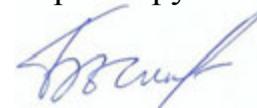


АКЦИОНЕРНОЕ ОБЩЕСТВО  
«НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОЕ ПРЕДПРИЯТИЕ  
«ИСТОК» ИМЕНИ А.И.ШОКИНА»

На правах рукописи



УДК: 621.385.69

БЫКОВСКИЙ СЕРГЕЙ ВАСИЛЬЕВИЧ

**ЦИКЛОТРОННЫЕ ЗАЩИТНЫЕ УСТРОЙСТВА  
ПРИЕМНИКОВ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ СИСТЕМ  
СВЕРХВЫСОКОЧАСТОТНОГО ДИАПАЗОНА**

Специальность 2.2.1

«Вакуумная и плазменная электроника»

Диссертация на соискание ученой степени  
доктора технических наук

Фрязино 2021

## ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ .....	6
Циклотронные защитные устройства в вакуумной СВЧ электронике ...	14
Глава 1. ОБЗОР ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИЕМНИКОВ РЛС ....	20
§ 1.1 Типы и основные параметры защитных устройств .....	20
§ 1.2 Газоразрядные защитные устройства .....	22
§ 1.3 Полупроводниковые защитные устройства .....	25
§ 1.4 Ферритовые защитные устройства .....	27
§ 1.5 Электронно-разрядные защитные устройства .....	28
§ 1.6 Гибридные защитные устройства .....	29
§ 1.7 Заключение .....	30
Глава 2. ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЦИКЛОТРОННОГО ЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА .....	33
§ 2.1 Введение. Режимы работы ЦЗУ .....	33
§ 2.2 Поперечные волны в электронном луче .....	38
§ 2.3 Режим пропускания сигнала .....	45
2.3.1 Рабочая полоса частот .....	45
2.3.2 Частотная избирательность .....	57
2.3.3 Ослабление сигнала и коэффициент шума .....	61
1) Ослабление сигнала вследствие активных потерь и отражений во входном и выходном СВЧ трактах - резонаторах, линиях связи и вакуумных окнах ЦЗУ .....	63
2) Остаточная шумовая энергия в сигнальной БЦВ .....	65
3) Разброс скоростей электронов луча .....	69
4) Оценка минимальной шумовой температуры ЦЗУ .....	71
5) Влияние поля пространственного заряда луча .....	74
6) Влияние некоторых конструктивно-технологических факторов ..	76

2.3.4 Устойчивость электронного луча в ЦЗУ .....	78
§ 2.4 Режим защиты ЦЗУ .....	79
2.4.1 Принципы работы ЦЗУ в режиме защиты .....	80
2.4.2 Ослабление входной СВЧ мощности .....	81
§ 2.5 Заключение .....	83
Глава 3. РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЗУ .....	87
§ 3.1 Вакуумный блок ЦЗУ .....	87
§ 3.2 Коэффициент шума ЦЗУ .....	89
3.2.1 Влияние рассеянных электронов на коэффициент шума .....	89
1) Диаметр вращательных колебаний рассеянных электронов .....	90
2) Частота колебаний рассеянных электронов .....	92
3) Экспериментальные результаты .....	95
3.2.2 Влияние на коэффициент шума вторичных электронов из области коллектора .....	98
3.2.3 Сдвиг частоты нагруженного резонатора .....	102
3.2.4 Заключение .....	104
§ 3.3 Амплитудная линейность ЦЗУ и переход в режим защиты .....	105
3.3.1 Аналитическая оценка границы линейности и параметров перехода ЦЗУ в режим защиты .....	107
3.3.2 Экспериментальные результаты .....	109
1) ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц .....	109
2) ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц .....	112
3) ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц с увеличенной полосой рабочих частот .....	114
3.3.3 Заключение .....	117
§ 3.4 Временные параметры включения и выключения режима защиты ЦЗУ .....	118
3.4.1 Включение режима защиты .....	118
3.4.2 Время восстановления параметров .....	119
3.4.3 Экспериментальные данные .....	125
1) Форма импульса на выходе ЦЗУ .....	125

2) Отраженная мощность и время затухания колебаний .....	127
3) Время восстановления .....	129
4) Влияние длительности заднего фронта (среза) мощного входного импульса .....	134
3.4.4 Заключение .....	135
§ 3.5 Фазовая линейность ЦЗУ в полосе рабочих частот .....	136
§ 3.6 Параметры электромагнитной совместимости ЦЗУ .....	138
3.6.1 Подавление побочных каналов приема .....	138
3.6.2 Интермодуляционные продукты .....	141
3.6.3 Блокирование сигнала помехой .....	143
3.6.4 Заключение .....	145
§ 3.7 Амплитудные и фазовые шумы .....	145
Глава 4. ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЦЗУ .....	150
§ 4.1 Магнитная система ЦЗУ .....	150
§ 4.2 Входной тракт с повышенной устойчивостью к СВЧ мощности ..	154
§ 4.3 Электронный зазор в резонаторах ЦЗУ .....	158
§ 4.4 Электронная пушка ЦЗУ .....	162
§ 4.5 Управляемая фазосдвигающая секция в ЦЗУ .....	170
Глава 5. ПРИМЕНЕНИЕ ЦЗУ В АППАРАТУРЕ ПРИЕМНИКОВ РЛС	173
§ 5.1 СВЧ тракт на входе ЦЗУ .....	173
§ 5.2 Комплексированное устройство на базе ЦЗУ .....	174
5.2.1 Малошумящий транзисторный усилитель .....	177
5.2.2 Блок режимов .....	179
5.2.3 Источник вторичного электропитания .....	180
5.2.4 Фильтры пульсаций питающих напряжений .....	181
5.2.5 ЦЗКУ .....	182
<b>ЗАКЛЮЧЕНИЕ</b>	
Основные выводы по работе .....	184
Задачи совершенствования ЦЗУ .....	189
Список сокращений .....	192

Список условных обозначений .....	193
Список литературы .....	196
Приложение 1. Уравнения поперечных волн электронного луча .....	213
Приложение 2. Реактивная проводимость резонансного контура .....	218
Приложение 3. Шумовой вклад пассивного четырехполюсника, находящегося при повышенной температуре .....	219
Приложение 4. Список печатных работ соискателя .....	221

## ВВЕДЕНИЕ

Защитные устройства (ЗУ) приемников радиолокационных систем (РЛС) предназначены для предохранения входных высокочувствительных усилительных каскадов приемников от выхода из строя при воздействии сверхвысокочастотной (СВЧ) мощности высокого уровня, которая может поступать на вход приемника РЛС как от своего передатчика, так и через антенну от внешних посторонних источников излучений. ЗУ является первым входным каскадом приемника.

В настоящей работе рассматриваются автономные ЗУ, т.е. устройства, которые переходят из режима пропускания сигнала в режим защиты и обратно без управляющего сигнала, в зависимости от уровня поступающей на вход СВЧ мощности. Обеспечить надежную защиту приемников РЛС от внешних источников СВЧ мощности, а, следовательно, от средств радиоэлектронного подавления способны лишь устройства подобного типа.

Существуют различные типы ЗУ приемников РЛС, обзорная информация по ним приведена в главе 1. Основные недостатки существующих ЗУ – это значительный пик просачивающейся на выход СВЧ мощности, обусловленный некоторой задержкой (временем срабатывания) перехода устройства из режима пропускания сигнала в режим защиты. Несмотря на малую длительность пик просачивающейся мощности может приводить к выходу из строя последующих каскадов приемника. Другой недостаток связан с недостаточно малым временем восстановления ЗУ при переходе его из режима защиты в режим пропускания сигнала.

Настоящая работа посвящена циклотронным защитным устройствам (ЦЗУ). Наиболее часто ЦЗУ применяются в аппаратуре приемников РЛС в составе циклотронно-защищенных комплексированных усилителей (ЦЗКУ), при этом ЦЗУ является определяющим элементом ЦЗКУ.

## Актуальность работы

Тенденции в развитии современных радиолокационных систем смещаются в сторону использования различных типов зондирующих импульсов со сложным фазовым и частотным наполнением, в том числе квазинепрерывных, с уровнями мощности, как правило, не более нескольких десятков киловатт. При этом обеспечение дальности действия РЛС, распознавание целей на фоне побочных отраженных излучений, определение параметров целей решаются за счет специальной обработки принимаемых отраженных сигналов, повышения чувствительности приемников, обеспечения максимальной линейности их входных каскадов.

Для решения подобных задач, помимо общей устойчивости защитных устройств к входной мощности, становятся исключительно важными такие параметры как сверхмалое время восстановления, отсутствие пиков просачивающейся мощности, высокий уровень границы амплитудной линейности, высокая фазовая линейность. По перечисленным параметрам циклотронные защитные устройства (ЦЗУ) выгодно отличаются от других типов защитных устройств.

Одно из наиболее ценных качеств ЦЗУ – сверхмалое время восстановления параметров после окончания импульса входной СВЧ мощности, данный параметр составляет не более 10...30 нс. Это позволяет организовать работу РЛС с малой длительностью и малой скважностью передаваемых импульсов, в квазинепрерывном режиме, что соответствует требованиям разработчиков современных РЛС.

Еще одно важное свойство ЦЗУ – высокое качество защиты последующих каскадов, которое выражается в отсутствии пиков просачивающейся мощности. В совокупности с верхней границей линейности ЦЗУ на уровне 1...5 мВт и переходом в режим защиты при увеличении входной мощности еще на 3...5 дБ, ЦЗУ обеспечивают надежную и качественную защиту последующих

полупроводниковых каскадов, использующих в том числе малошумящие НЕМТ-транзисторы.

ЦЗУ помимо прочего выполняет функцию частотного преселектора, ослабляя побочные каналы приема в приемных устройствах РЛС.

В диапазонах частот от 2 ГГц до 15 ГГц ЦЗУ допускают работу с входной импульсной мощностью до 10 кВт при средней мощности до 250...300 Вт без принятия мер по принудительному охлаждению устройства. В диапазоне частот 2...3 ГГц – до 50 кВт импульсной мощности при жидкостном охлаждении и до 200 кВт импульсной мощности при работе с короткими импульсами.

Циклотронные защитные устройства по совокупности основных электрических параметров превосходят существующие в настоящее время защитные устройства других типов.

По указанным причинам на сегодняшний день ЦЗУ нашли широкое применение в приемниках РЛС современных систем различного назначения, а также в разрабатываемых и проектируемых в настоящее время комплексах. При этом существует настоятельный запрос со стороны разработчиков РЛС на дальнейшее совершенствование и модернизацию ЦЗУ.

Таким образом, создание циклотронных защитных устройств представляет собой важное научное, техническое и технологическое решение, внедрение которого в практическую аппаратуру вносит значительный вклад в развитие радиолокационной техники специального назначения, в обеспечение оборонного потенциала страны.

Данный тезис позволяет утверждать, что разработка и исследование ЦЗУ (включая ЦЗКУ) являются актуальной задачей.

### **Цель работы**

Целью диссертационной работы является создание нового типа электронно-лучевых малошумящих СВЧ приборов О-типа с поперечным взаимодействием – циклотронных защитных устройств.

Для достижения поставленной цели в ходе работы необходимо было решить следующие **основные задачи**:

- 1) Исследовать и проанализировать принципы работы ЦЗУ, выявить физические основы, обуславливающие преимущества ЦЗУ перед другими типами устройств аналогичного назначения, специфические особенности устройств.
- 2) Разработать и исследовать серию циклотронных защитных устройств в диапазоне частот от 2 ГГц до 15 ГГц.
- 3) Найти оптимальные конструктивные решения для ЦЗУ в зависимости от особенностей их параметров и применения.
- 4) Содействовать внедрению ЦЗУ и комплексированных усилителей на их основе (ЦЗКУ) в модернизируемые и вновь разрабатываемые РЛС, освоению серийного производства ЦЗУ / ЦЗКУ.
- 5) Рассмотреть и предложить основные перспективные направления дальнейшего развития ЦЗУ.

**Объектом исследования** в настоящей работе является новый представитель класса электронно-лучевых малошумящих СВЧ приборов О-типа с поперечным взаимодействием, работа которых основана на возбуждении быстрой циклотронной волны (БЦВ) электронного луча. Представителем данного класса приборов на раннем этапе развития являлся электронно-лучевой параметрический усилитель (ЭПУ), затем – электростатический усилитель (ЭСУ), в настоящее время – ЦЗУ. Релятивистские эффекты для данного класса приборов пренебрежимо малы.

**Предмет исследования** – физические принципы работы ЦЗУ, конструктивно-технологические решения, комплекс электрических параметров, специфика использования устройства в аппаратуре приемников РЛС.

**Методы исследования.** При выполнении работы использованы следующие методы: аналитическое рассмотрение принципов преобразования и взаимодействия поперечных волн электронного луча с резонаторными

структурами, применение компьютерных пакетов программ 3D моделирования высокочастотных структур, использование радиоизмерительного оборудования и стандартных методик для исследования электрических параметров ЦЗУ. Определяющим явился опыт разработки приборов типа ЭСУ и ЦЗУ.

**Достоверность и обоснованность** полученных результатов достигалась использованием апробированных физических аналитических моделей, применением общепризнанных пакетов программ моделирования, измерением электрических параметров разработанных и изготовленных образцов ЦЗУ, в том числе в составе приемников РЛС, подтверждалась опытом их эксплуатации.

### **Научная новизна**

Научная новизна данной работы обусловлена тем, что направление ЦЗУ – это оригинальное направление в вакуумной электронике СВЧ, существующее и развивающееся на единственном предприятии в России и в мире – АО НПП «Исток» им. Шокина». Исследование, анализ и обоснование комплекса параметров и характеристик ЦЗУ, их взаимосвязь и зависимость от конструктивно-технологических особенностей, а также разработка и внедрение в аппаратуру потребителей серии ЦЗУ (ЦЗКУ) в диапазоне частот от 2 ГГц до 15 ГГц, – все это подтверждает состоятельность ЦЗУ, как научно-технического направления в вакуумной СВЧ электронике, содержит несомненную научную новизну.

### **Практическая значимость и внедрение результатов работы**

Практическая значимость настоящей работы связана прежде всего с широким внедрением разработанных ЦЗУ и ЦЗКУ в ряд современных радиолокационных систем наземного, морского, авиационного, а также космического базирования.

За двадцать лет было разработано 20 типов ЦЗКУ и 4 типа ЦЗУ, из которых 18 типов устройств в настоящее время производятся серийно. Несколько новых ЦЗКУ находятся на этапе внедрения в РЛС, разработка которых не завершена.

Разработанные устройства поставляются двенадцати предприятиям радиотехнического и радиолокационного профиля. Выполнены три экспортных контракта по разработке ЦЗКУ и приемника РЛС с использованием ЦЗУ.

Всего было выпущено за 20 лет более 5 тысяч ЦЗКУ, а также более 3,5 тысяч ЦЗУ.

### **Положения, выносимые на защиту**

1) Разработана и реализована концепция циклотронных защитных устройств приемников РЛС СВЧ диапазона, по комплексу основных электрических параметров превосходящих отечественные и зарубежные аналоги.

Содержание концепции изложено в виде основных выводов по работе, приведенных в Заключение.

2) В ЦЗУ принципиально отсутствует пик просачивающейся на выход СВЧ мощности, характерный для других типов ЗУ, что обусловлено конструктивным разделением входной и выходной ВЧ линий устройства, связь между которыми осуществляется через электронный луч в пределах его энергетической емкости.

3) Время восстановления ЦЗУ определяется преимущественно добротностью входного резонатора и рабочей частотой и в диапазоне длин волн 3 см составляет приблизительно 10 нс.

4) Линейность амплитудной характеристики ЦЗУ в режиме передачи сигнала нарушается лишь за счет оседания электронов луча на стенках пролетного канала, при этом верхняя граница линейности амплитудной характеристики ЦЗУ диапазона длин волн 3 см по уровню компрессии коэффициента передачи 1 дБ составляет 1...5 мВт по входной мощности.

5) Образование шумового пика в ЦЗУ связано с увеличением в луче количества рассеянных электронов, при этом сам факт появления шумового пика и частота, на которой он фиксируется, зависят от следующих факторов: диапазона рабочих частот, величины зазора резонатора, потенциала дрейфа луча, плотности пространственного заряда луча.

б) Увеличение электронной нагрузки резонаторов ЦЗУ и, соответственно, расширение рабочей полосы частот устройства может быть достигнуто посредством приближения стенок пролетного канала к электронному лучу за счет выполнения электронного зазора в паре резонаторов (входном и выходном) совместно, обеспечивая при изготовлении непрерывность поворота зазора на всей длине пространства взаимодействия согласно с поворотом «ленты» электронного луча в зазоре (патент на изобретение [116]).

### **Апробация результатов работы**

Результаты работы докладывались на конференциях разного уровня:

- Всероссийских конференциях «СВЧ-электроника», г. Фрязино Московской обл., АО «НПП «Исток» им. Шокина» – в 2003 г., 2013 г.; «Расплетинские чтения», г. Москва, ПАО «НПО «Алмаз» им. академика А.А. Расплетина» – в 2017 г.
- Международной Крымской конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», г. Севастополь – в 2001 г. (2 доклада), 2003 г., 2005 г., 2014 г. (2 доклада), 2015 г., 2020 г.
- IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC – в 2001 г., 2006 г., 2009 г., 2011 г.

## **Публикации**

Результаты исследований по теме диссертации изложены в 10 работах, опубликованных в журналах и сборниках, индексируемых в международных базах данных, в 17 статьях в журналах из списка ВАК для защиты кандидатских и докторских диссертаций, в 13 работах, опубликованных в других научных изданиях. Получено 7 патентов РФ на изобретения и 1 патент РФ на полезную модель.

Список печатных работ соискателя приведен в Приложении 4.

Автор считает своим приятным долгом выразить благодарность сотрудникам отдела, в котором проводились работы по тематике ЦЗУ / ЦЗКУ, без их активного и творческого участия данная диссертационная работа была бы невозможна.

Автор выражает искреннюю признательность своему учителю и коллеге Юрию Афанасьевичу Будзинскому за полезные обсуждения проектов и результатов работ, поддержку и многолетнее сотрудничество.

## **Циклотронные защитные устройства в вакуумной СВЧ электронике**

Циклотронные защитные устройства (ЦЗУ) сверхвысоких частот – оригинальное направление в вакуумной электронике СВЧ, которое существует и развивается на единственном предприятии в России и в мире – АО «НПП «Исток» имени А.И. Шокина».

В основе работы ЦЗУ лежит поперечное взаимодействие электронного луча, распространяющегося в продольном однородном магнитном поле, с резонаторной электродинамической системой на частотах, близких к частоте циклотронного резонанса. В процессе такого взаимодействия происходит возбуждение в луче одного из видов поперечных волн, которые могут существовать в электронном луче, – быстрой циклотронной волны (БЦВ).

Одной из первых теоретических работ в области взаимодействия электронного луча с поперечным СВЧ электрическим полем в продольном однородном магнитном поле можно считать работу [1]. Существенный вклад в развитие теории резонаторов, обеспечивающих подобного рода взаимодействие, был сделан Луисом Куччия (С.Л. Cuccia), имя которого закрепилось в литературе за резонатором с протяженным емкостным зазором, обеспечивающим взаимодействие с БЦВ электронного луча [2-5]. Важный вклад в теорию резонаторов Куччия был также сделан Владимиром Дубравцем (V. Dubravec) [6-7].

Целью исследований поперечного взаимодействия электродинамических систем с электронным лучом, проводившихся в 50-е – 60-е годы двадцатого века, было создание малозумящего СВЧ усилителя. С использованием резонаторов Куччия в качестве входного и выходного устройств связи с электронным лучом был создан малозумящий СВЧ электронно-лучевой параметрический усилитель (ЭПУ), также известный как лампа Адлера. Этот прибор и присущие ему процессы взаимодействия электродинамических систем с электронным лучом были крайне подробно и всесторонне изучены многими авторами [8-18]. ЭПУ

серийно выпускался в США и в СССР, этот прибор, в определенной мере, является ранним предшественником ЦЗУ.

В основу работы ЭПУ был положен принцип параметрического усиления, позволявший достигнуть низкого коэффициента шума: для усиления сигнала использовался посторонний источник энергии (накачки), не связанный с кинетической энергией электронного луча, переносящего шумовую энергию. Кроме этого, привнесение энергии накачки в электронный луч обуславливало использование быстрой волны для передачи и усиления сигнала – БЦВ электронного луча. Это позволило осуществить предварительное «охлаждение» волны – удаление из нее шумовой мощности в пассивном устройстве связи с электронным лучом. В ЭПУ были получены рекордно низкие для своего времени коэффициенты шума, на уровне 1...1,5 дБ [10,12,18].

Однако ЭПУ имели и ряд существенных недостатков. Прежде всего это необходимость использования для работы ЭПУ источника СВЧ мощности накачки на удвоенной частоте относительно рабочей частоты прибора («вырожденный» вариант ЭПУ). Помимо этого, использование накачки на удвоенной частоте сигнала приводило к тому, что разностная частота  $f_{\text{разн}}$  ( $f_{\text{разн}} = f_n - f_{\text{сигн}} \approx 2f_{\text{сигн}} - f_{\text{сигн}} = f_{\text{сигн}}$ , где  $f_n$  – частота накачки,  $f_{\text{сигн}}$  – частота сигнала) попадала в рабочую полосу частот ЭПУ. Это приводило к ухудшению коэффициента шума ЭПУ за счет шумов, поступающих в электронный луч от источника сигнала на разностной частоте. Кроме этого, в тракте усилителя промежуточной частоты могли возникать биения между сигнальной и разностной компонентами колебаний, приводящие к искажению формы принимаемого сигнала [12,19].

Еще одним недостатком ЭПУ можно считать конструктивную особенность его резонатора накачки, который должен создавать квадрупольную структуру высокочастотного электрического поля. С подобным полем может органично взаимодействовать электронный луч круглого поперечного сечения. Однако при круглом электронном луче рабочая полоса частот входного и выходного

резонаторов связи (резонаторов Куччия) оказывается весьма ограниченной по сравнению с использованием ленточного электронного луча, допускающего существенно меньший зазор между ламелями резонатора связи.

Следующим этапом развития малошумящих усилителей на БЦВ стало создание электростатического усилителя (ЭСУ). Для усиления сигнала в ЭСУ не требовалась высокочастотная накачка, усиление происходило при взаимодействии электронов с поперечными компонентами пространственно-периодического электростатического поля, создаваемого специальной усилительной структурой. При этом скорость движения электронов луча должна быть установлена такой, чтобы имел место синхронизм циклотронных колебаний электронов с пространственным периодом электростатического поля [20-23,12]. ЭСУ несколько проигрывали ЭПУ по коэффициенту шума, но существенно превосходили их по величине рабочей полосы частот, вследствие использования ленточного электронного луча, и по удобству работы, т.к. не требовали дополнительного источника СВЧ мощности накачки. В качестве усилительной структуры в серийных российских ЭСУ использовалась плоско-симметричная структура типа «гребёнка».

Для ЭСУ характерен ряд специфических недостатков. Прежде всего – использование для усиления сигнала продольной энергии луча. Торможение луча в процессе усиления сигнала с точки зрения межволнового взаимодействия означает возникновение связи сигнальной БЦВ с медленной циклотронной волной (МЦВ). То есть, в процессе усиления БЦВ также возрастает амплитуда МЦВ, при этом шумы МЦВ могут поступать в сигнал, что приводит к увеличению коэффициента шума ЭСУ [12].

Шум медленной волны (в данном случае МЦВ) не может быть удален из луча при взаимодействии с пассивным устройством связи (резонатором, согласованным с внешней нагрузкой). Поэтому в ЭСУ для получения низкого уровня собственных шумов принципиально важно использовать снижение шумовой энергии поперечных колебаний (МЦВ и БЦВ) в спадающем магнитном поле – катод помещается в магнитное поле с повышенным уровнем, которое

затем адиабатически снижается до уровня циклотронного резонанса в области взаимодействия [24-27].

В связи с тем, что в ЭСУ в процессе усиления (в том числе и усиления тепловых колебаний электронов) происходит торможение электронного луча, для сохранения синхронизма с пространственно-периодическим электростатическим полем и поддержания низкого коэффициента шума целесообразно ограничить коэффициент усиления уровнем 13...15 дБ. Появление в 1970-х – 1980-х годах мал шумящих транзисторных усилителей (МШУ) привело к логичному объединению в едином устройстве ЭСУ и МШУ – появлению электростатических комбинированных усилителей (ЭСКУ). ЭСКУ в значительной степени отвечали требованиям разработчиков радиолокационных систем [23].

В ходе разносторонних и многочисленных исследований и разработок ЭПУ и ЭСУ в нашей стране и за рубежом были рассмотрены и изучены многие варианты и особенности приборов данного класса: различные типы устройств связи с электронным лучом, различные конструкции электростатических усилительных структур, электронных пушек и магнитных систем. Было в значительной степени теоретически и, отчасти, экспериментально изучено влияние уровня вакуума, продольного и поперечного разброса скоростей электронов, профиля магнитного поля и других особенностей конструкций на параметры приборов [28-38].

В СССР и в России теоретические исследования проводились на физическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова [39], в Саратовском университете, в Киевском политехническом институте. Научные исследования, совмещенные с разработкой практических конструкций, приведшие в результате к серийному производству ЭПУ и ЭСУ, были осуществлены в НПО «Исток» под руководством С.П. Кантюка и Ю.А. Будзинского. Впервые была создана магнитная система для ЭСУ 3-х сантиметрового диапазона длин волн на постоянных магнитах (разработчик – Ю.А. Будзинский, НПО «Исток») в отличие от всех предыдущих магнитных систем, основой которых являлся

соленоид. Появление магнитной системы для ЭСУ и ЭСКУ на постоянных магнитах сразу же существенно расширило применение приборов в радиолокационных системах.

В 1990-х годах ЭСУ и ЭСКУ не смогли далее конкурировать по коэффициенту шума с малошумящими транзисторными усилителями. Класс малошумящих приборов на циклотронном резонансе пережил очередное качественное превращение – в циклотронные защитные устройства (ЦЗУ). На первый план вышли исключительные защитные свойства прибора, необходимые для достижения требуемых параметров современных радиолокационных систем [40-42].

К ЦЗУ в рамках единого комплексированного устройства были добавлены малошумящий транзисторный усилитель, схемы стабилизации питающих напряжений и токов ЦЗУ и МШУ, цепи управления и переключения режимов, источник вторичного электропитания. Данная комбинация устройств, в полном или частичном варианте, но, как минимум, в составе ЦЗУ и МШУ, получила название циклотронно-защищенный комплексированный усилитель (ЦЗКУ) [43-46].

ЦЗКУ имеет ряд важных преимуществ перед ЭСКУ: коэффициент шума ниже приблизительно на 1,5...2 дБ; рабочая полоса частот может быть увеличена в 1,5...2 раза и более (при использовании дополнительных связанных контуров во входном и выходном трактах); меньше габаритные размеры и масса (масса снижена приблизительно в 2 раза вследствие сокращения длины магнитного зазора в магнитной системе; типичная масса ЦЗКУ – 1,5...2 кг); ниже уровень амплитудно-фазовых шумов; увеличена в два раза минимальная наработка (с 1000 ч до 2000 ч), существенно понижен уровень требований к источникам электропитания и повышена безотказность.

ЦЗКУ оказался технически привлекательным устройством для разработчиков радиолокационной аппаратуры. Техническое задание на разработку первого ЦЗКУ было утверждено в 1997 году, поставки первых опытных образцов были выполнены в 1999 году.

Приблизительно за двадцать лет было разработано 20 типов ЦЗКУ и 4 типа ЦЗУ абсолютное большинство из которых производится серийно. Несколько новых ЦЗКУ находятся на этапе внедрения в РЛС, разработка которых не завершена. Разработанные устройства поставляются двенадцати предприятиям радиотехнического и радиолокационного профиля. Выполнены три экспортных контракта по разработке ЦЗКУ и приемника РЛС с использованием ЦЗУ. Всего за указанное время было выпущено более 5 тысяч ЦЗКУ, а также более 3,5 тысяч ЦЗУ для приемников РЛС.

Настоящая диссертационная работа посвящена вопросам исследования и разработки циклотронных защитных устройств, как основного и определяющего элемента ЦЗКУ.

## Глава 1

# ОБЗОР ЗАЩИТНЫХ УСТРОЙСТВ ПРИЕМНИКОВ РЛС

### § 1.1 Типы и основные параметры защитных устройств

Защитные устройства (ЗУ), устанавливаемые на входе приемников РЛС, решают исключительно важную задачу – обеспечивают защиту чувствительных входных каскадов приемников от воздействия высокочастотной (ВЧ) мощности как собственного передатчика, так и мощности постороннего происхождения, поступающей на вход приемника через антенну. При этом в паузе между импульсами ЗУ должны обеспечивать пропускание слабых сигналов, отраженных от цели, с минимальным ослаблением.

Мощность собственного передатчика может попадать на вход приемника в результате отражения от антенны (практически во всех современных РЛС используется одна антенна для работы на передачу излучаемого импульса и на прием сигнала) и в результате просачивания через антенный переключатель (АП), направляющий мощность передатчика в антенну и мощность принимаемого антенной сигнала в приемник. КСВН антенны может достигать уровня 2,0 в рабочей полосе частот, из чего следует, что приблизительно до 10% мощности передатчика может отражаться от антенны и поступать на вход приемника.

В качестве АП в настоящее время, чаще всего, используется ферритовый циркулятор, обратные потери в котором составляют 15...20 дБ. Соответственно, через циркулятор из передатчика в приемник может попадать приблизительно до 3% мощности передатчика.

Защита приемника от СВЧ мощности высокого уровня постороннего происхождения необходима, например, в следующих случаях: когда против РЛС применяются средства радиоэлектронного подавления; когда по направлению работы антенны радиолокатора на малой дальности оказывается объект с высокой отражающей способностью или когда в направлении антенны действует

другая РЛС, работающая на близких частотах и удаленная на малую дистанцию (например, корабельная РЛС и РЛС пролетающего вблизи самолета, РЛС самолетов, действующих в группе).

Исторически первыми ЗУ стали газоразрядные защитные устройства – резонансные разрядники, которые на ранних этапах развития радиолокации выполняли функции АП (разрядники защиты приемника и разрядники блокировки передатчика). В настоящее время при использовании циркуляторных АП разрядники выполняют роль защиты приемника. Такого типа ЗУ могут иметь несколько газоразрядных каскадов.

С развитием полупроводниковой электроники широкое распространение получили ЗУ, работа которых основана на использовании нелинейных свойств полупроводниковых рпн-диодов. Полупроводниковые ЗУ на рпн-диодах могут быть созданы для работы в ограничительном или отражательном режиме, а также являться управляемыми или автономными. Автономные ЗУ не требуют управляющего сигнала для перехода в режим защиты и, соответственно, в режим пропускания сигнала по окончании импульса высокой мощности на входе приемника. Управляемые полупроводниковые ЗУ переключаются между режимами защиты и пропускания по специальному сигналу, синхронизированному с импульсом передатчика.

Еще один тип защитных устройств – ферритовые ЗУ ограничительного типа. Работа ферритового ЗУ основана на увеличении поглощения электромагнитного излучения при превышении амплитудой магнитной составляющей поля проходящей волны определенного порогового уровня.

ЗУ на вторично-электронном резонансе, – работа ЗУ данного типа основана на эффекте резонансной вторичной электронной эмиссии под воздействием электромагнитного поля мощного СВЧ импульса в герметизированном вакуумном отрезке волновода.

Наибольшее распространение в настоящее время получили гибридные ЗУ, представляющие собой многокаскадные устройства, в состав которых входят ЗУ с разными принципами действия. Учитывая особенности ЗУ разных типов и

оптимально комбинируя их в рамках общей конструкции удастся получить приемлемые результаты для различных применений [47-50].

Циклотронные защитные устройства (ЦЗУ), исследованию которых посвящена настоящая диссертационная работа, – относительно новый тип ЗУ, которые находят все более широкое применение в аппаратуре РЛС в последние годы. Работа ЦЗУ подробно описана в следующей главе.

Практическая ценность того или иного ЗУ определяется прежде всего его параметрами – как в режиме пропускания сигнала, так и в режиме защиты.

Основные параметры ЗУ в режиме защиты – предельно допустимая входная импульсная и средняя СВЧ мощности, просачиваемая мощность плоской части импульса на выходе ЗУ, мощность (энергия) пика по переднему фронту входного импульса на выходе ЗУ, пороговая мощность – входная мощность, при превышении которой автономное ЗУ начинает переходить из режима пропускания в режим защиты. Для резонансных разрядников также определяют мощность зажигания – мощность, при которой возникает СВЧ газовый разряд в разрядном промежутке того или иного каскада разрядника.

Основными параметрами ЗУ в режиме пропускания являются рабочая полоса частот, ослабление сигнала (коэффициент шума), время восстановления параметров после окончания импульса мощности. Важным параметром является уровень нелинейных искажений (интермодуляция) для ЗУ ограничительного типа при увеличении входной мощности до уровня, приближающегося к пороговой мощности [47].

В настоящей работе не рассматриваются ЗУ для случая РЛС с использованием активных фазированных антенных решеток.

## **§ 1.2 Газоразрядные защитные устройства**

Газоразрядное ЗУ [47,49] – резонансный разрядник – представляет собой отрезок линии передачи, содержащий один или несколько объемных резонаторов, которые при низком уровне мощности обеспечивают прохождение

сигнала с минимальными потерями в рабочей полосе частот. Данный отрезок линии передачи герметизирован полностью или конструктивно обеспечивает установку в область каждого резонатора герметизированной (обычно кварцевой) колбы. Герметизированный участок линии или колба заполнены специальным газом при требуемом давлении. При воздействии входной СВЧ мощности, превышающей пороговую (мощность зажигания), в разрядных промежутках объемных резонаторов возникает СВЧ газовый разряд, что приводит к резкому уменьшению полного сопротивления линии в области разрядных промежутков. В результате большая часть падающей СВЧ мощности отражается от разрядника, в разряднике реализуется режим защиты.

Теория газового разряда подробно разработана в работах [51-53]. В общих чертах процесс возникновения разряда можно описать следующим образом. Свободные электроны, всегда присутствующие в разрядном зазоре в некотором количестве, под действием СВЧ поля проходящей волны начинают колебаться и набирать кинетическую энергию, достаточную для ионизации молекул газа. Далее происходит лавинообразное нарастание количества свободных электронов. Устанавливается разряд, характеристики которого определяются мощностью подводимой СВЧ энергии и другими условиями, определяемыми конструкцией разрядника. Следует отметить, что для газового разряда на СВЧ характерны две особенности: во-первых, носителями разряда являются электроны, т.к. тяжелые ионы, получая значительно меньшие смещения и энергию под воздействием СВЧ поля, практически не участвуют в разряде. Во-вторых, из-за малой амплитуды колебаний электронов в СВЧ поле процессы на электродах и стенках разрядного объема играют малую роль и практически не влияют на режим разряда. СВЧ разряд в газах является преимущественно безэлектродным [53]. При этом расстояние между электродами и их профиль безусловно влияют на напряженность электрического поля, а, следовательно, и на условия возникновения разряда.

Для обеспечения газового разряда с требуемыми параметрами необходимо выполнить ряд условий по составу газа, его давлению, параметрам

электрического поля в разрядном промежутке. В большинстве случаев в газовых разрядниках используется аргон при давлении 5...50 мм рт. ст., такой выбор объясняется химической инертностью аргона и относительно низким значением энергии ионизации. Электрическое ВЧ поле, прилагаемое к разрядному промежутку, увеличивается в соответствии с добротностью резонансного объема по сравнению с полем проходящей волны в десятки и сотни раз. Это обеспечивает устойчивый разряд с высокой проводимостью. Таким образом, степень шунтирования линии передачи СВЧ разрядом (несколькими разрядами в многокаскадном ЗУ) определяет ослабление входной импульсной мощности и уровень просачивающейся на выход ЗУ мощности плоской части импульса.

Для снижения мощности (энергии) просачивающегося пика на выходе ЗУ, соответствующего переднему фронту входного импульса, и уменьшения вероятности пропусков импульсов необходимо снижать напряжение зажигания и увеличивать скорость зажигания разряда, для этого требуется повышать начальную концентрацию электронов в области разрядного промежутка. В разрядниках для повышения начальной концентрации электронов используют вспомогательный тлеющий разряд или вводят радиоактивные ионизирующие вещества в герметизированный разрядный объем [47,49].

Газоразрядные ЗУ – это достаточно сложные устройства, которые прошли долгий эволюционный путь. Данные устройства разрабатывались для конкретных систем аппаратуры с учетом специфических требований по диапазону рабочих частот, предельной входной СВЧ мощности, длительности импульса, скважности, допустимой просачивающейся мощности плоской части импульса на выходе ЗУ и минимизации пика просачивающейся мощности. Все это многообразие противоречивых параметров может быть оптимизировано и, в определенной степени, сведено к приемлемому уровню при разработке устройства. Резонансные разрядники на сегодняшний день несомненные лидеры по уровню предельной входной СВЧ мощности – допустимая импульсная мощность может достигать нескольких МВт. Многокаскадные разрядники могут

обеспечивать на выходе вполне приемлемые уровни выходной мощности, особенно в комбинации с полупроводниковыми выходными каскадами.

К недостаткам разрядников следует отнести значительный пик просачивающейся мощности (обычно составляет до 20...50 нДж по энергии и до 100...200 мВт по мощности), который может приводить к повреждению чувствительных последующих каскадов, а также значительное время восстановления, которое, как правило, не менее 1 мкс (по общепринятому уровню дополнительных потерь 3 дБ). Типичное время восстановления разрядников составляет от 5 мкс до 20 мкс и более [47,54].

### **§ 1.3 Полупроводниковые защитные устройства**

Полупроводниковые ЗУ можно считать наиболее распространенными в настоящее время, прежде всего из-за малых габаритов и удобства применения, которое объясняется единством технологии с последующими полупроводниковыми каскадами приемника. Как правило, основным элементом полупроводниковых ЗУ является высокочастотный pin-диод. ЗУ с диодами такого типа можно разделить на две группы исходя из принципа их функционирования: автономные ограничительные pin-диодные ЗУ и управляемые pin-диодные ЗУ [48,55].

Управляемые pin-диодные ЗУ могут эффективно защищать приемник от мощности собственного передатчика и должны быть синхронизированы с его импульсом по времени управляющего сигнала. В этом случае, при включении режима защиты в ЗУ с некоторым опережением относительно импульса передатчика, можно исключить пик просачивающейся мощности на выходе ЗУ и повысить надежность и качество защиты приемника. Однако, защита приемника от импульсов посторонней СВЧ мощности не будет реализована или потребует достаточно сложных дополнительных цепей включения сигнала управления.

Автономные рpn-диодные ЗУ защищают приемник от СВЧ мощности высокого уровня любого происхождения. Таким типам ЗУ обычно отдается предпочтение в аппаратуре ответственных систем.

Одно из основных схмотехнических решений для повышения уровня предельной допустимой входной мощности автономных рpn-диодных ЗУ – это использование дополнительной «подпитки» основного коммутирующего рpn-диода током, который обеспечивается при использовании дополнительного выпрямительного диода, слабо связанного с основной линией и обеспечивающего ток «подпитки» рpn-диода за счет падающей входной мощности. Это позволяет использовать более «мощный» рpn-диод с более толстой базой и увеличить его быстродействие – использовать на более высоких частотах и снизить пик просачивающейся мощности [48].

Другой путь повышения предельной мощности – использование многодиодных структур различной конструкции. Это могут быть резонансные диодные решетки и структуры с последовательно-параллельным включением диодов, расположенных как в поперечном, так и в продольном сечении волновода или коаксиальной линии [47,48,55,56]. Для повышения предельной мощности также могут быть использованы структуры на основе делителей мощности на входе ЗУ с последующим суммированием на выходе в микрополосковом исполнении [57,58].

Существует информация о разработках полупроводниковых ЗУ на рpn-диодах, которые могут работать с входными импульсными мощностями до нескольких сотен киловатт, особенно в длинноволновой части см-диапазона [47]. При этом длительность импульса составляет не более 1...2 мкс при скважности порядка 1000.

Типичные современные полупроводниковые ЗУ см-диапазона длин волн обеспечивают работу с предельной входной импульсной мощностью до 10...30 кВт при длительности импульса от 1...5 мкс до приблизительно 50 мкс, скважность от 10 до 1000, при этом с увеличением рабочей частоты и импульсной мощности длительность импульса сокращается. Просачивающаяся

мощность плоской части импульса составляет 50...150 мВт, мощность пика на выходе 100...500 мВт, время восстановления 1...5 мкс [54,59,60].

Проводятся исследования по созданию полупроводниковых ЗУ на основе полевых транзисторов и на основе диодов с барьером Шоттки, заметных практических результатов пока в этих направлениях не опубликовано [61,62]. Обширный список зарубежных работ, в том числе современных, по полупроводниковым ЗУ приведен в [63].

### **§ 1.4 Ферритовые защитные устройства**

Ферритовые ЗУ являются устройствами ограничительного типа, их работа основана на эффекте дополнительного поглощения СВЧ энергии при поперечном намагничивании (дополнительный резонанс) или продольном намагничивании (параллельная накачка) ферритового образца. Ферритовые пластины, как правило, помещают в Е-плоскость волновода и крепят к корпусу на хороший теплоотвод.

При малой входной мощности сигнал передается с незначительными потерями. При входной мощности, превышающей пороговую, в феррите проявляется дополнительное ослабление распространяющейся электромагнитной волны, приводящее к ее ограничению. Энергия СВЧ поля переходит в тепловую энергию колебаний кристаллической решетки. В достаточно мощных ЗУ тепловую энергию следует отводить за счет принудительного воздушного или жидкостного охлаждения [64,47].

Предельная мощность ферритовых ЗУ в значительной степени определяется типом и эффективностью охлаждения. Существуют ферритовые ЗУ на предельную импульсную мощность до 250 кВт, но чаще используются как устройства средней мощности – до нескольких киловатт импульсной и нескольких сотен ватт средней мощности. Для данных устройств характерен значительный уровень просачивающейся на выход мощности – как плоской части импульса (не менее нескольких Ватт), так и пика на переднем фронте

входного импульса. По этой причине ферритовые ЗУ используются преимущественно как устройства предварительной защиты или в качестве среднего каскада в многокаскадном ЗУ.

Ферритовые ЗУ отличает достаточно малое время восстановления – 50...100 нс [64].

### **§ 1.5 Электронно-разрядные защитные устройства**

Работа электронно-разрядных ЗУ основана на использовании вторично-электронного резонанса в вакууме. Данное явление возникает в том случае, когда между двумя электродами происходят колебательные движения электронов синхронно с приложенным СВЧ полем. Для нарастания количества электронов в зазоре между электродами коэффициент вторичной электронной эмиссии при бомбардировке электродов должен быть больше единицы, а время пролета электронов между электродами равняться половине периода СВЧ поля [47].

ЗУ на вторично-электронном резонансе (в американской литературе – *multipactor, multipacting protector*) представляет собой отрезок вакуумированного волновода, широкие противоположные стенки в котором сближены и покрыты материалом с высокой вторичной электронной эмиссией. При низком уровне проходящей СВЧ мощности ЗУ представляет собой полосно-пропускающий фильтр, настроенный на полосу рабочих частот. Импульс СВЧ мощности высокого уровня вызывает бомбардировку имеющимися начальными электронами стенок волновода, для обеспечения начальных электронов в ЗУ применяется электронная пушка. Далее происходит лавинообразное нарастание количества электронов, которые ускоряются электрическим полем волны и отдают эту энергию стенкам волновода при соударении с ними, выбивая при ударе вторичные электроны. Энергия превращается в тепловую и отводится системой жидкостного охлаждения. Для обеспечения работы устройства в него устанавливается ионный насос для поддержания необходимого уровня вакуума

и генератор кислорода для сохранения свойств покрытий с высокой вторичной электронной эмиссией.

Электронно-разрядное ЗУ, в отличие от ЗУ других типов, при работе с мощностью высокого уровня не отражает ее, а поглощает и преобразует в тепловую.

Электронно-разрядное ЗУ является устройством предварительной защиты. Может работать с предельной импульсной мощностью до единиц мегаватт с длинными импульсами и низкой скважностью. Типичные уровни пика просачивающейся мощности на выходе – 20 Вт, плоской части импульса – 7 Вт. Для данного устройства характерно сверхмалое время восстановления – от 10 до 50 нс.

В Советском Союзе и в России электронно-разрядные ЗУ не выпускались очевидно в связи со сложностью их технологии. В США осуществлялось серийное производство мультипакторов фирмами Hughes Aircraft Co. и CPI International, Inc. [54,47].

### **§ 1.6 Гибридные защитные устройства**

Гибридные ЗУ представляют собой оптимизированные многокаскадные варианты защитных устройств, описанных выше. Как правило, на входе используется устойчивое к высокому уровню мощности газоразрядное или ферритовое ЗУ, вторым каскадом может быть устройство с меньшим уровнем просачивающейся мощности (газоразрядное, ферритовое или полупроводниковое), последний каскад обычно полупроводниковый, обеспечивающий наилучшее качество защиты входа приемника – минимальный пик и минимальная плоская часть просачивающегося импульса.

Для минимизации потерь такого ЗУ на малом уровне мощности все каскады устройства следует рассматривать и согласовывать как единый многосвязный фильтр. При таком подходе может быть получено ослабление полезного сигнала не более 1...1,5 дБ.

Предельная мощность всего ЗУ определяется стойкостью его первого каскада. Каждый последующий каскад должен иметь пороговую мощность, согласованную с выходной мощностью предыдущего каскада. Таким образом, гибридное ЗУ представляет собой достаточно сложное устройство, требующее расчета и оптимизации, а также межкаскадного согласования.

В настоящее время чаще всего используют входной газоразрядный каскад и один-два последующих полупроводниковых каскада. Это позволяет создавать в см-диапазоне длин волн устройства с предельной мощностью до нескольких киловатт импульсной мощности, с временем восстановления приблизительно 5...10 мкс, ослаблением сигнала в режиме приема до 1,5 дБ.

В России основным производителем газоразрядных и гибридных ЗУ является предприятие АО «Светлана-Электронприбор».

Следует также отметить маломощные полупроводниковые ЗУ предприятия ЗАО «НПП «Планета-Аргалл» типа М54404, М54405 с предельной мощностью 10 Вт, максимальной просачивающейся мощностью 20...50 мВт и временем восстановления не более 50 нс [65]. ЗУ могут использоваться самостоятельно или в качестве выходного каскада гибридных устройств.

В АО «НПП «Исток» им. Шокина» для применения в приемо-передающих модулях активных фазированных антенных решеток (АФАР) разработано ЗУ в монолитно-интегральном исполнении на диодах Шоттки на основе арсенид-галлиевой технологии. Изделие разработано в двух литерках – в диапазонах частот 1...18 ГГц (входная непрерывная мощность 2 Вт, ослабление в режиме пропускания 1,3 дБ) и 18...40 ГГц (входная непрерывная мощность 1 Вт, ослабление в режиме пропускания 1,8 дБ). Максимальная просачивающаяся на выход мощность 20 мВт [66-68].

## **§ 1.7 Заключение**

Учитывая современные тенденции в области радиолокации представляется, что предельная входная импульсная мощность на уровне сотен

киловатт и более для современных ЗУ приемников РЛС становится в основном неактуальной. Прежде всего потому, что мощности выходных каскадов передатчиков РЛС на уровне в сотни киловатт и мегаватты могут быть реализованы с использованием магнетронов, амплитронов и т.п. приборов, которые не позволяют формировать импульсы со сложной внутренней структурой. В современной радиолокации все чаще используются длинные и квазинепрерывные импульсы со сложным фазовым и частотным наполнением с уровнями мощности не более нескольких десятков киловатт. При этом обеспечение дальности действия РЛС и распознавание целей на фоне побочных отраженных излучений решается за счет специальной обработки принимаемых сигналов, повышения чувствительности приемников, обеспечения максимальной линейности их входных каскадов.

В подобных условиях, помимо общей устойчивости ЗУ к входной мощности, становятся исключительно важными такие параметры как сверхмалое время восстановления, высокий уровень границы линейности, отсутствие пиков просачивающейся мощности. По перечисленным параметрам выгодно отличаются от рассмотренных выше ЗУ различных типов циклотронные защитные устройства (ЦЗУ) [69].

ЦЗУ обеспечивают время восстановления не более 10...30 нс по уровню максимальной чувствительности, при этом время восстановления снижается с увеличением рабочей частоты устройства. Столь малое время восстановления позволяет строить работу РЛС с малой скважностью передаваемых импульсов, с малым периодом следования импульсов в квазинепрерывном режиме.

Верхняя граница линейности ЦЗУ по входу составляет 0,5...5 мВт с тенденцией увеличения при росте рабочей частоты. При увеличении входной мощности на 3...5 дБ относительно верхней границы линейности ЦЗУ переходит в режим защиты с ослаблением входной мощности на 60...80 дБ и более. Подобный уровень верхней границы линейности и максимум мощности на выходе ЦЗУ хорошо согласуются с полупроводниковыми элементами входных каскадов приемников.

В ЦЗУ отсутствует пик просачивающейся мощности, что обусловлено конструктивными особенностями устройства. Это позволяет обеспечить надежную и качественную защиту последующих полупроводниковых каскадов, использующих в том числе малошумящие НЕМТ-транзисторы.

ЦЗУ стандартных конструкций допускают работу с импульсной мощностью до 10 кВт при средней мощности до 250...300 Вт без принятия мер по принудительному охлаждению устройства. При этом для ЦЗУ характерны все негативные особенности электровакуумного прибора: значительный вес (приблизительно 2 кг), габаритные размеры ( $\sim 10 \times 10 \times 10$  см<sup>3</sup>) и необходимость электропитания. Однако, благодаря весьма привлекательным электрическим параметрам ЦЗУ за последние 20 лет нашли широкое применение в различных типах современных радиолокационных систем.

Опыт разработки приемников РЛС специалистами предприятия ПАО «НПО «Алмаз» им. академика А.А. Расплетина» с использованием малошумящих усилительных и защитных устройств на циклотронном резонансе (электростатических комбинированных усилителей – ЭСКУ, ЦЗУ и циклотронно-защищенных комплексированных усилителей – ЦЗКУ) нашел отражение в работе [70].

Принципы работы и особенности конструкции ЦЗУ подробно рассмотрены в следующей главе.

## Глава 2

# ОСНОВНЫЕ ПРИНЦИПЫ РАБОТЫ ЦИКЛОТРОННОГО ЗАЩИТНОГО УСТРОЙСТВА

### § 2.1 Введение. Режимы работы ЦЗУ

Циклотронное защитное устройство (ЦЗУ) – это вакуумный электронно-лучевой прибор, в котором электронный луч движется в продольном однородном магнитном поле. Сигнальное высокочастотное электрическое поле в резонаторах связи направлено перпендикулярно к направлению движения электронного луча.

Целесообразно выделить три режима работы ЦЗУ в зависимости от уровня входной СВЧ мощности:

- **режим пропускания** сигнала – электронный луч проходит от катода до коллектора, при этом входная СВЧ мощность (сигнал) переносится лучом из входного резонатора в выходной резонатор, не нарушая прохождение луча;

- **режим защиты** – электронный луч разрушен под действием входной СВЧ мощности во входном резонаторе, передачи СВЧ энергии с входа ЦЗУ на выход посредством электронного луча не происходит;

- **переходный режим** – имеет место при переходе из режима пропускания в режим защиты ЦЗУ, для него характерны некоторые особенности по сравнению с режимом пропускания: при достижении и некотором превышении пороговой мощности краевые электроны луча начинают оседать на стенках электронного зазора, линейность прохождения сигнала в ЦЗУ нарушается.

Таким образом, ЦЗУ – это автономное защитное устройство, которое переходит в режим защиты и в режим пропускания без внешнего сигнала управления, в зависимости от уровня входной СВЧ мощности в рабочем диапазоне частот.

Работа ЦЗУ в режиме пропускания поясняется рисунком 2.1.

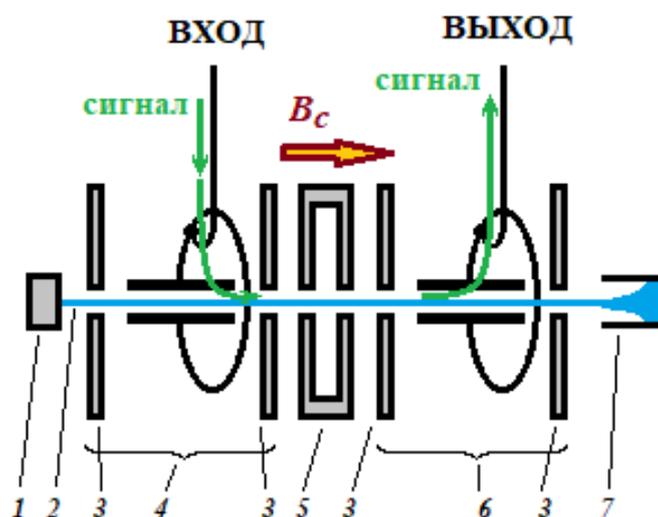


Рис. 2.1. Функциональная схема ЦЗУ в режиме пропускания. На рисунке цифрами обозначены: 1 – электронная пушка, 2 – электронный луч, 3 – диски, закрывающие входной и выходной объемные резонаторы со стороны пушки и со стороны коллектора, 4 – входной резонатор, 5 – разделительная секция, 6 – выходной резонатор, 7 – коллектор.  $B_c$  – вектор индукции продольного однородного магнитного поля, обеспечивающего циклотронный резонанс электронов на рабочей частоте.

Электронная пушка (поз.1, рис. 2.1) формирует ленточный электронный луч (поз.2), который последовательно проходит входной резонатор (поз.4), разделительную секцию (поз.5), выходной резонатор (поз.6) и оседает в коллекторе (поз.7). Входной и выходной резонаторы в плоскости, перпендикулярной оси луча, с двух сторон закрыты дисками (поз.3). Входной резонатор, разделительная секция и выходной резонатор составляют электродинамическую систему ЦЗУ.

Электродинамическая система ЦЗУ помещается в однородное продольное магнитное поле, формируемое магнитной системой на постоянных магнитах. Уровень индукции магнитного поля обеспечивает циклотронный резонанс электронов на средней частоте рабочего диапазона частот ЦЗУ  $f_0 = \omega_c / 2\pi$ :

$$\omega_c = \frac{e}{m} B_0 = \eta B_0, \quad (2.1)$$

где  $\omega_c$  – круговая циклотронная частота,  $e$  – заряд электрона,  $m$  – масса электрона,  $\eta$  – отношение заряда электрона к его массе,  $B_0$  – индукция продольного однородного магнитного поля, обеспечивающего циклотронный резонанс на средней частоте рабочего диапазона частот ЦЗУ.

Электронная пушка формирует луч с током, оптимизированным для обеспечения полной нагрузки резонаторов. Ток луча обычно составляет от 100 до 250 мкА с потенциалом дрейфа 12...25 В. Ленточная форма луча позволяет минимизировать поперечную величину зазора между ламелями входного и выходного резонаторов и, тем самым, увеличить электронную нагрузку резонаторов.

При работе ЦЗУ в режиме пропускания во входном резонаторе за счет энергии сигнала в луче возбуждается быстрая циклотронная волна (БЦВ). Сигнал в форме БЦВ переносится лучом в выходной резонатор, где выводится из луча и передается на выход ЦЗУ. Передача сигнала линейна до уровня входной мощности  $\sim 1 \dots 5$  мВт, при которой начинается оседание электронов на стенках электронного зазора вследствие увеличения амплитуды поперечных колебаний электронов.

Поскольку работа устройства основана на взаимодействии с быстрой волной электронного луча, это позволяет удалять тепловые шумы из сигнальной волны в пассивном (входном) устройстве связи одновременно с введением сигнальной мощности в БЦВ. Поперечные шумовые колебания электронов также могут быть ослаблены при прохождении луча через участок с адиабатически снижающимся продольным магнитным полем. Подобные меры позволяют достигать достаточно низкого собственного коэффициента шума ЦЗУ – на уровне 0,7...1,2 дБ.

Работа ЦЗУ в режиме защиты поясняется рисунком 2.2.

В режиме защиты, когда входная мощность ЦЗУ существенно превышает пороговый уровень, электронный луч на входе во входной резонатор разрушается под действием входной мощности, оседая на диске, закрывающем

входной резонатор со стороны пушки, и на ламелях на входе в зазор входного резонатора (см. рис. 2.2). При отсутствии электронного луча входной резонатор оказывается рассогласованным с входной линией, при этом до 90% падающей СВЧ мощности отражается от входного резонатора ЦЗУ. Оставшаяся мощность рассеивается в виде тепла во входном тракте ЦЗУ.

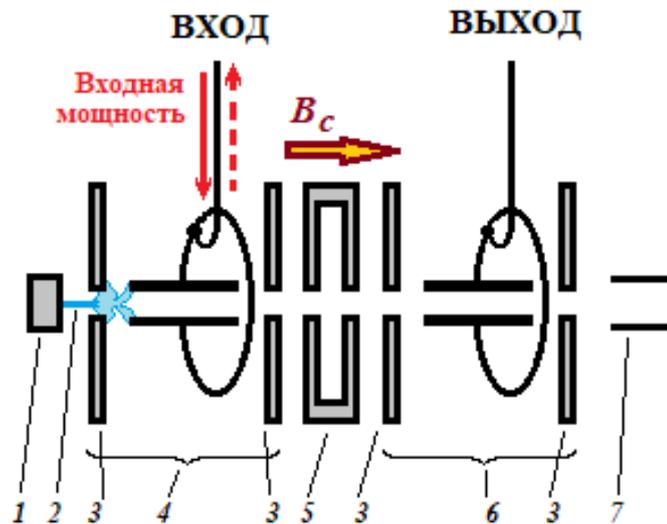


Рис. 2.2. Функциональная схема ЦЗУ в режиме защиты. На рисунке цифрами обозначены: 1 – электронная пушка, 2 – электронный луч, 3 – диски, закрывающие входной и выходной объемные резонаторы со стороны пушки и со стороны коллектора, 4 – входной резонатор, 5 – разделительная секция, 6 – выходной резонатор, 7 – коллектор.  $B_c$  – вектор индукции продольного однородного магнитного поля, обеспечивающего циклотронный резонанс электронов на рабочей частоте.

В режиме защиты, при отсутствии электронного луча, передающего энергию сигнала из входного резонатора в выходной, мощность с входа на выход ЦЗУ просачивается за счет излучения из входного резонатора в выходной через отверстие для прохождения электронного луча в смежных дисках, закрывающих резонаторы, и в разделительной секции (поз.5, рис. 2.2). Отверстие для прохождения электронного луча имеет запредельные размеры по отношению к длине волны электромагнитных колебаний. Ослабление входной мощности в режиме защиты составляет 60...80 дБ и более в см-диапазоне длин волн.

В ЦЗУ в принципе отсутствует пик просачивающейся на выход мощности, характерный для газоразрядных и полупроводниковых защитных устройств.

В газоразрядных и полупроводниковых ЗУ режим защиты реализуется посредством существенного снижения импеданса элемента (газоразрядный промежуток, рin-диод), который реагирует на входную СВЧ мощность выше порогового уровня, и, соответственно, отражения большей части входной мощности от такого элемента с пониженным импедансом. Данный элемент (несколько элементов) встроен в единую от входа к выходу СВЧ линию устройства (см. рисунок 2.3). Таким образом, в момент начала мощного импульса на входе ЗУ, пока газоразрядный промежуток или рin-диод не перешли в полной мере в состояние, соответствующее режиму защиты (время срабатывания ЗУ), мощность поступает с входа на выход ЗУ и формирует пик просачивающейся мощности.

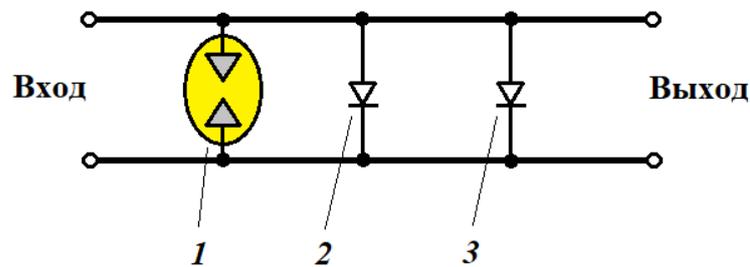


Рис. 2.3. Принципиальная схема газоразрядно-полупроводникового ЗУ. На рисунке цифрами обозначены: 1 – газоразрядный каскад ЗУ, 2 и 3 – рin-диодные каскады ЗУ.

В ЦЗУ входная и выходная СВЧ линии конструктивно разделены, сигнал с входа на выход ЦЗУ может попасть лишь посредством электронного луча в пределах его энергетической емкости. Энергетическая емкость луча определяет границу линейности ЦЗУ и максимальную мощность на выходе при переходе из режима пропускания в режим защиты.

Конструкция ЦЗУ определяет еще два важных качества данного типа ЗУ:

– способность защищать последующие каскады аппаратуры в выключенном состоянии: при отсутствии питающих напряжений, а, следовательно, и электронного луча, ЦЗУ находится в режиме защиты;

– принципиальную невозможность пропуска входных импульсов мощности в отличие от газоразрядных ЗУ.

## § 2.2 Поперечные волны в электронном луче

В электронном луче, дрейфующем в однородном продольном магнитном поле, могут существовать четыре типа поперечных волн:

- 1) Быстрая циклотронная волна (БЦВ);
- 2) Медленная циклотронная волна (МЦВ);
- 3) Быстрая синхронная волна (БСВ);
- 4) Медленная синхронная волна (МСВ).

