$$i_{\text{кон}} = \rho VS = I_0 + I_m \sin \omega t,$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения потока. Наведенный ток в этом случае определяется

$$i_{\text{нав}} = I_0 + I_m \cdot M \sin \omega t_0. \quad (1.12)$$

Через  $M$  обозначен коэффициент электронного взаимодействия потока носителей заряда с полем зазора, величина которого зависит от угла пролета  $\theta$  (1.7) и определяется соотношением вида

$$M = \frac{\sin 0,5 \cdot \theta}{0,5 \cdot \theta}. \quad (1.13)$$

В реальных приборах конвекционный ток или ток переноса носителей имеет не гармонический характер. Чтобы воспользоваться соотношением (1.12), функцию тока представляют в виде гармонического ряда Фурье

$$i_{\text{конв}} = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)] \quad (1.14)$$

Коэффициенты взаимодействия  $M_n$  для каждой гармоники различные и равны

$$M_n = \frac{\sin(0,5n \cdot \theta)}{0,5n \cdot \theta}. \quad (1.15)$$

Наведенный ток в этом случае определяется в виде

$$i_{\text{нав}} = I_0 + \sum_{n=1}^{\infty} M_n [A_n \sin(n\omega t) + B_n \cos(n\omega t)] \quad (1.16)$$

### Резонаторы для микроволновых приборов [4,6,7,9]

Для приборов СВЧ в основном используются резонаторы с узкими зазорами, через которые проходит поток носителей. Размер зазора определяется величиной коэффициента электронного взаимодействия -  $M$  (1.13) и, соответственно, углом пролета  $\theta$  (1.7). К таким резонаторам относятся: тороидальные (рис. 1.1а), коаксиальные сосредоточенной емкостью (рис. 1.1б), призматические с укорачивающей емкостью, многозазорные, магнетронные (рис 1.2) и различные их модификации.

Основные параметры резонаторов: **резонансная длина волны  $\lambda_0$**  или резонансная круговая частота  $\omega_0$  или частота  $f_0$ , которые определяются типом волны и геометрией резонатора; **активная проводимость  $G_0$** , характеризующая активные

потери в резонаторе; **собственная или ненагруженная добротность  $Q_0$** , которая определяется активной и реактивной проводимостями резонатора.

Параметры  $\lambda_0 G_0$ ,  $Q_0$  могут полностью заменить собой эквивалентные параметры  $L, C, R$  контуров низкочастотной радиотехники. При определении собственных параметров резонатор предполагается изолированным от внешних нагрузок. Влияние внешних нагрузок учитывается дополнительно в понятии внешней  $Q_{вн}$  и нагруженной  $Q_{н}$  добротностях:

$$Q_0 = \omega_0 \frac{W_0}{P_{пот.р}}, \quad Q_{вн} = \omega_0 \frac{W_0}{P_{пот.нагр.}}, \quad Q_{н} = \omega_0 \frac{W_0}{P_{пот.р} + P_{пот.нагр.}}. \quad (1.17)$$

В формулах (1.17)  $W_0$  – запасенная энергия в резонаторе;  $P_{пот.р}$  – мощность потерь в стенках резонатора;  $P_{пот.нагр.}$  – мощность потерь в нагрузке.

Добротности (1.24) связаны уравнением

$$\frac{1}{Q_{н}} = \frac{1}{Q_0} + \frac{1}{Q_{вн}}, \quad (1.18)$$

а добротность  $Q_0$  рассчитывается с помощью соотношения [3]

$$Q_0 = \frac{2 \int_V |H|^2 dV}{\delta \oint_S |H_t|^2 dS},$$

где  $\delta$  – глубина проникновения поля в стенке резонатора;  $|H|$  – величина магнитного поля в объеме резонатора;  $|H_t|$  – величина тангенциального магнитного поля на стенках резонатора;  $V$  – объем резонатора;  $S$  – площадь поверхности стенок;

Для измерения добротностей  $Q_0, Q_{вн}$  и  $Q_{н}$  резонаторов – двухполюсников рекомендуется [1] использовать выражения, связывающие добротности с проводимостями резонатора, в виде соотношений

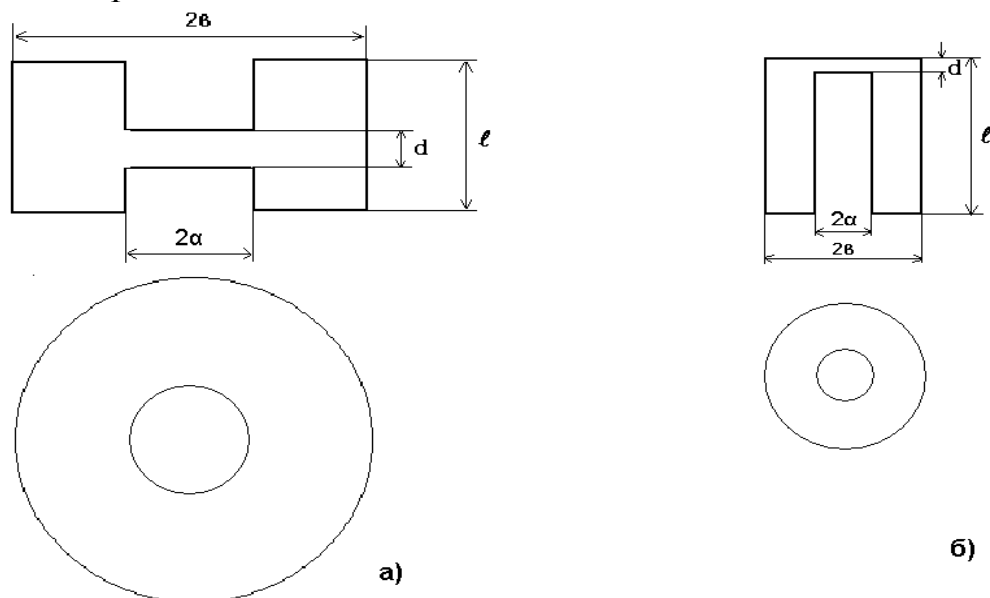


Рисунок 1.1 Типы резонаторов СВЧ приборов

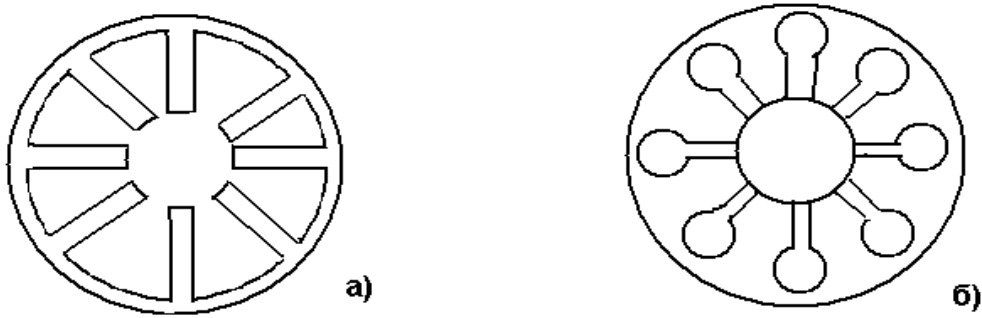


Рисунок 1.2. Магнетронные резонаторы: а – секторообразные, б – щель – отверстие.

$$Q_0 = \frac{\omega_0}{2G_0} \left( \frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega \rightarrow \omega_0}, \quad Q_H = \frac{\omega_0}{2(G_0 + G_H)} \left( \frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega \rightarrow \omega_0}, \quad (1.19)$$

где  $G_H$  – активная проводимость нагрузки;  $\left( \frac{dB}{d\omega} \right)_{\omega \rightarrow \omega_0}$  – скорость изменения

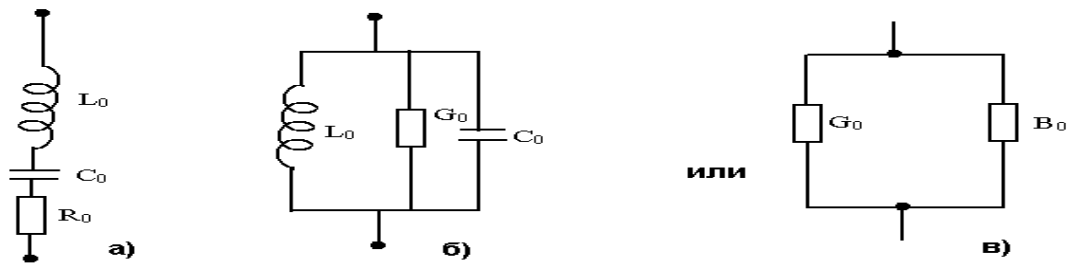


Рис.1.3. Варианты эквивалентной схемы полого резонатора: а) – последовательная схема; б, в) – параллельная схема.

реактивной проводимости вблизи резонансной частоты.

В микроволновом диапазоне при анализе работы генераторов и усилителей предпочтительнее параллельная схема резонатора (рис. 1.3в), где  $B_0 = \omega C_0 - \frac{1}{\omega L_0}$ , хотя схемы рис. 1.3а) и б) также применяются.

Активная проводимость определяется выражением

$$G_0 = \sqrt{\frac{\omega \mu_{ст}}{2 \sigma_{ст}}} \frac{\oint_S |H_t|^2 dS}{\left\{ \int_a^b \bar{E} d\bar{l} \right\}^2}, \quad (1.20)$$

здесь  $\mu_{ст}$  – абсолютная магнитная проницаемость стенок резонатора;

$\sigma_{ст}$  – удельная проводимость материала стенок резонатора.

В случае электронных СВЧ приборов  $G_0$  определяется по отношению к тем точкам, в которых резонатор пронизывается электронным потоком, и составляет  $10^{-3} - 10^{-5} 1/\text{Ом}$ .

Заметим, что с помощью понятий добротностей  $Q_0$ ,  $Q_{вн}$ ,  $Q_H$  можно определить коэффициент полезного действия резонатора  $\eta_{рез}$  (контура)

$$\eta_{рез} = \frac{Q_H}{Q_{вн}} = 1 - \frac{Q_H}{Q_0} . \quad (1.21)$$

Величина  $\eta_{рез}$  резонатора составляет 80-90%.

Ниже приводятся формулы резонансных частот или длин волн: для тороидального резонатора рис. 1.1,а

$$\lambda_0 = \pi\alpha \sqrt{\frac{2h}{d} \left( 1 + \frac{4d}{\pi\alpha} \ln \frac{h}{d} \right) \ln \frac{e}{a}} ; \quad (1.22)$$

для резонатора рис. 1.1,б резонансная частота находится из трансцендентное уравнение

$$\omega_0 \frac{\epsilon\pi\alpha^2}{d} - \frac{1}{Z_C} \operatorname{ctg} \frac{\omega_0 \ell}{C} = 0 , \quad (1.23)$$

здесь  $Z_C = 60 \ln \frac{b}{a}$  - волновое сопротивление коаксиальной линии;  $C$  -

эквивалентная емкость зазора.

В случае призматического резонатора с укорачивающей емкостью  $C$  резонансная длина волны определяется также трансцендентным соотношением

$$\frac{1}{Z_C} \operatorname{ctg} \left\{ \frac{2\pi(l-R)}{\lambda_g} \right\} = \frac{2\pi^2 R^2 \epsilon_0 C}{d \cdot \lambda_0} , \quad (1.24)$$

где  $C$  - скорость света;  $R$ - радиус цилиндра, создающего зазор  $d$ ;

$$Z_C = \frac{377e}{\sqrt{a^2 - \left(\frac{\lambda_0}{2}\right)^2}} - \text{волновое сопротивление волновода сечением; } l - \text{длина}$$

волновода от короткого замыкания до оси укорачивающего цилиндра;

$$\lambda_g = \frac{\lambda_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{\lambda_0}{\lambda_{кр}}\right)^2}} ; \quad \lambda_{кр} = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{e}\right)^2}}$$

$m, n$  – целые числа, определяют количество вариаций поля вдоль стенки “а” и вдоль стенки “в” соответственно в волноводе.

Для резонатора магнетронного типа (рис. 1.2.б) собственная частота отдельной ячейки резонаторного блока (рис.1.4) находится из соотношения:

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}} = \frac{1}{R} \sqrt{\frac{d}{\epsilon\mu\pi\alpha}} . \quad (1.25)$$

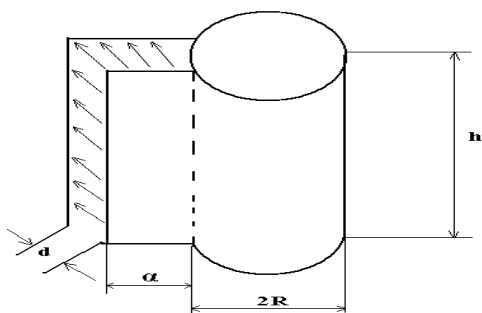


Рисунок 1.4. Ячейка магнетронного резонатора.

Размеры резонатора видны на рис. 1.4, причем

$$C_0 = \frac{\varepsilon \alpha h}{d}, \quad L_0 = \frac{\mu \pi R^2}{h}.$$

Перестройка частоты объемных резонаторов осуществляется изменением одного из размеров: либо высоты резонатора  $\ell$  (рис.1.1) либо диаметра, посредством погружения металлических стержней в область с магнитным полем, либо изменением высоты зазора  $d$  (рис.1.1).

Собственная добротность тороидальных резонаторов (для других типов резонаторов см. [9]) вычисляется по формуле

$$Q_0 = \frac{2\mu}{\delta\mu_{\text{cr}}} \cdot \frac{1 \cdot \ln \frac{b}{a}}{2 \ln \frac{b}{a} + 1 \left[ \frac{1}{b} + \frac{1}{a} \right]} \quad (1.26)$$

Эквивалентное резонансное сопротивление тороидальных резонаторов [9]

$$R_0 = \frac{R_s}{2\pi^3} \left( \frac{\lambda_0}{60L_0} \right)^2 \left[ \frac{\ell - d}{a} + \frac{\ell}{b} + 2 \ln \frac{b}{a} \right], \text{ Ом}, \quad (1.27)$$

где  $R_s = \sqrt{\frac{\omega\mu_{\text{cr}}}{2\sigma}}$  – поверхностное сопротивление; все геометрические размеры

на соответствующих рисунках.

### Резонансный микроволновый прибор как элемент схемы [2,16]

Условия самовозбуждения СВЧ генераторов с резонансными колебательными системами имеют вид:

$$\begin{aligned} G_0 + G_e + G'_n &= 0 \\ B_0 + B_e + B'_n &= 0 \end{aligned} \quad (1.28)$$

где  $G_0, B_0$  – активная и реактивная проводимость колебательной системы;

$G_e, B_e$  – активная и реактивная проводимости электронного потока;

$G'_n, B'_n$  – активная и реактивная проводимости нагрузки, трансформированной к области движения носителей заряда (зазора).

Мощности отдаваемая электронным потоком  $P_e$ , выделяемая в контуре  $P_k$  и в нагрузке  $P_n$  определяются, если известна амплитуда переменного напряжения  $U_m$ , соотношениями

$$P_e = \frac{1}{2} U_{m0}^2 G_e, \quad P_n = \frac{1}{2} U_{m0}^2 G'_n, \quad P_k = \frac{1}{2} U_{m0}^2 G_k. \quad (1.29)$$

Трансформированные активная  $G'_H$  и реактивная  $B'_H$  – проводимости нагрузки к зазору резонатора определяются в виде

$$G'_H = \frac{G_H}{(K_T)^2} = \frac{Y_c}{Q_{BH}} = G_0 \frac{Q_0}{Q_{BH}} ; \quad B'_H = \frac{B_H}{(K_T)^2} = B_H \frac{Y_c}{G_H Q_{BH}} = \frac{B_H G_0 Q_0}{G_H Q_{BH}} , \quad (1.30)$$

где  $(K_T)^2$  – коэффициент трансформации;

$$Y_c = \frac{f_0}{2} \left( \frac{dB}{df} \right)_{f=f_0} - \text{характеристическая проводимость резонатора}; \quad (1.31)$$

$$G_H = G_0 + G'_H = \frac{Y_c}{Q_H} - \text{суммарная активная проводимость резонатора.}$$

Мощность генератора в нагрузке  $P_H$  определяется амплитудой установившихся колебаний  $U_{m0}$  и проводимостью нагрузки  $G'_H$ .

Частота генерируемых колебаний определяется собственной резонансной частотой колебательной системы  $f_0$ , нагруженной добротностью этой системы  $Q_H$ , реактивной  $B_c$  и активной  $G_c$  электронными проводимостями

$$f_v = f_0 \left[ 1 + \frac{B_c}{2Q_H G_c} \right]. \quad (1.33a)$$

В случае учета влияния нагрузки на частоту генератора следует использовать формулу при условии  $G_H = I$

$$f_r = f_0 \left( 1 - \frac{B_H}{2Q_{BH}} \right). \quad (1.33b)$$

Величина реактивной проводимости в относительных единицах определяется соотношениями:

$$B_{H\max} = B_{H\min} = \pm \frac{(K_{CB})^2 - 1}{K_{CB}} . \quad (1.34)$$

Изменение частоты генератора при изменении нагрузки, выраженное в величинах  $K_{CB}$ , определяется в виде  $\Delta f = \pm \frac{f_0}{Q_{BH}} \frac{(K_{CB})^2 - 1}{2K_{CB}}$ ,

диапазон изменения частоты под влиянием нагрузки определяется формулой

$$\Delta V = \frac{f_0}{Q_{BH}} \frac{(K_{CB})^2 - 1}{2K_{CB}} = F_3 \cdot 1,2 \cdot \frac{(K_{CB})^2 - 1}{K_{CB}} , \quad (1.35)$$

здесь  $F_3 = 0,417f_0/Q_{BH}$  – параметр затягивания частоты. (1.36)

**Замедляющие системы (ЗС) для микроволновых приборов** должны иметь заданную величину коэффициента замедления  $K_3$ , высокое сопротивление связи  $R_{CB}$ , определенный характер дисперсии  $V_\phi(f)$  и величину крутизны дисперсионной характеристики, необходимую для взаимодействия с электронным потоком конфигурацию электромагнитного поля и хороший теплоотвод.

Расчет этих параметров проводится тремя методами: методом многопроводных линий, полевым методом и методом эквивалентных схем. Последний метод наиболее прост, часто применяется и дает достаточно хорошее совпадение

теоретических и практических результатов. Применим его для разных замедляющих систем.

**Гребенка в волноводе** (рис.1.5) на эквивалентной схеме [15,18] представляется цепочкой четырехполюсников П- или Т-образных ячеек.

Фазовый сдвиг  $\varphi_0$  волны на ячейку замедляющей системы в зависимости от частоты (определяется геометрическими и электрическими параметрами замедляющей системы) называется дисперсионным уравнением. Для эквивалентных схем, представленных на рис 1.6, дисперсионное уравнение [11] имеет вид:

$$\cos \varphi_0 = 1 + \frac{C_2}{2C_1} \cdot \frac{1 - \frac{\omega_2^2}{\omega^2}}{\frac{\omega_1^2}{\omega^2}}. \quad (1.37)$$

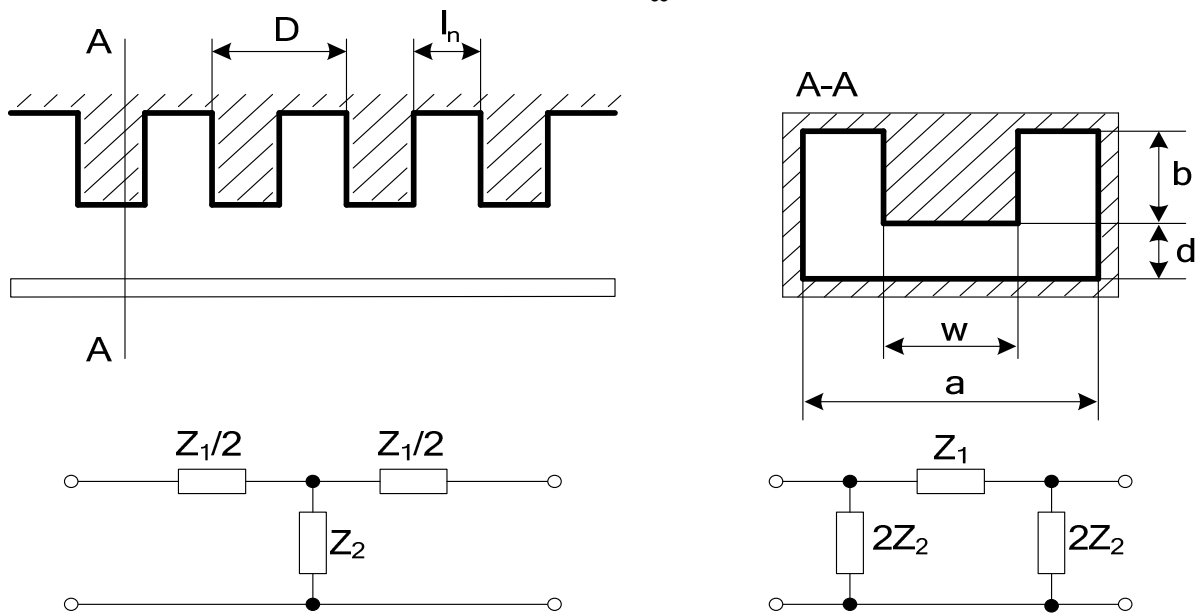


Рис 1.5 – Гребенчатая замедляющая система в волноводе и ее эквивалентная схема: а) Т – образная ячейка; б) П – образная ячейка.

Полоса рабочих частот П и Т – образных схем может быть определена из (1.35) как полоса, ограниченная частотами отсечки полосового фильтра

$$\omega_{\varphi_0=\pi} = \sqrt{\frac{\omega_1^2 + \frac{C_2}{4C_1} \omega_2^2}{1 + \frac{C_2}{4C_1}}}, \quad (1.38)$$

$$\omega_{\varphi_0=0} = \omega_2,$$

здесь  $C_2$  – емкость связи между плоскостью (катодом) и штырем (например, сегментом в магнетроне) ЗС;

$C_1 = \frac{4b^2}{\pi^2 L}$ ,  $L_1 = \frac{\pi b l_n}{\omega}$  – индуктивность и емкость паза щелевого резонатора.

Соотношения для определения  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  (частоты отсечки) следующие

$$\omega_2^2 L_2 C_2 = 1; \quad \omega_1^2 L_1 C_1 = 1;$$

$\omega$  – рабочая частота;

$L_{1,2}, C_{1,2}$  – параметры (индуктивности и емкости) эквивалентной схемы типа Т или П.

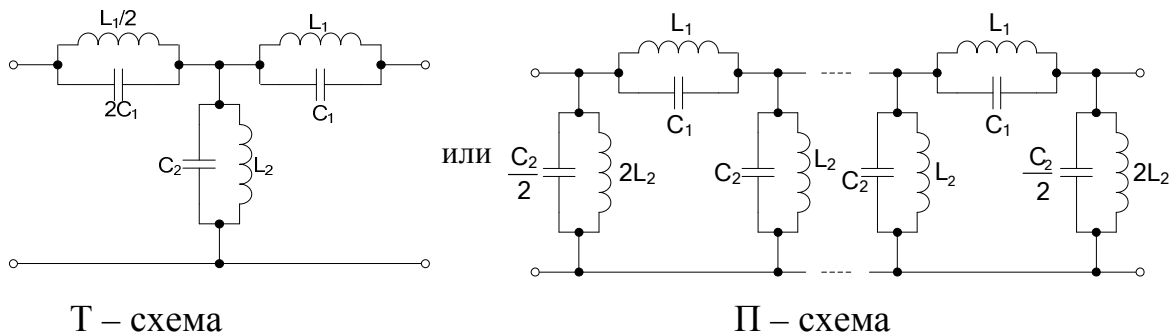


Рис. 1.6 Эквивалентная схема ЗС в виде эффективных индуктивностей и емкостей для П- и Н- образных схем.

Волновое сопротивление П – или Т – образной эквивалентной схемы согласно [15] равны

$$Z_{\Pi} = \sqrt{\frac{Z_1 Z_2}{1 + \frac{Z_1}{4Z_2}}} \quad \text{для П – образной ячейки,}$$

$$Z_T = \sqrt{Z_1 Z_2 (1 + Z_1/4Z_2)} \quad \text{для Т – образной ячейки.} \quad (1.39)$$

Величина коэффициента передачи  $g$ , для П или Т – образной эквивалентной схемы, определяется соотношением

$$\operatorname{ch} g = 1 + \frac{Z_1}{2Z_2}, \quad \text{где } g = b_0 \pm j\varphi_0; \quad (1.40)$$

где  $b_0$  - коэффициент потерь мощности на ячейку ЗС.  $b_0 = \frac{\operatorname{tg} \frac{\varphi_0}{2}}{Q} \cdot \frac{\omega_1^3}{\omega^3} \cdot \frac{1}{\frac{\omega_1^2}{\omega^2} - 1}$ , Нп;

здесь  $Q = \frac{\pi \cdot \lambda_{b_0}}{\alpha_T \cdot \lambda_0^2}$  – добротность ячейки ЗС типа щелевой резонатор,  $\alpha_T$  - коэффициент потерь в стенках ячейки замедляющей системы.

Сопротивление связи гребенки на  $m$  – ой гармонике [11] определяется соотношением

$$R_{св,р} = \frac{Z_1^2}{\beta_m^2 Z_T} \cdot \frac{1}{D^2} \left[ \frac{\sin(\beta_0 l_n/2)}{\beta_m l_n/2} \right]^2, \quad (1.41)$$



где  $Z_1 = \frac{1}{j\omega C_1 \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2}\right)}$  – сопротивление последовательного элемента четырехполюс-

ника (рис 1.5);  $Z_T = \frac{\sqrt{1 + \frac{C_2}{4C_1} - \frac{\omega_1^2}{\omega^2} - \frac{C_2}{4C_1} \cdot \frac{\omega_2^2}{\omega^2}}}{\omega \sqrt{C_1 C_2} \left(1 - \frac{\omega_1^2}{\omega^2}\right) \sqrt{\frac{\omega_2^2}{\omega^2} - 1}}$  – волновое сопротивление четырех-

полюсника;

$\beta_m = \beta_0 + \frac{2\pi m}{D}$  – фазовая постоянная распространения волны в ЗС на  $m$ -ой гармони-

ке;  $\varphi_m = \varphi_0 + 2\pi m$  – фазовый сдвиг; номер гармоники  $m = \pm 1, 2, 3, \dots$

Параметры индуктивности и емкости определяют из уравнений

$$C_2 = \frac{\varepsilon S}{d} = \frac{\varepsilon_0 w (D - l_n)}{d} [\text{Ф}],$$

$$L_2 = \frac{\lambda_2^2}{(4\pi)^2 C_2} = \frac{\lambda_2^2 \pi d}{(4\pi)^2 w (D - l_n)} = \frac{\pi^2 \frac{w(b+d)}{d} (a-w) \pi d}{16\pi^2 w (D - l_n)} = \frac{\pi(b+d)(a-w)}{16(D - l_n)},$$

где  $\lambda_2 = \lambda_{\text{крит.н}} = \pi \sqrt{\frac{w(b+d)}{d} (a-w)}$  критическая длина волны волновода определяется сечением ЗС.

Если использовать полевой метод [17] для получения дисперсионного уравнения [2] гребенки, то получим уравнение вида

$$x \cdot b \cdot \text{th} \left( \frac{d}{b} \cdot x \cdot b \right) = k \cdot b \cdot \text{tg} (k \cdot b) \quad (1.42)$$

где  $x$  – поперечное волновое число;  $k$  – фазовая постоянная распространения волны свободного пространства;

Остальные геометрические параметры видны на рис.1.5.

Из уравнения (1.42), при известной геометрии и заданной постоянной распространения в свободном пространстве  $k$ , определяется поперечное волновое число  $x$ , а, следовательно, фазовая постоянная волны  $\beta$  в ЗС и коэффициент замедления  $K_3$ :

$$\beta = \sqrt{k^2 - x^2} = k \sqrt{1 - (x/k)^2}$$

$$K_3 = \frac{\beta}{k} = \sqrt{1 - (x/k)^2}.$$

Сопротивление связи на нулевой гармонике ( $m = 0$ ), полученное в [17] полевым методом, определяется в виде

$$R_{\text{св}} = \frac{Z_0 2 x^3 \text{sh}^2 (x \cdot y)}{\beta^3 k [\text{ch} (2 x d) - 2 x d]}, \quad (1.43)$$

где  $Z_0 = 377 \text{ Ом}$ .

**Гребенка со связками** [10,11] используется в магнетронах и платинотронах. Штыри (в платинотронах - ламели) гребенки последовательно через один соединены электрически друг с другом проводниками, называемыми связками (рис.1.7)

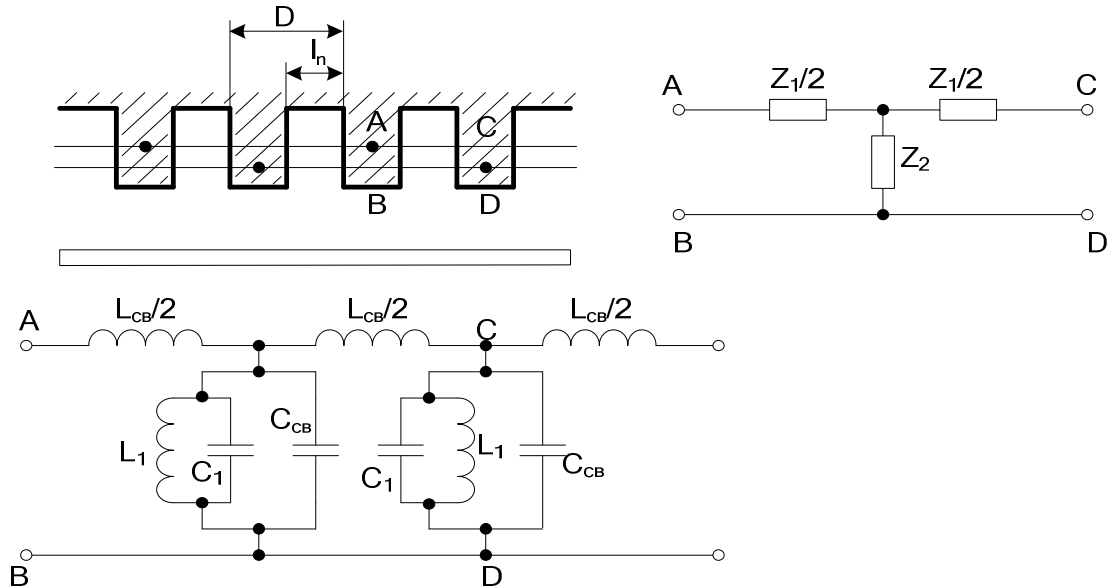


Рис 1.7. Гребенчатая система со связками и ее эквивалентная схема.

