

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Политехнический институт  
институт  
Межинститутская базовая кафедра  
«Прикладная физика и космические технологии»  
кафедра

УТВЕРЖДАЮ  
Заведующий кафедрой  
В.Е. Косенко  
подпись инициалы, фамилия  
« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

## МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ

«Разработка новой конструкции волноводного вращающегося соединения  
Ка-диапазона при производстве спутников-ретрансляторов»  
тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»  
код и наименование направления

15.04.05.02 «Технологии производства космических аппаратов»  
код и наименование магистерской программы

Научный руководитель	_____	профессор МБК ПФиКТ д-р техн. наук _____	<u>Г.В. Двирный</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата	должность, ученая степень	
Выпускник	_____		<u>И.Н. Марейкин</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата		
Рецензент	_____	Начальник сектора отдела 115 АО«РЕШЕТНЁВ» _____	<u>Д.О. Роганов</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата	должность, ученая степень	
Нормоконтролер	_____	профессор МКБ ПФиКТ д-р техн. наук _____	<u>В.Е. Чеботарев</u> инициалы, фамилия
	подпись, дата	должность, ученая степень	

Красноярск 2023

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

институт

Межинститутская базовая кафедра

«Прикладная физика и космические технологии»

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

В.Е. Косенко

подпись

инициалы, фамилия

« \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2023 г.

**ЗАДАНИЕ**  
**НА ВЫПУСКНУЮ КВАЛИФИКАЦИОННУЮ РАБОТУ**  
**в форме магистерской диссертации**

Красноярск 2023

Студенту: Марейкину Илье Николаевичу

Группа: МТ 21-04М.

Направление: 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Специализированная программа подготовки: 15.04.05.02 «Технологии производства космических аппаратов».

Тема магистерской диссертации (МД): «Разработка новой конструкции волноводного вращающегося соединения Ка-диапазона при производстве спутников-ретрансляторов».

Утверждено приказом по университету от « 20 » марта 2023 г. № 4538/с

Руководитель ВКР: Гурий Валерьевич Двирный, профессор МБК ПФ и КТ, доктор техн. наук, АО «Информационные спутниковые системы имени академика М.Ф.Решетнёва».

Исходные данные ВКР: создание новой конструкции волноводного вращающегося соединения Ка-диапазона с минимальными потерями электрического контакта между подвижной и неподвижной частями волноводов.

Перечень разделов МД.

1 Изучение принципов работы вращающихся волноводных соединений.

2 Анализ существующих конструкций волноводных вращающихся соединений.

3 Проведение электродинамического проектирования, создание электронной модели вращающегося волноводного соединения.

Перечень графического материала представлен в виде слайдов презентации в количестве 16 штук.

Руководитель ВКР \_\_\_\_\_  
подпись

Г.В. Двирный  
инициалы и фамилия

Задание принял к исполнению \_\_\_\_\_  
подпись

И.Н. Марейкин  
инициалы и фамилия

## РЕФЕРАТ

Выпускная квалификационная работа по теме «Разработка новой конструкции волноводного вращающегося соединения Ka-диапазона при производстве спутников-ретрансляторов» содержит 49 страницы текстового документа, 23 использованных источников, 30 рисунков.

СОЕДИНЕНИЕ ВРАЩАЮЩИЕСЯ ВОЛНОВОДНОЕ, ПРЯМОУГОЛЬНЫЙ ВОЛНОВОД, ЛИНИЯ ПЕРЕДАЧ, КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ.

*Цель работы:* разработать новую конструкцию волноводного вращающегося соединения Ka-диапазона с минимальными потерями электрического контакта между подвижной и неподвижной частями волноводов.

*Задачи:*

- изучение принципов работы вращающихся волноводных соединений.
- анализ существующих конструкций волноводных вращающихся соединений.
- проведение электродинамического проектирования, создание электронной модели вращающегося волноводного соединения.

Научная новизна диссертационной работы заключается в разработке новой конструкции вращающегося волноводного соединения Ka-диапазона с минимальными потерями электрического контакта между подвижной и неподвижной частями волноводов.

## СОДЕРЖАНИЕ

Введение.....	6
1 Изучение принципов работы вращающихся волноводных соединений.....	8
1.1 Вращающиеся волноводные соединители, основные принципы их работы.....	8
1.2 Переходы между линиями передачи различных типов.....	14
1.3 Переходы от прямоугольного волновода к круглому.....	17
2 Анализ существующих конструкций волноводных вращающихся соединений.....	21
2.1 Вращающиеся волноводные соединения .....	21
2.2 Коаксиальные вращающиеся соединения .....	25
2.3 Волноводные вращающиеся соединения со шлейфами и кольцами.....	29
2.4 Коаксиально-волноводные вращающиеся соединения.....	35
3 Проведение электродинамического проектирования, создание электронной модели вращающегося волноводного соединения.....	40
3.1 Создание электронной модели и 3D модели вращающегося волноводного соединения .....	40
3.2 Описание и преимущества новой конструкции соединения вращающегося волноводного.....	42
Заключение.....	46
Список сокращений.....	47
Список использованных источников.....	48