Данное представление [71,72] введено применительно к тонкому нитевидному электронному лучу, как к последовательности электронов. Это предположение позволяет выполнить требование о достаточно низкой плотности пространственного заряда и, следовательно, пренебречь расталкивающими силами пространственного заряда по сравнению с возвращающими силами магнитного поля. В соответствии с [72 -стр.73], данное требование выполняется при условии  $\omega_p^2 \ll \omega_c^2$ , где  $\omega_c$  – циклотронная частота (2.1),  $\omega_p$  – плазменная частота:

$$\omega_p = \sqrt{\frac{e \rho_e}{m \varepsilon_0}} = \sqrt{\eta \frac{\rho_e}{\varepsilon_0}}, \quad (2.2)$$

$\rho_e$  – плотность пространственного заряда луча,  $\varepsilon_0$  – электрическая постоянная. Плазменная частота – это частота с которой плазма с однородной плотностью  $\rho_e$  может колебаться под действием расталкивающих сил пространственного заряда.

При этом также можно допустить, что скорость электронов однородна по всему поперечному сечению луча.

Данный подход к анализу поперечных волн электронного луча в однородном продольном магнитном поле, определяемый как модель нитевидного электронного луча, признан приемлемым и справедливым [71,72,12,39].

В работе [12 -стр.7] указывается, что аналогично без учета сил пространственного заряда, в терминах поперечных волн, может быть описано и движение центра инерции поперечного сечения электронного луча. А, следовательно, и взаимодействие электронного луча, в котором возбуждены поперечные волны, с электродинамическими системами.

Рассмотрим движение электрона в зазоре резонатора ЦЗУ (см. рис. 2.4).

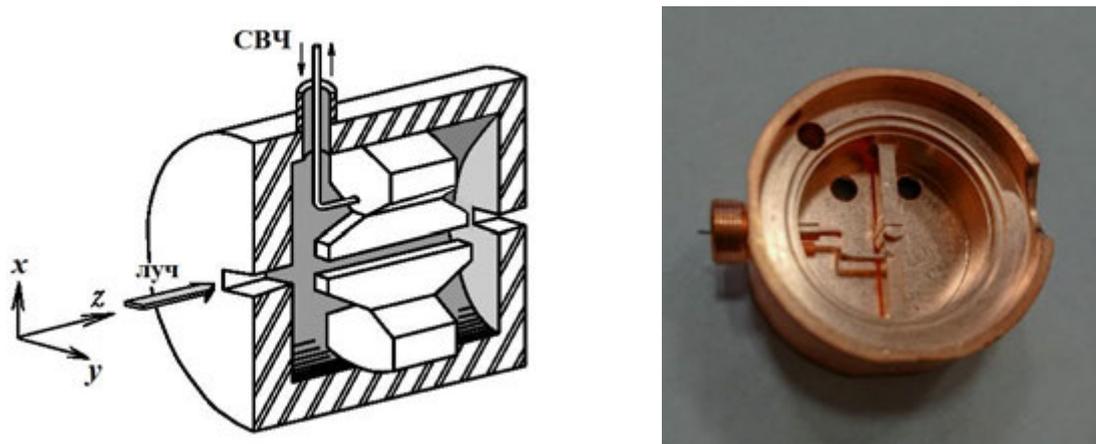


Рис. 2.4. Изображение резонатора Куччия в разрезе и фото резонатора без верхней крышки.

Отталкиваясь от уравнения движения электрона в прямоугольной системе координат ( $z$  – направление движения луча вдоль зазора резонатора;  $x$  – направление ВЧ электрического поля в зазоре, меньший размер (толщина) поперечного сечения ленточного луча – см. рис. 2.4)

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = -e\vec{E} - e[\vec{V}\vec{B}], \quad (2.3)$$

где  $V$  – скорость движения электрона,  $E = E_x$  – поперечное высокочастотное электрическое поле в зазоре резонатора Куччия,  $B = B_z = B_0$  – однородное продольное магнитное поле,  $t$  – время, в Приложении 1 получены следующие результаты с использованием комплексной поперечной координаты  $r = x + jy$ .

Уравнение движения электрона в поперечной плоскости и в направлении движения луча  $z$ :

$$\frac{d^2 r}{dt^2} - j\omega_c \frac{dr}{dt} = -\eta E, \quad (2.4)$$

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = 0. \quad (2.5)$$

На рисунке 2.5 условно показано возбуждение поперечных волн в нитевидном электронном луче.

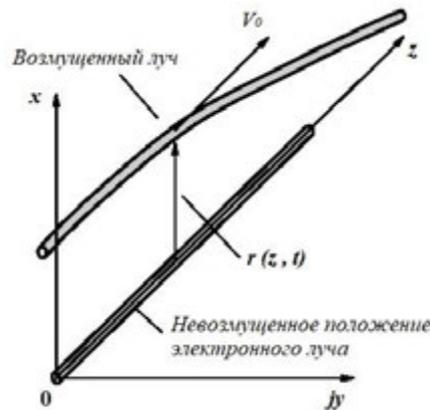


Рис. 2.5. Модель нитевидного электронного луча.

Уравнение движения нитевидного электронного луча (последовательности электронов):

$$\frac{\partial^2 r}{\partial z^2} + \frac{2}{V_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z \partial t} + \frac{1}{V_0^2} \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} - j \frac{\omega_c}{V_0} \frac{\partial r}{\partial z} - j \frac{\omega_c}{V_0^2} \frac{\partial r}{\partial t} = -\eta \frac{E}{V_0^2}, \quad (2.6)$$

где  $V_0$  – скорость движения электрона вдоль оси  $z$ , равная скорости движения луча.

Уравнения поперечных волн с правой (+) и левой (-) круговыми поляризациями, которые могут существовать в луче в рассматриваемых условиях:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 R_+}{\partial z^2} + j(2\beta_e - \beta_c) \frac{\partial R_+}{\partial z} - \beta_e(\beta_e - \beta_c)R_+ = -\frac{E_+(z)}{2U_0} \\ \frac{\partial^2 R_-}{\partial z^2} - j(2\beta_e + \beta_c) \frac{\partial R_-}{\partial z} - \beta_e(\beta_e + \beta_c)R_- = -\frac{E_-(z)}{2U_0} \end{cases} \quad (2.7)$$

где  $R_+$  и  $R_-$  амплитуды волн с правой и левой круговой поляризацией,  $\beta_e = \omega/V_0$  и  $\beta_c = \omega_c/V_0$  – фазовые постоянные распространения на частоте сигнала  $\omega$  и циклотронной частоте  $\omega_c$  соответственно,  $E_+$  и  $E_-$  – две поляризованные по кругу компоненты электрического поля  $E$  в зазоре резонатора Куччия,  $U_0 = V_0^2 / 2\eta$  – потенциал дрейфа луча в зазоре резонатора.

Решение уравнения (2.7) для случая, когда высокочастотное электрическое поле в зазоре резонатора отсутствует, т.е.  $E = E_+(z) = E_-(z) = 0$ :

$$\begin{cases} R_+ = R_{1+}e^{-j(\beta_e - \beta_c)z} + R_{2+}e^{-j\beta_e z} \\ R_- = R_{1-}e^{j(\beta_e + \beta_c)z} + R_{2-}e^{j\beta_e z} \end{cases} \quad (2.8)$$

где  $R_{1+}$  – амплитуда БЦВ,  $R_{2+}$  – амплитуда МСВ,  $R_{1-}$  – амплитуда МЦВ,  $R_{2-}$  – амплитуда БСВ.

Мгновенные значения суммы этих волн описываются выражением:

$$\begin{aligned} r(z, t) = R_{1+}e^{j(\omega t - (\beta_e - \beta_c)z)} + R_{2+}e^{j(\omega t - \beta_e z)} + \\ + R_{1-}e^{-j(\omega t - (\beta_e + \beta_c)z)} + R_{2-}e^{-j(\omega t - \beta_e z)}. \end{aligned} \quad (2.9)$$

Выражение (2.9) описывает форму поперечных волн, которые могут существовать в нитевидном электронном луче при рассматриваемых условиях. В фиксированный момент времени  $t = const$  данное выражение описывает конфигурации нитевидного электронного луча в форме спирали вокруг оси  $z$ .

Рассмотрим фиксированную поперечную плоскость  $z = const$ . Для сокращения записи представим (2.9) в следующем виде:

$$r(z, t) = r_{1+} + r_{2+} + r_{1-} + r_{2-} , \quad (2.10)$$

где  $r_{1\pm}$  и  $r_{2\pm}$  – четыре соответствующих слагаемых из правой части (2.9). Частная производная по времени даст скорость круговых движений точки пересечения луча с плоскостью  $z = const$ :

$$\frac{\partial r(t)}{\partial t} = j\omega(r_{1+} + r_{2+}) - j\omega(r_{1-} + r_{2-}) . \quad (2.11)$$

Следует отметить, что (2.11) отражает поперечные скорости волновых компонент луча в фиксированной поперечной плоскости при их движении с групповой скоростью  $V_0$  вдоль оси  $z$ , но не скорости поперечного движения электронов луча.

Чтобы определить скорости электронов в поперечной плоскости, следует использовать полную производную по времени (П.7) (Приложение 1). Рассмотрим данную операцию по отношению к волновой компоненте  $r_{1+}$ :

$$\frac{dr_{1+}}{dt} = \frac{\partial r_{1+}}{\partial t} + V_0 \cdot \frac{\partial r_{1+}}{\partial z} = j\omega r_{1+} + V_0(-j(\beta_e - \beta_c))r_{1+} = j\omega_c r_{1+} \quad (2.12)$$

Аналогично для волн  $r_{2+}$ ,  $r_{1-}$ ,  $r_{2-}$  получаем:

$$\frac{dr_{2+}}{dt} = 0 , \quad (2.13)$$

$$\frac{dr_{1-}}{dt} = j\omega_c r_{1-} , \quad (2.14)$$

$$\frac{dr_{2-}}{dt} = 0 . \quad (2.15)$$

Из (2.12) и (2.14) следует, что электронные спирали быстрой и медленной циклотронных волн вращаются вокруг своей продольной оси (электроны имеют скорость поперечного вращения) с частотой  $\omega_c$  и одновременно движутся в направлении оси  $z$  со скоростью  $V_0$ . Электронные спирали синхронных волн не вращаются, т.к. скорость поперечного движения электронов равна нулю (см. (2.13) и (2.15)), при этом движутся как целое со скоростью  $V_0$  в направлении оси  $z$ .

Картина поперечных волн в нитевидном электронном луче поясняется рисунком 2.6 [39].

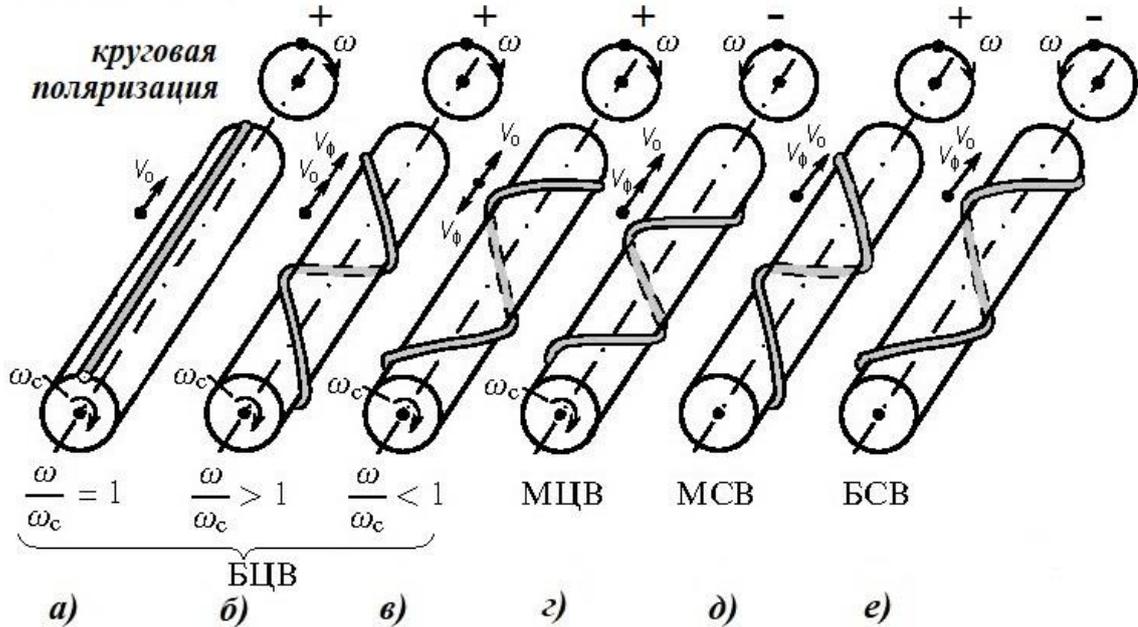


Рис. 2.6. Пространственная конфигурация нитевидного электронного луча, возбужденного на разных типах поперечных волн (внутренний цилиндр, на котором «закреплен» электронный луч, изображен для наглядности).

Рассмотрим далее дисперсионные характеристики поперечных волн, исходя из определения фазовой скорости волны, как скорости перемещения вдоль оси  $z$  волнового фронта, характеризующегося постоянством фазы волны  $\omega t - \beta z = const$  [74 -стр.27]. Из этого выражения в общем случае фазовая скорость волны  $V_\phi$  определяется:

$$V_\phi = \frac{dz}{dt} = \frac{\omega}{\beta}, \quad (2.16)$$

где  $\omega$  – круговая частота,  $\beta$  – фазовая постоянная волны.

Частотно-фазовые параметры каждой из волн в выражении (2.9) в соответствии с (2.16):

для быстрой (+) и медленной (–) циклотронных волн:

$$V_{\phi 1\pm} = V_0 \frac{1}{1 \mp \frac{\omega_c}{\omega}}, \quad (2.17)$$

для обеих синхронных волн, как быстрой (+), так и медленной (-), фазовая скорость равна скорости дрейфа луча  $V_0$ :

$$V_{\phi 2\pm} = V_0. \quad (2.18)$$

Дисперсионные характеристики приведены на рисунке 2.7.

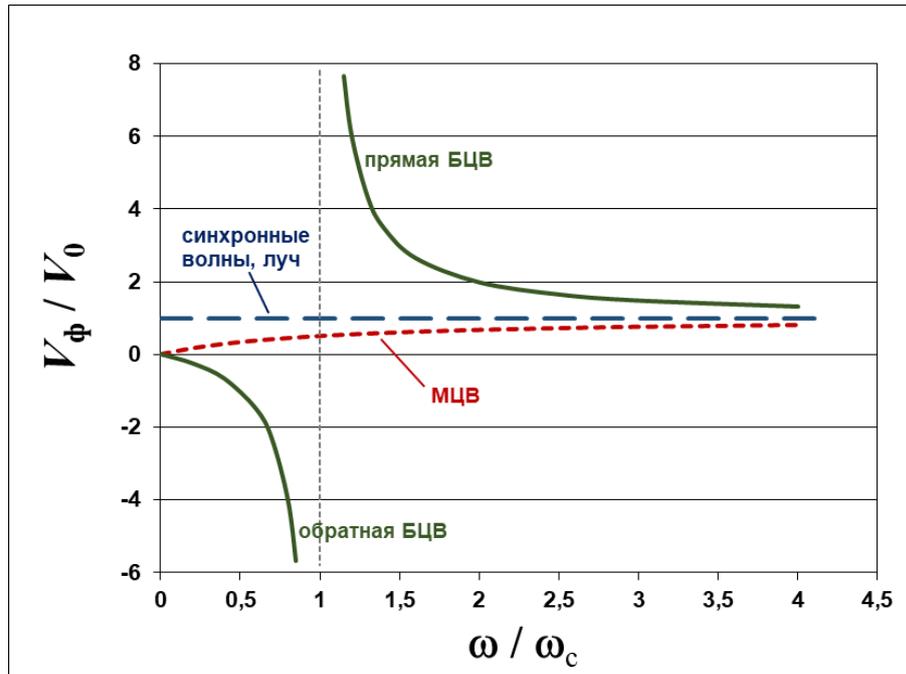


Рис. 2.7. Дисперсионные характеристики поперечных волн.

Фазовая скорость БЦВ на частотах выше циклотронного резонанса ( $\omega / \omega_c > 1$ ) имеет прямое направление по отношению к направлению движения луча (см. рис. 2.6, б), на частотах ниже циклотронного резонанса ( $\omega / \omega_c < 1$ ) имеет обратное направление (рис. 2.6, в). При циклотронном резонансе ( $\omega / \omega_c = 1$ ) фазовая скорость равна бесконечности, а нитевидный луч принимает форму прямой линии, вращающейся с циклотронной частотой (рис. 2.6, а).

Высокочастотное электрическое поле  $E = E_x$  в зазоре резонатора Куччия (рис. 2.4) в каждый момент времени имеет одну фазу на длине зазора резонатора, т.е. можно говорить, что фазовая скорость электромагнитной волны в зазоре резонатора бесконечна. Следовательно, исходя из равенства фазовых скоростей БЦВ электронного луча при циклотронном резонансе и электромагнитной волны

в зазоре резонатора, можно говорить об их эффективном взаимодействии и энергообмене.

## § 2.3 Режим пропускания сигнала

В режиме пропускания сигнала основными параметрами ЦЗУ являются рабочая полоса частот и частотная избирательность, ослабление полезного сигнала при прохождении его через ЦЗУ, коэффициент шума.

### 2.3.1 Рабочая полоса частот

Рабочая полоса частот ЦЗУ определяется тем, при какой отстройке от частоты циклотронного резонанса выполняется на приемлемом уровне условие комплексно-сопряженного согласования проводимостей внешней нагрузки ЦЗУ, резонатора связи с электронным лучом и электронного луча в зазоре резонатора [75 -стр.214]. При этом степень согласования входной линии (входная нагрузка – входной резонатор – электронный луч в зазоре входного резонатора) и выходной линии (электронный луч в зазоре выходного резонатора – выходной резонатор – выходная нагрузка) в равной мере влияют на параметры ЦЗУ, как две последовательно соединенные, независимые одна от другой ВЧ линии.

Рассмотрим эквивалентную схему входной линии в предположении, что резонатор (рис.2.4), обеспечивающий связь с электронным лучом в форме БЦВ, работает на основном (рабочем) типе колебаний (см. рисунок 2.8). Выходная линия может быть представлена аналогичной схемой.

На рисунке 2.8 условно обозначены:  $G_n$ ,  $B_n$  – активная и реактивная проводимости внешней нагрузки входной линии ЦЗУ, приведенные к плоскости резонатора с учетом петли связи;  $G_p$  – проводимость активных потерь в резонаторе,  $B_p$  – реактивная проводимость резонатора;  $G_e$  и  $B_e$  – активная и реактивная проводимости электронной нагрузки резонатора в форме БЦВ. При этом полная проводимость каждого из элементов  $Y = G + jB$ .

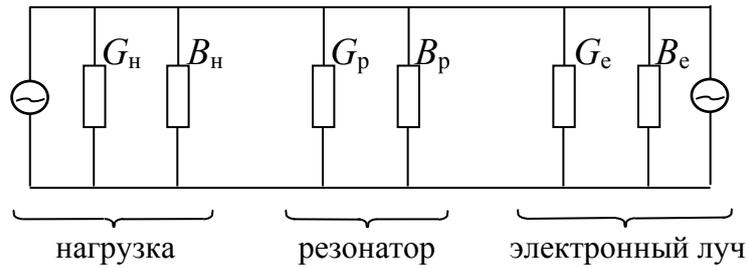


Рис. 2.8. Эквивалентная схема внешней нагрузки, резонатора и электронного луча.  $G$  – активные проводимости,  $B$  – реактивные проводимости, индексы «н», «р» и «е» обозначают отношение проводимостей соответственно к внешней нагрузке, резонатору и электронному лучу.

Во входной линии для обеспечения полной передачи сигнала из внешней нагрузки в резонатор, нагруженный электронным лучом, условие комплексно-сопряженного согласования проводимостей будет иметь следующий вид:

$$\begin{cases} G_n = G_p + G_e \\ B_n + B_p + B_e = 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

В выходной линии сигнал должен быть выведен из электронного луча, поэтому согласование проводимостей должно быть несколько иным:

$$\begin{cases} G_e = G_p + G_n \\ B_n + B_p + B_e = 0 \end{cases} \quad (2.20)$$

Полная электронная проводимость луча в зазоре резонатора с возбужденной в нем БЦВ  $Y_e = G_e + jB_e$  (как и в случае возбуждения других типов поперечных волн) получена в ряде работ [6,18,39,76]. В данном случае интерес представляют активная  $G_e$  и реактивная  $B_e$  электронные проводимости луча на БЦВ (см. Приложение 1):

$$G_e = G_0 \frac{\omega}{\omega_c} \frac{2(1 - \cos \theta)}{\theta^2}, \quad (2.21)$$

$$B_e = G_0 \frac{\omega}{\omega_c} \frac{2(\sin \theta - \theta)}{\theta^2}, \quad (2.22)$$

$$G_0 = \frac{I_0}{8U_0} \left(\frac{l}{d}\right)^2, \quad (2.23)$$

где  $G_0$  – активная электронная проводимость луча на циклотронной частоте  $\omega_c$ ,  $I_0$  и  $U_0$  – ток луча и потенциал дрейфа луча в зазоре резонатора,  $l$  и  $d$  – соответственно длина (вдоль оси  $z$ ) и поперечный размер (вдоль оси  $x$ ) электронного зазора резонатора (см. рис. 2.4),  $\theta$  – отстройка от циклотронного резонанса по углу пролета электронов в зазоре резонатора на частоте  $\omega$ :

$$\theta = (\omega - \omega_c) \frac{l}{V_0}, \quad (2.24)$$

где  $V_0$  – скорость дрейфа луча в зазоре резонатора ( $V_0 = \sqrt{2\eta U_0}$ ,  $U_0$  – потенциал дрейфа луча),  $l / V_0$  – время пролета зазора резонатора.

Выразим множитель  $\omega / \omega_c$  в (2.21) - (2.22) через  $\theta$  исходя из (2.24):

$$\frac{\omega}{\omega_c} = \frac{\theta}{2\pi N} + 1, \quad (2.25)$$

$$N = f_c \frac{l}{V_0}, \quad (2.26)$$

где  $N$  – число циклотронных оборотов электрона на длине зазора резонатора  $l$ ,  $f_c = \omega_c / 2\pi$  – циклотронная частота. Перепишем (2.21) - (2.22) с учетом (2.25):

$$G_e = G_0 \left(\frac{\theta}{2\pi N} + 1\right) \frac{2(1 - \cos \theta)}{\theta^2}, \quad (2.27)$$

$$B_e = G_0 \left(\frac{\theta}{2\pi N} + 1\right) \frac{2(\sin \theta - \theta)}{\theta^2}. \quad (2.28)$$

Соответствующие кривые электронных проводимостей в зависимости от отстройки по углу пролета  $\theta$  приведены на рисунках 2.9 и 2.10. Для вычисления зависимостей использованы типичные параметры резонаторов и параметры луча ЦЗУ в диапазоне частот 9 ГГц и 3 ГГц. Для ЦЗУ на 9 ГГц:  $I_0 = 200$  мкА;  $U_0 = 15$  В;  $l = 3$  мм;  $d = 0,130$  мм ( $G_0 = 8,88 \cdot 10^{-4}$  См). Для ЦЗУ на 3 ГГц:  $I_0 = 150$  мкА;  $U_0 = 20$  В;  $l = 5$  мм;  $d = 0,200$  мм ( $G_0 = 5,86 \cdot 10^{-4}$  См).

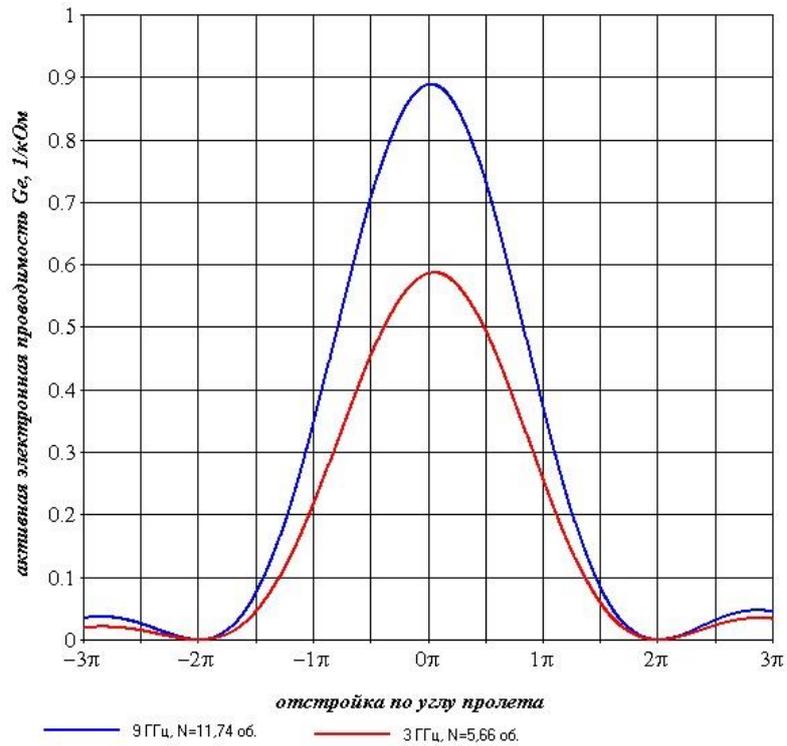


Рис. 2.9. Зависимость активной электронной проводимости луча от  $\theta$  для резонаторов типичных ЦЗУ на 9 ГГц и 3 ГГц.

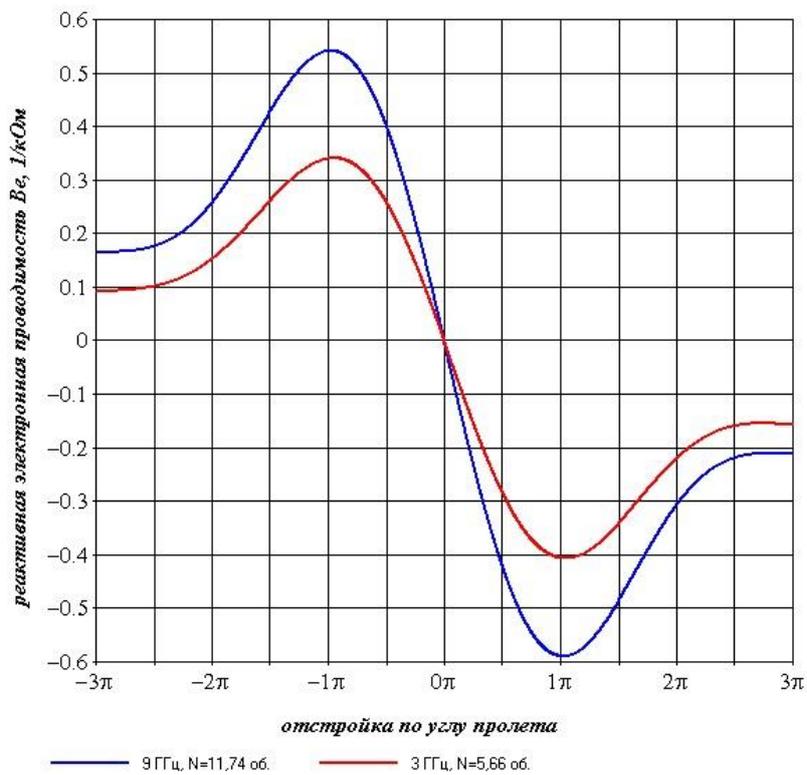


Рис. 2.10. Зависимость реактивной электронной проводимости луча от  $\theta$  для резонаторов типичных ЦЗУ на 9 ГГц и 3 ГГц.

Приведенные кривые демонстрируют физически обусловленные пульсирующие зависимости активной и реактивной электронных проводимостей луча от отстройки по углу пролета. В таком представлении достаточно сложно оценить частотные изменения проводимостей. Представим выражения для электронных проводимостей из (2.21) - (2.22) как функции относительной частоты  $x = \omega / \omega_c$  [77], при этом из (2.25):

$$\theta = 2\pi N(x - 1), \quad (2.29)$$

$$G_e = G_0 x \frac{2[1 - \cos(2\pi N(x - 1))]}{(2\pi N(x - 1))^2}, \quad (2.30)$$

$$B_e = G_0 x \frac{2[\sin(2\pi N(x - 1)) - 2\pi N(x - 1)]}{(2\pi N(x - 1))^2}. \quad (2.31)$$

В нормированном по  $G_0$  виде [18] частотные зависимости активной ( $g_e = G_e / G_0$ ) и реактивной ( $b_e = B_e / G_0$ ) электронных проводимостей приведены на рисунках 2.11 и 2.12 при различных углах пролета электронов в резонаторе (параметр  $N$  – число циклотронных оборотов на длине зазора резонатора).

Для обеспечения выполнения условий комплексно-сопряженного согласования проводимостей на частоте циклотронного резонанса ( $x = 1$ ), из кривых на рисунках 2.11, 2.12 следует, что рабочая полоса частот ЦЗУ расположена вблизи частоты циклотронного резонанса при некотором ограниченном отклонении активной электронной проводимости от проводимости на циклотронной частоте. Активная проводимость внешней нагрузки, трансформированная в плоскость резонатора, должна быть близка к  $G_0$ . Помимо этого, изменение реактивной электронной проводимости в рабочей полосе частот должно сохранять линейный характер, чтобы имелась возможность компенсации ее реактивной проводимостью резонатора.

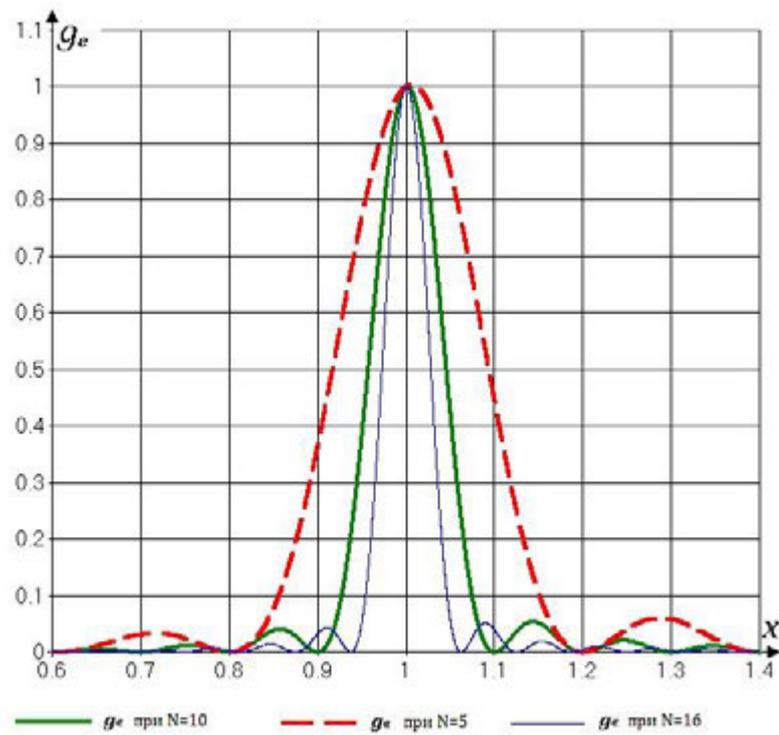


Рис. 2.11. Зависимость нормированной активной электронной проводимости луча от относительной частоты  $x = \omega / \omega_c$ .

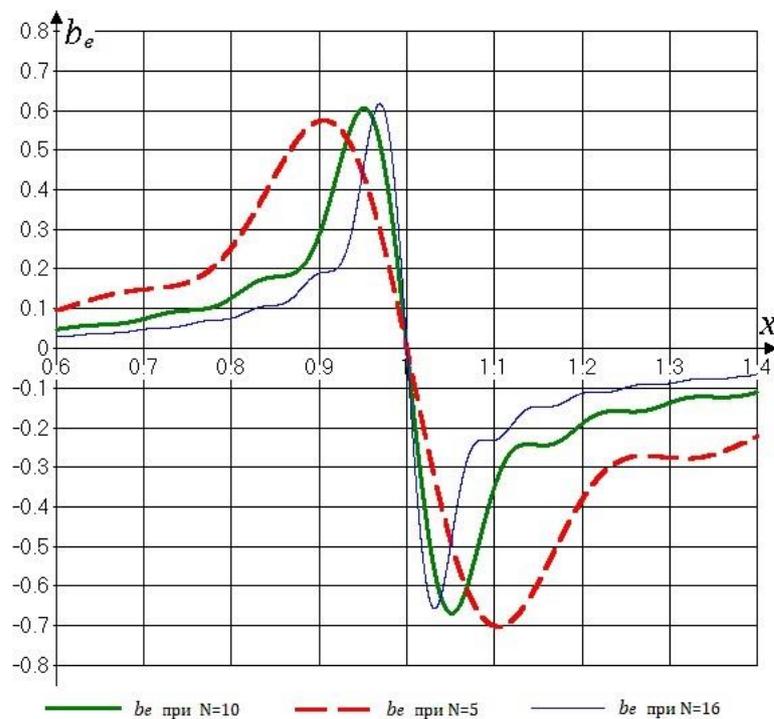


Рис. 2.12. Зависимость нормированной реактивной электронной проводимости луча от относительной частоты  $x = \omega / \omega_c$ .

Из анализа зависимостей на рис. 2.11, 2.12 следует, что расширение рабочей полосы частот связано с уменьшением параметра  $N$  (2.26) – с уменьшением угла пролета электронами зазора резонатора, т.е. уменьшением длины зазора  $l$  и/или увеличением потенциала дрейфа луча в зазоре  $U_0$ . Данная зависимость соответствует известному принципу увеличения рабочей полосы частот с уменьшением угла пролета электроном пространства взаимодействия.

При этом, однако, снижается активная электронная проводимость на циклотронной частоте  $G_0$  (2.23). Для согласования проводимостей в этом случае следует повышать внешнюю добротность резонатора за счет снижения связи с внешней линией, что препятствует расширению рабочей полосы частот. А кроме этого, с уменьшением угла пролета (параметра  $N$ ) увеличивается степень наклона кривой реактивной электронной проводимости (рис. 2.12) в области резонанса, что также осложняет ее компенсацию реактивной проводимостью резонатора и требует увеличения характеристического сопротивления резонатора  $\rho$ .

Определяющее влияние на величину рабочей полосы частот (см. рис. 2.8, выражения (2.19) - (2.20)) оказывает также реактивная проводимость резонатора  $B_p$ . Реактивная проводимость резонатора, как эквивалентного параллельного  $LC$ -контур [78 -стр.21] (см. Приложение 2) может быть выражена:

$$B_p = \omega C - \frac{1}{\omega L} = C \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega} = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\rho \omega \omega_0}, \quad (2.32)$$

где  $C$  и  $L$  – емкость и индуктивность эквивалентного контура,  $\omega_0$  – круговая резонансная частота контура,  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$ ,  $\rho = \sqrt{L/C} = 1/(C\omega_0)$  – характеристическое сопротивление контура. Для случая ЦЗУ уровень магнитной индукции в области взаимодействия должен обеспечивать равенство циклотронной частоты и резонансной частоты резонатора  $\omega_c = \omega_0$ , которая в свою очередь должна совпадать со средней частотой рабочей полосы частот ЦЗУ.

Выразим  $B_p$  (2.32) через относительную частоту  $x = \omega / \omega_c$  для удобства сопоставления проводимостей при определении коэффициента передачи сигнала:

$$B_p = \frac{x^2 - 1}{\rho x}. \quad (2.33)$$

Коэффициент передачи сигнала из внешней нагрузки в электронный луч (на входе ЦЗУ) и из луча во внешнюю нагрузку (на выходе) в соответствии с условиями (2.19) - (2.20) определяется [75 -стр.214, 12]:

$$K_{\text{вх}} = \frac{4G_H(G_p + G_e)}{(G_H + G_p + G_e)^2 + (B_H + B_p + B_e)^2} - \quad (2.34)$$

для передачи сигнала из внешней нагрузки в электронный луч на входе ЦЗУ,

$$K_{\text{вых}} = \frac{4G_e(G_p + G_H)}{(G_H + G_p + G_e)^2 + (B_H + B_p + B_e)^2} - \quad (2.35)$$

для передачи сигнала из электронного луча в нагрузку на выходе ЦЗУ.

Для оценки рабочей полосы частот можно считать, что проводимость активных потерь сигнала в резонаторе  $G_p$  достаточно мала по сравнению с другими активными проводимостями, ей можно пренебречь и принять  $G_p \approx 0$ . Реактивную проводимость нагрузки  $B_H$  можно свести к минимальному приемлемому уровню конструктивными мерами, в данном случае также можно принять  $B_H \approx 0$ .

При указанных допущениях выражения для коэффициента передачи сигнала из внешней нагрузки в электронный луч и из луча во внешнюю нагрузку (2.34) - (2.35) будут иметь один и тот же вид:

$$K = \frac{4G_e G_H}{(G_H + G_e)^2 + (B_p + B_e)^2}. \quad (2.36)$$

На рисунках 2.13, 2.14, 2.15 приведены частотные зависимости активных и реактивных проводимостей и соответствующий им коэффициент передачи из

внешней нагрузки в луч (из луча во внешнюю нагрузку), рассчитанные по выражениям (2.30), (2.31), (2.33) и (2.36) на основе параметров типичного резонатора ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц,  $N = 11,74$ . Рисунки демонстрируют влияние согласования активных и реактивных проводимостей на рабочую полосу частот, которая определена по уровню ослабления сигнала 0,2 дБ.

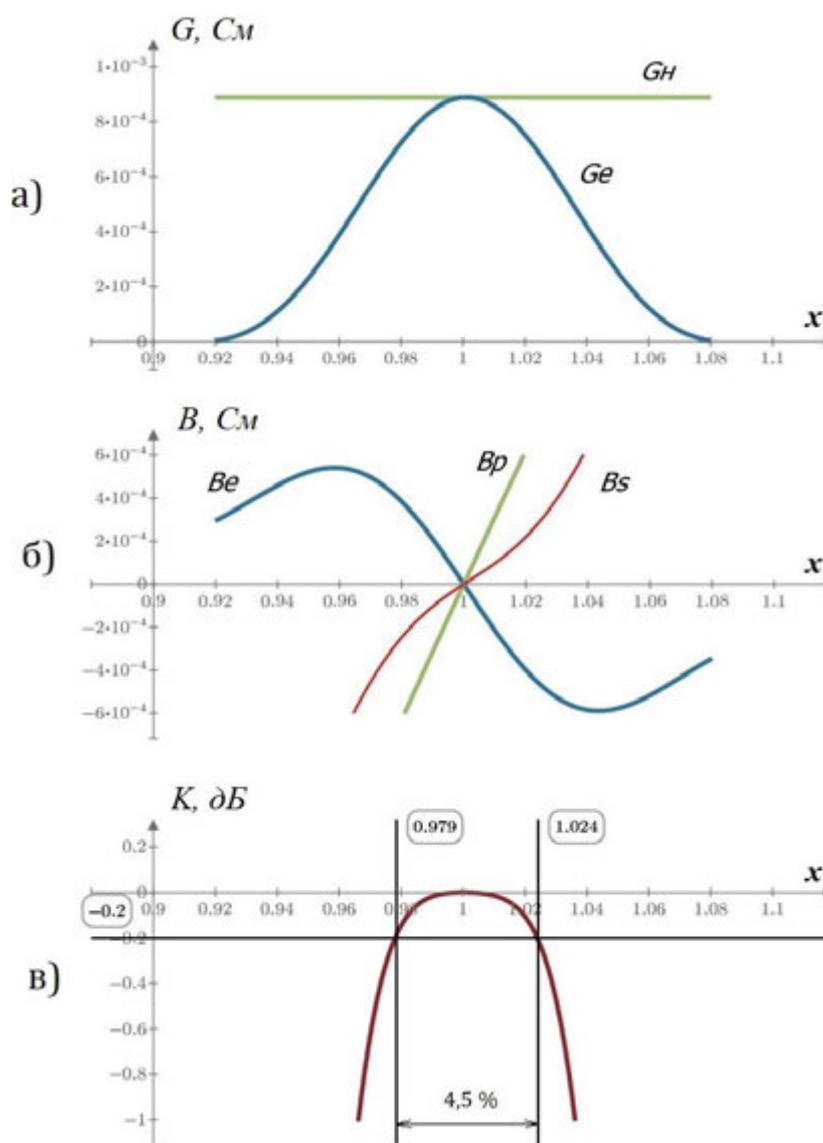


Рис. 2.13. Частотные зависимости ( $x = \omega / \omega_c$ ) проводимостей и коэффициента передачи: а) активные проводимости электронного луча ( $G_e$ ) и нагрузки ( $G_n$ ); б) реактивные проводимости электронного луча ( $B_e$ ), резонатора ( $B_p$ ) и их сумма ( $B_s$ ); в) коэффициент передачи ( $K$ ) внешняя нагрузка – электронный луч.

На рис. 2.13 активная проводимость внешней нагрузки, пересчитанной в плоскость резонатора, равна активной электронной проводимости на циклотронной частоте ( $G_H = G_0$ ). Реактивная проводимость резонатора ( $B_p$ , соответствует  $\rho \approx 65 \text{ Ом}$ ) определенно не компенсирует реактивную электронную проводимость ( $B_e$ ) в полосе частот вокруг  $x = 1$ , соответственно,

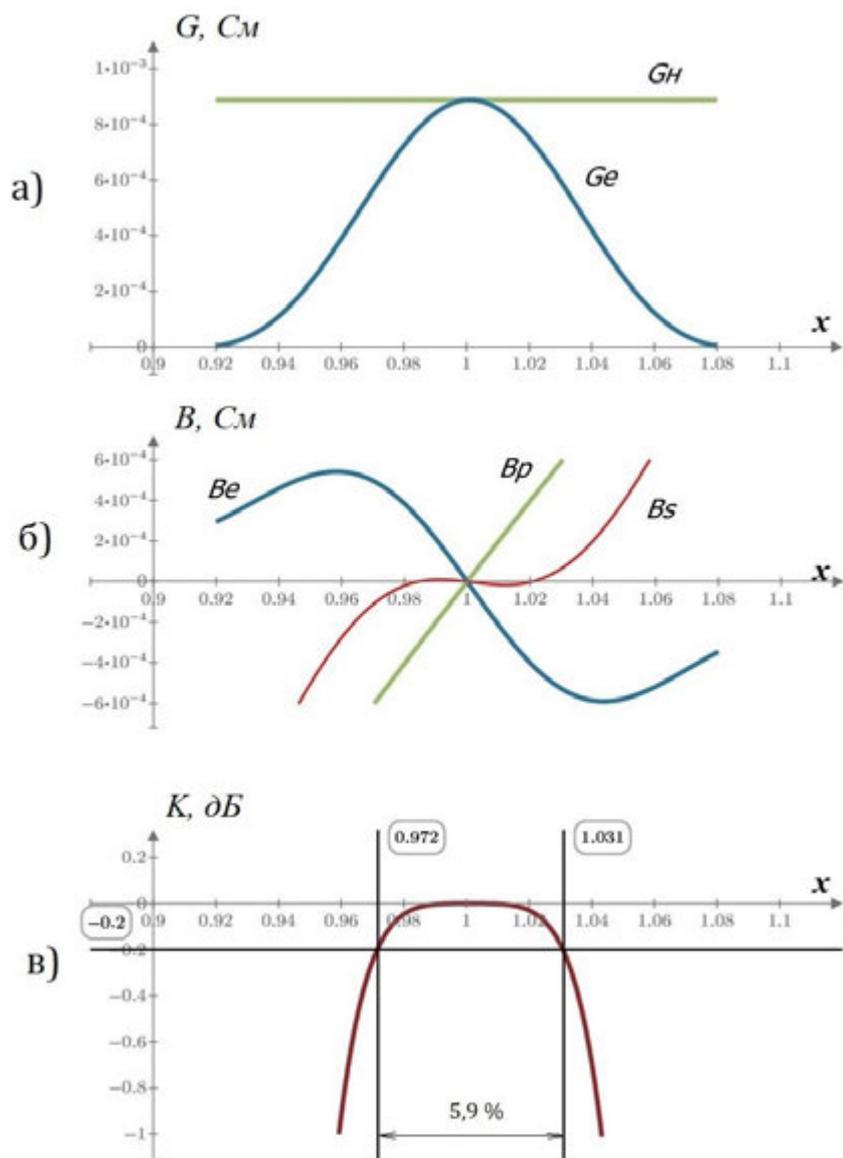


Рис. 2.14. Частотные зависимости ( $x = \omega / \omega_c$ ) проводимостей и коэффициента передачи: а) активные проводимости электронного луча ( $G_e$ ) и нагрузки ( $G_H$ ); б) реактивные проводимости электронного луча ( $B_e$ ), резонатора ( $B_p$ ) и их сумма ( $B_s$ ); в) коэффициент передачи ( $K$ ) внешняя нагрузка – электронный луч. Увеличено характеристическое сопротивление  $\rho$  резонатора.

суммарная реактивная проводимость ( $B_s$ ) не обращается в ноль в какой-либо полосе частот помимо точки  $x = 1$ . Рабочая полоса частот (по коэффициенту ослабления сигнала 0,2 дБ) составляет 4,5%.

На рис. 2.14 приведены аналогичные зависимости при увеличении характеристического сопротивления резонатора до уровня  $\rho = 100 \text{ Ом}$ , что

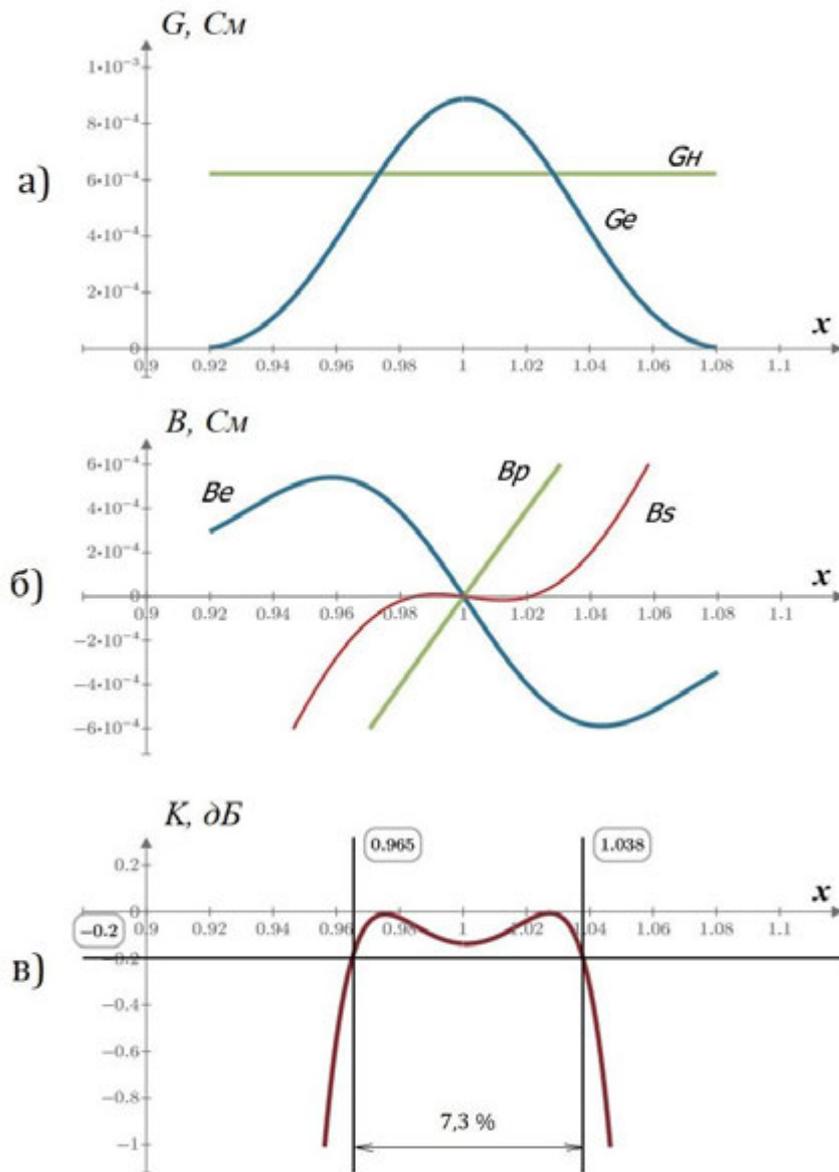


Рис. 2.15. Частотные зависимости ( $x = \omega / \omega_c$ ) проводимостей и коэффициента передачи: а) активные проводимости электронного луча ( $G_e$ ) и нагрузки ( $G_H$ ); б) реактивные проводимости электронного луча ( $B_e$ ), резонатора ( $B_p$ ) и их сумма ( $B_s$ ); в) коэффициент передачи ( $K$ ) внешняя нагрузка – электронный луч. Увеличено характеристическое сопротивление  $\rho$  резонатора,  $G_H = 0,7 \cdot G_0$ .

привело к увеличению наклона кривой  $B_p(x)$ . Реактивные проводимости электронного луча и резонатора компенсируют одна другую в полосе частот от  $x \approx 0,98$  до  $x \approx 1,02$  ( $B_s \approx 0$ ). Как следствие, полоса рабочих частот по уровню  $K \geq -0,2$  дБ увеличилась до 5,9%.

Соотношение активных проводимостей  $G_e$  и  $G_n$  также может быть оптимизировано для расширения рабочей полосы частот (рис. 2.15). Снижение активной проводимости нагрузки в плоскости резонатора ( $G_n$ ) за счет уменьшения петли связи внешней линии с резонатором (увеличения коэффициента трансформации петли связи) до уровня  $G_n \approx 0,7 \cdot G_0$  приводит к «перегрузке» внешней линии электронным лучом, некоторому увеличению ослабления сигнала на резонансной частоте  $x = 1$ , но при этом к дополнительному увеличению рабочей полосы частот до 7,3% (рис. 2.15, в).

В приведенных выше оценках полосы рабочих частот резонатора ЦЗУ не учтен ряд факторов, которые не поддаются простому аналитическому учету, но могут существенно влиять на результат, как правило, в сторону уменьшения полосы частот. К подобным факторам следует отнести частотную неравномерность коэффициента трансформации петли связи внешней линии с резонатором, собственную индуктивность петли связи, реактивную проводимость внешней нагрузки и реактивность элементов линии связи с внешней нагрузкой (коаксиально-волноводные переходы, вакуумные уплотнения и т.п. элементы), неоднородность магнитного поля на длине зазора резонатора и температурную нестабильность уровня магнитного поля, а также некоторые другие факторы. Часть указанных проблем может быть решена с использованием компьютерных методов 3D-моделирования. Например, коэффициент трансформации петли связи на циклотронной частоте можно определить по методике [82].

В то же время оперативная регулировка параметров электронного луча (ток луча, напряжение дрейфа), уровня и профиля магнитного поля (в некоторых пределах), использование конструктивных элементов подстройки СВЧ трактов

позволяют в определенной степени корректировать и оптимизировать электрические параметры конкретного образца ЦЗУ в процессе его настройки.

Влияние неоднородного продольного магнитного поля на связь резонатора Куччия с БЦВ электронного луча в параксиальном адиабатическом приближении изучено в работе [83]. Показано, что неоднородность магнитного поля до 10...20% на длине резонатора является допустимой, при этом для сохранения взаимодействия с электронным лучом требуется увеличение тока луча в 1,1...1,3 раза.

Специализированные современные системы электромагнитного 3D-моделирования при корректном их использовании, без сомнения, могут дать ответ на большинство вопросов, касающихся расчета конструкции и параметров ЦЗУ.

### **2.3.2 Частотная избирательность**

Электродинамическая система ЦЗУ представляет собой два резонатора связи электронного луча с внешней ВЧ линией на входе и на выходе устройства. Таким образом, частотная характеристика ЦЗУ носит резонансный характер, на который накладываются особенности взаимодействия быстрой циклотронной волны с резонатором связи типа Куччия. Передача сигнала с малым ослаблением на частотах вблизи резонансной частоты естественным образом превращается в полезное значительное затухание сигнала при достаточной отстройке от резонанса, что обеспечивает частотную избирательность ЦЗУ (ослабление приема по «зеркальному» каналу и другим побочным каналам приема в устройствах с преобразованием частоты).

Рассмотрим особенности передачи сигнала, изложенные в предыдущем пункте, в широкой полосе частот за пределами рабочей полосы. Построим кривые частотных зависимостей активной и реактивной электронных проводимостей в форме (2.30) - (2.31) – как функции относительной частоты

$x = \omega / \omega_c$  и соответствующий коэффициент передачи сигнала (2.36) аналогично приведенным на рисунках 2.13 - 2.15.

Нули активной электронной проводимости приходятся на частоты, соответствующие отстройке по углу пролета  $\theta = 2\pi \cdot n$ , где  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$  (см. рис. 2.9). Соответственно, на этих же частотах имеет место максимальное затухание при передаче сигнала через резонатор Куччия (зависимость  $K(x)$  на рисунке 2.16).

Значения частот, на которые приходятся нули активной электронной проводимости, зависят от параметра  $N$  – числа циклотронных оборотов электрона на длине резонатора, т.е. от угла пролета резонатора  $\omega l / V_0$ . Снижение параметра  $N$  не только способствует расширению рабочей полосы частот резонатора Куччия, как было отмечено выше, но и приводит к увеличению отстройки по частоте нулей активной электронной проводимости от резонансной частоты.

Поясним физическую природу нулей активной электронной проводимости в резонаторе Куччия. Из выражения (2.27) следует, что нули проводимости имеют место при условии  $\cos\theta = 1$ , т.е. при  $\theta = 2\pi \cdot n$ , где  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ . С учетом выражения для  $\theta$  (2.24) нули активной электронной проводимости имеют место на частотах:

$$f = f_c + \frac{1}{l/V_0} \cdot n, \quad \text{где } n = \pm 1, \pm 2, \dots, \quad (2.37)$$

где  $f_c$  – циклотронная частота, при этом  $f_c = f_0$  – резонансная частота резонатора,  $l / V_0$  – время пролета зазора резонатора электроном.

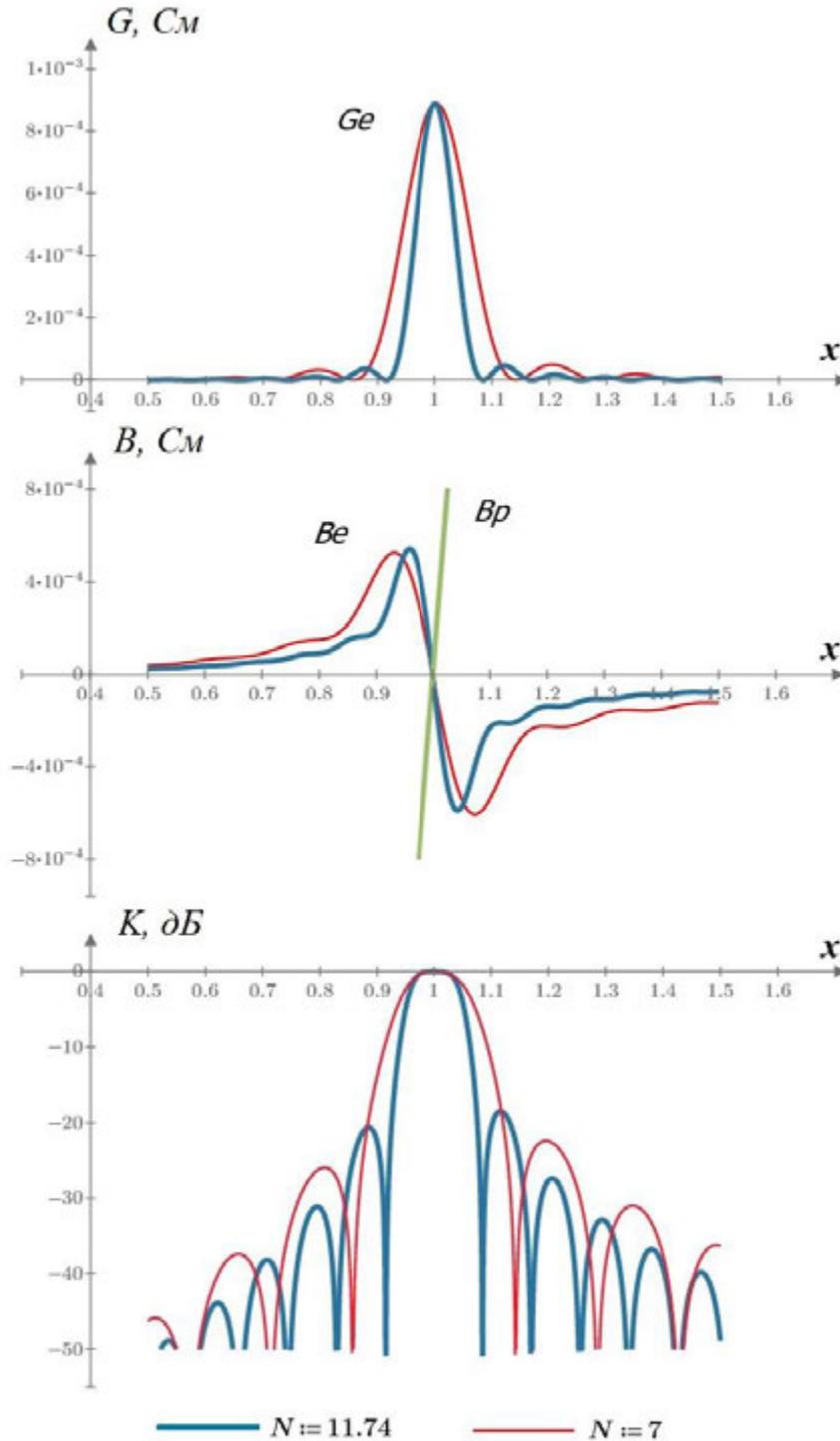


Рис. 2.16. Частотные зависимости ( $x = \omega / \omega_c$ ) активной ( $G_e$ ) и реактивной ( $B_e$ ) электронных проводимостей и коэффициента передачи ( $K$ ) внешняя нагрузка – электронный луч в широкой полосе частот при разных значениях параметра  $N$  ( $N = 11,74$  и  $N = 7$ ),  $f_c = 9$  ГГц,  $\rho = 65$  Ом.

Если вернуться к рисунку 2.6 -а, -б, -в, на котором изображена пространственная конфигурация нитевидного электронного луча, в котором

возбуждена БЦВ, то станет очевидным, что максимальная активная электронная проводимость  $G_e = G_0$  имеет место в случае, изображенном на рис. 2.6-а, – нитевидный электронный луч имеет форму прямого стержня, вращающегося с циклотронной частотой вокруг положения невозмущенной оси. При этом в резонаторе наводится максимально возможный ВЧ ток, обусловленный синфазными колебаниями всех электронов данного конкретного луча, находящихся в пределах зазора резонатора. Реактивная электронная проводимость  $B_e$  равна нулю.

При малом отклонении частоты сигнала, возбуждающего БЦВ, от циклотронной частоты (например, в пределах рабочей полосы частот) «прямой стержень» нитевидного электронного луча несколько деформируется – преобразуется в слабо скрученную «спираль» (рис. 2.6 -б, -в), так что на длине зазора резонатора угол навивки «спирали» значительно меньше  $2\pi$  (значительно меньше одного оборота). При этом наведенный в резонаторе ВЧ ток уменьшается, т.к. имеет место не полная синфазность вращательного движения электронов в силу кривизны «спирали». Активная электронная проводимость  $G_e$  соответственно снижается. Появляется ненулевая реактивная электронная проводимость  $B_e$ .

При дальнейшем отклонении частоты сигнала от циклотронной частоты угол навивки «спирали» увеличивается и при некоторой частоте достигает значения  $2\pi$  радиан на длине зазора резонатора – «спираль» на длине зазора делает ровно один полный виток. В этом случае суммарный наведенный в резонаторе ВЧ ток равен нулю, т.к. для каждого парциального участка луча в пределах длины зазора резонатора имеется ровно такой же противофазный участок луча, движущийся в противоположном направлении. Иными словами, парциальные наведенные в резонаторе ВЧ токи полностью взаимно компенсируют друг друга. Активная электронная проводимость  $G_e$  становится равной нулю.

При еще большем отклонении частоты сигнала от резонансной частоты «спираль» на длине зазора имеет более одного оборота, появляется некоторый

нескомпенсированный наведенный в резонаторе ВЧ ток. При дальнейшем отклонении частоты суммарный наведенный ток возрастает и достигает максимума при частоте, соответствующей первому боковому пику активной электронной проводимости снизу или сверху по частоте от резонанса (соответствует  $K \approx -20$  дБ на рис. 2.16 при  $N = 11,74$ ).

При отстройке частоты сигнала от резонансной до частоты вторых нулей активной электронной проводимости ( $x = 0,83$  и  $x = 1,17$  на рис. 2.16 при  $N = 11,74$ ) электронная «спираль» на длине зазора резонатора содержит ровно два полных витка.

Следует отметить, что все приведенные выше оценки ослабления сигнала в рабочей полосе частот и вне ее выполнены для одного резонатора ЦЗУ. Для всего устройства коэффициент ослабления следует увеличить в два раза, имея в виду аналогичный коэффициент ослабления второго резонатора ЦЗУ.

При расчете полосовых характеристик коэффициента передачи сигнала в рабочей полосе частот ЦЗУ так же могут быть оценены и уровни внеполосного подавления побочных каналов приемных устройств.

### **2.3.3 Ослабление сигнала и коэффициент шума**

Коэффициент шума [84-86] циклотронного защитного устройства является наиболее сложным параметром, который требуется получить при настройке, сохранить при испытаниях прибора на воздействие внешних воздействующих факторов и обеспечить в процессе всей наработки устройства. При существующем уровне технологии и доступных конструктивных решениях часто оказывается вполне достижимо получить необходимый уровень коэффициента шума в требуемой полосе частот для нескольких образцов ЦЗУ в ходе выполнения ОКР. Но на протяжении периода наработки ЦЗУ коэффициент шума является тем параметром, который наиболее часто выходит за установленную норму и приводит к отказу изделия.