Система (рис. 1.7) характеризуется аномальной дисперсией в полосе пропускания. Эквивалентная схема (рис 1.7) позволяет записать

$$Z_1 = j\omega L_{CB}, \quad Z_2 = \frac{Z}{1 - j\omega Z C_{CB}}, \quad (1.44)$$

где  $Z = \frac{1}{j(\omega C_1 - 1/(\omega L_1))}$  – входное сопротивление резонатора относительно то-

чек подключения связок к ламели (например, точек А–D, на рис.1.7);

$C_1, L_1$  – эквивалентные параметры щелевого резонатора;

$L_{CB}, C_{CB}$  – эквивалентные индуктивность и емкость связок на период системы

D.

Нижняя частота системы (фильтра) определяется из условия параллельного резонанса: ( $Z_2 = \infty$ );  $\omega_{\pi} = (jZ C_{CB})^{-1}$ , а верхняя - из условия последовательного резонанса

$$\frac{Z}{1 - j\omega C_{CB} Z} + \frac{j\omega L_{CB}}{4} = 0$$

Параметры T – образной схемы:

волновое сопротивление

$$Z_T = \sqrt{j\omega L_{CB} \left[ \frac{Z}{1 - j\omega Z C_{CB}} + \frac{j\omega L_{CB}}{4} \right]}, \quad (1.45)$$

величина постоянной передачи имеет вид

$$\cos \varphi_0 = 1 + \frac{j\omega L_{cb}}{Z} (1 - j\omega C_{cb} Z) \quad (1.46)$$

или 
$$Z_T = \sqrt{j\omega L_{cb} \left[ \frac{Z}{1 - (\omega/\omega_\pi)} + \frac{j\omega L_{cb}}{4} \right]}$$
 ;

$$\cos \varphi_0 = 1 + \frac{j\omega L_{cb}}{Z} \left[ 1 - \frac{\omega}{\omega_\pi} \right],$$

здесь  $\varphi_0$  – фазовый сдвиг на период ячейки вдоль связей в направлении движения потока энергии. А фазовый сдвиг в пространстве взаимодействия в направлении движения электронного луча будет  $\theta_0 = \pi - \varphi_0$  и, следовательно, фазовая скорость волны в направлении движения электронного потока равна  $V_\phi = \frac{\omega D}{\pi - \varphi_0}$ .

Располагая величиной  $\varphi_0$  и выражением  $V_\phi$ , можно построить дисперсионную зависимость. Емкость и индуктивность связей определяются соотношениями, выраженными в сантиметрах (система ед. CGSE),

$$C_{cb} = \frac{(2S + \delta)(D - l_n)}{t} \quad [\text{см}],$$

$$L_{cb} = \frac{D}{2\pi} \left[ \ln \left( \frac{4D}{\delta} \right) - 1 \right] \quad [\text{см}]. \quad (1.47)$$

Размеры для определения  $C_{cb}$ ,  $L_{cb}$  видны на рис 1.8

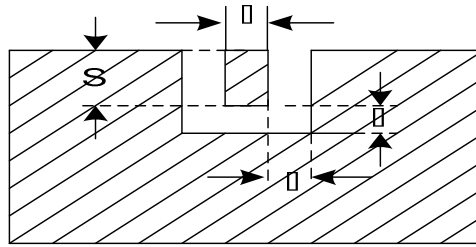


Рис 1.8 – Связка над сегментом.

Сопротивление связи для  $m$ -ой гармоники определяется в виде

$$R_{cbp} = \frac{Z_1^2}{\beta_m Z_T} \frac{1}{D^2} \left[ \frac{\sin(0,5\beta_m l_n)}{(0,5\beta_m l_n)} \right]^2 \quad (1.48)$$

Соотношения для встречно штыревой и спиральной замедляющих систем приводятся в следующем разделе (примеры решения задач).

### 5.1.2. Примеры решения задач

#### Задача №1 (Роль углов пролета)

Расстояние между двумя плоскими электродами равно 2 мм. При каких постоянных напряжениях на электродах на частоте  $3 \cdot 10^8$  Гц достигается угол пролета электронов  $\theta = 0,33\pi$  при наличии и отсутствии пространственного заряда?

Решение

Угол пролета зазора при отсутствии объемного заряда, т.е.  $\rho = 0$ , и наличии,  $\rho \neq 0$ , определяется из (1.3) и (1.7), а напряжение, соответственно, будет определяться выражениями  $U_{0(\rho=0)} = \frac{2m}{e} \cdot \frac{\omega^2 d^2}{\theta^2}$  и  $U_{0(\rho \neq 0)} = \frac{2m}{e} \cdot \frac{1,5^2 \omega^2 d^2}{\theta^2}$

Определим  $U_0$  с учетом и без учета пространственного заряда:

$$U_{0(\rho=0)} = \frac{2}{1,76 \cdot 10} \cdot \frac{4\pi \cdot 9 \cdot 10^{16} \cdot 4 \cdot 10^{-6}}{0,33^2 \cdot \pi^2} = \frac{32 \cdot 9}{1,76 \cdot 1,05} = 156 \text{ В}$$

$$U_{0(\rho \neq 0)} = 2,25 \cdot 156 = 350 \text{ В.}$$

**Вывод:** Пространственный заряд как бы ослабляет поле, увеличивая время пролета. Чтобы угол пролета сделать одинаковым в случаях  $\rho = 0$  и  $\rho \neq 0$ , необходимо увеличивать напряженность поля в зазоре, т.е. увеличить напряжение.

### Задача №2 (Определение полного тока во внешней цепи)

Конвекционный ток в пространстве между двумя электродами, к которым приложено переменное напряжение  $U = 0,4 \cos \omega t$ , изменяется по закону  $i_k = 2 \cos(\omega t - \beta x)$ . Найти амплитуду полного тока во внешней цепи, если известны: размер зазора 1 мм, емкость зазора 5 пФ, рабочая частота  $f = 600$  МГц, волновое число  $\beta = \frac{\pi}{3} 10^3$  1/м.

#### Решение

При движении заряда в пространстве зазора, полный ток в его внешней цепи равен сумме емкостного и наведенного токов (1.10), которые определяются следующими выражениями:

$$i_{\text{ем}} = C \frac{dU}{dt} = -C \omega U \sin \omega t ;$$

$$i_{\text{нав}} = M I_k \cos \left( \omega t_0 - \frac{\beta d}{2} \right).$$

Найдем токи

$$i_{\text{ем}} = -5 \cdot 10^{-12} \cdot 6,28 \cdot 600 \cdot 10^6 \cdot 0,4 \sin \omega t = -7,6 \cdot 10^{-3} \sin \omega t, A = 7,6 \cdot 10^{-3} \cos \left( \frac{\pi}{2} + \omega t \right).$$

$$i_{\text{нав}} = \frac{\sin \frac{\theta}{2}}{\frac{\theta}{2}} \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot \cos \left( \omega t_0 - \frac{\beta d}{2} \right),$$

где  $t_0$  – время, соответствующее фазе сигнала в середине зазора.

$$\theta = \frac{\omega d}{V} = \frac{6,28 \cdot 600 \cdot 10^6 \cdot 1 \cdot 10^{-3}}{5,95 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{0,4}} = 1,004 \text{ радиан.}$$

Величина  $M$  определяется из (1.13)  $M = \frac{\sin(0,5 \cdot \theta)}{0,5 \cdot \theta} = 0,95.$

$$i_{\text{нав}} = 2 \cdot 10^{-3} \cdot 0,25 \cdot \cos \left( \omega t_0 - \frac{\pi}{6} \right) = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot \cos \left( \omega t_0 - \frac{\pi}{6} \right);$$

$$i_{\text{пол}} = 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot \cos \left( \omega t_0 - \frac{\pi}{6} \right) + 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot \cos \left( \omega t + \frac{\pi}{2} \right) =$$

$$1,9 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j(\omega t_0 - \frac{\pi}{6})} - 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j(\omega t_0 + \frac{\pi}{2})} = \left[ 1,9 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-j\frac{\pi}{6}} + 7,6 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-j\frac{\pi}{2}} \right] e^{j\omega t_0} =$$

$$\left[ 1,9 \cdot \left( \cos \frac{\pi}{6} - j \sin \frac{\pi}{6} \right) + 7,6 \cdot \left( \cos \frac{\pi}{2} - j \sin \frac{\pi}{2} \right) \right] \cdot 10^{-3} \cdot e^{j\omega t_0} = [(1,65 - j0,95) + j7,6] \cdot 10^{-3} \cdot e^{j\omega t_0} =$$

$$(1,65 - j8,55) \cdot 10^{-3} \cdot e^{j\omega t_0} = 8,7 \cdot 10^{-3} \cdot e^{j(\omega t_0 - 1,38)}, \text{ А}$$

**Вывод:** Полный ток представляет комплексную величину, в которой емкостная составляющая больше наведенного тока. Полный ток отстает по фазе от переменного напряжения примерно на  $80^\circ$  или 1,38 радиан за счет пролетных явлений в зазоре.

### Задача №3 (Определение предельной частоты)

Определить предельную рабочую частоту триода, в котором плотность тока эмиссии  $2 \text{ А/см}^2$ , угол пролета зазора катод – сетка  $\theta_{\text{кс}} = 270^\circ$ , размер зазора  $d_{\text{кс}} = 0,1 \text{ мм}$ .

#### Решение

Предельной длиной волны называется  $\lambda_{\text{пр}}$ , при которой прекращается работа лампы, а угол пролета в зазоре катод – сетка становится равным  $\frac{3}{2}\pi$  [3]. Эмиссия с катода определяется законом “степени  $\frac{3}{2}$ ” в виде

$$I = \frac{4}{9} \epsilon_0 \sqrt{\frac{2e}{m}} \cdot \frac{U^{3/2}}{d_{\text{кс}}^2} = 2,34 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{U^{3/2}}{d_{\text{кс}}^2} \left( \frac{\text{А}}{\text{м}^2} \right) \quad (1.49)$$

Угол пролета зазора из (1.7) записывается

$$\theta = \omega d \sqrt{\frac{2m}{eU}} = 6,35 \cdot 10^3 \frac{d}{\lambda \sqrt{U}} \quad (1.50)$$

Напряжение  $U$  не задано, но определим его из (1.50) и (1.49), найдем величину  $\Theta$ , из которой определим  $\lambda_{\text{пр}}$ .

$$\sqrt{U} = 6,35 \cdot 10^3 \frac{d}{\lambda \theta}$$

$$\text{из (1.49)} \quad \sqrt{U^3} = \left( \frac{2,34 \cdot 10^{-6}}{I d^2} \right)^{-1} = \frac{I \cdot d^2}{2,34 \cdot 10^{-6}}$$

$$\frac{6,35^3 \cdot 10^9 d^3}{\lambda^3 \theta^3} = \frac{I \cdot d^2}{2,34 \cdot 10^{-6}}$$

откуда

$$\lambda^3 = \frac{6,35^3 \cdot 10^9 \cdot d^3 \cdot 2,34 \cdot 10^{-6}}{\theta^3 \cdot I \cdot d^2} \quad \text{или} \quad \lambda = \frac{6,35 \cdot 10 \cdot 1,53}{\theta} \sqrt[3]{\frac{d}{I}} = \frac{98,6}{\theta} \sqrt[3]{\frac{d}{I}}$$

Рассчитаем предельную длину волны и частоту

$$\lambda_{\text{пред}} = \frac{98,6}{4,74} \sqrt[3]{\frac{0,01}{2}} = \frac{98,6}{4,74 \cdot 5,76} = 3,62 \text{ см}$$

$$\nu_{\text{пр}} = \frac{c}{\lambda} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{3,62} = 8,6 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

**Вывод:** На частоте 8,6 ГГц работа прибора с указанными параметрами прекращается.

#### **Задача №4** (Определение добротностей резонатора)

Определить внешнюю, собственную и нагруженную добротности резонатора, используемого в приборе СВЧ, если на рабочей частоте 1 ГГц известно, что КПД резонатора должен быть 0,9, а степень затягивания частоты  $0,5 \cdot 10^7$  Гц.

#### Решение

Добротности в резонаторе связаны уравнением (1.18).

Степень затягивания частоты оценивается соотношением (1.36)

$F_3 = 0,417 \frac{f_0}{Q_{\text{вн}}}$ . Коэффициент полезного действия резонатора связан с добротностями

ми (1.43)  $\eta = \frac{Q_{\text{н}}}{Q_{\text{вн}}} = 1 - \frac{Q_{\text{н}}}{Q_0} = \frac{Q_0}{Q_0 + Q_{\text{вн}}}$ . Внешняя добротность тогда может быть определена из уравнения

$Q_{\text{вн}} = 0,417 \frac{f_0}{F_3}$ . Нагруженная добротность из соотношения

$Q_{\text{н}} = \eta \cdot Q_{\text{вн}} = \eta \cdot 0,417 \cdot \frac{f_0}{F_3}$ . Собственная добротность из уравнения добротностей опре-

деляется в виде  $Q_0 = \frac{Q_{\text{н}} \cdot Q_{\text{вн}}}{Q_{\text{н}} + Q_{\text{вн}}}$ .

Рассчитаем требуемые по условию задачи величины

$$Q_{\text{вн}} = 0,417 \frac{10^9}{0,5 \cdot 10^7} = 208,5 \approx 208$$

$$Q_{\text{н}} = 0,9 \cdot 208,5 = 187,7 \approx 188$$

$$Q_0 = \frac{187,7 \cdot 208,5}{-187,7 + 208,5} = \frac{39135,45}{20,8} \approx 1880$$

$$Q_0 = \frac{Q_{\text{н}}}{1 - \eta} = \frac{187,7}{0,1} = 1880$$

#### **Задача №5** (Расчет тороидального резонатора)

Тороидальный медный резонатор используется в генераторном приборе СВЧ. Определить его резонансную частоту и предъявить требование к величине электронной проводимости, если размеры радиусов резонатора  $R_2 = 10$  мм,  $R_1 = 5$  мм, высота резонатора 10 мм, размер зазора 1 мм. Резонатор связан петлей с коаксиальной линией имеющей волновое сопротивление 50 Ом, отношение площади петли связи  $S_{\text{н}}$  к площади сечения резонатора  $S_{\text{г}}$  в плоскости входа петли в резонатор равно 0,08.

#### Решение

Для возбуждения генератора необходимо выполнить условие баланса активных проводимостей (баланс амплитуд), т.е.

$$G_{\text{эл}} + G_0 + G_{\text{н}} \leq 0.$$

Откуда к активной проводимости электронного потока  $G_{эл}$  требование имеет вид:  $-G_{эл} \geq G_0 + G_n$ .

Следовательно, необходимо найти сумму проводимостей резонатора и нагрузки  $G_n$ , трансформированной к зазору. Коэффициент трансформации  $n$  проводимости нагрузки определяется соотношением

$$n = (1,1 \div 1,2) \frac{S_n}{S_r} = 1,15 \cdot 0,08 = 0,092.$$

Проводимость коаксиальной линии, являющейся нагрузкой [18], равна

$$G_n = \frac{1}{W} n^2 = 0,02 \cdot (0,092)^2 = 2 \cdot 10^{-2} \cdot 8,5 \cdot 10^{-3} = 17 \cdot 10^{-5} = 1,7 \cdot 10^{-4}, \left[ \frac{1}{\text{Ом}} \right].$$

Определим резонансную длину волны резонатора по формуле (1.22)

$$\lambda_0 = \pi R_1 \sqrt{\frac{2h}{d} \left( 1 + \frac{4d}{R_1} \ln \frac{h}{d} \right) \cdot \ln \frac{R_2}{R_1}} = 3,14 \cdot 0,5 \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot 10}{1} \left( 1 + \frac{4 \cdot 1}{5} \ln \frac{h}{d} \right) \cdot \ln 2} = 9,85 \text{ см.}$$

Резонансную проводимость резонатора, используя формулу (1.27), найдем

$$G_0 = \left\{ \frac{R_s}{2\pi^3} \left( \frac{\lambda_0}{60L_{(\text{см})}} \right)^2 \left( \frac{h-d}{R_1} + \frac{h}{R_2} + 2 \ln \frac{R_2}{R_1} \right) 10^{-18} \right\}^{-1},$$

где  $R_s = 0,045 \sqrt{\frac{2}{\lambda_0}} = \sqrt{\frac{\omega \mu_{\text{ст}}}{2\sigma_{\text{ст}}}}$  – поверхностное сопротивление.

$L = \frac{\mu h}{2\pi} \ln \frac{R_2}{R_1}$  – эквивалентная индуктивность резонатора.

$$R_s = \sqrt{\frac{2\pi \cdot 3,045 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7}}{2 \cdot 5,9 \cdot 10^7}} = \sqrt{20,7 \cdot 10^{-5}} = 1,42 \cdot 10^2, \text{ Ом.}$$

$$Z = \frac{4P \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-2}}{2\pi} \ln 2 = 2 \cdot 10^{-9} \cdot 0,693 = 1,386 \cdot 10^{-9} \text{ Гн; } 1 \text{ Гн} = 10^9 \text{ см.}$$

$$G_0 = \frac{1,42 \cdot 10^{-2}}{2 \cdot 3,14^3} \left( \frac{9,35}{60 \cdot 1,386} \right)^2 \left[ \frac{9}{5} + \frac{10}{10} + 2 \ln 2 \right] = 0,135 \cdot 10^{-4}, \text{ См.}$$

$$G_0 + G_n = 1,7 \cdot 10^{-4} + 0,135 \cdot 10^{-4} = 1,835 \cdot 10^{-4} \text{ См}$$

Откуда  $-G_{эл} > 1,835 \cdot 10^{-4} \text{ См.}$  Для устойчивой работы генератора достаточно.

### Задача №6. (Расчет спиральной замедляющей системы [11,13])

Рассчитать геометрию спиральной однозаходной замедляющей системы ЛОВ для диапазона  $\lambda_{cp} = 10 \text{ см}$ . Лампа работает при ускоряющем напряжении, равном 890 В. Номер пространственной гармоники  $m = -1$ .

#### Решение:

На рис.1.9. изображены: схематично спиральная ЗС, геометрические параметры, которые необходимо рассчитать.

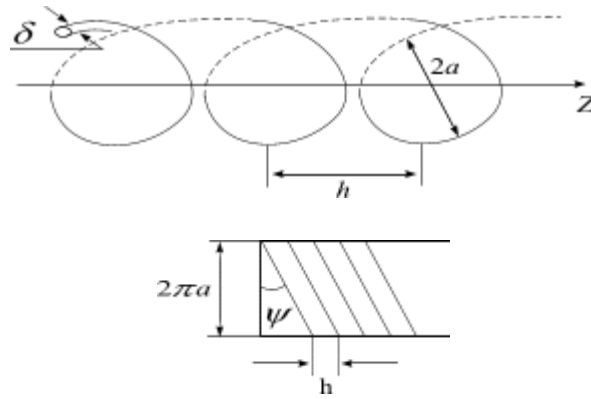


Рис.1.9. Спиральная замедляющая система.

$\psi$  - угол навивки спирали;  $\delta$  - диаметр провода;  $2a$  - диаметр спирали;  $h$  - шаг спирали.

Известно ускоряющее напряжение, можно определить коэффициент замедления волны в спирали  $K_3$ , а затем выразить коэффициент замедления через геометрию.

$$K_{зам} = \frac{C}{V_{\phi m}} \quad (1.51)$$

где  $C$  – скорость света;  $V_{\phi p}$  – фазовая скорость  $p$ -ой гармоники.

$$C = \lambda \cdot f, V_{\phi m} = \lambda_3 \cdot f \text{ и } V_{\phi m} = \frac{\omega}{\beta_m}; C = \frac{\omega}{k}.$$

$$K_{зам} = \frac{\lambda}{\lambda_3} \quad (1.52)$$

$$K_{зам} = \frac{\beta_m \cdot a}{k \cdot a} \quad (1.53)$$

где  $a$  – радиус спирали,  $k$ - волновое число свободного пространства.

Фазовая скорость волны первой отрицательной пространственной гармоники должна быть примерно равна скорости электронного потока.

$$V_{\phi m} \cong V_0$$

$V_0$  – скорость электронов определяются из (1.2), фазовая скорость  $p$ -ой гармоники равна  $V_{\phi p} = \frac{\omega}{\beta_p} = \frac{\omega}{\beta_0 + \frac{2\pi \cdot p}{h}}$ , тогда

$$\frac{\omega}{\beta_0 + \frac{2\pi \cdot m}{h}} = \sqrt{\frac{2e}{m_0} \cdot U_0} \quad (1.54)$$

Т.к.  $\frac{C}{V_{\phi m}} = \frac{C}{V_0} = \frac{505}{\sqrt{U_0}}$ , то коэффициент замедления (1.51)  $K_{зам} = \frac{505}{\sqrt{890}} = 17$

Определим угол намотки спирали  $\psi$ , используя соотношений (1.53) и (1.54)

.Здесь  $m = -1$ ;  $\frac{h}{2\pi \cdot a} \approx \frac{k}{\beta_0}$ , т.к. для нулевой гармоники в области наших частот дисперсия отсутствует. Тогда

$$K_3 = \frac{C}{V_{\phi}} = \frac{2\pi \cdot a}{h} \left[ 1 + \frac{(-1)}{a \cdot k} \right] \quad (1.51, б)$$



Из рис.1.10 запишем

$$\frac{2\pi \cdot a}{h} = \operatorname{ctg} \psi \quad (1.55)$$

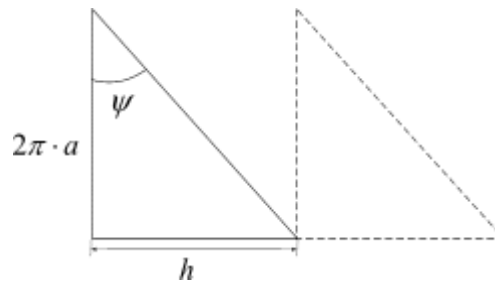


Рис.1.10 Развертка спирали на плоскость.

Значение  $\operatorname{ctg} \psi$  берется большим, при  $\psi \rightarrow 0$ , т.к. при этом снижается  $U_{\text{раб}}$ ; увеличивается  $N$  - число длин волн вдоль оси спирали, уменьшается рабочая длина лампы  $L$ . Для однозаходной спирали [15] величина  $2 < \frac{1}{a \cdot K} < 6$ . Это видно из равенства (1.55), т.к. при  $\frac{1}{a \cdot k} = 2$ ;  $\frac{C}{V_{\phi}} = \frac{2\pi \cdot a}{h}$ , а это соотношение близкое или равное значению нулевой гармоники, которая при этом возбуждается быстрее, чем первая отрицательная гармоника.

При  $\frac{1}{a \cdot k} < 5 \div 6$  величина сопротивления связи уменьшается, а это уменьшает выходную мощность  $P$ .

Задаем  $\frac{1}{aK} = 3$ , тогда радиус спирали:

$$a = \frac{1}{3k} = \frac{\lambda}{6\pi} = \frac{10}{18.8} = 0.53 \text{ см} ; \quad \frac{C}{V_{\phi(-1)}} = \operatorname{ctg} \psi(-2) \quad (1.56)$$

Минус (-) – показывает, что обратная гармоника, но при расчетах его можно опустить.

$$\frac{17}{2} = \operatorname{ctg} \psi = 8.5, \quad \psi = 6^{\circ}40', \quad a = 0.53 \text{ см} .$$

Найдем шаг спирали  $h$  из (7) и оценим диаметр проволоки. Т.к.

$$2\pi a/h = 8.5, \quad \text{то} \quad h = \frac{6.28 \cdot 0.53}{8.5} = 0.39 \text{ см} .$$

При выполнении  $0.3 \leq \frac{\delta}{h} \leq 0.5$  минимум потерь в проводниках системы. Берем

$$\frac{\delta}{h} = 0.4 \quad \delta = 0.4 \cdot 0.39 = 0.156 \text{ см} .$$

Оценим сопротивление связи спирали при  $r = a$ , воспользовавшись формулой

$$[15] \quad R_{\text{св}}(a) = \frac{16.7}{\left(\frac{1}{aK} - 0.923\right)^2} \cdot \frac{1}{a \cdot K} \quad (1.57)$$

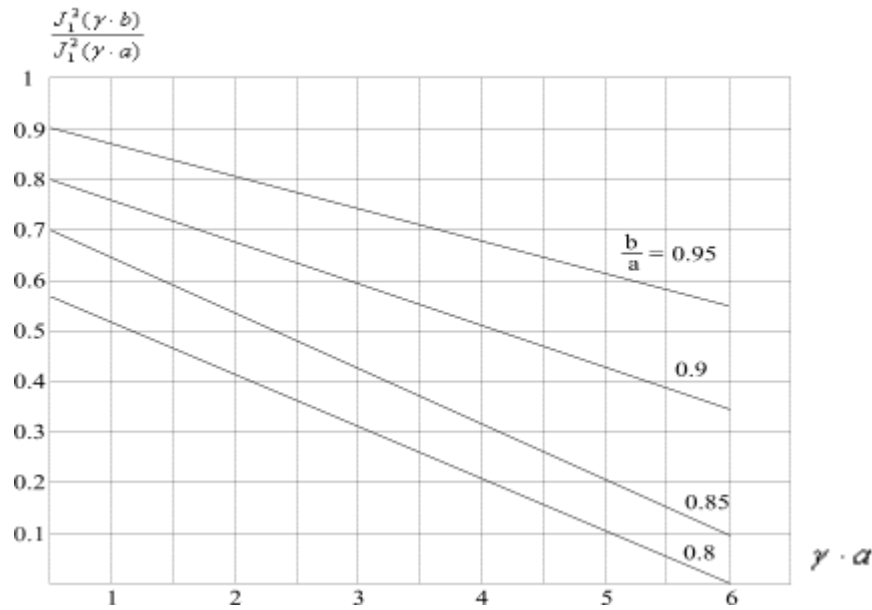


Рис.1.11. Поправочные коэффициенты для вычисления действующего значения волнового сопротивления при различных  $b/a$ .

Это сопротивление связи определено на самой спирали, но т.к. пучок проходит на некотором расстоянии от спирали, равном  $|b - a|$ , то следует в формулу (1.57) внести поправку, в виде:

$$R_{св}(b) = R_{св}(a) \frac{J_1^2(\gamma b)}{J_1^2(\gamma a)},$$

где  $J_0$  – функция Бесселя;  $\gamma$  – фазовая постоянная распространения волн в направлении радиуса. Смысл тот же, как для гребенки у величин  $\xi_1$  и  $h_1$ .

$$\gamma = \sqrt{\beta_m^2 - K^2} = \sqrt{\left(\frac{\omega}{V_{\phi m}}\right)^2 - \left(\frac{\omega}{C}\right)^2} = \frac{\omega}{C} \sqrt{\left(\frac{C}{V_{\phi m}}\right)^2 - 1} \approx \frac{\omega}{C} \cdot \frac{C}{V_{\phi m}} = \frac{\omega}{V_{\phi m}} = \frac{6.28 \cdot 3 \cdot 10^9}{5.95 \cdot 10^5 \cdot 29} = 5.6$$

По графику рис.1.11 определим поправочный коэффициент для  $\frac{b}{a} = 0.9$ .

$$\left. \frac{J_1^2(\gamma b)}{J_1^2(\gamma a)} \right|_{\frac{b}{a}=0.9} = 0.38, \quad R_{св} \Big|_{r=b} = \frac{16.7}{(3 - 0.923)^2} \cdot 3 \cdot 0.38 = 5.6 \text{ Ом}$$

Найдем волновое сопротивление спирали, пользуясь формулой  $W^{(U)} = \frac{U^2}{2P}$  по напряжению,  $W^{(J)} = \frac{2P}{J^2}$  по току.

$$W^U = \frac{376 \cdot \beta_0 \cdot J_0^2(\gamma a)}{\pi \cdot K \cdot \gamma \cdot a \cdot F_0(\gamma a)},$$

где  $J_0$  – функция Бесселя нулевого порядка.

Или более простая формула волнового сопротивления спирали в цилиндре, что практически всегда выполняется  $W = 60 K_{зам} J_0(\gamma a) N_0(\gamma a)$ ,

где  $N_0$  – функция Неймана нулевого порядка.

Для нашего случая имеем:

$$W = 60 \cdot 17 \cdot 0.027 \cdot 0.34 = 9.3 \text{ Ом}$$

Как видно волновое сопротивление не равно сопротивлению связи.

**Вывод:** Определена геометрия, параметры работы в ЛОВ на  $m = -1$ ,  $R_{ce}$  и  $W$  спирали для замедляющей системы помещены в таблицу 1.1.

Таблица 1.1

$2a$	$h$	$\delta$	$\psi$	$R_{ce b}$	$W$	$\lambda$	$U_0$
1.06 см	0.39 см	0.156 см	$6^{\circ}40'$	5.6 Ом	9.3 Ом	10 см	890 В

**Задача №7** (Рабочий диапазон замедляющей системы встречные штыри)

В каком диапазоне длин волн может работать замедляющая система типа встречные штыри (рис. 1.12), если рабочее ускоряющее напряжение изменяется в пределе  $324 \text{ В} \div 1600 \text{ В}$ . Замедляющая система используется в ЛОВО на  $m = -1$ , длина штыря составляет 20 мм, период  $h = 2$  мм.