## ВВЕДЕНИЕ

Прогресс современной радиотехники сопровождается быстрым развитием теории и техники устройств СВЧ. В большинстве случаев эти устройства представляют собой конструктивное сочетание проводников, диэлектриков и ферритов и относятся к классу линейных радиотехнических устройств. Все они в совокупности образуют фидерный тракт радиотехнической системы, который занимает место между антенной и радиопередающим и радиоприёмным устройствами. Фидерный тракт осуществляет канализацию электромагнитной энергии, обеспечивает правильный режим выходных и входных цепей передатчика и приёмника, а также совместно с антенной системой выполняет предварительную поляризационную и частотную селекцию сигналов. В него могут включаться коммутирующие цепи, различные подвижные и неподвижные сочленения, устройства, обеспечивающие контроль работоспособности системы. В настоящее время наблюдается бурный рост теоретических и экспериментальных исследований в области устройств СВЧ. Он происходит как по пути модернизации и применения ранее известных устройств на всё более высоких частотах, так и по пути создания ряда новых устройств на основе достижений физики твёрдого тела и прогрессивной технологии. Именно поэтому современный радиоинженер должен иметь представление об основных конструкциях устройств СВЧ, их принципах действия и особенностях применения в интересах радиотехнического обеспечения полётов авиации.

На практике часто встречается необходимость в передаче электромагнитной энергии в нагрузку с наибольшим коэффициентом полезного действия, например от передатчика к антенне, от антенны к приёмнику и т.п. В этих случаях применяется передача энергии с помощью так называемых направляющих систем или линий передачи (ЛП), образованных в большинстве случаев поверхностями металлических

проводников. В технике СВЧ такие линии передачи называют фидерами (от английского глагола tofeed – «питать»). Они определяют выбор типа устройств СВЧ, образующих высокочастотный тракт любой радиотехнической системы. Различают регулярные (если геометрические размеры и электрические параметры поперечного сечения не меняются вдоль линии передачи) и нерегулярные (если хотя бы какие-то из этих условий не выполняются) линии передачи. Иначе их называют однородные и неоднородные соответственно. Наиболее широкое распространение на практике получили регулярные линии передачи. Они бывают открытого типа, если поперечное сечение ЛП не имеет замкнутого проводящего контура, охватывающего область распространения электромагнитной волны, и закрытого типа, если такой проводящий контур имеется. К ЛП открытого типа относятся однопроводные, двухпроводные, полосковые, поверхностных волн, к ЛП закрытого типа – коаксиальные кабели, волноводы.

К любой линии передачи предъявляются следующие общие требования:

- обеспечение минимальных потерь энергии, т.е. высокого КПД;
- способность к передаче требуемой мощности без электрического пробоя;
- необходимая широкополосность;
- минимальное излучение энергии в окружающее пространство;
- минимально возможные размеры, вес, стоимость;
- технологичность изготовления.

В принципе, невозможно создать идеальную направляющую систему, обеспечивающую распространение энергии электромагнитного поля только в одном направлении. Однако в правильно сконструированных линиях рассеяние энергии в других направлениях оказывается пренебрежимо малым. Качество линии передачи определяется её характеристиками и параметрами.

# **1 Изучение принципов работы вращающихся волноводных соединений**

## **1.1 Вращающиеся волноводные соединители, основные принципы их работы**

Волноводный тракт обычно выполняется на прямоугольном волноводе, так как картина распределения поля основной волны  $H_{10}$  жестко связана с формой поперечного сечения и сохраняется при изгибах и скручивании волновода, что бывает необходимо при прокладке реальных трактов сложных радиотехнических устройств и систем. Вращающиеся волноводные соединители содержат два перехода от прямоугольного волновода с волной типа  $H_{10}$  к круглому с симметричной волной, устройство, обеспечивающее вращение одной части круглого волновода относительно другой, преобразователи линейной поляризации в круговую и обратно, дроссельное устройство для предотвращения утечки энергии через кольцевую щель. Такой вращающийся волноводный соединитель имеет значительную осевую длину. Кроме того, при вращении возникает паразитная фазовая модуляция сигнала, что может быть недопустимо в некоторых радиотехнических системах. Чаще во вращающихся волноводных соединителях используют круглый волновод с симметричной волной  $E_{01}$ , т.е. первой высшей волной в круглом волноводе.

Вращающееся волноводное соединение, использующее круглый волновод с симметричной волной  $E_{01}$  как показано на рисунке 1. Связь между прямоугольным и круглым волноводами происходит через круглое отверстие в широкой стенке прямоугольного волновода. Однако кроме волны  $E_{01}$  в круглом волноводе возбуждается и волна  $H_{11}$ , низшая по отношению к волне  $E_{01}$  и имеющая несимметричную относительно оси волновода структуру поля. Существуют различные способы фильтрации этой волны. В данном случае применяются фильтры типа волны в виде резонансных колец, ось

которых совпадает с осью волновода. Резонансное кольцо не препятствует распространению волн типа  $E_{01}$ , в связи с тем, что линии электрического поля этой волны перпендикулярны к краям кольца. Выбором размеров кольца можно добиться резонансного отражения им волны  $H_{11}$ . Крепление кольца к волноводу производится с помощью радиально расположенных стержней.