Коэффициент шума ЦЗУ не связан с передачей шумов из других типов поперечных волн, как это имеет место в усилителях БЦВ типа ЭСУ или ЭПУ. Коэффициент шума ЦЗУ зависит от целого ряда конструктивно-технологических параметров и условий, при этом любое самопроизвольное или нештатное изменение какого-либо из данных параметров и условий приводит к ухудшению коэффициента шума.

Также следует отметить, что ЦЗУ является пассивным устройством, усиление сигнала в котором не происходит, по этой причине, казалось бы, коэффициент шума ЦЗУ должен соответствовать ослаблению сигнала, проходящего через ЦЗУ от входа к выходу. Однако, коэффициент шума ЦЗУ превышает ослабление сигнала в нем. Причиной этого является использование для передачи сигнала электронного луча, который испускается нагретым катодом и содержит дополнительную шумовую энергию, обусловленную температурой катода  $\approx 900^\circ\text{K}$ .

Поскольку коэффициент шума ЦЗУ достаточно мал, целесообразно для оценки шумовых характеристик использовать параметр «эквивалентная шумовая температура»  $T_{\text{ш}}$  [84,85]:

$$T_{\text{ш}} = (K_{\text{ш}} - 1) \cdot T_0, \quad K_{\text{ш}} = 1 + \frac{T_{\text{ш}}}{T_0}, \quad (2.38)$$

где  $K_{\text{ш}}$  – коэффициент шума, измеренный в относительных единицах,  $T_0 = 293^\circ\text{K}$  – стандартная шумовая температура.

Рассмотрим причины ослабления сигнала и источники шума в ЦЗУ [41] в рабочей полосе частот:

- 1) ослабление сигнала вследствие активных потерь и отражений во входном и выходном СВЧ трактах – резонаторах (активная проводимость потерь резонаторов  $G_p$ ), линиях связи и вакуумных окнах;
- 2) остаточная шумовая энергия в сигнальной БЦВ при неполном согласовании электронной нагрузки входного резонатора с его внешней нагрузкой. Шумовая БЦВ, возникающая на горячем катоде, не полностью выводится из луча во

входном резонаторе и, таким образом, поступает через выходной резонатор в выходную нагрузку;

- 3) разброс скоростей электронов луча при передаче сигнала БЦВ;
- 4) влияние поля пространственного заряда луча;
- 5) недостаточно высокий уровень вакуума в ЦЗУ;
- 6) оседание луча на стенках зазора резонаторов при неполной юстировке;
- 7) эмиссия вторичных электронов с коллектора;
- 8) изменение уровня магнитного поля при температурных воздействиях.

Некоторые из указанных процессов приводят к затуханию сигнала и соответствующему шумовому вкладу. Другие, например, остаточный шум в сигнальной БЦВ или эмиссия вторичных электронов с коллектора, – не ослабляют проходящий сигнал, но вносят свой шумовой вклад в сигнал на выходе ЦЗУ.

Рассмотрим перечисленные факторы, влияющие на коэффициент передачи сигнала и коэффициент шума ЦЗУ.

### **1) Ослабление сигнала вследствие активных потерь и отражений во входном и выходном СВЧ трактах - резонаторах, линиях связи и вакуумных окнах ЦЗУ**

Коэффициент передачи сигнала из внешней нагрузки в электронный луч и из луча во внешнюю нагрузку, зависит от соотношения проводимостей, определяется выражениями (2.34), (2.35). Данные выражения позволяют сформулировать требования к проводимостям элементов, участвующих в передаче сигнала, с тем, чтобы минимизировать отражения и, соответственно, потери сигнала.

Помимо указанного отражения сигнала из-за несогласованности проводимостей, для ряда элементов характерно поглощение СВЧ энергии в силу их физических свойств.

Прежде всего это поглощение энергии входным и выходным резонаторами Куччия при протекании в скин-слое стенок резонаторов СВЧ токов. Такого рода

ослабление сигнала характеризуется активной проводимостью потерь резонатора  $G_p$  и его собственной добротностью  $Q_0$ . При типичных уровнях собственной добротности резонатора  $Q_0 \approx 500$  и нагруженной добротности (резонатор нагружен внешней линией и электронным лучом)  $Q_n \approx 10$ , к.п.д. резонатора [74 -стр.314]  $\eta_p = 1 - \frac{Q_n}{Q_0}$  составляет приблизительно 98%. Соответствующий коэффициент ослабления резонатора  $L_p \approx 0,09$  дБ.

Коэффициент ослабления во входной (выходной) линии связи, включая вакуумное окно, оценочно составляет  $L_{лс} \approx 0,05 \dots 0,1$  дБ.

Таким образом, суммарный коэффициент ослабления вследствие активных потерь во входном (выходном) СВЧ тракте ЦЗУ  $L_{тр.а} = L_p + L_{лс} \approx 0,14 \dots 0,19$  дБ.

Ослабление сигнала вследствие отражения  $L_{ксв}$ , соответствующего КСВН  $\sigma = 1,5$ , в точках рабочей полосы частот с указанным КСВН

$(L_{ксв} = -10 \lg \left[ 1 - \left( \frac{\sigma-1}{\sigma+1} \right)^2 \right], \text{ дБ})$ , составит  $L_{ксв} \approx 0,18$  дБ.

Суммарный коэффициент ослабления во входном или выходном тракте ЦЗУ вследствие активных потерь в резонаторе и линии связи, а также вследствие рассогласования проводимостей составляет:

- $L_{тр} = L_{тр.а} + L_{ксв} \approx 0,14 \dots 0,19$  дБ – в частотных точках с КСВН  $\sigma = 1,0$ ;
- $L_{тр} = L_{тр.а} + L_{ксв} \approx 0,32 \dots 0,37$  дБ – в частотных точках с КСВН  $\sigma = 1,5$ .

Коэффициент шума пассивной линии передачи  $K_{ш.п}$ , находящейся при стандартной температуре  $T_0$ , равен его коэффициенту ослабления  $L$  ( $L \geq 1$ ):

$$K_{ш.п} = L = 1/K_n, \quad (2.39)$$

$K_n \leq 1$  – коэффициент передачи (все величины – в относительных единицах).

При работе ЦЗУ с входной СВЧ мощностью высокого уровня и при повышенных температурах окружающей среды ВЧ тракты устройства могут нагреваться приблизительно до  $80^\circ\text{C}$  (рабочая температура  $T_p = 353^\circ\text{K}$ ). В этом случае эквивалентная шумовая температура (см. Приложение 3):

$$T_{ш} = (K_{ш} - 1) \cdot T_p, \quad (2.40)$$

$K_{ш} = K_{ш.п.}$  Шумовой вклад согласно (2.38) - (2.40) входного либо выходного тракта составит:

- при физической температуре тракта  $T_0 = 293^\circ\text{K}$  ( $20^\circ\text{C}$ ):

- $T_{ш} \approx 10...13^\circ\text{K}$  – в частотных точках с КСВН  $\sigma = 1,0$ ;
- $T_{ш} \approx 22...26^\circ\text{K}$  – в частотных точках с КСВН  $\sigma = 1,5$ ;

- при физической температуре тракта  $T_p = 353^\circ\text{K}$  ( $80^\circ\text{C}$ ):

- $T_{ш} \approx 12...16^\circ\text{K}$  – в частотных точках с КСВН  $\sigma = 1,0$ ;
- $T_{ш} \approx 24...29^\circ\text{K}$  – в частотных точках с КСВН  $\sigma = 1,5$  \*.

Примечание \*: оценка увеличения шумовой температуры в данном случае сделана на такую же величину, как при увеличении КСВН с  $\sigma = 1,0$  до  $\sigma = 1,5$  при температуре тракта  $T_0 = 293^\circ\text{K}$  ( $T_{ш} \approx 24 = 12 + (22 - 10)$ ). Данный подход обусловлен тем физическим соображением, что шумовая температура, обусловленная рассогласованием ( $\sigma \neq 1,0$ ), не возрастает при увеличении температуры тракта.

## 2) Остаточная шумовая энергия в сигнальной БЦВ

Шумовая энергия БЦВ электронного луча, обусловленная тем, что электроны луча эмитируются горячим катодом, определяется следующим выражением [24-27]:

$$T_{ш.БЦВ} = \frac{B_0}{B_k} \cdot T_k, \quad (2.41)$$

где  $T_{ш.БЦВ}$  – шумовая температура БЦВ,  $B_0$  и  $B_k$  – соответственно индукция магнитного поля в области резонатора и на поверхности катода,  $T_k \approx 900^\circ\text{K}$  – рабочая температура молекулярно-напыленного оксидного катода ЦЗУ. Из выражения следует, что перепад магнитного поля от катода ( $B_k$ ) к области взаимодействия ( $B_0$ ,  $B_0 = \omega_0 / \eta$ ) позволяет пропорционально понизить шумовую температуру БЦВ. При этом снижение индукции магнитного поля должно происходить адиабатически – с сохранением адиабатического инварианта  $W_{\perp} / B_z = \text{const}$  (отношение энергии поперечного вращения электронов  $W_{\perp}$  к

продольному магнитному полю  $B_z$  должно оставаться постоянным), т.е. относительное изменение магнитного поля на длине одного циклотронного оборота электрона должно быть достаточно малым [87]. Данное условие позволяет обеспечить перевод соответствующей части энергии поперечного движения электрона в энергию продольного движения.

В некоторых моделях ЦЗУ используется данный механизм снижения шумовой температуры электронного луча в расходящемся продольном магнитном поле, как элемент преемственности построения ЦЗУ на принципах электростатических усилителей (см. рис. 2.17, [41]). Концентратор магнитного поля (половинка эллипсоида вращения, конус или круглый стержень с диаметром, приблизительно равным длине катода вдоль оси  $y$  – рис. 2.4), изготовленный из ферромагнитного материала, располагается вдоль оси прибора с обратной стороны катода по отношению к эмитирующей поверхности, достаточно близко к катоду (обычно расстояние катод – кончик концентратора поля приблизительно 0,1 мм). Подобная конструкция позволяет повышать уровень индукции магнитного поля на поверхности катода до 10 раз (особенно для ЦЗУ низкочастотного диапазона СВЧ) по отношению к  $B_0$  и, соответственно, во столько же раз снижать  $T_{ш.БЦВ}$  по отношению к  $T_k$  (2.41).

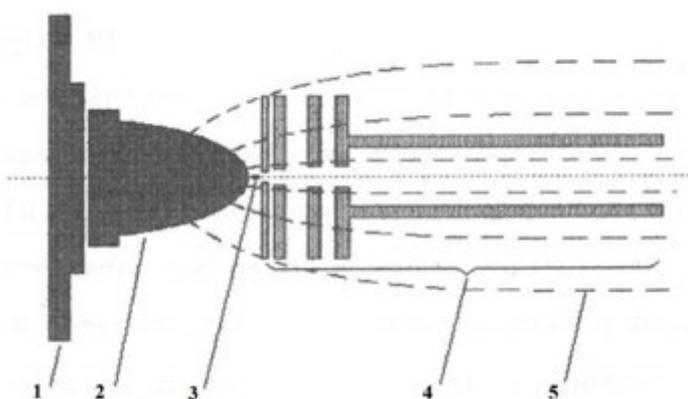


Рис. 2.17. Электронная пушка ЭСУ с концентратором магнитного поля на катоде. Цифрами обозначены: 1 – ферромагнитная вставка вакуумной оболочки; 2 – концентратор магнитного поля – половина эллипсоида вращения; 3 – катод; 4 – электроды электронной пушки; 5 – силовые линии магнитного поля.

Указанный метод повышения индукции магнитного поля на катоде позволяет не только понизить шумовую температуру БЦВ луча, но и, что более важно, позволяет уменьшить S-образную деформацию поперечного сечения электронного луча и, таким образом, способствует улучшению юстировки луча в рабочем зазоре резонаторов [88 -стр.302]. Данный эффект проявляется вследствие увеличения поперечных размеров луча и снижения плотности объемного заряда [89], в большей степени на периферийных по ширине луча участках. Подобный механизм снижения деформации луча более актуален для низкочастотных ЦЗУ с более низким уровнем индукции магнитного фокусирующего поля в области взаимодействия.

Другой механизм снижения шумовой температуры БЦВ, являющийся определяющим для ЦЗУ, – удаление шумовой энергии из луча во входном резонаторе ЦЗУ и рассеяние ее во внешней нагрузке. Основным условием для максимально полного удаления шумов в данном случае является степень комплексно-сопряженного согласования проводимостей: электронного луча, резонатора и внешней нагрузки. При нарушении этого условия шумовая мощность, возникающая на горячем катоде, не полностью выводится из луча во входном резонаторе и поступает через выходной резонатор в выходную нагрузку.

С учетом активной проводимости собственных потерь резонатора  $G_p$  условия согласования проводимостей для случая удаления шумов из луча и случая ввода сигнала в луч строго говоря различны: условие (2.20) для удаления шумов и условие (2.19) для ввода сигнала в луч. Соответственно и коэффициенты передачи также различны: (2.35) и (2.34). Тем не менее, как ранее уже указывалось, при к.п.д. резонатора  $\eta_p \geq 97...98\%$  проводимостью собственных потерь резонатора  $G_p$  можно пренебречь и полагать, что коэффициент отражения от нагруженного резонатора со стороны внешней линии и со стороны электронного луча одинаков.

Таким образом, при идеальном комплексно-сопряженном согласовании проводимостей со стороны электронного луча шумовая мощность может полностью удаляться из луча:

- $T_{ш.БЦВ} \approx 0^\circ\text{К}$  – теоретический предел, в частотных точках с коэффициентом отражения по мощности со стороны луча  $\Gamma^2 = 0$ .

При типичном КСВН входа ЦЗУ в рабочей полосе частот  $\sigma \leq 1,5$  и соответствующем коэффициенте отражения по мощности  $\Gamma^2 \leq 0,04$ , можно полагать, что и со стороны электронного луча имеет место аналогичный коэффициент отражения. Шумовая мощность, остающаяся в луче после прохождения им зазора согласованного входного резонатора при  $\Gamma^2 = 0,04$  составляет:

- $T_{ш.БЦВ} \approx 36^\circ\text{К}$  – в частотных точках с КСВН  $\sigma = 1,5$  при температуре катода  $900^\circ\text{К}$  без «охлаждения» луча в спадающем магнитном поле.

В случае предварительного понижения шумовой температуры БЦВ в адиабатически снижающемся от катода магнитном поле в  $(B_k / B_0 \approx 10)$  раз, что достижимо для низкочастотных ЦЗУ, шумовая температура БЦВ может составлять:

- $T_{ш.БЦВ} \approx 3...4^\circ\text{К}$  – в частотных точках с КСВН  $\sigma = 1,5$  при температуре катода  $900^\circ\text{К}$  с «охлаждением» луча в спадающем магнитном поле при  $B_k / B_0 \approx 10$ .

Физический смысл удаления шумовой энергии из БЦВ электронного луча имеет некоторую специфику. Исследователями данного процесса [90,18] было установлено, что ВЧ мощность, выведенная из электронного луча и рассеянная во внешней цепи, на несколько порядков меньше шумовой мощности БЦВ на входе в электродинамическую систему. При этом шумовая мощность БЦВ на выходе из системы может быть близка к нулю. Это говорит о том, что физически механизм «охлаждения» луча представляет собой достаточно сложный процесс. В ходе этого процесса, при взаимодействии совокупности шумовых колебаний электронов луча с резонатором, нагруженным согласованной внешней нагрузкой, происходит балансировка (подфазировка) отдельных электронных

шумовых орбит таким образом, что электроны, участвующие в шумовых колебаниях, распределяются по всем возможным фазам вращательного движения (равномерно от 0 до  $2\pi$ ) и энергиям так, что суммарный наведенный в резонаторе шумовой ток близок к нулю.

При этом если на участке дрейфа луча между входным и выходным резонаторами указанная шумовая балансировка луча, как целого, по какой-либо причине нарушается, в луче снова появляется шум.

Частотная полоса отбора шумов определяется широкополосностью выполнения условий согласования проводимостей (2.19) - (2.20).

### **3) Разброс скоростей электронов луча**

Разброс поперечных скоростей электронов электронного луча следует понимать, как дополнительную энергетическую вариацию, налагаемую на поперечную шумовую энергию циклотронных волн, которая понижается при расширении луча в спадающем продольном магнитном поле или выводится из луча во входном резонаторе, как описано выше.

Влияние разброса продольных скоростей электронов, возникающее на катоде, исследовалось рядом авторов [35,32,12 -стр.133], которые пришли к следующим заключениям. Пусть мощность сигнала, поступающая в луч, распределяется между его частями, которые движутся с различными скоростями. На участке дрейфа между входным и выходным резонаторами парциальные элементы луча приобретают различный фазовый набег и, таким образом, наводят в выходном резонаторе парциальные токи с некоторым фазовым смещением, что приводит к ослаблению суммарного наведенного тока и потере мощности сигнала. Данный эффект проявляется в виде размытия циклотронной спирали (рис. 2.6 -б, -в) лишь при отличии частоты сигнала от циклотронной частоты. При совпадении сигнальной и циклотронной частот (рис. 2.6 -а) эффект не проявляется, т.к. условно «нитевидный» луч с БЦВ имеет форму прямого стержня и при движении парциальных элементов луча с разными скоростями

фазового сдвига между парциальными токами, наведенными в выходном резонаторе, не происходит.

Данное явление подтверждается измерением амплитудных шумов ЦЗУ, обусловленных микропульсациями напряжения катод-резонатор устройства. При увеличении отстройки несущей частоты как в одну, так и в другую сторону от циклотронной частоты амплитудные шумы (весь спектр по частотам анализа) возрастают. На циклотронной частоте могут быть получены минимально возможные для ЦЗУ амплитудные шумы.

Коэффициент передачи (затухания) сигнала БЦВ на длине дрейфа луча  $l_0$  вследствие разброса продольных скоростей был получен [35] в следующем виде:

$$K_{п.БЦВ}(l_0) = \frac{1}{1 + \left(\frac{k_6 T_{ez}}{mV_0^2}\right)^2 (\beta_e - \beta_c)^2 l_0^2}, \quad (2.42)$$

где  $k_6$  – постоянная Больцмана,  $T_{ez}$  – продольная электронная температура луча на выходе из электронной пушки (обычно можно полагать равной температуре катода, умноженной на коэффициент снижения магнитного поля  $B_k/B_0$  в области между катодом и входным резонатором),  $m$  – масса электрона,  $V_0$  – скорость дрейфа луча,  $\beta_e = \omega/V_0$  и  $\beta_c = \omega_c/V_0$  – фазовые постоянные распространения на частоте сигнала и циклотронной частоте соответственно.

Шумовая температура, связанная с разбросом продольных скоростей электронов на длине дрейфа луча  $l_0$ , определена в [35,12] следующим образом:

$$T_{ш.БЦВ}(l_0) = K_{п.БЦВ}(l_0) \cdot T_{ш}(0) + [1 - K_{п.БЦВ}(l_0)] \cdot T_{ш.БЦВ}, \quad (2.43)$$

где  $T_{ш}(0)$  – шумовая температура, определяемая мощностью шума, поступающего в БЦВ во входном резонаторе;  $T_{ш.БЦВ}$  – шумовая температура, обусловленная собственной шумовой энергией БЦВ электронного луча. Если затухание на длине  $l_0$  отсутствует ( $K_{п.БЦВ} = 1$ ), то шумовая температура БЦВ на конце участка дрейфа стремится к  $T_{ш}(0)$ . В случае большого затухания ( $K_{п.БЦВ} \rightarrow 0$ ) шумовая температура БЦВ на конце участка дрейфа стремится к собственной температуре БЦВ  $T_{ш.БЦВ}$ .

В связи с тем, что конструктивная длина между центрами входного и выходного резонаторов достаточно мала и даже для низкочастотных ЦЗУ обычно  $l_0 \leq 10$  мм, коэффициент передачи сигнала БЦВ с учетом разброса продольных скоростей, определяемый в соответствии с (2.42), составляет величину  $K_{п.БЦВ} \approx 0,995 \dots 1$ . Соответственно, шумовую температуру БЦВ в конце участка дрейфа можно считать равной шумовой температуре входной нагрузки, из которой шум поступает в БЦВ:  $T_{ш.БЦВ}(l_0) \approx T_{ш}(0)$ .

Оценка затухания сигнала, обусловленного различной скоростью дрейфа электронов луча на его периферии и в центре вследствие провисания электрического потенциала выполнена в [41]. Показано, что коэффициент передачи (затухание), связанный с данным механизмом, превышает 0,999 и им можно пренебречь.

#### 4) Оценка минимальной шумовой температуры ЦЗУ

Причины затухания сигнала и источники шума, указанные выше в п.п. 1) - 2) являются практически неустранимыми и обуславливают минимально возможный коэффициент шума ЦЗУ. Влияние разброса продольных скоростей электронов, рассмотренное в п.п. 3), пренебрежимо мало и не учитывается в дальнейшем. Источники шума, которые будут рассмотрены ниже в последующих пунктах, могут быть исключены конструктивно-технологическими приемами.

Рассмотрим минимально возможные шумовые параметры ЦЗУ, формируемые активными потерями сигнала во входном и выходном СВЧ трактах ЦЗУ и отражениями сигнала в них (п.п.1), а также остаточной шумовой энергией в сигнальной БЦВ (п.п.2). На рисунке 2.18 приведена эквивалентная шумовая схема ЦЗУ, учитывающая перечисленные механизмы.

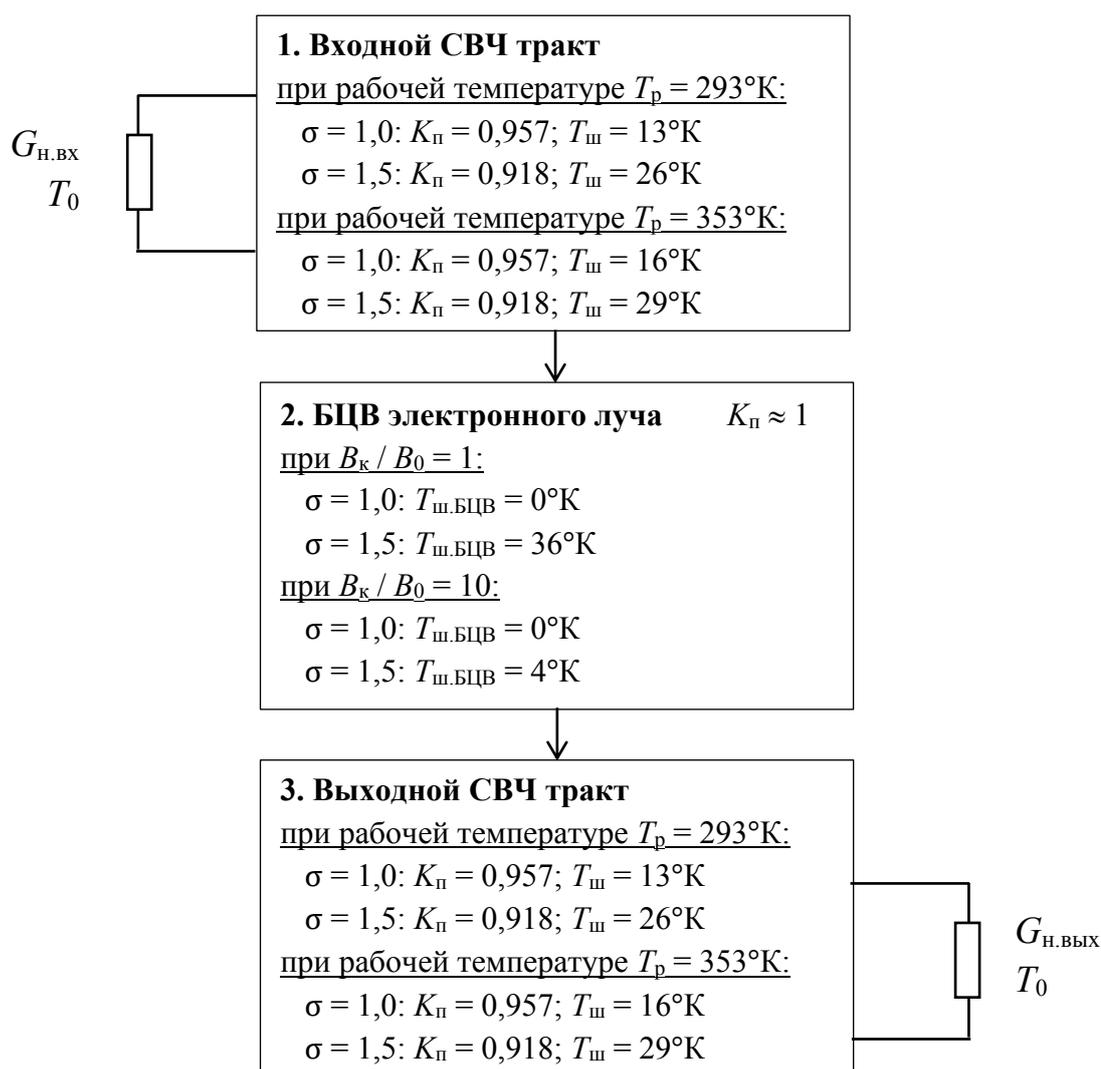


Рис. 2.18. Эквивалентная шумовая схема ЦЗУ, учитывающая шумовой вклад СВЧ трактов и остаточный шум БЦВ.  $\sigma$  – КСВН,  $K_n$  – коэффициент передачи ( $K_n \leq 1$ ),  $T_{ш}$  – эквивалентная шумовая температура.

Суммарная шумовая температура трех каскадно соединенных четырехполюсников определяется:

$$T_{ш,\Sigma} = T_{ш1} + \frac{T_{ш2}}{K_{n1}} + \frac{T_{ш3}}{K_{n1}K_{n2}}, \quad (2.44)$$

где  $T_{ши}$  – шумовая температура  $i$ -го каскада,  $K_{ni}$  – коэффициент передачи соответствующего каскада,  $K_n = 1/L$  (2.39).

Таким образом, в соответствии с (2.44) суммарная минимальная шумовая температура ЦЗУ составит:

- без использования механизма «охлаждения» луча в спадающем магнитном поле (при  $B_k / B_0 = 1$ ):

- при температуре СВЧ трактов 20°С в точках с КСВН  $\sigma = 1,0$ :

$$T_{ш} = 27^{\circ}\text{К}, \quad K_{ш} = 0,4 \text{ дБ (при полном удалении шума из БЦВ луча);}$$

- при температуре СВЧ трактов 20°С в точках с КСВН  $\sigma = 1,5$ :

$$T_{ш} = 94^{\circ}\text{К}, \quad K_{ш} = 1,2 \text{ дБ;}$$

- при температуре СВЧ трактов 80°С в точках с КСВН  $\sigma = 1,0$ :

$$T_{ш} = 33^{\circ}\text{К}, \quad K_{ш} = 0,5 \text{ дБ (при полном удалении шума из БЦВ луча);}$$

- при температуре СВЧ трактов 80°С в точках с КСВН  $\sigma = 1,5$ :

$$T_{ш} = 100^{\circ}\text{К}, \quad K_{ш} = 1,3 \text{ дБ;}$$

- при использовании механизма «охлаждения» луча в спадающем магнитном поле при  $B_k / B_0 = 10$ :

- при температуре СВЧ трактов 20°С в точках с КСВН  $\sigma = 1,0$ :

$$T_{ш} = 27^{\circ}\text{К}, \quad K_{ш} = 0,4 \text{ дБ (при полном удалении шума из БЦВ луча);}$$

- при температуре СВЧ трактов 20°С в точках с КСВН  $\sigma = 1,5$ :

$$T_{ш} = 59^{\circ}\text{К}, \quad K_{ш} = 0,8 \text{ дБ;}$$

- при температуре СВЧ трактов 80°С в точках с КСВН  $\sigma = 1,0$ :

$$T_{ш} = 33^{\circ}\text{К}, \quad K_{ш} = 0,5 \text{ дБ (при полном удалении шума из БЦВ луча);}$$

- при температуре СВЧ трактов 80°С в точках с КСВН  $\sigma = 1,5$ :

$$T_{ш} = 65^{\circ}\text{К}, \quad K_{ш} = 0,9 \text{ дБ.}$$

Приведенные оценки значения шумовой температуры для случаев с КСВН  $\sigma = 1,0$  можно рассматривать как теоретический предел для практических конструкций: дальнейшее снижение активных потерь сигнала во входном и выходном трактах представляется затруднительным, над улучшением согласования проводимостей можно работать.

Выполним аналогичные оценки для случая КСВН  $\sigma = 1,3$  (вполне достижимый уровень по КСВН для ЦЗУ) без «охлаждения» луча в спадающем

магнитном поле: при тех же уровнях активных потерь в каждом тракте  $L_{\text{тр.а}} = 0,19$  дБ и потерь за счет КСВН  $\sigma = 1,3$   $L_{\text{КСВ}} = 0,08$  дБ суммарное ослабление в СВЧ тракте составит  $L_{\text{тр}} = L_{\text{тр.а}} + L_{\text{КСВ}} = 0,27$  дБ,  $T_{\text{ш}} = 19^\circ\text{К}$ ,  $K_{\text{п}} = 0,94$ . Шумовая температура БЦВ при КСВН  $\sigma = 1,3$  составит  $T_{\text{ш.БЦВ}} = T_{\text{к}} \cdot \Gamma^2 = 900 \cdot 0,017 = 15,3^\circ\text{К} \approx 16^\circ\text{К}$  ( $T_{\text{к}} = 900^\circ\text{К}$  – температура катода). Суммарная шумовая температура ЦЗУ составит:

- при температуре СВЧ трактов  $20^\circ\text{С}$  в точках с КСВН  $\sigma = 1,3$ :

$$T_{\text{ш}} = 56^\circ\text{К}, \quad K_{\text{ш}} = 0,76 \text{ дБ.}$$

Как можно увидеть из представленных оценок, коэффициент шума при прочих равных условиях весьма существенно меняется от уровня согласования по входу и выходу:

$$\text{при КСВН } \sigma = 1,5 \quad T_{\text{ш}} = 94^\circ\text{К} \quad K_{\text{ш}} = 1,2 \text{ дБ;}$$

$$\text{при КСВН } \sigma = 1,3 \quad T_{\text{ш}} = 56^\circ\text{К} \quad K_{\text{ш}} = 0,76 \text{ дБ.}$$

## 5) Влияние поля пространственного заряда луча

Для электронного луча круглого поперечного сечения с равномерным распределением пространственного заряда по поперечному сечению в центре масс этого сечения кулоновские поля взаимно компенсируются и, фактически, отсутствуют. Электронный луч конечного поперечного сечения ведет себя подобно нитевидному электронному лучу, не испытывающему воздействие сил пространственного заряда. Если луч не подвергается нелинейным и неоднородным воздействиям в процессе взаимодействия, то теория поперечных волн, развитая для нитевидного электронного луча, правильно отражает реальную картину (см. § 2.2).

Подобного рода взаимодействие в однородном продольном магнитном поле и в однородном поперечном ВЧ электрическом поле имеет место в резонаторе Куччия. Электронный луч, как целое, ведет себя так, как если бы весь его заряд и масса были сконцентрированы на его продольной оси

[39 -стр.961, 12 -стр.135]. Резонатор Куччия взаимодействует с электронным лучом как с целым.

В условиях продольного магнитного поля и поперечного поля пространственного заряда луча на периферийных участках поперечного сечения луча возникает дополнительное движение электронов [14,12,33] с частотами  $\omega_c'$  и  $\omega_c''$ , см. рисунок 2.19.

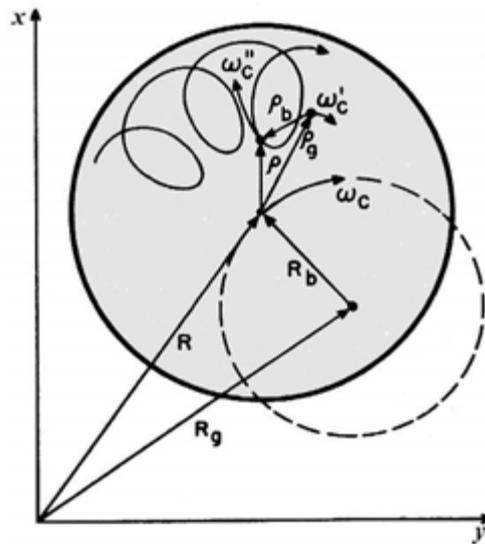


Рис. 2.19. Схема движения электрона под действием силы пространственного заряда в поперечной плоскости  $z$ .  $R$  – радиус-вектор движения центра масс луча,  $\rho$  – радиус-вектор движения отдельного электрона относительно центра масс.

Частоты внутреннего движения электронов под действием силы пространственного заряда определяются из выражений [14,12 -стр.135]:

$$\omega_c' = \frac{\omega_c}{2} \left( 1 - \sqrt{1 - 2 \left( \frac{\omega_p}{\omega_c} \right)^2} \right), \quad (2.45)$$

$$\omega_c'' = \frac{\omega_c}{2} \left( 1 + \sqrt{1 - 2 \left( \frac{\omega_p}{\omega_c} \right)^2} \right), \quad (2.46)$$

где  $\omega_p$  – плазменная частота, определяемая в соответствии с (2.2);  $\omega_c$  – циклотронная частота (2.1).

Частоты  $\omega_c'$  и  $\omega_c''$  характеризуют сложное движение электронов по эпициклоидам:  $\omega_c'$  – медленный поворот локальной орбиты вращения электрона и вращение круглого луча как целого (вращение фрагментов ленточного луча),  $\omega_c''$  – быстрое внутреннее вращение электрона (см. рис. 2.19). Радиус-вектор  $\rho_d$  характеризует медленный поворот электронных орбит и поворот всего луча круглого сечения (фрагмента ленточного луча) с частотой  $\omega_c'$  вокруг центра масс луча, радиус-вектор  $\rho_b$  отражает быстрое вращение электронов с частотой  $\omega_c''$  относительно центра масс луча. Движение центра масс луча отражает радиус-вектор  $R$ .

В однородном ВЧ поле резонаторов Куччия указанное вращение электронов не оказывает влияния на передачу сигнала с использованием БЦВ и его можно не учитывать (в приведенных литературных источниках вращение электронов с частотами  $\omega_c'$  и  $\omega_c''$  рассматривалось применительно к процессам усиления в параметрических усилителях, где оно имеет принципиальное значение вследствие неоднородности полей в усилительной структуре). Однако, если в ЦЗУ невозмущенное движение электронного луча нарушается, например, при рассеянии электронов луча на ионах остаточных газов (при ухудшении вакуума) или при некотором минимальном оседании луча на стенках пролетного канала (при ухудшении юстировки), данные процессы начинают играть существенную роль в ухудшении коэффициента шума прибора. Рассеянные электроны, при движении с частотой  $\omega_c''$ , которая попадает в рабочую полосу частот ЦЗУ или близка к ней, могут вносить существенный дополнительный шумовой вклад. Приводить к появлению «шумовых пиков» рассеянных электронов вблизи частоты  $\omega_c''$ .

#### **б) Влияние некоторых конструктивно-технологических факторов**

Негативное влияние конструкторско-технологических факторов применительно к ЦЗУ проявляется прежде всего в ухудшении шумовых параметров устройства. Как указывалось выше, коэффициент шума – это

наиболее чувствительный и сложный для производственного процесса параметр, который, как правило, не имеет значительных запасов относительно нормы, установленной в технических условиях на изделие.

Один из важнейших технологических факторов при производстве ЦЗУ – это необходимость высокого уровня вакуума в откачанном устройстве и высокой степени обезгаживания внутренних поверхностей вакуумного объема. Можно сказать, что среди современных вакуумных приборов СВЧ, ЦЗУ наиболее требователен к уровню вакуума. Этому есть ряд причин:

- для формирования тонкого ленточного электронного луча в ЦЗУ используется микрокатод с молекулярно-напыленным оксидным покрытием толщиной  $\approx 1$  мкм [122]. Плотность отбираемого тока  $\approx 2$  А/см<sup>2</sup>, рабочая температура катода составляет приблизительно 600...650°С. Такой катод весьма чувствителен к уровню вакуума и составу остаточных газов с точки зрения его долговечности. Высокий уровень вакуума необходим также в связи с необходимостью минимизации ионной бомбардировки катода;
- высокий уровень вакуума в ЦЗУ необходим для обеспечения минимально возможного коэффициента шума устройства (отсутствия заметного рассеяния электронов луча на ионах и молекулах остаточных газов).

Достаточно сложным конструктивным фактором является необходимость проведения ленточного луча без оседаний через электронный зазор с поперечным размером 90...100 мкм в отдельных типах ЦЗУ. Для этого требуется обеспечить высокую соосность зазоров входного и выходного резонаторов при соответствующей соосности и однородности магнитного поля. Нарушение юстировки луча и минимальное его оседание на стенках зазора приводит к ухудшению коэффициента шума.

Еще один конструктивный фактор – коллектор, конструкция которого должна обеспечивать отсутствие вторичных и отраженных электронов в выходном резонаторе. Нарушение данного требования также приводит к ухудшению коэффициента шума.

Достаточно чувствительным фактором применительно к обеспечению низкого коэффициента шума при внешних температурных воздействиях является недостаточная линейность температурной зависимости магнитной проницаемости материала, из которого изготавливаются термошунты, призванные обеспечить стабильность уровня магнитного поля при изменении температуры окружающей среды. Изменение уровня продольного магнитного поля с изменением температуры приводит к ухудшению параметров ЦЗУ на краях рабочей полосы частот.

### 2.3.4 Устойчивость электронного луча в ЦЗУ

Для обеспечения устойчивости ленточного электронного луча в продольном однородном магнитном поле уровень индукции магнитного поля должен быть не менее Бриллюэновского, определяемого выражением [88 -стр.51, 91 -стр.269]:

$$B_{бр} = \sqrt{5,41 \cdot 10^{-7} \frac{I_1}{a_{бр} \sqrt{U_0}}}, \text{ Тл}, \quad (2.47)$$

где  $I_1$  – ток, приходящийся на единицу ширины электронного луча (А/м),  $a_{бр}$  – Бриллюэновская полутолщина ленточного луча (м),  $U_0$  – потенциал дрейфа луча (В).

В ЦЗУ продольное магнитное поле, помимо фокусировки луча, должно обеспечивать циклотронный резонанс электронов на средней частоте рабочей полосы частот  $f_0$ , т.е.  $B_c = \frac{2\pi}{\eta} f_0$  (подставив значения постоянных получим необходимый уровень индукции 35,7 мТл на 1 ГГц частоты).

Оценим достаточность уровня магнитного поля для обеспечения транспортировки электронного луча в зазоре ЦЗУ при обеспечении циклотронного резонанса для минимальной рабочей частоты, для которой разработаны ЦЗУ,  $f_0 = 2$  ГГц.

Рассмотрим вариант электронной пушки без расширения луча в спадающем от катода магнитном поле при параметрах луча с практически максимальной плотностью заряда: ток луча  $I_0 = 300$  мкА,  $U_0 = 12$  В, толщина луча без учета деформации его поперечного сечения  $a_{\text{л}} = 60$  мкм, ширина луча  $b_{\text{л}} = 1$  мм. Для подстановки в (2.47) получаем следующие значения:  $I_1 = I_0 / b_{\text{л}} = 0,3$  А/м;  $a_{\text{бр}} = a_{\text{л}} / 2 = 30$  мкм. Бриллюэновское магнитное поле составит  $B_{\text{бр}} = 39,5$  мТл.

Циклотронное магнитное поле для частоты 2 ГГц составит 71,4 мТл, что в 1,8 раза превышает минимально необходимое (Бриллюэновское) магнитное поле. С увеличением рабочей частоты ЦЗУ запас уровня магнитного поля по отношению к Бриллюэновскому пропорционально возрастает, электронный луч в ЦЗУ с рабочими частотами 4 ГГц и выше жестко удерживается магнитным полем.

Для ЦЗУ низкочастотного диапазона (ниже 4 ГГц) в целях улучшения прохождения луча и облегчения юстировки вакуумного блока ЦЗУ в магнитной системе применяется конструкция электронной пушки с расширением луча в спадающем от катода к входному резонатору магнитном поле, используется меньший ток луча и более высокий потенциал дрейфа. Это позволяет увеличить запас уровня индукции циклотронного магнитного поля по отношению к Бриллюэновскому магнитному полю.

## § 2.4 Режим защиты ЦЗУ

Основные требования к ЦЗУ при работе в режиме защиты:

- тепловая устойчивость и электрическая прочность входного СВЧ тракта, достаточные для того, чтобы обеспечить функционирование устройства без выхода его из строя;
- отсутствие пика просачивающейся на выход ЦЗУ мощности по переднему фронту мощного входного СВЧ импульса;

- предельно малое время восстановления параметров режима пропускания после окончания импульса СВЧ мощности на входе ЦЗУ;
- обеспечение необходимого уровня ослабления входной СВЧ мощности с тем, чтобы уровень просачивающейся на выход СВЧ мощности не приводил к выходу из строя последующих каскадов приемных устройств.

#### **2.4.1 Принципы работы ЦЗУ в режиме защиты**

Как уже указывалось в § 2.1, в режиме защиты, когда входная мощность ЦЗУ существенно превышает пороговый уровень, электронный луч разрушается на входе во входной резонатор под действием входной мощности (см. рис. 2.2), не нагружая входной резонатор. При этом резонатор оказывается рассогласованным с входной линией, приблизительно 90% падающей СВЧ мощности отражается от резонатора. Оставшаяся мощность рассеивается в виде тепла во входном тракте ЦЗУ. Данное пояснение отражает энергетическую составляющую режима защиты.

Для снижения тепловой нагрузки на входной тракт ЦЗУ следует уменьшать активные потери СВЧ энергии во входной линии связи, во входном вакуумном окне, а также во входном резонаторе, повышая его собственную добротность. Для ослабления тепловой нагрузки может использоваться принудительное воздушное или жидкостное охлаждение.

Электрическая прочность входного СВЧ тракта решается конструктивными мерами. Электрическая прочность также может быть повышена путем герметизации входного тракта и созданием в нем повышенного избыточного давления воздуха.

Пик просачивающейся на выход устройства мощности по переднему фронту мощного входного СВЧ импульса отсутствует в ЦЗУ в силу конструктивных особенностей. Входной и выходной СВЧ тракты ЦЗУ разделены, передача сигнала с входа на выход происходит через электронный луч. Максимальная СВЧ мощность, которую способен передать луч, определяет

пиковую мощность на выходе устройства при переходе из режима пропускания в режим защиты.

Сверхмалое время восстановления параметров режима пропускания после окончания импульса СВЧ мощности на входе ЦЗУ связано с использованием для работы ЦЗУ заряженной частицы с исключительно высокой подвижностью – электрона в вакууме.

#### 2.4.2 Ослабление входной СВЧ мощности

Входная СВЧ мощность в режиме защиты ЦЗУ должна быть понижена к выходу устройства настолько, чтобы обеспечить сохранность последующих высокочувствительных каскадов аппаратуры (МШУ). Требуемое ослабление входной СВЧ мощности происходит при ее передаче из входного резонатора в выходной в отсутствие электронного луча – мощность просачивается за счет излучения из входного резонатора в выходной через отверстие для прохождения электронного луча в смежных дисках, закрывающих резонаторы, и в разделительной секции (поз. 3, 5 на рис. 2.2). Отверстие для прохождения электронного луча во всех элементах конструкции ЦЗУ имеет запредельные размеры по отношению к длине волны электромагнитных колебаний.

Коэффициент ослабления сигнала в такого рода запредельном волноводе определяется в соответствии с [74 -стр.132] (в относительных единицах):

$$L_{з.в} = \exp \left( \frac{4\pi \cdot z}{\lambda_{кр}} \cdot \sqrt{1 - \left( \frac{\lambda_{кр}}{\lambda} \right)^2} \right), \quad (2.47)$$

где  $z$  – длина запредельного участка волновода,  $\lambda$  – длина волны электромагнитных колебаний в свободном пространстве,  $\lambda_{кр}$  – критическая длина волны,  $\lambda_{кр} = 2a$  при соответствующем типе возбуждения волны  $H_{10}$ ,  $a$  – широкая стенка запредельного волновода.

Как было показано в [41], для увеличения ослабления входной мощности, просачивающейся на выход ЦЗУ в режиме защиты, целесообразно в

разделительной секции (поз. 5 на рис. 2.2) вдоль оси щели для прохождения электронного луча расположить несколько радиальных линий, закороченных на расстоянии приблизительно четверти длины волны от оси щели (см. рисунок 2.20). Такая линия представляет собой цилиндрическую полость, ось которой совпадает с осью щели. Высота цилиндрической полости вдоль оси щели достаточно мала, но поскольку радиальный размер полости близок к четверти длины волны, волновое сопротивление щели в области радиальной линии будет скачкообразно изменяться и, таким образом, способствовать увеличению ослабления сигнала в щели.

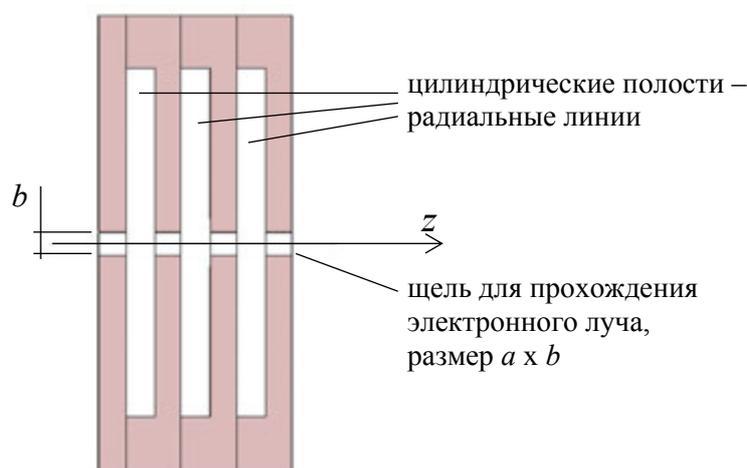


Рис. 2.20. Разделительная секция с тремя радиальными линиями.

Влияние поперечных радиальных линий на ослабление просачивающегося сигнала через разделительную секцию показано на рисунке 2.21 для диапазона длин волн 8 мм, приведены экспериментальные данные [41].

Существенное влияние на ослабление сигнала в разделительной секции оказывает эффективность возбуждения электромагнитных колебаний на входе в щель ВЧ электрическим полем в зазоре между ламелями входного резонатора – т.е. расстояние между торцами ламелей резонатора и щелью в диске, закрывающем резонатор со стороны разделительной секции.

Указанные здесь параметры ослабления сигнала могут быть достаточно точно рассчитаны с использованием систем 3D-электромагнитного моделирования.

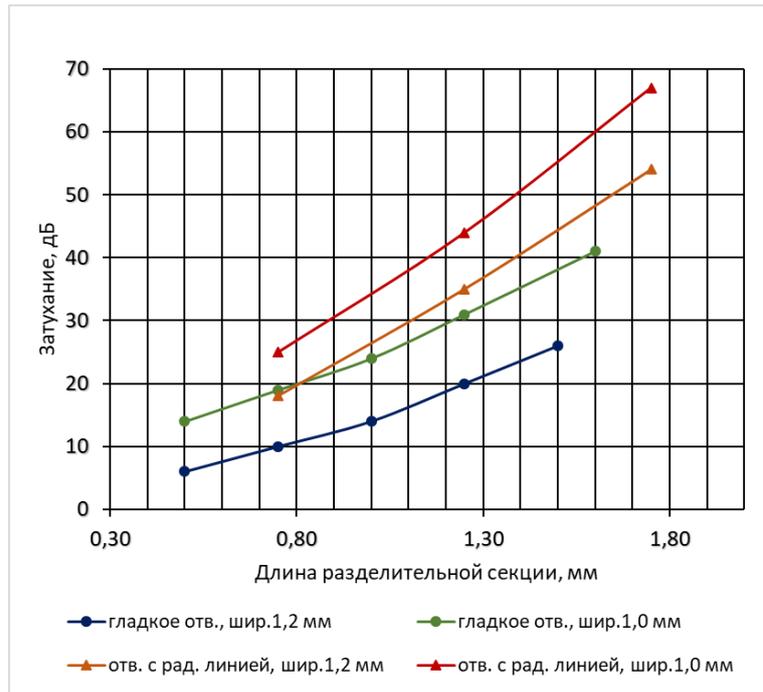


Рис. 2.21. Влияние радиальной линии диаметром 3,5 x 0,25 мм на ослабление просачивающегося сигнала через разделительную секцию ЦЗУ на частоте 34,5 ГГц. Размеры щели для луча  $a \times b$ : 1,0x0,2 мм и 1,2x0,2 мм. Гладкое отверстие – щель без радиальных линий. Длина разделительной секции с радиальными линиями: 0,75 мм – 1 радиальная линия; 1,25 мм – 2 радиальные линии; 1,75 мм – 3 радиальные линии.

В практических конструкциях ЦЗУ ослабление входной мощности в режиме защиты составляет 60...80 дБ и более в см-диапазоне длин волн.

## § 2.5 Заключение

Основные принципы работы циклотронного защитного устройства свидетельствуют о том, что ЦЗУ – это оригинальный и, в определенной степени, уникальный электровакуумный СВЧ прибор, предназначенный для защиты входных каскадов приемников РЛС от высокого или повышенного уровня СВЧ мощности. Принципы работы и конструктивные особенности ЦЗУ объясняют и обуславливают исключительные качества устройства:

- работа прибора основана на взаимодействии с быстрой циклотронной волной (БЦВ) электронного луча, шумовая мощность быстрой волны может

быть удалена из луча в пассивном устройстве (резонаторе). Этим объясняется низкий уровень шума и высокая чувствительность ЦЗУ;

– механизм поперечного взаимодействия ВЧ электрического сигнала с электронным лучом в однородном продольном магнитном поле не приводит к образованию сгустков заряда и связанным с этим нелинейным процессам. Для ЦЗУ характерна высокая линейность (до уровня единиц мВт в см диапазоне длин волн);

– сверхмалое время восстановления параметров ЦЗУ связано с использованием заряженной частицы с максимально высокой подвижностью – электрона в вакууме;

– в ЦЗУ отсутствуют пики просачивающейся мощности, характерные для газоразрядных и полупроводниковых защитных устройств. При работе ЦЗУ в режиме пропускания передача сигнала с входа на выход осуществляется через электронный луч, при переходе устройства в режим защиты максимальная мощность, способная попасть на выход, определяется энергетической емкостью луча;

– ЦЗУ обеспечивает защиту последующих каскадов в выключенном состоянии – без электропитания отсутствует электронный луч, в ЦЗУ реализуется режим защиты.

Рабочая полоса частот ЦЗУ определяется частотами, в пределах которых выполняется на приемлемом уровне условие комплексно-сопряженного согласования проводимостей внешней нагрузки, резонатора связи и электронного луча в зазоре резонатора. Расширение рабочей полосы частот требует уменьшения угла пролета электронами рабочего зазора и увеличения характеристического сопротивления резонатора.

Частотная избирательность ЦЗУ связана с тем, что активная и реактивная составляющие электронной проводимости имеют пульсирующий по частоте характер, спадающий при отстройке от частоты циклотронного резонанса. Это приводит к рассогласованию проводимостей и увеличению ослабления

передаваемого сигнала. Более того, активная составляющая электронной проводимости на определенных частотах достигает нуля.

Нули активной проводимости электронного луча, возбужденного на БЦВ, на частотах, соответствующих отстройке по углу пролета от циклотронного резонанса на  $2\pi n$  радиан, где  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ , обусловлены тем, что «спираль» центра масс последовательности поперечных сечений электронного луча на длине зазора резонатора имеет целое количество витков, что не позволяет наводить в резонаторе ВЧ ток при вращении указанной спирали.

Коэффициент шума ЦЗУ не связан с передачей шумов из других типов поперечных волн, как это имеет место в усилителях БЦВ типа ЭСУ или ЭПУ, т.к. в ЦЗУ связи БЦВ с другими типами поперечных волн не возникает. Основные источники шума в ЦЗУ – это ослабление сигнала вследствие активных потерь и отражений во входном и выходном СВЧ трактах – резонаторах, линиях связи и вакуумных окнах, а также остаточная шумовая энергия в сигнальной БЦВ, связанная с горячим катодом, которая не полностью удалена из луча во входном резонаторе. Для максимального удаления шумовой энергии из сигнальной БЦВ входной тракт ЦЗУ должен быть нагружен на согласованную нагрузку.

Разброс скоростей электронов не оказывает заметного влияния на ослабление сигнала и коэффициент шума ЦЗУ.

Поле пространственного заряда приводит к деформации поперечного сечения луча, что следует учитывать при конструировании устройства.

Вследствие воздействия поля пространственного заряда колебания рассеянных электронов происходят на частоте несколько ниже циклотронной частоты и в том случае, если попадают в рабочую полосу частот, формируют «шумовые пики», ухудшающие коэффициент шума ЦЗУ.

Уровень продольного магнитного поля, обеспечивающий циклотронный резонанс на рабочей частоте ЦЗУ, при типичных параметрах электронного луча превышает уровень Бриллюэновского магнитного поля приблизительно в два раза на частоте 2 ГГц и пропорционально возрастает с увеличением рабочей

частоты ЦЗУ. Это обеспечивает жесткое удержание электронного луча в пролетном канале для ЦЗУ диапазона частот 4 ГГц и выше, для ЦЗУ диапазона частот менее 4 ГГц следует принимать меры по снижению плотности заряда электронного луча и обеспечению повышенного запаса по превышению рабочего уровня магнитного поля относительно Бриллюэновского.

Передача сигнала в ЦЗУ линейна при возрастании входной СВЧ мощности до уровня, при котором начинается оседание электронов на стенках пролетного канала ( $\sim 0,5 \dots 5$  мВт).

Режим защиты реализуется в ЦЗУ автономно, при увеличении входной СВЧ мощности до некоторого порогового уровня, при котором электронный луч полностью разрушается и перестает транслировать сигнал из входного резонатора в выходной. Ослабление входной мощности в режиме защиты определяется ослаблением при излучении ее из входного резонатора в выходной через щель для прохождения электронного луча с запредельными размерами.

Тепловая нагрузка ЦЗУ в режиме защиты составляет приблизительно 10% от падающей СВЧ мощности, т.к.  $\approx 90\%$  входной СВЧ мощности отражается от входного резонатора, не нагруженного электронным лучом. Отраженная СВЧ мощность должна поглощаться входным ферритовым вентилем или нагрузкой циркулятора.

Для существенного увеличения ослабления входной мощности, просачивающейся на выход ЦЗУ в режиме защиты, целесообразно в разделительной секции (поз. 5 на рис. 2.2) вдоль оси щели для прохождения электронного луча расположить несколько радиальных линий, закороченных на расстоянии приблизительно четверти длины волны от оси щели.

### Глава 3

## РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ ЦЗУ

В данной главе рассматривается взаимосвязь основных параметров ЦЗУ с конструктивными особенностями и электрическими режимами работы устройства, его составных частей.

Один из основных параметров ЦЗУ – рабочая полоса частот. Теоретическое рассмотрение и обоснование полосовых параметров устройства в классическом варианте резонаторов Куччия достаточно подробно изложены в п. 2.3.1. Для дополнительного увеличения рабочей полосы частот может приниматься ряд специальных мер, рассмотренных в том числе в работах [80,81,77,92-97]. Прежде всего – это введение во входной и выходной тракты дополнительных реактивных контуров и соответствующее изменение степени связи резонаторов с ВЧ линией с целью расширения полосы комплексно-сопряженного согласования проводимостей.

Увеличение рабочей полосы частот ЦЗУ можно рассматривать, как отдельную, достаточно сложную и трудоемкую задачу, которая к настоящему времени не вполне решена и по этой причине не рассматривается в данной диссертационной работе. Тем более, что при выполнении почти всех опытно-конструкторских работ, указанных в пункте **Введения** «Практическая значимость и внедрение результатов работы» (кроме ОКР «Шлюз»), задача по разработке особых мер, направленных на существенное увеличение рабочей полосы частот, не стояла и не решалась.

### § 3.1 Вакуумный блок ЦЗУ

Основные элементы вакуумного блока типичного ЦЗУ приведены на рисунке 3.1. Разрез выполнен по плоскости электронного зазора в резонаторах, на рисунках показана ширина ламелей входного и выходного резонаторов, соответствующая ширине ленточного электронного луча.

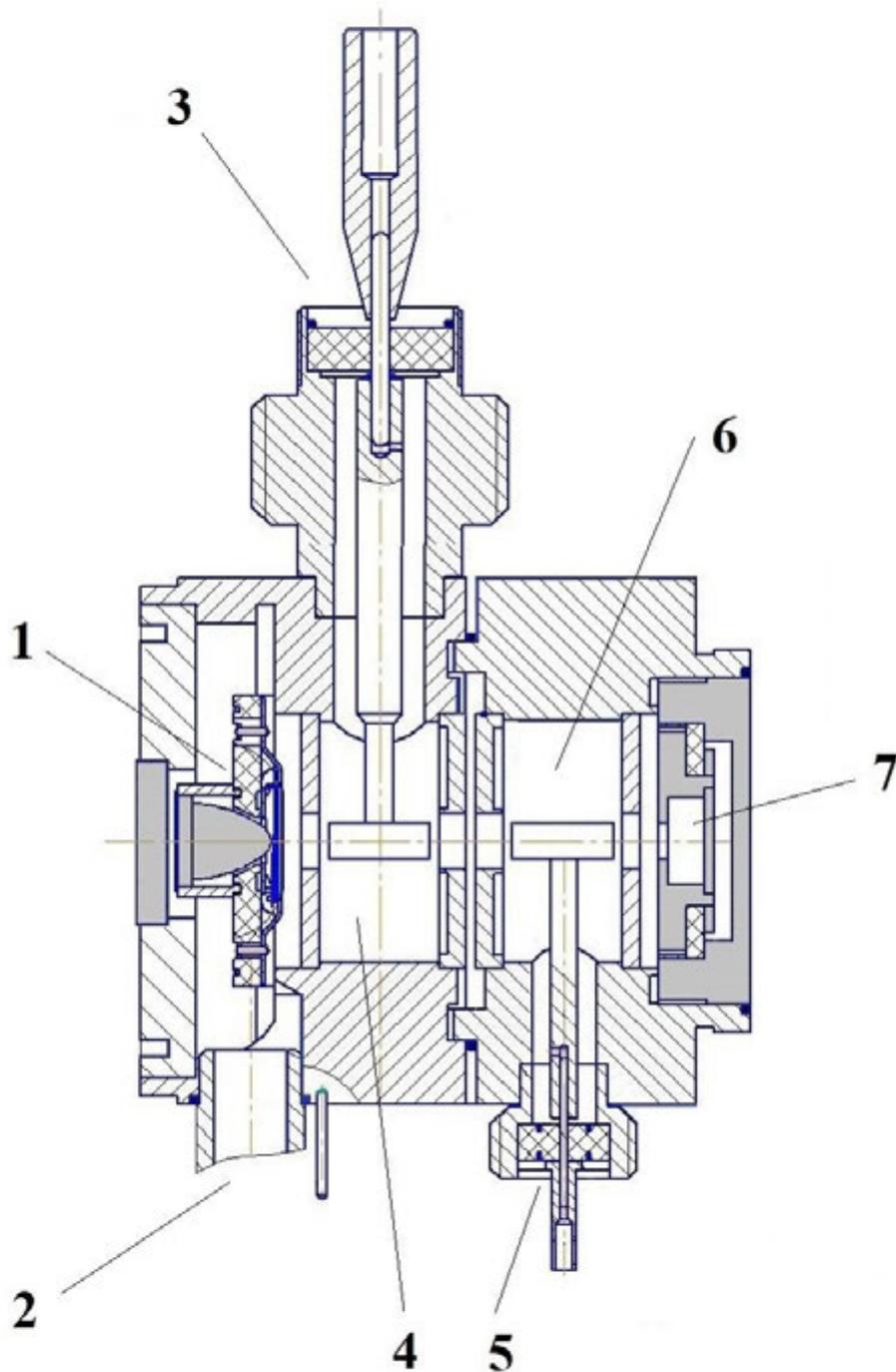


Рис. 3.1. Разрез вакуумного блока ЦЗУ. Цифрами на рисунке обозначены: 1 – электронная пушка, 2 – штенгель для откачки, 3 – коаксиальный участок входной СВЧ линии, 4 – входной объемный резонатор, 5 – выходная коаксиальная СВЧ линия, 6 – выходной объемный резонатор, 7 – коллектор. Сплошным серым цветом выделены элементы конструкции из ферромагнитного материала.

Входная и выходная коаксиальные линии содержат вакуумно-плотные керамические изоляторы в виде шайб. В электронную пушку встроены ферромагнитный концентратор магнитного поля в области катода в форме половины эллипсоида вращения.

### **§ 3.2 Коэффициент шума ЦЗУ**

Основные факторы, влияющие на коэффициент шума или шумовую температуру ЦЗУ, перечислены в п. 2.3.3. Для реализации оценок шумовой температуры, приведенных в п. 2.3.3 - 4), необходимо исключить влияние таких факторов, как рассеяние электронов на ионах, атомах и молекулах остаточных газов, оседание луча на стенках пролетного канала, вылет вторичных электронов из области коллектора, температурную нестабильность магнитного поля.

Рассмотрим более подробно влияние на шумовые параметры рассеянных электронов и вторичных электронов из области коллектора.

#### **3.2.1 Влияние рассеянных электронов на коэффициент шума**

При недостаточно высоком уровне вакуума в объеме ЦЗУ некоторое количество электронов луча рассеивается на ионах, атомах и молекулах остаточных газов, присутствующих в вакуумном объеме устройства. По некоторым оценкам рабочий уровень вакуума в ЦЗУ составляет  $\sim 10^{-7} \dots 10^{-8}$  мм рт. ст., при ухудшении вакуума относительно указанного уровня в области электронного луча образовывается значительное количество рассеянных электронов.