*Решение:*

Для решения этой задачи необходимо воспользоваться условием фазового синхронизма.

$$V_{\phi} \cong V_0 = \frac{C}{K_{зам}}$$

Для нулевой гармоники это условие можно записать в другом виде

$$\frac{h+b}{h} = \frac{C}{V_{\phi 0}} = K_{зам 0} \quad (1.58)$$

Для  $m$ -ой гармоники фазовое условие можно получить из соотношения для постоянной  $\beta_m$

$$\beta_m = \beta_0 + \frac{2\pi \cdot m}{2h} \quad (1.59)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \beta_0 &= \frac{\omega}{V_{\phi 0}} = \frac{2\pi \cdot f}{V_{\phi 0}} = \frac{2\pi}{\lambda} \cdot \frac{C}{V_{\phi 0}}, \\ \frac{2\pi \cdot f}{V_{\phi m}} &= \frac{2\pi \cdot f}{V_{\phi 0}} + \frac{2\pi \cdot m}{2h} \cdot \lambda, \\ \frac{C}{V_{\phi m}} &= \frac{C}{V_{\phi 0}} + \frac{\lambda \cdot m}{2h} \end{aligned} \quad (1.60)$$

Из (1.58) и (1.60) имеем

$$\frac{C}{V_{\phi 1}} = \frac{h+b}{h} + \frac{\lambda \cdot m}{2h} = \frac{h+b}{h} - \frac{\lambda}{2h}$$

Но, учитывая отрицательный знак перед  $V_{\phi(-1)}$  и для ЛОВ на -1-ой гармоники

имеем:

$$\frac{C}{V_{\phi(-1)}} = -\left(\frac{\lambda}{2h} - \frac{h+b}{h}\right). \quad (1.61)$$

Используя (1.61) найдем выражение в общем виде для определения диапазона длин волн. Для расчетов следует брать  $\left| \frac{C}{V_{\phi(-1)}} \right|$ , тогда

$$\frac{C}{V_{\phi(-1)}} = \frac{505}{\sqrt{U_0}} = \frac{\lambda}{2h} - \frac{\lambda + b}{h}.$$

Т.к. два напряжения заданы, то определяем большую и малую длину волны

$$\left( \frac{505}{\sqrt{U_0}} + \frac{\lambda + b}{h} \right) \cdot 2h = \lambda; \quad \left( \frac{505}{\sqrt{1600}} + \frac{20 + 2}{2} \right) \cdot 0.2 \cdot 2 = \lambda_1; \quad \left( \frac{505}{\sqrt{324}} + \frac{20 + 2}{2} \right) \cdot 0.2 \cdot 2 = \lambda_2$$

$$(12.6 + 11)0.4 = 9.44 \text{ см}; \quad (28 + 11)0.4 = 15.6 \text{ см};$$

**Ответ:**  $9.44 \leq \text{диапазон } \lambda \leq 15.6$

### Задача №8. (Расчет геометрии ЗС типа встречные штыри)

Решение проводится в общем виде для любой гармоники [14].

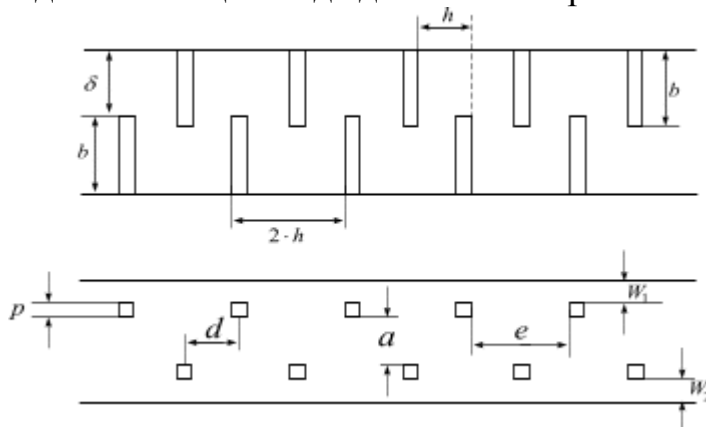


Рис.1.12. Замедляющая система типа встречные - штыри.

Размер  $\delta$  (рис.1.13) не влияет на дисперсионные свойства замедляющей системы. Поэтому размером  $\delta$  можно при расчете геометрии задаться согласно технологии. Точно также поступают и с размерами и  $m$ ,  $b$ ,  $a$ ,  $W$ .

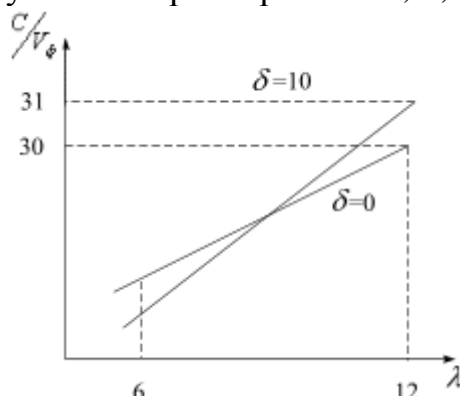


Рис.1.13. Зависимость коэффициента замедления от длины волны при разных размерах  $\delta$ .

Считая, что волна движется по известному пути между штырями, со скоростью света  $C$ , имеем:  $\frac{b+h}{h} = \frac{C}{V_{\phi 0}}$ . Т.к.  $\beta_m = \beta_0 + \frac{2\pi \cdot m}{2h}$ ,

а  $\beta_0 = \frac{2\pi \cdot C}{\lambda \cdot V_{\phi 0}} = \frac{\omega}{V_{\phi 0}} = \frac{2\pi \cdot f}{V_{\phi 0}}$  получаем  $\beta_m = \frac{2\pi \cdot C}{\lambda \cdot V_{\phi m}}$  или

$$\frac{2\pi \cdot C}{\lambda \cdot V_{\phi m}} = \frac{2\pi \cdot C}{\lambda \cdot V_{\phi 0}} + \frac{2\pi \cdot m}{2h}. \quad \frac{C}{V_{\phi m}} = \frac{C}{V_{\phi 0}} + \frac{m \cdot \lambda}{2h}, \quad \frac{C}{V_{\phi m}} = \frac{b+h}{h} + \frac{m \cdot \lambda}{2h},$$

здесь  $m = 0, \pm 1, \pm 2 \dots$

Это выражение описывает достаточно хорошо для практических целей дисперсионные характеристики однорядных и двухрядных замедляющих систем типа встречные штыри.

При изменении  $b$  кривые смещаются параллельно себе.

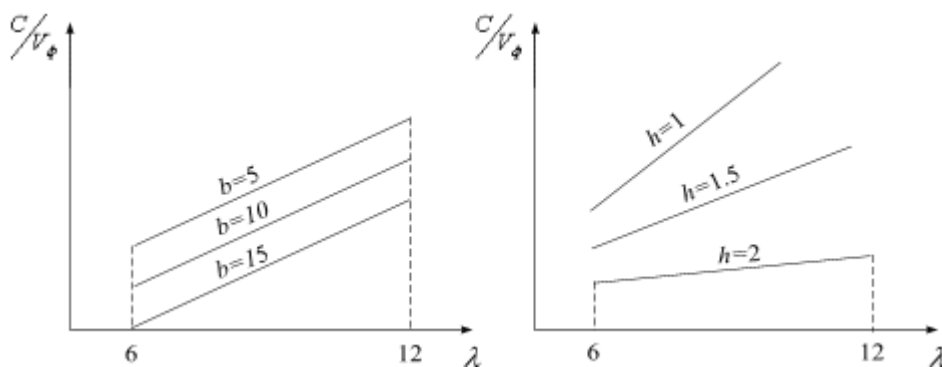


Рис.1.14. Поведение коэффициента замедления в диапазоне длин волн для разных значений  $b$  и  $h$ .

Таким образом, варьируя  $h$  и  $b$ , можно получить желаемое замедление при данной длине волны  $\lambda$  и наоборот. От остальных параметров характеристики почти не зависят.

#### Выбор оптимальных размеров замедляющих систем.

Пусть задан диапазон  $\lambda_{\min} - \lambda_{\max}$  и диапазон  $U_{\min}$  и  $U_{\max}$ . Таким образом из формулы (3.4) можно определить  $m$ ,  $h$ . Задается номер гармоники, пусть  $m = -1$ . Кривая электронной настройки дает  $\lambda_{\min} - U_{\max}$  и  $\lambda_{\max} - U_{\min}$ .

$$\begin{cases} \frac{C}{5.95 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U_{\max}}} = -\frac{h+b}{h} + \frac{\lambda_{\min}}{2h} = \frac{505}{\sqrt{U_{\max}}} \\ \frac{C}{5.95 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U_{\min}}} = -\frac{h+b}{h} + \frac{\lambda_{\max}}{2h} = \frac{505}{\sqrt{U_{\min}}} \end{cases}$$

$$\frac{\lambda_{\max}}{2h} - \frac{\lambda_{\min}}{2h} = \frac{505}{\sqrt{U_{\min}}} - \frac{505}{\sqrt{U_{\max}}}$$

$$2h = \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\frac{505}{\sqrt{U_{\min}}} - \frac{505}{\sqrt{U_{\max}}}}$$

где  $h$  – период замедляющей системы типа встречные штыри.

Из

$$\frac{\lambda_{\max}}{2h} - 2 \frac{b+h}{2h} = \frac{2h \cdot 505}{2h \cdot \sqrt{U_{\min}}}$$

$$2b = \lambda_{\max} - 2h - 2h \cdot \frac{505}{\sqrt{U_{\min}}} = \lambda_{\max} - 2h \cdot \left(1 - \frac{505}{\sqrt{U_{\min}}}\right) = \lambda_{\max} - \frac{\lambda_{\max} - \lambda_{\min}}{\frac{505}{\sqrt{U_{\min}}} - \frac{505}{\sqrt{U_{\max}}}} \cdot \left(1 - \frac{505}{\sqrt{U_{\min}}}\right) =$$

$$\frac{\lambda_{\max} \cdot \left(\frac{505}{\sqrt{U_{\min}}} - \frac{505}{\sqrt{U_{\max}}}\right) - \lambda_{\max} + \frac{505}{\sqrt{U_{\min}}} \cdot \lambda_{\max} + \lambda_{\min} - \lambda_{\max} \cdot \frac{505}{\sqrt{U_{\min}}}}{\frac{505}{\sqrt{U_{\min}}} - \frac{505}{\sqrt{U_{\max}}}} =$$

$$\frac{\lambda_{\min} \cdot \left(1 + \frac{505}{\sqrt{U_{\min}}}\right) - \lambda_{\max} \cdot \left(1 + \frac{505}{\sqrt{U_{\max}}}\right)}{\frac{505}{\sqrt{U_{\min}}} - \frac{505}{\sqrt{U_{\max}}}} = 2b$$

Сопротивление связи  $R_{св}$  увеличивается при уменьшении расстояния между рядами штырей системы типа встречные штыри-  $a$  ( рис.1.15), а дисперсия от  $a$  не зависит. Исходя из этого, величину  $a$  нужно выбирать минимальной.

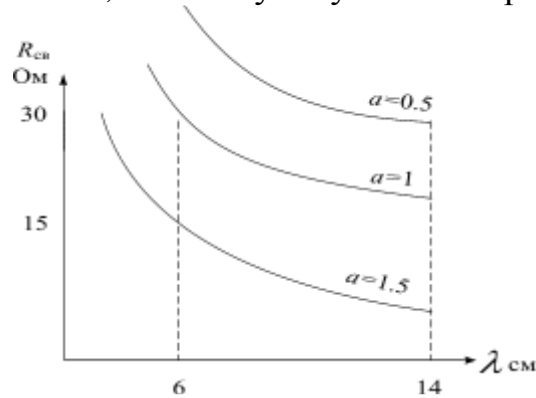


Рис.1.15 Зависимость сопротивления связи от расстояния между рядами штырей  $a$  в замедляющей системе.

Однако, если  $a$  выбирается минимальной, то при заданной величине тока  $J$  прибора и плотности тока эмиссии  $j_k$ , то высота электронного потока  $b$  должна быть определенной, согласно известному соотношению  $\frac{J}{ab} \leq j_k$ .

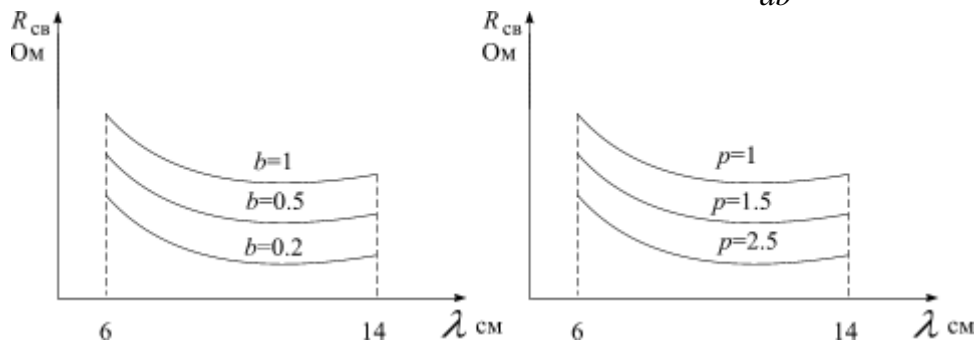


Рис.1.16. Влияние на сопротивление связи размеров  $p, b$ .

Хотя, сопротивление связи  $R_{св}$  увеличивается с ростом  $h$  и уменьшением  $p$ , свойства дисперсионные остаются неизменными. Кажется можно увеличивать  $h$  и уменьшать  $p$ , но при этом ухудшаются тепловые и механические параметры замедляющих систем. Поэтому  $h$  и  $p$  выбирают из требований механической прочности конструкции ЗС прибора и ее теплового режима, Обычно  $p \cong b \cong \frac{h}{2}$ .

Из конструктивных и технологических соображений выбирают  $\delta$  и  $W$ .

$$\delta = 0.5 \div 1 \text{ мм} \quad W \succ h$$

Длина замедляющих систем определяется параметром усиления, который зависит от длины волны в ЗС, от числа  $N$  замедленных длин волн  $\lambda_3$ , уложившихся вдоль неё (см. раздел 3, далее)

$$K_{yc} = f(N \cdot \lambda).$$

## 5.2. Индивидуальное задание №2

### Клистроны. - раздел программы – 2.3.1.

#### 5.2.1. Основные вопросы теории

В этом задании студенту необходимо провести расчет параметров и характеристик (КПД, коэффициента усиления, коэффициента преобразования, полосы рабочих частот и пр.) усилителей, генераторов, умножителей частоты на клистро-нах при различных условиях.

Клистроны по особенностям группировки электронного потока делятся на два типа: пролётные и отражательные. В пролётных клистро-нах группировка электро-нов происходит в пролётном пространстве, называемом пространством дрей-фа, а в отражательных - в пространстве тормозящего поля, расположенном между отражателем и резонатором. Процесс модуляции скорости переменным напряже-нием резонатора в обоих типах клистронов одинаков. Скорость электронов [2,3] после прохождения первого резонатора определяется соотношением:

$$V = V_0 + V_1 \cdot \sin \omega \cdot t_1, \quad (2.1)$$

где  $V_0$  - скорость на входе резонатора (1.2),  $V_1$  - амплитуда переменной состав-ляющей скорости на выходе резонатора, имеет вид

$$V_1 = M_1 \frac{V_0}{2} \frac{U_1}{U_0}, \quad (2.2)$$

где  $M_1$  - коэффициент взаимодействия зазора первого резонатора (1.13),  $U_1$  - ам-плитуда переменного напряжения на первом резонаторе,  $U_0$  - ускоряющее напря-жение на пушке и резонаторе.

Фаза прилёта каждого электрона во второй резонатор или вторичного прохо-ждения в отражательном клистроне  $\omega \cdot t_2$ , без учета влияния пространственного заряда, в зависимости от фазы вылета из первого резонатора  $\omega \cdot t_1$  определяется уравнением:

$$\omega t_2 = \theta + \omega t_1 - X \cdot \sin \omega t_1. \quad (2.3)$$

Здесь  $\theta = \frac{\omega \cdot S}{V_0}$  угол пролёта (1.17) немодулированным по скорости электроном

между резонаторами, расположенными на расстоянии  $S$  один от другого в пролётном клистроне;  $X$ - параметр группировки.

Для отражательного клистрона, если расстояние между сетками резонатора  $d$ , а между резонатором и отражателем  $D$ ;  $U_R$ -напряжение на отражателе клистрона, то угол пролета в пространстве тормозящего поля -  $\Theta_0$ , а в зазоре -  $\Theta_3$ , и общий угол пролета определяется выражением

$$\theta = \theta_0 + \theta_3 = \frac{2m}{e} \frac{\omega \cdot D \cdot V_0}{U_0 + |U_R|} + \frac{\omega \cdot d}{V_0} . \quad (2.4)$$

Величина параметра группирования для пролётного клистрона:

$$X = \frac{\omega \cdot S}{V_0} \frac{M_1 \cdot U_1}{2U_0} = 0,5\theta \cdot M_1 \cdot \xi = \theta \frac{V_1}{V_0} ; \quad (2.5a)$$

для отражательного клистрона:

$$X = (\theta_T - \theta_3) \frac{V_1}{V_0} = 0,5\theta \cdot M_1 \cdot \xi = V_1 \left( \frac{2m}{e} \frac{\omega \cdot D}{U_0 + |U_R|} - \frac{\omega \cdot d}{V_0^2} \right) , \quad (2.5b)$$

здесь  $\xi = \frac{U_1}{U_0}$  - коэффициент использования напряжения первого резонатора;

$\omega$ - рабочая круговая частота.

Конвекционный ток  $i_2$ , поступающий во второй резонатор пролётного клистрона, или поступающий в резонатор отражательного клистрона при возвращении электронов из пространства группирования, равен:

$$i_2 = I_0 \cdot k_c / (1 - X \cos \omega \cdot t_1) = I_0 + 2 \cdot I_0 \cdot k_c \sum_{n=1}^{\infty} J_n(nX) \cdot \cos(n(\omega \cdot t_2 - \theta)) , \quad (2.6)$$

причем  $I_0$ -ток на входе в резонатор-модулятор;  $k_c$  - коэффициент прозрачности сеток резонатора, равный  $k_c = \frac{S_0}{S_C}$  - отношению площади отверстий сеток зазора

резонатора  $S_0$  к площади сечения зазора –  $S_C$ ;  $J_n(nX)$ - функция Бесселя первого рода  $n$ -го порядка от аргумента  $nX$ ;  $n$ -номер гармоники.

Оптимальные значения параметров группировки и соответствующие им значения функции Бесселя для разных гармоник приведены в таблице 2.1.

Таблица 2.1.

Оптимальные значения параметров группирования и функций Бесселя для различных гармоник.

Параметр	$n$ -номер гармоники								
	1	2	3	4	5	8	10	15	20
$X_{opt}$	1,84	1,53	1,4	1,35	1,28	1,22	1,2	1,13	1,1
$J_n$	0,58	0,487	0,434	0,35	0,345	0,32	0,26	0,25	0,24

Наведённый во внешней цепи ток для  $n$ -ой гармоники  $I_{nm}$ , согласно (1.9) равен:

$$I_{nm} = -I_{kn} \cdot M_{2n} . \quad (2.6a)$$



Напряжение на зазоре второго резонатора  $n$ -ой гармоники, имеющего резонансное сопротивление  $R_2$ , определяется с помощью (2.5) и (2.6) в виде:

$$U_{2n} = R_2 \cdot M_{2n} \cdot 2 \cdot I_0 \cdot k_C \cdot J_n(nX) \quad , \quad (2.7)$$

где

$$R_2 = \frac{G'_H}{(G_{02} + G'_H + G_e)^2 + (B_{02} + B'_H)^2} \quad , \quad (2.8)$$

здесь  $G_{02}, G_e, G'_H$  - активные проводимости соответственно резонатора, электронного потока, нагрузки, приведённые к зазору;  $B_{02}, B'_H$  - реактивные проводимости второго резонатора и нагрузки, трансформированной к зазору.

Выходная мощность клистрона определяется соотношением:

$$P_{\text{ВЫХ}} = 0.5 \cdot U_{2n} \cdot I_{Hn} \quad . \quad (2.9)$$

Коэффициент усиления по мощности имеет вид:

$$K_P = 10 \lg(P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}}) \quad , \quad [\text{дБ}] \quad . \quad (2.10)$$

Входная мощность согласованного по входу клистрона равна:

$$P_{\text{ВХ}} = \frac{1}{2} U_1^2 \cdot (G_{1n} + G_{e1}) = \frac{2U_0^2 \cdot (G_{1n} + G_{e1}) \cdot X^2}{M_1^2 \cdot \theta^2} \quad . \quad (2.11)$$

Максимальная величина коэффициента усиления достигается при условии:  $B_{02} + B'_H = 0$ ,  $G_{02} + G_e = G'_H$ , называемых условиями сопряжённого согласования нагрузки с резонатором, и определяется соотношением

$$K_P = 20 \lg\left(\frac{M_1 \cdot M_2 \cdot I_0 \cdot \theta \cdot k_C \cdot J_1(X')}{2 \cdot U_0 \cdot \sqrt{(G_{10} + G_{e1}) \cdot (G_{20} + G_{e2})} \cdot X}\right) \quad . \quad (2.12)$$

С увеличением числа резонаторов пролётного клистрона  $N$  коэффициент усиления может быть определён [3] с помощью эмпирического выражения:

$$K_y = 15 + 20 \cdot (N - 2) \quad , \quad [\text{дБ}] \quad . \quad (2.13)$$

Величина комплексной электронной проводимости генераторного отражательного клистрона имеет вид:

$$\dot{Y}_e = \frac{I_0}{U_0} \cdot M^2 \cdot \frac{J_1(X)}{X} \cdot \theta \cdot (\sin \theta + i \cdot \cos \theta) \quad . \quad (2.14)$$

Величина оптимального угла пролёта  $\Theta = \theta_{\text{opt}}$ , соответствующая центру зоны генерации, определяется соотношением вида:

$$\theta_{\text{opt}} = 2 \cdot \pi \cdot (n + 0.75) = 2 \cdot \pi \cdot n + 1.5 \cdot \pi \quad . \quad (2.15)$$

Пусковой ток отражательного клистрона для центра зоны генерации определяется выражением:

$$I_{\text{пуск}} = \frac{U_0 \cdot G_n}{M^2 \cdot \pi \cdot (n + 0.75)} \quad . \quad (2.16)$$

Мощность, передаваемая электронным сгустком электромагнитному полю резонатора в отражательном клистроне, находится из соотношения:

$$P_e = 0.5 U_m^2 G_e = -2 \cdot I_0 \cdot U_0 \cdot X \cdot J_1(X) \cdot \sin(\theta_T + \theta_3) / (\theta_T - \theta_3) \quad . \quad (2.17)$$

Зависимость электронной настройки с учётом выражений (1.21) и (2.14) определяется в виде:

$$f_2 = f_0 \cdot (1 + 0,5 \cdot \text{ctg} \theta / Q_H). \quad (2.18)$$

Для интервала напряжений на отражателе  $\Delta U_R$ , когда мощность уменьшается до значения  $0,5 P_{max}$  в зоне генерации, характеристика электронной настройки

(2.18) при углах пролета  $\theta_T + \theta_3 + \Delta\theta = 2 \cdot \pi \cdot (n + \frac{3}{4}) + \Delta\theta$ , преобразуется до вида:

$$f_z = f_0 \left( 1 - \frac{\pi \cdot (n + 0,75)}{Q_H \cdot (U_0 + |U_R|)} \Delta U_R \right). \quad (2.19)$$

Нагруженная добротность резонатора отражательного клистрона с учетом режима работы определяется формулой:

$$Q_H = \frac{\omega \cdot C}{G_n} = \frac{f_0 \cdot C \cdot U_0 \cdot J_1(X)}{M^2 \cdot I_0 \cdot (n + 0,75) \cdot X}. \quad (2.20)$$

здесь  $C$  – ёмкость резонатора.

Диапазон электронной настройки между точками половиной мощности может быть определен формулой:

$$\Delta f = f_1 - f_2 = \frac{f_0}{Q_H} \sqrt{2 \left( \frac{J_1(X/\sqrt{2})}{J_1(X)} \right)^2 - 1}. \quad (2.21)$$

Использование (2.20) в формуле (2.21) позволяет определить полосу электронной настройки в зависимости от режима питания при работе в разных зонах генерации. Если изменять напряжение на отражателе к краям зоны генерации, изменяется и угол пролёта в пространстве тормозящего поля на величину:

$$\Delta\theta = \frac{\theta_T \cdot \Delta U_R}{U_\Sigma - \Delta U_R} = \pm 0,89 \text{ рад}. \quad (2.22)$$

Разность напряжений по краю одной зоны генерации  $U_{зоны}$  с учётом (2.22) составляет величину  $U_{зоны} = U_\Sigma \frac{0,3}{n + 0,4}$ , где  $U_\Sigma = U_0 + |U_R|$ .

### 5.2.2. Примеры решения задач

#### Задача №1. (Определение напряжения на выходном зазоре)

Для усилительного 2-х резонаторного пролётного клистрона определить напряжение на выходном зазоре, если на приборе ускоряющее напряжение 1000В, ток луча 100 мА, угол пролёта между резонаторами  $20\pi$ , напряжение на входном зазоре 25 В, колебательная мощность 8 Вт. Оценить электронный КПД для случая, если увеличить напряжение входного зазора до 50 В. Коэффициент электронного взаимодействия обеих резонаторов 0.8.

#### Решение.

- Выполняется ли при заданных условиях “Закон степени 3/2”

$i_0 = p \cdot U^{3/2}$ . Определим величину первеанса  $p$ .

$$p = \frac{i_0}{U^{3/2}} = \frac{100 \cdot 10^{-3}}{1000^{3/2}} = 3,16 \cdot 10^{-6}, \text{ А/В}^{3/2} \quad (2.23)$$

Когда величина микропервеанса  $p < 10$ , то заданные условия физически реализуемы электронной пушкой.

• Переменное напряжение на выходном резонаторе определим с помощью формул (2.9), (2.6), (2.5). Колебательная мощность на выходном резонаторе

$$P_e = \frac{1}{2} U_2 I_H = U_2 i_0 M_2 J_1(X), \text{ откуда}$$

$$U_2 = P_e / (i_0 M_2 J_1(X)) \quad (2.24)$$

• Определим величину параметра группировки  $X$  из (2.4):

$$X = 0,5 \cdot \theta \cdot M_1 \cdot U_1 / U_0 = 0,5 \cdot 20 \cdot \pi \cdot 0,8 \cdot 25 / 1000 = 0,628.$$

Величина  $X < 1$ , поэтому функция Бесселя в (2.24)  $J_1(X) \Rightarrow X/2 = 0,314$ . Вы-

числяем  $U_2$

$$U_2 = \frac{8}{100 \cdot 10^{-3} \cdot 0,8 \cdot 0,314} = 318,5 (B).$$

• Определим полное резонансное сопротивление  $R_{n2}$  второго резонатора

$$U_2 = R_{n2} \cdot I_H = R_{n2} \cdot M_2 \cdot 2 \cdot i_0 \cdot J_1(X);$$

$$R_{n2} = \frac{318,5}{0,8 \cdot 2 \cdot 100 \cdot 10^{-3} \cdot 0,314} = 6340,6 (Om) \text{ или } G_{n2} = 1,58 \cdot 10^{-4} (Cm) - \text{ полная проводи-}$$

мость.

• При увеличении  $U_1$  до 50В параметр группировки  $X_2$  возрастает в 2 раза и становится 1,256, что в свою очередь увеличивает величину функции Бесселя до значения  $J_1(1,256) = 0,51$  (см. приложение 3). Оставим неизменным резонансное сопротивление второго резонатора и определим  $U_2$  для случая  $U_1 = 50$  В.

$$U_{21} = R_{n2} \cdot M_2 \cdot 2 \cdot i_0 \cdot J_1(X_2) = 6340,6 \cdot 0,8 \cdot 2 \cdot 0,1 \cdot 0,51 = 517,39 (B)$$

• Величина электронного КПД при  $U_1 = 25$  В равна:

$$\eta_{e1} = \frac{P_e}{P_0} = \frac{8}{1000 \cdot 0,1} = 0,08$$

В случае  $U_1 = 50$  В электронный КПД возрастает, и становится равным:

$$\eta_{e2} = \frac{U_{22} \cdot i_0 \cdot M_2 \cdot J_1(X_2)}{P_0} = \frac{517,39 \cdot 0,1 \cdot 0,8 \cdot 0,51}{1000 \cdot 0,1} = 0,21.$$

## Задача №2. (Определение выходной мощности)

Определить во сколько раз изменится выходная мощность, если выходной контур 2-х резонаторного пролётного клистрона расстроили по частоте на 0,5% относительно резонансной частоты. Собственная добротность резонатора в горячем режиме 1000. При резонансной частоте мощность, передаваемая в нагрузку, в 10 раз больше мощности потерь в резонаторе. Изменением реактивной проводимости нагрузки  $B_H$  при расстройке резонатора по частоте пренебречь.

### Решение.

• Выходная мощность при расстройке резонатора определяется из (2.9) с учётом (2.7), (2.6) и (2.9) в виде:

$$P_{\text{вых}} = \frac{P_{60}}{1 + 4 \cdot (Q'_H)^2 \cdot \left(\frac{\Delta f}{f_0}\right)^2},$$

где  $P_{60} = 2 \cdot M_2^2 \cdot i_0^2 \cdot \{J_1(X)\}^2 \frac{G'_H}{G_n^2}$  - выходная мощность при резонансной частоте;

$G_n = G_e + G_o + G'_H$  - полная активная проводимость на зазоре выходного резонатора;  $Q'_H$  -нагруженная добротность в “горячем” режиме.

• Величина реактивной проводимости второго резонатора  $B_2$  заменена из (1.25), (1.26) следующим выражением:

$$B_2 = 2 \cdot Q'_H \cdot G_n \cdot \frac{\Delta f}{f_0}.$$

Добротность  $Q'_H$  следует определить из уравнения добротностей (1.23):

$$\frac{1}{Q'_H} = \frac{1}{Q'_0} + \frac{1}{Q'_{BH}}. \text{ Из условия задачи известно, что } \frac{Q'_0}{Q'_{BH}} = \frac{P_{nH}}{P_{nP}} = 10, \text{ тогда}$$

$$Q_H = \frac{Q'_0 \cdot Q'_{BH}}{Q'_0 + Q'_{BH}} = \frac{10 \cdot Q'^2_{BH}}{11 \cdot Q'_{BH}} = \frac{0,1 \cdot (Q'_0)^2}{1,1 \cdot Q'_0} = 0,091 \cdot Q'_0;$$

$$Q_H = 0,091 \cdot 1000 = 91.$$

• Изменение выходной мощности при расстройке резонатора на 0,5% от резонансной частоты будут составлять:

$$P_{\text{вых}} = \frac{P_{60}}{1 + 4 \cdot 91^2 \cdot (0,005)^2} = \frac{P_{60}}{1 + 0,8287} = 0,5468 \cdot P_{60} \approx 0,55 \cdot P_{60}$$

Вывод: выходная мощность изменяется почти в два раза, если изменение частоты происходит на 0,5% от  $f_0$ .

**Задача №3.** (Определение входной мощности усилительного клистрона).

Рассчитать величину мощности, которую необходимо подать на вход усилительного 2-х резонаторного клистрона, работающего в режиме максимальной выходной мощности, если в линейном режиме коэффициент усиления при этой мощности равен 34 дБ, рабочий ток пучка 0,1 А, коэффициенты взаимодействия обоих резонаторов 0,8. В каждом резонаторе сумма активной проводимости резонатора и электронной проводимости потока одинакова и составляет  $10^{-4}$  См, работа усилителя осуществляется в режиме сопряженного согласования.

**Решение.**

• Коэффициент усиления определяется с помощью формул (2.10) и (2.12). Причем коэффициент усиления в нелинейном режиме на 4 дБ меньше, чем в линейном режиме. Это позволяет определить  $K_{\text{ун}}$ .

$$K_{\text{ун}} = K_{\text{ул}} - 4 \text{ дБ} = 30 \text{ дБ}.$$

• В режиме максимальной выходной мощности (нелинейный режим) параметр группировки  $X=1,84$ , а так как по условию задан режим сопряженного согласования,  $B_2 + B'_H = 0$ ,  $G_2 + G_{e2} = G'_H$ , то выходная мощность равна:

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{2 \cdot M_2^2 \cdot i_0^2 \cdot (J_1(X))^2 \cdot G'_H}{(G_2 + G_{e2} + G'_H)^2 + (B_2 + B'_H)^2} = \frac{M_2^2 \cdot i_0^2 \cdot (J_1(X))^2}{2 \cdot G'_H}.$$

Функция Бесселя при оптимальной величине параметра группировки  $X=1,84$ , равна  $J_1(1,84)=0,58$ . Найдем выходную мощность и коэффициент усиления, подставив числовые значения,

$$P_{\text{ВЫХ}} = \frac{0,8^2 \cdot 0,1^2 \cdot 0,58^2}{2 \cdot 10^{-4}} = 10,765 \text{ (Вт)},$$

$$K_{yn} = 30 \text{ дБ} = 10 \lg \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}} = 1000.$$

Тогда входная мощность в нелинейном режиме будет равна  $P_{\text{ВХ}} = P_{\text{ВЫХ}} / 1000 = 10,765 / 1000 = 0,0108$  (Вт)

**Задача №4.** (Определение номера зоны генерации и напряжения на отражателе клистрона).

Отражательный клистрон работает на частоте 7 ГГц при ускоряющем напряжении резонатора 300 В. Расстояние между сетками резонатора 0,6 мм, расстояние резонатор - отражатель равно 5 мм; ток с катода 30 мА, полная проводимость резонатора в холодном режиме  $G_{\text{П}} = 50 \cdot 10^{-4}$  См, коэффициент прозрачности сеток  $K_C = 0,8$ . Определить номер зоны генерации, в пределах которого напряжение отражателя меньше напряжения резонатора.

**Решение.**

- Фазовое условие самовозбуждения отражательного клистрона имеет вид:

$$\theta_T + \theta_3 = 2\pi(n + 0,75), \quad (2.25)$$

где, согласно (2.4), угол пролёта электрона в пространстве тормозящего поля и зазоре резонатора определяются из выражений:

$$\theta_T = \frac{4 \cdot \omega \cdot D}{\sqrt{\frac{2 \cdot e}{m} \cdot U_0}} \frac{U_0}{U_{\Sigma}}; \quad \theta_3 = \frac{\omega \cdot d}{\sqrt{\frac{2 \cdot e}{m} \cdot U_0}}.$$

В условие (2.25) неизвестными величинами являются номер зоны генерации  $n$  и напряжение отражателя  $U_{\text{отр}}$ , которое можно определить так  $U_{\text{отр}} = U_{\Sigma} - U_0$ .

• Амплитудное условие самовозбуждения отражательного клистрона имеет вид  $G_{\Sigma} + G_n \leq 0$  или  $G_n \leq -G_{\Sigma}$ , где  $G_n = G_0 + G'_n$  - полная проводимость резонатора и нагрузки, трансформированной к зазору. Из (2.4) для отражательного клистрона

$$G_{\Sigma} = -\frac{M^2 \cdot J_0}{2 \cdot U_0} \cdot (\theta_T - \theta_3) \cdot F(X) \cdot \sin(\theta_T + \theta_3), \quad (2.26)$$

здесь  $M = \frac{\sin \theta_3 / 2}{\theta_3 / 2}$  - коэффициент взаимодействия, функция  $F(X) = \frac{2J_1(X)}{X} \rightarrow 1$  - в

режиме начала самовозбуждения, из (2.26) определим величину

$$\theta_T - \theta_3 = -\frac{2 \cdot U_0 \cdot G_{\Sigma}}{M^2 \cdot I_0 \cdot F(X) \cdot \sin(\theta_T + \theta_3)} \quad \text{или} \quad \theta_T + \theta_3 = \frac{2 \cdot U_0 \cdot G_n}{M^2 \cdot I_0 \cdot F(x)} + 2\theta_3,$$

которые можно поставить в условие (2.25) и определить  $n$ -номер генерации.

$$2 \cdot \pi \cdot (n + 0,75) = \frac{2 \cdot U_0 \cdot G_n}{M^2 \cdot I_0 \cdot F(X)} + 2\theta_3;$$

$$\theta_3 = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot d}{\sqrt{\frac{2 \cdot e}{m} \cdot U_0}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 7 \cdot 10^9 \cdot 0,6 \cdot 10^{-3}}{5,95 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{300}} \approx 0,8 \cdot \pi;$$

$$M = \frac{\sin(0,8 \cdot \frac{\pi}{2})}{0,4 \cdot \pi} = 0,75;$$

• Номер зоны генерации определяется из выражения

$$n + 0,75 = \frac{U_0 \cdot G_n}{M^2 \cdot I_0 \cdot F(x) \cdot \pi} + \frac{\theta_3}{\pi}; \text{ или } n = \frac{U_0 \cdot G_n}{M^2 \cdot I_0 \cdot F(X) \cdot \pi} + 0,8 - 0,75. \quad (2.27)$$

Примечание: Для центра любой зоны генерации

$$X \rightarrow 2,41, \quad J_1(2,41) \rightarrow 0,52$$

$$n = \frac{300 \cdot 50 \cdot 10^{-4}}{\pi \cdot 0,56 \cdot 30 \cdot 10^{-3} \cdot 0,52} + 0,05 \approx 6$$

Клистрон с заданными параметрами возбуждается в 6 зоне.

• Определим напряжение на отражателе для 6-й зоны генерации и покажем, что оно удовлетворяет условию:  $|U_{omp}| < U_0$ .

$$\theta_T + \theta_3 = \frac{4 \cdot \omega \cdot D}{\sqrt{\frac{2 \cdot e}{m} \cdot U_0}} \frac{U_0}{U_0 - U_{omp}} + \theta_3,$$

$$2 \cdot \pi \cdot (n + 0,75) = \frac{4 \cdot \omega \cdot D \cdot U_0}{5,95 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U_0} \cdot (U_0 - U_{отр})} + 0,8 \cdot \pi,$$

$$U_0 - U_{отр} = \frac{4 \cdot \omega \cdot D \cdot U_0}{5,95 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U_0} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (n + 0,75)},$$

$$U_{отр} = U_0 \cdot \left(1 - \frac{4 \cdot \omega \cdot D}{5,95 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U_0} \cdot 2 \cdot \pi \cdot (n + 0,75)}\right) = 300 \cdot \left(1 - \frac{4 \cdot 2 \cdot \pi \cdot 5 \cdot 10^{-3} \cdot 7 \cdot 10^9}{5,95 \cdot 10^5 \cdot 17,3 \cdot 6,75 \cdot 2 \cdot \pi}\right) = -250 \text{ В}$$

**Задача №5.** (Определение величины рабочего тока отражательного клистрона)

Определить величину рабочего тока отражательного клистрона в режиме максимального КПД при максимальной выходной мощности. Клистрон имеет следующие рабочие параметры: ускоряющее напряжение 300В, рабочая частота 7 ГГц, работа происходит в пятой зоне генерации. Собственная добротность резонатора 1000, внешняя добротность 200, проводимость резонатора при минимальном переменном напряжении на нем равна  $5 \cdot 10^{-4}$  См, размер зазора 0.6 мм, коэффициент прозрачности сеток 0,8.

**Решение.**

• В каждой зоне генерации существует максимальная выходная мощность, но есть только одна зона, где выходная мощность и КПД максимальны одновременно (режим максимального КПД и максимальной выходной мощности). Этот режим зависит от условий, связанных с величиной нагрузки и сопротивлением резонатора. В задаче задано, что оптимальной зоной должна быть пятая, и все остальные параметры (конструктивные и электрические) следует подобрать так, чтобы в 5-й зоне был режим максимального КПД.

• Номер оптимальной зоны находим из уравнения баланса мощностей, имеющего вид:  $P_{эл} = P_{вых} + P_{ном}$ . Запишем уравнение мощности в виде [25]

$$2G_{эл0} X J_1(X) = G_p X^2 + G_n X^2, \quad \text{где } G_{эл0} = \frac{(\theta_T - \theta_3) \cdot I_0 \cdot M^2}{2 \cdot U_0} = (G_p + G'_n)_{U_1 \rightarrow 0}$$

есть предельная нагрузка (состоящая из потерь резонатора и полезной нагрузки), при которой амплитуда колебаний стремится к нулю, или предельная проводимость электронного потока.

Выходная мощность, оптимизированная по параметру группировки  $X$  и по параметру  $\theta_T$  после подставки нагрузки  $G_n$  из уравнения баланса мощностей, приводится к виду  $P_{вых} = \frac{I_0 \cdot U_0}{\theta_T - \theta_3} \left( \frac{2 \cdot J_1(X)}{X} - \frac{G_p}{G_{эл0}} \right) \cdot X^2$ , где условия оптимальных значений  $G_p$  и  $G'_n$  имеют вид:  $G_p = 0,317 G_{эл0}$ ;  $G'_{ном} = 0,317 G_{эл0}$ , т.е.  $G_p = G'_n$ , при  $X = 1,84$ .

Выходная оптимальная мощность с учетом этих параметров имеет вид  $P_{вых} = \frac{K_C I_0 U_0}{\theta_T - \theta_3}$ , а номер оптимальной зоны определяется из  $\theta_T - \theta_3 = \frac{6 U_0 G_p}{K_C M^2 I_0}$ :

$$n_{онм} = \frac{U_0 G_p}{K_C M^2 I_0} \quad (2.28)$$

• Трансформированная к зазору величина проводимости нагрузки  $G'_n$  равна  $G'_n = G_{эл0} \cdot \frac{Q_{BH}}{Q_0}$ , откуда величина собственной проводимости резонатора:

$G_p = G_{эл0} \cdot \frac{Q_{BH}}{Q_0}$ , позволяет определить из (2.28) величину тока  $I_0$ .

$$\bullet \quad I_0 = \frac{U_0 \cdot G'_n}{K_C \cdot M^2 \cdot n_{онм}} = \frac{U_0 \cdot G_{эл0} \cdot Q_{BH}}{Q_0 \cdot K_C \cdot M^2 \cdot n_{онм}}, \quad \theta_3 = 0,4 \cdot 2\pi \quad (2.29)$$

$$M^2 = \left( \frac{\sin \theta_3 / 2}{\theta_3 / 2} \right)^2 = (0,75)^2 = 0,51 \quad - \text{ как в предыдущей задаче.}$$

$$I_0 = \frac{300 \cdot 200 \cdot 5 \cdot 10^{-4}}{1000 \cdot 0,51 \cdot 0,8 \cdot 5} = 0,015 \text{ (A)}.$$

### Задача №6. (Определение величины напряжения на отражателе)

Определить напряжение отражателя на краях пятой зоны генерации и диапазон электронной настройки при всех параметрах предыдущей задачи:  $f=7$  ГГц,  $U_0=300$  В,  $U_R=-250$  В,  $n=5$ ,  $Q_0=1000$ ,  $Q_{BH}=200$ .

#### Решение.

• Ширина зоны генерации (2.22) в виде изменения угла пролёта равна

$$\Delta \theta = \frac{\theta_T \cdot \Delta U_R}{U_\Sigma - \Delta U_R}.$$

Откуда получим изменение напряжения на отражателе по отношению к оптимальному напряжению в центре зоны:

$$\Delta U_R = \frac{U_\Sigma \cdot \frac{\Delta \theta}{\theta_T}}{1 + \frac{\Delta \theta}{\theta_T}} \quad (2.30)$$

где  $\Delta \theta = \pm 0,89$ , а величина угла пролёта в пространстве тормозящего поля будет  $\theta_T = 2 \cdot \pi \cdot (n + 0,75) - \theta_3$ . Тогда ширина зоны генерации:

$$U_{\text{зоны}} = U_\Sigma \cdot \frac{0,3}{n + 0,4} \quad (2.31)$$

$$U_{\text{зоны}} = (300 + 250) \cdot \frac{0,3}{5,4} = 30,5.$$

Найдем пределы изменения напряжения (2.30) на отражателе в пятой зоне:

$$\theta_T = 2 \cdot \pi \cdot (n + 0,75) - \theta_3 = 2 \cdot \pi \cdot 5,75 - 2 \cdot \pi \cdot 0,4 = 33,6$$

$$\Delta U_R = \frac{550 \frac{0,89}{33,6}}{1 + \frac{0,89}{33,6}} = 14,23(B), \quad \Delta U_R = \frac{550 \frac{(-0,89)}{33,6}}{1 - 0,026} = -14,96(B)$$

**Вывод:** зона несколько не симметрична, она сдвинута в сторону более высоких отрицательных напряжений.

Определим изменение частоты от напряжения, т.е. диапазон электронной настройки  $\Delta f$ :

$$\Delta f = -\frac{f}{Q_H} \operatorname{tg} \frac{\theta_T \cdot \Delta U_R}{U_\Sigma - \Delta U_R} \quad \text{здесь}$$

$$Q_H = \frac{Q_0 \cdot Q_{\text{вн}}}{Q_0 + Q_{\text{вн}}} = \frac{200000}{1200} \approx 167$$

$$\Delta f_1 = -\frac{7 \cdot 10^9}{167} \operatorname{tg} \frac{33,6 \cdot 14,23}{550 - 14,23} = -0,051 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

$$\Delta f_2 = \frac{7 \cdot 10^9}{167} \operatorname{tg} \frac{33,6 \cdot 14,96}{566} = 0,052 \cdot 10^9 \text{ Гц}$$

Диапазон изменения частот на краях зоны генерации равно 10 МГц.

### 5.3. Индивидуальное задание №3

#### Лампа бегущей волны и лампа обратной волны О - типа.

-раздел программы – 2.3.3.

##### 5.3.1. Основные вопросы теории

В этом задании студенту необходимо изучив основной материал провести расчеты параметров и характеристик (коэффициента усиления, коэффициента замедления, параметров волны в неоднородных ЗС, выходной мощности и КПД, полосы рабочих частот и пр.) усилителей, и генераторов на ЛБВО и ЛОВО при различных условиях.



В приборах О - типа используются прямолинейные электронные потоки, взаимодействующие с продольной составляющей электрического СВЧ- поля. При этом взаимодействии поток электронов модулируется по скорости и плотности и одновременно передает энергию полю. К этим приборам относятся лампы бегущей волны О - типа (ЛБВО) и лампы обратной волны О - типа (ЛОВО).

Вдоль замедляющей системы распространяется электромагнитная волна с фазовой скоростью  $V_\phi$  и групповой скоростью  $V_{gp}$ , а вдоль оси замедляющей системы распространяется электронный поток со скоростью  $V_0$ . Эффективное взаимодействие волны и потока будет при условии примерного равенства скоростей  $V_\phi = V_0$ , а точное соотношение имеет вид:

$$V_\phi = \frac{V_0}{1 + 0,5 \cdot K_c}, \quad (3.1)$$

где  $K_c$  - параметр усиления, зависящий от тока в электронном потоке  $I_0$ , сопротивления связи замедляющей системы  $R_{св}$  и ускоряющего напряжения на ЗС  $U_0$ , определяется соотношением:

$$K_c = \sqrt[3]{\frac{I_0 \cdot R_{св}}{4 \cdot U_0}}, \quad (3.2)$$

Для неоднородных ЗС продольная составляющая электрического поля представляет сумму полей всех пространственных гармоник [2] вида:

$$E_z(x, y, z, t) = \sum_{m=-\infty}^{\infty} E_{zm}(x, y, z) \cdot \exp[j \cdot (\omega \cdot t - \beta_m \cdot z)], \quad (3.3)$$

где 
$$\beta_m = \beta + \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{D}, \quad m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (3.4)$$

фазовая постоянная распространения пространственной гармоники с номером  $m$ ;  $D$  - период замедляющей системы;  $\beta = \frac{\Psi}{D}$  для гармоники  $m = 0$ ;  $\Psi$  - сдвиг фазы на периоде ЗС для нулевой гармоники. Каждая гармоника распространяется со своей фазовой скоростью  $U_{\phi m}$

$$V_{\phi m} = \frac{\omega}{\beta + \frac{2 \cdot \pi \cdot m}{D}}. \quad (3.5)$$

Групповая скорость (скорость переноса энергии) у всех гармоник на фиксированной частоте величина постоянная

$$V_{rm} = \frac{d\omega}{d\beta_m} = V_{r(m=0)} \quad (3.6)$$

Длина замедленной волны  $\lambda_z$  зависит от длины волны  $\lambda$  в свободном пространстве и отношения фазовой скорости к скорости света, для гармоники  $m$  равна

$$\lambda_{zm} = \frac{2 \cdot \pi}{\beta_m} = \lambda \cdot \frac{V_{\phi m}}{c}. \quad (3.7)$$

Для случая нулевой гармоники  $m = 0$ , с учетом (1.2) и величины  $c$ , определяется соотношением:

$$\lambda_{30} = \lambda \cdot \frac{V_{\Phi}}{c} = \lambda \cdot \frac{\sqrt{U_0}}{505} = \lambda / K_3 . \quad (3.7a)$$

Лампа бегущей волны О - типа в основном используется как усилитель СВЧ сигнала. Коэффициент усиления по напряжению находится как отношение амплитуды электрического поля на выходе ЗС ( $z=l$ ) к амплитуде поля на входе ЗС ( $z=0$ )

$$K_y = E_{zm}(l) / E_{zm}(0) . \quad (3.8)$$

Напряженность поля взаимодействующей волны [2] в отсутствии потерь в ЗС изменяется по закону

$$E_z = E_{zm}(0) \cdot e^{\frac{\sqrt{3}}{2} K_c \frac{\omega z}{V_0}} \cdot e^{j[\omega t - \frac{\omega}{V_0} \cdot (1+0,5 \cdot K_c) z]} . \quad (3.9)$$

Коэффициент усиления (3.8) для взаимодействующей волны в линейном режиме с учетом (3.9) определяется в виде:

$$K_y = -9,54 + 47,3 \cdot N \cdot K_c - L , \text{ [дБ]}, \quad (3.10)$$

где  $L$  - потери, вносимые сосредоточенным поглотителем (обычно, менее 15дБ);

$N = \frac{l}{\lambda_3}$  - электрическая длина замедляющей системы.

Из (3.9), величина постоянной распространения усиливаемой волны  $\overset{\circ}{\Gamma}$  имеет

$$\text{ет вид:} \quad \overset{\circ}{\Gamma} = j \cdot \frac{\omega}{V_0} \cdot (1+0,5 \cdot K_c) - \frac{\sqrt{3}}{2} \cdot \frac{\omega}{V_0} \cdot K_c = -\alpha + j \cdot \beta \quad (3.11)$$

Переменная составляющая скорости электронов и переменная составляющая плотности заряда и плотности тока в пучке (результат воздействия переменного электрического поля в ЗС) определяются выражениями:

$$v_m = - \frac{e \cdot E_{zm}}{m \cdot V_0 \cdot (j \cdot \frac{\omega}{V_0} - \overset{\circ}{\Gamma})} , \quad (3.12)$$

$$\rho_m = -j \cdot \frac{\overset{\circ}{\Gamma}}{\omega} \cdot J_m ,$$

$$J_m = -j \frac{\rho_0 \cdot V_0 \cdot \frac{\omega}{V_0} \cdot E_{mz}}{2 \cdot U_0 \cdot (j \cdot \frac{\omega}{V_0} - \overset{\circ}{\Gamma})^2} , \quad (3.13)$$

$$I_m = -j \cdot \frac{I_0}{2 \cdot U_0} \cdot \frac{\frac{\omega}{V_0} \cdot E_{mz}}{(j \cdot \frac{\omega}{V_0} - \overset{\circ}{\Gamma})^2} .$$

Продольное переменное напряжение ЗС в случае бегущих волн находится из соотношения:

$$U = - \frac{\overset{\circ}{\Gamma} \cdot \overset{\circ}{\Gamma}_0 \cdot R_{cb} \cdot I_k}{\overset{\circ}{\Gamma}_0^2 - \overset{\circ}{\Gamma}^2} , \quad (3.14)$$

где  $\Gamma_0 = j \cdot \frac{\omega}{V_0} = j \cdot \sqrt{B_0 \cdot X_0}$  - величина постоянной распространения волны в «холод-

ной» лампе при условии синхронизма скоростей  $V_\phi = V_0$ ;

$I_k$  - величина конвенционного тока в электронном потоке;

$R_{c\phi} = \sqrt{\frac{X_0}{B_0}} = \frac{U}{I}$  - сопротивление связи замедляющей системы;

$X_0, B_0$  - погонное сопротивление и погонная проводимость «холодной» замедляющей системы.

**ЛОВО** используются, в основном, как маломощные генераторы с электронной перестройкой частоты. Условие баланса фаз в ЛОВО имеет вид

$$\frac{\omega \cdot L}{V_{\phi(-1)}} - \frac{\omega \cdot L}{V_0} = (2 \cdot n + 1) \cdot \pi, \quad n=0, 1, 2, \dots \quad (3.15)$$

Из (3.5), имеем  $V_{\phi(-1)} = \frac{\omega}{\left(\beta - \frac{2 \cdot \pi}{D}\right)}$  - фазовая скорость отрицательной первой об-

ратной гармоники при  $m = -1$ .

Баланс амплитуд генератора на ЛОВО определяется необходимой величиной

пускового тока  $I_{\text{пуск}} \approx 0,124 \cdot \frac{U_0}{R_{c\phi} \cdot N^3}$ . (3.16)

Электронный КПД ЛОВ типа О определяется величиной параметра усиления

$$\eta_e \approx 0,84 \cdot K_c \approx \frac{2}{\pi \cdot N} \quad (3.17)$$

Колебательная мощность  $P_e$  генератора на ЛОВО можно с достаточной точностью вычислить, используя соотношение:

$$P_e = \eta_e \cdot U_0 \cdot (I_0 - I_{\text{пуск}}) \quad (3.18)$$

Генерируемая длина волны или усиливаемая, если известны геометрические размеры встречно - штыревой ЗС, наиболее часто используемой в ЛОВО, и ускоряющее напряжение для гармоники  $m = -1$ , может быть определена в виде

$$\lambda = 2 \cdot h + D + \frac{c \cdot D}{5,95 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U_0}}, \quad (3.19)$$

где  $h$  – высота штыря встречно-штыревой замедляющей системы.

Скорость электронного потока, необходимая для взаимодействия в случае встречно-штыревой ЗС и произвольной гармоники  $m$ , находится из выражения

$$V_0 = \frac{c \cdot D}{2 \cdot h + D + (2 \cdot m + 1) \cdot \lambda} \quad (3.20)$$

Коэффициент шума  $K_{ш}$  усилительных ЛБВ определяется соотношением

$$K_{ш} = 10 \cdot \lg \left( 1 + \frac{T_{ш}}{T_0} \right), [\text{дБ}] \text{ или} \quad (3.21)$$

$$K_{ш} = 10 \cdot \lg \left( 1 + \frac{P_{шс}}{k \cdot T_0 \cdot \Delta\nu} \right), [\text{дБ}],$$

где  $T_{ш}$  - эффективная шумовая температура, определяется как абсолютная температура согласованной нагрузки, включенной ко входу усилителя, при которой на выходе шумовая мощность равна  $P_{шс}$ ;

$$(P_{шс} = k \cdot T_{ш} \cdot \Delta\nu); T_0 = 290\text{K}; k = 1,38 \cdot 10^{-23} \frac{\text{Дж}}{\text{град}} - \text{постоянная Больцмана};$$

$\Delta\nu$  - полоса рабочих частот.

Из (3.19) видно, что шумовая температура усилителя зависит от абсолютной величины коэффициента шума и определяется равенством:

$$T_{ш} = 290 \cdot (K_{ш\text{абс}} - 1), [K] \quad (3.22)$$

### 5.3.2. Примеры решения задач

**Задача 1.** (Определение сопротивления связи спиральной ЗС).

Ускоряющее напряжение ЛБВ типа О равно 1600 В, ток луча 1,5 мА, геометрия замедляющей системы известна: шаг спирали 1 мм, радиус спирали 2 мм. Определить сопротивление связи спиральной замедляющей системы.

**Решение.**

Из (3.2), получим выражение для определения  $R_{св}$

$$R_{св} = \frac{K_c^3 \cdot 4 \cdot U_0}{I_0}, \text{ хотя в этом равенстве неизвестна величина параметра усиления } K_c,$$

но ее можно найти, используя выражение фазовой скорости для усиливаемой волны (3.1). Скорость электронов в потоке

$$V_0 = V_\phi \cdot (1 + 0,5 \cdot K_c), \quad (3.21)$$

при известных размерах спирали  $V_\phi = \frac{c \cdot D}{2 \cdot \pi \cdot a}$  (для первого приближения)

Из (3.21) находится  $K_c$

$$K_c = \left( \frac{V_0}{V_\phi} - 1 \right) \cdot 2 = 2 \cdot \left( \frac{5,95 \cdot 10^5 \sqrt{U_0 \cdot (2 \cdot \pi \cdot a)^2}}{c \cdot D} - 1 \right)$$

$$K_c = 2 \left( \frac{5,95 \cdot 10^5 \sqrt{1600 \cdot 6,28 \cdot 2 \cdot 10^{-3}}}{3 \cdot 10^8 \cdot 1 \cdot 10^{-3}} - 1 \right) \approx 0,02$$

Найдем сопротивление связи  $R_{св} = \frac{0,02^3 \cdot 4 \cdot 1600}{1,5 \cdot 10^{-3}} = 34,2 \text{ Ом}.$

**Задача 2.** (Определение ускоряющего напряжения).

Найти оптимальное ускоряющее напряжение и коэффициент замедления ЛБВ типа О, работающей в режиме линейного усиления, если известны следующие геометрические параметры: угол намотки спирали по отношению к плоскости, перпендикулярной к оси спирали  $\Psi = 4,55^\circ$ , шаг спирали  $D = 1$  мм, требуемая величина параметра усиления  $K_c = 0,1$ .

**Решение.**

Из выражений для скорости электронов  $V_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot e}{m}} \cdot U_0$  и фазовой скорости волны в спиральной замедляющей системе  $V_\phi = \frac{c \cdot D}{2 \cdot \pi \cdot a}$ , находим ускоряющее напряжение

$$U_0 = \frac{m \cdot c^2}{8 \cdot e \cdot \pi^2} \cdot \left(\frac{D}{a}\right)^2, \quad (3.22)$$

здесь  $a$  - радиус спирали,  $c$  - скорость света.

Радиус спирали определяется из выражения коэффициента замедления

$$1/K_3 = \sin \Psi = \frac{V_\phi}{c} \quad \text{и} \quad \sin \Psi = \frac{D}{\sqrt{(2 \cdot \pi \cdot a)^2 + D^2}} \quad (3.23)$$

Откуда

$$a = \frac{1}{2 \cdot \pi} \sqrt{\left(\frac{D}{\sin \Psi}\right)^2 - D^2} = 2 \text{ мм}$$

Величина ускоряющего напряжения, при которой коэффициент усиления максимален, из (3.22) равна

$$U_0 = \frac{9,1 \cdot 10^{-31} \cdot (3 \cdot 10^8)^2}{8 \cdot (3,14)^2 \cdot 1,6 \cdot 10^{-19}} \left(\frac{1}{2}\right)^2 = 1625 \text{ В}.$$

Если учесть в фазовой скорости  $V_\phi$  величину параметра усиления (3.1), то

$$V_\phi = \frac{V_0}{1 + 0,5 \cdot 0,1} = \frac{V_0}{1,05}$$

$$U_0 = \left(\frac{V_\phi \cdot (1 + 0,05)}{5,95 \cdot 10^5}\right)^2 = \left(\frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 1,05}{6,28 \cdot 2 \cdot 10^{-3} \cdot 5,95 \cdot 10^5}\right)^2 = 934,5 \text{ В}$$

$$V_\phi = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 1}{6,28 \cdot 2} = 2,38 \cdot 10^7 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Коэффициент замедления в ЛБВ будет равен

$$K_3 = \frac{c}{V_\phi} = \frac{3 \cdot 10^8}{2,38 \cdot 10^7} = 12,6.$$

**Задача 3.** (Зависимость сопротивления связи спиральной ЗС от длины волны)

Как будет изменяться сопротивление связи спиральной замедляющей системы на нулевой гармонике, если осуществлять изменение длины волны в пределах  $\lambda_0 = 3,2 \pm 0,5$  см? Ускоряющее напряжение не изменяется и равно 900 В, требуемый параметр усиления 0,03, диаметр спирали равен 2 мм.

**Решение.**

Сопротивление связи спиральной ЗС определяется соотношением

$$R_{св} = \frac{c}{V_\phi} \cdot 13,3 \left(\frac{\lambda_3}{2 \cdot \pi \cdot a}\right)^2, [\text{Ом}], \quad (3.24)$$

где  $a$  - радиус спирали,  $\lambda_3$  - длина замедленной волны.