Рассеянные электроны могут также возникать и по другой причине – как отраженные или вторичные электроны при оседании незначительной части электронного луча на стенках пролетного канала. Из опыта настройки ЦЗУ следует, что оседание 3...4 % и более от тока луча на корпус (стенки пролетного канала в резонаторах и разделительной секции) практически всегда сопровождается значительным увеличением коэффициента шума. Оседание

не более 1...2 % от тока луча может не приводить к заметному росту коэффициента шума, в данном случае играет роль место, в котором происходит оседание: если оседание происходит в выходном диске выходного резонатора, то рассеянные электроны увлекаются повышенным потенциалом коллектора и не наводят шумовых токов в выходном резонаторе. Оседание электронов луча в зазоре выходного резонатора всегда приводит к увеличению коэффициента шума. Незначительное оседание луча во входном резонаторе может как ухудшать коэффициент шума, так и не влиять на него, – в зависимости от дальнейшего движения рассеянных электронов – при смещении рассеянных электронов в выходной резонатор их шумовые колебания приведут к увеличению коэффициента шума, оседание электронов на корпус до влета в выходной резонатор не приведет к заметному увеличению коэффициента шума.

Появление рассеянных электронов в луче приводит к росту коэффициента шума по двум причинам: во-первых, ухудшается шумовая балансировка луча, достигнутая во входном резонаторе при взаимодействии с согласованной внешней нагрузкой (п. 2.3.3 - 2)); а во-вторых, и это преобладающий фактор, циклотронные колебания рассеянных электронов являются шумовыми, наводят в выходном резонаторе шумовые токи и, таким образом, являются источником собственной шумовой мощности ЦЗУ [98].

Рассматривая влияние рассеянных электронов на коэффициент шума следует выделить два основных аспекта:

- 1) диаметр вращательных колебаний электронов в продольном магнитном поле;
- 2) частота колебаний электронов.

### **1) Диаметр вращательных колебаний рассеянных электронов**

С точки зрения влияния на коэффициент шума диаметр циклотронного вращения рассеянных электронов важен по той причине, что если он близок к величине электронного зазора в резонаторах ЦЗУ или превосходит ее, то такие электроны будут практически сразу оседать на ламелях и не будут оказывать значительного влияния на коэффициент шума. Рассеянные электроны с

амплитудой циклотронных колебаний существенно меньше поперечного размера электронного зазора могут достаточно долго существовать в объеме электронного луча и наводить шумовые токи в выходном резонаторе ЦЗУ.

Оценим радиус  $R$  поперечного циклотронного вращения рассеянного электрона в предположении упругого столкновения с частицей остаточного газа с направлением движения после соударения перпендикулярно продольному магнитному полю. При этом электрон будет совершать циклотронное вращение с частотой  $\omega_c$  (без учета влияния поля пространственного заряда).

Будем предполагать, что ЦЗУ работает с предельно малыми мощностями на входе, при которых, собственно, и важен низкий коэффициент шума. В этом случае энергия электрона до столкновения определяется потенциалом дрейфа луча  $U_0$ , после столкновения энергия переходит в энергию вращения с частотой  $\omega_c$  и радиусом  $R$ :  $eU_0 = \frac{1}{2}m\omega_c^2R^2$ , отсюда радиус вращения электрона:

$$R = \frac{1}{\omega_c} \sqrt{2\eta U_0}, \quad (3.1)$$

где  $\eta = e/m$  – отношение заряда электрона к его массе.

Радиус циклотронного вращения подобного рассеянного электрона при типичном значении  $U_0 = 20$  В составит:

- для частоты 3 ГГц:  $R \approx 140$  мкм, диаметр  $2R \approx 280$  мкм;
- для частоты 9 ГГц:  $R \approx 47$  мкм, диаметр  $2R \approx 94$  мкм.

Данные оценки сделаны для случая, когда угол рассеяния составляет  $90^\circ$  по отношению к продольной оси электронного луча и продольного магнитного поля. В случае угла рассеяния  $45^\circ$  амплитуда поперечных колебаний в плоскости  $xOy$  (перпендикулярно продольной оси луча) будет меньше в  $\sin 45^\circ = 0,707$  раз, т.е. можно полагать, что диаметр циклотронного вращения наиболее существенной доли рассеянных электронов при  $U_0 = 20$  В приблизительно составляет:

- для частоты 3 ГГц: диаметр  $2R \approx 200 \dots 280$  мкм;
- для частоты 9 ГГц: диаметр  $2R \approx 65 \dots 100$  мкм.

В данном случае интерес представляют электроны с углом рассеяния близким к  $90^\circ$ , т.к. подобные электроны теряют после столкновения продольную скорость и могут накапливаться в зазоре резонатора, являясь источником шума в ЦЗУ. Электроны с малыми углами рассеяния относительно продольного магнитного поля сохраняют продольную скорость и быстро уходят из электронного зазора.

Таким образом, для ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц с типичным поперечным размером зазора резонатора  $d = 200 \dots 230$  мкм и потенциалом дрейфа луча  $U_0 \geq 20$  В рассеянные электроны не способны в течение какого-либо существенного времени совершать колебания в зазоре резонатора, т.к. диаметр их циклотронного вращения приблизительно равен или превышает поперечный размер зазора резонатора  $d$ .

В ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц с зазором  $d = 130 \dots 140$  мкм, потенциалом дрейфа  $U_0 \approx 20$  В и менее, рассеянные электроны являются стабильным источником шума в форме «шумовых вакуумных пиков» на частотах их колебаний.

Аналогичная ситуация имеет место с рассеянными электронами, причиной возникновения которых явилось оседание электронного луча на стенке пролетного канала.

## 2) Частота колебаний рассеянных электронов

Частоты колебаний рассеянных электронов внутри луча  $\omega_c'$  и  $\omega_c''$  в условиях влияния поля пространственного заряда луча (см. п. 2.3.3 -5)) определяются выражениями (2.45) – (2.46). Характеристика поля пространственного заряда в данных выражениях связана с плазменной частотой  $\omega_p$ , циклотронная частота определяется диапазоном рабочих частот ЦЗУ.

Определим плазменную частоту (выражение (2.2)) для двух практических случаев плотности пространственного заряда луча ЦЗУ – низкой и высокой.

Плотность пространственного заряда выражается:

$$\rho_e = \frac{I_0}{V_0 \cdot S_{\text{л}}}, \quad (3.2)$$

где  $I_0$  – ток луча,  $V_0 = \sqrt{2\eta U_0}$  – скорость и  $U_0$  – потенциал дрейфа луча,  $S_{\text{л}}$  – площадь поперечного сечения луча ( $S_{\text{л}} = a_{\text{л}} \cdot b_{\text{л}}$ ,  $a_{\text{л}}$  и  $b_{\text{л}}$  – толщина и ширина ленточного луча соответственно).

Низкая плотность пространственного заряда луча  $\rho_e$ :

- ток луча  $I_0 = 150$  мкА,
  - потенциал дрейфа  $U_0 = 25$  В,
  - поперечное сечение луча  $S_{\text{л}} = a_{\text{л}} \cdot b_{\text{л}} \approx 0,06 \cdot 1,5$  мм<sup>2</sup>,
- $$\rho_e \approx 5,62 \cdot 10^{-4} \text{ Кл/м}^3, \quad \omega_p \approx 3,34 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}, \quad f_p = \omega_p / 2\pi \approx 532 \text{ МГц.}$$

В этом случае частоты внутренних колебаний электронов в соответствии с выражениями (2.45) – (2.46) составляют:

- для частоты  $f_0 = 3,0$  ГГц:
  - $\omega_c' = 3,01 \cdot 10^8$  рад/с,  $f_c' \approx 47,9$  МГц;
  - $\omega_c'' = 1,86 \cdot 10^{10}$  рад/с,  $f_c'' \approx 2,952$  ГГц.
- для частоты  $f_0 = 9,0$  ГГц:
  - $\omega_c' = 9,90 \cdot 10^7$  рад/с,  $f_c' \approx 15,8$  МГц;
  - $\omega_c'' = 5,65 \cdot 10^{10}$  рад/с,  $f_c'' \approx 8,984$  ГГц.

Высокая плотность пространственного заряда луча  $\rho_e$ :

- ток луча  $I_0 = 250$  мкА,
  - потенциал дрейфа  $U_0 = 12$  В,
  - поперечное сечение луча  $S_{\text{л}} = a_{\text{л}} \cdot b_{\text{л}} \approx 0,02 \cdot 0,7$  мм<sup>2</sup>,
- $$\rho_e \approx 8,69 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^3, \quad \omega_p \approx 1,31 \cdot 10^{10} \text{ с}^{-1}, \quad f_p = \omega_p / 2\pi \approx 2,092 \text{ ГГц.}$$

При высокой плотности пространственного заряда луча частоты внутренних колебаний электронов составляют:

- для частоты  $f_0 = 3,0$  ГГц:
  - $\omega_c' = 7,87 \cdot 10^9$  рад/с,  $f_c' \approx 1,252$  ГГц;

$$\omega_c'' = 1,10 \cdot 10^{10} \text{ рад/с}, \quad f_c'' \approx 1,748 \text{ ГГц.}$$

- для частоты  $f_0 = 9,0 \text{ ГГц}$ :

$$\omega_c' = 1,57 \cdot 10^9 \text{ рад/с}, \quad f_c' \approx 250 \text{ МГц};$$

$$\omega_c'' = 5,50 \cdot 10^{10} \text{ рад/с}, \quad f_c'' \approx 8,750 \text{ ГГц.}$$

Как следует из приведенных оценок, частота внутренних медленных колебаний электронов  $f_c'$  (медленного поворота локальной орбиты вращения электрона) не представляет практического интереса с точки зрения коэффициента шума ЦЗУ в рабочей полосе частот.

Частота быстрых колебаний  $f_c''$ , напротив, является важной шумовой характеристикой ЦЗУ. При низкой плотности пространственного заряда электронного луча частоты быстрых внутренних колебаний электронов как для низкочастотных ЦЗУ ( $f_0 \approx 3,0 \text{ ГГц}$ ), так и для высокочастотных ЦЗУ ( $f_0 \approx 9,0 \text{ ГГц}$ ) находятся вблизи собственно циклотронной частоты, определяемой уровнем магнитного поля устройства, т.е. вблизи средней частоты рабочей полосы частот.

При высокой плотности пространственного заряда луча частота быстрых колебаний электронов  $f_c''$  не попадет в рабочую полосу частот низкочастотных ЦЗУ (в приведенных оценках отстоит более, чем на 40% от  $f_0$ ). Для высокочастотных ЦЗУ  $f_c''$  существенно ближе к центральной частоте устройства (отстоит приблизительно на 2,8% от  $f_0$ ), находится в рабочей полосе частот.

Быстрые внутренние колебания рассеянных электронов при достаточном их количестве формируют пики шумовой энергии на частоте  $f_c''$ . Если данная частота находится в пределах рабочей полосы частот ЦЗУ коэффициент шума устройства значительно возрастает. С другой стороны, если частота  $f_c''$  находится за пределами рабочей полосы частот ЦЗУ, то такое устройство менее критично к уровню вакуума.

### 3) Экспериментальные результаты

Рассмотрим экспериментальные кривые измеренного коэффициента шума ЦЗКУ диапазона частот 9 ГГц – рисунок 3.2 [98].

МШУ, подсоединенный к выходу ЦЗУ имеет коэффициент шума 1 дБ и коэффициент усиления приблизительно 23...24 дБ. Электрический режим ЦЗУ: ток луча  $I_0 = 200$  мкА; потенциал дрейфа  $U_0 = 12,0$  В; ориентировочно поперечное сечение луча  $S_{\perp} = a_{\perp} \cdot b_{\perp} \approx 0,04 \cdot 1,2$  мм<sup>2</sup>. Исходя из приведенных данных, плотность пространственного заряда луча составляет промежуточную величину относительно указанных выше «низкой» и «высокой» плотностей пространственного заряда:

$$\rho_e \approx 2,03 \cdot 10^{-3} \text{ Кл/м}^3, \quad \omega_p \approx 6,35 \cdot 10^9 \text{ с}^{-1}, \quad f_p = \omega_p / 2\pi \approx 1,01 \text{ ГГц.}$$

Для частоты  $f_0 = f_c = 8,935$  ГГц аналогично предыдущим вычислениям получаем:

$$\omega_c'' = 5,578 \cdot 10^{10} \text{ рад/с}, \quad f_c'' \approx 8,877 \text{ ГГц.}$$

Данная расчетная оценка хорошо согласуется с частотой шумового «вакуумного» пика на кривой б) рисунка 3.2 (частота, отмеченная маркером 4, составляет 8,8815 ГГц). Ошибка может быть связана как с неверной оценкой площади поперечного сечения луча  $S_{\perp}$ , так и неточным равенством между средней частотой рабочей полосы частот и циклотронной частотой:  $f_0 \approx f_c$ .

Кривые в) и г) на рисунке 3.2 демонстрируют смещение «вакуумного» пика по частоте при изменении плотности пространственного заряда луча путем изменения пролетного потенциала  $U_0$ :

- кривая в) – снижение потенциала до  $U_0 = 10,0$  В, увеличение плотности заряда луча, смещение вакуумного пика по частоте вниз (маркер 4);
- кривая г) – повышение потенциала до  $U_0 = 14,0$  В, уменьшение плотности заряда луча, смещение «вакуумного» пика по частоте вверх (маркер 4).

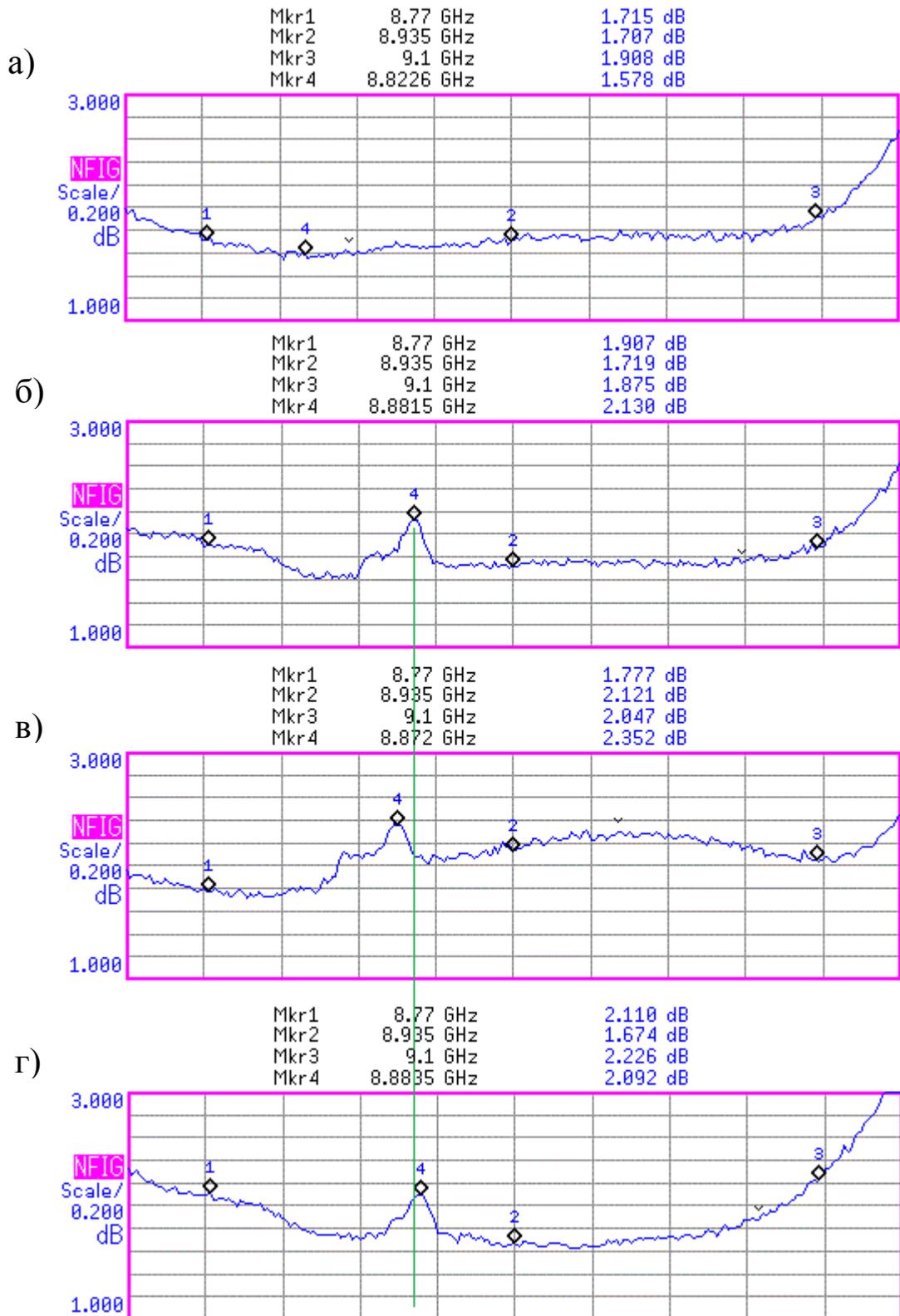


Рис. 3.2. Частотные зависимости коэффициента шума ЦЗУ+МШУ диапазона частот 9 ГГц ( $K_{ш.МШУ} = 1,0$  дБ): а) без «вакуумного» пика рассеянных электронов; б) «вакуумный» пик (маркер 4) при том же режиме электронного луча; в) «вакуумный» пик при увеличенной плотности объемного заряда луча; г) «вакуумный» пик при пониженной плотности объемного заряда луча.

Форма шумового «вакуумного» пика на кривых б) и в) рис. 3.2 имеет дополнительный примыкающий меньший пик на частоте приблизительно на 30 МГц ниже основного пика. Это может быть связано с тем, что вследствие ленточной формы электронного луча в некоторых его участках по ширине начинают формироваться отдельные шнуры с различной плотностью заряда [88 -стр.302]. На кривой г) рис. 3.2 дополнительный меньший пик отсутствует, по-видимому вследствие того, что потенциал дрейфа луча выше, общее время пролета луча меньше, формирование отдельных шнуров в луче менее выражено и не заметно применительно к коэффициенту шума при данном времени пролета.

Ухудшение коэффициента шума на частотах в стороне от «вакуумных» пиков – кривые в) и г) – связано с неоптимальным электрическим режимом по потенциалу дрейфа в сравнении с кривыми а) и б) на рис. 3.2.

При измерениях коэффициента шума «вакуумный» пик формировался путем некоторого ухудшения уровня вакуума в приборе при нагревании электроразрядного насоса, входящего в конструкцию ЦЗУ, газовой горелкой.

Практика изготовления ЦЗУ диапазона частот 4,0 ГГц с поперечным размером зазора в резонаторах  $d \approx 170$  мкм и потенциалом дрейфа луча  $U_0 \approx 14$  В свидетельствует о том, что «вакуумные» пики в данном типе устройств практически не встречаются. Следует отметить, что изделие имеет достаточно узкую полосу рабочих частот – 150 МГц.

Оценим частоту быстрых внутренних колебаний рассеянных электронов  $f_c''$  при следующих типичных параметрах луча: ток луча  $I_0 = 200$  мкА, потенциал дрейфа  $U_0 = 14$  В, поперечное сечение луча  $S_{\perp} = a_{\perp} \cdot b_{\perp} \approx 0,05 \cdot 1,2$  мм<sup>2</sup>. Плотность пространственного заряда луча (3.2) составит  $\rho_e \approx 1,5 \cdot 10^{-3}$  Кл/м<sup>3</sup>,  $\omega_p \approx 5,46 \cdot 10^9$  с<sup>-1</sup> (2.2),  $f_p = \omega_p / 2\pi \approx 869$  МГц. Частота шумовых колебаний электронов под влиянием поля пространственного заряда луча  $f_c'' \approx 3,900$  ГГц (2.46) – находится за границей полосы рабочих частот ЦЗУ (3,925...4,075 ГГц) вблизи ее нижнего значения.

При этом диаметр циклотронного вращения рассеянных электронов (3.1) при пролетном потенциале  $U_0 = 14$  В составляет  $2R \approx 170 \dots 180$  мкм, т.е. равен величине электронного зазора в резонаторах  $d \approx 170$  мкм. Таким образом, рассеянные электроны сразу же оседают на стенках полетного канала и не могут накапливаться в электронном зазоре резонаторов.

Два данных фактора – частота шумовых колебаний рассеянных электронов, находящаяся несколько ниже нижней границы полосы рабочих частот, и амплитуда поперечных колебаний рассеянных электронов, приблизительно равная величине электронного зазора, способствуют предотвращению возникновения шумовых пиков в данном типе ЦЗУ.

### **3.2.2 Влияние на коэффициент шума вторичных электронов из области коллектора**

Вторичные электроны, попадающие в зазор выходного резонатора из области коллектора, состоят из упруго и неупруго отраженных электронов и «истинно» вторичных электронов – электронов, выбитых из поверхности коллектора первичными электронами. Коллектор ЦЗУ представляет собой полость, частично экранированную от магнитного поля (поз. 7, рис. 3.1). Это затрудняет вылет вторичных электронов из коллектора. Помимо этого, вылету вторичных электронов из области коллектора в зазор выходного резонатора препятствует потенциальный барьер, образованный разностью потенциалов между корпусом ЦЗУ (диском, закрывающим выходной резонатор со стороны коллектора) и собственно коллектором. Разность потенциалов корпус – коллектор обычно составляет не менее 200 В.

Вторичные электроны, попадающие в зазор выходного резонатора из области коллектора, совершают шумовые колебания с частотами преимущественно вблизи циклотронной частоты (несколько ниже циклотронной частоты вследствие влияния поля пространственного заряда луча) и являются источником собственных шумов ЦЗУ.

На рисунке 3.3 приведены частотные зависимости коэффициента шума ЦЗКУ диапазона частот 9 ГГц, в состав которого входит МШУ с коэффициентом шума 1,0 дБ при различных напряжениях коллектора  $U_{\text{кол}}$ .

- а)  $U_{\text{кол}} = 200 \text{ В}$  – номинальный режим;
- б)  $U_{\text{кол}} = 70 \text{ В}$ ;
- в)  $U_{\text{кол}} = 30 \text{ В}$ ;
- г)  $U_{\text{кол}} = 20 \text{ В}$ .

Напряжение коллектора  $U_{\text{кол}}$  подается относительно катода, при этом напряжение катод-корпус  $U_{\text{кат-корп}} = 12 \text{ В}$ .

При снижении напряжения коллектора нарушается нормальная работа коллекторного узла и снижается потенциальный барьер коллектор-корпус:

$U_{\text{кол-корп}} = U_{\text{кол}} - U_{\text{кат-корп}}$ , при этом возрастает количество вторичных электронов, поступающих из области коллектора в электронный зазор выходного резонатора. Соответственно возрастает коэффициент шума ЦЗУ.

Вследствие влияния поля пространственного заряда максимальное увеличение коэффициента шума происходит на частотах несколько ниже циклотронной частоты (маркер 2 на кривых рис. 3.3) – вблизи частоты быстрых колебаний рассеянных электронов  $f_c''$ , определяемой в соответствии с (2.46).

В некоторых типах ЦЗКУ данный эффект увеличения коэффициента шума ЦЗУ при снижении напряжения коллектора используется в качестве специального режима «увеличенной мощности шумов» для выполнения калибровки приемного тракта аппаратуры. Режим включается путем подачи специального управляющего сигнала в «Блок режимов ЦЗКУ», отвечающий за стабилизацию питающих напряжений электродов ЦЗУ и включение управляемых режимов устройства. При этом напряжение коллектора понижается до уровня, при котором коэффициент шума ЦЗКУ усредненно в полосе частот  $\pm 10 \text{ МГц}$  от средней частоты полосы рабочих частот повышается на 3 дБ (см. рисунок 3.4).

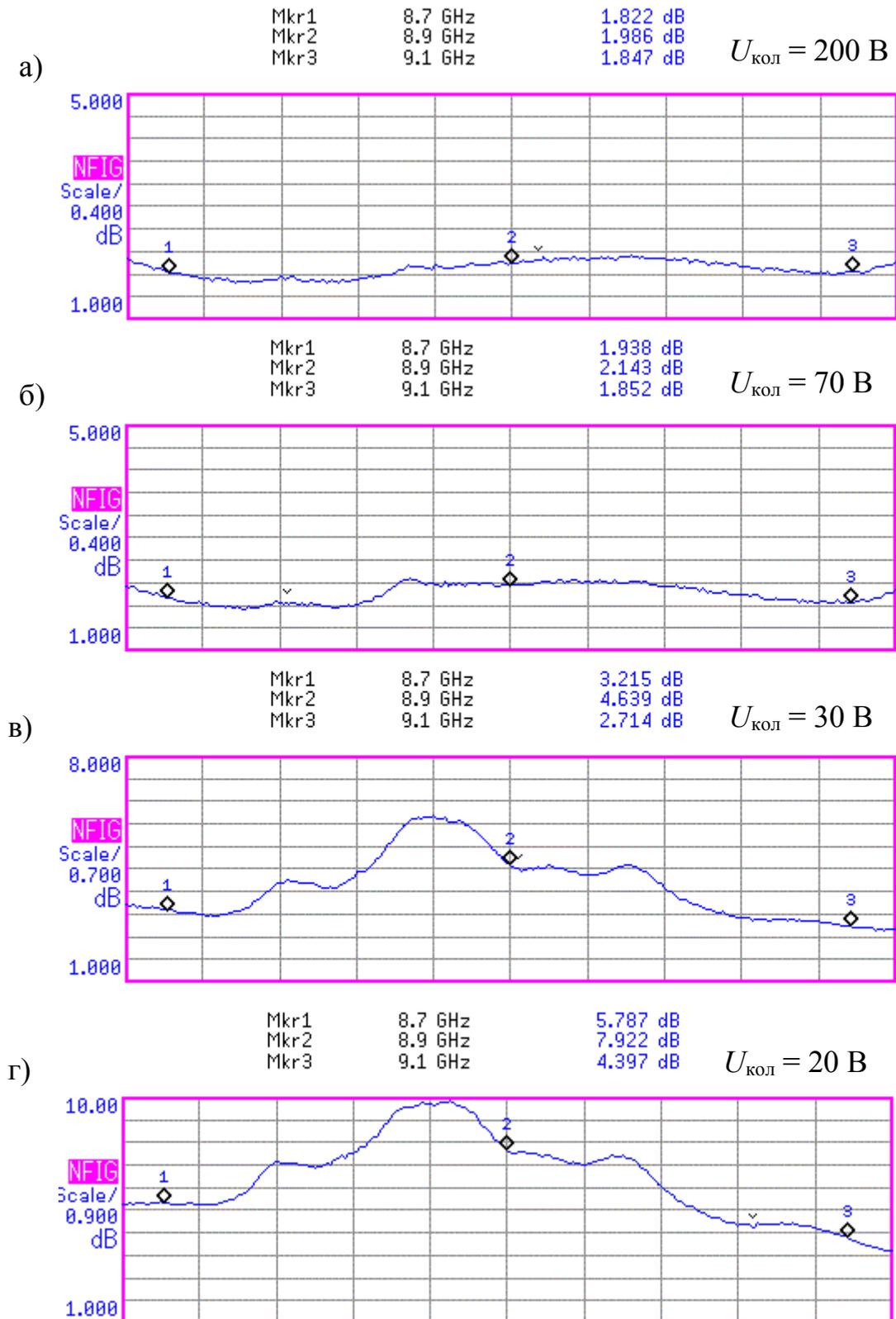


Рис. 3.3. Частотные зависимости коэффициента шума ЦЗУ+МШУ диапазона частот 9 ГГц ( $K_{\text{ш.МШУ}} = 1,0 \text{ дБ}$ ) при различных напряжениях коллектора  $U_{\text{кол}}$ :  
 а)  $U_{\text{кол}} = 200 \text{ В}$  – номинальный режим;  
 б)  $U_{\text{кол}} = 70 \text{ В}$ ; в)  $U_{\text{кол}} = 30 \text{ В}$ ; г)  $U_{\text{кол}} = 20 \text{ В}$ .

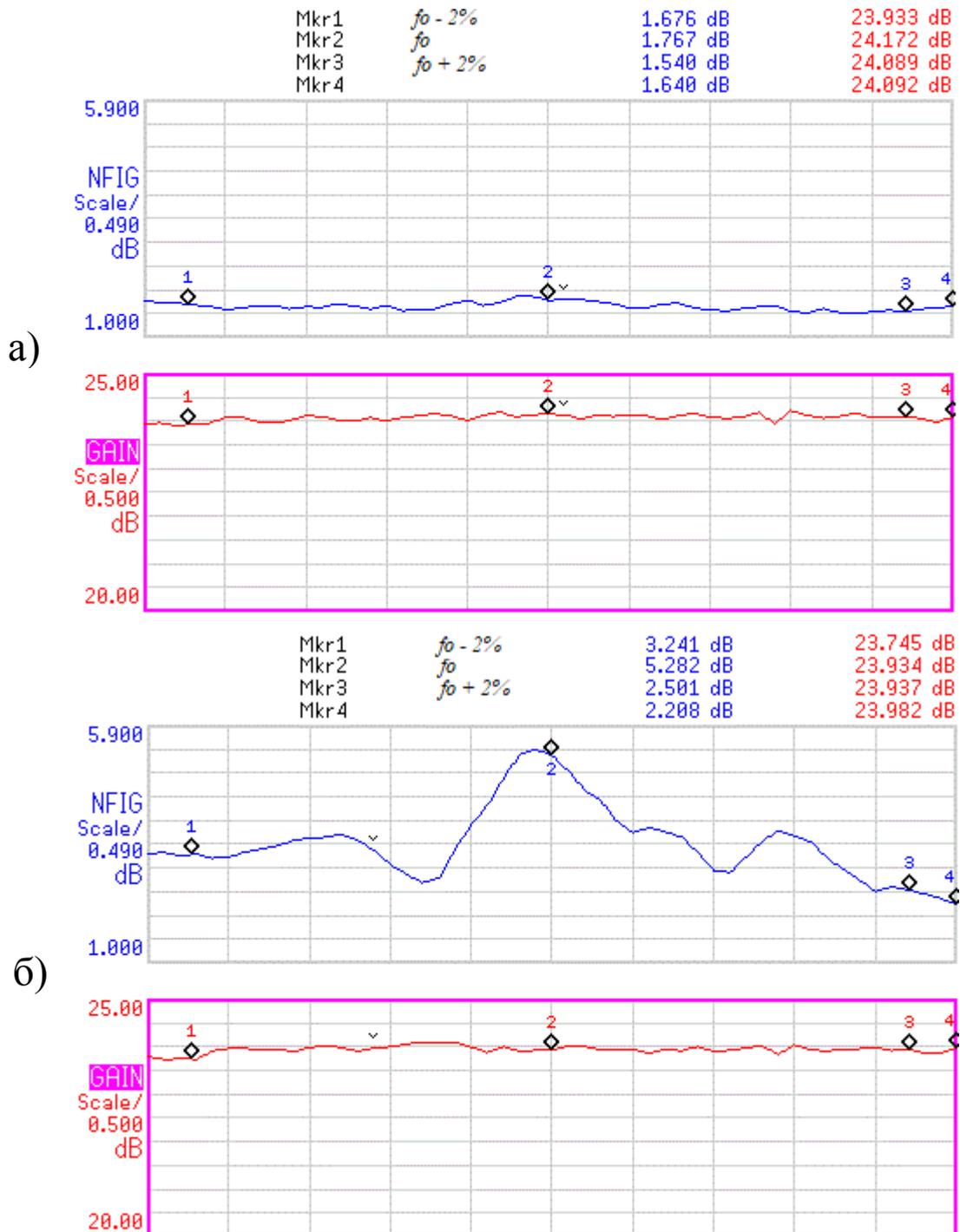


Рис. 3.4. Включение режима «Увеличенная мощность шумов» ЦЗКУ 4-см диапазона длин волн:

а) коэффициент шума и коэффициент усиления в номинальном режиме работы ЦЗКУ;

б) коэффициент шума и коэффициент усиления при включении режима «Увеличенная мощность шумов». Мощность шумов на выходе ЦЗКУ увеличена на 3,0...3,5 дБ.

На рисунке 3.4 приведено в качестве примера изменение коэффициента шума и коэффициента усиления ЦЗКУ при включении режима «Увеличенная мощность шумов» (режим «УМШ»). Увеличение мощности шумов ( $\Delta P_{\text{ш}}$ ) на выходе ЦЗКУ (в дБ) определяется:  $\Delta P_{\text{ш}} = K_{\text{ш.УМШ}} - K_{\text{ш.НОМ}} - (K_{\text{у.НОМ}} - K_{\text{у.УМШ}})$ , где  $K_{\text{ш}}$  – коэффициент шума,  $K_{\text{у}}$  – коэффициент усиления, дБ, измеренные в режиме УМШ и в номинальном режиме. Норма на параметр «увеличение мощности шумов» составляет  $\Delta P_{\text{ш}} = 3,0 \dots 3,5$  дБ.

### 3.2.3 Сдвиг частоты нагруженного резонатора

Как было указано в п. 2.3.3 (§ 2.3), одними из основных источниками шума в ЦЗУ являются ослабление сигнала вследствие отражений во входном и выходном СВЧ трактах устройства, а также остаточная шумовая энергия в сигнальной БЦВ при неполном согласовании электронной нагрузки входного резонатора с его внешней нагрузкой. Для обеспечения минимизации потерь при передаче сигнала и, соответственно, минимизации коэффициента шума следует максимально точно соблюдать условия комплексно-сопряженного согласования проводимостей (2.19) – (2.20) (п. 2.3.1 - § 2.3) в полосе рабочих частот, в данном случае, прежде всего в части равенства нулю суммарной реактивной проводимости (кривые на рис. 2.14 и 2.15 по отношению к рис. 2.13).

В случае, когда уровень магнитной индукции в области взаимодействия обеспечивает равенство циклотронной частоты и резонансной частоты резонатора  $\omega_c = \omega_0$ , кривые реактивной проводимости электронного луча ( $B_e$ ) и резонатора ( $B_p$ ) проходят через ноль на одной и той же частоте (см. рис. 2.13 – 2.15). Это позволяет получать более полную их взаимную компенсацию и добиваться лучшего согласования проводимостей.

Применительно к ЦЗУ согласование реактивных проводимостей осложняется тем, что, как известно, частота собственных колебаний сильно нагруженного резонатора  $\omega_{\text{н0}}$  заметно смещена вниз по отношению к

собственной частоте ненагруженного резонатора  $\omega_0$ . Данный эффект следует учитывать в широкополосных ЦЗУ с сильно нагруженными резонаторами.

Рассмотрим объемный резонатор ЦЗУ исходя из того, что он структурно близок к резонатору с сосредоточенными параметрами (определяющая часть емкости резонатора как параллельного контура сосредоточена в зазоре между ламелями). На этом основании используем классическую теорию электрических колебаний [99 -стр.450-455].

Колебания напряжения  $u$  с амплитудой  $U_m$  на конденсаторе параллельного контура изменяются со временем  $t$  в соответствии с выражением:

$$u(t) = U_m e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi), \quad (3.3)$$

$$\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}, \quad (3.4)$$

где  $\omega = \omega_{н0}$  – частота собственных колебаний нагруженного резонатора,  $\omega_0$  – частота собственных колебаний ненагруженного резонатора,  $\alpha$  – коэффициент затухания, амплитуда колебаний  $U_m$  и фаза  $\varphi$  – постоянные, которые определяются начальными условиями.

Коэффициент затухания  $\alpha$  связан с логарифмическим декрементом затухания  $\delta$  и добротностью  $Q$  контура:

$$\alpha = \delta/T_n = \delta f_{н0} = \frac{\pi}{Q_n} f_{н0}, \quad (3.5)$$

где  $T_n$  – период и  $f_{н0}$  – частота колебаний нагруженного контура,  $Q_n$  – нагруженная добротность контура.

Аналогичные выражения и рассуждения о сдвиге частоты нагруженных резонаторов приведены в литературных источниках [100 -стр.535-537, 101 -стр.415-417, 50 -стр.81-84].

Из (3.4) и (3.5) следует, что частота собственных колебаний нагруженного резонатора  $f_{н0}$  по отношению к частоте собственных колебаний ненагруженного резонатора  $f_0$  выражается следующим образом:

$$f_{\text{н0}} = \frac{f_0}{\sqrt{1 + \frac{1}{4Q_{\text{н}}^2}}}. \quad (3.6)$$

Для нагруженного резонатора с добротностью  $Q_{\text{н}} = 6$  из (3.6) следует, что сдвиг частоты составит 0,347%. Для рабочей частоты 9 ГГц – приблизительно 30 МГц, для рабочей частоты 11 ГГц – приблизительно 40 МГц. Указанное разнесение частот перехода через ноль реактивных проводимостей собственно резонатора и электронного луча может оказаться заметным с точки зрения ухудшения согласования проводимостей и способствовать росту коэффициента шума, особенно на краях рабочей полосы для ЦЗУ с максимальной рабочей полосой частот.

### 3.2.4 Заключение

Диаметр циклотронного вращения рассеянных электронов, определяемый циклотронной частотой и энергией дрейфа луча, влияет на коэффициент шума таким образом, что если он близок к величине электронного зазора в резонаторах ЦЗУ или превосходит его, то в этом случае электроны будут практически сразу оседать на ламелях и не будут оказывать значительного влияния на коэффициент шума. Рассеянные электроны с амплитудой циклотронных колебаний существенно меньше поперечного размера электронного зазора могут достаточно долго существовать в объеме электронного луча и наводить шумовые токи в выходном резонаторе ЦЗУ.

Частота быстрых внутренних колебаний рассеянных электронов  $f_c''$ , обусловленная полем пространственного заряда луча, является важной шумовой характеристикой ЦЗУ. В зависимости от диапазона и полосы рабочих частот ЦЗУ, а также от плотности пространственного заряда луча, частота  $f_c''$  может попадать или не попадать в полосу рабочих частот и, соответственно, приводить или не приводить к формированию «шумовых пиков» рассеянными электронами.

Для практической реализации теоретических оценок коэффициента шума ЦЗУ весьма важным является высокий уровень вакуума. Рассеяние электронов луча на частицах остаточных газов при недостаточном уровне вакуума и плохом обезгаживании внутренней поверхности вакуумной оболочки может существенно ухудшать коэффициент шума.

При неоптимальной работе коллектора ЦЗУ вторичные электроны, попадающие в зазор выходного резонатора из области коллектора, совершают шумовые колебания с частотами преимущественно вблизи циклотронной частоты и являются источником собственных шумов ЦЗУ. Данный режим с увеличенной мощностью шумов на выходе устройства является достаточно стабильным и может использоваться в качестве специального режима для калибровки приемного тракта аппаратуры, в которой применяется ЦЗУ.

При использовании сильно нагруженных резонаторов ЦЗУ с низкой нагруженной добротностью электронный сдвиг частоты может препятствовать согласованию реактивных проводимостей собственно резонатора и электронного луча, возбужденного на БЦВ, и ухудшать коэффициент шума устройства.

### **§ 3.3 Амплитудная линейность ЦЗУ и переход в режим защиты**

Как было отмечено в § 2.1, при работе ЦЗУ в режиме пропускания передача сигнала линейна до уровня входной мощности  $\sim 1 \dots 5$  мВт, при которой начинается оседание краевых электронов луча на стенках электронного зазора вследствие увеличения амплитуды поперечных колебаний электронов. При увеличении входной мощности выше указанного уровня линейность передачи сигнала в ЦЗУ ухудшается – с увеличением входной мощности возрастает количество электронов луча, воспринявших входную мощность, но не передавших ее в выходной резонатор, а осевших на стенках пролетного канала.

Рассмотрим данный процесс более подробно. Конструктивное устройство емкостного зазора резонаторов ЦЗУ и расположение электронного луча в зазоре показаны на рисунках 3.5 и 3.6.

При определении параметров поперечного сечения электронного луча ЦЗУ использованы результаты моделирования [102-105].

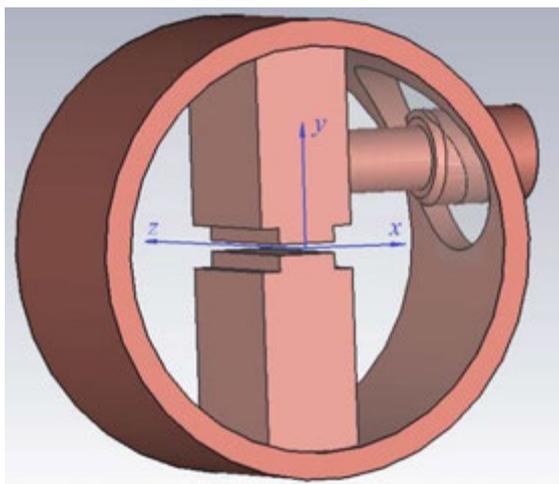


Рис. 3.5. Входной / выходной резонатор ЦЗУ без дисков, закрывающих резонатор (поз. 3 на рис. 2.1). Электронный луч направлен вдоль оси  $z$ .

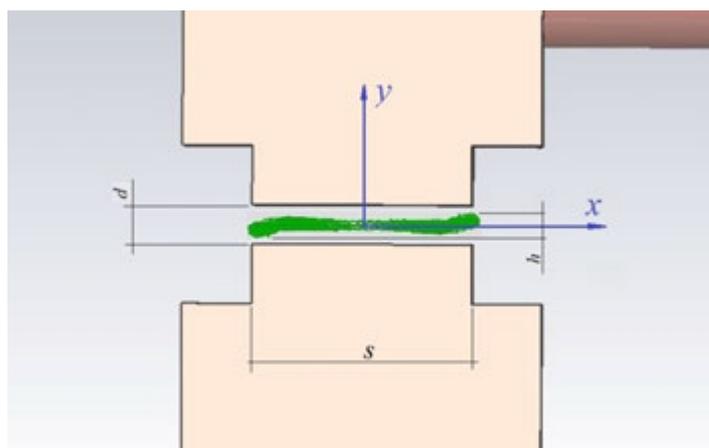


Рис. 3.6. Поперечное сечение ленточного электронного луча (показан зеленым цветом, толщина луча с учетом деформации его поперечного сечения  $h$ ) в зазоре  $d$  между ламелями резонатора ( $s$  – ширина рабочей части зазора).

### 3.3.1 Аналитическая оценка границы линейности и параметров перехода ЦЗУ в режим защиты

ВЧ электрическое поле  $E_{\perp}$ , перпендикулярное направлению дрейфа луча, создаваемое сигналом в зазоре входного резонатора, направлено параллельно оси  $y$  (см. рис. 3.5, 3.6). Электронный луч дрейфует вдоль оси  $z$  соосно с однородным магнитным полем. Рассмотрим взаимодействие электрического поля  $E_{\perp}$  с электронным лучом с точки зрения передачи энергии [106]. Релятивистские эффекты в данном случае пренебрежимо малы.

Поперечное электрическое ВЧ поле  $E_{\perp}$  в зазоре резонатора совершает работу по увеличению амплитуды циклотронного вращения электронов луча. Определим работу  $A$  поля по увеличению циклотронного радиуса вращения для одного электрона за один циклотронный оборот. При этом электрон приобретет кинетическую энергию поперечного движения  $K_1$ :

$$\begin{aligned} K_1 = A &= \int_S F dS = \int_0^{T_c} F \cdot V_c dt = \int m \frac{dV_c}{dt} V_c dt = \\ &= m \int V_c dV_c = m\omega_c^2 \int_0^R r dr = \frac{1}{2} m\omega_c^2 R^2, \end{aligned} \quad (3.7)$$

где  $F$  – сила, прикладываемая к электрону со стороны электрического поля на длине окружности  $S$  с увеличивающимся радиусом  $r$  (от 0 до  $R$ ) за время одного циклотронного периода  $T_c$ ,  $V_c$  – скорость поперечного циклотронного движения электрона по круговой орбите,  $V_c = \omega_c \cdot r$ ,  $\omega_c$  – круговая циклотронная частота,  $m$  – масса электрона.

Для нескольких циклотронных оборотов одного электрона на длине ламели резонатора суммарная кинетическая энергия  $K_1$  будет иметь тот же вид, при этом под  $R$  следует понимать конечный радиус вращения. При этом предполагается, что электрическое поле  $E_{\perp}$  равномерно распределено вдоль ламели (в направлении  $z$ ). Далее перейдем к мощности  $P_1$ , получаемой одним электроном во время пролета зазора в ламели резонатора. В условиях

циклотронного резонанса электрон продолжает получать энергию от ВЧ поля  $E_{\perp}$  в течение всего времени взаимодействия с полем – времени пролета  $\tau$ :

$$P_1 = K_1/\tau . \quad (3.8)$$

Полная мощность, полученная от поля всеми электронами  $N$  луча, находящимися в зазоре:

$$P = P_1 \cdot N = \frac{1}{2} m \omega_c^2 R^2 \cdot \frac{1}{\tau} \cdot \frac{I_0 \tau}{e} = \frac{I_0}{2(e/m)} \omega_c^2 R^2 , \quad (3.9)$$

где  $I_0$  – ток луча,  $I_0 \cdot \tau$  – суммарный заряд всех электронов в зазоре,  $e$  – заряд электрона.

Аналогичное выражение для поперечной составляющей кинетической мощности быстрой циклотронной волны электронного луча получено в [107] при решении уравнения движения луча в форме поперечных волн при энергообмене на циклотронной частоте  $\omega_c$ .

Оценим уровень входной СВЧ мощности (без учета ослабления мощности во входном тракте ЦЗУ), при которой амплитудная характеристика ЦЗУ начинает отклоняться от линейного закона, т.е. начинается оседание электронов луча на стенках зазора в ламелях входного или выходного резонаторов. Определим граничный уровень входной мощности  $P_{гр1}$ , при которой радиус циклотронного вращения крайних электронов луча увеличится настолько, что толщина электронного луча  $h$  в сумме с удвоенным радиусом циклотронного вращения электронов  $R$  сравняется с величиной электронного зазора  $d$  между ламелями (см. рис. 3.6).

Для этого в выражение для мощности (3.9) следует подставить  $R = (d - h) / 2$ .

При типичных характеристиках стандартного ЦЗУ диапазона частот  $f_c = 9$  ГГц:  $I_0 = 200$  мкА,  $\omega_c = 2\pi \cdot f_c$ ,  $d = 130$  мкм,  $h = 100$  мкм,  $e/m = 1,76 \cdot 10^{11}$  Кл/кг, получаем  $P_{гр1} = 0,4$  мВт = - 4 дБмВт. Из данной оценки следует, что при входной мощности  $P_{гр1} \approx - 4$  дБмВт начинается оседание электронного луча.

Приведенные числовые значения являются оценочными по ряду причин: луч может располагаться в зазоре несимметрично как в направлении оси  $y$ , так и в направлении оси  $x$  – выходить за пределы рабочей части зазора  $s$  (см. рис. 3.6); зазоры во входном и выходном резонаторах могут быть не вполне соосны; ток луча, величина зазора, уровень и неоднородность магнитного поля также могут меняться от прибора к прибору.

Используя выражение (3.9), можно также оценить уровень входной мощности ( $P_{гр2}$ ), при котором ЦЗУ переходит в режим защиты с максимально возможным ослаблением входной мощности. При этом электронный луч должен полностью находиться в пределах зазора по его ширине  $s$  (см. рис. 3.6).

Для того, чтобы все электроны луча при определенном уровне входной мощности оседали на стенках зазора, необходимо, чтобы удвоенный радиус циклотронного вращения электрона, находящегося на оси симметрии зазора по оси  $y$ , сравнился с величиной зазора  $d$ . В выражение для мощности (3.9) следует подставить значение  $R = 0,5 \cdot d$ . Соответствующий уровень входной мощности  $P_{гр2}$  при прочих параметрах электронного луча и зазора, указанных выше, составит  $P_{гр2} = 7,7$  мВт  $\approx 9$  дБмВт.

### 3.3.2 Экспериментальные результаты

Как следует из выражения (3.9), параметры границы амплитудной линейности ЦЗУ и перехода ЦЗУ в режим защиты определяются диапазоном рабочих частот, поперечной величиной электронного зазора  $d$  и током луча, а также поперечными размерами электронного луча  $h$  и его положением в зазоре по осям  $x$  и  $y$  (см. рис. 3.6) [106].

#### 1) ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц

На рисунке 3.7 приведена типичная зависимость выходной мощности и тока коллектора ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц от входной мощности. При следующих параметрах луча и зазора: ток луча  $I_0 = 100$  мкА, величина зазора

$d = 200$  мкм, толщина луча (с учетом его деформации)  $h = 150$  мкм – оценка мощности по выражению (3.9) дает следующее значение, при котором начинается оседание краевых электронов луча (радиус циклотронного вращения электронов  $R = (d - h) / 2$ ), –  $P_{гр1} \approx -12$  дБмВт. Из кривой зависимости тока коллектора от входной мощности видно, что снижение тока коллектора начинается при несколько меньшей мощности, но это снижение происходит достаточно медленно на уровне входных мощностей  $-10 \dots -20$  дБмВт и, очевидно, объясняется неопределенностью внешней границы луча и положением луча в зазоре резонатора при малом запасе уровня рабочего магнитного поля относительно Бриллюэновского уровня (см. п. 2.3.4).

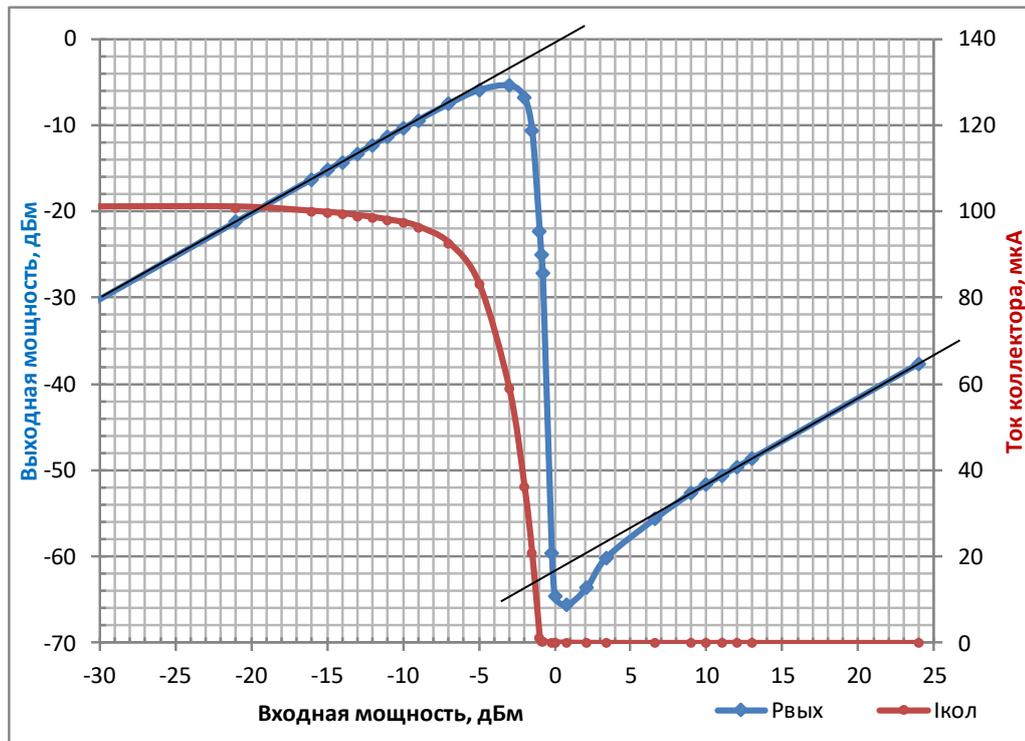


Рис. 3.7. Амплитудная характеристика и зависимость тока коллектора от входной мощности ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц ( $I_0 = 100$  мкА,  $d = 200$  мкм,  $h = 150$  мкм,  $P_{гр1} \approx -12$  дБмВт,  $P_{-1дБ} = -4 \dots -5$  дБмВт,  $P_{гр2} \approx 0$  дБмВт, ослабление сигнала в режиме защиты  $L_{защ} = 62$  дБ).

Принятое в СВЧ технике определение границы линейности коэффициента передачи по уровню его снижения (компрессии) на 1 дБ должно сопровождаться в данном случае уменьшением тока коллектора на соответствующую величину –

в 1,26 раза. Действительно, при снижении тока коллектора от 100 мкА до 80 мкА (кривая красного цвета на рис. 3.7) амплитудная характеристика ЦЗУ (кривая синего цвета на рис. 3.7) отклоняется от линейного закона приблизительно на 1 дБ, при этом входная мощность – верхняя граница линейности ЦЗУ по компрессии коэффициента передачи на 1 дБ – составляет  $P_{-1\text{дБ}} = -4 \dots -5$  дБмВт.

Оценка входной мощности по (3.9), при которой ЦЗУ переходит в режим защиты с максимальным ослаблением входного сигнала, дает следующий результат. При радиусе циклотронного вращения электронов, равном половине величины электронного зазора ( $R = d / 2$ ), и тех же прочих параметрах входная мощность  $P_{\text{гр2}} \approx 0$  дБмВт, что очень хорошо согласуется с кривой на рисунке 3.7.

Кривая амплитудной характеристики на рис. 3.7 имеет три явно выраженных участка: линейный участок при малых входных мощностях – передача сигнала с малым ослаблением в режиме пропускания ЦЗУ; линейный участок при больших входных мощностях – передача входной мощности на выход в режиме защиты ЦЗУ с высоким ослаблением; нелинейный участок перехода ЦЗУ из режима пропускания в режим защиты. При этом протяженность переходного участка по входной мощности для ЦЗУ данного типа не превышает 4...5 дБ, что, несомненно, является положительным качеством для защитного устройства.

Перепад по выходной мощности между линейными участками амплитудной характеристики в режиме пропускания и в режиме защиты (аппроксимированы на рисунке 3.7 прямыми линиями) представляет собой ослабление входной мощности в режиме защиты ЦЗУ, для данного образца параметр составляет  $L_{\text{защ}} \approx 62$  дБ.

На начальном участке режима защиты при входной мощности от 0 дБмВт до 5 дБмВт кривая амплитудной характеристики проходит ниже аппроксимирующей прямой линии (при  $P_{\text{вх}} = 1$  дБмВт ослабление входной мощности  $L_{\text{защ}} \approx 65$  дБ). Данный эффект объясняется тем, что при указанных входных мощностях в электронном зазоре еще присутствует некоторое

количество рассеянных электронов луча, которые воспринимают входную СВЧ мощность, но не передают ее в выходной резонатор и, таким образом, вносят дополнительное ослабление мощности, просачивающейся из входного резонатора в выходной через отверстие в разделительной секции ЦЗУ.

Представленная на рисунке 3.7 амплитудная характеристика является наиболее типичной и не имеет иных особенностей в связи с тем, что для данного ЦЗУ ширина ламели  $s$  превышает ширину ленточного луча (вдоль оси  $x$ , рис. 3.6), таким образом, весь луч находится в однородном ВЧ поле зазора резонатора.

## 2) ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц

На рисунке 3.8 показаны амплитудные характеристики одного образца ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц при различных токах луча (212 мкА и 100 мкА). Характеристики сняты на средней частоте рабочей полосы ЦЗУ при стандартном и при пониженном токе луча, соответственно со снижением тока луча понижен и потенциал дрейфа с тем, чтобы обеспечить требуемую электронную нагрузку резонаторов. Рабочая полоса частот ЦЗУ с пониженным током луча является существенно более узкой.

Численные оценки параметров амплитудной характеристики и перехода в режим защиты данного ЦЗУ для основного режима с током луча  $I_0 \approx 212$  мкА приведены в п. 3.3.1 и хорошо согласуются с экспериментальными данными: краевые электроны луча начинают оседать на стенках пролетного канала при входной мощности  $P_{гр1} \approx -4$  дБмВт.

Верхняя граница линейности по компрессии коэффициента передачи на 1 дБ составляет  $P_{-1дБ} \approx 4$  дБмВт, при этом прохождение электронного луча на коллектор соответственно снижается приблизительно в 1,26 раза.

Представляет интерес амплитудная характеристика того же образца ЦЗУ при уменьшении тока луча в  $I_{01} / I_{02} = 2,1$  раза (пунктирные кривые на рис. 3.8). При этом нелинейный участок амплитудной характеристики – переход ЦЗУ из режима пропускания в режим защиты – практически в неизменном виде

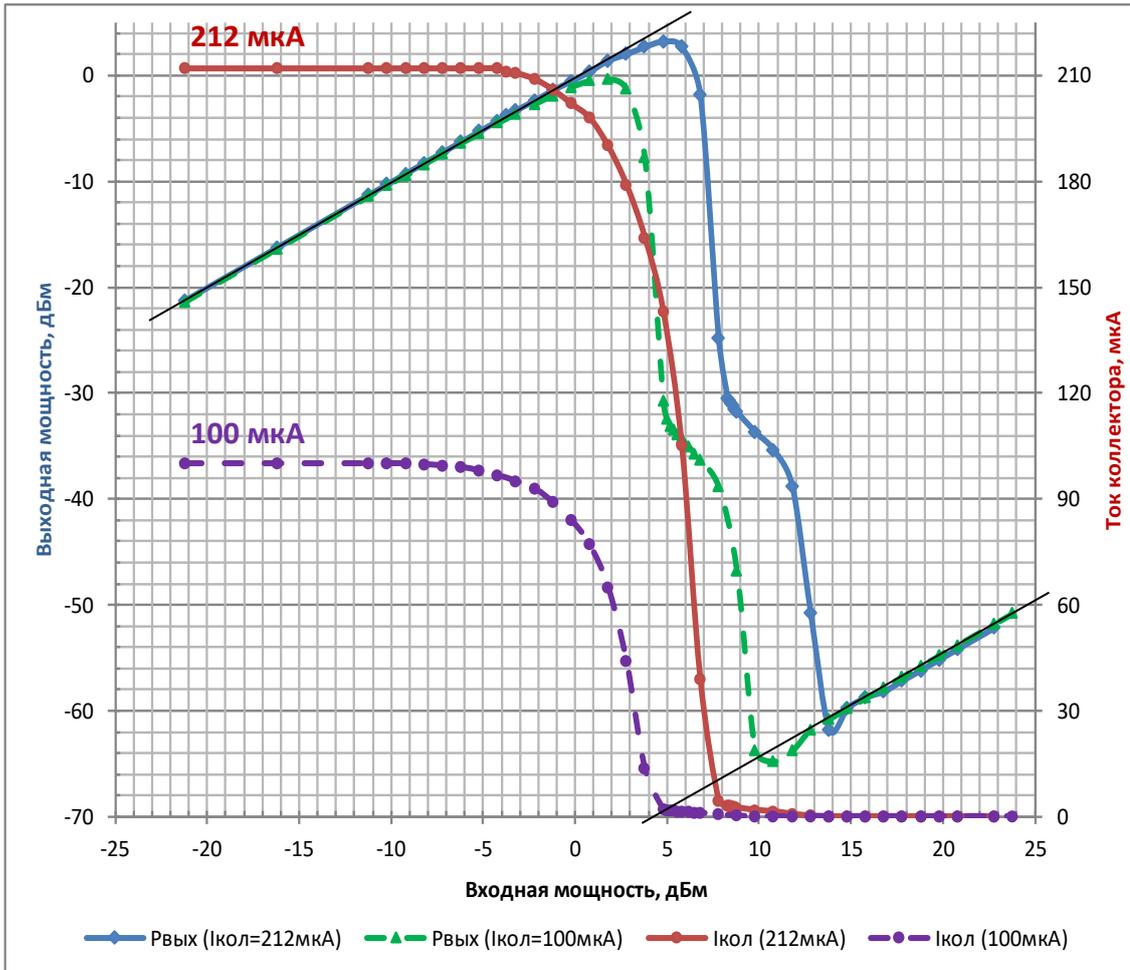


Рис. 3.8. Амплитудные характеристики и зависимости тока коллектора от входной мощности ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц в двух режимах. Основной режим работы ЦЗУ (сплошные линии):  $I_0 = 212$  мкА,  $d = 130$  мкм,  $h = 100$  мкм,  $P_{гр1} \approx -4$  дБмВт,  $P_{-1дБ} = 3 \dots 5$  дБмВт. Режим с пониженным током луча (пунктирные линии):  $I_0 = 100$  мкА. Ослабление в режиме защиты  $L_{защ} = 74$  дБ.

перемещается в область меньших входных мощностей на величину  $\approx 10 \cdot \lg(I_{01} / I_{02}) = 3,2$  дБ, т.е. в соответствии с уменьшением тока луча.

Обе амплитудные характеристики образца, – в основном режиме и в режиме работы с пониженным током луча, – имеют характерный изгиб в средней области нелинейного участка (в области от -30 до -40 дБмВт выходной мощности). Данный эффект объясняется тем, что ленточный электронный луч для данного типа ЦЗУ по своей ширине приблизительно равен ширине ламели  $s$ . В данном образце луч расположен не вполне симметрично относительно

ширины ламелей  $s$  входного резонатора (см. рис. 3.6), – один край луча несколько выходит из области рабочего зазора в направлении параллельном оси  $x$ . Таким образом, для разрушения данного элемента луча требуется повышенная входная мощность, – амплитудная характеристика приобретает дополнительный изгиб в сторону повышения входной мощности на участке перехода из режима пропускания в режим защиты ЦЗУ.

Численная оценка по выражению (3.9) (см. п. 3.3.1) уровня входной мощности, при которой ЦЗУ переходит в режим защиты, дает значение  $P_{гр2} \approx 9$  дБмВт. Данный уровень мощности соответствует переходу ЦЗУ в режим защиты на кривой амплитудной характеристики основного режима ЦЗУ (рис. 3.8), если предположить, что изгиб в средней области нелинейного участка характеристики отсутствует (весь электронный луч находится в пределах ширины рабочего зазора  $s$ ). Линейная экстраполяция верхней области переходного участка характеристики вниз, в область увеличения входной мощности, дает точку перехода в режим защиты  $P_{гр2} \approx 9,5$  дБмВт.

Образцы ЦЗУ данного типа, в которых электронный луч не выходит за пределы рабочего зазора  $s$ , не имеют описанного характерного изгиба в средней части нелинейного участка амплитудной характеристики (при переходе ЦЗУ из режима пропускания в режим защиты). Их амплитудная характеристика подобна по форме характеристике на рисунке 3.7.

### **3) ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц с увеличенной полосой рабочих частот**

С целью существенного увеличения полосы рабочих частот ЦЗУ (до 800 МГц) в диапазоне частот 9 ГГц была существенно изменена конструкция ламелей резонаторов в области электронного зазора: зазор был уменьшен до величины  $d = 90 \dots 100$  мкм, ширина ламели  $s$  выбрана меньше ширины луча с тем, чтобы наиболее деформируемые края ленты электронного луча выпустить за пределы рабочей части зазора. Амплитудная характеристика и зависимость тока коллектора от входной мощности такого ЦЗУ приведены на рисунке 3.9.

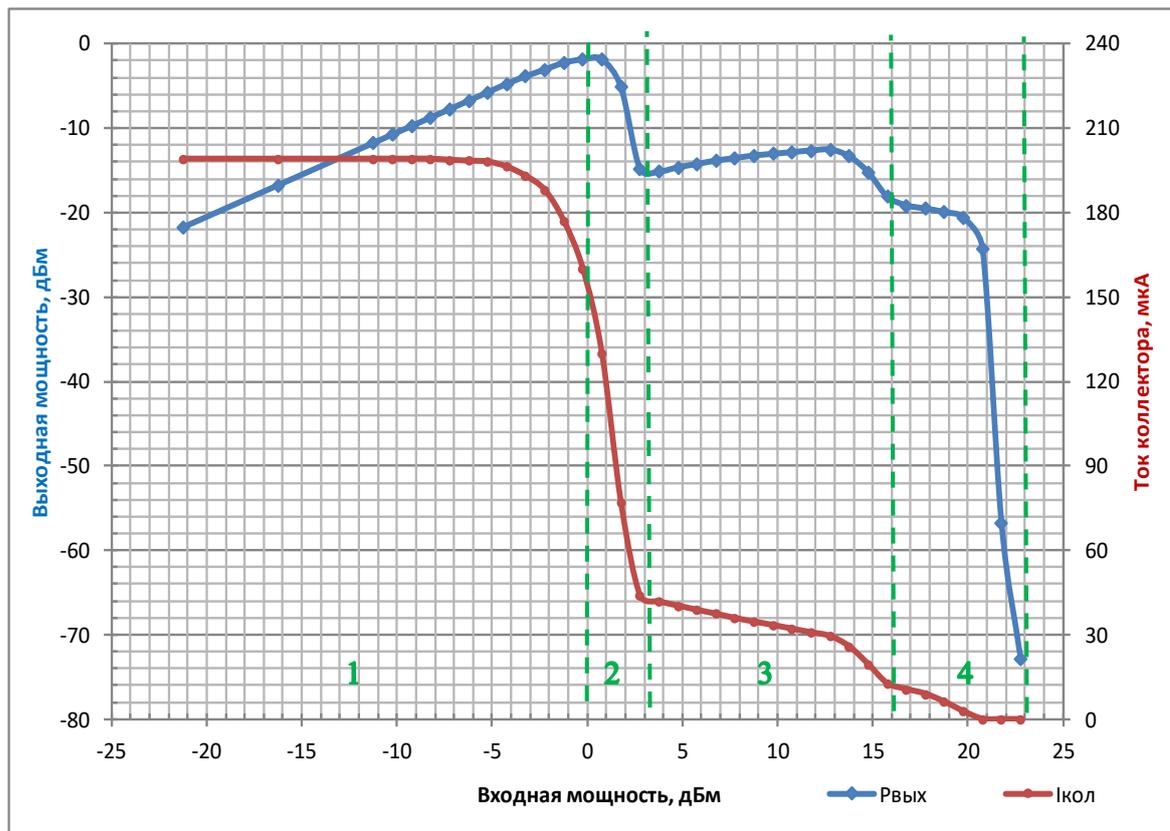


Рис. 3.9. Амплитудная характеристика и зависимость тока коллектора от входной мощности ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц с увеличенной полосой рабочих частот ( $I_0 = 200$  мкА,  $d = 90$  мкм,  $h = 60$  мкм,  $P_{гр1} \approx -5$  дБмВт,  $P_{гр2} \approx 23$  дБмВт,  $P_{-1дБ} \approx 0$  дБмВт).

На рисунке 3.9 вертикальными пунктирными линиями выделены четыре характерные области, которые соответствуют различным режимам работы ЦЗУ.

Область «1» соответствует линейной передаче сигнала ЦЗУ в режиме пропускания. Компрессия коэффициента передачи на 1 дБ (граница областей «1» и «2») имеет место при входной мощности  $P_{-1дБ} \approx 0$  дБмВт.

Область «2» представляет собой начало перехода ЦЗУ из режима пропускания сигнала в режим защиты. При входных мощностях, соответствующих окончанию области «2», в значительной мере разрушается та часть электронного луча, которая находится в пределах электронного зазора шириной  $s$  (см. рис. 3.6) и наиболее эффективно взаимодействует с электрическим полем резонатора.

Области «3» и «4» связаны с передачей входной мощности на выход ЦЗУ краевыми участками электронного луча, которые находятся за пределами зазора  $s$  в ламелях резонатора, взаимодействуют с ВЧ полем резонатора менее эффективно и разрушаются при более высоком уровне входной мощности. В данном образце ЦЗУ электронный луч расположен не вполне симметрично относительно ширины зазора  $s$ , поэтому сначала разрушаются ближние к зазору краевые части луча (область «3»), а затем – более удаленная от зазора часть с одной стороны луча (область «4»). Это приводит к значительному увеличению входной мощности, при которой ЦЗУ переходит в режим защиты с максимальным ослаблением. Входная мощность перехода ЦЗУ в режим защиты в данном случае будет составлять  $P_{гр2} \approx 20 \dots 23$  дБмВт.

При этом максимальная мощность на выходе ЦЗУ не превышает того уровня ( $\approx 0$  дБмВт), который обусловлен передачей СВЧ мощности основной частью луча, находящейся в пределах ширины зазора  $s$  (области «1» и «2»).

В других образцах данного типа ЦЗУ, при более симметричном расположении электронного луча относительно ширины ламели  $s$  области «3» и «4» могут быть объединены в единую область – разрушение краевых частей луча за пределами зазора будет происходить синхронно от входной мощности.

Учитывая, что ток, проходящий на коллектор при входной мощности, соответствующей началу области «3», составляет приблизительно 20% от полного тока луча, можно полагать, что приблизительно такая часть луча по его ширине находится вне рабочего зазора. Следовательно, оставшаяся часть луча находится в области зазора – в области наиболее эффективного взаимодействия с ВЧ полем резонатора. Исходя из этого и геометрических размеров зазора можно оценить, используя выражение (3.9), входную мощность, при которой начинается оседание электронов луча на стенках пролетного канала:  $P_{гр1} \approx -5$  дБмВт. Полученное значение хорошо согласуется с экспериментальными данными рисунка 3.9.

### 3.3.3 Заключение

Передача сигнала циклотронным защитным устройством является линейным процессом, т.к. не связана с образованием сгустков и разрежений плотности электронного луча и соответствующими нелинейными эффектами.

Граница амплитудной линейности ЦЗУ определяется оседанием электронов луча на стенках пролетного канала, зависит от рабочей частоты, тока электронного луча и геометрических размеров электронного зазора и поперечного сечения электронного луча в зазоре.

Аналитическое выражение (3.9), устанавливающее связь мощности циклотронного вращения электронов луча с током луча, рабочей частотой и радиусом циклотронного вращения электронов луча, позволяет с приемлемой точностью определять характерные параметры амплитудных характеристик ЦЗУ.

Для ЦЗУ разных типов в диапазоне частот до 12 ГГц параметры линейности и перехода в режим защиты имеют следующие значения:

- касание электронным лучом стенок зазора начинается при входных мощностях с уровнем - 12...- 4 дБмВт.
- верхняя граница линейности по входу при отклонении амплитудной характеристики от линейного закона на 1 дБ составляет - 5...+ 5 дБмВт.
- входная мощность, при которой ЦЗУ переходит в режим защиты с максимальным ослаблением, составляет величину от 0 дБмВт до 10...13 дБмВт при условии, что электронный луч не выходит за пределы электронного зазора по его ширине.

В случае, когда боковые края ленты электронного луча ЦЗУ выходят за пределы электронного зазора в область с пониженной эффективностью взаимодействия с ВЧ полем, переход ЦЗУ из режима пропускания в режим защиты происходит как минимум в два этапа: сначала при меньшей входной мощности разрушается часть луча, находящаяся в зазоре, а затем при увеличенной входной мощности разрушаются боковые части луча, находящиеся

за пределами непосредственно зазора. При этом входная мощность, при которой ЦЗУ переходит в режим защиты с максимальным ослаблением, возрастает до 23...25 дБмВт.

Максимальная мощность на выходе ЦЗУ диапазона частот до 12 ГГц при переходе в режим защиты не превышает +5...+7 дБмВт, в том числе и для конструкций ЦЗУ, в которых края ленточного луча выходят за пределы электронного зазора в ламелях резонаторов.

На основании выражения (3.9) при изменении уровня входной мощности могут быть проведены оценки поперечных размеров электронного луча опираясь на известные размеры электронного зазора в ламелях резонатора.

### **§ 3.4 Временные параметры включения и выключения режима защиты ЦЗУ**

#### **3.4.1 Включение режима защиты**

Как было отмечено в § 2.1, ЦЗУ переходит в режим защиты автономным образом, при достижении входной мощностью уровня, при котором электронный луч ЦЗУ разрушается полностью или в значительной степени. При этом реализуется, так называемый, переходный режим (§ 2.1). Результаты исследования физических особенностей процессов при переходном режиме описаны в § 3.3.

Время включения режима защиты (время срабатывания) является важным параметром для газоразрядных и полупроводниковых защитных устройств, а также для ЗУ с аналогичным принципом построения. В подобного рода ЗУ в момент начала мощного СВЧ импульса на входе, пока газоразрядный промежуток или рпн-диод не перешли в полной мере в состояние, соответствующее режиму защиты, мощность поступает с входа на выход ЗУ и формирует пик просачивающейся мощности (§ 2.1).

В ЦЗУ входной и выходной СВЧ тракты устройства разделены линией передачи сигнала, содержащей электронный луч (см. рис. 2.1, 2.2).

Энергетическая емкость луча определяет максимальную мощность на выходе устройства при переходе из режима пропускания в режим защиты. Таким образом, в ЦЗУ отсутствует пик просачивающейся на выход мощности, типичный для газоразрядных и полупроводниковых защитных устройств.

По этой причине такой параметр, как время включения режима защиты ЗУ (время срабатывания) не свойственен ЦЗУ. ЦЗУ обеспечивает абсолютное, в указанном смысле, качество защиты последующих каскадов по переднему фронту или начальному участку мощного СВЧ импульса.

### **3.4.2 Время восстановления параметров**

Время восстановления параметров ЦЗУ после окончания мощного входного СВЧ импульса имеет сверхмалую продолжительность, что является чрезвычайно важной характеристикой ЦЗУ и выделяет его среди других типов защитных устройств [108]. Применительно к рассматриваемому типу ЗУ время восстановления параметров определяется временем затухания колебаний ВЧ энергии, поступившей во входной резонатор к моменту окончания импульса входной СВЧ мощности, и временем пролета электронного луча от входного резонатора до выходного резонатора после восстановления прохождения луча. Отметим при этом, что затухание колебаний во входном резонаторе происходит достаточно быстро в силу его низкой добротности.

Рассмотрим этапы восстановления прохождения сигнала в ЦЗУ после окончания мощного входного СВЧ импульса. При этом для определенности будем полагать, что задний фронт (срез) мощного входного импульса имеет длительность пренебрежимо малую для оценки времени восстановления. Представляется целесообразным выделить 4 этапа в процессе восстановления прохождения сигнала [108].

Этап 1. Снижение накопленной во входном резонаторе СВЧ энергии от пикового уровня до минимального уровня, при котором в зазоре резонатора еще отсутствуют электроны луча. Резонатор не нагружен электронным лучом. Продолжается режим защиты.

Этап 2. Снижение энергии во входном резонаторе от уровня, соответствующего окончанию этапа 1 (электроны луча отсутствуют в зазоре резонатора) до уровня верхней границы линейности [106] – уровня входной мощности, при которой практически весь луч не разрушен, выходит из зазора входного резонатора и поступает в зазор выходного резонатора. На протяжении этапа 2 нагрузка резонатора электронным лучом изменяется от нулевой (минимальной) до максимально возможной. Реализуется переход из режима защиты в режим пропускания сигнала.

Этап 3. Снижение энергии во входном резонаторе от уровня верхней границы линейности до уровня максимальной чувствительности ЦЗУ (до уровня минимальной мощности входного сигнала уверенно различимого над собственными шумами ЦЗУ). Резонатор нагружен электронным лучом. В ЦЗУ имеет место режим пропускания сигнала. Учет продолжительности данного этапа позволяет оценить время восстановления параметров по уровню максимальной чувствительности.

Этап 4. Задержка передачи сигнала из входного резонатора в выходной, связанная с временем пролета электронов луча между резонаторами.

Для того, чтобы электромагнитные СВЧ колебания в объемном резонаторе ЦЗУ можно было рассматривать с точки зрения обычной теории колебательных контуров, следует убедиться в том, что резонатор является квазистационарным. Существуют два условия квазистационарности [99 -стр.145-147]:

1) Максвелловское время релаксации  $\tau_m$  неравновесных зарядов внутри проводника должно быть существенно меньше периода колебаний  $T$ :  $\tau_m \ll T$ .

2) Время распространения возмущения вдоль контура  $\tau$  также должно быть существенно меньше периода колебаний  $T$ :  $\tau = l/v = (l/c)\sqrt{\epsilon\mu} \ll T$ , где  $l$  – длина контура,  $v$  – скорость распространения возмущения вдоль контура,  $c$  – скорость света,  $\epsilon$  и  $\mu$  – относительные электрическая и магнитная проницаемости среды, окружающей проводник.

Максвелловское время релаксации  $\tau_m$  для металлов составляет величину порядка  $10^{-17}$  с [99 -стр.147], период СВЧ колебаний  $T \approx 10^{-10}$  с. Первое условие выполняется с большим запасом.

При длине контура  $l \approx (0,5...1) \cdot 10^{-2}$  м,  $\varepsilon = \mu = 1$ , время распространения возмущения  $\tau \approx (1,5...3) \cdot 10^{-11}$  с имеет один порядок с периодом колебаний  $T \approx 10^{-10}$  с. Второе условие квазистационарности не выполняется с требуемым запасом.

Тем не менее, учитывая, что объемный резонатор ЦЗУ близок к резонатору с сосредоточенными параметрами (определяющая часть емкости контура сосредоточена в зазоре между ламелями), а также ссылаясь на авторитетных авторов [12,39], в работах которых предполагалась квазистационарность резонаторов Куччия, как минимум, в сантиметровом диапазоне длин волн, проведем оценку времени снижения СВЧ мощности в резонаторе, используя классическую теорию колебаний в электрических контурах [99 -стр.450-455].

Колебания напряжения  $u$  на конденсаторе параллельного контура (резонатора) изменяются со временем  $t$  следующим образом:

$$u(t) = U_m e^{-\alpha t} \cos(\omega t + \varphi) , \quad (3.10)$$

где  $U_m$  – амплитуда колебаний,  $\alpha$  – коэффициент затухания,  $\omega = \sqrt{\omega_0^2 - \alpha^2}$  – круговая частота периодических колебаний в резонаторе,  $\omega_0$  – частота собственных колебаний ненагруженного резонатора,  $\varphi$  – фаза колебаний, амплитуда колебаний  $U_m$  и фаза  $\varphi$  – постоянные, которые определяются в данном случае начальными условиями [108].

Пусть амплитуда колебаний в контуре экспоненциально снижается от начального уровня с амплитудой  $U_1$  до конечного уровня с амплитудой  $U_2$  :

$$U_2 = U_1 e^{-\alpha t} . \quad (3.11)$$

Получим далее выражение для времени  $t$  :

$$t = \frac{1}{\alpha} \ln \frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{\alpha} \ln \sqrt{\frac{P_1}{P_2}} = \frac{1}{2\alpha} \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (3.12)$$

где мощности  $P_1 \sim U_1^2$ ,  $P_2 \sim U_2^2$ .

Коэффициент затухания  $\alpha$  связан с логарифмическим декрементом затухания  $\delta$  и добротностью  $Q$  контура известным соотношением:

$$\alpha = \delta/T = \delta f = \frac{\pi}{Q} f, \quad (3.13)$$

где  $T$  – период и  $f$  – частота колебаний контура,  $Q$  – добротность контура.

Из (3.12) и (3.13) следует:

$$t = \frac{Q}{2\pi f} \ln \frac{P_1}{P_2}, \quad (3.14)$$

в данном выражении  $t$  – время затухания колебаний в контуре от уровня мощности  $P_1$  до уровня  $P_2$ .

На протяжении этапа 1 резонатор не нагружен электронным лучом и, таким образом, не согласован с внешней входной ВЧ линией ЦЗУ. Соответственно, часть падающей на резонатор СВЧ мощности отражается от рассогласованного резонатора. Доля поступившей в резонатор СВЧ мощности ( $P_1$  в выражении (3.14)) относительно полной входной мощности  $P_{\text{вх и}}$ , падающей на резонатор во время импульса, определяется входным КСВН резонатора:

$$P_1 = P_{\text{вх и}} (1 - K_{\text{отр}}) = P_{\text{вх и}} \left( 1 - \frac{(\sigma - 1)^2}{(\sigma + 1)^2} \right) = P_{\text{вх и}} \frac{4\sigma}{(\sigma + 1)^2}, \quad (3.15)$$

где  $K_{\text{отр}}$  – коэффициент отражения по мощности,  $\sigma$  – «холодный» (без электронного луча) КСВН резонатора.

Определим из выражений (3.14), (3.15) время снижения уровня СВЧ мощности во входном резонаторе до уровня  $P_2$ , при котором ток луча еще отсутствует во входном резонаторе (этап 1). Используем типичные значения «холодного» КСВН входного резонатора ЦЗУ  $\sigma \approx 30$  и добротности  $Q \approx 25$ . При

этом добротность  $Q \approx 25$  определяется собственными потерями в резонаторе и связью «холодного» резонатора с внешней линией.

Расчетные оценки времени  $t_1$  затухания колебаний в контуре выполним для уровней мощности  $P_2 = 10$  мВт для частоты 10 ГГц и  $P_2 = 1$  мВт для частоты 3 ГГц, как типичных минимальных значений мощности для ЦЗУ соответствующих частотных диапазонов, при которых электронный луч в зазоре резонаторов отсутствует (п. 3.3.1, п. 3.3.2) [106].

Вычисление времени  $t_1$  затухания колебаний в контуре на частоте  $f = 10$  ГГц ( $P_2 = 10$  мВт) дает следующие значения:

$$\text{при } P_{\text{вх и}} = 1 \text{ кВт} \quad - \quad t_1 = 3,8 \text{ нс};$$

$$\text{при } P_{\text{вх и}} = 10 \text{ кВт} \quad - \quad t_1 = 4,7 \text{ нс}.$$

Для частоты  $f = 3$  ГГц ( $P_2 = 1$  мВт) аналогичные оценки составляют:

$$\text{при } P_{\text{вх и}} = 1 \text{ кВт} \quad - \quad t_1 = 15,6 \text{ нс};$$

$$\text{при } P_{\text{вх и}} = 10 \text{ кВт} \quad - \quad t_1 = 18,6 \text{ нс}.$$

На следующем этапе 2 – переход ЦЗУ из режима защиты в режим пропускания – имеет место дальнейшее затухание СВЧ мощности во входном резонаторе до уровня, при котором все электроны луча выходят из резонатора. Нагруженная добротность входного резонатора понижается при этом от уровня  $Q \approx 25$  (окончание этапа 1, режим защиты, резонатор нагружен собственными потерями и внешней нагрузкой через входной тракт ЦЗУ) до типичного уровня  $Q \approx 8$  (окончание этапа 2, режим пропускания, резонатор нагружен собственными потерями, внешней нагрузкой и электронным лучом). Можно полагать, что усредненная по длительности этапа 2 добротность входного резонатора составляет величину  $Q \approx 16$ .

На этапе 2 происходит снижение мощности от уровня  $\approx 10$  мВт до границы линейности 1 мВт (для ЦЗУ диапазона частот 10 ГГц) или от уровня  $\approx 1$  мВт до границы линейности 0,1 мВт (для ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц) [106] (п. 3.3.1, п. 3.3.2), т.е. перепад мощности  $P_1 / P_2 = 10$ . В соответствии с (3.14) находим время затухания колебаний  $t_2$ :

для частоты  $f = 10$  ГГц: -  $t_2 = 0,6$  нс;

для частоты  $f = 3$  ГГц: -  $t_2 = 2,0$  нс.

Дальнейшее затухание колебаний СВЧ энергии во входном резонаторе до уровня максимальной чувствительности ЦЗУ (этап 3), т.е. приблизительно на 90 дБ, происходит в резонаторе, который нагружен собственными потерями, внешней нагрузкой и электронным лучом. Типичная нагруженная добротность в этом случае составляет  $Q \approx 8$ . Время затухания колебаний  $t_3$  в соответствии с (3.14) составляет:

для частоты  $f = 10$  ГГц: -  $t_3 = 2,6$  нс;

для частоты  $f = 3$  ГГц: -  $t_3 = 8,8$  нс.

Время пролета электронов луча между входным и выходным резонаторами зависит от электрического режима ЦЗУ: потенциал дрейфа луча обычно составляет 15...25 В, расстояние между центрами входного и выходного резонаторов 5...10 мм. Таким образом, продолжительность этапа 4 составляет  $t_4 \approx 2...5$  нс.

В соответствии со стандартом [109] под временем восстановления ЗУ понимается интервал времени, отсчитываемый от момента окончания СВЧ импульса до момента, когда потери, дополнительные к потерям пропускания, достигнут в СВЧ защитном устройстве заданного уровня (обычно 3 дБ). В ЦЗУ после окончания этапа 2 режим пропускания восстанавливается без каких-либо дополнительных потерь с задержкой на время пролета электронов между резонаторами ( $t_4$ , этап 4).

Таким образом, время восстановления ЦЗУ  $t_{\text{в}}$  определяется суммой:  $t_{\text{в}} = t_1 + t_2 + t_4$  и при входной СВЧ импульсной мощности до 10 кВт оценочно составляет:

для частоты  $f = 10$  ГГц -  $t_{\text{в}} \approx 10$  нс;

для частоты  $f = 3$  ГГц -  $t_{\text{в}} \approx 22...26$  нс.

За дополнительное время от 3 до 10 нс (в зависимости от частоты, продолжительность этапа 3) в ЦЗУ восстанавливается максимальная чувствительность, соответствующая коэффициенту шума 1...1,5 дБ.

В настоящих приведенных оценках времени восстановления предполагается идеальный задний фронт мощного входного СВЧ импульса с нулевой длительностью.

### 3.4.3 Экспериментальные результаты

#### 1) Форма импульса на выходе ЦЗУ

На рисунке 3.10 приведены синхронизированные по времени осциллограммы импульсной СВЧ мощности на входе и выходе ЦЗУ: частота 10 ГГц, импульсная мощность на входе ЦЗУ 5 Вт, пауза между импульсами 500 нс, длительность переднего и заднего фронтов мощного входного импульса  $\approx 30$  нс, мощность в паузе между импульсами менее 1 мВт – рис. 3.10-а. Сигнал на осциллограф подается через амплитудный детектор.

На выходе ЦЗУ (рис. 3.10-б) в соответствии с входной мощностью реализуются режим защиты (левая и правая части рисунка) и режим пропускания (средняя часть рисунка). Пик выходной мощности в начале режима пропускания (отмечен буквой «А») обусловлен ростом коэффициента пропускания сигнала по мере снижения входной мощности ЦЗУ на заднем фронте входного импульса, выходная мощность проходит через максимум (точка «А», соответствует моменту времени 120 нс на осциллограмме) и далее снижается согласно окончательному спаду входного импульса с некоторой временной задержкой. Временная задержка связана с временем восстановления ЦЗУ, но по осциллограммам рис. 3.10-а и рис. 3.10-б оценить ее не представляется возможным вследствие разных масштабов по амплитуде на двух указанных осциллограммах.

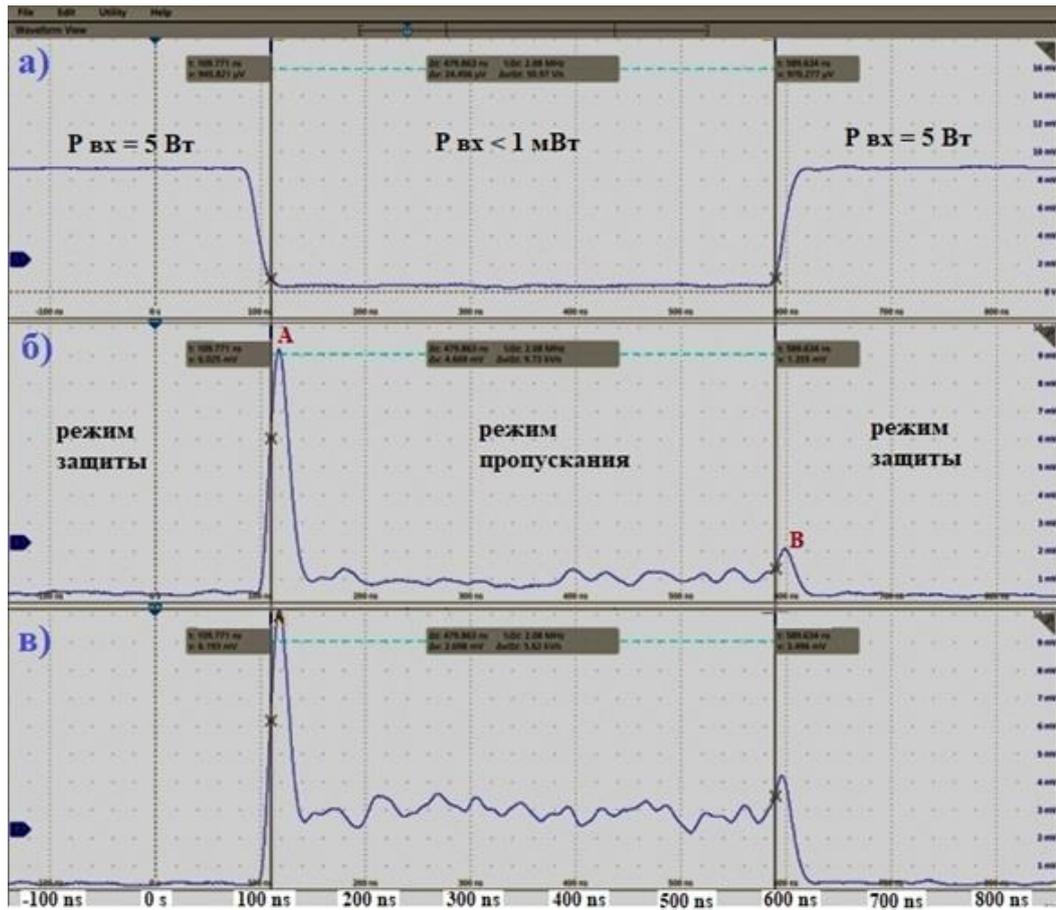


Рис. 3.10. Синхронизированные по времени осциллограммы импульсной мощности на частоте 10 ГГц: а) импульсная мощность с уровнем 5 Вт в тракте на входе ЦЗУ, мощность в паузе между импульсами (средняя часть рисунка) менее 1 мВт; б) мощность на выходе ЦЗУ; в) мощность на выходе ЦЗУ при подаче пилот-сигнала с уровнем 0,3 мВт во входной тракт.

Пик выходной мощности в начале режима защиты (отмечен буквой «В» на рис. 3.10-б) также связан с тем, что в начале роста входной мощности на переднем фронте импульса мощность на выходе ЦЗУ также растет, далее устройство переходит в режим защиты и пик мощности спадает.

Разная амплитуда импульсов на выходе ЦЗУ, соответствующих заднему и переднему фронтам входного импульса (импульсы «А» и «В» на рис. 3.10-б) обусловлена различной крутизной импульсов в точках перехода ЦЗУ в режим пропускания и в режим защиты в совокупности с ограниченным быстродействием амплитудного детектора и осциллографа.

На рис. 3.10-в приведена осциллограмма прохождения непрерывного пилот-сигнала мощностью 0,3 мВт на частоте, отличной от частоты мощного входного импульса, но в полосе рабочих частот ЦЗУ. В режиме защиты ЦЗУ пилот-сигнал на выходе ЦЗУ не регистрируется. В режиме пропускания амплитудный детектор суммирует пилот-сигнал по амплитуде с мощностью в паузе между импульсами.

## **2) Отраженная мощность и время затухания колебаний**

Осциллограммы СВЧ мощности на выходе ЦЗУ во время окончания входного импульса с использованием осциллографа реального времени с полосой пропускания до 33 ГГц представлены на рисунках ниже.

Чтобы реализовать минимально возможное время восстановления ЦЗУ и максимально быстро обеспечить способность приемного устройства РЛС работать с принимаемым полезным сигналом, следует прежде всего правильно распорядиться СВЧ мощностью высокого уровня завершившегося импульса, которая отразилась от входа ЦЗУ в режиме защиты. Данная отраженная мощность должна быть направлена в нагрузку циркулятора или поглощена вентилем, расположенным в СВЧ тракте перед ЦЗУ. При этом циркулятор или вентиль должны иметь минимальный КСВН со стороны ЦЗУ и должны быть расположены по возможности ближе к защитному устройству.

Данный тезис поясняется следующими осциллограммами, приведенными на рисунке 3.11. На вход ЦЗУ подавался прямоугольный импульс от стандартного СВЧ генератора мощностью 200 мВт длительностью 500 нс, пауза между импульсами 500 нс, задний фронт (спад) импульса 0,68 нс. При длине соединительного коаксиального кабеля между генератором и входом ЦЗУ 0,9 м время затухания СВЧ колебаний после окончания импульса, измеренных на выходе ЦЗУ, составило 20,2 нс (рис. 3.11-а). При аналогичных измерениях с соединительным кабелем между генератором и входом ЦЗУ длиной 1,8 м и 2,7 м время затухания колебаний на выходе ЦЗУ составило соответственно 28,1 нс и 36,0 нс.

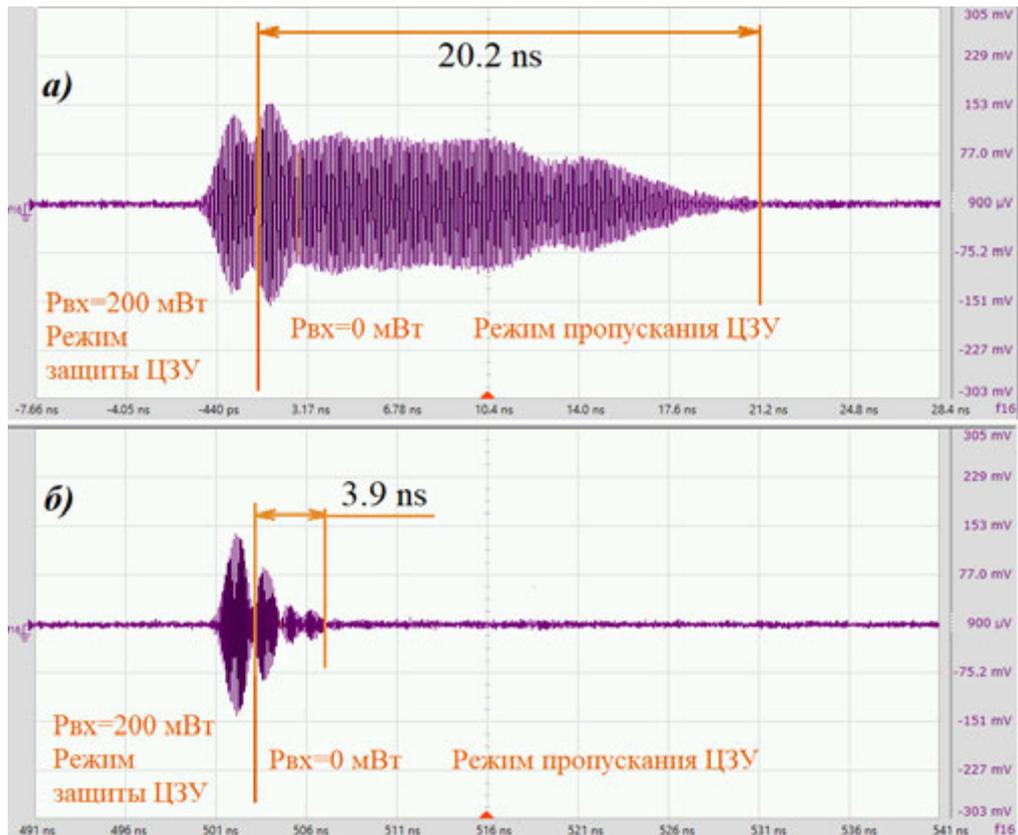


Рис. 3.11. Осциллограммы СВЧ мощности (в разном масштабе по времени) на выходе ЦЗУ диапазона частот 10 ГГц при переходе из режима защиты в режим пропускания (окончание входного импульса мощностью 200 мВт с длительностью заднего фронта 0,68 нс): а) развязывающее устройство между генератором и ЦЗУ отсутствует, длина соединительного кабеля 0,9 м; б) то же, дополнительно к входу ЦЗУ подсоединен вентиль.

Таким образом, увеличение длины кабеля генератор – вход ЦЗУ на 0,9 м приводит к увеличению времени затухания СВЧ колебаний на выходе ЦЗУ приблизительно на 7,9 нс. Данное явление объясняется тем, что отраженная от входа ЦЗУ в режиме защиты СВЧ мощность распространяется по соединительному кабелю в сторону генератора, отражается от него в соответствии с уровнем КСВН и снова поступает на вход ЦЗУ. Подобного рода затухающие переотражения могут происходить многократно и при достаточно низком уровне мощности поступать на выход ЦЗУ, продлевая время затухания колебаний и перекрывая процесс затухания, обусловленный собственным временем восстановления ЦЗУ.

При установке между соединительным кабелем и непосредственно входом ЦЗУ ферритового вентиля время затухания колебаний на выходе ЦЗУ существенно сокращается – до 3,9 нс (рис. 3.11-б) – времени затухания остаточной СВЧ энергии во входном резонаторе устройства. Отраженная от входа ЦЗУ СВЧ мощность поглощается вентилем. Часть мощности, отраженная от вентиля (в силу его низкого, но не нулевого КСВН) затухает на участке тракта между входным резонатором ЦЗУ и вентилем предельно быстро в силу минимальной длины данного участка (5...7 см при воздушном / вакуумном заполнении). Таким образом, время затухания колебаний, равное 3,9 нс на рис. 3.11-б можно считать временем восстановления ЦЗУ применительно к описанным условиям эксперимента.

Первый по времени колебательный процесс в форме «амплитудного вздутия» на рис. 3.11-а и 3.11-б продолжительностью приблизительно 2 нс (слева от линии, разделяющей режим защиты и режим пропускания) в значительной степени обусловлен спаданием СВЧ мощности на заднем фронте входного импульса и не может быть отнесен к времени восстановления.

### **3) Время восстановления**

Аналогично осциллограмме времени восстановления ЦЗУ диапазона частот 10 ГГц, приведенной на рис. 3.11-б, на рисунке 3.12 приведена осциллограмма времени восстановления ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц. Мощность входного импульса 200 мВт, длительность заднего фронта (спада) импульса 2,4 нс. Непосредственно к входу ЦЗУ подсоединен вентиль, предотвращающий переотражения СВЧ мощности в соединительном кабеле между генератором и входом ЦЗУ.

Время восстановления ЦЗУ после окончания импульса СВЧ мощности на входе составляет приблизительно 20 нс. Первый слева колебательный процесс в форме «амплитудного вздутия» связан с задним фронтом входного импульса мощности и предшествует процессу восстановления ЦЗУ.

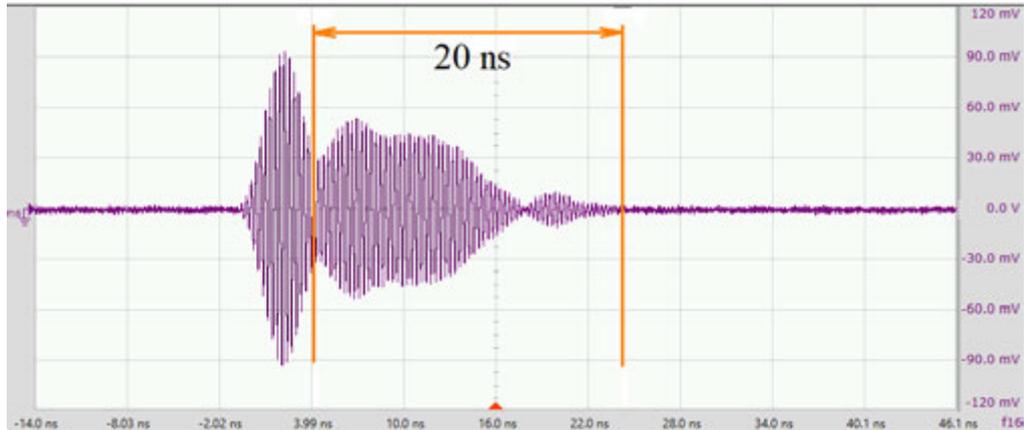


Рис. 3.12. Осциллограмма времени восстановления ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц при переходе из режима защиты в режим пропускания (окончание входного импульса мощностью 200 мВт). К входу ЦЗУ подсоединен вентиль.

На рисунке 3.13 приведена осциллограмма импульса на входе ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц и соответствующая осциллограмма на выходе ЦЗУ. Входной импульс мощностью 200 мВт и длительностью 500 нс имеет длительность заднего фронта 2,4 нс (рис. 3.13-а). Воздействие данного импульса переводит ЦЗУ в режим защиты. При этом на выходе ЦЗУ имеют место короткие пики мощности, соответствующие начальной части переднего фронта импульса (до уровня мощности 1...3 мВт) – метка «1» на рис. 3.13-б, а также окончанию заднего фронта импульса (при спадании мощности ниже уровня 1...3 мВт) – метка «2» на рис. 3.13-б. Пик на окончании заднего фронта импульса продлевается за счет процессов, связанных с восстановлением прохождения сигнала в ЦЗУ, до приблизительно 20 нс при том, что длительность заднего фронта импульса составляет 2,4 нс.

Между пиками на рисунке 3.13-б имеет место режим защиты ЦЗУ (обозначенная на рисунке продолжительность времени 501,6 нс между метками «М3» и «М4»), СВЧ мощность на выходе ЦЗУ не фиксируется.

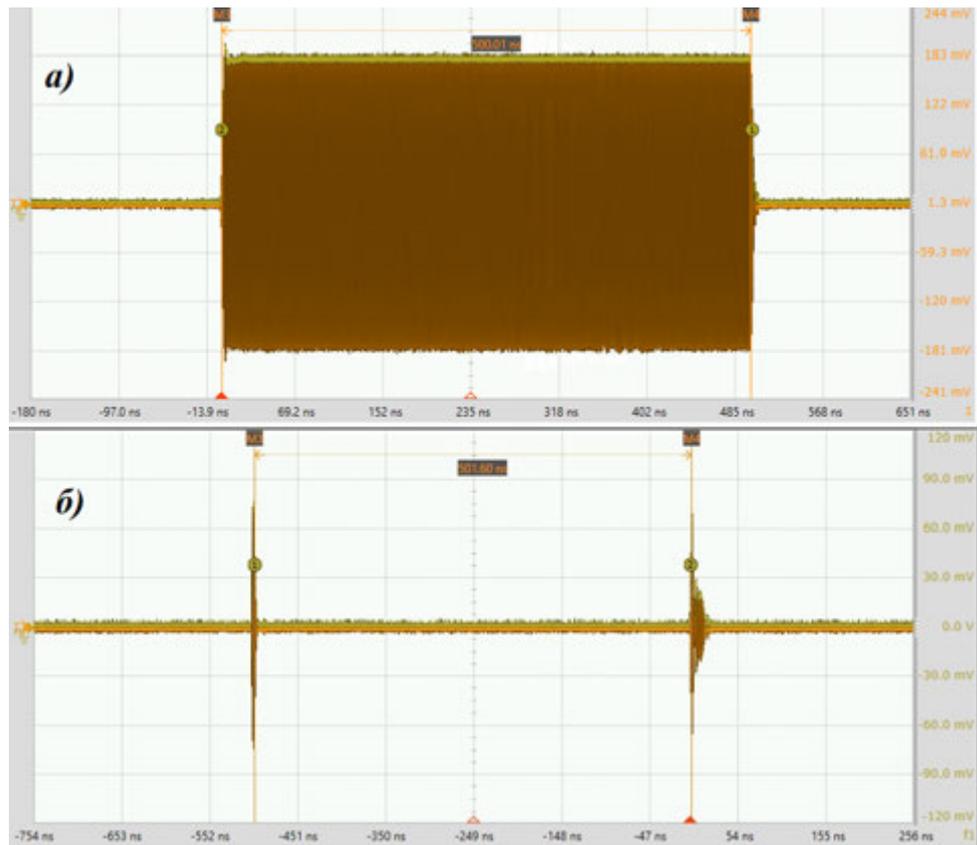


Рис. 3.13. Осциллограммы СВЧ мощности (в разном масштабе по времени) на входе и выходе ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц: а) входной импульс мощностью 200 мВт и длительностью 500 нс, задний фронт импульса 2,4 нс; б) результат воздействия указанного входного импульса на выходе ЦЗУ: метка «1» - прохождение переднего фронта, метка «2» - прохождение заднего фронта плюс процессы в ЦЗУ, соответствующие времени восстановления.

На рисунках 3.14 и 3.15 приведены двухканальные осциллограммы, на которых показано окончание импульса на входе ЦЗУ мощностью 1 Вт и 70 Вт соответственно и сигнал на выходе ЦЗУ после окончания входного импульса, а также переходной процесс в ЦЗУ (частота 10 ГГц). Своеобразная форма окончания входного импульса мощностью 70 Вт (рис. 3.15) продолжительностью приблизительно 30 нс связана очевидно с тем, что использованный усилитель мощности имеет в своем составе минимум два каскада, при этом последний каскад работает в режиме насыщения или ограничения мощности.

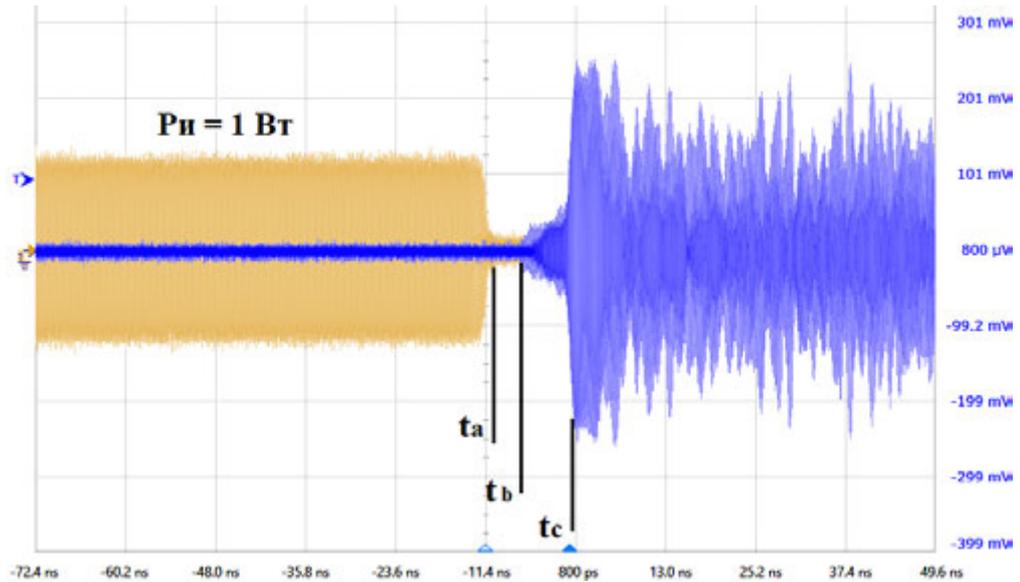


Рис. 3.14. Двухканальная осциллограмма окончания импульса СВЧ мощности уровня 1 Вт на входе ЦЗУ (желтый цвет) и выходе ЦЗУ (синий цвет) диапазона частот 10 ГГц. Моменты времени:  $t_a$  – окончание импульса мощности на входе ЦЗУ;  $t_b$  – момент появления электронного луча в выходном резонаторе;  $t_c$  – восстановление прохождения сигнала в ЦЗУ.

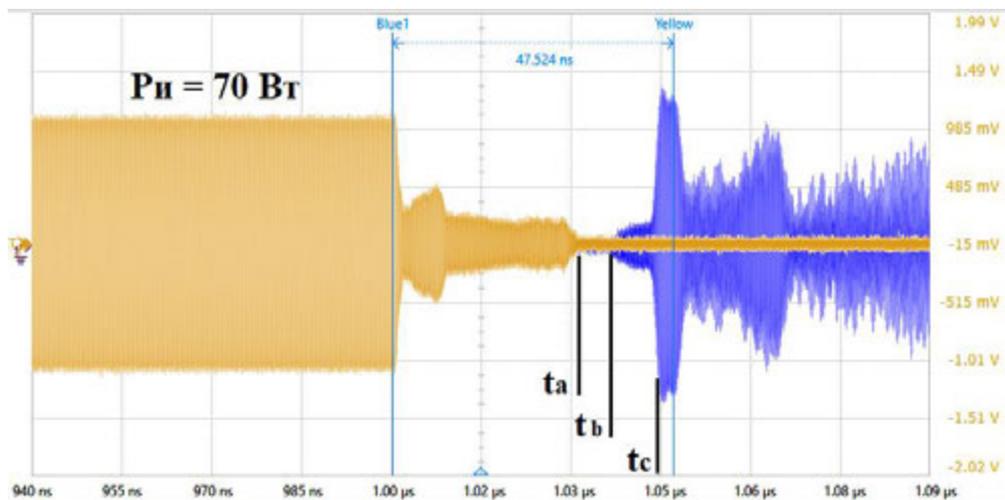


Рис. 3.15. Двухканальная осциллограмма окончания импульса СВЧ мощности уровня 70 Вт на входе ЦЗУ (желтый цвет) и выходе ЦЗУ (синий цвет) диапазона частот 10 ГГц. Моменты времени:  $t_a$  – окончание импульса мощности на входе ЦЗУ;  $t_b$  – момент появления электронного луча в выходном резонаторе;  $t_c$  – восстановление прохождения сигнала в ЦЗУ.

На обоих рисунках 3.14 и 3.15 отмечены временные точки  $t_a$ ,  $t_b$  и  $t_c$ , которые соответствуют следующим процессам:

- момент времени  $t_a$  – импульс мощности на входе ЦЗУ в основном закончился;
- интервал  $t_a \dots t_b$  – уровень мощности во входном резонаторе снижается до минимально низкого уровня, при котором электроны луча в зазоре резонатора еще отсутствуют (интервал соответствует этапу 1 по п. 3.4.2), продолжается режим защиты ЦЗУ. К данному интервалу времени следует отнести также время пролета первых электронов, способных выйти из входного резонатора (этап 4 по п. 3.4.2). Продолжительность интервала  $t_a \dots t_b$  равна 3,7 нс на рис. 3.14 и 5,3 нс на рис. 3.15;
- интервал  $t_b \dots t_c$  – в выходном резонаторе появляются электроны луча, увеличивается их количество с нарастающим переносом входной СВЧ мощности, имеющей место при окончании импульса – этап перехода из режима защиты в режим пропускания, совмещенный с временем пролета. Продолжительность данного интервала (6,9 нс на рис. 3.14 и 7,8 нс на рис. 3.15) свидетельствует о том, что во входной резонатор продолжает поступать мощность на окончании заднего фронта входного импульса. Уровень верхней границы линейности ЦЗУ и полное прохождение луча из входного резонатора в выходной достигается при завершении данного интервала;
- момент времени  $t_c$  – восстанавливается полное прохождение электронного луча. Правее точки  $t_c$  на осциллограммах показана СВЧ мощность на выходе ЦЗУ (изображение синего цвета на рис. 3.14 и 3.15, мощность менее 1 мВт), которая представляет собой прошедшую через ЦЗУ входную мощность, присутствующую в паузах между мощными входными импульсами. Данная мощность имеет шумовой характер.

Ненулевая продолжительность заднего фронта (спада) мощного входного СВЧ импульса приводит к продлению и частичному перекрытию по времени этапов 2 и 4 (см. п. 3.4.2) времени восстановления ЦЗУ – восстановления прохождения луча и времени пролета.

#### **4) Влияние длительности заднего фронта (среза) мощного входного импульса**

Рассмотренные в п. 3.4.2 этапы восстановления прохождения сигнала через ЦЗУ предполагают идеально прямоугольный задний фронт (срез) импульса входной СВЧ мощности, имеющий нулевую длительность. После окончания импульса мощность отсутствует. В этом случае представляется возможным описать и оценить по времени процессы восстановления прохождения сигнала в ЦЗУ, как было изложено выше.

Реальные импульсы с мощностью в единицы и десятки килоВатт не имеют столь коротких времен спада мощности. Спад мощности на заднем фронте импульса носит, как правило, экспоненциальный характер. При мощностях в единицы мВт (до 10...20 мВт), когда в ЦЗУ начинаются процессы восстановления прохождения луча, скорость спада мощности, как правило, существенно снижается. Это приводит к частичному перекрытию и объединению этапов восстановления прохождения сигнала через ЦЗУ.

Оценочно можно полагать, что если импульс мощности с уровнем в несколько кВт характеризуется таким временем спада мощности на заднем фронте, что до уровня приблизительно 5...10% от его амплитуды снижение мощности происходит за время 10...20 нс или более, то в этом случае скорость снижения мощности импульса на уровне процессов восстановления прохождения сигнала в ЦЗУ существенно ниже скорости процессов восстановления прохождения в устройстве. Таким образом, наступление момента, когда приемник способен принимать полезный сигнал, принятый антенной, определяется в большей степени продолжительностью заднего фронта мощного импульса, а не временем восстановления ЦЗУ. Профиль и время спадания мощности на выходе ЦЗУ практически повторяет профиль и время спадания мощности входного импульса на низком уровне мощности.

### 3.4.4 Заключение

Поскольку в ЦЗУ входной и выходной СВЧ тракты устройства разделены линией передачи сигнала, содержащей электронный луч, энергетическая емкость луча определяет максимальную мощность на выходе устройства при переходе из режима пропускания в режим защиты. По этой причине в ЦЗУ отсутствует пик просачивающейся на выход мощности, типичный для газоразрядных и полупроводниковых защитных устройств.

Время восстановления параметров ЦЗУ определяется временем затухания колебаний ВЧ энергии, поступившей во входной резонатор к моменту окончания импульса входной СВЧ мощности, и временем пролета электронного луча от входного резонатора до выходного резонатора после восстановления прохождения луча. При этом длительность заднего фронта мощного импульса должна быть пренебрежимо мала.

Целесообразно выделить 4 этапа в процессе восстановления прохождения сигнала в ЦЗУ: снижение накопленной во входном резонаторе СВЧ энергии от максимального уровня без электронной нагрузки резонатора; дальнейшее снижение СВЧ энергии при нарастающей нагрузке резонатора электронным лучом до уровня верхней границы линейности; снижение энергии при максимальной электронной нагрузке резонатора до уровня максимальной чувствительности ЦЗУ; задержка передачи сигнала из входного резонатора в выходной, связанная с временем пролета электронов луча между резонаторами.

Время восстановления параметров ЦЗУ в большей степени определяется добротностью резонатора и рабочей частотой и в меньшей степени – уровнем входной импульсной мощности (см. выражение (3.14)).

Аналитическая оценка времени восстановления ЦЗУ диапазона частот 10 ГГц дает значение приблизительно 10 нс, для диапазона частот 3 ГГц – 22...26 нс. За дополнительное время от 3 до 10 нс в зависимости от диапазона частот в ЦЗУ восстанавливается максимальная чувствительность, соответствующая коэффициенту шума 1...1,5 дБ.

Экспериментально продемонстрировано, что пики мощности на выходе ЦЗУ в начале и в конце входного мощного импульса связаны с фронтами этого импульса и их прохождением через ЦЗУ.

Отраженная от входа ЦЗУ в режиме защиты импульсная мощность может многократно переотражаться от входа ЦЗУ и других элементов СВЧ тракта и, таким образом, продлевать процесс восстановления прохождения сигнала в ЦЗУ. Для исключения данного эффекта следует использовать развязывающее устройство (например, ферритовый вентиль) и располагать его по возможности ближе к ЦЗУ.

Экспериментальные данные подтверждают справедливость приведенных выше аналитических оценок времени восстановления ЦЗУ.

При реальных киловаттных входных импульсах мощности с задним фронтом порядка десятков наносекунд профиль и время спада мощности на выходе ЦЗУ практически повторяет профиль и время спада мощности входного импульса на низком уровне мощности.

### **§ 3.5 Фазовая линейность ЦЗУ в полосе рабочих частот**

Набег фазы от входа до выхода ЦЗУ определяется электрической длиной входного коаксиально-волноводного перехода (или коаксиального перехода для ЦЗУ диапазона частот 2...3 ГГц), коаксиального ввода во входной резонатор, включающего керамическую вакуумно-плотную шайбу, входного резонатора, участка передачи сигнала электронным лучом, выходного резонатора, коаксиального вывода из выходного резонатора с керамической вакуумно-плотной шайбой, а также полужесткого коаксиального кабеля, соединяющего выход ЦЗУ с входом малошумящего транзисторного усилителя (МШУ).

Линейная зависимость набега фазы СВЧ сигнала на длине устройства при изменении частоты является весьма важной характеристикой, т.к. свидетельствует о том, что модулированные и манипулированные сигналы могут

передаваться через устройство без искажений. ЦЗУ обеспечивает высокую фазовую линейность в полосе рабочих частот.

На рисунке 3.16 приведены фазо-частотная характеристика (ФЧХ) типичного ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц и соответствующее групповое время запаздывания ( $t_{гр}$ ), как мера нелинейности ФЧХ:

$$t_{гр} = -\frac{d\varphi}{df}, \quad (3.10)$$

где  $\varphi$  – разница фаз сигнала на входе и выходе ЦЗУ,  $f$  – частота сигнала.

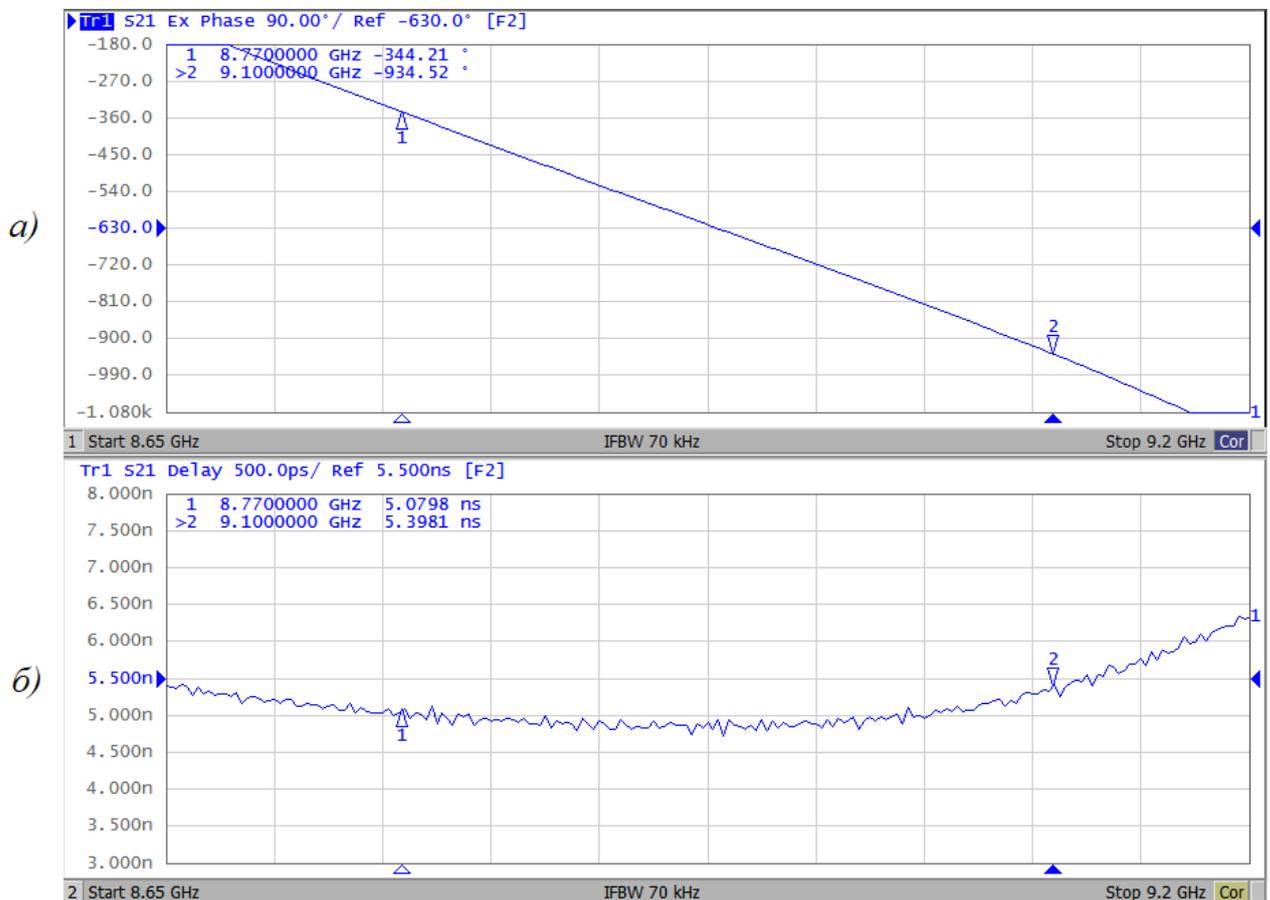


Рис. 3.16. Фазо-частотная характеристика (а) и групповое время запаздывания (б) ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц. Рабочая полоса частот – между маркерами «1» и «2».

Групповое время запаздывания в полосе рабочих частот изменяется от 4,8 нс до 5,4 нс (см. рис. 3.16-б). Можно полагать, что групповое время запаздывания  $t_{гр} \approx 5$  нс во всей полосе рабочих частот ЦЗУ – время распространения сигнала в устройстве включая входной коаксиально-волноводный переход и полужесткий коаксиальный кабель длиной 90...100 мм на выходе ЦЗУ, предназначенный для подсоединения к МШУ.

Таким образом, ЦЗУ обладает высокой фазо-частотной линейностью и способно работать в системах с фазовым и частотным манипулированием зондирующих сигналов.

### **§ 3.6 Параметры электромагнитной совместимости ЦЗУ**

Параметры электромагнитной совместимости [110-113,70] оказывают существенное влияние на работоспособность радиоэлектронных систем, на достоверность получаемой информации, чувствительность, устойчивость к высокочастотным перегрузкам и другие важнейшие характеристики. В настоящей работе рассмотрены основные требования из области электромагнитной совместимости, предъявляемые к ЦЗУ.

#### **3.6.1 Подавление побочных каналов приема**

Электродинамическая система ЦЗУ состоит из двух несвязанных один с другим резонаторов, нагруженных общим электронным лучом. Сигнал через резонаторы проходит последовательно посредством связи через электронный луч. По этой причине для устройства характерно значительное ослабление сигнала при отстройке от резонансной (циклотронной) частоты – вне рабочей полосы частот ЦЗУ [113]. Теоретические особенности частотной избирательности ЦЗУ рассмотрены в п. 2.3.2 (коэффициент передачи на рис. 2.16).

Экспериментальные данные коэффициента передачи ЦЗУ в широкой полосе частот приведены на рисунке 3.17.