Используя (3.1), находим фазовую скорость

$$V_{\phi} = \frac{V_0}{1+0,5 \cdot K_c} = \frac{5,95 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U_0}}{1+0,5 \cdot 0,03} = 1,76 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

$$\lambda_3 = \lambda_0 \cdot \frac{V_{\phi}}{c} = \lambda_0 \cdot \frac{1,76 \cdot 10^7}{30 \cdot 10^7} = \lambda_0 \cdot 0,059$$

Подставив в (3.24) полученные значения, получим требуемую зависимость

$$R_{\text{св}} = \frac{1}{0,059} \cdot 13,3 \cdot \frac{(0,059)^2}{(2 \cdot 3,14 \cdot 10^{-3})^2} \cdot \lambda_0^2 (\text{см}) = 2 \cdot 10^4 \cdot \lambda_0^2 = 2 \cdot \lambda_0^2 (\text{см}), [\text{Ом}]$$

Таблица 3.1

Расчетные данные для зависимости сопротивления связи от длины волны  $R_{\text{св}} (\lambda_0)$

$\lambda_0$ , см	2,7	2,8	2,9	3,0	3,1	3,2	3,3	3,4	3,5	3,6	3,7
$R_{\text{св}}$ , Ом	14,6	15,7	16,8	18	19,2	20,5	21,8	23,1	24,5	25,9	27,4

**Задача 4.** (Определение амплитуды конвенционного тока и переменного напряжения)

Определить амплитуду конвенционного тока и амплитуду переменного напряжения ЛБВ типа О на входе. Известно, что входная мощность  $P_{\text{вх}}=1$  мВт, постоянный ток  $I_0=2,5$  мА, ускоряющее напряжение 900В, сопротивление связи  $R_{\text{св}} = 20$  Ом, рабочая длина волны  $\lambda_0=3,2$  см.

**Решение.**

Уравнение для определения амплитуды тока согласно (3.13)

$$I_1 = -i \frac{I_0}{2 \cdot U_0} \cdot \frac{\beta_e}{(i \cdot \beta_e - \Gamma)^2} \cdot E_{\text{мз}}$$

где  $\beta_e = \frac{\omega}{V_0}$  - электронное волновое число;  $\Gamma$  - постоянная распространения волны в горячей лампе;  $E_{\text{мз}}$  - напряженность продольного переменного электрического поля.

Определим  $\beta_e$ :

$$\beta_e = \frac{\omega}{V_0} = \frac{2 \cdot \pi \cdot c}{\lambda_0 \cdot 6 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{U_0}} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 3 \cdot 10^8}{3,2 \cdot 10^{-2} \cdot 6 \cdot 10^5 \cdot \sqrt{900}} \approx 3270, 1/\text{м}.$$

Рассчитаем параметр усиления  $K_c$

$$K_c = \sqrt[3]{\frac{I_0 \cdot R_{cb}}{4U_0}} = \sqrt[3]{\frac{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 20}{4 \cdot 900}} = \sqrt{13,9 \cdot 10^{-6}} = 0,024$$

Напряженность переменного электрического поля на входе найдем из соотношения

$$P_{вх} = \frac{E_{mz}^2}{2 \cdot \beta_e^2 \cdot R_{cb}}, \text{ т.е.}$$

$$E_{mz} = \beta_e \cdot \sqrt{2 \cdot P_{вх} \cdot R_{cb}} = 3270 \cdot \sqrt{1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 20} = 654 \frac{\text{В}}{\text{м}}$$

Постоянная распространения волны в горячей лампе  $\overset{\circ}{\Gamma}$ , входящая в выражение амплитуды тока (3.13) и напряжения (3.14), определяется (3.11)

$$\overset{\circ}{\Gamma} = j \cdot \beta_e \cdot (1 + 0,5 \cdot K_c) - 0,5 \cdot \sqrt{3} \cdot \beta_e \cdot K_c = \beta_e \cdot [j(1 + 0,5 \cdot K_c) - 0,866 \cdot K_c] = j \cdot 3270 \cdot (1 + 0,5 \cdot 0,024) - 0,866 \cdot 3270 \cdot 0,024 = 3309 \cdot j - 67,97$$

Подставим полученные значения  $\overset{\circ}{\Gamma}, \beta_e$  в (3.13), (3.14)

$$I_m = -\frac{I_0}{2 \cdot U_0} \cdot \frac{\beta_e \cdot E_{mz}}{(j \cdot \beta_e - \overset{\circ}{\Gamma})^2} = -\frac{2,5 \cdot 10^{-3} \cdot 3270 \cdot 654,4}{2 \cdot 900 \cdot (j \cdot 3270 - j \cdot 3309 + 67,97)^2} = j \cdot \frac{5349,7}{1800 \cdot (68,0 - 39 \cdot j)^2} = -0,483 \cdot 10^{-3} \cdot e^{-j2,16}$$

В (3.14)  $\Gamma_0 = \beta_e$

$$U_m = -\frac{\Gamma \cdot \beta_e \cdot R_{cb} \cdot I_m}{\Gamma^2 - \beta_e^2} = \frac{(j \cdot 3309 - 67,97) \cdot 3270 \cdot 20 \cdot 0,483 \cdot 10^{-3}}{e^{j2,16} \cdot [(j \cdot 3309 - 67,97)^2 - 3720^2]} = \frac{31,59 \cdot (j \cdot 3309 - 68)}{e^{j2,16} \cdot [-10,95 \cdot 10^6 - j \cdot 0,45 \cdot 10^6]} = -\frac{31,59 \cdot 3309 \cdot e^{-j49}}{e^{j2,16} \cdot 10^6 \cdot 10,95 \cdot e^{-j0,04}} = 0,0096 \cdot e^{j48} = 0,0096 \cdot e^{-j15,3\pi} = 0,0096 \cdot e^{-j1,1\pi}$$

Ответ. Амплитуда переменной составляющей тока 0,483 мА, что создает амплитуду переменного напряжения 0,01 В на входе спирали.

**Задача 5.** (Расчет коэффициента усиления).

Рассчитать коэффициент усиления по мощности и сопротивление связи ЗС для ЛБВ типа О, работающей на длине волны 15 см. Ток пучка 6 мА, ускоряющее напряжение 1200В. Выходная мощность лампы 0,25 Вт при рабочей длине замедляющей системы 20 см, коэффициент вносимых замедляющей системой потерь равен 0,58 дБ.

**Решение.**

Для определения коэффициента усиления следует воспользоваться (3.10), но необходимо рассчитать параметр усиления  $K_c$  (3.2) и число длин замедленной волны на длине спирали  $N$ .

Найдем из соотношения (3.7а) величину коэффициента замедления

$$K_3 = \frac{505}{\sqrt{U_0}} = \frac{505}{\sqrt{1200}} = \frac{505}{34,64} = 14,6$$

и длину замедленной волны в спиральной ЗС на нулевой гармонике

$$\lambda_c = \frac{\lambda}{K_3} = \frac{15}{14,6} = 1,03 \text{ см} .$$

$$V_\phi = \frac{C}{K_3} = 2,055 \cdot 10^7 \frac{\text{м}}{\text{с}}$$

Выходная максимальная мощность ЛБВО равна

$$P_{\max} = \eta \cdot I_0 \cdot U_0$$

где  $\eta = 1,5 \cdot K_c$  - максимальный коэффициент полезного действия в режиме  $P_{\max}$ ,  $K_c$  - параметр усиления не известен, но может быть определен

$$K_c = \frac{P_{\max}}{1,5 \cdot I_0 \cdot U_0} = \frac{0,25}{1,5 \cdot 6 \cdot 10^{-3} \cdot 1200} = 0,023 .$$

Количество замедленных длин волн на длине спирали  $l_c$

$$N = \frac{l_c}{\lambda_c} = \frac{20}{1,03} = 19,42$$

Коэффициент усиления

$$K_{y(\text{дБ})} = -9,54 + 47,3 \cdot N \cdot K_c - L = -9,54 + 47,3 \cdot 19,42 \cdot 0,023 - 0,58 = 11,9 \text{ дБ}$$

Требуемое сопротивление связи для работы лампы определим из (3.2).

Подставляя данные  $R_{\text{св}} = \frac{4 \cdot U_0 \cdot K_c^3}{I_0} = \frac{4 \cdot 1200 \cdot 0,023^3}{6 \cdot 10^{-3}} \approx 10 \text{ [Ом]}$

Радиус спиральной замедляющей системы можно определить [19] из соотношения

$$R_{\text{св}} = K_3 \cdot 0,56 \cdot 60 \cdot \pi \cdot e^{\frac{4 \cdot \pi \cdot a}{\lambda_3}}$$

$$e^{\frac{4 \cdot \pi \cdot a}{\lambda_3}} = \frac{K_3 \cdot 0,56 \cdot 60 \cdot \pi}{R_{\text{св}}} = \frac{14,6 \cdot 0,56 \cdot 60 \cdot 3,14}{10} = 154$$

$$e^A = 154$$

$$A = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda_c} = 5,05$$

$$a = \frac{5,05 \cdot \lambda_c}{6,28} = \frac{5,05 \cdot 1,03}{6,28} = 0,828 \text{ см}$$

**Задача 6.** (Определение сопротивления связи в ЛОВ типа О).

Для ЛОВ типа О, работающей на средней частоте диапазона 3 ГГц, при ускоряющем напряжении 890 В, рабочем токе 30 мА, определить пусковой ток, КПД и выходную мощность. В ЛОВ типа О использована однозаходная спираль



длинной 12,7 см с радиусом 0,6 см, при полном затухании спирали  $L=2$  дБ. Определить сопротивление связи.

**Решение.**

Определим параметр

$$ka = \frac{2 \cdot \pi \cdot a}{\lambda} = \frac{6,28 \cdot 0,6}{10} = 0,3768$$

$$\text{и } \frac{1}{ka} = \frac{1}{0,3768} = 2,65$$

Из выражения ускоряющего напряжения для первой обратной гармоники [19] в ЛОВО

$$U_0 = \frac{25,5 \cdot 10^4}{(\text{ctg} \Psi)^2} \cdot \frac{1}{\left(1 - \frac{1}{ka}\right)^2}$$

найдем  $\text{ctg} \Psi$

$$\text{ctg} \Psi = \sqrt{\frac{25,5 \cdot 10^4}{U_0 \left(1 - \frac{1}{ka}\right)^2}} = \sqrt{\frac{25,5 \cdot 10^4}{890(1 - 2,65)^2}} = 10,25.$$

Число замедленных длин волн на первой обратной гармонике в спирали определяется из

$$N = \frac{l_c}{\lambda_c} = \frac{l_c}{2 \cdot \pi \cdot a} \text{ctg} \Psi \cdot |(ka - 1)| = \frac{12,7 \cdot 10,25}{2 \cdot 3,14 \cdot 0,6} |(0,3768 - 1)| = 21,5.$$

Сопротивление связи однозаходной спиральной замедляющей системы на средней частоте в ЛОВО находится по формуле [19]

$$R_{св} = \frac{16,7}{\left(\frac{1}{ka} - 0,923\right)^2} \cdot \frac{1}{ka} = \frac{16,7 \cdot 2,65}{(2,65 - 0,923)^2} = 14,84 \text{ [Ом]}.$$

Пусковой ток лампы обратной волны согласно формуле (3.16)  $I_n = \frac{4 \cdot U_0 \cdot (K_c N)_n^3}{R_{св} \cdot N^3}$  можно найти, если будет известна величина  $(K_c N)_n$ . С учетом пространственного заряда и потерь в замедляющей системе величина  $(K_c N)_n$  определяется в виде

$$(K_c N)_n = 0,314 + 6,1 \cdot 10^{-3} L_{[дБ]} = 0,314 + 6,1 \cdot 10^{-3} \cdot 2 = 0,326$$

Теперь находим пусковой ток и остальные требующиеся параметры

$$I_n = \frac{4 \cdot 890 \cdot 0,326^3}{14,84 \cdot (21,5)^3} = 0,836 \cdot 10^{-3}, \text{ A};$$

$$\eta = \frac{2}{\pi \cdot N} = \frac{2}{3,14 \cdot 21,5} = 0,0296;$$

$$P_{\text{вх}} = \eta \cdot U_0 \cdot (I_0 - I_n) = 0,0296 \cdot 890 \cdot (30 - 0,836) \cdot 10^{-3} = 770 \cdot 10^{-3} = 770, [\text{мВт}].$$

## 5.4. Индивидуальное задание №4

### Приборы М – типа - Разделы программы – 2.3.4. – 2.3.5.

#### 5.4.1. Основные вопросы теории

В этом задании студенту необходимо, изучив основной материал, уметь рассчитывать параметры траекторий электронов в приборах - М типа, частотный спектр резонаторного блока магнетрона или параметры замедляющей системы прибора М-типа, проводить расчеты параметров и характеристик генераторов и усилителей при различных условиях. Приборами типа М являются: магнетроны, лампы бегущей волны типа - М – ЛБВМ, лампы обратной волны типа – М – ЛОВМ, платинотроны.

В приборах М – типа движение электронов происходит во взаимно ортогональных (скрещенных) постоянных электрическом и магнитном полях, и в создаваемых переменных электрических СВЧ полях.

При этих движениях электроны группируются и взаимодействуют с переменными составляющими электрического СВЧ поля, передавая свою потенциальную энергию. В приборах, таким образом, суммарные электрические (переменные и постоянные) и магнитные (постоянные) силы действуют на движущийся электрон.

Уравнение движения электрона в скрещенных полях ( $\vec{E} \perp \vec{B}$ ) имеет вид

$$\frac{d\vec{V}}{dt} = \frac{-e}{m_0} \{ \vec{E} + [\vec{V} \cdot \vec{B}] \}. \quad (4.1)$$

Решением этого уравнения в декартовой системе координат для случая магнетронного генератора будет уравнение циклоиды (частный случай трохойды):

$$\begin{aligned} x &= x_0 + \frac{E}{B} t - \frac{m_0 \cdot E}{e \cdot B^2} \sin \omega_{\text{ц}} \cdot t, \\ y &= -\frac{m_0 \cdot E}{e \cdot B^2} (1 - \cos \omega_{\text{ц}} \cdot t), \\ z &= z_0. \end{aligned} \quad (4.2)$$

В декартовой системе координат катод магнетрона лежит в плоскости  $y_0 = 0$ , скорости начальные электронов отсутствуют, движение идет вдоль оси  $x$ , траектории движения лежат в плоскости  $z = z_0$ .

В (4.2)  $\omega_{\text{ц}}$  - круговая циклотронная частота

$$\omega_{\text{ц}} = \frac{e \cdot B}{m_0}; \quad (4.3)$$

$$R = \frac{m_0 \cdot E}{e \cdot B^2} = \frac{V_{\text{ц}}}{\omega_{\text{ц}}} - \text{радиус круга, описывающего циклоиду}; \quad (4.4)$$

$$V_{\text{ц}} = \frac{E}{B} - \text{скорость центра круга, движущегося (катящегося) без скольжения}. \quad (4.5)$$

Полное время полета электрона, находящегося на ободке колеса, от катода к вершине циклоиды и обратно к катоду равно  $t_n = \frac{2 \cdot \pi}{\omega_{\text{ц}}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot m_0}{e \cdot B}$ .

### Примечание

Каноническая форма трохоиды

$$x = V_{\text{ц}} \cdot t - r \cdot \sin \varphi, \quad y = R - r \cdot \cos \varphi, \quad Z = Z_0,$$

где  $r$  – расстояние точки, описывающей трохоиду, от центра круга, для циклоиды  $r = R$ ;  $\varphi$  – угол поворота круга.

При движении в статистических полях между магнитной индукцией и напряжением на аноде устанавливается зависимость, называемая критической связью. Эта зависимость описывается кривой, называемой параболой критического режима, при движении по которой вершина циклоиды касается анода.

Если между анодом и катодом расстояние равно  $d$ , то это касание происходит при  $d = 2 \cdot R$ .

Учитывая (4.4), и  $U_a = E \cdot d$  получим для плоского магнетрона (и любого прибора М - типа)

$$B_{\text{кр}} = \frac{1}{d} \sqrt{\frac{2 \cdot m_0}{e} \cdot U_{\text{акр}}}, \quad (4.6a)$$

для магнетрона цилиндрической конструкции

$$B_{\text{кр}} = \frac{6,75 \cdot 10^{-2} \cdot \sqrt{U_{\text{акр}}}}{r_a \cdot [1 - (\frac{r_k}{r_a})^2]}. \quad (4.6b)$$

где  $U_{\text{акр}}$  – критическое напряжение на аноде.

### Резонаторный блок или замедляющая система магнетрона.

Вдоль поверхности анодного блока, имеющего радиус  $r_a$  по пространству взаимодействия, укладывается целое число замедленных волн  $n$

$$2 \cdot \pi \cdot r_a = n \cdot \lambda_s, \quad (4.7)$$

где  $n=0,1,2, \dots \frac{N}{2}$  – номер вида колебания;  $N$  – число резонаторов, или число ячеек, или периодов замедляющей системы.

Набег фазы на периоде замедляющей системы  $\varphi$  определяется

$$\varphi = \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{N} = \omega \cdot \tau \quad (4.8)$$

Время полета периода ячейки  $\mathcal{T}$  в случае неоднородных замедляющих систем (при наличии гармоник), используемых в приборах типа М, можно представить как

$$\tau = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N \cdot \omega} + m \cdot T = m \cdot T + \Delta t \quad (4.9)$$

здесь  $m=0, \pm 1, \pm 2 \dots$  номер пространственной гармоники;  $T$  – период колебания;  $\Delta t = \frac{2 \cdot n \cdot \pi}{N \cdot \omega}$  – изменение времени полета на ячейку системы при  $m=0$ .

Фазовую скорость волн, движущихся вдоль анодного блока,  $V_{\phi nm}$  или угловую скорость  $\Omega_{nm}$  и коэффициент замедления можно определить пользуясь следующими соотношениями:

$$V_{\phi nm} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_a}{N \cdot \tau} = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_a}{T \cdot (n + m \cdot N)} = \frac{\omega_n \cdot r_a}{n + m \cdot N} \quad (4.10)$$

$$\Omega_{nm} = \frac{V_{\phi nm}}{r_a} = \frac{\omega_n}{n + m \cdot N} \quad (4.11)$$

$$K_3 = \frac{C}{V_{\phi nm}} = \frac{C \cdot (n + m \cdot N)}{\omega_n \cdot r_a} = \frac{\lambda_n \cdot (n + m \cdot N)}{2 \cdot \pi \cdot r_a} \quad (4.12)$$

где  $C$ -скорость света.

Круговая частота  $\omega_n$  для разных видов колебаний  $n$  зависит от фазового сдвига  $\varphi$  и вида конструкции резонаторного блока и резонансной частоты отдельного резонатора  $\omega_0$

$$\omega_n = \frac{\omega_0}{\left\{ 1 + C' / \left[ 2 \cdot C_0 \cdot \left( 1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N} \right) \right] \right\}^{1/2}} \cdot \quad (4.13)$$

Резонансная длина волны резонаторного блока для  $n$ -го вида колебания  $\lambda_n$  - определяется соотношением

$$\lambda_n = \lambda_0 \cdot \sqrt{1 + \frac{C'}{2 \cdot C_0 \cdot \left( 1 - \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N} \right)}} \quad ; \quad (4.14)$$

где  $C_0$  - эквивалентная емкость одного резонатора,  $C'$  - емкость связи между катодом и сегментом ячейки;  $\lambda_0$  ( $\omega_0$ ) - резонансная длина волны (резонансная круговая частота) одного резонатора анодного блока магнетрона.

В случае коротких анодов (по высоте) связь между резонаторами оказывается больше магнитная, чем электрическая, и тогда для определения  $\lambda_n$  используется коэффициент взаимной индукции  $M$  и индуктивность одиночного резонатора  $L_0$

$$\lambda_n = \lambda_0 \sqrt{1 - \frac{2 \cdot M}{L_0} \cdot \cos \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{N}} \quad . \quad (4.15)$$

Очень важным показателем работоспособности магнетрона является коэффициент разделения частот или длин волн в процентах.

$$\xi = \frac{\lambda_{N/2} - \lambda_{N/2-1}}{\lambda_{N/2}} \cdot 100\% = \frac{f_{0,5 \cdot N} - f_{0,5 \cdot N-1}}{f_{0,5 \cdot N}} \cdot 100\% \quad . \quad (4.16)$$

Если  $\xi > 1,5 \div 2\%$  разделение считается удовлетворительным.

Для разделения частот используются связки, вносящие дополнительную емкость в каждый отдельный резонатор.

Частота  $\pi$  – вида с учетом емкости связок, равна

$$\omega_{N/2} = \frac{1}{\sqrt{L_0 \cdot (C_0 + C_{cb})}} \cdot \quad (4.17)$$

### Рабочий режим магнетрона

Для работы магнетрона необходимо выполнение синхронизма скоростей, т.е. равенство средней фазовой скорости волны в замедляющей системе и скорости электрона,  $V_0$  (скорость центра катящегося круга)  $V_u = V_{\phi nm}$  или

$$\frac{E}{B} = \frac{\omega_n \cdot (r_a + r_k)}{(n + m \cdot N) \cdot 2} = \frac{\omega_n \cdot r_{cp}}{(n + m \cdot N)} \quad (4.18)$$

Из (4.18) величина напряжения на аноде, удовлетворяющая условию самовозбуждения для любого вида колебания  $n$  и любой гармоники  $m$ , имеет вид

$$U_{nm} = \frac{\omega_n \cdot (r_a^2 - r_k^2)}{2 \cdot (n + m \cdot N)} \cdot B \quad (4.19)$$

На электрон в магнетроне (или любом приборе  $M$  – типа) действует электрическая сила  $F_e$ , направленная от катода к аноду, и магнитная сила  $F_m$ , направленная к катоду, но ещё на электрон, обладающий угловой скоростью, действует центробежная сила, направленная к аноду и не зависящая от магнитного поля. Учет этих сил позволяет определить пороговое анодное напряжение, при котором существует генерация, и величина его  $U_{nm}$  определяется из (4.19)

$$U_{nop} = \frac{2 \cdot \pi \cdot f_n}{2 \cdot (m \cdot N + n)} \cdot (r_a^2 - r_k^2) \cdot B - \frac{m_0}{2 \cdot e} \cdot \left( \frac{2 \cdot \pi \cdot f_n}{(m \cdot N + n)} \cdot r_a \right)^2$$

или

$$U_{nop} = 1,01 \cdot 10^7 \cdot \left[ \frac{r_a}{(n + m \cdot N) \cdot \lambda_n} \right]^2 \cdot \left[ B \cdot \left( 1 - \frac{r_k^2}{r_a^2} \right) \cdot \frac{(n + m \cdot N) \cdot \lambda_n}{1,07} - 1 \right], [B] \quad (4.20)$$

Здесь  $r_a, \lambda$  в сантиметрах.

Электронный коэффициент полезного действия в приборах типа  $M$  может быть найден при использовании одного из соотношений

$$\eta_e = \frac{W_n - W_k}{W_n} = 1 - 2 \cdot \frac{m_0}{e} \cdot \frac{U_a}{[(r_a - r_k) \cdot B]^2} =$$

$$= 1 - \frac{1}{(n + m \cdot N)} \cdot \frac{\omega_n \cdot m_0}{B \cdot e} \cdot \frac{1 + \delta}{1 - \delta} = \quad (4.21)$$

$$= 1 - \frac{1,07}{(n + m \cdot N) \cdot \lambda \cdot B} \cdot \frac{1 + \delta}{1 - \delta}$$

$$\text{где } \delta = \frac{r_k}{r_a} = \frac{N - 4}{N + 4} \quad (4.22)$$

Коэффициент полезного действия контура (резонатора) определяется его добротностями

$$\eta_k = 1 - \frac{Q_H}{Q_0} = \frac{Q_0}{Q_0 + Q_{au}} \quad (4.23)$$

Величина внешней добротности определяет параметр магнетронов - степень затягивания  $F_s$  частоты прибора

$$F_3 = \frac{0,417 \cdot f_0}{Q_{\text{эл}}} \quad (4.24)$$

В ЛБВМ и ЛОВМ начальная скорость электронов в пространстве взаимодействия для их прямолинейного движения задается электронной пушкой и должна быть равна

$$V_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot e \cdot U_0}{m_0}} = \frac{U_1 + U_2}{d \cdot B}, \quad (4.25)$$

$$V_0 = V_u,$$

где  $d$  – расстояние между замедляющей системой и холодным катодом, называемым подошвой;  $U_0, U_1, U_2$  – постоянные напряжения на аноде пушки, холодном катоде, замедляющей системе прибора относительно катода.

Траектория движения электронов в пространстве взаимодействия ЛБВМ или ЛОВМ (в случае пушек короткой оптики) должна быть прямолинейной. Требование будет выполнено при равенстве скорости электронов на выходе из пушки и скорости электронов в центре колеса, катящегося без скольжения в области пространства взаимодействия  $V_u$ . Для этого требуется, чтобы напряженность электрического поля в пространстве взаимодействия  $E_0$ , равнялась двум напряженностям электрического поля в области пушки  $E_n$  при постоянной величине магнитного поля, т.е.

$$E_0 = 2 \cdot E_n. \quad (4.26)$$

Условию (4.26), при одинаковых размерах катод - ускоряющий электрод  $d_n$  в области пушки и замедляющая система - холодный катод  $d_c$  в области пространства взаимодействия, будет соответствовать соотношение

$$U_a = U_2 + U_1 = 2 \cdot U_n \quad (4.25)$$

Для передачи потенциальной энергии электронов  $e \cdot U_a$  высокочастотному полю ЗС в условиях синхронизма скоростей  $V_0 = V_u = V_\phi$ , кинетическая энергия

$W_k = \frac{m_0 \cdot V_u^2}{2}$  должна рассеиваться на коллекторе. Полю СВЧ передается энергия

$$W = W_n - W_k = e \cdot (U_a - U_0),$$

электронный КПД  $\eta_e$  можно определить

$$\eta_e = \frac{W}{W_n} = 1 - \frac{U_0}{U_a} \quad (4.26, a)$$

или

$$\eta_e = 1 - \frac{m_0 \cdot V_\phi^2}{2 \cdot e \cdot U_a} = 1 - \frac{25,6 \cdot 10^4}{U_a} \left( \frac{V_\phi}{C} \right)^2. \quad (4.26, b)$$

Если электроны попадают в пространство взаимодействия с вершины циклоиды, двигаясь в пушке короткой оптики, то КПД можно определять через координаты влета и размер пространства взаимодействия в виде:

$$\eta = 1 - \frac{4 \cdot U_n}{U_a} = 1 - \frac{y_{вл}}{d} \quad (4.26, \text{в})$$

Коэффициент усиления в децибелах ЛБВМ определяется соотношением

$$K_y = -6 + 54,6 \cdot D \cdot N \text{ [дБ]} ; \quad (4.27)$$

где  $N$  – количество замедленных длин волн, укладываемых длины замедляющей системы;  $D$  – параметр усиления, равный

$$D = \sqrt{\frac{I_0 \cdot R_{св} \cdot d}{U_a}} \beta_e \cdot \text{Cth}(\beta_e \cdot y_{вл}) , \quad (4.28)$$

где  $I_0$  – ток пучка электронов;  $R_{св}$  – сопротивление связи на уровне прохождения невозмущенного потока электронов в лампе;  $\beta_e = \frac{\omega}{V_0}$  – постоянная распространения пространственной волны в электронном потоке;  $y_{вл}$  – координата влета электронного пучка относительно холодного катода.

Величина параметра усиления лежит в пределах  $0,02 < D < 0,2$ .

Возбуждение генераторных ЛОВМ (в различных зонах генерации  $n$ ) происходит при определенной величине пускового тока. Предпочтенье отдается работе в первой зоне генерации

$$\begin{aligned} I_{\text{опуск}}^{(n)} &= (2 \cdot n - 1)^2 \cdot I_{\text{опуск}}^{(1)} , \\ I_{\text{опуск}}^{(1)} &\approx 0,124 \cdot \frac{U_a}{R_{св} \cdot N^3} . \end{aligned} \quad (4.29)$$

Величина тока пучка  $I_0$  определяется выходной мощностью и напряжением на пушке.

В платинотронах если обозначить шаг замедляющей системы  $d$  и толщину ламели  $\tau$ , то

$$\tau = 0,5 \cdot d , \quad d = \frac{2 \cdot \pi \cdot r_a}{N} \quad (4.30)$$

где  $r_a$  – радиус анода по пространству взаимодействия,  $N$  – число ячеек в ЗС.

Обычно  $N \leq 11$ . Ускоряющее напряжение, необходимое для достижения скорости  $V_\phi$ , определяется соотношением  $U_0 = \frac{1}{2} \cdot \frac{m}{e} \cdot \left( \frac{\omega \cdot d}{\pi - \Theta} \right)^2$ .

Рабочее значение анодного напряжения амплитрона

$$U_a = \frac{9,42 \cdot 10^8 \cdot B \cdot (r_a^2 - r_k^2)}{\gamma \cdot \lambda} - 1,01 \cdot 10^7 \cdot \left( \frac{r_a}{\gamma \cdot \lambda} \right)^2 , \quad (4.31)$$

где  $\gamma = \frac{N - p_3}{2}$  – номер вида колебания;  $p_3$  – номер рабочей зоны (целое число).

Из (4.31) можно определить  $r_a$ , введя  $\delta$  в виде

$$\delta = \frac{r_k}{r_a} = \frac{1 - \frac{\pi}{2 \cdot \gamma}}{1 + \frac{\pi}{2 \cdot \gamma}} ;$$

$$r_a = \sqrt{\frac{U_a}{\frac{9,42 \cdot 10^8 \cdot B \cdot (1-\delta)^2}{\gamma \cdot \lambda} - \frac{1,01 \cdot 10^7}{(\gamma \cdot \lambda)^2}}} \quad (4.32)$$

Полный КПД равен произведению КПД колебательной системы  $\eta_k$  на электронный КПД  $\eta_e$ . КПД системы находится по формуле

$$\eta_k = \frac{1}{1 + \frac{L_3(\partial B)}{K_y(\partial B)}} \quad (4.33)$$

где  $L_3$  - потери в замедляющей системе,  $K_y$  - коэффициент усиления.

Высота активной части катода  $h_k$  меньше высоты пространства взаимодействия

$$h_k = 0,95 \cdot h_a \quad (4.34)$$

Ток катода  $I_a$ , площадь катода  $S$  и плотность тока  $j_{пред}$ , равны соответственно,

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{P_{вх} - P_{вх}}{\eta \cdot U_a} ; \\ S_k &= 2 \cdot \pi \cdot r_k \cdot h_k ; \\ j_{пред} &= \frac{(\delta_0 - 1) \cdot U_a}{754 \cdot \lambda \cdot r_k \cdot \ln(\delta^{-1})} , \end{aligned} \quad (4.35)$$

где  $\delta_0$  - коэффициент вторичной эмиссии катода, величина которого для оксидных катодов равна 5, а для остальных меньше 3.