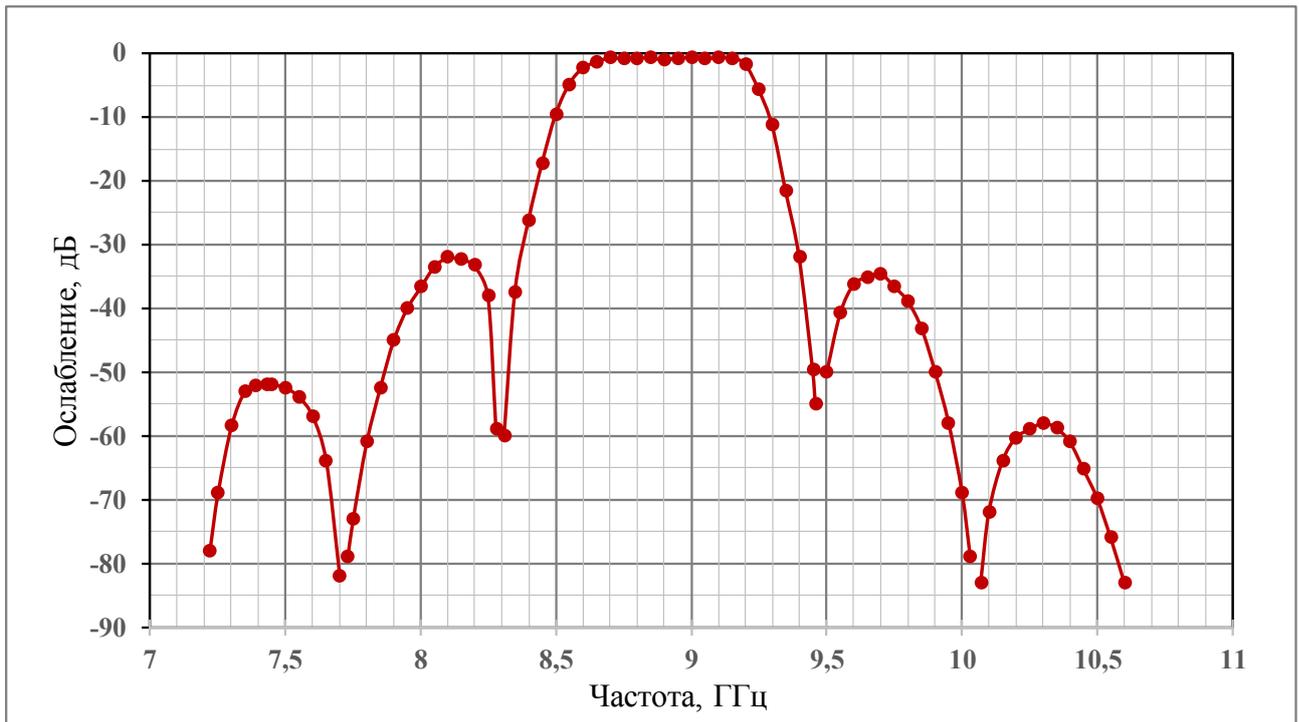


Рис. 3.17. Экспериментальная амплитудно-частотная характеристика ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц в широкой полосе частот.

Как поясняется в п. 2.3.2, ослабление сигнала за пределами рабочей полосы частот ЦЗУ и нули коэффициента передачи обусловлены тем, что при отстройке частоты сигнала от циклотронной частоты линия, на которой расположены центры инерции поперечных сечений электронного луча все в большей степени отличается от «прямого стержня» и трансформируется во все более «закрученную спираль», вращающуюся вокруг оси электронного луча с циклотронной частотой. При этом суммарный наведенный в выходном резонаторе ВЧ ток снижается.

В частотных точках с минимальным коэффициентом передачи спираль центра инерции электронного луча содержит на длине резонатора целое число полных оборотов, теоретически должна приводить к нулевой активной составляющей электронной проводимости (см. рис. 2.16) и, соответственно, нулевому коэффициенту передачи ЦЗУ. На экспериментальной кривой рис. 3.17

коэффициент передачи на частотах близких к рабочей полосе частот «нулей» составляет  $-55\dots-60$  дБ. Это связано с неоднородностью продольного магнитного поля на длине резонатора, отклонением его от уровня циклотронного резонанса на средней частоте рабочей полосы частот и, как следствие, размыванию «нулевой» активной электронной проводимости.

Отстройка по частоте, на которую смещены «нули» коэффициента передачи от рабочей полосы частот, возрастает при расширении рабочей полосы частот (см. рис. 2.16). Это связано с уменьшением угла пролета электронами резонаторов и, соответственно, необходимостью увеличения отстройки по частоте, которая приводит к преобразованию центра инерции электронного луча в спираль с целым количеством оборотов на длине каждого из резонаторов. Уменьшение угла пролета связано с увеличением потенциала дрейфа и сокращением длины электронного зазора резонаторов, что приводит к снижению электронной проводимости луча и коэффициента передачи ЦЗУ, но, в свою очередь, может быть скомпенсировано увеличением тока луча и уменьшением величины поперечного зазора резонаторов (см. выражение (2.23) для активной электронной проводимости луча на циклотронной частоте).

Затухание сигнала на боковых «пиках» коэффициента передачи и частота «нулей» коэффициента передачи может отличаться от расчетных значений вследствие неоднородности продольного магнитного поля, неточного совпадения собственных частот входного и выходного резонаторов с центральной частотой рабочей полосы частот (при этом смещенная в небольших пределах частота нагруженного пучком резонатора может быть скорректирована магнитным полем), допущений, принятых при расчетах (чисто активная внешняя нагрузка трактов ЦЗУ, идеализированная трансформация активной внешней нагрузки в плоскость резонатора для согласования ее с проводимостью электронного пучка), а также другие факторы [113].

Для максимально возможного подавления приема по «зеркальному каналу» или по другому побочному каналу приема, наиболее критичному для

приемника, конструкция резонаторов и электрический режим ЦЗУ, в определенных пределах, могут быть скорректированы таким образом, чтобы частота соответствующего критичного побочного канала находилась вблизи «нуля» коэффициента передачи ЦЗУ.

При типичных вариантах построения приемников современных РЛС и выборе частот гетеродинов подавление «зеркального канала» приема только за счет частотной избирательности ЦЗУ может достигать 60...70 дБ [113].

### 3.6.2 Интермодуляционные продукты

Продукты интермодуляции двух сигналов (или помех) в рабочей полосе частот ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц приведены на рисунке 3.18. Нелинейность ЦЗУ, обуславливающая появление продуктов интермодуляции, связана с оседанием электронов луча на стенках пролетного канала.

Рисунок 3.18-а – ЦЗУ линеен при мощности выходного сигнала  $P_{\text{вых}} = -18,2$  дБмВт, продукты интермодуляции отсутствуют выше уровня шумов.

Рисунок 3.18-б – при мощности выходного сигнала  $P_{\text{вых}} = -17,1$  дБмВт появляются продукты интермодуляции 3-го порядка примерно на 5 дБ выше уровня шумов, при этом ток коллектора из-за оседания луча снижается на 0,1 мкА (0,05%).

Рисунок 3.18-в – при дальнейшем увеличении мощности входного сигнала (мощность выходного сигнала  $P_{\text{вых}} = -7,2$  дБмВт) дополнительно появляются продукты интермодуляции 5-го и 7-го порядков, при этом ток коллектора из-за оседания луча снижается на 2 мкА (1%).

Таким образом, динамический диапазон ЦЗУ по интермодуляции в условиях, представленных на рисунке 3.18-б, составляет приблизительно 76 дБ (уровень мощности интермодулирующих сигналов минус уровень шумов, который превышает продуктами интермодуляции 3-го порядка примерно на 3...5 дБ) [113].

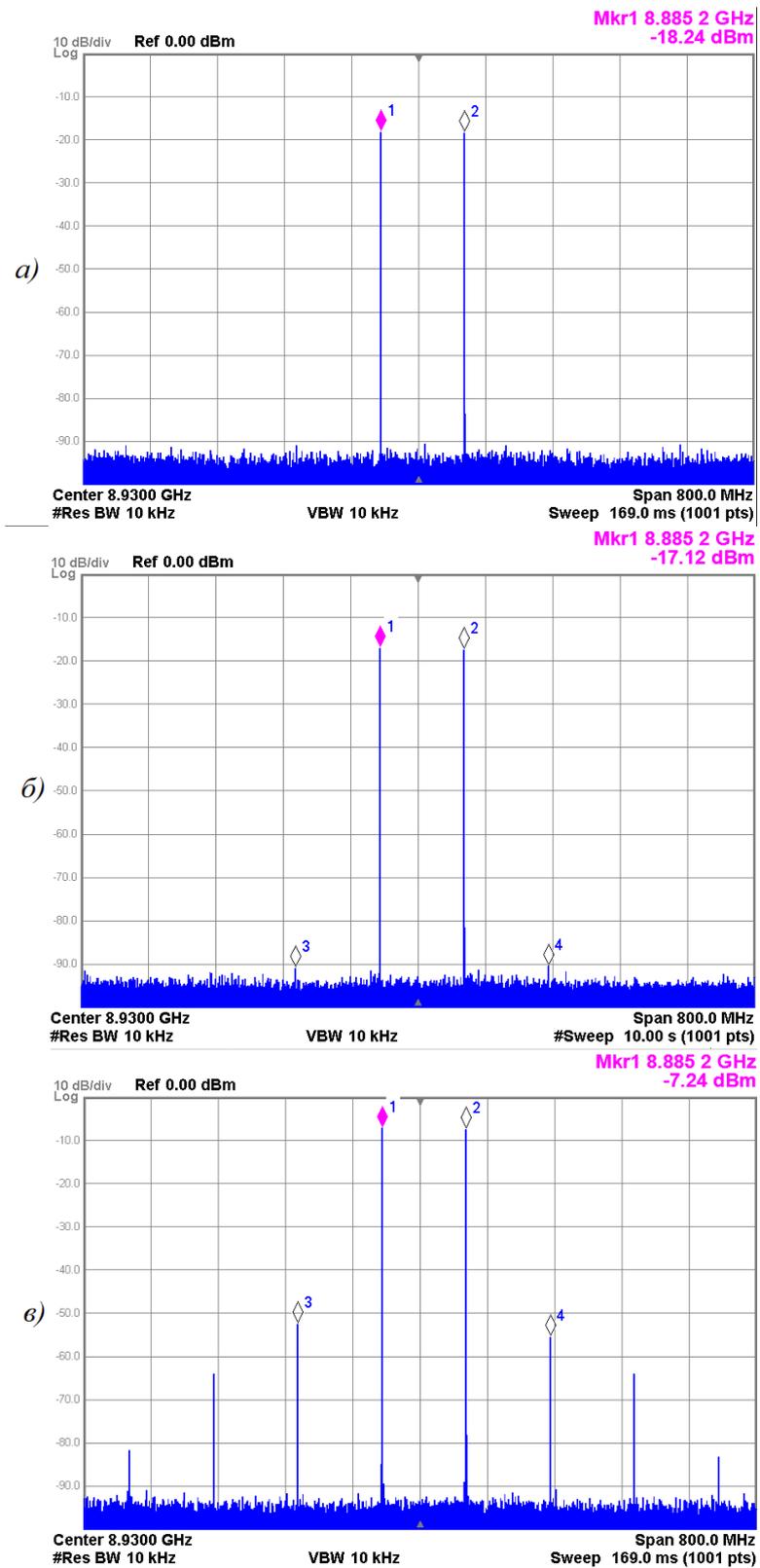


Рис. 3.18. Интермодуляционные продукты двух сигналов, отстоящих по частоте на 100 МГц: а) ЦЗУ линейен, интермодуляция не фиксируется; б) продукты интермодуляции 3-го порядка на 5 дБ выше уровня шумов; в) присутствуют продукты интермодуляции 3-го, 5-го и 7-го порядков.

Следует отметить, что верхняя граница линейности по компрессии коэффициента передачи на 1 дБ составляет приблизительно  $P_{-1\text{дБ}} \approx 3 \dots 5$  дБмВт (см. рис. 3.8 и п. 3.3.2) и имеет место при оседании приблизительно 20% тока луча. В то же время из приведенных в настоящем пункте данных следует, что продукты интермодуляции появляются при ухудшении токопрохождения луча на уровне  $\approx 0,05 \dots 0,1\%$ . Для увеличения границы линейности по интермодуляционным критериям следует очень тщательно обеспечивать фокусировку и транспортировку луча, увеличивать электронный зазор в резонаторах, увеличивать потенциал дрейфа луча, что, очевидно, будет препятствовать расширению полосы рабочих частот устройства.

### 3.6.3 Блокирование сигнала помехой

Результаты определения восприимчивости ЦЗУ (диапазон частот 9 ГГц) при блокировании его помехой в рабочей полосе частот приведены на рисунке 3.19.

На рис. 3.19-а показан сигнал с уровнем  $P_{\text{вых}} = -112,48$  дБмВт, который приблизительно на 5 дБ превышает уровень шумов при отсутствии блокирующей помехи.

При увеличении мощности помехи в рабочей полосе частот ЦЗУ, отстоящей от сигнала по частоте на 30 МГц (рис. 3.19-б), блокирование сигнала (снижение его амплитуды) начинается при мощности помехи -6,5 дБмВт. При этом амплитуда сигнала понижается приблизительно на 0,5 дБ, прохождение луча ухудшается на 0,43% (0,9 мкА при токе луча 207,7 мкА).

Блокирование сигнала помехой, как и рассмотренные выше другие нелинейные эффекты, связано с тем, что достаточно мощная помеха приводит к оседанию части электронов луча на стенках пролетного канала ЦЗУ, к соответствующей потере полезного сигнала, введенного в луч, а также к проявлению нелинейных эффектов при передаче сигнала.

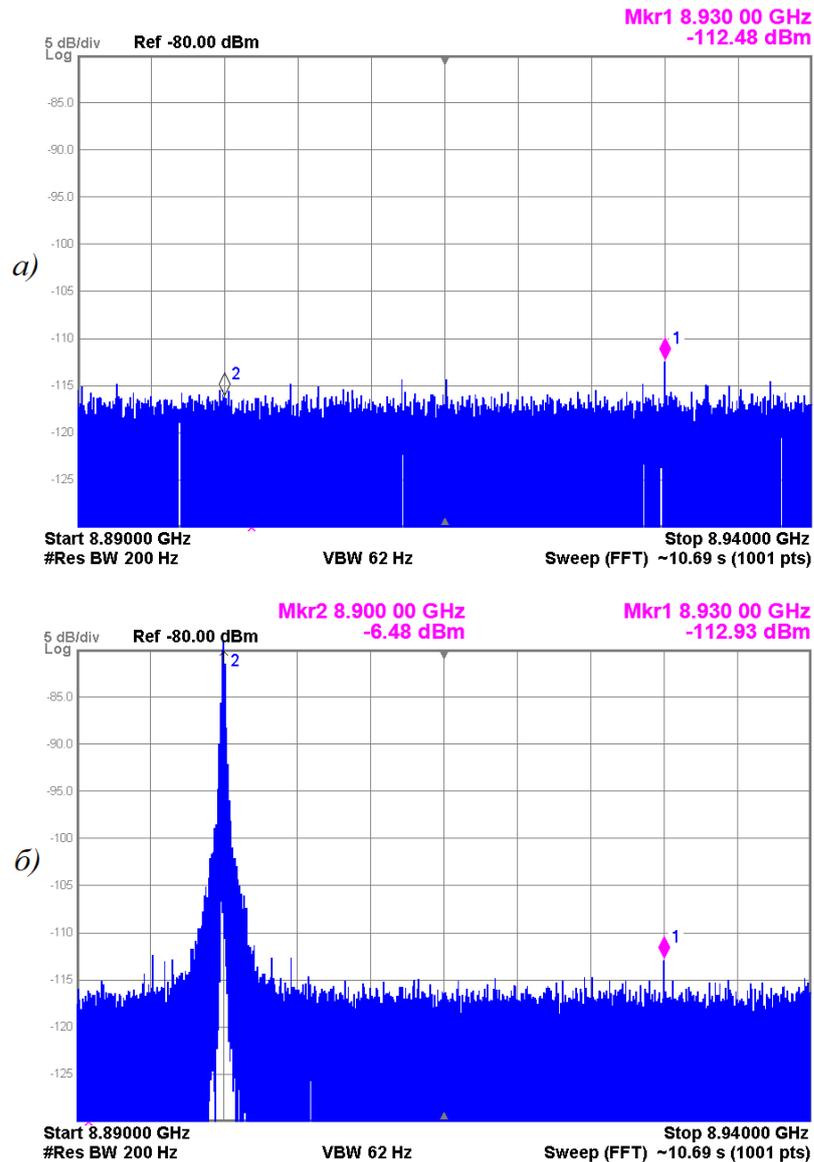


Рис. 3.19. Блокирование ЦЗУ помехой в рабочей полосе частот, помеха смещена от сигнала по частоте на 30 МГц: а) помеха отсутствует, уровень сигнала (-112,48 дБмВт – маркер «1») приблизительно на 5 дБ выше уровня измеренных шумов; б) уровень помехи -6,5 дБмВт (маркер «2»), начинается блокирование сигнала, амплитуда которого понизилась приблизительно на 0,5 дБ.

Динамический диапазон ЦЗУ по блокированию помехой в рабочей полосе частот в условиях, представленных на рисунке 3.19, составил приблизительно 110 дБ (уровень мощности блокирующей помехи минус уровень шумов, который превышает сигналом примерно на 3...5 дБ, при этом амплитуда сигнала начинает понижаться под воздействием помехи) [113].

### **3.6.4 Заключение**

Для ЦЗУ характерно значительное ослабление сигналов вне рабочей полосы частот, таким образом, устройство, помимо защитных функций, дополнительно выполняет функции частотного преселектора приемного устройства РЛС и повышает помехозащищенность, в том числе по побочным каналам приема.

При типичных вариантах построения приемников современных РЛС и выборе частот гетеродинов подавление «зеркального канала» приема только за счет частотной избирательности ЦЗУ может достигать 60...70 дБ.

ЦЗУ имеет значительный динамический диапазон по интермодуляции и блокированию помехой в рабочей полосе частот. При этом причиной нелинейных искажений, обуславливающих ограничение динамического диапазона, является оседание части электронов луча на стенках пролетного канала при определенном уровне СВЧ мощности, воздействующей на луч.

Таким образом, ЦЗУ обладает достаточно привлекательными параметрами электромагнитной совместимости, прежде всего в части подавления побочных каналов приема. Линейность ЦЗУ также существенно превышает линейность малошумящих СВЧ транзисторов, особенно в диапазоне частот «Х» и выше с критерием компрессии коэффициента передачи на 1 дБ. Линейность ЦЗУ с критерием по продуктам интермодуляции может быть существенно повышена при обеспечении полного прохождения луча в электронных зазорах резонаторов с достаточным запасом по зазору между лучом и стенками пролетного канала.

### **§ 3.7 Амплитудные и фазовые шумы**

В предыдущей главе, в п. 2.3.3 - п.п. 3) показано, что разброс поперечных скоростей электронов в электронном луче, обусловленный эмиссией электронов нагретым катодом, в значительной степени ослабляется в расходящемся магнитном поле и/или при взаимодействии с входным резонатором, нагруженным на согласованную входную нагрузку.

Разброс продольных скоростей электронов имеет несколько источников происхождения применительно к ЦЗУ:

- 1) разброс скоростей, возникающий на нагретом катоде, ослабляется полем пространственного заряда вблизи катода;
- 2) трансформация разброса поперечных скоростей электронов в расходящемся от катода магнитном поле в разброс продольных скоростей;
- 3) различная скорость дрейфа электронов луча на его периферии и в центре луча вследствие провисания электрического потенциала внутри луча.

Первый и второй механизмы происхождения продольного разброса скоростей в значительной степени ослабляются ускорением электронов до единого потенциала дрейфа при прохождении луча через фокусирующие и ускоряющие электроды. Третий механизм достаточно слаб в приборах данного типа, как показано в п. 2.3.3 - п.п. 3). Продольный разброс скоростей электронов приводит к размытию циклотронной спирали, на которой располагаются центры масс поперечных сечений луча при смещении рабочей частоты сигнала от циклотронной (на циклотронной частоте центры масс поперечных сечений луча располагаются на прямой линии, параллельной направлению дрейфа, разброс продольных скоростей электронов не приводит к ее деформации).

Указанный выше разброс поперечных и продольных скоростей электронов является одним из основных источников амплитудных и фазовых шумов (спектральная плотность мощности флуктуаций амплитуды или фазы) в ЦЗУ. Другим источником такого рода шумов являются пульсации питающих напряжений электродов ЦЗУ и тока подогревателя катода, т.к. катод в ЦЗУ является квазипрямокальным (кern катода приварен к середине подогревателя) и пульсации тока в подогревателе приводят к соответствующим пульсациям напряжения на катоде.

Пульсации напряжения, а, следовательно, и скорости дрейфа электронного луча приводят к изменениям электронной нагрузки резонаторов и к соответствующим изменениям коэффициента передачи ЦЗУ (амплитудные шумы), а также к изменениям времени пролета электронов луча между

резонаторами (фазовые шумы). Амплитудные и фазовые шумы ЦЗУ приблизительно одинаковы по их уровню.

На рисунке 3.20 приведена типичная зависимость амплитудных шумов ЦЗКУ (ЦЗУ с подключенным к выходу МШУ) диапазона частот 10 ГГц на частотах анализа при их отстройке от несущей частоты сигнала на величину от 10 Гц до 2 МГц.

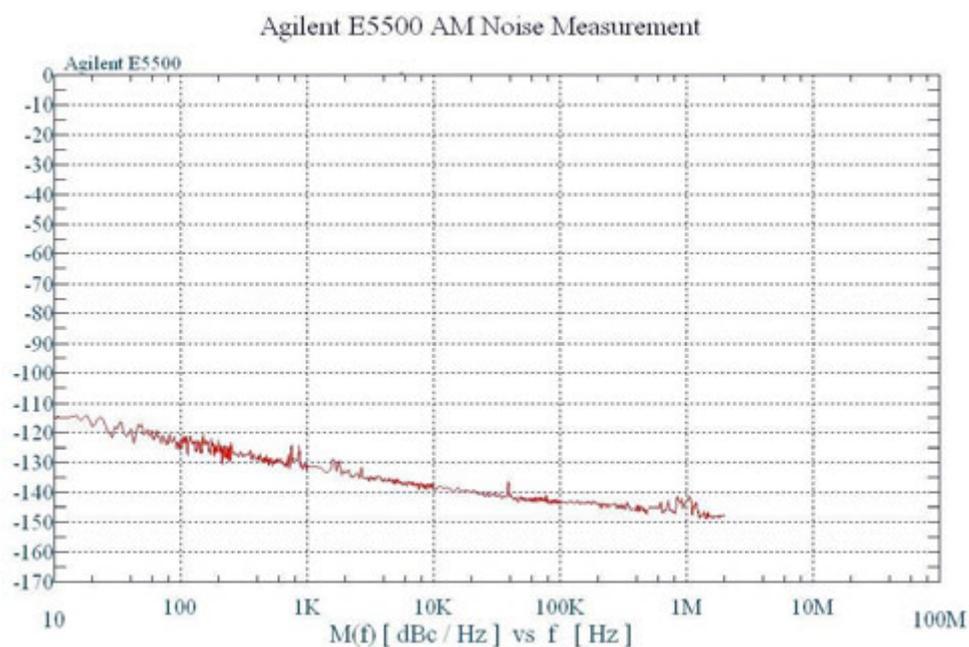


Рис. 3.20. Кривая зависимости амплитудных шумов ЦЗКУ диапазона частот 10 ГГц на частотах отстройки от несущей от 10 Гц до 2 МГц.

На рисунке 3.21 показаны зависимости фазовых шумов ЦЗКУ того же типа для двух случаев: а) частота несущей совпадает с циклотронной частотой; б) частота несущей отстоит от циклотронной частоты на 250 МГц. Фазовые шумы в случае смещения частоты несущей от циклотронной частоты (рис. 3.21-б) несколько выше случая, представленного на рис. 3.21-а: фазовые шумы на частоте анализа 10 кГц хуже на 1,5 дБн/Гц (метки «3» на рисунках «а» и «б»), на частоте анализа 100 кГц – хуже на 2,8 дБн/Гц (метки «4»). Данный эффект связан с тем, что, как уже упоминалось, при смещении частоты сигнала (в данном случае частоты несущей) от циклотронной частоты прямая линия, вдоль которой располагаются центры масс поперечных сечений электронного

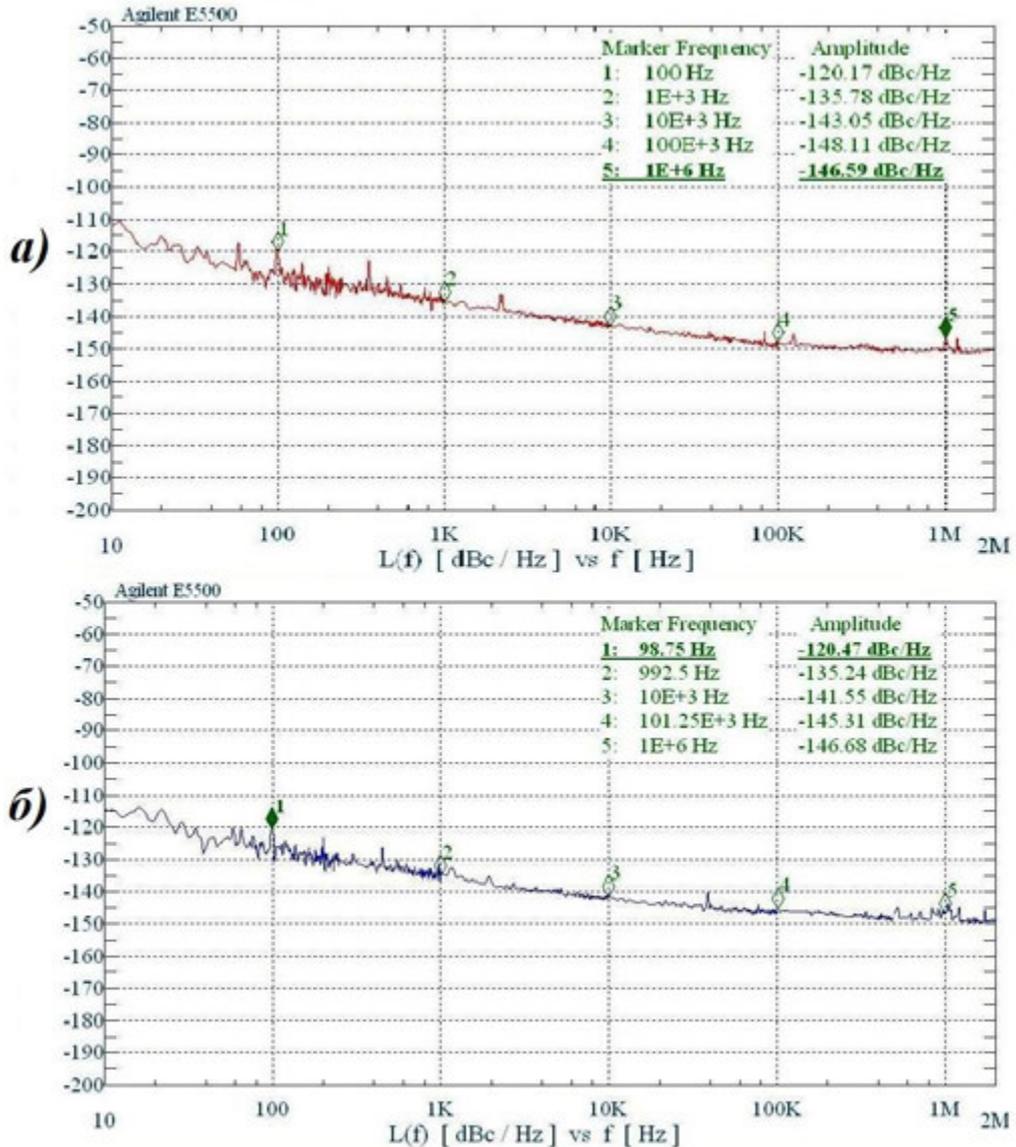


Рис. 3.21. Кривая зависимости фазовых шумов ЦЗКУ диапазона частот 10 ГГц на частотах отстройки от несущей от 10 Гц до 2 МГц: а) частота несущей совпадает с циклотронной частотой; б) частота несущей отстоит от циклотронной частоты на 250 МГц.

луча, преобразуется в слабо закрученную спираль. При этом пульсации скорости электронов приводят к размытию данной спирали и к возрастанию амплитудных и фазовых шумов ЦЗУ (см. рис. 2.6, п. 2.3.2). На циклотронной частоте центры масс поперечных сечений луча располагаются на одной прямой линии – продольной оси луча, в этом случае пульсации скорости электронов не приводят

к возрастанию амплитудных и фазовых шумов (при идеальном однородном циклотронном магнитном поле).

Незначительные пики на обеих кривых на рис. 3.21-а и 3.21-б на частоте анализа 100 Гц очевидно свидетельствуют о недостаточной фильтрации питающей сети 50 Гц после двухполупериодного выпрямителя.

Приведенные на рисунках 3.20 и 3.21 данные по амплитудным и фазовым шумам ЦЗКУ в целом являются удовлетворительными для разработчиков приемных устройств. Важно не ухудшать значения приведенных параметров при использовании источников питания с недостаточно качественным подавлением пульсаций питающих напряжений как для ЦЗУ, так и для МШУ из состава ЦЗКУ.

## Глава 4

### ВОПРОСЫ КОНСТРУИРОВАНИЯ ЦЗУ

В данной главе рассмотрены наиболее важные конструктивные особенности циклотронных защитных устройств, которые позволили решить ряд достаточно важных задач при их разработке. При этом значительная часть конструктивных решений ЦЗУ была воспринята «по наследству» от предшественников ЦЗУ – электростатических усилителей (ЭСУ).

#### § 4.1 Магнитная система ЦЗУ

Классическая магнитная система ЭСУ на постоянных магнитах из сплава самарий-кобальт имела броневой тип, на внутренних поверхностях противоположных стенок располагались основные магниты (группы магнитов) противоположных полюсов (см. рис. 4.1). При недостаточном уровне магнитной индукции на боковых стенках могли устанавливаться дополнительные магниты.

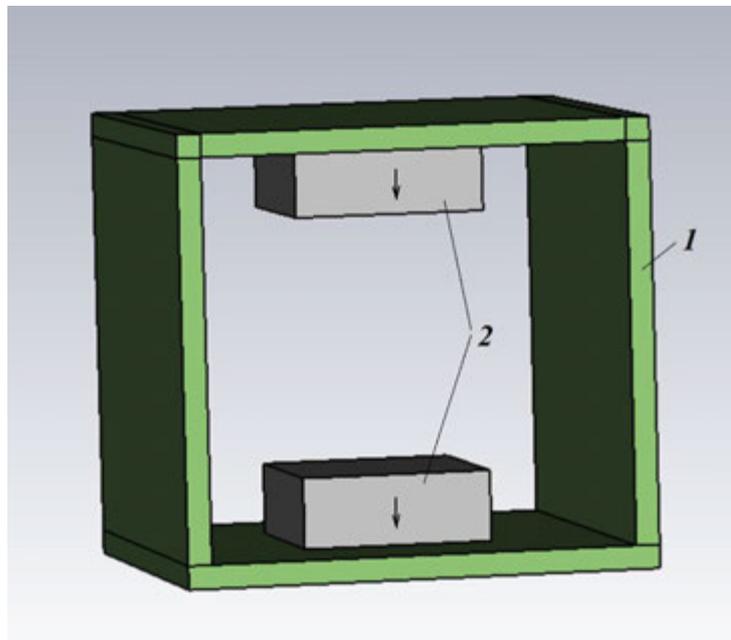


Рис. 4.1. Классическая магнитная система ЭСУ. Цифрами обозначены: 1 – магнитопровод броневого типа, 2 – основные магниты. Стрелками обозначено направление намагниченности магнитов.

Вакуумный блок ЭСУ с входящими в него полюсными наконечниками устанавливался в пространстве между основными магнитами системы. Требуемый уровень магнитной индукции в области пространства взаимодействия электронного луча с ВЧ полем резонаторов и усилительной структурой обеспечивался подбором магнитной индукции основных магнитов (их частичным размагничиванием или дополнительным намагничиванием), установкой дополнительных корректирующих элементов из электротехнической стали или изменением положения дополнительных магнитов (при их наличии). Это достаточно сложная и трудоемкая процедура, учитывая необходимую точность, с которой следует получить требуемый уровень магнитной индукции в области взаимодействия. При этом должна быть обеспечена однородность индукции магнитного поля на длине пространства взаимодействия.

Вакуумный блок ЦЗУ, в силу того, что в нем нет усилительной структуры, имеет существенно меньшую длину области взаимодействия. Это позволяет использовать основные магниты с меньшей массой. Дополнительные магниты в магнитных системах ЦЗУ не используются.

Для облегчения и упрощения настройки магнитного поля в магнитных системах ЦЗУ см-диапазона длин волн, рассматриваемых в настоящей работе, было использовано оригинальное для данного класса задач решение: основные магниты на каждом из полюсов, которые в случае ЭСУ имели квадратную форму в плоскости, перпендикулярной продольной оси системы, были разделены на два магнита, располагавшиеся рядом. При их плотном соединении имел место аналог единого магнита с примерно теми же магнитными свойствами, при раздвигании магнитов индукция магнитного поля на данном полюсе снижалась (см. рис. 4.2). Таким образом была обеспечена возможность регулировки уровня магнитного поля на каждом из полюсов независимо. Это позволило также дополнительно регулировать профиль магнитного поля на длине пространства взаимодействия.

На рисунке 4.3 показаны варианты распределения продольной индукции магнитного поля в магнитной системе ЦЗУ в зависимости от зазора между магнитами на каждом из полюсов.

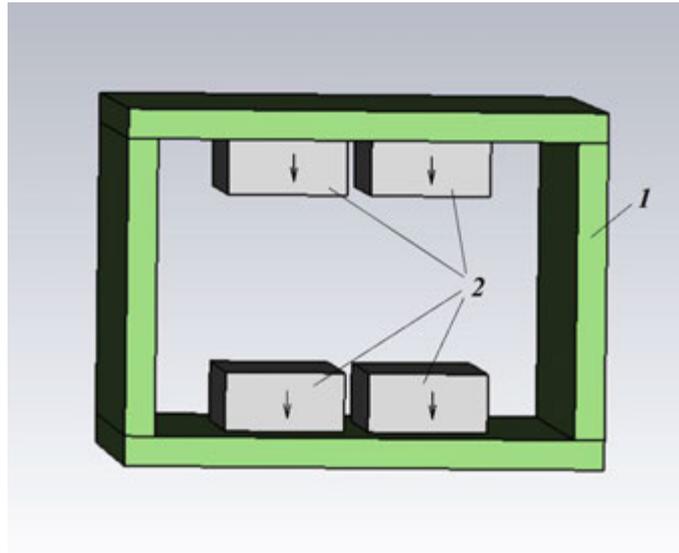


Рис. 4.2. Магнитная система ЦЗУ с составными магнитами на каждом полюсе. Цифрами обозначены: 1 – магнитопровод, 2 – магниты. Стрелками обозначено направление намагниченности магнитов. Условно верхняя пара магнитов образует полюс со стороны электронной пушки, нижняя пара магнитов – со стороны коллектора ЦЗУ.

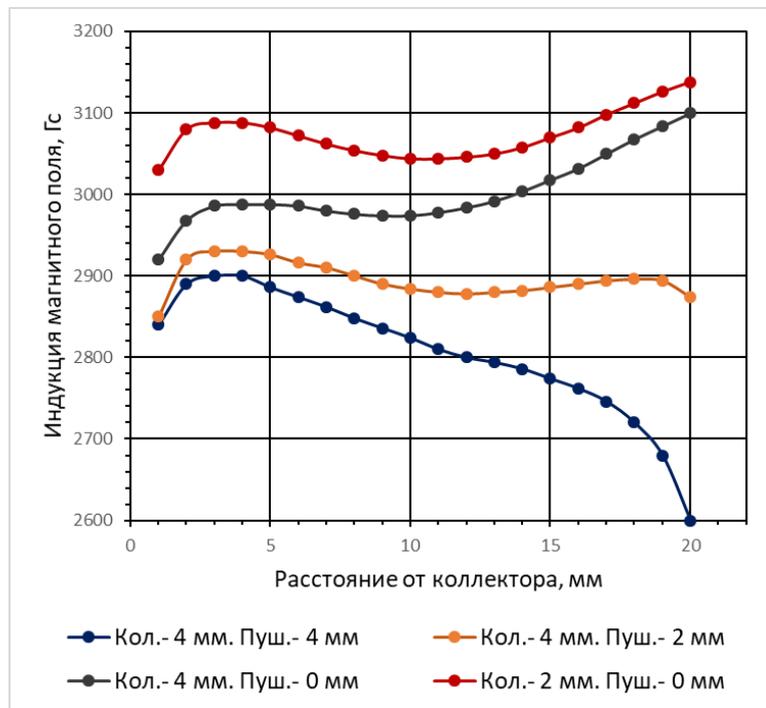


Рис. 4.3. Экспериментальные зависимости уровня и распределения продольной составляющей магнитной индукции от зазора между магнитами на каждом из полюсов магнитной системы ЦЗУ. В подписях к рисунку обозначено: «Кол.» - зазор между магнитами на коллекторном полюсе; «Пуш.» - зазор между магнитами на пушечном полюсе системы.

В идеальном случае взаимодействие сигнальной быстрой циклотронной волны с ВЧ полем входного и выходного резонаторов ЦЗУ должно происходить в однородном магнитном поле. Получить магнитное поле с высокой степенью однородности в практических конструкциях достаточно затруднительно. В работе [83] было показано, что некоторая неоднородность распределения продольного магнитного поля вдоль зазора резонатора Куччия вполне допустима, при этом необходимо увеличить ток луча для компенсации неоднородности магнитного поля. Рассматривалось неоднородное магнитное поле аксиально-симметричной структуры.

Использование в магнитной системе ЦЗУ в качестве одного полюса двух магнитов, расположенных рядом один с другим (см. рис. 4.2) с некоторым зазором между ними, приводит к появлению плоско-симметричной составляющей в структуре неоднородного магнитного поля. Данный эффект не является препятствием к использованию в ЦЗУ подобного рода магнитных полюсов с составными магнитами.

В работах [114 -стр.1478, 41 -стр.36] было установлено, что в монотонно изменяющемся параксиальном адиабатическом магнитном поле аксиально-симметричной или плоско-симметричной структуры характер изменения циклотронных волн одинаков – за один циклотронный оборот электрона влияние структуры поля (аксиально-симметричная или плоско-симметричная) «усредняется», существенной оказывается лишь степень количественного изменения индукции магнитного поля. Таким образом, использование в магнитной системе ЦЗУ на каждом из полюсов двух расположенных рядом магнитов, приводящее к появлению незначительной плоско-симметричной компоненты в структуре магнитного поля, не является препятствием к функционированию ЦЗУ.

При этом зазор между магнитами одного полюса не должен быть значительным (обычно не более 4 мм при размерах каждого магнита 50x20x10 мм), а магниты должны иметь приблизительно одинаковую энергию. Нарушение данного условия приводит к пространственному искривлению

магнитного поля и к нарушению юстировки вакуумного блока ЦЗУ в магнитной системе (оседанию электронного луча на стенках пролетного канала).

Таким образом, использование в магнитных системах ЦЗУ см-диапазона длин волн на каждом из полюсов двух магнитов с возможностью изменения в определенных пределах зазора между ними позволяет регулировать профиль распределения и уровень магнитной индукции. Такого рода конструкция существенно облегчает настройку магнитной системы ЦЗУ.

#### **§ 4.2 Входной тракт с повышенной устойчивостью к СВЧ мощности**

Входной СВЧ тракт и входной резонатор ЦЗУ в режиме защиты работают в напряженном режиме из-за поступающей в них СВЧ мощности высокого уровня. В режиме защиты приблизительно 90% падающей мощности отражается от входного резонатора ЦЗУ, во входном тракте образуется стоячая волна. При этом изменение рабочей частоты приводит к смещению минимумов и пучностей стоячей волны вдоль тракта.

Стойкость ЦЗУ к входной СВЧ мощности высокого уровня определяется двумя факторами: электрической прочностью входного тракта и тепловой устойчивостью входного тракта и входного резонатора, т.к. в них рассеивается приблизительно 10% падающей СВЧ мощности.

В ЦЗУ стандартных конструкций входная предельно-допустимая импульсная мощность не превышает 10 кВт при средней мощности до 250...300 Вт. При этом длительность импульса не должна превышать 10...20 мкс. При указанных параметрах предельной входной СВЧ мощности конструкция входного СВЧ тракта предполагает коаксиальный участок входной СВЧ линии вакуумного блока ЦЗУ (см. рис. 3.1, поз. 3), который заканчивается вакуумноплотной керамической шайбой, снаружи шайбы находится зонд, помещаемый во входной волновод через широкую стенку. Такая конструкция достаточно практична, т.к. позволяет подсоединять волновод к вакуумному блоку резьбовым способом на этапе настройки устройства. Зонд,

обеспечивающий связь коаксиального участка входного тракта ЦЗУ с входным волноводом, находится в объеме волновода и не требует обеспечения электрического контакта со стенкой волновода (рис. 4.4.).

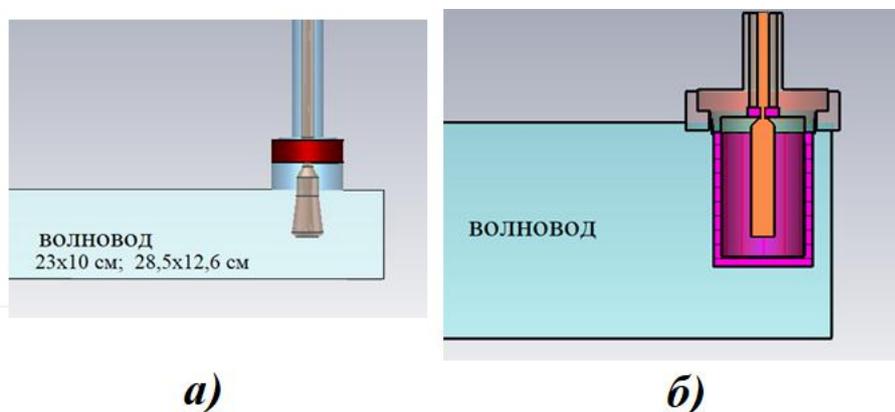


Рис. 4.4. Стандартные варианты соединения вакуумного блока ЦЗУ с входным волноводом: а) в диапазоне длин волн 3...4 см; б) в диапазоне длин волн 10 см. Красным и малиновым цветом показаны керамические детали вакуумного уплотнения.

Для увеличения указанных выше уровней предельно-допустимой входной СВЧ мощности необходимо повышать требования по электрической прочности входного тракта ЦЗУ, вводить жидкостное охлаждение. Увеличение длительности импульса входной мощности более 10...20 мкс (при достаточно высоком уровне входной мощности) также вынуждает принимать меры по увеличению электрической прочности, т.к. при подобной длительности импульса пробойные процессы успевают развиваться уже в пределах одного импульса.

Наиболее слабым элементом с точки зрения устойчивости к СВЧ пробоям в указанной конструкции являются керамическая шайба (рис. 4.4 - а) или керамический колпачок (рис. 4.4 - б), которые обеспечивают вакуумноплотную герметизацию вакуумного блока ЦЗУ.

При разработке ЦЗУ в диапазоне длин волн 4 см (входная импульсная мощность до 7 кВт, средняя мощность до 350 Вт, длительность импульса 60 мкс), а также в диапазоне длин волн 10 см (входная импульсная мощность до

50 кВт, средняя мощность до 1250 Вт, длительность импульса 60 мкс) стандартная конструкция входных СВЧ трактов не обеспечивала требуемую устойчивость к входной мощности. Ситуация для ЦЗУ диапазона длин волн 10 см осложнялась тем, что выходным усилителем мощности передатчика являлся амплитрон, который имел выброс мощности по переднему фронту импульса до 20% и более относительно плоской части с длительностью выброса до 10...20 нс. Данный пиковый выброс способствовал «поджигу» разряда в области керамического узла во входном тракте.

В конструкции входного тракта ЦЗУ и входного резонатора была введена система жидкостного охлаждения, изменен способ соединения входного волновода с коаксиальным участком тракта вакуумного блока (см. рис. 4.5).

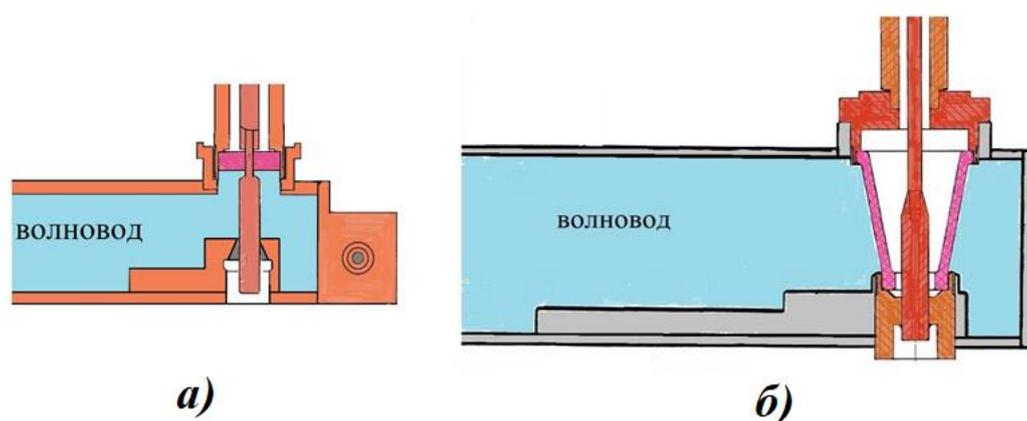


Рис. 4.5. Переработанные варианты соединения вакуумного блока ЦЗУ с входным волноводом для работы с увеличенным уровнем предельной входной СВЧ мощности: а) в диапазоне длин волн 4 см; б) в диапазоне длин волн 10 см. Малиновым цветом показаны керамические детали вакуумного уплотнения.

Доработанный вариант соединения коаксиального участка СВЧ тракта с волноводом (показан на рис. 4.5) при котором зонд, продолжающий центральный проводник коаксиала соединяется с противоположной стенкой волновода, позволил существенно повысить электрическую прочность входного тракта ЦЗУ. Основными факторами в повышении электрической прочности следует считать следующие:

1) существенное улучшение теплоотвода от зонда, продолжающего центральный проводник коаксиала, при закреплении его в противоположной стенке волновода. Данный фактор наиболее критичен для случая герметизации вакуумного блока с помощью керамической шайбы (рис. 4.5 - а), т.к. снимает значительную тепловую нагрузку на спай центрального штыря (сплав молибден-рений) в шайбе с самой шайбой при помощи глазури;

2) изменение структуры электрического СВЧ поля, в основном для случая герметизации вакуумного блока с использованием керамического конуса (рис. 4.5 - б). Использование керамического колпачка для герметизации вакуумного блока (рис. 4.4 - б) при предельных уровнях мощности приводило к возникновению вторично-электронного СВЧ разряда на вакуумной стороне керамического колпачка, сопровождавшегося свечением керамики, и нарушению ее целостности с последующим натеканием, зажиганием дугового разряда, расплавлением медного зонда и полным выходом из строя всего коаксиального участка тракта ЦЗУ. При использовании керамического конуса (рис. 4.5 - б) указанные негативные эффекты не возникают (при условии соблюдения конструктивно-технологических требований на спай керамического конуса с охватывающим металлом). При подобной конструкции крайне важно обеспечить отсутствие металлизации по керамике за пределами спая металла с керамикой (в области на поверхности керамики вблизи спая, не прикрытой металлом), что может способствовать концентрации СВЧ поля по краю металлизации и возникновению СВЧ пробоя;

3) существенный положительный эффект также оказало введение жидкостного охлаждения элементов коаксиального тракта и входного резонатора.

Предложенная конструкция была реализована в изделиях ЦЗКУ-3.

Таким образом, можно утверждать, что соединение зонда, размещаемого в волноводе для обеспечения связи коаксиала с входным волноводом ЦЗУ, с

противоположной стенкой волновода позволяет повысить устойчивость ЦЗУ к входной СВЧ мощности не менее, чем в 1,5...2 раза.

### § 4.3 Электронный зазор в резонаторах ЦЗУ

Для расширения полосы рабочих частот ЦЗУ необходимо увеличивать электронную нагрузку резонаторов. Наиболее эффективный путь в данном направлении – уменьшение величины электронного зазора  $d$  между ламелями (см. рис. 3.6). При этом необходимо исключить оседание луча на стенках пролетного канала, что приводит к ухудшению шумовых параметров ЦЗУ. Таким образом, стенки электронного зазора необходимо приближать к электронному лучу, но не допускать касания лучом стенок зазора.

Форма поперечного сечения ленточного электронного луча ЦЗУ, движущегося в однородном продольном магнитном поле, претерпевает существенную деформацию при движении его от электронной пушки до коллектора – поперечное сечение луча видоизменяется, особенно на краях «ленты», приобретает  $s$ -образную форму. Помимо этого, плоскость ленточного луча, как целого, поворачивается на несколько градусов.

Если электронная пушка установлена так, что катод, эмиттирующий ленточный луч, расположен по оси зазора на входе во входной резонатор и при этом параллелен стенкам зазора (такой вариант установки электронной пушки наиболее приемлем с точки зрения точности ее установки), то на выходе из зазора входного резонатора электронный луч вследствие его поворота приблизится к стенкам зазора. Выходной резонатор для компенсации поворота луча следует повернуть согласно с поворотом «ленты» луча так, чтобы на его длине краевые электроны луча имели максимально возможный зазор со стенками [115]. Однако, поворот «ленты» луча и его краевая деформация распределены по всей длине транспортировки луча от катода до коллектора, поворот выходного резонатора может обеспечить соответствующую корректировку пролетного канала лишь «ступенчатым» образом – с

определенной фиксированной точки траектории луча. Таким образом, очевидно, что поворот луча и его *s*-образная деформация вынуждают увеличивать электронный зазор в резонаторах.

На рисунке 4.6 приведен пример результатов моделирования электронного луча в ЦЗУ [102-105] диапазона частот 9 ГГц – трансформация и поворот поперечного сечения луча с током 200 мкА при потенциале дрейфа 20 В без повышенного уровня магнитного поля в области катода.

При повышении тока луча до 250...300 мкА, снижении потенциала дрейфа до 12...15 В (режимы, которые могут иметь место при настройке ЦЗУ), а также при использовании повышенного уровня магнитного поля в области катода, которое адиабатически снижается к области взаимодействия, краевые части «ленты» луча подвержены более существенной *s*-образной деформации вплоть до появления признаков диокотронной неустойчивости.

Влияние повышенного уровня магнитного поля в области катода с последующим его снижением к пространству взаимодействия на увеличение *s*-образной деформации краев «ленты» луча можно объяснить несовершенством полюсного наконечника, который имеет, например, простую цилиндрическую форму. В этом случае при расширении электронного луча при движении его от катода в средней части «ленты» луча образуется область с пониженной плотностью заряда. Следовательно, в периферийных областях «ленты» плотность заряда будет относительно выше. Указанный вид *s*-образной деформации в большей степени может проявляться в высокочастотных образцах ЦЗУ с более высоким уровнем магнитного поля. Данный тезис подтверждается результатами моделирования, приведенными в вышеуказанных работах.

В значительной степени решением проблемы «поворота луча» можно считать конструктивное предложение выполнять электронный зазор в паре резонаторов (входном и выходном) совместно, обеспечивая при изготовлении непрерывность поворота зазора на всей длине пространства взаимодействия – от начала зазора во входном резонаторе до окончания зазора в выходном резонаторе (патент [116]), см. рис. 4.7.

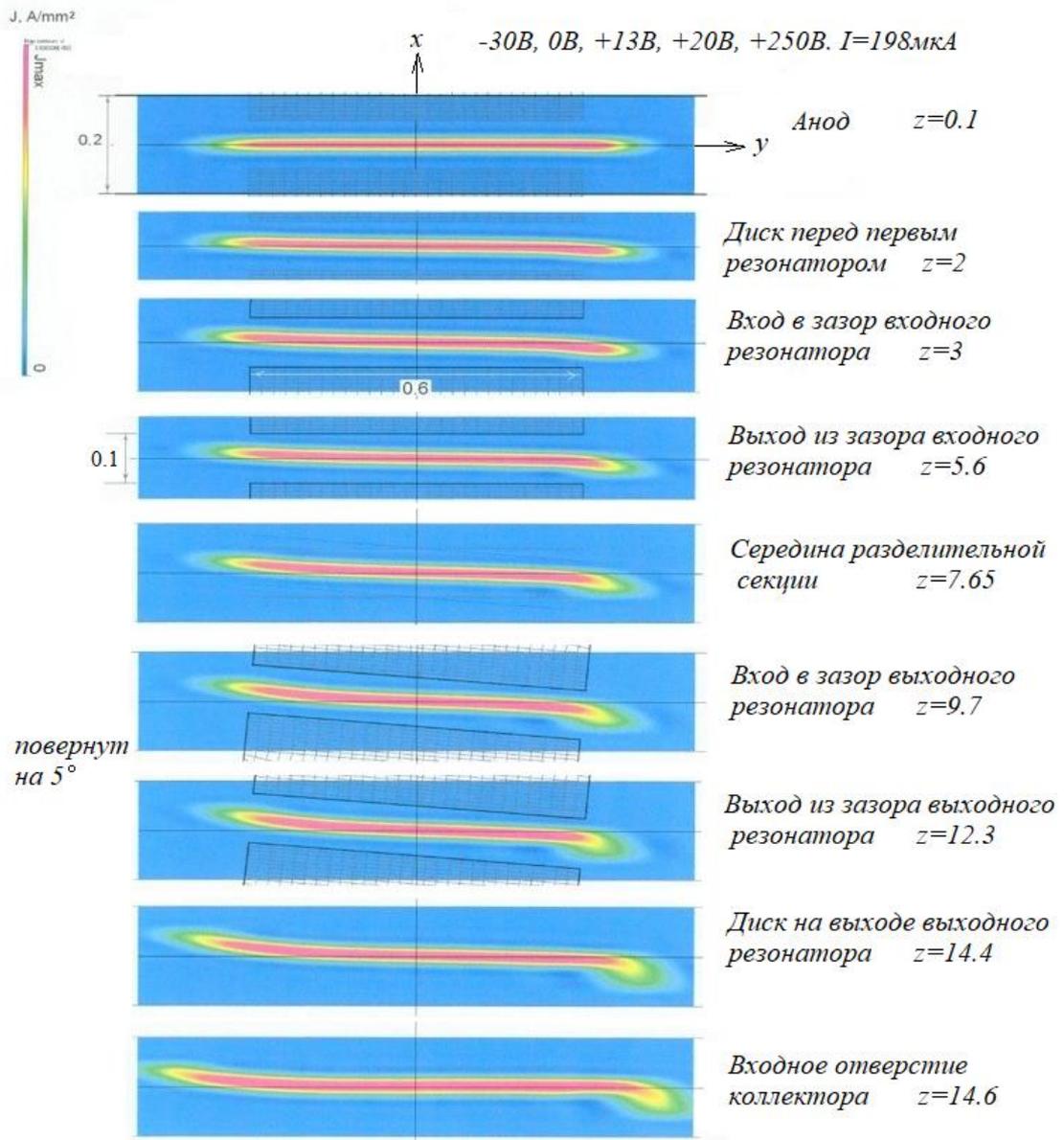


Рис. 4.6. Пример моделирования электронного луча в ЦЗУ диапазона частот 9 ГГц без повышенного уровня магнитного поля в области катода. Ток луча 198 мкА, потенциалы относительно катода: фокусирующий электрод -30 В, анод +13 В, корпус +20 В, коллектор +250 В. Ширина ламели  $S = 0,6$  мм; величина зазора  $d = 0,1$  мм;  $z$  – продольная ось луча, отсчет от катода.

Предложенный способ изготовления электронного зазора может дать максимальный эффект в случае, если зазор прорезается в уже спаянных между собой входном и выходном резонаторах. При этом нивелируются зазоры, допуски и погрешности, неизбежно имеющие место при изготовлении каждого из резонаторов и необходимые для соединения и разъединения резонаторов

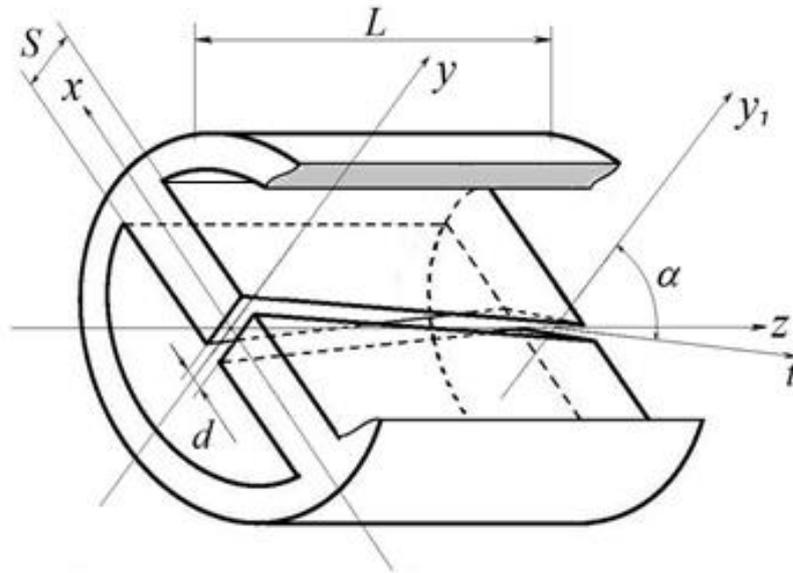


Рис. 4.7. Схематическое изображение поворота электронного зазора на длине пространства взаимодействия (на длине двух резонаторов). Плоскость «ленты» электронного луча на входе в зазор входного резонатора ( $z = 0$ ) лежит в плоскости  $y\theta z$ , на выходе из зазора выходного резонатора ( $z = L$ ) совпадает с плоскостью  $t\theta_1 z$ ,  $\alpha$  – суммарный угол поворота плоскости зазора на длине пространства взаимодействия.

между собой при их монтаже. В этом случае резонаторная сборка должна иметь специальное окно, через которое устанавливались бы смежные диски, закрывающие резонаторы, и разделительная секция (при ее наличии) в пространство между резонаторами (см. рис. 2.1). Данное окно после сборки следует запаять.

Преимущества предложенного способа прорезки электронного зазора могут быть реализованы и без специального окна для установки разделительной секции между резонаторами. В большинстве конструкций разделительная секция состоит из двух дисков, закрывающих входной резонатор со стороны коллектора и выходной резонатор со стороны пушки (см. рис. 3.1). После пайки двух резонаторов между собой и с двумя указанными внутренними дисками отверстия для прохождения электронного луча в этих дисках должны позволять пропустить сбоку от ламелей резонаторов проволоку электроискрового станка, предназначенную для прорезки зазора. После этого прорезается зазор указанной

конструкции. После прорезки зазора необходимо конструктивно-технологическими мерами обеспечить очистку всей сборки и области между дисками от загрязняющих продуктов выполненной операции.

Принцип прорезки электронно-лучевого зазора в двух резонаторах с непрерывным поворотом зазора на длине пространства взаимодействия может позволить еще в большей степени приблизить стенки пролетного канала к электронному лучу. Для этого следует промоделировать изменение формы поперечного сечения луча применительно к конкретному ЦЗУ на всей длине пространства взаимодействия, а электронный зазор выполнять таким образом, чтобы в каждом поперечном сечении зазор образовывали не параллельные прямые линии, а кривые, повторяющие образующую электронного луча с минимальным необходимым зазором по всей длине пространства взаимодействия.

Из вышеуказанного следует, что использование принципа прорезки электронного зазора в резонаторах ЦЗУ с непрерывно распределенным по длине пространства взаимодействия поворотом зазора, согласованным с поворотом электронного луча, позволяет приблизить стенки пролетного канала к электронному лучу и в значительной степени нивелировать погрешности и допуски изготовления резонаторов (патент [116]).

#### **§ 4.4 Электронная пушка ЦЗУ**

Размеры электронного луча, используемого в ЦЗУ, имеют определяющее влияние на основные электрические параметры устройства. Луч должен без оседания проходить в достаточно малом электронном зазоре, поскольку оседание электронов луча на стенках пролетного канала приводит к увеличению коэффициента шума. Малый поперечный размер электронного зазора обусловлен необходимостью увеличения электронной нагрузки резонатора и расширения рабочей полосы частот устройства (см. рис. 3.5 и 3.6). При этом зазор между электронным лучом и стенками пролетного канала определяет для

данной рабочей частоты верхнюю границу линейности устройства по входной мощности, т.к. при оседании краевых электронов луча на стенках при увеличении входной мощности приводит к появлению нелинейности при передаче сигнала.

Предельно «тонкая» лента электронного луча (размер  $h$  на рис. 3.6) обеспечивается прежде всего соответствующими размерами катода. КERN катода представляет собой сплюсненную до 20 мкм проволоку из сплава вольфрамовый с исходным диаметром 50 мкм. КERN приваривается к подогревателю из аналогичной проволоки. На КERN наносится молекулярно-напыленное оксидное покрытие [117-127] (см. рис. 4.8).

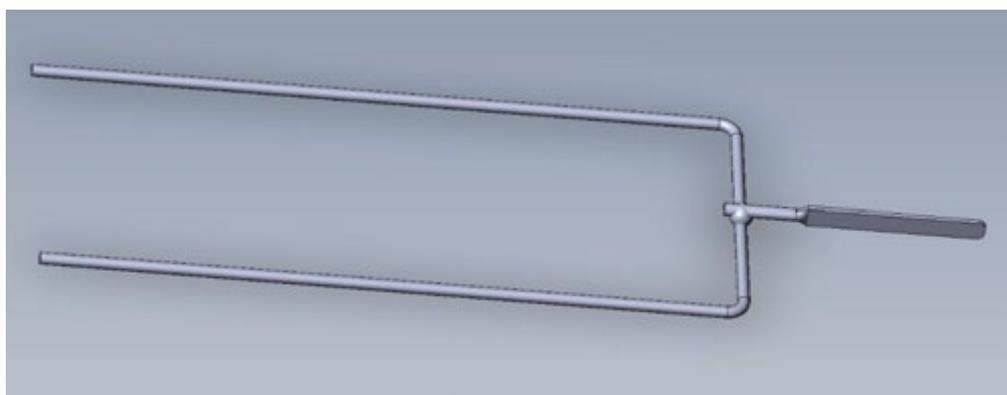


Рис. 4.8. Трехмерное изображение катода ЦЗУ: КERN катода с подогревателем.