Фазовая скорость и длина замедленной волны пространственной гармоники СВЧ в ЗС платинотрона

$$V_{\phi m} = \frac{\omega d}{\pi + \theta + 2\pi m} ; \quad V_{\phi(-1)} = \frac{\omega d}{\pi - \theta} ; \quad \lambda_3 = \frac{2\pi d}{\pi - \theta} , \quad (4.36)$$

где  $\theta$  - фазовый сдвиг на ячейку по связкам равный

$$\theta = \pi \left( 1 - \frac{2\gamma}{N} \right) \pm \frac{\omega \Delta t}{N} , \quad \text{или} \quad (4.37)$$

$$\theta_{opt} = \pi \left( 1 - \frac{2\gamma}{N} \right) .$$

$\Delta t$  - допустимое время отставания (или опережения) спицы по отношению к целому числу периодов СВЧ поля, бегущего вдоль ЗС.

Оптимальный (и допустимый) фазовый сдвиг СВЧ поля на ячейку по пространству взаимодействия  $\varphi_{opt}$ , когда  $\Delta t = 0$ , составляет

$$\begin{aligned} \varphi_{opt} &= \pi - \theta_{opt} = \frac{2\pi\gamma}{N} , \\ \varphi_{opt} &= \frac{\pi \left( N + 1 - 2m \pm \frac{1}{3} \right)}{N} . \end{aligned} \quad (4.38)$$

Коэффициент усиления амплитрона [10]



$$\begin{aligned}
K_y &= \eta_k (1 + \eta_\varepsilon \cdot P_0 / P_{ex}) = && \text{или} \\
&= \eta_k (1 + P_\varepsilon / P_{ex}) \\
K_y &= \frac{P_{exx}}{P_{ex}} = \frac{K^2}{4P_{ex}} + \frac{K}{\sqrt{P_{ex}}} + 1;
\end{aligned}
\tag{4.39}$$

где  $K=43,2$  – константа.

Амплитуда входного сигнала может быть определена в виде

$$U_m = \sqrt{2P_{ex} \cdot R_{св}}. \tag{4.40}$$

### 5.4.2. Примеры решения задач

#### Задача №1( Определение геометрии некоторых узлов в магнетроне)

Определить диаметры анода и катода, высоту анодного блока 16-ти резонаторного магнетрона, работающего на основной гармонике  $\pi$  - вида колебания и на длине волны 10 см. При напряжении на аноде 12 кВ обеспечивается импульсная мощность 300 кВт и коэффициент полезного действия 50%.

#### Решение

Размеры анода и катода или магнитную индукцию можно определить из соотношений параболы критического режима, а также можно воспользоваться эмпирической формулой из теории магнетрона

$$\frac{r_k}{r_a} = \frac{N - 4}{N + 4}.$$

Отсюда

$$\begin{aligned}
\frac{r_k}{r_a} &= \frac{12}{20} = 0,6; \\
B_{кр} &= \sqrt{\frac{8m}{e}} U_a \cdot \frac{1}{r_a \left(1 - \frac{r_k^2}{r_a^2}\right)} = \frac{6,75 \cdot 10^{-4} \sqrt{U_a}}{r_a \left[1 - \left(\frac{r_k}{r_a}\right)^2\right]},
\end{aligned}$$

здесь  $r_a$  в сантиметрах.

Из условия  $\lambda \cdot B < 1,2[\text{Тл} \cdot \text{см}]$  получаем, что  $B < 0,12[\text{Тл}]$  и принимаем  $B = 0,1[\text{Тл}]$ , т.к. при меньших значениях КПД снижается.

Из параболы критического режима определяем радиус анода

$$r_a = \frac{6,75 \cdot 10^{-4} \sqrt{U_a}}{\left[1 - \left(\frac{r_k}{r_a}\right)^2\right] \cdot B} = \frac{6,75 \cdot 10^{-4} \cdot 1,1 \cdot 10^2}{0,1 \cdot [1 - 0,36]} = 1,16 \text{ см};$$

$$r_k = 0,6 \cdot 1,16 = 0,696 \approx 0,7 \text{ см}.$$

Для нахождения высоты анодного блока следует определить, какой ток необходимо получать с катода

$$\eta = \frac{P_{ген}}{U_0 \cdot I_0} \quad \text{или} \quad I_0 = \frac{P_{ген}}{U_0 \cdot \eta}.$$

$$\text{Откуда } I_0 = \frac{300 \cdot 10^3}{12 \cdot 10^3 \cdot 0,5} = 50 \text{ A}$$

Ток с катода при известной плотности  $I_0 = j_a \cdot 2\pi r_k \cdot h$ , где  $h$  высота эмиссионного слоя катода. Плотность тока эмиссии оксидных катодов в приборах типа М, в том случае, когда катод находится в пространстве взаимодействия, оценивается эмпирической формулой, позволяющей учесть частоту

$$j_a = 3 \cdot 10^{-3} \cdot f_{\text{МГц}} = 3 \cdot 10^{-3} \cdot 3 \cdot 10^3 = 9 \left[ \frac{\text{A}}{\text{см}^2} \right]$$

При заданной величине тока с катода  $I_0$  высота эмитирующей поверхности катода определяется

$$h = \frac{I_0}{j_a \cdot 2\pi r_k} = \frac{50}{9 \cdot 2 \cdot 3,14 \cdot 0,7} = 1,264 \text{ см}$$

### Задача №2 (Определение напряжения на магнетроне и разделения частот)

Определить величину анодного напряжения, при котором возможно возникновение ближайшего к  $\pi$  - виду колебания в восемнадцати резонаторном магнетроне, если известно, что частота  $\pi$  - вида равна 3 ГГц, частота ближайшего высокочастотного вида 3,1 ГГц, а анодное напряжение на колебании  $\pi$  - вида равно 8 кВ. Определить разделение частот.

#### Решение

Условие самовозбуждения различных видов колебаний имеет вид

$$\frac{E}{B} = \frac{\omega(r_a + r_k)}{2(n + mN)} = \frac{\omega r_{cp}}{(n + mN)};$$

$$U_a = \frac{\omega_n(r_a^2 - r_k^2) \cdot B}{2(n + mN)} = \frac{\omega_n A}{2(n + mN)}, \quad (4.41)$$

где  $m=0$  для основной гармоники; для колебания  $\pi$  - вида  $n = \frac{N}{2}$ ; и  $n = \frac{N}{2} - 1$  для ближайшего к  $\pi$  - виду колебания;  $A = B \cdot (r_a^2 - r_k^2)$ .

Из (4.41) получим формулы для вычисления напряжений

$$\begin{aligned} U_{a\pi} &= \frac{\omega_{\pi}}{N} A \\ U_{a(\frac{N}{2}-1)} &= \frac{\omega_{n-1} \cdot A}{(N-2)} \\ \frac{U_{a\pi} N}{\omega_n} &= \frac{U_{a(\frac{N}{2}-1)} \cdot (N-2)}{\omega_{n-1}} \\ U_{a(\frac{N}{2}-1)} &= \frac{\omega_{n-1} N}{\omega_{\pi} (N-2)} U_{a\pi} = \frac{3,10 \cdot 18}{3 \cdot 16} \cdot 8 \cdot 10^3 = 9,3 [\text{кВ}]. \end{aligned}$$

**Выводы.** Напряжение на аноде для возбуждения ближайшего к  $\pi$ - виду колебания значительно больше напряжения  $\pi$  вида ( $9,3 \text{ кВ} > 8 \text{ кВ}$ ).

Разделение частот определяется по формуле

$$\xi = \frac{\Delta f}{f_{\pi}} = \frac{[f_{\pi} - f_{\frac{N}{2}-1}]}{f_{\pi}} = \frac{0,1 \cdot 100\%}{3} = 3,33\%$$

Этой величины разделения частот достаточно для устойчивой работы магнетрона на  $\pi$  - виде колебания.

### Задача №3 (Определение размеров петли возбуждения поля в магнетроне)

Уход частоты колебаний магнетрона под действием нагрузки не должен быть более 1,5 МГц на частоте 3 ГГц при коэффициенте стоячей волны 1,2 в тракте, на который работает прибор. Рассчитать размеры площади петли, обеспечивающей требуемые параметры, если волновое сопротивление кабеля, подключенного к петле связи, равно 75 Ом, резонаторный блок магнетрона представляет резонаторы типа щель-отверстие. Высота резонаторного блока 2 см, диаметр отверстия резонатора 2 мм.

**Решение.** Уход частоты определяется соотношением

$$\Delta f = \frac{f_0 \cdot (K_{св}^2 - 1)}{Q_{вн} \cdot 2K_{св}},$$

где  $K_{св}$  - коэффициент стоячей волны. Из этого выражения находим  $Q_{вн}$

$$Q_{вн} = \frac{f_0 \cdot (K_{св}^2 - 1)}{\Delta f \cdot 2K_{св}} = \frac{3 \cdot 10^3 \cdot 0,44}{1,5 \cdot 1,2 \cdot 2} = 366$$

Площадь витка [5] определяется соотношением

$$S_n = \left[ \frac{Z_{\kappa} \cdot V_p \cdot \lambda_0}{4\pi \cdot Z_0 \cdot Q_{вн}} \right]^{1/2},$$

где  $Z_{\kappa}$  - сопротивление кабеля;  $V_p$  - объем пространства в одном резонаторе, занимаемого отверстием (типа щель – отверстие), диаметр которого равен  $2v$ ;  $Z_0$  - волновое сопротивление свободного пространства, т.к.  $V_p = h \cdot \pi v^2$ ,  $\lambda_0 = c/f_0$ , то

$$S_n = \left( \frac{Z_{\kappa} \cdot h \cdot \pi v^2 \cdot c}{4\pi \cdot 377 \cdot Q_{вн} \cdot f_0} \right)^{1/2} = \frac{75 \cdot 2 \cdot 10^{-2} \cdot 3,14 \cdot (2 \cdot 10^{-3})^2 \cdot 3 \cdot 10^8}{377 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 366 \cdot 3 \cdot 10^9} = 1,04 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2.$$

$$\text{Откуда радиус петли связи } R_n = \sqrt{\frac{S}{\pi}} = \sqrt{\frac{1,04}{3,14}} = 0,576, [\text{мм}].$$

### Задача №4 (Определение величины магнитного поля и напряжения в ЛБВМ)

Коэффициент замедления ЛБВМ равен 10, напряженность постоянного электрического поля, в пространстве взаимодействия  $3,3 \cdot 10^6$ ,  $[\frac{B}{m}]$ . Расстояние между ЗС и холодным электродом 2 мм. Определить величины магнитного поля и ускоряющего напряжения в лампе бегущей волны, если на холодном электроде напряжение отрицательное, равное (-100В.).

### Решение

Коэффициент замедления  $K_3 = \frac{c}{V_\phi}$ . В лампах типа М выполняется синхронизм

скоростей  $V_\phi = V_u$ . А т.к. скорость центра катящегося круга  $V_u = \frac{E}{B}$ , то

$$B = \frac{E}{V_\phi} = \frac{E \cdot K_3}{C} = \frac{3,3 \cdot 10^6 \cdot 10}{3 \cdot 10^8} = 0,11 \text{ Тл.}$$

Зная, что напряженность электрического поля определяется в пространстве взаимодействия напряжением и размером  $d$  - расстояние между ЗС и холодным электродом, то  $U_n = E \cdot d$ , а  $U_n = U_0 - U_x$ . Откуда имеем

$$U_0 = U_n + U_x = E \cdot d - |U_x| = 3,3 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-3} + 100 = 6,5 \text{ кВ.}$$

### Задача №5 (Определение времени пролета спицы в платинотроне)

Определить время полного оборота спицы в платинотроне и время пролета одного периода замедляющей системы, если известны размеры: радиус анода 2 см, радиус катода 1 см. Ускоряющее напряжение 20 кВ, индукция магнитного поля 0,1 Тл, количество резонаторов в платинотроне равно 9.

### Решение.

Время оборота спицы равно  $\tau = \frac{L}{V_u} = \frac{2\pi r_a}{V_u}$ ,

где  $L$  – длина окружности вблизи поверхности анода.

Скорость электронов, находящихся в центре катящегося круга  $V_u$ , равна  $V_u = \frac{E}{B}$ , здесь напряженность электрического поля определяется  $E = \frac{U_0}{r_a - r_k}$ .

Время оборота электронной спицы вокруг катода

$$\tau = \frac{2\pi r_a (r_a - r_k)}{U_0} = \frac{2 \cdot 3,14 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 10^{-4} \cdot 0,1}{20 \cdot 10^3} = 0,628 \cdot 10^{-8} = 6,28 \cdot 10^{-9} \text{ с}$$

Время пролета электроном одного сегмента  $\tau_c = \frac{\tau}{N} = \frac{6,28 \cdot 10^{-9}}{9} = 0,698 \cdot 10^{-9} \text{ с.}$

### Задача №6 (Определение КПД платинотрона).

Платинотрон работает при ускоряющем напряжении 30 кВ и рабочем токе анода 10 А. На вход его подается мощность 20 кВт, а при собственных потерях в электродинамической системе 3 дБ он имеет коэффициент усиления 15 дБ. Определить электронный и общий КПД этого платинотрона.

### Решение

Коэффициент полезного действия замедляющей системы  $\eta_{zc}$  [12] зависит от потерь в системе  $L_3$  и от коэффициента усиления  $K_y$

$$\eta_{zc} = \frac{K_y(\text{дБ})}{K_y(\text{дБ}) + L_3(\text{дБ})}$$

В нашем случае  $\eta_{zc} = \frac{10}{10+3} = \frac{10}{13} \approx 0,77$

Коэффициент усиления платинотрона [13] определяется в виде.

$$K_y = \eta_{zc} \left( 1 + \eta_3 \frac{P_o}{P_{ex}} \right), \text{ раз,}$$

где  $P_o = U_a \cdot I_a$  - мощность, затрачиваемая постоянным источником питания.

Получим выражение для КПД  $\eta_3$  из последнего соотношения в виде:

$$\eta_3 = \frac{[K_y / h_{zc} - 1] P_{ex}}{P_o}$$

Коэффициент усиления 10 дБ соответствует увеличению мощности на входе в 10 раз, тогда  $\eta_3 = \frac{[10/0,77-1] \cdot 16}{300} = 0,639 \approx 0,64$

Общий КПД платинотрона составляет  $\eta = \eta_{zc} \cdot \eta_3 = 0,77 \cdot 0,64 = 0,493$

Вывод: общий КПД платинотрона примерно 50% .

## 5.5. Индивидуальное задание №5

### Полупроводниковые приборы и применение СВЧ энергии

- Раздел программы – 2.4.

#### 5.5.1. Основные вопросы теории

При выполнении этого задания студенту необходимо знать материал по полупроводниковым приборам с положительным и отрицательным сопротивлением, чтобы уметь рассчитать основные параметры и характеристики. Необходимо знать эквивалентные приборов и особенности работы передающих линий с параллельно или последовательно включенными полупроводниковыми приборами. К серии особых СВЧ устройств относится микроволновая камера. Особенности ее работы и расчета режимов нагрева предстоит освоить самостоятельно. Ниже приводятся краткие вопросы теории ее.

Полупроводниковые приборы (ППП) СВЧ диапазона используются для детектирования сигналов, преобразования частот, генерирования и усиления колебаний, в качестве переключателей трактов. Основным преимуществом ППП являются малые габариты и вес, малое потребление энергии, высокая механическая прочность и простота эксплуатации.

**Детекторные диоды (ДД)** предназначены для детектирования СВЧ сигналов в измерительной аппаратуре, в приемниках прямого усиления. Детекторные диоды используются при малых уровнях мощности сигнала, и поэтому работают в режиме квадратичного детектирования. Параметрами ДД являются:

-чувствительность по току  $\beta$ -отношение выпрямленного тока  $I$  к высокочастотной мощности, поглощаемой диодом при минимальном сопротивлении внешней нагрузки. Мощность сигнала, рассеиваемая на сопротивлении диода, определяется соотношением  $P_{\text{пот}} = 0,5 \cdot I^2 \cdot \text{Re}(Z)$ , где полное сопротивление диода

$$(рис.5.1) \quad Z = r + \frac{1}{R^{-1} + j\omega C} + j\omega L_k \quad (5.1)$$

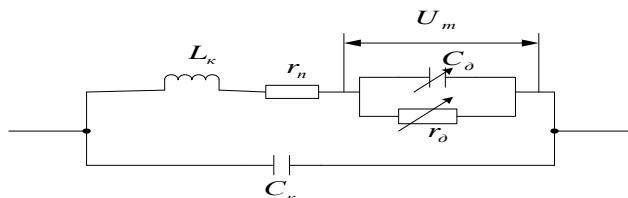


Рис.5.1. Эквивалентная схема полупроводникового диода на СВЧ.

При согласовании диода с СВЧ трактом величина  $\beta$  определяется формулой

$$\beta = \frac{\alpha}{2} \cdot \frac{1}{(R_{\text{вых}} + r)} \cdot \frac{R^2}{R + r(1 + \omega^2 C^2 R^2)}, \quad (5.2)$$

где  $\alpha$ -параметр при квадратичной ВАХ диода равен 2;  $C, R$  – емкость и активное сопротивление p-n перехода;  $r$  – сопротивление потерь диода,  $R_{\text{вых}}$  – определяется по ВАХ как дифференциальное сопротивление при положительном смещении, соответствующем рабочему режиму (в несколько десятков микроампер) или сопротивление в рабочей точке;

-добротность  $Q$  – характеризует чувствительность диода в режиме малых сигналов

$$Q = \frac{\beta \cdot R_{\text{вых}}}{\sqrt{t_{\text{ш}} R_{\text{вых}} + R_{\text{ш}}}}, \quad (5.3)$$

где  $t_{\text{ш}}$ - шумовое отношение диода,  $R_{\text{ш}}$ - эквивалентное шумовое сопротивление, обычно равное 1000 Ом. Обычно добротность  $Q > 30 \text{ ВТ}^{-0,5}$ ;

-шумовое отношение диода  $t_{\text{ш}}$ - есть отношение мощности шумов на выходе диода в заданной полосе частот к мощности тепловых шумов в рабочей точке, обычно  $t_{\text{ш}} \geq 1,5 \div 2$ ;

-полное входное сопротивление диода в рабочем диапазоне частот на входе диодной камеры равно

$$Z_{\text{вх}} = \frac{1}{j\omega C_k + \frac{1}{j\omega L_k + Z_0 + r}}, \quad (5.4)$$

где  $Z_0$ - сопротивление p-n перехода для случая параллельного соединения  $C$  и  $R$  перехода,  $L_k, C_k$ - параметры корпуса диода.

-коэффициент стоячей волны - отображает согласование детекторной камеры с СВЧ трактом.

**Переключающие диоды (ПД)** представляют на СВЧ двухполюсник с комплексным входным сопротивлением, изменяемым режимом питания по постоянному току, и не зависят от величины СВЧ мощности. ПД в двух режимах характеризуются двумя значениями входных сопротивлений  $Z_1 = r_1 + jX_1$  и  $Z_2 = r_2 + jX_2$  и параметрами:

-*потери преобразования*  $L_n$ - отношение СВЧ мощности, поданной на устройство с ПД, к мощности, проходящей через устройство, когда ПД находится в состоянии пропускания.

-*потери запираания*  $L_3$ - такое же отношение, когда диод находится в состоянии запираания. Чем  $L_n < L_3$ , тем лучше диод. Соответствующая величина  $L_n, L_3$  определяется соответствующим сопротивлением диода  $Z_1$  или  $Z_2$ , или коэффициентом отражения  $\Gamma$ .

$$L = 10 \cdot \lg(1 - |\Gamma|^2)^{-1}. \quad (5.5)$$

Если в СВЧ тракт с волновым сопротивлением  $Z_0$  параллельно включены диод, с проводимостью диода равной  $Y = G + jB$ , и согласованная нагрузка  $Z_H = Z_0$ ,

$$\text{то } \Gamma = \frac{Y \cdot Z_0}{2 + Y \cdot Z_0}, \text{ а } L = 10 \cdot \lg\left[1 + \frac{(0,5 \cdot G \cdot Z_0)^2 + (0,5 \cdot B \cdot Z_0)^2}{1 + G \cdot Z_0}\right]. \quad (5.6)$$

-*коэффициент качества*  $K$ - характеризует эффективность ПД и равен

$$K = \frac{\sqrt{L_3} - 1}{\sqrt{L_p} - 1} = \frac{1}{(\omega C)^2 \cdot R_{пр} \cdot R_{обр}}, \quad (5.7.)$$

где  $\omega$ - рабочая частота,  $R_{пр}, R_{обр}$  – прямое и обратное сопротивление диода при указанных напряжениях,  $C$ - ёмкость перехода. Качество р-і-п диода определяется по формуле

$$K = \frac{|Z_1 + Z_2^*| + |Z_1 - Z_2|}{|Z_1 + Z_2^*| - |Z_1 - Z_2|} = \frac{|(r_1 + r_2) + j(X_1 - X_2)| + |(r_1 - r_2) + j(X_1 - X_2)|}{|(r_1 + r_2) + j(X_1 + X_2)| - |(r_1 - r_2) + j(X_1 - X_2)|}. \quad (5.7,6)$$

**Туннельные диоды (ТД)** применяются для создания маломощных усилителей и маломощных генераторов СВЧ диапазона. Действие туннельного диода основанного на туннельном эффекте (ТЭ). ТЭ означает способность электронов проникать сквозь потенциальный барьер в переходе и появляться с другой его стороны без потери энергии. Для получения ТЭ необходимо, чтобы р-п переход был узкий ( $10^{-6}$ см), р- и n- области перехода должны иметь высокую концентрацию примесей в материале полупроводника ( $10^{18} \div 10^{20}$  см $^{-3}$ ). ТД характеризуются следующими параметрами:

- ток впадины*  $I_v$  – прямой ток в минимуме ВАХ;
- пиковый ток*  $I_n$  – прямой ток в максимуме ВАХ;
- напряжения пика  $U_n$  и впадины  $U_v$ ;
- *отрицательное минимальное дифференциальное сопротивление диода*  $R_{дмин}$  в точке перегиба ВАХ между точками с координатами  $(I_v, U_v)$  и  $(I_n, U_n)$ ;
- ёмкость диода - суммарная емкость перехода и корпуса;
- сопротивление потерь*  $r$  – суммарное сопротивление кристалла, контактов и выводов;
- удельный ток*- отношение пикового тока к емкости перехода - параметр качества;
- предельная частота*  $f_{пред}$  –это частота, когда активная составляющая полного сопротивления диода обращается в нуль и равна

$$f_{\text{пред}} = \frac{1}{2\pi C \cdot R_{\text{дмин}}} \cdot \sqrt{\frac{R_{\text{дмин}}}{r} - 1}. \quad (5.8)$$

В режиме генерации  $f_{\text{пред}} = f_0$ , где  $f_0$  – резонансная частота, на которой реактивная составляющая полного сопротивления диода без учета емкости корпуса при  $R_{\text{дмин}}$  обращается в нуль. Резонансная частота равна

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{1}{L_k \cdot C} - \left(\frac{1}{R_{\text{дмин}} \cdot C}\right)^2}. \quad (5.9)$$

В резонансную систему ТД (как отрицательное сопротивление) включают параллельно. Колебательная система генератора образуется реактивными элементами ТД и внешней нагрузки, трансформированной к плоскости включения диода. Выходная мощность генераторов на ТД (мощность в нагрузке) определяется  $P_{\text{вых}} = 0,5 \cdot I_1^2 \cdot R_n$ , а мощность, создаваемая диодом, равна  $P_{\text{д}} = 0,5 \cdot I_1^2 \cdot R_{\text{д}}$ . где  $I_1$  – ток диода на первой гармонике,  $R_n$  – активное суммарное сопротивление контура. В рабочем режиме должно выполняться неравенство  $P_{\text{д}} > P_{\text{вых}}$ .

**Лавинно-пролетные диоды (ЛПД)** применяются в схемах генераторов с большим КПД (более 20%) в диапазоне частот от 500 МГц до 300 ГГц. В основе работы ЛПД лежат два механизма: дрейф носителей под действием электрического поля и лавинное умножение числа носителей при больших напряжениях. Лавинный пробой возникает при  $E = 10^5 \div 10^6$  В/с, а скорость носителей достигает постоянной величины  $V_n = 10^5$  м/с при  $E = 10^4$  В/с. Наведенный ток во внешней цепи протекает при отрицательном переменном напряжении, что способствует возникновению отрицательной электронной проводимости.

Если длину пространства дрейфа носителей  $l_{\text{др}}$  выбрать так, чтобы время пролета  $\tau_{\text{др}}$  в ней было близко к полупериоду колебаний, то высокочастотное поле будет тормозить электронные сгустки, и они передадут ему свою энергию. Так как  $\tau_{\text{др}} = l_{\text{др}} / V_n$ ,  $\Theta_{\text{др}} = \omega \tau_{\text{др}} = \pi$ , то  $f = V_n / (2 \cdot l_{\text{др}})$  или  $l_{\text{др}} = V_n / (2 \cdot f)$ .

Возбуждение СВЧ колебаний происходит при пусковых токах [1]

$$I_{\text{пуск}} = \frac{\pi}{\alpha'} \cdot \frac{(\omega \cdot C_d)^2}{\omega \cdot C_d + \frac{1 - \cos \theta_{\text{др}}}{\theta_{\text{др}} \cdot R_{\text{пот}}}}, \quad (5.10)$$

где  $R_n$  – суммарное активное сопротивление диода, контура и нагрузки;  $\alpha'$  – коэффициент ударной ионизации, зависящий от материала полупроводника и напряженности электрического поля;  $C_d = \epsilon_r \cdot \epsilon_0 S/d$  – емкость диода;  $S, d$  – площадь и толщина полупроводниковой структуры.

Выходная мощность генератора на ЛПД определяется выражением

$$P_{\text{вых}} = 0,5 \cdot U_{m1} \cdot I_1 = 0,5 (U_{m1})^2 / R_{\text{нэ}}. \quad (5.11)$$

Т.к. в оптимальном режиме  $I_1 = 4 I_0 / \pi$ , то  $P_{\text{вых}} = 2 \cdot U_{m1} \cdot I_0 / \pi$ ;

где  $R_{\text{нэ}}$  – эквивалентное сопротивление нагрузки, трансформированное на зажимы диода. Обычно оно равно модулю отрицательного сопротивления диода. Величина  $R_{\text{нэ}} > r$ . В области дрейфа напряжение  $U_m$  должно быть меньше пробивного напряжения, но не менее напряжения, при котором обеспечивается скорость  $V_n$ , т.е.  $U_m < U_{\text{др}}$ . Величина  $U_m = (0,25 \div 0,5) \cdot U_0$ .



Максимальная выходная мощность удовлетворяет неравенству

$$P_{\text{вых}} \cdot f^2 < E_{\text{проб}}^2 \cdot V_n^2 / (4R_{\text{нз}}). \quad (5.12)$$

**Диоды Ганна (ДГ)** применяются для генерации и усиления СВЧ сигналов. Основными особенностями ДГ являются большие токи, протекающие в объёме однородного полупроводника. При больших электрических полях наблюдаются квантовые переходы электронов из центральной долины в боковую долину, изменение подвижности их, массы, скорости и времени пролета.

Концентрация электронов в долинах определяется соотношением

$$\frac{n_1}{n_2} = \frac{N_1}{N_2} \exp\left(-\frac{\Delta\varepsilon_1}{kT}\right), \quad (5.13)$$

где  $N_1, N_2$  – плотность энергетических состояний в долинах

$$\frac{N_1}{N_2} = \left(\frac{m_{\text{эф2}}}{m_{\text{эф1}}}\right)^{3/2} \approx 70, \quad kT = 0,025 \text{ эВ при } T = 300\text{K},$$

$$\Delta\varepsilon_1 = 0,36 \text{ эВ}, \quad \Delta\varepsilon_0 = 1,4 \text{ эВ}; \quad m_{\text{эф1}} = 0,07 \cdot m, \quad m_{\text{эф2}} = 1,2 \cdot m,$$

где  $m$  – масса свободного электрона, то

$$n_2 / n_1 = 7 \cdot 10^{-5} \text{ и все электроны находятся в нижней долине } (n_1 \gg n_2).$$

При подаче напряжения на диод  $n_2 > n_1$  и изменяется подвижность  $\mu$ .

При  $E < 3 \cdot 10^3$  В/см подвижность  $\mu_1 = 6000 - 8500$  см<sup>2</sup>/(В·с);

при  $E > 3,5 \cdot 10^3$  В/см подвижность  $\mu_2 = 100$  см<sup>2</sup>/(В·с); при  $E > 15 \cdot 10^3$  В/см, скорость насыщения (дрейфовая)  $V_n = 10^7$  см/с. Дрейфовая скорость в общем случае определяется произведением  $V_n = \mu_{\text{эф}} \cdot E$ , где эффективная подвижность имеет вид [1]

$$\mu_{\text{эф}} = (n_1 \cdot \mu_1 + n_2 \cdot \mu_2) / (n_1 + n_2), \quad \text{а } (n_1 + n_2) = n_0 = 2 \cdot 10^{14} - 2 \cdot 10^{16} \text{ см}^{-3}. \quad (5.14)$$

Величина конвекционного тока (тока переноса) в ДГ определяется

$$I = S \cdot q \cdot n_0 \cdot V_{\text{др}}(E) = \rho V_{\text{др}} S,$$

$S$  – площадь сечения образца диода, диаметр сечения кристалла находится в пределах (50–250 мкм),  $E = U/d$  – напряженность электрического поля на образце длиной  $d$ . Обычно  $d = 1 - 100$  мкм.

Частота генерируемых колебаний в пролетном режиме ГДГ определяется соотношением

$$f = V_n / d. \quad (5.15)$$

**Генератор на ДГ (ГДГ)** можно представить в виде эквивалентной схемы рис 5.2

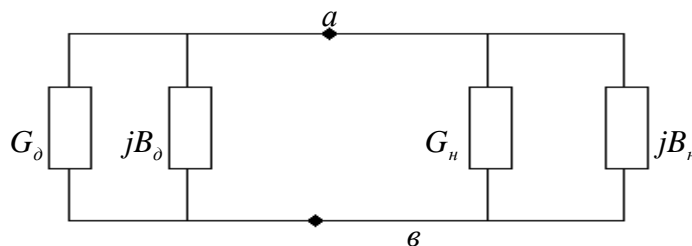


рис. 5.2 Эквивалентная схема генераторов СВЧ.