Катод и базовая конструкция электронной пушки были разработаны Ю.А. Будзинским и Р.И. Шерстяных. В настоящее время в серийных ЦЗУ используется три вида электронных пушек: 1) в области катода имеется концентратор магнитного поля в виде половины эллипсоида вращения, выполненного из ферромагнитного материала; 2) концентратор магнитного поля в области катода выполнен в виде ферромагнитного стержня с диаметром, приблизительно равным длине катода; 3) концентратор магнитного поля в области катода отсутствует.

Общий вид электронной пушки ЦЗУ с концентратором магнитного поля в виде половины эллипсоида вращения приведен на рисунке 4.9.

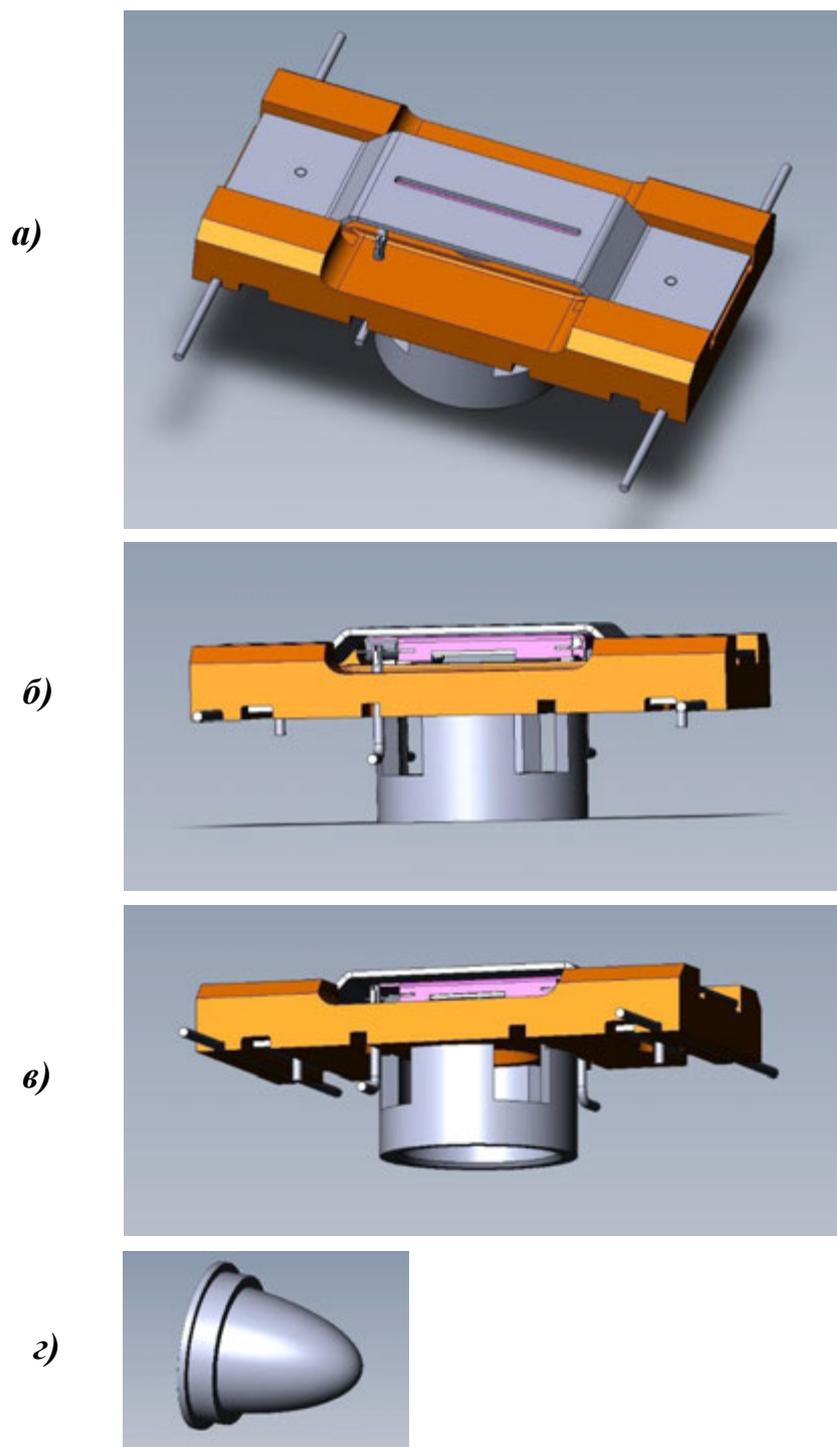


Рис. 4.9. Общий вид электронной пушки ЦЗУ с разных ракурсов (*а, б, в*) и концентратор магнитного поля в виде половины эллипсоида вращения (*г*). Оранжевым цветом показана керамическая пластина, на которой смонтированы элементы пушки. На рис. *а*) сверху – анод, на рис. *б*) и *в*) в средней части розовым цветом показан управляющий электрод. Ферромагнитный наконечник *г*) крепится снизу в отверстие во втулке на рис. *в*).

1) Конструкция электронной пушки с ферромагнитным концентратором магнитного поля в виде половины эллипсоида вращения показана на рис. 4.10.

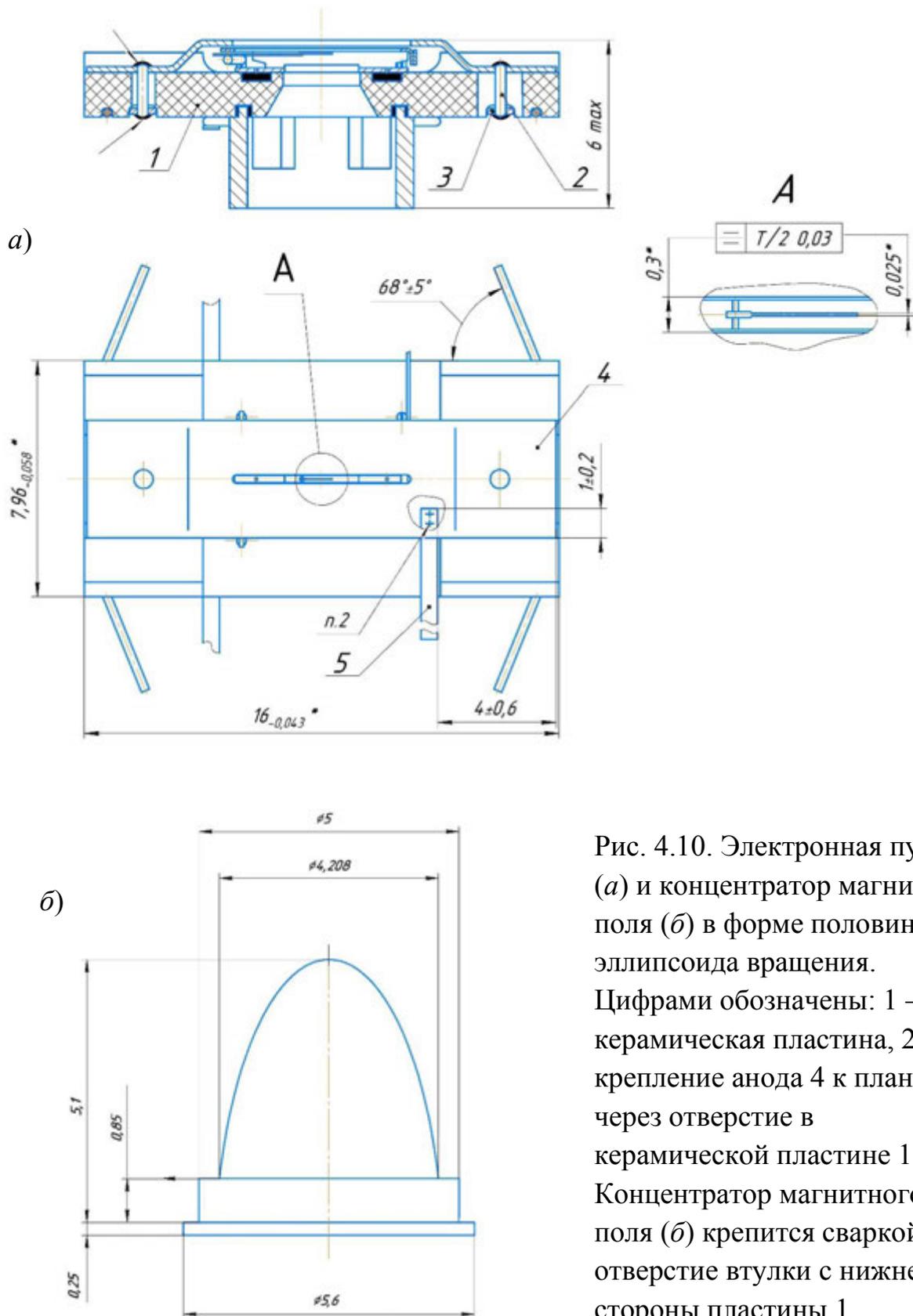


Рис. 4.10. Электронная пушка (а) и концентратор магнитного поля (б) в форме половины эллипсоида вращения. Цифрами обозначены: 1 – керамическая пластина, 2 – крепление анода 4 к планке 3 через отверстие в керамической пластине 1. Концентратор магнитного поля (б) крепится сваркой в отверстие втулки с нижней стороны пластины 1.

Данный вид электронной пушки используется в низкочастотных вариантах ЦЗУ (в диапазоне рабочих частот до 4...5 ГГц).

В п. 2.3.4 показано, что для электронного луча ЦЗУ без заметной расходимости его в спадающем от катода магнитном поле бриллюэновское магнитное поле составляет  $B_{бр} \approx 40$  мТл. При этом для рабочей частоты 2 ГГц циклотронный резонанс будет иметь место при уровне магнитного поля  $B_c \approx 71,4$  мТл, для рабочей частоты 4 ГГц –  $B_c \approx 142,8$  мТл. То есть, запас по уровню магнитного поля для жесткого удержания луча можно считать недостаточным. Расширение электронного луча в спадающем от катода магнитном поле позволяет снизить плотность пространственного заряда и, соответственно, уменьшить деформацию поперечного сечения луча, повысить устойчивость луча на пространстве дрейфа до коллектора.

Исходя из данных об уровне входной СВЧ мощности ЦЗУ диапазона частот 3 ГГц (п. 3.3.2, п.п.1), при которой начинается оседание краевых электронов луча, можно полагать, что поперечный размер луча увеличивается приблизительно в 7 раз (от размера «толщины» катода по оси  $y$ , равной 20 мкм, до размера  $h \approx 150$  мкм, см. рис. 3.6). При этом следует учитывать, что также на увеличение «толщины» луча помимо расталкивающих сил пространственного заряда влияет и электрическое поле электродов пушки – управляющего электрода и анода, – которое имеет существенную поперечную компоненту, направленную параллельно оси  $y$  (см. рис. 3.6, а также см. выноску «А» на рис. 4.10-а, на которой показан катод толщиной 0,025\* мм в отверстиях для прохождения луча в управляющем электроде и аноде 0,3\* мм).

2) Конструкция электронной пушки с ферромагнитным концентратором магнитного поля в виде цилиндра с диаметром ( $\varnothing 0,7$ ), равным длине катода, приведена на рисунке 4.11. Электронная пушка аналогична приведенной выше с тем отличием, что концентратор магнитного поля имеет меньшую массу и, соответственно, приводит к меньшему повышению уровня магнитного поля в

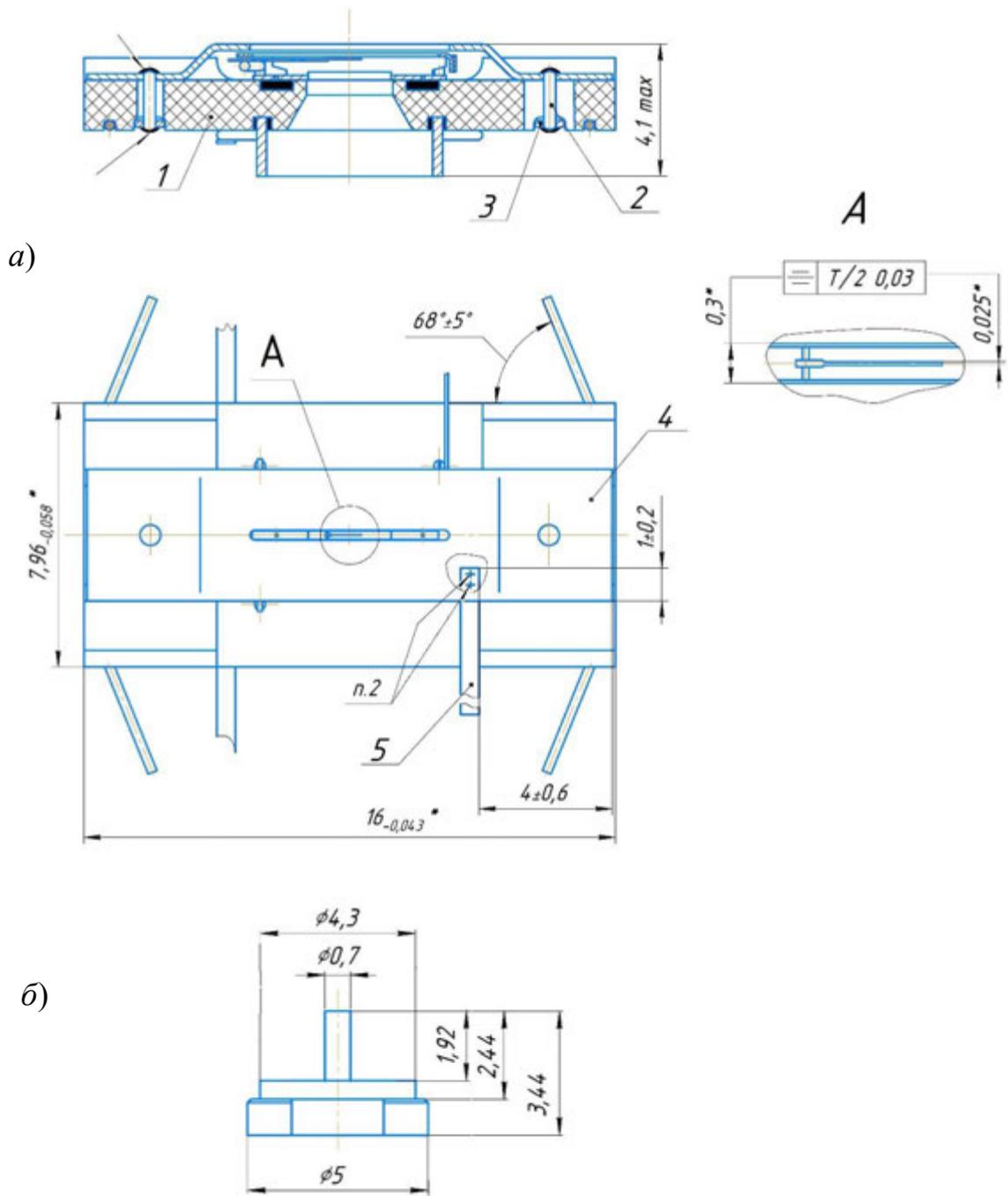


Рис. 4.11. Электронная пушка (а) и ферромагнитный концентратор магнитного поля (б) в форме цилиндра.

области катода, к меньшей расходимости луча в спадающем от катода магнитном поле. Используется в более высокочастотных образцах ЦЗУ (7...11 ГГц).

Концентраторы магнитного поля в электронных пушках на рис. 4.10 и рис. 4.11 электрически соединены с катодом и предотвращают эмиссию в обратном направлении по отношению к направлению дрейфа луча.

3) Конструкция электронной пушки без концентратора магнитного поля представлена на рис. 4.12.

Наконечник, показанный на рис. 4.12-б, не является концентратором магнитного поля, т.к. изготовлен из немагнитного материала. Торцом своей цилиндрической части ( $\varnothing 1,4$ ) наконечник приближен к катоду с обратной стороны по отношению к направлению эмиссии луча. На наконечник подается отрицательный потенциал по отношению к катоду, таким образом, наконечник играет роль фокусирующего электрода.

Данный вариант электронной пушки не имеет управляющего электрода, роль управляющего электрода выполняет анод. По этой причине, для обеспечения совместимости со стандартной схемой бланкирования луча, потенциал анода должен быть ниже потенциала корпуса резонаторов, что накладывает определенные ограничения на возможности выбора потенциала анода.

ЦЗУ, использующие данный вид электронной пушки, не уступают по коэффициенту шума аналогичным устройствам с пушкой по варианту 2) в том же диапазоне частот. Это свидетельствует о том, что «охлаждение» быстрой циклотронной волны (БЦВ) в спадающем магнитном поле не является принципиальным фактором для получения низкого коэффициента шума в ЦЗУ. Шумовая энергия луча в форме БЦВ удаляется из луча во входном резонаторе при взаимодействии с согласованной внешней нагрузкой. В отличие от ЦЗУ, для получения низкого коэффициента шума в электростатических усилителях (ЭСУ) принципиально необходим перепад магнитного поля в области катода для «охлаждения» медленной циклотронной волны, с которой взаимодействует БЦВ в усилительной структуре ЭСУ.

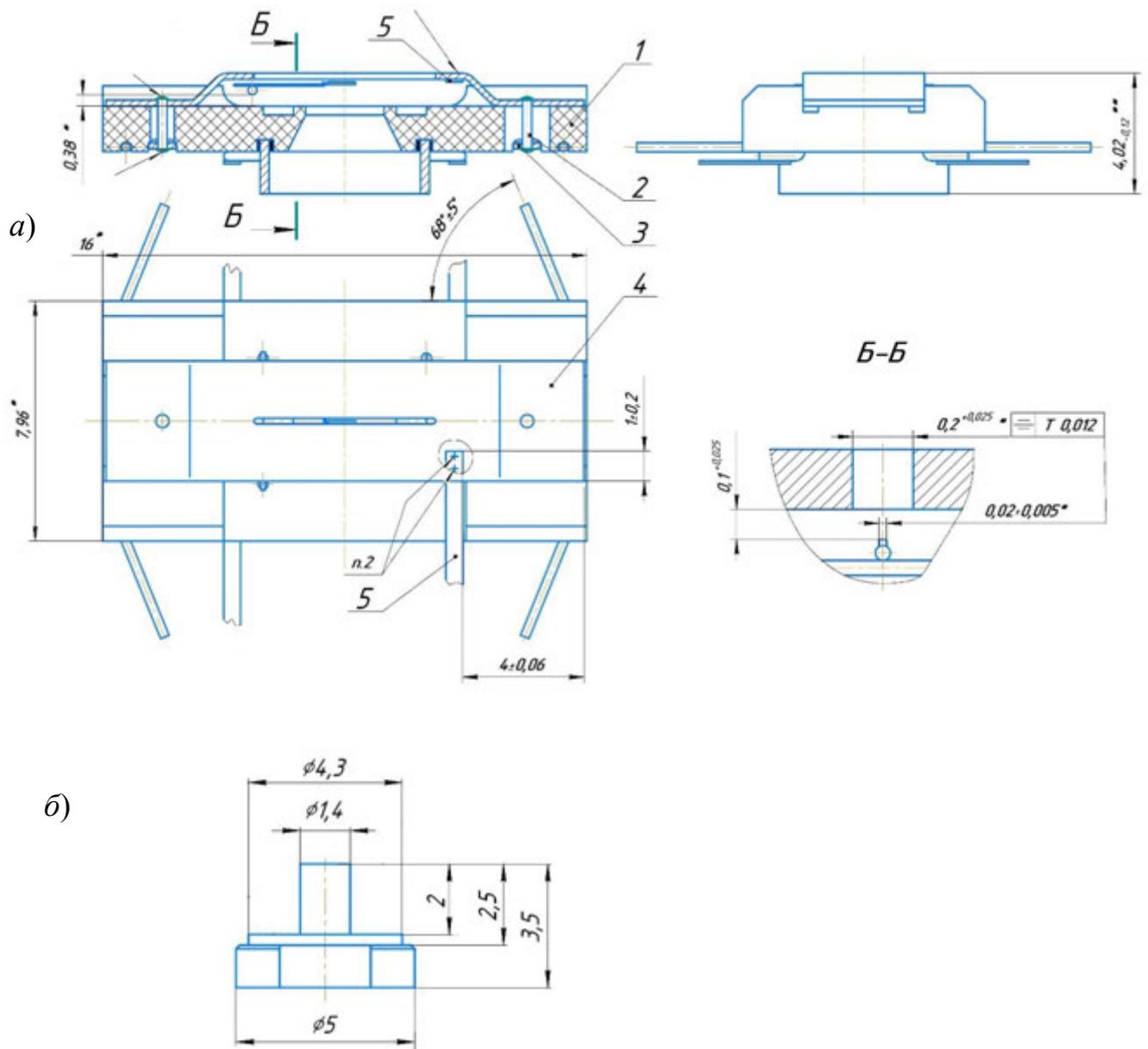


Рис. 4.12. Электронная пушка (а) без концентратора магнитного поля. Наконечник (б) выполнен из немагнитного материала. На разрезе *Б-Б* показано расположение торца керны катода, приваренного к подогревателю, относительно отверстия в аноде ( $0,2^{+0,025}$ ), через которое проходит электронный луч.

По-видимому, конструкция электронных пушек ЦЗУ см-диапазона длин волн может быть улучшена, в частности, путем повышения эффективности фокусирующего воздействия специального электрода. Это позволит обеспечивать более «тонкий» электронный луч и, как следствие, пропускать в

его в меньшем электронном зазоре, увеличивая электронную нагрузку резонаторов, а также повышать верхнюю границу линейности ЦЗУ, увеличивая зазор между электронным лучом и стенками пролетного канала в резонаторах.

#### § 4.5 Управляемая фазосдвигающая секция в ЦЗУ

Разделительная секция (рис. 2.1, поз. 5), предназначенная для ослабления входной СВЧ мощности, просачивающейся из входного резонатора в выходной в режиме защиты, может быть выполнена в виде электрически изолированного от корпуса ЦЗУ электрода, на который подается регулируемый потенциал. При изменении потенциала будет изменяться скорость дрейфа луча в области данного электрода и, соответственно, электрическая длина ЦЗУ. Таким образом может быть реализовано изменение фазы проходящего через ЦЗУ сигнала, а ЦЗУ получает дополнительные функции управляемого фазовращателя [40].

Данная функция была реализована при выполнении экспортного контракта на разработку приемного устройства с применением ЦЗУ в диапазоне частот 14,7 ГГц. Экспериментальные данные по зависимости изменения фазы от управляющего напряжения не сохранились. Оценим данную зависимость расчетным способом.

Электрическая длина ( $\Phi$ , в градусах) участка дрейфа луча на протяжении фазосдвигающего электрода определяется:

$$\Phi = \frac{l \cdot f_0 \cdot 360}{\sqrt{2 \frac{e}{m} U_{\text{упр}}}}, \quad (4.1)$$

где  $l$  – длина фазосдвигающего электрода,  $f_0$  – частота сигнала,  $e/m$  – удельный заряд электрона,  $U_{\text{упр}}$  – управляющее напряжение, подаваемое на фазосдвигающий электрод.

Зависимость сдвига фазы  $\Delta\Phi$  от управляющего напряжения относительно фазы при исходном напряжении  $U_{\text{упр}} = 20$  В (типичный потенциал дрейфа луча в ЦЗУ) имеет вид:

$$\Delta\Phi(U_{\text{упр}}) = \Phi(U_{\text{упр}}) - \Phi(20 \text{ В}). \quad (4.2)$$

Графически данная зависимость приведена на рисунке 4.13.

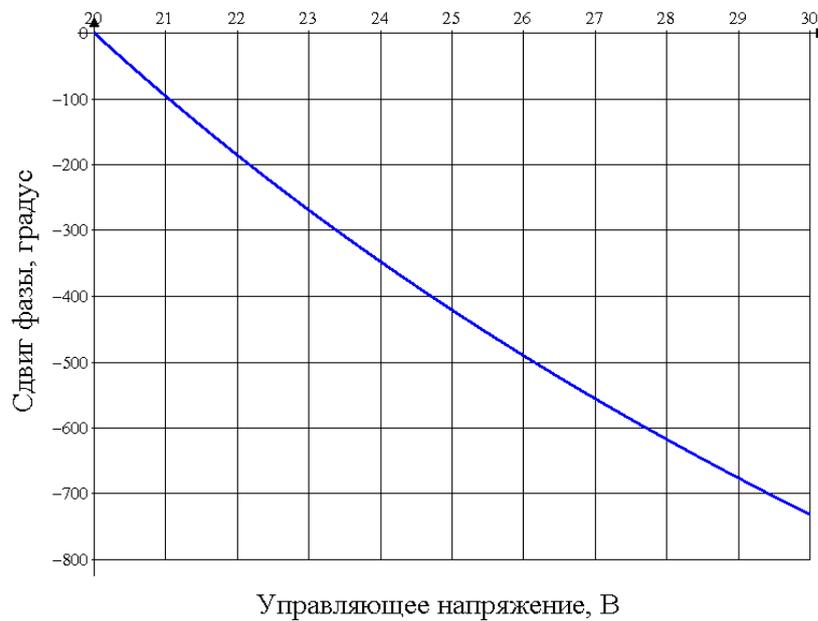


Рис. 4.13. Расчетная зависимость сдвига фазы сигнала, проходящего через ЦЗУ (диапазон частот 14,7 ГГц) от управляющего напряжения, подаваемого на электрод, расположенный между входным и выходным резонаторами, относительно фазы при управляющем напряжении 20 В. Длина электрода вдоль оси пролетного канала 2 мм.

При отличии управляющего напряжения, подаваемого на фазосдвигающую секцию, от потенциала дрейфа луча в области резонаторов в промежутке между дисками, закрывающими входной и выходной резонаторы, и электродом фазосдвигающей секции образуются электрические линзы, структура поля в которых близка к плоско-симметричной. Как уже указывалось в § 4.1 применительно к плоско-симметричной составляющей структуры магнитного поля, циклотронные волны допускают незначительное монотонное изменение амплитуды электрического или магнитного поля аксиально-симметричной или плоско-симметричной структуры. Важно, чтобы изменение амплитуды полей на длине одного циклотронного оборота было незначительным. В этом случае структура быстрой циклотронной волны

сохраняется и связей с другими типами поперечных волн не возникает [114 -стр.1478, 41 -стр.36].

Из этого следует, что при существенном отличии управляющего напряжения, подаваемого на фазосдвигающую секцию, по сравнению с потенциалом дрейфа в области прилегающих резонаторов, электрические линзы, образующиеся по обе стороны от фазосдвигающей секции, могут приводить к ухудшению коэффициента шума и нарушению юстировки луча в ЦЗУ.

Из приведенных рассуждений следует, что при соответствующей доработке конструкции ЦЗУ может выполнять функции управляемого фазовращателя. При этом следует иметь в виду, что электрические линзы, появляющиеся на участке дрейфа луча между входным и выходным резонаторами, могут ухудшать коэффициент шума устройства.

## Глава 5

### ПРИМЕНЕНИЕ ЦЗУ В АППАРАТУРЕ ПРИЕМНИКОВ РЛС

Применение ЦЗУ в аппаратуре приемников РЛС имеет ряд специфических особенностей. Прежде всего это обеспечение согласования СВЧ входа и выхода ЦЗУ с ответными трактами аппаратуры для обеспечения минимально возможного коэффициента шума. Для снижения требований к аппаратуре, в которой используется ЦЗУ, устройство может быть дополнено источником вторичного электропитания, сервисными цепями управляемого переключения режимов ЦЗУ. Имеет место ряд других особенностей использования ЦЗУ в аппаратуре.

#### § 5.1 СВЧ тракт на входе ЦЗУ

СВЧ тракт на входе ЦЗУ должен выполнять две основные задачи: первая – обеспечивать в режиме пропускания сигнала согласование с входом ЦЗУ таким образом, чтобы тепловые шумы электронного луча, переносимые быстрой циклотронной волной, были удалены из луча (из БЦВ). Как указано выше (п. 2.3.1, п. 2.3.3), это может быть реализовано при комплексно-сопряженном согласовании проводимостей электронного луча при возбужденной в нем БЦВ, входного резонатора и внешней нагрузки в виде СВЧ тракта, подсоединяемого к входу ЦЗУ.

Вторая задача – поглощение или ответвление в нагрузку отраженной от входа ЦЗУ в режиме защиты падающей СВЧ мощности высокого уровня. При этом условии может быть реализовано минимально возможное время восстановления прохождения сигнала в ЦЗУ.

Обе эти задачи в первом приближении могут быть решены при использовании в тракте, подсоединяемом к входу ЦЗУ ферритового вентиля или циркулятора. Специфика использования подобного развязывающего устройства заключается в том, что его нагрузка в случае нагревания от поглощенной СВЧ

мощности не должна приводить к дополнительному нагреванию соответствующего элемента входного тракта ЦЗУ, работающего в режиме пропускания сигнала, принятого антенной. Нагретый элемент входного тракта будет приводить к увеличению шумовой мощности в принимаемом сигнале: если данным нагретым элементом является поглощающий материал вентиля – то тепловые шумы БЦВ могут быть удалены во входном резонаторе ЦЗУ лишь до уровня теплового шума данного нагретого поглотителя. В случае использования циркулятора нагретый участок его тракта будет добавлять к принимаемому сигналу шумовую мощность в силу собственных потерь (см. Приложение 3).

Наиболее приемлемым вариантом развязки передатчика РЛС и входа ЦЗУ (антенного переключателя) следует считать использование четырехплечего циркулятора или двух трехплечих Y-циркуляторов (рис. 5.1) с использованием тепловой развязки между нагретой нагрузкой и собственно корпусом циркулятора.

## **§ 5.2 Комплексирующее устройство на базе ЦЗУ**

Как правило, ЦЗУ поставляется предприятием-изготовителем в составе приемного устройства РЛС или в составе комплексирующего усилителя.

Функциональную основу циклотронно-защищенного комплексирующего усилителя (ЦЗКУ) [128-131] составляют два основных СВЧ блока – циклотронное защитное устройство (ЦЗУ) и малошумящий транзисторный усилитель (МШУ). Объединение двух указанных устройств в виде единого комплексирующего усилителя не только позволяет в существенной мере стабилизировать один из основных параметров ЦЗУ и ЦЗКУ – низкий коэффициент шума, но и достичь известных преимуществ при комплексовании электронных СВЧ приборов.

Коэффициент шума ЦЗКУ весьма существенно зависит от согласования выходного тракта ЦЗУ с входным трактом МШУ. Поэтому обеспечение оптимального согласования и индивидуальная подстройка двух данных

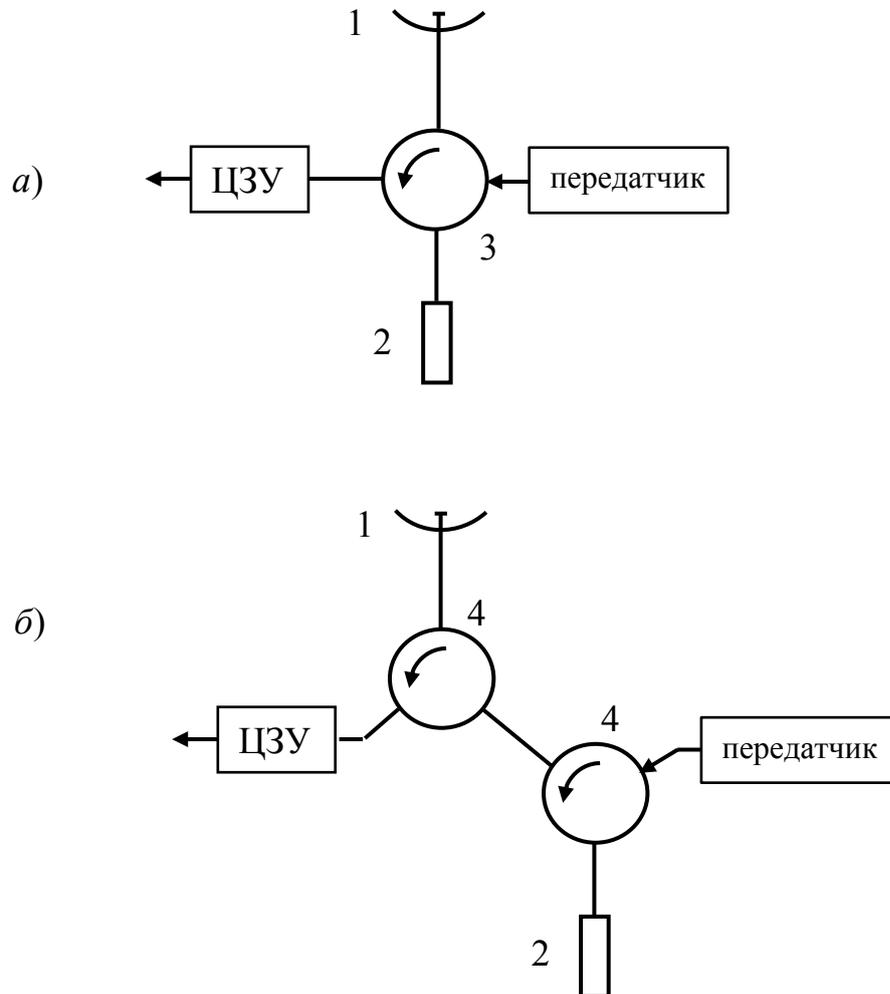


Рис. 5.1. Варианты антенного переключателя с использованием ферритовых циркуляторов: а) четырехплечего циркулятора; б) двух трехплечих Y-циркуляторов. Цифрами на схемах обозначены: 1 – антенна, 2 – нагрузка, 3 – четырехплечий циркулятор, 4 – трехплечие циркуляторы.

приборов в рамках единого ЦЗКУ, минимизация коэффициента шума при совместной подстройке, – все это является несомненным преимуществом такого устройства. Коэффициент шума ЦЗКУ является существенно более стабильным параметром вследствие достаточно высокого коэффициента усиления устройства (обычно не менее 20 дБ) [43].

Положительный эффект от комплексирования электронных СВЧ приборов рассмотрен в ряде работ [132-134]. Его основной смысл заключается в том, что

при монтаже комплектующих высокочастотных электронных компонентов в аппаратуре индивидуальный разброс параметров каждого из компонентов может приводить к заметному ухудшению характеристик всего устройства в силу неоптимальности индивидуальных параметров компонентов. Решением данной проблемы может быть как ужесточение требований к разбросу параметров отдельных элементов, часто весьма сложное и дорогостоящее, так и использование индивидуальной «подгонки», согласования, подстройки смежных элементов системы между собой. Объединение подобных смежных функциональных элементов в единое комплексированное изделие (КИ) со своим набором параметров имеет ряд крайне важных технических, надежностных и финансовых преимуществ, особенно в условиях ограниченных объемов производства. К подобным преимуществам можно отнести:

- возможность индивидуального отбора элементов, объединяемых в рамках одного КИ;
- возможность введения дополнительных элементов подстройки и взаимного согласования элементов в рамках одного КИ;
- возможность индивидуальной настройки каждого из входящих в КИ элементов с целью улучшения параметров не каждого отдельного элемента, а всего КИ.

В ЦЗКУ, как в функционально законченный малошумящий входной усилитель с защитой от перегрузок, как правило, встроены источник вторичного электропитания и сервисные устройства, объединенные в блоке режимов, – стабилизаторы напряжений питания МШУ и электродов ЦЗУ, стабилизатор тока подогревателя катода ЦЗУ, фильтры пульсаций в цепях питания, а также схемы переключения режимов ЦЗУ и МШУ.

### 5.2.1 Малошумящий транзисторный усилитель

Принципиальные требования к МШУ в составе ЦЗКУ – это низкий коэффициент шума и малый уровень КСВН входа, позволяющий обеспечить хорошее согласование с выходом ЦЗУ. Также ценным качеством МШУ является возможность управляемого расширения динамического диапазона – повышение верхней границы линейности путем включения управляемого аттенюатора, располагаемого между первым и вторым каскадами МШУ.

Коэффициент усиления МШУ в базовом варианте обычно составляет 20...25 дБ (иногда до 30...33 дБ – в этом случае МШУ имеет три каскада усиления). Как правило, все каскады подобного рода МШУ реализованы на аналогичных малошумящих транзисторах. КСВН входа и выхода не превышает уровня 1,3...1,5, что обеспечивается использованием ферритовых вентилях или балансных мостов Ланге.

МШУ может быть относительно узкополосным, что обусловлено полосой рабочих частот ЦЗУ. Это позволяет минимизировать коэффициент шума в рабочей полосе частот, который обычно при использовании импортных малошумящих СВЧ транзисторов в диапазоне частот до 12 ГГц не превышает 1,0...1,2 дБ (при нормальной температуре окружающей среды).

Граница линейности по выходу для каждого из каскадов МШУ при компрессии коэффициента усиления на 1 дБ составляет 7...8 дБмВт. Таким образом, при малых уровнях сигнала МШУ обеспечивает максимальное усиление. При увеличении входной мощности и приближении второго каскада МШУ к нелинейному режиму работы, на управляемый аттенюатор (10...15 дБ), расположенный после первого каскада, подается соответствующий сигнал на его включение. Включение аттенюатора позволяет расширить динамический диапазон МШУ. При этом коэффициент шума МШУ несколько возрастает, но не слишком существенно, т.к. перед ним расположен первый каскад усиления МШУ с усилением 12...14 дБ.

При использовании указанного типа МШУ верхняя граница линейности ЦЗКУ по входу в режиме максимального усиления определяется верхней

границей линейности второго каскада МШУ (верхняя граница линейности по входу  $\approx -13 \dots -12$  дБм); при включении управляемого аттенюатора в МШУ – верхней границей линейности первого каскада (в этом случае верхняя граница линейности по входу составляет  $\approx -4 \dots -3$  дБмВт) [131,128].

Для расширения динамического диапазона МШУ второй каскад усиления может выполняться на более мощных транзисторах с несколько большим коэффициентом шума, но в этом случае следует оценивать максимальный уровень мощности в линейном режиме, поступающий на смеситель преобразователя частоты, оценивать работу диодов смесителя в подобном режиме.

В новых разработках для расширения динамического диапазона ЦЗКУ и повышения верхней границы линейности до уровня, определяемого ЦЗУ ( $0 \dots 5$  дБмВт по входу), используется МШУ без управляемого аттенюатора между каскадами, но с переключением путей прохождения сигнала [135]: сигнал может усиливаться обоими каскадами усиления, может подаваться сразу на второй более мощный каскад в обход первого каскада, сигнал также может проходить в обход второго каскада или обоих каскадов усиления. При увеличении мощности входного сигнала до уровня верхней границы линейности МШУ в режиме максимального усиления происходит переключение путей прохождения сигнала.

В связи с тем, что на входе МШУ в этом случае располагается управляемый переключатель путей прохождения сигналов с собственными потерями  $0,2 \dots 0,3$  дБ коэффициент шума подобного усилителя в режиме максимального усиления хуже на величину собственных потерь переключателя.

При работе МШУ в составе ЦЗКУ возможна также функция электронного выключения питания МШУ, что вносит в СВЧ тракт вместо усиления сигнала его затухание с уровнем до 30 дБ и более. Данный режим (режим «бланкирования» по МШУ) используется для «отключения» приемного канала от антенны и калибровки канала по коэффициенту передачи и коэффициенту

шума. Бланкирование по МШУ также может использоваться для предотвращения перехода МШУ в режим насыщения пиками мощности на выходе ЦЗУ, связанными с прохождением переднего и заднего фронтов импульса собственного передатчика, отраженного от антенны. В этом случае импульсы бланкирования МШУ должны быть синхронизированы с началом и окончанием импульса передатчика.

### **5.2.2 Блок режимов**

Блок режимов ЦЗУ содержит стабилизаторы питающих напряжений электродов ЦЗУ, стабилизатор тока подогревателя ЦЗУ, обеспечивает возможность их регулировки при настройке устройства, фильтрацию пульсаций входных питающих напряжений и наводок. Стабилизатор тока подогревателя также обеспечивает температурную корректировку тока и соответствующую стабилизацию температуры катода при изменении температуры окружающей среды.

Блок режимов при необходимости может содержать дополнительные цепи, обеспечивающие включение электронным способом следующих режимов работы ЦЗКУ:

1) режим управляемого выключения электронного луча в ЦЗУ (режим «бланкирования» по ЦЗУ), что переводит ЦЗУ в режим защиты и обеспечивает соответствующую «развязку» входа и выхода ЦЗУ. Режим может применяться для калибровки приемного устройства при «отключении» приемного тракта от антенны посредством данного режима. Режим бланкирования по ЦЗУ также может применяться при управляемом переводе ЦЗУ в режим защиты на время излучения импульса собственного передатчика, при этом сигнал бланкирования должен быть синхронизирован с началом и окончанием импульса передатчика;

2) режим увеличенной мощности шумов на выходе ЦЗКУ (см. п. 3.2.2). Режим реализуется путем снижения напряжения коллектора ЦЗУ до требуемого уровня, который регулируется и устанавливается при настройке изделия. При работе в данном режиме в зазоре выходного резонатора появляется некоторое

количество отраженных от коллектора электронов, что приводит к увеличению мощности шумов на выходе устройства (обычно на 3,0...3,5 дБ на средней частоте рабочей полосы частот). Режим также используется для калибровки приемного тракта аппаратуры;

3) формирование сигнала «признак закрывания ЦЗУ» – сигнал формируется в момент перехода ЦЗУ из режима пропускания сигнала в режим защиты, при снижении тока коллектора от уровня полного прохождения луча на коллектор в режиме пропускания сигнала до определенного уровня. Сигнал присутствует на соответствующем выводе разъема в продолжение режима защиты в ЦЗУ.

### **5.2.3 Источник вторичного электропитания**

Источник вторичного электропитания обеспечивает работу ЦЗКУ от одного постоянного напряжения  $27 \pm 3$  В. Для обеспечения малой массы и размеров источник разработан по импульсной схеме с высокой частотой преобразования. Чтобы пульсации на частоте преобразования, в случае их смешивания с полезным сигналом, не могли приводить к ложному определению цели с доплеровским сдвигом частоты, частота преобразования источника вторичного электропитания должна быть, как правило, не менее 200 кГц (что соответствует доплеровскому сдвигу частоты от цели, движущейся со скоростью не менее 17,5 махов). Источник вторичного электропитания обычно обеспечивает следующие постоянные напряжения: напряжение питания коллектора + 200...250 В относительно корпуса; напряжения питания резистивных делителей напряжения + 40 В и – 40 В относительно корпуса (питание электродов ЦЗУ); изолированное от корпуса напряжение питания стабилизатора тока подогревателя ЦЗУ + 5 В; напряжение питания МШУ + 10 В относительно корпуса.

Источник вторичного электропитания может быть многоканальным – по числу каналов приемного устройства, в каждом из которых используется ЦЗУ. Источник может содержать резисторы регулировки напряжений электродов и выполнять другие функции, обычно относящиеся к блоку режимов ЦЗУ.

Применение индивидуальных источников вторичного электропитания для каждого ЦЗУ либо ЦЗКУ повышает надежность многоканального приемника РЛС. В ряде ранее разработанных РЛС источник питания ЦЗКУ входит в состав аппаратуры приемного устройства (без использования источников вторичного электропитания). При этом питание аналогичных цепей ЦЗКУ (например, коллекторов, делителей напряжений) различных каналов обеспечивается от одного источника напряжения. В этом случае при выходе из строя соответствующей цепи одного ЦЗУ (например, замыкание коллектора на корпус) нарушается работа общего источника напряжения и, соответственно, питание ЦЗУ во всех каналах приемника, приемник при этом выходит из строя по всем каналам. При использовании индивидуального источника электропитания ЦЗКУ при подобного рода неисправности выходит из строя один соответствующий канал.

#### **5.2.4 Фильтры пульсаций питающих напряжений**

Как было показано в § 3.7, пульсации питающих напряжений электродов ЦЗУ и тока подогревателя катода являются источниками амплитудных и фазовых шумов, увеличивают собственный шумовой вклад ЦЗУ, могут проявляться в выходном спектре частот устройства в виде паразитных СВЧ колебаний.

Фильтры пульсаций питающих напряжений электродов ЦЗУ устанавливаются в источнике вторичного электропитания и в цепях блока режимов. Тем не менее, фильтрация может оказаться недостаточной, кроме этого, провода питания электродов ЦЗУ могут воспринимать паразитные наводки. Все это вынуждает устанавливать дополнительные емкостные фильтры пульсаций и располагать их как можно ближе к металлокерамическим вводам постоянных напряжений в вакуумный блок ЦЗУ. Применение такого рода фильтров позволяет дополнительно понизить паразитные спектральные составляющие в выходном сигнале ЦЗКУ на 5...7 дБ.

### 5.2.5 ЦЗКУ

На рисунке 5.2 приведена обобщенная структурно-функциональная схема ЦЗКУ.

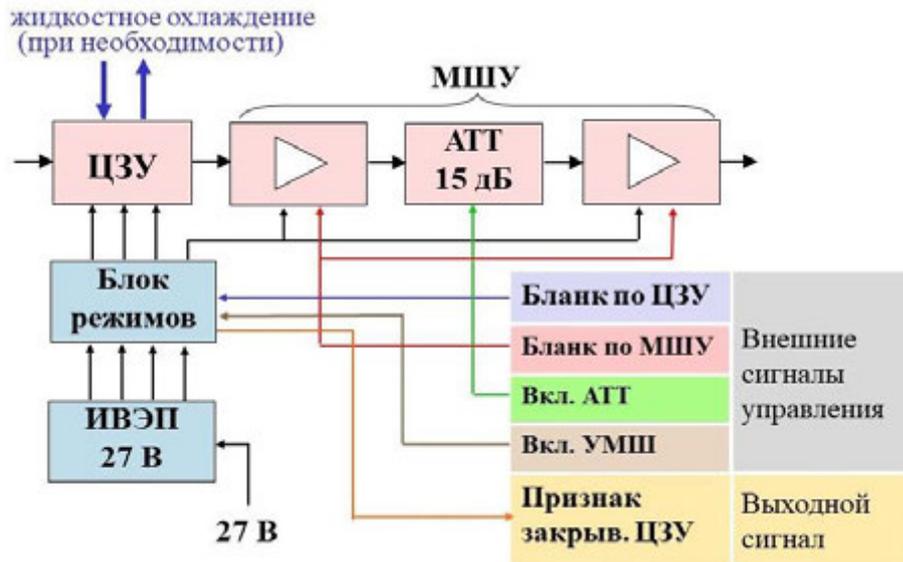


Рис. 5.2. Обобщенная структурно-функциональная схема ЦЗКУ. На рисунке обозначены: «АТТ» – аттенюатор, «ИВЭП» – источник вторичного электропитания, «Бланк по ЦЗУ» – режим выключения электронного луча ЦЗУ, «Бланк по МШУ» – режим выключения электропитания МШУ, «УМШ» – режим с увеличенной мощностью шумов.

На рисунках 5.3 и 5.4 показаны фото ЦЗКУ диапазонов длин волн 3 см и 10 см.

В заключение можно констатировать, что циклотронно-защищенный комплексированный усилитель – это в значительной степени оптимальная по составу система, не только определяющая коэффициент шума приемного устройства, но и обеспечивающая потребителю ряд важнейших дополнительных функций и удобство ее использования.



Рис. 5.3. Фото ЦЗКУ диапазона длин волн 3 см. Фланец входного волновода совмещен с крепежным фланцем ЦЗКУ (расположен снизу).



Рис. 5.4. Фото ЦЗКУ диапазона длин волн 10 см. СВЧ вход ЦЗКУ – коаксиальный сечением 7/3,04 мм.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

### ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ ПО РАБОТЕ

1) В ЦЗУ отсутствуют пики просачивающейся мощности, характерные для газоразрядных, полупроводниковых и других типов автономных защитных устройств. При работе ЦЗУ в режиме пропускания передача сигнала с входа на выход осуществляется посредством возбуждения БЦВ электронного луча. При переходе устройства в режим защиты максимальная мощность, способная попасть на выход ЦЗУ, определяется энергетической емкостью луча в форме БЦВ.

2) Принцип действия и конструкция ЦЗУ определяют еще два важных качества данного типа ЗУ:

- способность защищать последующие каскады аппаратуры в выключенном состоянии: при отсутствии питающих напряжений, а, следовательно, и электронного луча, ЦЗУ находится в режиме защиты;

- принципиальную невозможность пропуска входных импульсов мощности в отличие от газоразрядных ЗУ.

3) Рабочая полоса частот ЦЗУ определяется частотным диапазоном, в пределах которого выполняется на приемлемом уровне условие комплексно-сопряженного согласования проводимостей внешней нагрузки, резонатора связи и электронного луча в зазоре резонатора. Расширение рабочей полосы частот требует уменьшения угла пролета электронами рабочего зазора и увеличения характеристического сопротивления резонатора.

4) Частотная избирательность ЦЗУ связана с тем, что активная и реактивная составляющие электронной проводимости спадают при отстройке от полосы рабочих частот и при этом имеют пульсирующий по частоте характер, что приводит к рассогласованию проводимостей и увеличению ослабления передаваемого сигнала. Более того, активная составляющая электронной проводимости на определенных частотах стремится к нулю.

- 5) Нули активной проводимости электронного луча, возбужденного на БЦВ, на частотах, соответствующих отстройке по углу пролета от циклотронного резонанса на  $2\pi n$  радиан, где  $n = \pm 1, \pm 2, \dots$ , (другими словами – на частотах, отстоящих от циклотронного резонанса на величину, обратную времени пролета электронами зазора резонатора, и кратную ей) обусловлены тем, что «спираль» центра масс последовательности поперечных сечений электронного луча на длине зазора резонатора имеет целое количество витков, что не позволяет наводить в резонаторе ВЧ ток при циклотронном вращении указанной спирали.
- 6) Уровень продольного магнитного поля, обеспечивающий циклотронный резонанс на рабочей частоте ЦЗУ, при типичных параметрах электронного луча превышает уровень Бриллюэновского магнитного поля приблизительно в два раза на рабочей частоте 2 ГГц и пропорционально возрастает с увеличением рабочей частоты ЦЗУ. Это обеспечивает жесткое удержание электронного луча в пролетном канале для ЦЗУ диапазона частот 4 ГГц и выше, для ЦЗУ диапазона частот менее 4 ГГц следует принимать меры по снижению плотности заряда электронного луча и обеспечению повышенного запаса по превышению рабочего уровня магнитного поля относительно Бриллюэновского.
- 7) Вследствие влияния поля пространственного заряда электронного луча колебания рассеянных электронов происходят на частоте несколько ниже циклотронной частоты и в том случае, если попадают в рабочую полосу частот, формируют «шумовые пики», ухудшающие коэффициент шума ЦЗУ.
- 8) Диаметр циклотронного вращения рассеянных электронов, определяемый циклотронной частотой и энергией дрейфа луча, влияет на коэффициент шума следующим образом: если диаметр циклотронного вращения близок к величине электронного зазора в резонаторах ЦЗУ или превосходит его, то в этом случае электроны будут практически сразу оседать на ламелях и не будут оказывать значительного влияния на коэффициент шума. Рассеянные электроны с амплитудой циклотронных колебаний существенно меньше поперечного размера электронного зазора могут достаточно долго существовать в объеме электронного луча и наводить шумовые токи в выходном резонаторе ЦЗУ.

9) При неоптимальной работе коллектора ЦЗУ вторичные электроны, попадающие в зазор выходного резонатора из области коллектора, совершают шумовые колебания с частотами преимущественно вблизи циклотронной частоты и являются источником собственных шумов ЦЗУ. Данный режим с увеличенной мощностью шумов на выходе устройства является достаточно стабильным и может использоваться в качестве специального режима для калибровки приемного тракта аппаратуры, в которой применяется ЦЗУ.

10) Для ЦЗУ разных типов в диапазоне частот от 2 ГГц до 15 ГГц параметры линейности и перехода в режим защиты в зависимости от диапазона частот имеют следующие значения:

- касание электронным лучом стенок зазора начинается при входных мощностях с уровнем - 12...- 4 дБмВт;
- верхняя граница линейности по входу при отклонении амплитудной характеристики от линейного закона на 1 дБ составляет - 5...+ 5 дБмВт;
- входная мощность, при которой ЦЗУ переходит в режим защиты с максимальным ослаблением, составляет величину от 0 дБмВт до 10...13 дБмВт при условии, что электронный луч не выходит за пределы электронного зазора по его ширине;
- максимальная мощность на выходе ЦЗУ диапазона частот до 15 ГГц при переходе в режим защиты не превышает +5...+10 дБмВт, в том числе и для конструкций ЦЗУ, в которых края ленточного луча выходят за пределы электронного зазора в ламелях резонаторов.

11) Режим защиты реализуется в ЦЗУ автономно, при увеличении входной СВЧ мощности до некоторого порогового уровня, при котором электронный луч полностью разрушается и перестает транслировать сигнал из входного резонатора в выходной. Ослабление входной мощности в режиме защиты определяется ослаблением при излучении ее из входного резонатора в выходной через щель для прохождения электронного луча, которая имеет запредельные размеры.

12) Тепловая нагрузка ЦЗУ в режиме защиты составляет приблизительно 10% от падающей СВЧ мощности, т.к.  $\approx 90\%$  входной СВЧ мощности отражается от входного резонатора, не нагруженного электронным лучом. Отраженная СВЧ мощность должна поглощаться входным вентилем или нагрузкой циркулятора.

13) Время восстановления параметров ЦЗУ определяется временем затухания колебаний ВЧ энергии, поступившей во входной резонатор к моменту окончания входного импульса (преимущественно – добротностью входного резонатора и рабочей частотой), а также временем пролета электронного луча от входного резонатора до выходного резонатора после восстановления прохождения луча.

14) Время восстановления ЦЗУ диапазона частот 10 ГГц составляет приблизительно 10 нс, диапазона частот 3 ГГц – 22...26 нс. За дополнительное время от 3 до 10 нс в зависимости от диапазона частот в ЦЗУ восстанавливается максимальная чувствительность, соответствующая коэффициенту шума 1...1,5 дБ.

15) Отраженная от входа ЦЗУ в режиме защиты импульсная мощность может многократно переотражаться от входа ЦЗУ и других элементов СВЧ тракта и, таким образом, продлевать процесс восстановления прохождения сигнала в ЦЗУ. Для исключения данного эффекта следует использовать развязывающее устройство (ферритовый циркулятор) и располагать его по возможности ближе к ЦЗУ.

16) В ЦЗУ стандартных конструкций входная предельно-допустимая импульсная мощность достигает 10 кВт при средней мощности до 250...300 Вт и длительности импульса до 10...20 мкс. При принятии специальных конструктивных мер в диапазоне длин волн 10 см входная импульсная мощность может достигать 50 кВт при средней мощности 1,25 кВт и длительности импульса 60 мкс.

17) Увеличение электронной нагрузки резонаторов ЦЗУ и, соответственно, расширение рабочей полосы частот устройства может быть достигнуто посредством приближения стенок пролетного канала к электронному лучу за

счет выполнения электронного зазора в паре резонаторов (входном и выходном) совместно, обеспечивая при изготовлении непрерывность поворота зазора на всей длине пространства взаимодействия согласно с поворотом «ленты» электронного луча в зазоре (патент на изобретение [116]).

18) ЦЗУ обладает достаточно привлекательными параметрами электромагнитной совместимости, прежде всего в части подавления побочных каналов приема.

19) Циклотронно-защищенный комплексированный усилитель – это в значительной степени оптимальная по составу система, определяющая коэффициент шума приемного устройства РЛС и обеспечивающая надежную защиту от СВЧ мощности высокого уровня при сверхмалом времени восстановления.

20) Разработанные ЦЗУ имеют следующие основные электрические параметры:

- |  |                |
|--|----------------|
| – Коэффициент шума   | 0,7...1,2 дБ   |
| – Время восстановления   |                |
| – в диапазоне длин волн 3 см                                     | ≈ 10 нс        |
| – в диапазоне длин волн 10 см                                    | ≈ 22...26 нс   |
| – Верхняя граница линейности по входу                            | 0,3...3 мВт    |
| – Максимальная выходная мощность ЦЗУ при переходе в режим защиты | < 8 мВт        |
| – Типичная предельно-допустимая входная мощность:                |                |
| – импульсная   | ≤ 10 кВт       |
| – средняя  | ≤ 250...300 Вт |
| – Ослабление входной мощности в режиме защиты                    | > 60...70 дБ   |
| – Отсутствуют пики просачивающейся мощности.                     |                |

По итогам представленной диссертационной работы можно констатировать, что к настоящему моменту задача создания циклотронных защитных устройств сверхвысокочастотного диапазона в целом решена. Достигнуты две основные цели:

- на основе проведенных исследований ЦЗУ, их изучения и выявления особенностей работы составлена вполне определенная картина данного класса приборов, в значительной степени определены их возможности, подтверждены и уточнены характеристики, установлены предпочтительные режимы работы и предельно-допустимые внешние воздействующие факторы, определены конструктивно-технологические особенности;
- разработаны 24 типа ЦЗУ и ЦЗКУ, из которых 18 типов устройств в настоящее время производятся серийно предприятием АО «НПП «Исток» им. Шокина».

### **ЗАДАЧИ СОВЕРШЕНСТВОВАНИЯ ЦЗУ**

Направление циклотронных защитных устройств в настоящее время занимает существенное и весьма важное место в современной СВЧ вакуумной электронике в России. Направление продолжает развиваться. Следует выделить ряд основных задач по совершенствованию ЦЗУ.

#### Первоочередные и крайне актуальные задачи:

- 1) Конструктивно-технологическая доработка и освоение производства ЦЗУ диапазона длин волн 8 мм;
- 2) Разработка ЦЗУ диапазона длин волн 3 см с уменьшенной приблизительно в три раза массой (приблизительно до 0,7 кг).

#### Задачи повышения надежности ЦЗУ:

- 3) Разработка конструктивно-технологических мер по обеспечению высокого уровня вакуума и отсутствию газоотделений в процессе эксплуатации ЦЗУ / ЦЗКУ. Высокий уровень вакуума – принципиальное требование для обеспечения низкого коэффициента шума;

4) Стабилизация тока эмиссии катода в процессе эксплуатации ЦЗУ – технологические и конструктивные меры. К конструктивным мерам можно отнести разработку схемы стабилизации тока катода путем автоматической корректировки напряжения анода электронной пушки ЦЗУ;

Задачи улучшения конструктивных и электрических параметров ЦЗУ:

5) Снижение массы и габаритов ЦЗКУ путем объединения источника вторичного электропитания и блока режимов в единый блок;

6) Полное решение задачи по расчету (моделированию с использованием трехмерных пакетов программ) и на этой основе конструированию ЦЗУ с расширенной полосой рабочих частот за счет использования дополнительных резонансных контуров во входном и выходном СВЧ трактах;

7) Расширение полосы рабочих частот и увеличение верхней границы линейности ЦЗУ за счет внедрения в конструкцию резонаторов электронного зазора с поворотом, распределенным по длине обоих резонаторов. Для этого требуется провести моделирование электронного луча в типичных режимах работы ЦЗУ разных типов и выполнить соответствующую конструктивную доработку. В этом случае электронный зазор может не просто поворачиваться вокруг своей продольной оси на длине резонаторов, сохраняя параллельность поверхностей пролетного канала в каждом поперечном сечении, а повторять с минимально необходимым запасом профиль поперечного сечения электронного луча. Поперечный размер ленточного луча (его «толщину») также необходимо уменьшать путем дополнительной фокусировки электрическим полем в области электронной пушки;

8) Проработка задачи по возможному увеличению диапазона рабочих частот ЦЗУ (или снижению массы ЦЗУ) при использовании квадрупольных входного и выходного резонаторов, что позволит устройству работать при циклотронной частоте (и уровне магнитного поля) в два раза ниже частоты сигнала [39 -с.975,136];

9) Проработка задачи по исключению коаксиального участка входного и выходного ВЧ трактов ЦЗУ и обеспечению необходимой связи волновода непосредственно с резонатором. Это позволит снизить потери сигнала вследствие повышенного сопротивления центрального проводника коаксиала малого диаметра особенно в высокочастотных образцах ЦЗУ, а также увеличить электрическую устойчивость устройства.