где кристалл диода имеет проводимость  $Y_d = G_d + jB_d$ , причем  $G_d$  в рабочем режиме отрицательна;  $Y_n = G_n + jB_n$  – параметры нагрузки и контура. Эквивалентные параметры диода [3] имеют вид:

$$|G_{\delta}| = |G_{\delta 0}| \left[ 1 - \left( \frac{U_1}{U_{\max}} \right)^2 \right],$$

$$B_{\delta} = -\frac{1}{5R_0} \left[ 1 - 0.25 \frac{U_{\text{нор}}}{U_0} \right], \quad (5.16)$$

где  $U_1$  - амплитуда колебаний на кристалле,  $U_{\max}$  - максимальная амплитуда колебаний в системе,  $G_{\delta 0}$  - малосигнальная проводимость диода при  $U_1 \rightarrow 0$ ,

$R_0$  - сопротивление диода при малых токах ( $R_0 = \frac{U_0}{2I_0}$ );  $U_0, I_0$  - напряжение питания

и ток диода. При работе ГДГ в пролетном режиме, можно использовать соотношения:  $U_1 = U_0 - U_{\text{нор}}$ ,  $U_{\max} = 2U_{\text{нор}}$ , где  $U_{\text{нор}}$  - пороговое напряжение. Величина  $|G_{\delta 0}|$  - имеет максимальное значение на пролетной частоте  $f_{\text{нр}}$  и уменьшается при отклонении частоты  $f$  от  $f_{\text{нр}}$ :

$$|G_{\delta 0}| = |G_{\text{н}}| \left( 1 - 2 \left| 1 - \frac{f}{f_{\text{нр}}} \right| \right), \quad (5.17)$$

где  $G_{\text{н}}$  - значение  $|G_{\delta 0}|$  на частоте  $f = f_{\text{нр}}$ . При  $G_{\text{н}} < |G_{\delta 0}|$  - наблюдаются возбуждение колебаний. Мощность колебаний, генерируемых диодом, определяется:

$$P_1 = 0.5 |G_{\delta}| U_1^2,$$

и, решив уравнение  $\frac{\partial P_1}{\partial U_1} = 0$ , найдем  $U_{1\text{ном}} = \frac{U_{\max}}{\sqrt{2}} = \sqrt{2} U_{\text{нор}}$ ,  $G_{\text{ном}} = 0.5 |G_{\delta 0}|$  условие,

когда диод отдает в нагрузку максимальную мощность при  $f = f_{\text{нр}}$ , равную

$$P_{\max} = 0.5 |G_{\delta 0}| U_{\text{нор}}^2. \quad (5.18)$$

**В СВЧ печах** нагрев энергий СВЧ происходит одновременно по всему объему неидеального диэлектрика, что обеспечивает высокую скорость нагрева, безынерционность управления процессом и хорошее качество продукции [20].

СВЧ печь - это конструкция, ограничивающая область взаимодействия между, полями СВЧ и нагрузкой (нагреваемый продукт). В СВЧ печь входят: магнетрон, секция передачи энергии от генератора к нагревательной камере; резонансная камера (нагревательная), работающая на резонансной частоте; герметизирующие уплотнения или ВЧ - ловушки для предотвращения паразитного излучения.

Каждая среда характеризуется параметрами: диэлектрической проницаемостью  $\epsilon \left( \frac{\Phi}{\text{М}} \right)$ , магнитной проницаемостью  $\mu \left( \frac{\text{ГН}}{\text{М}} \right)$  и проводимостью  $\sigma \left( \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{М}} \right)$ .

Наличие проводимости делает диэлектрик неидеальным, с потерями. В диэлектрике с потерями, находящемся в электромагнитном поле, течет ток смещения

$\vec{j}_{\text{см}} = i\omega \cdot \epsilon \vec{E} = \omega \epsilon \vec{E} \cdot e^{\frac{j\pi}{2}}$  и ток проводимости  $\vec{j}_{\text{пр}} = \sigma \vec{E}$ , сдвинутые на  $\frac{\pi}{2}$  при векторном представлении полного тока  $\vec{j} = \vec{j}_{\text{см}} + \vec{j}_{\text{пр}}$ .

Отношение тока проводимости к току смещения есть тангенсом угла потерь

$$\operatorname{tg}\delta = \frac{\sigma}{\omega\epsilon}, \quad (5.19)$$

величина которого определяет на круговой частоте  $\omega$  постоянную затухания  $\alpha$  электромагнитного поля в этом диэлектрике,

$$\alpha = \omega \cdot \sqrt{\epsilon\mu \cdot \left( \frac{\sqrt{1 + \operatorname{tg}^2\delta} - 1}{2} \right)}, \quad (5.20)$$

Величина  $\alpha$  характеризует изменение амплитуды полей (электрического -  $E_m$  и магнитного -  $H_m$ ) в зависимости от расстояния  $x$  в образце:

$$E_m(x) = E_m(0) \cdot e^{-\alpha x} \cdot e^{-j\beta x}. \quad (5.21)$$

В случае диэлектриков с малыми потерями ( $\operatorname{tg}\delta \ll 1$ ) выражение (5.20), после разложения в ряд по малому параметру, примет более простой вид:

$$\alpha = \frac{\omega\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}{c} \cdot \frac{\operatorname{tg}\delta}{2} = \frac{\pi\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r}}{\lambda} \cdot \operatorname{tg}\delta, \quad (5.22)$$

где  $\lambda = \frac{c}{f}$  длина волны в свободном пространстве.

Расстояние, на котором амплитуда поля уменьшается в  $e$  раз, называется глубиной проникновения -  $\Delta$  поля в материал, и, согласно (5.21) и (5.22) для случая малых потерь выражается как

$$\Delta = \frac{1}{\alpha} = \frac{\lambda}{\pi\sqrt{\epsilon_r \cdot \mu_r} \cdot \operatorname{tg}\delta}. \quad (5.23)$$

Глубина проникновения поля в металл ( $\operatorname{tg}\delta \gg 1$ ) из (5.20) определяется фор-

мулой 
$$\Delta_{\text{мет}} = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu\delta}}. \quad (5.23,б)$$

параметры различных материалов приведены в приложении Г.

Потери энергии СВЧ поля в диэлектрике (тепловые потери мощности  $P_{\text{пот}}$ ) определяются соотношением:

$$P_{\text{пот}} = \int_{V_\epsilon} \sigma(E \cdot E^*) dV = \omega\epsilon_0\epsilon_r \operatorname{tg}\delta \int_{V_\epsilon} |E|^2 dV, \quad (5.24)$$

где  $V_\epsilon$  - объем диэлектрика;  $E$  - электрическое поле в области, занятой диэлектриком, в конкретном случае функция координат.

Эффективность преобразования энергии электрического поля в тепловую, согласно (5.24), увеличивается пропорционально рабочей частоте и квадрату напряженности электрического поля. Но увеличивать напряженность электрического поля нельзя, так как, начиная с некоторого уровня, возникает пробой. Поэтому увеличение частоты - единственный путь увеличения удельной тепловой энергии потерь.

Процесс термообработки сопровождается повышением температуры диэлектрика. Чтобы нагреть образец весом  $m$  на  $\Delta T$  градусов (от  $T_n$  - начальной до

$T_k$  - конечной температуры, т.е.  $\Delta T = T_k - T_n$ ) при его удельной теплоемкости  $\gamma \left[ \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}} \right]$ , необходима энергия

$$W = 4,1868 \cdot m \cdot \gamma_c \cdot \Delta T \text{ [Дж]} \quad (5.25)$$

Скорость изменения энергии за время  $\Delta t$ , т.е.  $\frac{W}{\Delta t}$ , есть мощность  $P_{\text{пот}}$ , затра-

чиваемая электромагнитным полем  $P_{\text{пот}} = \frac{W}{\Delta t} \text{ [Вт]}$ , а с учетом (5.24) и (5.25) по-

лучим соотношение

$$\Delta t \omega \epsilon_0 \epsilon_r \cdot \text{tg} \delta \int_{V_\epsilon} |E|^2 dV = 4,1868 \cdot m \gamma \Delta T. \quad (5.26)$$

Из (5.26) определяется изменение температуры диэлектрика за время  $\Delta t$ .

$$\Delta T^0 = \frac{\omega \epsilon \cdot \text{tg} \delta \int |E|^2 dV}{4,1868 \cdot m \gamma} \cdot \Delta t \text{ [град]}. \quad (5.27)$$

Величина поля  $|E|^2$  определяется в резонаторе (нагревательная камера) СВЧ печи.

Нагревательная камера СВЧ печи - это объемный резонатор прямоугольной формы  $a \times b \times h$ , выполненный из металла (нержавеющая сталь, алюминий и т.п. с  $\mu_r = 1$ ).

. В прямоугольных резонаторах возможны колебания типов  $H_{mnp}$  и  $E_{mnp}$ , для которых выражения компонент поля имеют вид:

колебания типа  $H_{mnp}$

$$\begin{aligned} H_x &= -D \cdot \frac{\pi m}{a} \cdot \frac{\pi p}{L} \cdot \sin\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi p z}{L}\right); \\ H_y &= D \cdot \frac{\pi n}{b} \cdot \frac{\pi p}{L} \cdot \cos\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi p z}{L}\right); \\ H_z &= D \cdot \left[ \left(\frac{\pi m}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2 \right] \cdot \cos\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi p z}{L}\right); \\ E_x &= j\omega_0 \mu D \cdot \frac{\pi n}{b} \cdot \cos\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi p z}{L}\right); \\ E_y &= -j\omega_0 \mu D \cdot \frac{\pi m}{a} \cdot \sin\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi p z}{L}\right); \\ E_z &= 0, \end{aligned} \quad (2.1)$$

где  $D$  - амплитудный коэффициент, он равен  $D = \sqrt{\frac{4P}{ab} \cdot \frac{g_{mn}^2}{\omega \mu h}}$ .

Индекс  $m$  - число вариаций по оси  $x$  в пределах стороны  $a$ , индекс  $n$  - по оси на стороне  $b$ , а индекс  $p$  - число вариаций по  $z$ , т.е. по длине резонатора  $h$ .

колебания типа  $E_{mnp}$

$$E_x = -D \cdot \frac{\pi m}{a} \cdot \frac{\pi p}{L} \cdot \cos\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi p z}{L}\right);$$

$$E_y = -D \cdot \frac{\pi n}{b} \cdot \frac{\pi p}{L} \cdot \sin\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi p z}{L}\right);$$

$$E_z = D \cdot \left[ \left(\frac{\pi m}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2 \right] \cdot \sin\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi p z}{L}\right); \quad (2.11)$$

$$H_x = j\omega_0 \epsilon D \cdot \frac{\pi n}{b} \cdot \sin\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi p z}{L}\right);$$

$$H_y = -j\omega_0 \epsilon D \cdot \frac{\pi m}{a} \cdot \cos\left(\frac{\pi m x}{a}\right) \cdot \sin\left(\frac{\pi n y}{b}\right) \cdot \cos\left(\frac{\pi p z}{L}\right);$$

$$H_z = 0,$$

$$\text{где } D = \sqrt{\frac{4P}{ab} \cdot \frac{g_{mn}^2}{\omega \epsilon h}}; \quad g^2 = \left(\frac{\pi m}{a}\right)^2 + \left(\frac{\pi n}{b}\right)^2; \quad h = \sqrt{\omega^2 \epsilon \mu - g_{mn}^2}.$$

Для равномерного распределение электрического поля в резонаторе надо использовать много типов колебаний  $H_{mnp}$  и  $E_{mnp}$ , а для этого следует в необходимых пределах увеличить внутренний объем резонатора. Поля колебаний, имеющих одинаковые резонансные частоты, смешиваются друг с другом и образуют поле, в котором суммарные электрические и магнитные поля становятся почти равномерными в любом направлении и сечении.

Резонансная длина волны камеры - резонатора определяется выражением:

$$\lambda_R = \frac{2}{\sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2}}, \quad (5.28)$$

а резонансная частота:

$$f_{R0} = \frac{c}{\lambda_R} = \frac{c}{2} \sqrt{\left(\frac{m}{a}\right)^2 + \left(\frac{n}{b}\right)^2 + \left(\frac{p}{h}\right)^2}, \quad (5.29)$$

где  $c$  - скорость света.

Набор целых чисел  $m, n, p$ , удовлетворяющий (5.29), показывает, сколько видов колебаний может возникнуть в резонаторе на  $f_{R0} - \text{const}$ .

Число колебаний  $N$  в резонаторе объемом  $V=a \times b \times h$  можно определить [20,21]

по формуле: 
$$N = \frac{4}{3} \pi \cdot \left( \frac{f_{R0}}{c} \right)^3 \cdot V. \quad (5.30)$$

Для нахождения индексов  $m, n$  видов колебаний, которые могут возникать в заданном сечении камеры  $a \times b$  можно воспользоваться [19] или рис. 5.3.

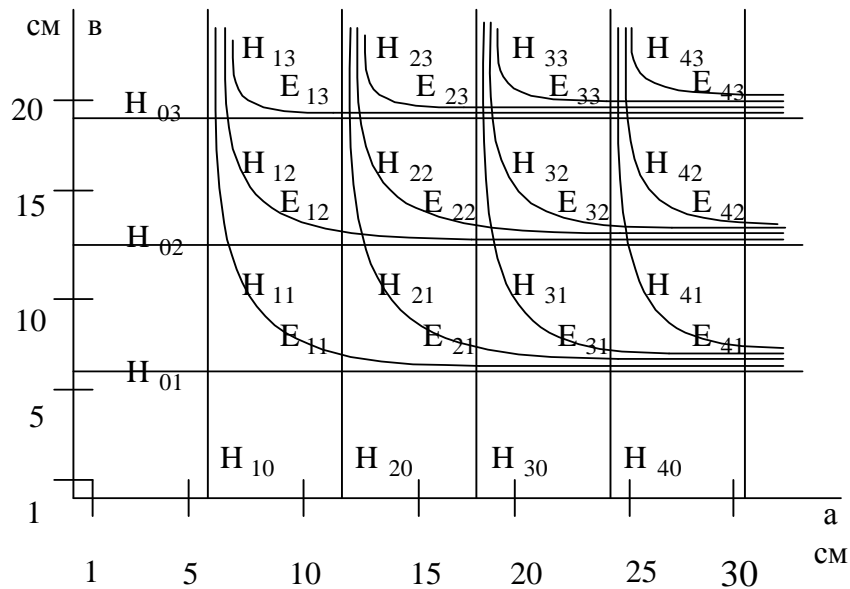


Рис. 5.3. Виды колебаний в прямоугольном волноводе в зависимости от размеров поперечного сечения  $a \times b$  на частоте 2400 МГц.

Таких колебаний может быть несколько десятков. Далее из (5.29) определяются индексы  $r$  для заданной частоты. Значение индекса  $r$  следует округлить до ближайшего целого числа, хотя при этом изменяется и резонансная частота. Поэтому следует рассчитать резонансные частоты  $f_R$  всех выбранных колебаний и построить спектр, чтобы представлять разброс частот и затем управлять в процессе работы его изменением.

Энергия  $W$ , вводимая в резонатор, определяется соотношением:

$$W = \frac{1}{2} \int_V \epsilon |E|^2 dV, \quad (5.31)$$

где поле  $|E|^2$  для каждого колебания, согласно (2.I) и (2.II), должно быть представлено  $|E|^2 = E_x^2 + E_y^2 + E_z^2$ . Результат вычисления интеграла по объему для любого одного из колебаний будет

$$W = \frac{1}{16} \cdot \epsilon |E|^2 \cdot V.$$

За период  $T$  в резонатор вводится мощность от генератора  $P_k$ , которая, принимаясь, делится поровну между  $n$  возбужденными одновременно колебаниями. Таких колебаний на одной частоте может быть два или четыре (это определяется рассчитанным спектром колебаний для полосы частот).

$$\frac{P_k T}{n} = \frac{1}{16} \cdot \varepsilon |E|^2 \cdot V, \text{ откуда} \quad |E|^2 = \frac{16 \cdot P_k}{n \cdot \varepsilon \cdot f \cdot V}. \quad (5.32)$$

Входное сопротивление камеры обозначим  $Z_k$ . Если сопротивление конца волновода, возбуждающего камеру,  $Z_w$  и  $Z_k$  равны, то в камеру поступает мощность  $P_k$ , равная мощности генератора  $P_{\text{ген}}$ , а в тракте подводящего волновода коэффициент стоячей волны  $K_{\text{ст}} = 1$ . В случае частично стоячих волн ( $K_{\text{ст}} \neq 1$ ), что наблюдается при изменении сопротивления  $Z_k$ , между мощностями  $P_k$  и  $P_{\text{ген}}$  устанавливается соотношение:

$$P_k = P_{\text{ген}} (1 - |\Gamma|^2), \quad (5.33)$$

где  $|\Gamma| = \frac{K_{\text{ст}} - 1}{K_{\text{ст}} + 1}$ . Величина  $Z_k$  тоже определяется [5] параметром  $|\Gamma|$ :

$$|Z_k| = Z_w \cdot \frac{1 + |\Gamma|}{1 - |\Gamma|} = Z_w \cdot K_{\text{ст}}. \quad (5.34)$$

где  $Z_w$  - величина волнового сопротивления волновода, равная

$$Z_w = 2 \frac{b}{a} \cdot \frac{120\pi}{\sqrt{1 - (\lambda/2a)^2}}. \quad (5.35)$$

### 5.5.2. Примеры решения задач

Задача № 1 (Глубина проникновения СВЧ поля).

Определить глубину проникновения электромагнитного СВЧ поля на частоте  $f = 2,45 \cdot 10^9$  Гц для пищевых продуктов (мясо, вода), параметры которых приведены в приложении Г, и металла алюминия, из которого сделан корпус СВЧ печи.

#### Решение

Глубина проникновения  $\Delta$  в случае проводящих тел определяется из (5.23,б) для металла:

$$\Delta_{\text{мет}} = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \mu_r \sigma}} = \sqrt{\frac{2}{2\pi \cdot 2,45 \cdot 10^9 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 3,72 \cdot 10^7}}$$

где  $\sigma_{\text{Al}} = 3,72 \cdot 10^7 \frac{1}{\text{Ом} \cdot \text{м}}$ ;  $\mu_r = 1$ ;

$$\Delta_{\text{Al}} = 1,67 \cdot 10^{-3} \text{ мм} = 1,67 \text{ мкм}.$$

Вода – диэлектрик с малыми потерями ( $\text{tg}\sigma = 0,157$ ), поэтому глубина  $\Delta_{\text{воды}}$  определяется по формуле (5.23), величина  $\mu_r = 1$  для воды и мяса.

$$\Delta_{\text{ВОДЫ}} = \frac{c}{f\pi\sqrt{\epsilon_r}\mu_r \text{tg}\delta} = \frac{3 \cdot 10^8 \cdot 10^2}{2,45 \cdot 10^9 \cdot 3,14 \cdot 0,157\sqrt{76,7}}$$

$$\Delta_{\text{ВОДЫ}} = 2,836\text{см}$$

Определим постоянную затухания (5.20) для мяса

$$\alpha_{\text{мясо}} = \frac{\omega}{c} \sqrt{\frac{\epsilon_r}{2}} \sqrt{(-1 + \sqrt{1 + \text{tg}^2 \delta})} = \frac{2\pi \cdot 2,45 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} \sqrt{\frac{40}{2}} \sqrt{(-1 + \sqrt{1 + (0,3)^2})} = 48,1 \frac{1}{\text{м}}$$

Откуда глубина  $\Delta_{\text{мяса}} = \frac{1}{\alpha_{\text{мяса}}} = \frac{10^2}{48,1} = 2,08\text{см}.$

**Выводы:**

1) толщина стенок -t металлического корпуса СВЧ-печи не определяется величиной  $\Delta_{\text{Al}}$ , т.к.  $t \gg \Delta_{\text{Al}}$  она задается требованиями технологической прочности (1,5 –2мм). Можно по известной толщине стенок определить во сколько раз уменьшится поле снаружи печи.

2) глубина проникновения поля в мясо определяет толщину образцов ( $t_{\text{мяс.}} \approx \Delta_{\text{мяс.}}$ ).

3) по мере разогрева мяса, происходит возгонка воды (обезвоживание) и уменьшение параметров  $\epsilon_r$  и  $\text{tg}\delta$ . Следовательно, первоначальная толщина образцов может быть взята больше.

### **Задача № 2** (Определение времени разогрева продуктов)

За какое время нагреется 1 л воды до 80°C от начальной температуры 20°C в СВЧ –печи с мощностью 800Вт, рабочей частотой 2,45 ГГц и размерами камеры  $a \times b \times h = 310 \times 200 \times 324\text{мм}$ ?

### **Решение**

Для нагрева воды весом  $m$  грамм на  $\Delta T^\circ\text{C}$ , при теплоемкости воды

$$\gamma = 1 \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}, \text{ за время } dt \text{ требуется, согласно (5.24) и (5.25), мощность } P_T, \text{ опре-}$$

деляемая выражением следующего вида

$$P_T = \frac{W}{dt} = 4,186 \cdot \frac{m}{dt} \gamma \Delta T, \quad [\text{Вт}], \quad (5.24,б)$$

где  $W$  – требуемая энергия в джоулях для нагрева вещества за время  $dt$  на  $\Delta T^\circ\text{C}$ , т.е. со скоростью  $\frac{\Delta T}{dt}$ .

**Справка:** 1кал = 4,186 Дж, Дж·сек = Вт.



Мощность тепловых потерь  $P_T$  СВЧ поля, напряженность которого  $E$ , для нагрева воды, проводимость которой  $\sigma$  и объем  $V_B$ , определяется формулой

$$P_T = \int_{V_B} \sigma |E|^2 dV \quad (5.24,в)$$

Величина  $|E|^2$  определяется мощностью, вводимой в камеру (5.32), имеющую объем  $V = a \times b \times h = 20 \text{ дм}^3$

$$|E|^2 = \frac{16 \cdot P_K}{n \cdot \epsilon \cdot f \cdot V}, \quad \text{где в общем случае } n \cdot k \text{ -одновременное количество колебаний на одной частоте: в каждом частном случае, когда } n=1, k=2 \text{ (} E_{mn}, H_{mn}\text{-колебания при комплекте индексов } m, n\text{).}$$

Подставим  $|E|^2$  в формулу  $P_T$  и определим мощность потерь

$$P_T = \omega \cdot \epsilon \cdot \text{tg} \delta \cdot V_{\text{дв}} \cdot E^2 = 2\pi f \cdot \epsilon \cdot \text{tg} \delta \cdot \frac{16 \cdot P_K \cdot V_{\text{дв}}}{n \cdot \epsilon \cdot f \cdot V} = \frac{2\pi \text{tg} \delta \cdot 16 \cdot V_{\text{дв}}}{n \cdot V} P_K$$

откуда  $P_T = \frac{6,28 \cdot 0,157 \cdot 1 \cdot 10^{-3} \cdot 16 \cdot 800}{2 \cdot 20 \cdot 10^{-3}} = 374,7 \text{ Вт}$

Определим время разогрева (5.24,б)

$$374,7 \cdot dt = 4,186 \cdot m \cdot \gamma \cdot \Delta T$$

$$dt = \frac{4,186 \cdot m \cdot \gamma \cdot \Delta T}{374,7} = \frac{4,186 \cdot 10^3 \cdot 1 \cdot 60}{374,7} = 670,296 \text{ с}$$

$$t = \frac{670,3}{60} = 11,17 \text{ мин}$$

### Задача № 3. (Определение числа колебаний в камере СВЧ печи)

Определите количество типов колебаний и их первые индексы  $(m,n)$ , которые могут возбуждаться в резонаторе СВЧ печи марки Samsung – 0M75S(31), размеры которой  $a \times b \times h = 306 \times 201 \times 322 \text{ мм}$ . Рабочая частота камеры  $f = 2,45 \text{ ГГц}$ .

#### Решение

Определим объем камеры  $V = a \times b \times h = 20 \text{ дм}^3$ . Количество типов колебаний в камере согласно (5.30) равно

$$N = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{f}{c} \right)^3 \cdot V = \frac{4}{3} \pi \left( \frac{2,45 \cdot 10^9}{3 \cdot 10^8} \right)^3 \cdot 20 \cdot 10^{-3} \approx 45$$

Согласно рис. 5.3 определяем индексы  $m,n$  и записываем возможные типы волн

$H_{01}$	$H_{02}$	$H_{03}$	$H_{10}$	$H_{20}$	$H_{30}$	$H_{40}$	$H_{50}$
$H_{11} E_{11}$	$H_{21} E_{21}$	$H_{31} E_{31}$	$H_{41} E_{41}$				
$H_{12} E_{12}$	$H_{22} E_{22}$	$H_{32} E_{32}$	$H_{42} E_{42}$				
$H_{13} E_{13}$	$H_{23} E_{23}$	$H_{33} E_{33}$	$H_{43} E_{43}$				

Таких типов 32 по индексам m,n. Очевидно, остальные типы колебаний будут с вариациями индексов m, p или n, p при нулевых индексах n или m.

**Задача №4.** (Определение величины мощности за дверцей печи)

Окно в дверце камеры СВЧ печи прямоугольной формы  $200 \times 120 \text{ мм}^2$  покрыто перфорированной металлической сеткой, толщиной 0,3мм. Диаметр отверстий  $d = 4 \text{ мм}$ . Рабочая частота камеры  $f = 2450 \text{ МГц}$ . Определите величину ослабления мощности излучения вблизи этого экрана. Мощность в камере 600Вт.

**Решение**

Для нахождения ослабления мощности излучения воспользуемся номограммой [2].

Определим длину волны  $\lambda = \frac{c}{f} = \frac{3 \cdot 10^{10}}{2,45 \cdot 10^9} = 12,245 \text{ см}$

Находим отношение  $\frac{d}{\lambda} = \frac{4 \cdot 10^{-3}}{12,245 \cdot 10^{-2}} = 0,0327$  и отношение  $\frac{d}{t} = \frac{4}{2} = 2$

По номограмме отношение ( $\delta_p$ ) мощности вне камеры ( $P_{\text{внеш}}$ ) к мощности ( $P_{\text{внут}}$ ) внутри не определяется при полученных величинах,  $\frac{d}{\lambda}$  и  $\frac{d}{t}$ . Поэтому определяем по формуле

$$\delta_p = \frac{1}{1 + \left( \frac{\lambda}{2d \cdot \ln(t\pi/d)} \right)^2} = \frac{1}{1 + \left( \frac{1}{0,065 \cdot \ln(0,5\pi)} \right)^2} = 0,00085$$

$$\alpha_{\text{дб}} = 10 \lg \frac{1}{\delta_p} = 30,7 \text{ дб}$$

Мощность ослабляется сеткой в 1170 раз или на 30,7 дБ . Площадь окна  $S_{\text{ок}} = 20 \times 12 = 240 \text{ см}^2$ . При допущении, что КПД камеры составляет 70%, тогда около 30% мощности не тратится в продуктах. Это потери на стенках камеры, примерно 10%, допустим, что около 12% мощности приходится на потери в окне, это 72Вт, остальная мощность – отражается во вводе энергии в камеру. На  $1 \text{ см}^2$  поверхности окна приходится плотность мощности

$$P_{\text{внут}} = \frac{P}{S_{\text{ок}}} = \frac{72}{240} = 0,3 \frac{\text{Вт}}{\text{см}^2}$$

$$P_{\text{внеш}} = P_{\text{внут}} \cdot \delta = 0,3 \cdot 0,00085 = 0,000255 = 0,255 \frac{\text{мВт}}{\text{см}^2}$$

Величина  $P_{\text{внеш}}$  меньше предельной нормы

**Задача №5.** (Определение концентрации в долинах диода Ганна)

Определить соотношение концентрации электронов в долинах диода Ганна, если известна эффективная масса электронов в боковой долине, равная  $m_{эфф2} = 1,2 m_0$ , и в центральной долине-  $m_{эфф1} = 0,07 m_0$ , интервал между минимумами энергии в долинах равен  $\Delta E = 0.36$ , при температуре  $T=300$  К.

### Решение:

Соотношение концентрации электронов в долинах диода Ганна определяется по

формуле: 
$$\frac{n_2}{n_1} = \left(\frac{N_2}{N_1}\right) \exp\left(-\frac{\Delta E_1}{kT}\right),$$

Найдём соотношение  $\frac{N_2}{N_1}$ , по формуле: 
$$\frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{m_{эфф2}}{m_{эфф1}}\right)^{3/2}, \quad \frac{N_2}{N_1} = \left(\frac{1,2 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}{0,07 \cdot 9,1 \cdot 10^{-31}}\right)^{3/2} = 70,$$

тогда соотношение концентрации электронов в долинах диода Ганна равно

$$\frac{n_2}{n_1} = 70 \exp\left(-\frac{0,36}{\frac{1,38 \cdot 10^{-23} \cdot 300}{1,6 \cdot 10^{-19}}}\right) = 3,902 \cdot 10^{-5}$$

Ответ:  $\frac{n_2}{n_1} = 3,902 \cdot 10^{-5}$ .

### Задача №6. (Определение мощности ГДГ)

Определить максимальную выходную мощность, обеспечиваемую генератором на диоде Ганна на основе GaAs, если он включен в камеру с активной проводимостью нагрузки  $0,01$  1/Ом и работает в пролетном режиме на рабочей частоте  $10$  ГГц. Длина образца диода  $8$  мкм, рабочее напряжение  $8,4$  В. При изменении напряжения на диоде от  $4$  В до  $8,4$  В величина тока падала с  $400$  мА до  $350$  мА

### Решение.

Определим напряженность поля на образце диода и скорость при этой напряженности поля:  $E=U/l=8,4/8 \cdot 10^{-6}=1,05 \cdot 10^6$  В/м =  $1,05 \cdot 10^4$  В/см.

Согласно теории при напряженности  $3,5 \cdot 10^3$  В/см достигается величина пороговой скорости  $2 \cdot 10^7$  см/с/. С этой скоростью носители дрейфуют в образце.