10) Проработка задачи по формированию входного и выходного резонаторов ЦЗУ непосредственно в волноводе входного или выходного СВЧ трактов при соответствующей трансформации волноводов, формировании в них емкостного зазора и пропускании через зазор электронного луча.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

АП	Антенный переключатель
АТТ	Аттенюатор
АФАР	Активная фазированная антенная решетка
БСВ	Быстрая синхронная волна
БЦВ	Быстрая циклотронная волна
ВЧ	Высокочастотный
ЗУ	Защитное устройство
ИВЭП	Источник вторичного электропитания
КИ	Комплексированное изделие
к.п.д.	Коэффициент полезного действия
КСВН	Коэффициент стоячей волны по напряжению
МСВ	Медленная синхронная волна
МЦВ	Медленная циклотронная волна
МШУ	Малошумящий транзисторный усилитель
ОКР	Опытно-конструкторская работа
РЛС	Радиолокационная система
СВЧ	Сверхвысокая частота, сверхвысокочастотный
УМШ	Режим работы с увеличенной мощностью шумов
ФАР	Пассивная фазированная антенная решетка
ФЧХ	Фазо-частотная характеристика
ЦЗКУ	Циклотронно-защищенный комплексированный усилитель
ЦЗУ	Циклотронное защитное устройство
ЭПУ	Электронно-лучевой параметрический усилитель
ЭСКУ	Электростатический комбинированный усилитель
ЭСУ	Электростатический усилитель

## СПИСОК УСЛОВНЫХ ОБОЗНАЧЕНИЙ

$f$	Частота сигнала
$f_0$	Резонансная частота, средняя частота рабочей полосы частот
$f_c$	Циклотронная частота
$T_c$	Период циклотронного колебания
$\omega$	Круговая частота сигнала
$\omega_0$	Круговая резонансная частота, круговая средняя частота
$\omega_c$	Круговая циклотронная частота
$\omega_p$	Круговая плазменная частота
$\omega_c', \omega_c''$	Круговые частоты внутреннего движения электронов луча под действием силы пространственного заряда
$\rho_e$	Плотность пространственного заряда электронного луча
$e$	Заряд электрона
$m$	Масса электрона
$\eta = e/m$	Отношение заряда электрона к его массе
$B$	Индукция магнитного поля
$B_0, B_z$	Индукция продольного однородного магнитного поля
$B_c$	Индукция продольного однородного магнитного поля, обеспечивающего циклотронный резонанс
$\epsilon_0$	Электрическая постоянная
$E, E_x$	ВЧ электрическое поле, его проекции на оси координат
$E_{\perp}$	ВЧ электрическое поле в плоскости $xOy$ (перпендикулярно оси $z$ )
$F$	Сила, действующая на электрон со стороны электрического поля
$V$	Скорость движения электрона
$V_c$	Скорость поперечного циклотронного движения электрона по круговой орбите
$V_0$	Скорость движения (дрейфа) электронного луча
$V_{\phi}$	Фазовая скорость волны

$U_0$	Потенциал дрейфа электронного луча
$I_0$	Ток электронного луча
$I_1$	Ток, приходящийся на единицу ширины электронного луча
$S_{\text{л}}$	Площадь поперечного сечения луча
$a_{\text{л}}$	Толщина ленточного луча (вдоль оси $x$ ) без учета деформации его поперечного сечения
$h$	Толщина ленточного луча (вдоль оси $x$ ) с учетом деформации его поперечного сечения
$a_{\text{бр}}$	Бриллюэновская полутолщина ленточного луча
$b_{\text{л}}$	Ширина ленточного луча (вдоль оси $y$ )
$x, y, z$	Координаты по соответствующим осям
$r = x + jy$	Поперечная координата электрона
$t$	Время
$t_{\text{гр}}$	Групповое время запаздывания
$\varphi$	Фаза
$R$	Амплитуда поперечных волн, радиус вращения электрона
$\beta_e, \beta_c$	Фазовые постоянные распространения на частоте $\omega, \omega_c$
$G$	Активная проводимость
$G_{\text{н}}, G_{\text{р}}, G_e$	Активная проводимость нагрузки, резонатора, электр. луча
$G_0$	Активная проводимость электр. луча на циклотронной частоте
$B$	Реактивная проводимость
$B_{\text{н}}, B_{\text{р}}, B_e$	Реактивная проводимость нагрузки, резонатора, электр. луча
$Y = G + jB$	Полная проводимость
$l$	Длина зазора резонатора (вдоль оси $z$ )
$l_0$	Расстояние между центрами входного и выходного резонаторов ЦЗУ (вдоль оси $z$ )
$d$	Поперечный размер зазора резонатора (вдоль оси $x$ )
$s$	Ширина зазора резонатора (вдоль оси $y$ )
$\theta$	Отстройка от циклотронного резонанса по углу пролета в зазоре резонатора на частоте $\omega$

$N$	Число циклотронных оборотов электрона на длине зазора резонатора $l$
$x = \omega / \omega_c$	Относительная частота
$C, L$	Емкость, индуктивность эквивалентного контура
$\rho$	Характеристическое сопротивление контура
$K, K_{\Pi}$	Коэффициент передачи сигнала ( $P_{\text{вых}} / P_{\text{вх}}$ )
$K_{\text{ш}}$	Коэффициент шума в относительных единицах
$K_{\text{ш}}, \text{дБ}$	Коэффициент шума в децибелах
$T_{\text{ш}}$	Эквивалентная шумовая температура, °К
$T_0 = 293^\circ\text{К}$	Стандартная шумовая температура
$T_{\text{р}}$	Рабочая шумовая температура, °К
$k_{\text{б}}$	Постоянная Больцмана
$Q_0, Q_{\text{н}}, Q_{\text{вн}}$	Добротности резонатора: собственная, нагруженная, внешняя
$\eta_{\text{р}}$	К.п.д. резонатора
$L$	Коэффициент ослабления сигнала ( $P_{\text{вх}} / P_{\text{вых}}$ )
$L_{\text{защ}}$	Коэффициент ослабления сигнала в режиме защиты
$\sigma$	КСВН
$\Gamma$	Коэффициент отражения по напряжению
$\Gamma^2$	Коэффициент отражения по мощности
$P$	Мощность СВЧ
$P_{\text{гр1}}$	Уровень входной СВЧ мощности, при которой краевые электроны луча начинают оседать на стенках пролетного канала ЦЗУ
$P_{\text{гр2}}$	Уровень входной СВЧ мощности, при которой электроны луча, находящиеся на оси электронного зазора, начинают оседать на стенках пролетного канала – ЦЗУ в режиме защиты
$P_{-1\text{дБ}}$	Верхняя граница линейности ЦЗУ по входной мощности при компрессии коэффициента передачи на 1 дБ
$P_{\text{вых}}$	СВЧ мощность на выходе ЦЗУ

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Smith, L.P. Frequency Modulation and Control by Electron Beams / L.P. Smith, C.I. Shulman. // Proceedings of the IRE. – July 1947. – P.644-657.
2. Cuccia, C.L. The Electron Coupler – A Developmental Tube for Amplitude Modulation and Power Control at Ultra-High Frequencies. Part I / C.L. Cuccia. // RCA Review. – June 1949. – Vol.10. – N 2. – P.270-303.
3. Cuccia, C.L. The Electron Coupler / C.L. Cuccia, J.S. Donal, Jr. // Electronics. – March 1950. – P.80-85.
4. Cuccia, C.L. The Electron Coupler – A Developmental Tube for Amplitude Modulation and Power Control at Ultra-High Frequencies. Part II / C.L. Cuccia. // RCA Review. – March 1953. – Vol.14. – N 1. – P.72-99.
5. Cuccia, C.L. Parametric Amplification, Power Control and Frequency Multiplication at Microwave Frequencies Using Cyclotron-Frequency Devices / C.L. Cuccia. // RCA Review. – June 1960. – Vol.21. – N 2. – P.228-244.
6. Dubravec, V. Wellentheorie des Cuccia-Kopplers / V. Dubravec // Archiv für Elektronik und Übertragungstechnik. – 1964. – Band 18. – Heft 10. – S.585-593.
7. Dubravec, V. General Power Relations of Cyclotron Waves / V. Dubravec // Electrical Communication. – 1964. – Vol.39. – N 4. – P.558-565.
8. Adler, R. Parametric Amplification of the Fast Electron Wave / R. Adler // Proc. IRE. – 1958. – Vol.46. – N 6. – P.1300.
9. Adler, R. A Low Noise Electron-Beam Parametric Amplifier / R. Adler, G. Hrbek, G. Wade // Proc. IRE. – 1958. – Vol.46. – N 10. – P.1756.
10. Adler, R. The Quadrupole Amplifier, a Low Noise Parametric Device / R. Adler, G. Hrbek, G. Wade // Proc. IRE. – 1959. – Vol.47. – N 10. – P.1713.

11. Капица, П.Л. Электроника больших мощностей / П.Л. Капица. – М.: Изд. Академии Наук СССР, 1962. – 198 с.
12. Лопухин, В.М. Электроннолучевые параметрические усилители / В.М. Лопухин, А.С. Рошаль. – М.: Сов. радио, 1968. – 240 с.
13. Лопухин, В.М. Шумы и параметрические явления в электронных приборах сверхвысоких частот / В.М. Лопухин, В.Б. Магалинский, В.П. Мартынов, А.С. Рошаль. – М.: Наука, 1966. – 372 с.
14. Adler, R. Excitation and Amplification of Cyclotron Waves and Thermal Orbits in the Presence of Space Charge / R. Adler, A. Ashkin, E.I. Gordon // Journal of Appl. Phys. – 1961. – Vol.32. – N 4. – P.672-675.
15. Gordon, E.I. Charged-Particle Orbits in Varying Magnetic Fields / E.I. Gordon // Journal of Appl. Phys. – 1960. – Vol.31. – N 7. – P.1187-1190.
16. Chalk, G.O. Design of Cuccia Couplers for Quadrupole Amplifiers / G.O. Chalk // Proc. IEE. Electronics. – 1963. – Vol.110. – N 12. – P.2105-2117.
17. Лопухин, В.М. Электроннолучевые параметрические усилители поперечных волн / В.М. Лопухин, А.С. Рошаль // Успехи физических наук. – 1965. – Т.85. – В.2. – С.297-334.
18. Ванке, В.А. Сверхмалошумящие усилители циклотронных волн / В.А. Ванке, В.М. Лопухин, В.Л. Саввин // Успехи физических наук. – 1969. – Т.99. – В.4. – С.545-569.
19. Ванке, В.А. Анализ двухлучевого электронного параметрического усилителя / В.А. Ванке, С.П. Кантюк, В.М. Лопухин, В.Л. Саввин // Радиотехника и электроника. – 1969. – Т.14. – № 4. – С.666-674.
20. Авторское свидетельство № 21100 СССР. Электростатический усилитель СВЧ : № 704297 : заявл. 26.11.1959, зарегистр. 16.05.1960. / Кантюк С.П.

21. Ванке, В.А. К теории процессов усиления в электростатическом усилителе / В.А. Ванке, В.Л. Саввин // Радиотехника и электроника. – 1970. – Т.15. – № 11. – С.2317-2321.
22. Bass, J.C. A DC Pumped Amplifier with a Two-Dimensional Field Structure / J.C. Bass // Proc. IRE. – December 1961. – P.1957-1958.
23. Будзинский, Ю.А. Электростатические усилители / Ю.А. Будзинский, С.П. Кантюк // Электронная техника. Серия 1. СВЧ техника. – 1993. – В.1 – С.21-27.
24. Adler, R. Beam Refrigeration by Means of Large Magnetic Fields / R. Adler, G. Wade // Journal of Appl. Phys. – 1960. – Vol.31. – N 7. – P.1201-1203.
25. Hrbek, G. Low Noise D.C. Pumped Cyclotron Wave Amplifiers / G. Hrbek, R. Adler // Proc. of 5-th Intern. Congress on Microwave Tubes (Paris, 1964). – N.Y.-London, Acad. Press. – 1965. – P.17-20.
26. Ванке, В.А. Формирование магнитного поля в прикатодной области электростатического усилителя / В.А. Ванке, В.Л. Саввин // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1969. – В.2 – С.143-146.
27. Ванке, В.А. О минимальном уровне собственных шумов электростатического усилителя с ленточным лучом / В.А. Ванке, С.П. Крюков, Ю.М. Тимофеев // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1971. – Т.14. - № 1. – С.141-151.
28. Ванке, В.А. Структура поля и расчет параметров четырехзаходной спирали для электростатического усилителя / В.А. Ванке, В.Л. Саввин // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1969. – В.12 – С.159-164.
29. Бондарев, А.С. Секционированные электростатические усилители СВЧ на циклотронных волнах / А.С. Бондарев, С.П. Кантюк // Известия ВУЗов. Радиоэлектроника. – 1976. – Т.19. – № 10. – С.74-79.

30. Бондарев, А.С. Процессы взаимодействия в усилительных элементах ЭСУ СВЧ / А.С. Бондарев // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1972. – В.12 – С.74-84.
31. Канавец, В.И. Устройство связи с быстрой циклотронной волной в виде системы связанных резонаторов / В.И. Канавец, В.Г. Рассадин, А.С. Рошаль // Известия ВУЗов СССР. Радиотехника. – 1966. – Т.9. – №5. – С.622-629.
32. Blotekjer, K. Transverse Electron Beam Noise Described by Filamentary Beam Parameters / K. Blotekjer // Journal of Appl. Phys. – 1962. – Vol.33. – N 8. – P.2409-2414.
33. Ванке, В.А. О роли объемного заряда при усилении внутренних шумовых орбит отдельных электронов в высокочастотном квадрупольном поле / В.А. Ванке, В.Б. Магалинский // Известия ВУЗов. Радиофизика. – 1966. – Т.9. – № 5. – С.831.
34. Ванке, В.А. Продольный разброс скоростей электронов и ограничение усиления в диффронах / В.А. Ванке, С.П. Крюков // Радиотехника и электроника. – 1972. – Т.17. – № 10. – С.2230-2233.
35. Gordon, E.I. Noise in Beam-Type Parametric Amplifiers / E.I. Gordon // Proc. IRE. – 1961. – Vol.49. – N 7. – P.1208.
36. Adler, R. Excitation and Amplification of Cyclotron Waves and Thermal Orbits in the Presence of Space Charge / R. Adler, A. Ashkin, E.I. Gordon // Journal of Appl. Phys. – 1961. – Vol.32. – N 4. – P.672-675.
37. Vanke, V.A. A New Microwave Input Amplifier with High Self-Protection and Rapid Recovery / V.A. Vanke, H. Matsumoto, N. Shinohara // IEICE Trans. on Electronics. – 1998. – Vol. E81-C. – N 5. – P.788-794.
38. Manheimer, W.M. Electrostatic and parametric cyclotron wave amplifiers / W.M. Manheimer, G.W. Ewell // IEEE Transactions on Plasma Science. – Aug.

1998. – Vol.26. – N.4. – P.1282-1296. DOI:10.1109/27.725161; [https://www.researchgate.net/publication/3164338\\_Cyclotron\\_Wave\\_Electrostatic\\_and\\_Parametric\\_Amplifiers](https://www.researchgate.net/publication/3164338_Cyclotron_Wave_Electrostatic_and_Parametric_Amplifiers).
39. Ванке, В.А. Поперечные волны электронного потока в микроволновой электронике / В.А. Ванке // Успехи физических наук. – 2005. – Т.175. – №9. – С.957-978.
  40. Будзинский Ю.А., Кантюк С.П., Петровский В.Б. Сверхвысокочастотное защитное устройство // Патент РФ на изобретение № 2167480. Заявл. 21.02.1985. Оpubл. 20.05.2001. Бюл. №14.
  41. Быковский С.В. Теоретическое исследование процессов энергообмена поперечных волн электронного потока и на этой основе исследование и разработка электронных защитных устройств на быстрой циклотронной волне с малым (порядка  $10^1$  нс) временем восстановления: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.02 / Быковский Сергей Васильевич. – Фрязино, 1996. – 134 с.
  42. Boudzinski, I.A. Amplifying and Protective Devices Based on Electron Beam Fast Cyclotron Wave / I.A. Boudzinski, S.V. Bykovski // Proc. of The 2nd IEEE International Vacuum Electronics Conference «IVEC'2001». (Noordwijk, The Netherlands, 2001). – P.153-156.
  43. Патент на полезную модель №43405 РФ, МПК H01J 25/78 (2000.01). Циклотронно-защищенное комплексированное устройство (ЦЗКУ) : № 2003110309/22 :заявл. 10.04.2003 : опубл. 10.01.2005 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Вильданов С.А.
  44. Будзинский, Ю.А. Комплексированные усилители с циклотронной защитой для приемников РЛС / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов, Д.Н. Грудцов, Н.В. Ильичев, О.А. Саврухин, И.А. Шмелев // Материалы 11-й Международной конференции «СВЧ

- техника и телекоммуникационные технологии» (Севастополь, 2001). – Севастополь: Вебер. – 2001. – С.190-192.
45. Будзинский, Ю.А. Циклотронные защитные устройства для приемников РЛС / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов, О.А. Саврухин, И.А. Шмелев // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2003. – В.1 – С.24-30.
  46. Будзинский, Ю.А. Становление, развитие и перспективы СВЧ-приборов на циклотронном резонансе электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, И.И. Голеницкий, В.Г. Калина // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2013. – В.3 – С.136-142.
  47. Ропий, А.И. Сверхвысокочастотные защитные устройства / А.И. Ропий, А.М. Старик, К.К. Шутов. – М.: Радио и связь, 1993. – 128 с.
  48. Алыбин, В.Г. СВЧ защитные устройства в радиолокации и связи / В.Г. Алыбин // Радиотехника. – 2002. – №8. – С.42-49.
  49. Резонансные разрядники антенных переключателей / Д.Я. Ашкенази, В.П. Беляев, Г.И. Бродуленко и др. Под ред. И.В. Лебедева. – М.: Сов. радио, 1976. – 248 с.
  50. Лебедев, И.В. Техника и приборы сверхвысоких частот. Т.2. Электровакуумные приборы СВЧ. Под ред. Н.Д. Девяткова. – М.: Высшая школа, 1972. – 376 с.
  51. Райзер, Ю.П. Физика газового разряда / Ю.П. Райзер. – М.: Наука, 1992. – 536 с.
  52. Мак-Доналд, А. Сверхвысокочастотный пробой в газах. Пер. с англ. под ред. М.С. Рабиновича. – М.: Мир, 1969. – 212 с.
  53. Голант В.Е. Газовый разряд на сверхвысоких частотах // УФН. – 1958. – Т.65 – №1. – С.39-86.

54. Сайт компании «CPI's Beverly Microwave Division». URL: [www.CPI.com/BMD](http://www.CPI.com/BMD).
55. Вайсблат, А.В. Коммутационные устройства СВЧ на полупроводниковых диодах / А.В. Вайсблат. – М.: Радио и связь, 1987. – 120 с.
56. Drozdovski, N.V. Microstrip and waveguide passive power limiters with simplified construction / N.V. Drozdovski, L.M. Drozdovskaia // Journal of Microwaves and Optoelectronics. – December 1999. – Vol.1. – N 5. – P.14-29. // URL: <http://jmoe.org/index.php/jmoe/article/view/32>
57. Ильичёв, Н.В. Диодные защитные устройства с резонатором на связанных микрополосковых линиях / Н.В. Ильичёв, В.Г. Калина, В.В. Шаповалова // Электронная техника, сер. СВЧ-техника. – 2004. – В.1. – с.75-83.
58. Николаев, С.В. Диодные защитные устройства СВЧ на связанных микрополосковых резонаторах / С.В. Николаев, В.В. Шаповалова, И.В. Кротов // Сборник трудов III Всероссийской научно-технической конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ». 2014 г. СПбГЭТУ «ЛЭТИ», Санкт-Петербург. – С.375-378.
59. Сайт компании «Teledyne e2v». URL: <https://www.teledyne-e2v.com/datasheets/microwave-device-datasheets.cfm>
60. Сайт компании «API Technologies». URL: <https://www.apitech.com/products/rf-solutions/limiters--receivers/waveguide-limiters-receiver-protectors/>
61. Drozdovski, N.V. Microwave passive power limiters based on MESFETs / N.V. Drozdovski // Journal of Microwaves and Optoelectronics. – April 1998. – Vol.1. – N 2. P.26-36. // URL: <http://jmoe.org/index.php/jmoe/article/view/16>
62. Echchakhaoui, K. New Design of a Broadband Microwave Zero Bias Power Limiter / K. Echchakhaoui, E. Abdelmounim, J. Zbitou, H. Bennis, N. Ababssi, M. Latrach // International Journal of Electronics and Communication

- Engineering. – 2015. – Vol.9. – N 1. P.164-167. // URL: <https://publications.waset.org/10000261/new-design-of-a-broadband-microwave-zero-bias-power-limiter>
63. Echchakhaoui, K. Microwave Power Protectors: Attenuators and Limiters / K. Echchakhaoui, E. Abdelmounim, H. Bennis // Chapter 8 in Handbook of Research on Advanced Trends in Microwave and Communication Engineering. – 2016. – P.244-282. // URL: [https://www.researchgate.net/publication/308778723\\_Microwave\\_Power\\_Protectors\\_Attenuators\\_and\\_Limiters](https://www.researchgate.net/publication/308778723_Microwave_Power_Protectors_Attenuators_and_Limiters)
64. Рогозин, В.В. Ферритовые фильтры и ограничители мощности / В.В. Рогозин, В.И. Чуркин. – М.: Радио и связь, 1985. – 264 с.
65. Сайт компании ЗАО «НПП «Планета-Аргалл». URL: <http://www.argall.ru/pustaay.html>
66. Крутов, А.В. Разработка и освоение производства монолитных интегральных схем быстродействующих ограничителей мощности / А.В. Крутов, А.С. Ребров // Научно-технический отчет No 3-93211. ОКР «Одноцветник-53». АО «НПП «Исток» им. Шокина», 2017. – 71 с.
67. Груша, А.В. Ограничители СВЧ мощности М44427 / А.В. Груша, А.В. Крутов, А.С. Ребров // Электроника и микроэлектроника СВЧ. – 2017. – Т.1, С.235-240.
68. Крутов, А.В. Быстродействующие ограничители СВЧ мощности диапазона частот до 40 ГГц / А.В. Крутов, А.С. Ребров // Материалы 26-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо-2016. Севастополь, 2016. – С.221-225.
69. Борисов, А.А. О радиолокационных применениях полупроводниковых и вакуумных СВЧ приборов / А.А. Борисов, А.В. Галдецкий, С.В. Щербаков // Материалы 27-й международной конференции «СВЧ-техника и

- телекоммуникационные технологии» КрыМиКо-2017. Севастополь, 2017. – С.25-33.
70. Плешивцев, В.И. СВЧ-приемники радиолокационных систем. Монография // В.И. Плешивцев. – М.: Радиотехника, 2012. – 184 с.
71. Siegman, A.E. Waves on a Filamentary Electron Beam in a Transverse-Field Slow-Wave Circuit / A.E. Siegman // Journal of Appl. Phys. – 1960. – Vol.31. – N 1. – P.17-26.
72. Люиселл, У. Связанные и параметрические колебания в электронике / У. Люиселл. – М.: Изд. Иностранной литературы, 1963. – 351 с.
73. Эльсгольц, Л.Э. Дифференциальные уравнения и вариационное исчисление / Л.Э. Эльсгольц. – М.: Наука, 1969. – 424 с.
74. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.1. Техника сверхвысоких частот. Под ред. Н.Д. Девяткова. М.: Высшая школа, 1970. – 440 с.
75. Сифоров, В.И. Радиоприемники сверхвысоких частот / В.И. Сифоров. – М.: Воен. изд. МО СССР, 1957. – 636 с.
76. Ванке В.А. Взаимодействие поперечных колебаний и волн в электронных потоках с электромагнитными полями: дис. ... д-ра физ.-мат. наук: 01.04.03 / Ванке Владимир Александрович. – М., 1979. – 424 с.
77. Будзинский, Ю.А. Расчет рабочей полосы частот циклотронного защитного устройства / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, В.Г. Калина // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2010. – В.1. – С.70-87.
78. Саусворт, Дж.К. Принципы и применения волноводной передачи / Дж.К. Саусворт. – М.: Сов. радио, 1955. – 700 с.
79. Григорьев, А.Д. Электродинамика и техника СВЧ: Учеб. для вузов / А.Д. Григорьев. – М.: Высшая школа, 1990. – 335 с.

80. Лопухин, В.М. Расширение полосы электронного параметрического усилителя с помощью двух несвязанных резонаторов / В.М. Лопухин, Б.К. Миценко // Вестник Московского университета. Серия физика, астрономия. – 1968. – № 1. – С.80-84.
81. Балыко, А.К. Влияние рассогласованной нагрузки на полосу пропускания резонансных элементов связи / А.К. Балыко, В.Б. Петровский // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1988. – В.2. – С.64-66.
82. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Расчет связи с нагрузкой / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2016. – В.2. – С.8-12.
83. Кантюк, С.П. Характеристики резонансного элемента связи с быстрой циклотронной волной электронного потока в неоднородном магнитном поле / С.П. Кантюк, В.Б. Петровский // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1982. – В.8. – С.29-32.
84. Алмазов-Долженко, К.И. Коэффициент шума и его измерение на СВЧ / К.И. Алмазов-Долженко. – М.: Научный мир, 2000. – 240 с.
85. Белоусов, А.П. Коэффициент шума / А.П. Белоусов, Ю.А. Каменецкий. – М.: Радио и связь, 1981. – 112 с.
86. Белоусов, А.П. Расчет коэффициента шума радиоприемников / А.П. Белоусов. – М.: Гос. изд. оборонной промышленности, 1959. – 136 с.
87. Альвен, Г. Космическая электродинамика / Г. Альвен, К.-Г. Фельтхаммар. – М.: Мир, 1967. – 260 с.
88. Алямовский, И.В. Электронные пучки и электронные пушки / И.В. Алямовский. – М.: Сов. радио, 1966. – 456 с.
89. Саввин, В.Л. О транспортировке ленточного электронного пучка в аксиально-симметричном магнитном поле / В.Л. Саввин, А.В. Коннов,

- Д.А. Михеев, Г.М. Казарян, И.И. Шуваев // Журнал радиоэлектроники. – 2015. – N 9. URL: <http://jre.cplire.ru/jre/sep15/9/text.pdf>
90. Lea-Wilson, C.P. Some possible causes of noise in Adler tubes / C.P. Lea-Wilson, R. Adler, G. Hrbek, G. Wade // Proc. IRE. – 1960. – Vol.48. – P.255.
91. Сушков, А.Д. Вакуумная электроника: Физико-технические основы / А.Д. Сушков – СПб: Изд. «Лань», 2004. – 464 с.
92. Калина, В.Г. Моделирование СВЧ циклотронного защитного устройства как трехзвенного фильтра / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2010. – В.4. – С.3-15.
93. Калина, В.Г. Расчет циклотронного защитного устройства по модели полосового фильтра / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2014. – В.1. – С.19-38.
94. Будзинский, Ю.А. Об увеличении полосы рабочих частот циклотронного защитного устройства / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, В.Е. Котов, О.А. Саврухин // Материалы 15-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо-2005. Севастополь, 2005. – С.205-206.
95. Budzinskiy, Y.A. Cyclotron Protective Device with Increased Frequency Band / Y.A. Budzinskiy, S.V. Bykovskiy // Abstracts of 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2009. Rome, Italy, 2009. – P.60-61.
96. Патент № 2319274 РФ, МПК H02H 7/12 (2006.01), H01J 23/36 (2006.01), H01J 25/00 (2006.01). Циклотронное защитное устройство с увеличенной полосой рабочих частот : № 2006123002/09 : заявл. 28.06.2006 : опубл. 10.03.2008 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Конов М.А., Хахалкин В.Н., Шапотковский Ю.В.

97. Патент № 2453018 РФ, МПК H02H 7/00 (2006.01). Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство : № 2010140806/07 : заявл. 05.10.2010 : опубл. 10.06.2012 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Калина В.Г.
98. Быковский, С.В. Влияние рассеянных электронов на коэффициент шума циклотронных защитных устройств / С.В. Быковский // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т.47. – В.12. – С.51-54.
99. Калашников, С.Г. Электричество: Учебное пособие / С.Г. Калашников – М.: Наука, 1985. – 576 с.
100. Вайнштейн, Л.А. Электромагнитные волны / Л.А. Вайнштейн – М.: Сов. радио, 1957. – 581 с.
101. Григорьев, А.Д. Электродинамика и микроволновая техника: Учебник / А.Д. Григорьев – СПб: Изд. «Лань», 2007. – 704 с.
102. Голеницкий, И.И. Моделирование трехмерной электронно-оптической системы циклотронного защитного устройства / И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Материалы 11-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо-2001. Севастополь, 2001. – С.216-217.
103. Голеницкий, И.И. Формирование высокоперевансных тонких ленточных электронных потоков в слабых магнитных полях / И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Материалы 13-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо-2003. Севастополь, 2003. – С.291-293.
104. Будзинский, Ю.А. Становление, развитие и перспективы СВЧ-приборов на циклотронном резонансе электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, И.И. Голеницкий, В.Г. Калина // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2013. – В.3. – С.136-142.

105. Будзинский, Ю.А. Электронно-оптическая система циклотронного защитного устройства / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина // Материалы 24-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо-2014. Севастополь, 2014. – С.157-158.
106. Быковский, С.В. Циклотронные защитные устройства: граница линейности и переход в режим защиты / С.В. Быковский, Ю.А. Будзинский, В.Г. Калина, В.Е. Котов, О.А. Саврухин // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2018. – В.3. – С.43-49.
107. Быковский, С.В. О кинетической мощности поперечных волн электронного потока / С.В. Быковский, В.А. Ванке // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т.37. – №10. – С.1854-1858.
108. Быковский, С.В. Циклотронные защитные устройства: время восстановления параметров / С.В. Быковский, Ю.А. Будзинский, В.Г. Калина, В.Е. Котов, С.В. Николаев, О.А. Саврухин // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2020. – В.1. – С.12-21.
109. ГОСТ 23769-79. Приборы электронные и устройства защитные СВЧ. Термины, определения и буквенные обозначения.
110. ГОСТ 23611-79. Совместимость радиоэлектронных средств электромагнитная. Термины и определения. – М.: Стандартинформ, 1988. – 10 с.
111. Плешивцев, В.И. Очерки об электромагнитной совместимости и помехозащищенности СВЧ-приемников РЛС // В.И. Плешивцев, Т.И. Градова. – М.: ПАО «НПО «Алмаз», 2018. – 120 с.
112. Усыченко, В.Г. Стойкость сверхвысокочастотных радиоприемных устройств к электромагнитным воздействиям. Монография // В.Г. Усыченко, Л.Н. Сорокин. – М.: Радиотехника, 2017. – 288 с.

113. Быковский, С.В. Параметры электромагнитной совместимости циклотронно-защищенных комплексированных усилителей (ЦЗКУ) / С.В. Быковский, Т.И. Градова, М.Б. Орехов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2020. – В.1. – С.51-54.
114. Быковский, С.В. Поперечные волны электронного потока в плоско-симметричных полях / С.В. Быковский, В.А. Ванке // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т.38. – №8. – С.1475-1482.
115. Патент № 2530746 РФ, МПК H02H 7/00 (2006.01). Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство : № 2013117623/07 : заявл. 16.04.2013 : опубл. 10.10.2014 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Голеницкий И.И., Духина Н.Г., Шерстяных Р.И.
116. Патент № 2731297 РФ, МПК H02H 7/12 (2006.01), H01J 23/36 (2006.01). Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство : № 2020103845 : заявл. 28.01.2020 : опубл. 02.09.2020 / Быковский С.В.
117. Дружинин, А.В. Новый эффективный термокатод с высокой эмиссионной однородностью / А.В. Дружинин, Ю.А. Кондрашенков // Радиотехника и электроника. – 1973. – Т.18. – №7. – С.1531-1533.
118. Кондрашенков, Ю.А. Эмиссионные свойства молекулярно-напыленного оксидного катода / Ю.А. Кондрашенков, З.Н. Галанина, А.В. Дружинин // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1974. – В.6. – С.55-62.
119. Кондрашенков, Ю.А. Долговечность молекулярно-напыленного оксидного катода / Ю.А. Кондрашенков, З.Н. Галанина, А.В. Дружинин // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1974. – В.7. – С.35-48.
120. Князев, А.Я. Свойства молекулярно-напыленного оксидного катода на ионнолегированном керне / А.Я. Князев, В.Ф. Шнюков // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1979. – В.2. – С.64-69.

121. Исследование возможности создания сильноточечных оксидных микрокатодов с плотностью токоотбора в непрерывном режиме 2 - 4 А/см<sup>2</sup> с долговечностью 1000 часов: технический отчет №144-7287 / Князев А.Я., Лифанцев Е.Н. – Фрязино, НПО «Исток», 1985.
122. Авторское свидетельство № 1267982 СССР, МПК H01J 1/20. Прямокальный термоэлектронный микрокатод : № 3861350/24-21 : заявл. 04.03.1985 / Князев А.Я., Лифанцев Е.Н., Будзинский Ю.А., Шерстяных Р.И., Баранникова Н.М.
123. Разработка технологии ионно-плазменного напыления оксидных покрытий с целью увеличения скорости напыления в 1,5 раза и стабилизации параметров катодов на уровне токоотбора до 3 А/см<sup>2</sup> с долговечностью 1000 часов: технический отчет №15-8051 / Лифанцев Е.Н., Князев А.Я. – Фрязино, НПО «Исток», 1988.
124. Жабин, Г.А. Эмиссионные характеристики молекулярно-напыленных оксидных катодов в циклотронных защитных устройствах / Г. А. Жабин // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2017. – В.2. – С.49-53.
125. Жабин, Г.А. Исследование влияния температурного отжига на эмиссионные свойства молекулярно-напыленных оксидных катодов / Г.А. Жабин, А.Н. Пашков, О.В. Пелипец // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2017. – В.4. – С.15-21.
126. Жабин, Г.А. Влияние повышенного отбора тока на элементный состав эмиссионной поверхности молекулярно-напыленного оксидного катода / Г.А. Жабин, Д.Ю. Архипов, О.В. Пелипец // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2019. – В.4. – С.24-34.
127. Жабин, Г.А. Параметры ионно-плазменного осаждения оксидных покрытий и эмиссионные свойства молекулярно-напыленных катодов / Г.А. Жабин, Д.Ю. Архипов, Д.М. Седловец, М.П. Темиряева // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2020. – В.1. – С.46-55.

128. Будзинский, Ю.А. Комплексируемые усилители с циклотронной защитой для приемников РЛС / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов, Д.Н. Грудцов, Н.В. Ильичев, О.А. Саврухин, И.А. Шмелев // Материалы 11-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии» КрыМиКо-2001. Севастополь, 2001. – С.190-192.
129. Vanke, V.A. Electron Beam Transverse Waves and Microwave Electronics / V.A. Vanke, Y.A. Budzinskiy, S.V. Bykovskiy // Abstracts of 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2006. Monterey, USA, 2006. – P.295-296.
130. Borisov, A.A. The Development of Vacuum Microwave Devices in Istok / A.A. Borisov, U.A. Budzinsky, S.V. Bykovsky, A.V. Galdetskiy, A.N. Korolev, M.I. Lopin, A.A. Negirev, V.I. Pugnin, G.V. Ruvinsky, B.V. Sazonov // Abstracts of 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2011. Bangalore, India, 2011. – P.437-438.
131. Будзинский, Ю.А. Защитные устройства СВЧ-диапазона на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, Т.Ш. Сиюхов, А.И. Тёхан // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – №7. – С.69-73.
132. Комплексируемые устройства – новый тип электронных компонентов СВЧ (информация) / И.К. Викулов // Электронная техника. Серия 1. Электроника СВЧ. – 1977. – Вып.2. – С.128-134.
133. Гельвич, Э.А. Комплексируемые изделия СВЧ: основные особенности и тенденции развития / Э.А. Гельвич, А.С. Котов // Радиотехника. – 2004. – №2. – С.4-16.
134. Куприянов, П.В. Разработка и производство комплексируемых широкополосных приемных устройств СВЧ. Основные принципы и

- подходы / П.В. Куприянов // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2007. – В.3. – С.10-19.
135. Кондукторов, А.А. Расширение динамического диапазона малошумящего усилителя X-диапазона / А.А. Кондукторов, А.И. Кирпиченков // Электронная техника. Серия 3. Микроэлектроника. – 2015. – В.4. – С.35-38.
136. Vanke, V.A. On a Possibility to Decrease Magnetic Intensity in Microwave / DC Cyclotron Wave Converter / V.A. Vanke, H. Matsumoto, N. Shinohara // Журнал радиоэлектроники. – 2002. – N 4.  
URL: <http://jre.cplire.ru/jre/apr02/6/text.html>

## Приложение 1

### УРАВНЕНИЯ ПОПЕРЕЧНЫХ ВОЛН ЭЛЕКТРОННОГО ЛУЧА

На движущийся нерелятивистский заряд  $q$  действуют сила электрического поля  $E$  и сила Лоренца:

$$\vec{F} = q\vec{E} + q[\vec{V}\vec{B}] \quad (\text{П. 1})$$

Рассмотрим движение электрона в однородном продольном магнитном поле  $B$  и в поперечном высокочастотном электрическом поле  $E$  зазора резонатора Куччия (следуя в основном работам [6,7]). Заряд электрона по модулю без учета знака обозначим  $e$ . Для одного электрона с массой  $m$ , движущегося со скоростью  $V$ , уравнение (П.1) следует записать:

$$m \frac{d\vec{V}}{dt} = -e\vec{E} - e[\vec{V}\vec{B}] \quad (\text{П. 2})$$

Без учета поля пространственного заряда (П.2) описывает также движение центра инерции поперечного сечения электронного луча [12 -стр.7].

Пусть электрическое и магнитное поля ориентированы по отношению к направлению движения электронного луча (вдоль оси  $z$ ) так, как указано на рисунке П-1.

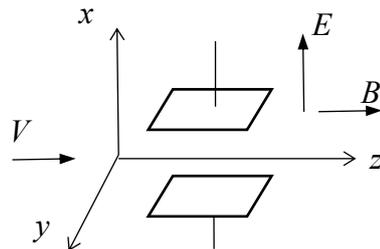


Рис. П-1. Направление полей и движения электронного луча в емкостном зазоре резонатора Куччия относительно осей системы координат.

ВЧ электрическое поле:  $E = E_x = E_{\perp}$ ,  $E_y = E_z = 0$ . Краевые поля по бокам ламелей на их длине, а также в начале и в конце ламелей резонатора не учитываются.

Индукция постоянного магнитного поля:  $B = B_z = B_0$ ,  $B_x = B_y = 0$  – магнитное поле однородно.

Электронный луч движется со скоростью  $V_0$  соосно с осью  $z$  по инерции после ускорения на входе в резонатор.  $V_0 = (2\eta U_0)^{1/2}$ , где  $U_0$  – потенциал резонатора,  $\eta = e/m$  – отношение заряда электрона к его массе.

Циклотронная круговая частота:  $\omega_c = \eta B_0$ .

Представим векторное уравнение (П.2) с учетом указанного распределения полей в виде системы двух уравнений в проекциях на оси  $x$  и  $y$ :

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = -\eta E - \eta B_0 V_y \\ \frac{dV_y}{dt} = \eta B_0 V_x \end{cases} \quad (\text{П. 3})$$

$$\begin{cases} \frac{dV_x}{dt} = -\eta E - \omega_c V_y \\ \frac{dV_y}{dt} = \omega_c V_x \end{cases} \quad (\text{П. 4})$$

Перейдем к комплексной поперечной координате  $r = x + jy$ , для этого второе уравнение в системе (П.4) умножим на  $j$  и сложим оба уравнения:

$$\begin{aligned} \frac{d^2 r}{dt^2} &= -\eta E + \omega_c (jV_x - V_y) = -\eta E + j\omega_c (V_x + jV_y) = -\eta E + j\omega_c \frac{dr}{dt}, \\ \frac{d^2 r}{dt^2} - j\omega_c \frac{dr}{dt} &= -\eta E \end{aligned} \quad (\text{П. 5})$$

В уравнении (П.5) второе слагаемое в левой части отражает воздействие силы Лоренца, множитель  $j$  учитывает ортогональность силы Лоренца направлению движения луча.

В рассматриваемом случае движение электрона вдоль координаты  $z$  происходит с постоянной неизменной скоростью  $V_0$ :

$$\frac{d^2 z}{dt^2} = 0 \quad (\text{П. 6})$$

Чтобы перейти от анализа движения отдельного электрона к анализу нитевидного электронного луча (последовательности электронов) следует полагать, что переменные  $z$  и  $t$  независимы. При этом оператор  $d/dt$  для радиус-вектора  $r$  имеет вид [7]:

$$\frac{d}{dt}\{r(z(t), t)\} = \frac{\partial r}{\partial t} + \frac{\partial r}{\partial z} \cdot \frac{dz}{dt} = \frac{\partial r}{\partial t} + V_0 \cdot \frac{\partial r}{\partial z} \quad (\text{П. 7})$$

С учетом (П.7) уравнение (П.5) может быть преобразовано:

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \left( \frac{\partial r}{\partial t} + V_0 \frac{\partial r}{\partial z} \right) - j\omega_c \left( \frac{\partial r}{\partial t} + V_0 \frac{\partial r}{\partial z} \right) &= -\eta E, \\ \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} + V_0 \frac{\partial^2 r}{\partial z \partial t} + V_0 \frac{\partial^2 r}{\partial z \partial t} + V_0^2 \frac{\partial^2 r}{\partial z^2} - j\omega_c \frac{\partial r}{\partial t} - j\omega_c V_0 \frac{\partial r}{\partial z} &= -\eta E, \\ \frac{\partial^2 r}{\partial z^2} + \frac{2}{V_0} \frac{\partial^2 r}{\partial z \partial t} + \frac{1}{V_0^2} \frac{\partial^2 r}{\partial t^2} - j \frac{\omega_c}{V_0} \frac{\partial r}{\partial z} - j \frac{\omega_c}{V_0^2} \frac{\partial r}{\partial t} &= -\eta \frac{E}{V_0^2} \end{aligned} \quad (\text{П. 8})$$

Плоско-поляризованное ВЧ электрическое поле  $E$  в зазоре резонатора Куччия может быть представлено в виде суммы двух поляризованных по кругу компонент с противоположными направлениями вращения:

$$E = E_+(z)e^{j\omega t} + E_-(z)e^{-j\omega t} \quad (\text{П. 9})$$

Условно принято считать, что компонента  $E_+ \exp(j\omega t)$  имеет правую круговую поляризацию,  $E_- \exp(-j\omega t)$  – левую круговую поляризацию [12].

Решение уравнения (П.8) также будем искать в форме двух поляризованных по кругу бегущих волн – волны с правой поляризацией и амплитудой  $R_+$  и волны с левой поляризацией и амплитудой  $R_-$  :

$$r(z, t) = R_+(z)e^{j\omega t} + R_-(z)e^{-j\omega t} \quad (\text{П. 10})$$

Учитывая, что взаимодействие имеет место между волнами одного направления круговой поляризации [7,71], преобразуем (П.8) с учетом (П.9) и (П.10) для каждого из направлений поляризации независимо. В качестве примера рассмотрим преобразование уравнения (П.8) для компонент с правой поляризацией:

$$\begin{aligned}
& \frac{\partial^2 R_+}{\partial z^2} e^{j\omega t} + \frac{2}{V_0} \frac{\partial R_+}{\partial z} j\omega \cdot e^{j\omega t} + \frac{1}{V_0^2} R_+ (j\omega)^2 e^{j\omega t} - \\
& - j \frac{\omega_c}{V_0} \frac{\partial R_+}{\partial z} e^{j\omega t} - j \frac{\omega_c}{V_0^2} R_+ \cdot j\omega \cdot e^{j\omega t} = -\eta \frac{E_+(z)}{V_0^2} e^{j\omega t}, \\
& \frac{\partial^2 R_+}{\partial z^2} + j \left( \frac{2\omega}{V_0} - \frac{\omega_c}{V_0} \right) \frac{\partial R_+}{\partial z} - \left( \frac{\omega^2}{V_0^2} - \frac{\omega\omega_c}{V_0^2} \right) R_+ = -\eta \frac{E_+(z)}{V_0^2} \quad (\text{П. 11})
\end{aligned}$$

Подставим в уравнение фазовые постоянные распространения  $\beta_e = \omega/V_0$  и  $\beta_c = \omega_c/V_0$ ; заменим в правой части  $V_0^2 = 2\eta U_0$ , где  $U_0$  – потенциал дрейфа луча в зазоре резонатора. Добавим аналогичное уравнение для компонент с левой поляризацией:

$$\begin{cases} \frac{\partial^2 R_+}{\partial z^2} + j(2\beta_e - \beta_c) \frac{\partial R_+}{\partial z} - \beta_e(\beta_e - \beta_c) R_+ = -\frac{E_+(z)}{2U_0} \\ \frac{\partial^2 R_-}{\partial z^2} - j(2\beta_e + \beta_c) \frac{\partial R_-}{\partial z} - \beta_e(\beta_e + \beta_c) R_- = -\frac{E_-(z)}{2U_0} \end{cases} \quad (\text{П. 12})$$

Уравнения (П.12) имеют стандартное решение [73 -стр.107] для случая, когда высокочастотное электрическое поле в зазоре резонатора отсутствует, т.е.  $E = E_+(z) = E_-(z) = 0$ :

$$\begin{cases} R_+ = R_{1+} e^{-j(\beta_e - \beta_c)z} + R_{2+} e^{-j\beta_e z} \\ R_- = R_{1-} e^{j(\beta_e + \beta_c)z} + R_{2-} e^{j\beta_e z} \end{cases} \quad (\text{П. 13})$$

Таким образом, поперечные волновые процессы в нитевидном электронном луче ((П.10) с учетом (П.13)), дрейфующем в однородном магнитном продольном поле, могут быть описаны следующими четырьмя независимыми волнами [39]:

$$\begin{aligned}
r(z, t) = & R_{1+} e^{j(\omega t - (\beta_e - \beta_c)z)} + R_{2+} e^{j(\omega t - \beta_e z)} + \\
& + R_{1-} e^{-j(\omega t - (\beta_e + \beta_c)z)} + R_{2-} e^{-j(\omega t - \beta_e z)}, \quad (\text{П. 14})
\end{aligned}$$

где  $R_{1+}$  – амплитуда БЦВ,  $R_{2+}$  – амплитуда МСВ,  $R_{1-}$  – амплитуда МЦВ,  $R_{2-}$  – амплитуда БСВ.

Путем решения системы неоднородных уравнений (П.12) [6] и определения мощности поперечных колебаний [7] могут быть получены выражения для комплексной электронной проводимости луча в зазоре резонатора [18]. В данном случае интерес представляют активная  $G_e$  и реактивная  $B_e$  составляющие полной электронной проводимости луча в виде БЦВ  $Y_e = G_e + jB_e$ :

$$G_e = G_0 \frac{\omega}{\omega_c} \frac{2(1 - \cos \theta)}{\theta^2}, \quad (\text{П. 15})$$

$$B_e = G_0 \frac{\omega}{\omega_c} \frac{2(\sin \theta - \theta)}{\theta^2}, \quad (\text{П. 16})$$

$$G_0 = \frac{I_0}{8U_0} \left(\frac{l}{d}\right)^2, \quad (\text{П. 17})$$

где  $G_0$  – активная электронная проводимость луча на циклотронной частоте  $\omega_c$ ,  $I_0$  и  $U_0$  – ток луча и потенциал дрейфа луча в зазоре резонатора,  $l$  и  $d$  – соответственно длина (вдоль оси  $z$ ) и поперечный размер (вдоль оси  $x$ ) электронного зазора резонатора (см. рис. 2.4),  $\theta$  – отстройка от циклотронного резонанса по углу пролета в зазоре резонатора на частоте  $\omega$ :

$$\theta = (\omega - \omega_c) \frac{l}{V_0}, \quad (\text{П. 18})$$

где  $V_0$  – скорость дрейфа луча в зазоре резонатора ( $V_0 = \sqrt{2\eta U_0}$ ,  $U_0$  – потенциал дрейфа луча),  $l / V_0$  – время пролета зазора резонатора.

## Приложение 2

### РЕАКТИВНАЯ ПРОВОДИМОСТЬ РЕЗОНАТОРНОГО КОНТУРА

Реактивную проводимость резонатора, как эквивалентного параллельного LC-контура [78 -стр.21] можно получить из общеизвестных выражений для реактивного сопротивления  $X$  емкости  $C$  и индуктивности  $L$ :

$$jX_C = \frac{1}{j\omega C} = -j\frac{1}{\omega C}, \quad jX_L = j\omega L = -\frac{\omega L}{j} \quad (\text{П. 19})$$

Суммарная реактивная проводимость резонатора (параллельного LC-контура):

$$jB_p = jB_C + jB_L = j\omega C - j\frac{1}{\omega L}, \quad (\text{П. 20})$$

учитывая, что резонансная частота эквивалентного контура  $\omega_0 = 1/\sqrt{LC}$  и характеристическое сопротивление контура  $\rho = \sqrt{L/C} = 1/(C\omega_0)$ , далее получаем:

$$B_p = \omega C - \frac{1}{\omega L} = C \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\omega} = \frac{\omega^2 - \omega_0^2}{\rho\omega\omega_0}. \quad (\text{П. 21})$$

Выражение соответствует [79 -стр.277].

В работах [80,81] использовано сокращенное выражение для реактивной проводимости контура, справедливое для частот вблизи резонансной частоты  $\omega \approx \omega_0$  (принято  $\omega + \omega_0 = 2\omega$ ):

$$B_p = \frac{2(\omega - \omega_0)}{\rho\omega_0} = 2(\omega - \omega_0)C. \quad (\text{П. 22})$$

### Приложение 3

## ШУМОВОЙ ВКЛАД ПАССИВНОГО ЧЕТЫРЕХПОЛЮСНИКА, НАХОДЯЩЕГОСЯ ПРИ ПОВЫШЕННОЙ ТЕМПЕРАТУРЕ

Следуя [85 -стр.36] определим шумовой вклад пассивного четырехполосника, находящегося при повышенной (рабочей) температуре  $T_p$ . Коэффициент шума четырехполосника  $K_{ш}$  равен отношению полной шумовой мощности на выходе  $P_{ш.ш.в.вых}$  к той ее части, которая обусловлена шумами источника сигнала  $P_{ш.и.в.вых}$ :

$$K_{ш} = \frac{P_{ш.ш.в.вых}}{P_{ш.и.в.вых}} = \frac{P_{ш.и.в.вых} + P_{ш.4.в.вых}}{P_{ш.и.в.вых}}, \quad (\text{П. 23})$$

где  $P_{ш.4.в.вых}$  – мощность шумов четырехполосника на выходе.

Пусть температура проводимости источника шумов на входе четырехполосника превышает стандартную шумовую температуру  $T_0$  и равняется рабочей температуре  $T_p$ , сам пассивный четырехполосник также находится при температуре  $T_p$ . В соответствии с формулой Найквиста [85]:

$$P_{ш.ш.в.вых} = k_б \cdot T_p \cdot \Delta f ,$$

$$P_{ш.и.в.вых} = k_б \cdot T_p \cdot \Delta f \cdot K_{п} ,$$

где  $k_б$  – постоянная Больцмана,  $\Delta f$  – шумовая полоса частот анализа,  $K_{п}$  – коэффициент передачи четырехполосника. Шумовой вклад собственно четырехполосника составляет разность приведенных выражений:

$$P_{ш.4.в.вых} = k_б \cdot T_p \cdot \Delta f \cdot (1 - K_{п}) . \quad (\text{П. 24})$$

При стандартной шумовой температуре на входе  $T_0$ :

$$P_{ш.и.в.вых} = k_б \cdot T_0 \cdot \Delta f \cdot K_{п} . \quad (\text{П. 25})$$

Суммарная шумовая мощность на выходе при стандартной шумовой температуре на входе  $T_0$  и рабочей температуре четырехполосника  $T_p$  равна сумме выражений (П.24) и (П.25). Коэффициент шума в соответствии с (П.23):

$$K_{\text{ш}} = \frac{T_0 \cdot K_{\text{п}} + T_{\text{р}}(1 - K_{\text{п}})}{T_0 \cdot K_{\text{п}}} = 1 + \frac{T_{\text{р}}}{T_0} \left( \frac{1}{K_{\text{п}}} - 1 \right). \quad (\text{П. 26})$$

Эквивалентная шумовая температура пассивного четырехполюсника, находящегося при физической температуре  $T_{\text{р}}$ , согласно (2.38) будет определяться выражением:

$$T_{\text{ш}} = \left( \frac{1}{K_{\text{п}}} - 1 \right) \cdot T_{\text{р}}. \quad (\text{П. 27})$$

**Приложение 4****СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ СОИСКАТЕЛЯ****(в хронологической последовательности)**

1. Быковский, С.В. О кинетической мощности поперечных волн электронного потока / С.В. Быковский, В.А. Ванке // Радиотехника и электроника. – 1992. – Т.37. – №10. – С.1854-1858.
2. Быковский, С.В. Поперечные волны электронного потока в плоскосимметричных полях / С.В. Быковский, В.А. Ванке // Радиотехника и электроника. – 1993. – Т.38 – №8. – С.1475-1482.
3. Будзинский, Ю.А. Электростатические усилители – основные параметры и особенности применения / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Саратов, 1994. – С.19-20.
4. Ванке, В.А. Преобразование поперечных волн электронного потока в параксиальных полях различной структуры / В.А. Ванке, С.В. Быковский // Материалы международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения». Саратов, 1994. – С.20-21.
5. Быковский, С.В. Поперечные волны электронного потока в квадрупольном электрическом поле / С.В. Быковский, В.А. Ванке // Радиотехника и электроника. – 1995. Т.40. – №8. – С.1277-1281.
6. Vanke, V.A. Development of Cyclotron-Wave Converter / V.A. Vanke, V.L. Savvin, I.A. Boudzinski, S.V. Bykovski // Abstracts of The Second International Wireless Power Transmission Conference, WPT'95. Kobe, Japan, 16-19 October, 1995. P.3-3.
7. Быковский С.В. Теоретическое исследование процессов энергообмена поперечных волн электронного потока и на этой основе исследование и

- разработка электронных защитных устройств на быстрой циклотронной волне с малым (порядка  $10^1$  нс) временем восстановления: дис. ... канд. техн. наук: 05.27.02 / Быковский Сергей Васильевич. – Фрязино, 1996. – 134 с.
8. Будзинский, Ю.А. Электронные приборы СВЧ на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.П. Кантюк, М.А. Мاستрюков // Радиотехника. – 1999. – №4. – С.32-40.
  9. Boudzinski, I.A. Amplifying and Protective Devices Based on Electron Beam Fast Cyclotron Wave / I.A. Boudzinski, S.V. Bykovski // Proceedings of The 2nd IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2001. Noordwijk, The Netherlands, 2001. – P.153-156.
  10. Будзинский, Ю.А. Комплексируемые усилители с циклотронной защитой для приемников РЛС / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов, Д.Н. Грудцов, Н.В. Ильичев, О.А. Саврухин, И.А. Шмелев // Материалы 11-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2001. Севастополь, 2001. – С.190-192.
  11. Голеницкий, И.И. Моделирование трехмерной электронно-оптической системы циклотронного защитного устройства / И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Материалы 11-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2001. Севастополь, 2001. – С.216-217.
  12. Будзинский, Ю.А. Усилительные и защитные приборы, работающие на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов // Вопросы радиоэлектроники. Серия "Общетехническая": Науч.-техн. сборник / ФГУП "ЦНИИ "Комета". – 2002. - В.2. – С.43-47.
  13. Будзинский, Ю.А. Циклотронные защитные устройства для приемников РЛС / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильданов, О.А. Саврухин,

- И.А. Шмелев // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2003. – В.1. – С.24-30.
14. Голеницкий, И.И. Формирование высокоперевансных тонких ленточных электронных потоков в слабых магнитных полях / И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Материалы 13-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2003. Севастополь, 2003. – С.291-293.
15. Будзинский, Ю. Нетрадиционная вакуумная СВЧ-электроника на основе поперечных волн электронного потока / Ю. Будзинский, С. Быковский, В. Ванке // Электроника: Наука, Технология, Бизнес. – 2005. – №4. – С.38-42.
16. Будзинский, Ю.А. Об увеличении полосы рабочих частот циклотронного защитного устройства / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, В.Е. Котов, О.А. Саврухин // Материалы 15-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2005. Севастополь, 2005. – С.205-206.
17. Vanke, V.A. Electron Beam Transverse Waves and Microwave Electronics / V.A. Vanke, Y.A. Budzinskiy, S.V. Bykovskiy // Abstracts of 2006 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2006. Monterey, USA, 2006. – P.295-296.
18. Budzinskiy, Y.A. Cyclotron Protective Device with Increased Frequency Band / Y.A. Budzinskiy, S.V. Bykovskiy // Abstracts of 2009 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2009. Rome, Italy, 2009. – P.60-61.
19. Будзинский, Ю.А. Расчет рабочей полосы частот циклотронного защитного устройства / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, В.Г. Калина // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2010. – В.1, С.70-87.

20. Калина, В.Г. Моделирование СВЧ циклотронного защитного устройства как трехзвенного фильтра / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2010. – В.4. – С.3-15.
21. Borisov, A.A. The Development of Vacuum Microwave Devices in Istok / A.A. Borisov, U.A. Budzinsky, S.V. Bykovsky, A.V. Galdetskiy, A.N. Korolev, M.I. Lopin, A.A. Negirev, V.I. Pugnin, G.V. Ruvinsky, B.V. Sazonov // Abstracts of 2011 IEEE International Vacuum Electronics Conference, IVEC-2011. Bangalore, India, 2011. – P.437-438.
22. Будзинский, Ю.А. Становление, развитие и перспективы СВЧ-приборов на циклотронном резонансе электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, И.И. Голеницкий, В.Г. Калина // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2013. – В.3. – С.136-142.
23. Будзинский, Ю.А. Защитные устройства СВЧ-диапазона на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, Т.Ш. Сиюхов, А.И. Тёхан // Успехи современной радиоэлектроники. – 2013. – №7. – С.69-73.
24. Калина, В.Г. Расчет циклотронного защитного устройства по модели полосового фильтра / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2014. – В.1. – С.19-38.
25. Будзинский, Ю.А. Инженерный расчет циклотронных защитных устройств / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, В.Г. Калина // Материалы 24-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2014. Севастополь, 2014. – С.159-160.
26. Будзинский, Ю.А. Электронно-оптическая система циклотронного защитного устройства / Ю. А. Будзинский, С. В. Быковский, И. И. Голеницкий, Н. Г. Духина // Материалы 24-й международной конференции «СВЧ-техника и

- телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2014. Севастополь, 2014. – С.157-158.
27. Калина, В.Г. Расчет циклотронного защитного устройства с подавлением зеркального канала / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2014. – В.4. – С.48-62.
28. Голеницкий, И.И. Электронно-оптическая система циклотронного защитного устройства 8-мм диапазона длин волн / И.И. Голеницкий, Н.Г. Духина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Материалы 25-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2015. Севастополь, 2015. – С.181-182.
29. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Расчет связи с нагрузкой / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2016. – В.2. – С.8-12.
30. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Расчет характеристического сопротивления резонатора / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2016. – В.3. – С.31-39.
31. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Модель с автотрансформатором / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2017. – В.1. – С.74-83.
32. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. LCR-модель с индуктивным проводником вывода / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2017. – В.3. – С.41-49.

33. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Частотно-унитарная LCR-модель / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2017. – В.4. – С.6-11.
34. Быковский, С.В. Циклотронные защитные устройства: граница линейности и переход в режим защиты / С.В. Быковский, Ю.А. Будзинский, В.Г. Калина, В.Е. Котов, О.А. Саврухин // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2018. – В.3. – С.43-49.
35. Калина, В.Г. Циклотронное защитное устройство. Модель с заданной полосой пропускания / В.Г. Калина, Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2019. – В.1. – С.44-56.
36. Быковский, С.В. Циклотронные защитные устройства: время восстановления параметров / С.В. Быковский, Ю.А. Будзинский, В.Г. Калина, В.Е. Котов, С.В. Николаев, О.А. Саврухин // Электронная техника. Серия 1. СВЧ-техника. – 2020. – В.1. – С.12-21.
37. Быковский, С.В. Параметры электромагнитной совместимости циклотронно-защищенных комплексированных усилителей (ЦЗКУ) / С.В. Быковский, Т.И. Градова, М.Б. Орехов // Вестник воздушно-космической обороны. – 2020. – В.1. – С.51-54.
38. Быковский, С.В. Циклотронные защитные устройства СВЧ / С.В. Быковский, Ю.А. Будзинский, В.Е. Котов, С.В. Николаев, О.А. Саврухин // Материалы 30-й международной конференции «СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии», КрыМиКо-2020. Севастополь, 2020. – С.49-50.
39. Быковский, С.В. Влияние рассеянных электронов на коэффициент шума циклотронных защитных устройств / С.В. Быковский // Письма в ЖТФ. – 2021. – Т.47. – В.12. – С.51-54.

40. Быковский, С.В. Циклотронные защитные устройства СВЧ-диапазона для приемников РЛС / С.В. Быковский // РЭНСИТ. – 2021. – Т.13. – В.3. – С.297-302.

### Патенты

41. Патент № 2024098 РФ, МПК H01J 23/08 (1990.01). Магнитная система электровакуумного прибора СВЧ : № 4900352/21 : заявл. 08.01.1991 : опубл. 30.11.1994 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Мурсков А.А.
42. Патент № 2119691 РФ, МПК H01J 25/00 (1995.01). Циклонный преобразователь СВЧ-энергии : № 97 97103772 : заявл. 12.03.1997 : опубл. 10.11.2016 / Быковский С.В., Кылинский Ю.Ф., Семенович В.Д., Ванке В.А., Будзинский Ю.А., Саввин В.Л.
43. Патент на полезную модель № 43405 РФ, МПК H01J 25/78 (2000.01). Циклотронно-защищенное комплексированное устройство (ЦЗКУ) : № 2003110309/22 : заявл. 10.04.2003 : опубл. 10.01.2005 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Вильданов С.А.
44. Патент № 2319274 РФ, МПК H02H 7/12 (2006.01), H01J 23/36 (2006.01), H01J 25/00 (2006.01). Циклотронное защитное устройство с увеличенной полосой рабочих частот : № 2006123002/09 : заявл. 28.06.2006 : опубл. 10.03.2008 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Конов М.А., Хахалкин В.Н., Шапотковский Ю.В.
45. Патент № 2453018 РФ, МПК H02H 7/00 (2006.01). Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство : № 2010140806/07 : заявл. 05.10.2010 : опубл. 10.06.2012 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Калина В.Г.
46. Патент № 2530746 РФ, МПК H02H 7/00 (2006.01). Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство : № 2013117623/07 : заявл. 16.04.2013 : опубл. 10.10.2014 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В., Голеницкий И.И., Духина Н.Г., Шерстяных Р.И.

47. Патент № 2631923 РФ, МПК H02H 7/12 (2006.01), H01J 23/34 (2006.01).  
Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство : № 2016114977 :  
заявл. 18.04.2016 : опубл. 29.09.2017 / Будзинский Ю.А., Быковский С.В.,  
Голеницкий И.И., Духина Н.Г.
48. Патент № 2731297 РФ, МПК H02H 7/12 (2006.01), H01J 23/36 (2006.01).  
Сверхвысокочастотное циклотронное защитное устройство : № 2020103845 :  
заявл. 28.01.2020 : опубл. 02.09.2020 / Быковский С.В.