Величина пролетной частоты (5.18) будет равна

$$F_{np} = V_n/l = 2 \cdot 10^7 / 8 \cdot 10^{-4} = 0,25 \cdot 10^{11} = 25 \cdot 10^9 \text{ Гц.}$$

Дифференциальное сопротивление диода определяется следующим образом

$$R_{диф} = (U_1 - U_2) / (I_1 - I_2) = (4 - 8) / (400 - 350) \cdot 10^{-3} = 4/50 \cdot 10^{-3} = 0,08 \cdot 10^{-3} \text{ Ом.}$$

Величина порогового напряжения определяется

$$U_{nop} = E_{nop} \cdot l = 3,5 \cdot 10^3 \cdot 8 \cdot 10^{-4} = 2,8 \text{ В.}$$

Откуда амплитуда переменного напряжения составляет

$$U_1 = U_0 - U_{nop} = 8,4 - 2,8 = 5,6 \text{ В.}$$

Мощность в нагрузке (проводимость контура дана) равна

$$P_{max} = 0,5 G_{до} (U_{nop})^2 = 0,5 G_n (1 - 2 \left| \frac{1 - f/f_{np}}{1} \right|) (U_{nop})^2 = \\ = 0,5 \cdot 0,01 \cdot (1 - 2 \cdot \left| \frac{10}{25} \right|) \cdot (U_{nop})^2 = 7,84 \text{ мВт}$$

Ответ: максимальная мощность в нагрузке ГДГ равна  $7,84$  мВт.

**Задача №7.** (Определить эквивалентного сопротивления нагрузки ГЛПД)

Определить эквивалентное сопротивление нагрузки, если выходная мощность ЛПД составляет 2 Вт, а постоянная составляющая тока  $I_0=0.6$  А.

**Решение:**

$$P_{\text{вых}} = 0.5 \cdot U_m^2 / R_э, \text{ или в другом виде } P_{\text{вых}} = 2 \cdot U_m \cdot I_0 / \pi.$$

Из первого выражения  $R_э = 0.5 \cdot U_m^2 / P_{\text{вых}}$ , а из второго соотношения находим величину переменного напряжения на контуре

$$U_m = P_{\text{вых}} \cdot \pi / 2 \cdot I_0.$$

Подставляем исходные величины

$$U_m = 2 \cdot 3,14 / 2 \cdot 0,6 = 5,23, \text{ В}$$

$$R_э = 0,5 \cdot 5,23^2 / 2 = 6,85 \text{ Ом}$$

Ответ: Эквивалентное сопротивление нагрузки  $R_э = 6,85$  Ом

**Задача №8.** (Частота ГДГ в пролетном режиме)

В генераторном режиме работы диода Ганна, домен возникает при постоянном напряжении большем порогового напряжения  $U_0 > U_{\text{пор}}$ . Найти частоту генерации в пролетном режиме, если известны величины: пороговое напряжение 0,21 В; скорость носителей в пороговом режиме  $6 \cdot 10^3$  м/с, скорость насыщения  $5 \cdot 10^3$  м/с.

**Решение:**

$f_{\text{np}} = v_{\text{нас}} / l$ , где  $l$  - длина образца, находится из соотношения

$$U_{\text{пор}} = E_{\text{пор}} \cdot l.$$

Для приборов на материале GaAs величина  $E_{\text{пор}}=3,5 \cdot 10^3$  В/см.

Тогда  $l = U_{\text{пор}} / E_{\text{пор}}$ ,  $l = 6 \cdot 10^{-5}$  см. а частота генерации в заданном режиме

$$f_{\text{np}} = 5 \cdot 10^3 / 6 \cdot 10^{-5} = 0,83 \cdot 10^8 \text{ Гц}$$

Ответ:  $f_{\text{np}} = 83$  МГц

**Задача №9** (Определение постоянной времени релаксации в ГДГ)

Определить постоянную времени релаксации объёмного заряда и определить существование домена в диоде Ганна на основе GaAs n-типа при  $L=1$  мкм, скорости домена  $v_0 = 10^7$  см/с и исходной концентрации  $n_0 = 2 \cdot 10^{15}$  см<sup>-3</sup>,  $\epsilon_r = 12.5$ , дифференциальная подвижность  $|\mu_d| = 0.1$  м<sup>2</sup>/В.

**Решение:**

Постоянная времени релаксации объёмного заряда определяется [2] в виде

$$\tau_d = \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0}{e \cdot n_0 \cdot \mu_d}, \quad \text{вычисляем} \quad \tau_d = \frac{125 \cdot 5.85 \cdot 10^{-12}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 2 \cdot 10^{15} \cdot 0.1 \cdot 10^4} = 35 \text{ мс}.$$

Условие существования домена определяется критерием Крамера [2]:

$$n_0 \cdot L \geq \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 \cdot v_d}{e \cdot \mu_d}, \quad 2 \cdot 10^{15} \cdot 10^{-4} \geq \frac{12.5 \cdot 8.85 \cdot 10^{-10}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 0.1 \cdot 10^4} \quad \text{или} \quad 2 \cdot 10^{11} \gg 6.9 \cdot 10^6.$$

Так как  $n_0 \cdot L = 2 \cdot 10^{11} \text{ см}^2$ , то домен в образце на основе GaAs возникает. Время релаксации  $\tau_d = 6,9 \cdot 10^6 / 2 \cdot 10^{15} = 3,45 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ .

Ответ:  $\tau_d = 3,45 \cdot 10^{-9} \text{ с}$ .

**Задания №10.** (Определение сопротивления потерь диода для генератора)

В диоде Ганна скорость домена в пролетном режиме  $2 \cdot 10^6 \text{ м/с}$ , время пролета в образце  $5 \cdot 10^{-10} \text{ с}$ , площадь сечения образца прибора  $23 \cdot 10^{-4} \text{ см}^2$ , общее число электронов  $2 \cdot 10^{15} \text{ см}^{-3}$ , подвижность электронов в слабом поле составляет  $\mu_1 = 6000 \text{ см}^2 / \text{Вс}$ . Найти сопротивление потерь образца в слабом поле.

**Решение:**

Сопротивление потерь образца в слабом поле  $R_0 = \frac{l}{e \cdot n \cdot \mu_1 \cdot S}$ , где

$l$  - длина образца,  $e$  - заряд электрона  $e = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ Кл}$ .

Найдем длину образца по формуле  $l = T_0 \cdot v_d = 5 \cdot 10^{-10} \cdot 2 \cdot 10^6 = 10 \text{ мкм}$ , где  $T_0$  - время пролета. Теперь найдем сопротивление образца в слабом поле:

$$R_0 = \frac{l}{e \cdot n \cdot \mu_1 \cdot S} = \frac{10 \cdot 10^{-4}}{1.6 \cdot 10^{-19} \cdot 6000 \cdot 23 \cdot 10^{-4} \cdot 2 \cdot 10^{15}} = \frac{10 \cdot 10^{-4}}{0.004416} = 0.226 \text{ Ом}$$

## 6. МЕТОДИКА ТЕКУЩЕГО КОНТРОЛЯ ОСВОЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ

Осуществляется в соответствии с **Положением о порядке использования рейтинговой системы для оценки успеваемости студентов** (приказ ректора 25.02.2010 № 1902) и основана на бально - рейтинговой системы оценки успеваемости, действующей с 2009 г., которая включает **текущий** контроль выполнения элементов дисциплины по элементам контроля с подведением текущего рейтинга (раздел б) и **итоговый** контроль.

**Правила формирования пятибалльных оценок** за каждую контрольную точку (КТ1, КТ2) осуществляется путем округления величины, рассчитанной по формуле:

$$КТх|_{x=1,2} = \frac{(\text{Сумма}_\text{баллов}_\text{набранная}_\text{к}_\text{КТх}) \cdot 5}{\text{Требуемая}_\text{сумма}_\text{баллов}_\text{по}_\text{балльной}_\text{раскладке}}.$$

**Итоговый контроль освоения** дисциплины осуществляется на экзамене по традиционной пятибалльной шкале. Обязательным условием перед сдачей экзамена является выполнение студентом необходимых по рабочей программе для дисциплины видов занятий: выполнение и защита результатов лабораторных работ, сдача контрольных работ.

**Формирование итоговой суммы баллов** осуществляется путем суммирования семестровой (до 70 баллов) и экзаменационной составляющих (до 30 баллов).

## ПРИМЕНЕНИЕ БАЛЬНО-РЕЙТИНГОВОЙ СИСТЕМЫ

### Распределение баллов по элементам контроля

Элементы учебной деятельности	Кол-во элементов	Длительность элемента, час.	Кол - во баллов за 1 элемент контроля	Срок контроля, (неделя с начала семестра)	Кол - во баллов (всего)
Посещение занятий	18	2	0,25	1-18	<b>4,5</b>
Выполнение контрольных работ (дом.)	2		5	7, 14	<b>10</b>
Выполнение лабораторных работ	4	4	8	11 -18	<b>32</b>
Выполнение индивидуальных и расчетных заданий	2		10	7, 17	<b>20</b>
Компонент своевременности				1-17	<b>3.5</b>
Сдача экзамена(максимум)					<b>30</b>
<b>Итого</b>					<b>100</b>

### Таблица распределения баллов в течение семестра

Элементы учебной деятельности	Максимальный балл на 1-ую контрольную точку с начала семестра	Максимальный балл за период между 1КТ и 2КТ	Максимальный балл за период между 2КТ и на конец семестра	Всего за семестр
Посещение занятий	1,5	1,5	1,5	<b>4,5</b>
Контрольные работы	5	5	-	<b>10</b>
Выполнение лабораторных работ	-	16	16	<b>32</b>
Выполнение индивидуальных заданий	10		10	<b>20</b>
Компонент своевременности	1	1	1,5	<b>3,5</b>
<b>Итого максимум за период:</b>	<b>17,5</b>	<b>23,5</b>	<b>29</b>	<b>70</b>
Сдача экзамена (максимум)				<b>30</b>
<b>Нарастающим итогом</b>	<b>17,5</b>	<b>41</b>	<b>70</b>	<b>100</b>

## 7.График работ по темам индивидуальных и расчетных заданий

<b>Темы индивидуальных и расчетных заданий:</b>	<b>Готовность</b>	<b>Дата сдачи</b>
1. Общие вопросы микроволновых приборов - контрольная дом, работа	Каждому студ.	6-я неделя
2. Клистроны (генераторы, умножители частоты, усилители)	выдается	8-я неделя
3. ЛБВ типа О и ЛОВ типа О	номер задания, который определяет	11-я неделя
4. Магнетроны, приборы типа М	вопрос и задачу по соответствующей теме	14-я неделя
5. Полупроводниковые СВЧ приборы И применение СВЧ энергии	для домашней разработки	16-я неделя
<b>Темы контрольных работ:</b>		
		Накануне контрольной недели
1. Общие вопросы микроволновых приборов		6-я неделя
2. Резонансные и не резонансные приборы типа О		11-я неделя

### Примечание

По желанию студента (выбирает микроволновый прибор сам) выполнение 3-х домашних индивидуальных заданий может быть заменено разработкой одной сквозной расчетной работой, касающейся разработки электродинамической системы, рассмотрением вопросов электроники прибора (получение самостоятельно задаваемых выходных параметров) и формулировки требований к электронной оптической системе этого прибора. Студент сам составляет график работ по выбранной теме, согласовывает с преподавателем сроки готовности различных этапов работы и сроки контроля, но они должны быть приближены к срокам сдачи домашних индивидуальных заданий.

## 8. Экзаменационные вопросы

1. Роль углов пролета МВП при получении выходных параметров.
2. Основные уравнения в теории МВП и У , необходимые и достаточные условия при их решении. (Примеры)
3. Физика процессов работы МВП, положенная в анализ пространственно – временных диаграмм (ПВД). (Примеры).
4. Управление электронными потоками: цель, причины и следствия и требования к конструкциям приборов. (Примеры)
5. Токи в МВ приборах, используемые при анализе их работы.
6. Принципы работы прибора (любого, одного) и вытекающие требования к его конструкции.
7. Роль скоростей электронов в процессе работы любого МВП при получении выходных параметров. (Примеры)
8. Основные выходные параметры и характеристики генераторных и усилительных МВП.
9. Способы управления выходными параметрами МВП. (Примеры)
10. Физические основы при рассмотрении электронной перестройки частоты. (Примеры)
11. Роль колебательной системы в получении максимальных выходных параметров МВП. (Примеры)
12. Требования к электронным потокам в разных МВП (рассматривать любые три прибора)
13. Физика влияния внешних нагрузок на выходные параметры приборов.
14. Способы изменения частоты в приборах и физические процессы происходящие при этом. (Примеры)
15. Уравнение наведенного тока, его роль в работе МВП и влияние на конструкцию прибора.
16. Процессы и способы передачи энергии электронными потоками в приборах. (Примеры)
17. Электродинамические системы не резонансных МВП и их характеристики, учитываемые в выходных параметрах.
18. Основные параметры и характеристики электродинамических систем, работающих с пространственными гармониками.
19. Как можно управлять выходными параметрами прибора с помощью электронных потоков. (Примеры)
20. Требования, предъявляемые к элементам конструкции МВП различного назначения параметрами электронных потоков.
21. Основные параметры и характеристики конкретного одного МВ прибора с пояснениями особенностей (указывается тип: отражательный клистрон , пролетный клистрон для различных режимов работы, ЛБВО, ЛОВО и др.) .
22. Получение из основных уравнений электроники математических соотношении для вычисления выходной мощности -  $P_{\text{вых}}$ , коэффициента усиления -  $K_u$ , электронного КПД -  $\eta_e$ , электронной проводимости  $U_{\text{эл}}$  и др.



- параметров в разных МВП.
23. Физические принципы, лежащие в основе работы генераторов и усилителей СВЧ диапазона.
  24. Основные выходные характеристики МВП и возможность управления ими (Пример).
  25. Режимы работы МВП и особенности их выходных характеристик.
  26. Основные отличия приборов типа -О и М-типов на каких выходных параметрах они сказываются.
  27. Особенности физики работы приборов с катодами в пространстве взаимодействия.
  28. Схемы для исследования основных параметров или характеристик МВП (принципы действия их, прибор задается).
  29. Особенности конструкций СВЧ приборов, взятой из доп. литературы [4,5,6,11,12,13,14]
  30. Объяснить понятия: зона генерации, зона усиления, зона возбуждения, рабочая зона.
  31. Отображение физики работы прибора в поведении любой характеристики.
  32. Приборы с положительным сопротивлением и схемы устройств с их применением.
  33. Приборы с отрицательным сопротивлением и особенности конструкций генераторов, их использующих.
  34. Основные нагрузочные характеристики МВП и какие сведения можно получить, руководствуясь ими.
  35. Основные конструктивные узлы любого МВП. Сформулируйте требования, предъявляемые к ним при разработке прибора.
  36. Коэффициент шума и способы его уменьшения в микроволновых усилительных приборах.
  37. Широкополосность микроволновых приборов, чем она может обеспечиваться. (Примеры).
  38. Принцип действия генераторов с отрицательным сопротивлением (Примеры).
  39. Микроволновые устройства на управляющих диодах, основные параметры и характеристики, определяющие их работу.
  40. Микроволновые устройства на детекторных и смесительных диодах, основные параметры и характеристики, определяющие их работу.

## **9. Учебно-методические материалы по дисциплине**

### **Основная литература**

1. Соколова Ж.М. Микроволновые приборы и устройства.- Томск: Изд.-во ТМЦДО ТУСУР, 2009.-276с.

2. Электронные, квантовые приборы и микроэлектроника: Учебное пособие для вузов. / Ю.Л.Бобровский, С.А.Корнилов, И.А. Кратилов и др.; Под ред. Федорова Н.Д. - М: «Радио и связь», 2002.-560с.

### Дополнительная литература

3. Куш Г.Г. , Соколова Ж.М., Шангина Л.И. Оптоэлектронные и СВЧ приборы и устройства. - Томск: Изд.-во ТУСУР, 2003.-452с.

4. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ, т.т. I, II . Учебник для вузов по специальности «Электронные приборы», - М.: «Высшая школа». 1972-376с.

5. Кацман Ю.А. Приборы СВЧ. Теория , основы расчета и проектирования электронных приборов : Учебник для Вузов по спец. «Электронные приборы» - М.: Высшая школа, 1983-383с.

6.Электронные приборы СВЧ: Учебное пособие для вузов, спец. «Электронные приборы» /Березин В.М.; Буряк В.С.; Гутцайт Э.М.; Марин В.П..-М.: Высшая школа. 1985-296с

7..Кукарин С.В. Электронные СВЧ приборы.- М.: Радио и связь; 1981-172с.

8. Голант М.Е.; Бобровский Ю.Л. Минитроны. - М.: Радио и связь, 1983 - 149с.

9.Электронные приборы СВЧ. Учеб. пособие для радиофизических и радиотехнических факультетов и специальностей вузов/ Под ред. В.Н. Шевчика, М.А. Григорьева. Изд-во Саратовского ун-та, 1980. 416с.

10. Руководство к лабораторным работам по дисциплине «Приборы СВЧ»/ Под редакцией Соколовой Ж.М. каф. СВЧиКР, Ротапринт ТУСУРА, 2002г.

11. Итоги науки и техники, серия Электроника, т.17. М: ВИНТИ, 1985-361с

12. Молоковский С.И., Сушков А.Д. Электронно – оптические системы приборов СВЧ. – М. - Л. : изд. «Энергия», 1965.232с.

13. Электронные сверхвысокочастотные приборы со скрещенными полями./ Перевод с англ. под общей редакцией М.М.Федорова т.1,т.2.-М. изд. «Иностранная литература», 1961.-553с.,

14. Стальмахов В.С. Основы электроники СВЧ приборов со скрещенными полями. – М.: «Сов. Радио», 1963. -365с.

15. Григорьев А.Д. Электродинамика и техника СВЧ. Учеб. для вузов по спец. «Электронные приборы» - М.: Высшая школа, 1990.- 335с.

16. Силин Р.А., Сазонов В.П. Замедляющие системы. – М.: «Сов. Радио», 1966.- 421с.

17. Тараненко З.И., Трохименко Я.К. Замедляющие системы. – Киев: 1965.- 357с.

18.Лебедев И.В. Усилители и генераторы СВЧ диапазона. - М.: «Высшая школа». 2005.- 276с.

19. Микроволновые устройства телекоммуникационных систем/ М.З. Згуровский, М.Е.Ильченко, С.М.Кравчук, т.2. Устройства приемного и передающего трактов. Проектирование устройств и реализация систем/ К. «Політехніка», 2003 – 616с.

20. Федоров Н.Д. Электронные СВЧ, квантовые приборы. - М: «Радио и связь», 1992.-257с.
21. Пюшнер Г. Нагрев энергией сверхвысоких частот. Пер. с англ./ Под. ред. Э.Я.Пастрона. – М.: изд «Энергия», 1968. – 312 с.
22. СВЧ энергетика./ Под ред. Э. Окресса. Пер. с англ. / Под ред. В. Г. Алыбина, Э. Я. Пастрона. т.т 1, 2, 3. – М.: изд. «Мир», 1971.
23. Микроэлектронные устройства СВЧ. Учеб. Пособие для радиотехнических вузов/ Г.И. Веселов, Е.Н. Егоров, Ю.Н.Алехин и др.; Под ред. Г.И. Веселова.- М.: «Сов. Радио», 1972.- 264с.
24. Царапкин Д.Н. Генераторы СВЧ на диодах Ганна. М.: «Радио и связь». - 1982.
25. Итоги науки и техники, серия Электроника, т.17. М: ВИНТИ, 1985-361с.

## Приложение А

### Основные параметры полупроводниковых материалов при T=300 К

параметры	Ед. измерения	Si	Ga As	Ge	InP
Диэлектрическая проницаемость, $\epsilon_r$	отн. ед.	11,8	12,9	16	12,4
Плотность атомов, N	см <sup>-3</sup>	$5 \cdot 10^{22}$	$2,21 \cdot 10^{22}$	$4,42 \cdot 10^{22}$	$2 \cdot 10^{22}$
Плотность	г·см <sup>-3</sup>	2,33	5,31	5,33	4,79
Теплопроводность	Вт·м <sup>-1</sup> ·град <sup>-1</sup>	140	50	60	68
Температура плавления	К	1690	1503	1209	1335
Ширина запрещенной зоны, $\Delta W$	эВ	1,12	1,42	0,67	1,35
Удельная теплоемкость	Дж г <sup>-1</sup> ·град <sup>-1</sup>	0,75	0,35	0,31	-
Собственная концентрация $n_i = p_i$	См <sup>-3</sup>	$1,6 \cdot 10^{10}$	$1,1 \cdot 10^9$	$2,5 \cdot 10^{13}$	$2 \cdot 10^9$
Подвижность в слабых полях	см <sup>2</sup> /(с·В)				
Электронов $\mu_n$		1500	8500	3900	4800
Дырок $\mu_p$		450	400	1900	150
Насыщенная дрейфовая скорость в сильных полях	см·с <sup>-1</sup>	$1 \cdot 10^7$	$1,3 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^6$	$1,5 \cdot 10^7$
Критическая напряженность поля	кВ·см <sup>-1</sup>	10	3,2	2,3	10,5
Работа выхода $\Phi$ ,	эВ	4,8	4,7	4,4	4,4
Контактная разность потенциала $\phi_k$	В	0,9	1,3	0,5	

Время жизни не основных носителей заряда	с	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-9}$
Тангенс угла диэлектрических потерь		$5 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-3}$	-	-
Коэффициент диффузии дырок	$\frac{\text{см}^2}{\text{с}}$	37	250	93	-
Число атомов в $1 \text{ см}^3$		$5 \cdot 10^{22}$	$4,42 \cdot 10^{22}$	$4,42 \cdot 10^{22}$	
Атомный вес		28,09	144,63	72,6	
Поле пробоя	$\text{В/см}$	$3 \cdot 10^5$	$4 \cdot 10^5$	$10^5$	$5 \cdot 10^5$
Эффективная плотность в зоне проводимости	$\text{см}^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{19}$	$4,7 \cdot 10^{19}$	$1,04 \cdot 10^{+19}$	
Эффективная плотность состояний в валентной зоне	$\text{см}^{-3}$	$1,4 \cdot 10^{19}$	$7,0 \cdot 10^{17}$	$6 \cdot 10^{18}$	
Собственное удельное сопротивление	Ом·см	$2,3 \cdot 10^5$	$10^8$	47	
Температура плавления	°С	1415	1238	937	1062
Время жизни не основных носителей заряда	с	$2 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-5}$	$3 \cdot 10^{-3}$	$1 \cdot 10^{-9}$

## Приложение Б

### Некоторые физические константы

№ п/п	Наименование	Ед. измерения	Величина
1	Заряд электрона	К	$1,602 \cdot 10^{-19}$
2	Масса электрона	кг	$9,108 \cdot 10^{-31}$
3	Отношение заряда электрона к его массе, $e/m$	К./кг	$1,76 \cdot 10^{11}$
4	Диэлектрическая проницаемость воздуха, $\epsilon_0$	$\text{Ф/м}$	$8,85 \cdot 10^{-12}$
5	Постоянная Больцмана, $k$	Дж/град	$1,38 \cdot 10^{-23}$
6	Скорость света, $c$	м/с	$3 \cdot 10^8$
7	Отношение $\sqrt{\frac{2e}{m}}$	$\sqrt{\frac{\text{К}}{\text{кг}}}$	$5,933 \cdot 10^5$
8	Магнитная проницаемость воздуха, $\mu_0$	Гн/м	$4\pi \cdot 10^{-7}$
9	Постоянная Планка, $\hbar$	Дж/с	$6,63 \cdot 10^{-34}$

10	Редуктивная постоянная Планка, $\hbar / 2\pi$	Дж/с	$1,05 \cdot 10^{-34}$
11	Электрон-Вольт	Дж	$1\text{эВ} = 1,6 \cdot 10^{-19}$

## Приложение В

### Данные по величинам функций Бесселя

X	$J_0(X)$	$J_1(X)$	$\frac{2J_1(X)}{X}$	$XJ_1(X)$
0	1,0	0	1,0	0
0,1	0,997	0,05	0,99	0,01
0,2	0,99	0,10	0,99	0,02
0,3	0,98	0,15	0,98	0,04
0,4	0,96	0,20	0,98	0,08
0,5	0,94	0,24	0,97	0,12
0,6	0,91	0,29	0,96	0,17
0,7	0,88	0,33	0,94	0,23
0,8	0,85	0,37	0,92	0,29
0,9	0,81	0,41	0,90	0,35
1,0	0,76	0,44	0,88	0,44
1,1	0,72	0,47	0,86	0,52
1,2	0,67	0,50	0,83	0,60
1,3	0,62	0,52	0,80	0,67
1,4	0,57	0,54	0,77	0,76
1,5	0,51	0,56	0,74	0,84
1,6	0,46	0,57	0,71	0,91
1,7	0,40	0,58	0,68	0,98
1,8	0,34	0,58	0,65	1,05
1,9	0,28	0,58	0,61	1,10
2,0	0,22	0,57	0,57	1,15
2,1	0,17	0,57	0,54	1,19
2,2	0,11	0,55	0,51	1,22
2,3	0,06	0,54	0,47	1,24
2,4	0,002	0,52	0,43	1,25
2,5	-0,05	0,50	0,40	1,24
2,6	-0,10	0,47	0,36	1,22
2,7	-0,14	0,44	0,31	1,20
2,8	-0,18	0,41	0,29	1,15
2,9	-0,22	0,37	0,26	1,09
3,0	-0,26	0,34	0,23	1,02
3,1	-0,29	0,30	0,19	0,93
3,2	-0,32	0,26	0,16	0,83
3,3	-0,34	0,22	0,13	0,73
3,4	-0,36	0,18	0,10	0,61
3,5	-0,38	0,14	0,08	0,48
3,6	-0,39	0,10	0,05	0,35
3,7	0,40	0,01	0,01	0,05
3,8	0,403	0,00	0,00	0,00

## Приложение Г

Параметры $\epsilon_r$ , $\text{tg}\delta$ и теплоемкости $\gamma$ некоторых диэлектриков							
№	Материал	$f = 3 \cdot 10^8$		$f = 3 \cdot 10^9$		$\gamma, \frac{\text{кал}}{\text{г} \cdot \text{град}}$	Т, °С
		$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta$	$\epsilon_r$	$\text{tg}\delta$		
1	Мясо сырое постное	50	0,78	40	0,3	0,58	25
2	Мясо сырое жирное	—	—	33	0,32	0,65	4,4
3	Мясо сухое	2	0,02	2	0,02	0,3	25
4	Жир	2,5	0,12	$2 \cdot 10^{-4}$	0,07	0,43	25
5	Вода	77,5	0,016	76,7	0,157	1	25
6	Мышечная ткань	49 – 52	$1,6 \cdot 10^{-3}$	45 – 48	$2,96 \cdot 10^{-3}$	0,4	25
7	Печень	—	—	37	$3 \cdot 10^{-3}$	0,58	25
8	Растит. жир	2,2	40	2,2	50		20
9	Сахар песок	2,9	4,5	4,5	7,6	-	-
10	Мясо натур.	40	330	30	370		
11	NaCl	5,9	$2 \cdot 10^{-4}$	—	—	0,22	—
12	Тефлон	2,0	$2 \cdot 10^{-4}$	2,04	$2,8 \cdot 10^{-4}$	0,1	25
13	Стекло	5 – 7	0,01-0,02	5,2	0,01	0,2	20
14	Лед	3,17	0,7	3,17	0,7	0,43	-1
15	Фарфор	5,8	0,0115	5,7	0,014	0,2	20

**Темы рефератов для презентаций**  
(примерные, тип прибора оговаривается при выборе темы).

1. Требования электроники к расчету параметров и геометрии резонаторов для приборов миллиметрового диапазона. Примеры конструкций.
2. Оптимизация выходных (электронных) параметров для конкретного микроволнового прибора по заданным параметрам режима для приборов миллиметрового диапазона.
3. Требования электроники к расчету геометрии и основных параметров замедляющей системы для конкретного прибора миллиметрового диапазона. Примеры конструкций.
4. Особенности оптоэлектронных систем многолучевых многорезонаторных пролетных клистронов.
5. Многолучевые многорезонаторные пролетные клистроны (особенности устройства и принципа действия), достоинства и недостатки.
6. Многофункциональных ЛБВ типа О или ЛОВ типа О. Особенности конструкций, характеристик и параметров.
7. Требования электроники к расчету и расчет магнетрона или любого прибора типа М (ЛБВМ, ЛОВМ, платинотрона).
8. Требования электроники к расчету и расчет генератора на диоде Ганна или диоде ЛПД для сантиметрового диапазона волн.
9. Расчет СВЧ устройства на полосковых линиях, использующих **pin** диоды, или детекторные диоды.
10. Особенности компьютерных программ расчета параметров или конструкций приборов миллиметрового диапазона.
11. Разработка компьютерных программ для лабораторных исследований характеристик микроволновых приборов или СВЧ устройств.

## **Методические указания по написанию и оформлению рефератов**

1. Указанные темы являются примерными. По желанию студентов, они сами могут предложить тему, исходя из того, что она должна иметь отношение к современным проблемам или достижениям в области физики микроволновых приборов, разработки элементов или устройств конкретного прибора, создании схем преобразования для СВЧ диапазона.
2. Реферат представляет собой краткий аналитический обзор по избранной тематике, он является авторской работой. Слепое копирование работ из Интернета без их творческой переработки не будет оцениваться положительно.
3. На объем реферата не накладывается каких-либо требований. Не нужно стремиться к его раздуванию, не нужно забывать, что это творческая работа, и что краткость – сестра таланта.
4. В реферате обязателен список источников, по которым выполнен анализ вопроса. Обязательны и ссылки на цитируемые источники в тексте реферата. Число цитируемых источников не может быть менее трех.
5. При заимствовании рисунков и иллюстраций из анализируемых литературных источников обязательна ссылка на эти источники в подрисуночных подписях.
6. Помните, что основной Вашей задачей является осмысление проблемы и понимание ее сути и путей решения. Глубина этого понимания будет выясняться в устной беседе или в Вашем докладе по теме реферата в процессе его защиты.



**Учебное издание**

**Соколова Жанна Моисеевна**

# **Микроволновые приборы и устройства**

Учебно-методическое пособие по организации  
самостоятельной работы студентов  
специальности 210105  
«Электронные приборы и устройства»

Формат 60x84 1/16. Усл. печ. л.-----.

Тираж 30 экз. Заказ-----.

Отпечатано в Томском государственном университете  
систем управления и радиоэлектроники.  
634050, Томск, пр. Ленина, 40. Тел. (3822) 533018.