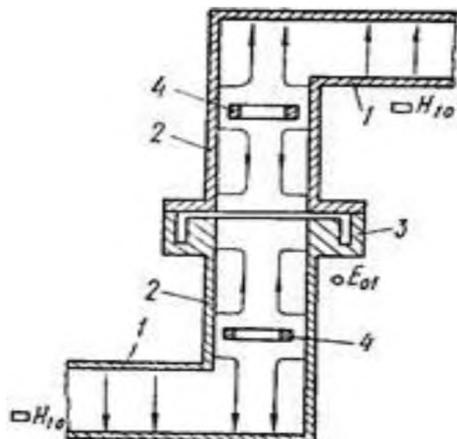


Рисунок 1 – Вращающееся волноводное соединение

Волна типа  $E_{01}$  в круглом волноводе создает интенсивные продольные поверхностные токи. Поэтому во вращающемся соединении используется принцип дроссельно – фланцевого соединения. На рисунке 2 приведена схема волноводного вращающегося соединителя с использованием коаксиальных переходов. Короткие отрезки коаксиальных волноводов с  $T$ -волной обеспечивают фильтрацию паразитной волны  $H_{11}$ . Дроссельное устройство представляет собой свернутую полуволновую коаксиальную линию с волной  $T$ , причем в точке контакта  $A$  (точке разрыва) имеет место нуль тока, а в точке  $B$  – виртуальное короткое замыкание. Рассмотренное волноводное вращающееся соединение имеет невысокий уровень допустимой мощности, что обусловлено малыми зазорами в коаксиальных отрезках, возбуждающих круглый волновод.

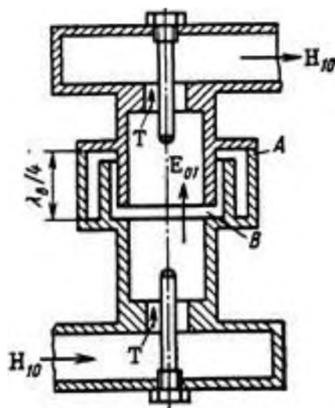
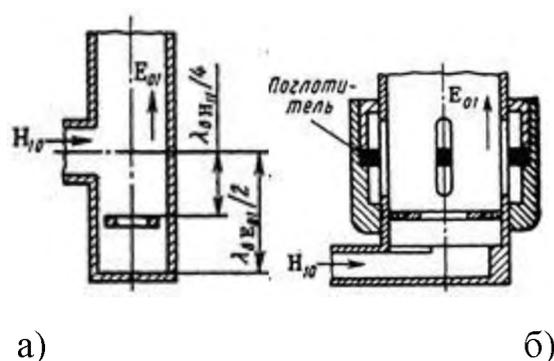


Рисунок 2 – Волноводное вращающееся соединение с волной типа  $E_{01}$

На рисунке 3 а, б изображены устройства возбуждения волны  $E_{01}$  без использования коаксиальных отрезков. На рисунке 3 а прямоугольный волновод соединяется с круглым через поперечное отверстие. Для лучшего возбуждения волны  $E_{01}$  круглый волновод с одной стороны закорачивается на расстоянии  $\lambda_{в} E_{01}/2$  и от возбуждающего отверстия. Для подавления паразитной волны низшего типа  $H_{11}$ , которая также возбуждается отверстием, в короткозамкнутом отрезке круглого волновода располагают тонкое металлическое кольцо, которое при периметре кольца близком к  $\lambda_0$  действует на волну  $H_{11}$  подобно короткозамыкателю. Располагая кольцо на расстоянии  $\lambda_{в} H_{11}/4$  от центра щели, удается эффективно подавить волну  $H_{11}$  в круглом волноводе. На волну типа  $E_{01}$ , силовые линии электрического поля которой радиальны и лежат в плоскости кольца, резонансное кольцо практически не влияет, так как линии вектора  $E$  перпендикулярны проводу кольца и не наводят в нем токи. Другой возбуждатель волны  $E_{01}$  в круглом волноводе с высокой степенью подавления волны  $H_{11}$  показан на рисунке 3 б. Прямоугольный волновод соединяется с круглым через поперечное отверстие с коротким замыканием одной половины круглого волновода непосредственно у места сочленения. В круглом волноводе также помещено резонансное кольцо, закорачивающее его для волны  $H_{11}$ . Волна  $H_{11}$ ,

просочившаяся через резонансное кольцо, далее просачивается через продольные щели и поглощается в резонаторе с поглотителем. Волна  $E_{01}$  не имеет поперечных токов и не возбуждает продольные щели и резонатор с поглотителем. Все волноводные вращающиеся соединители состоят из двух переходов, разделенных, как и на рисунке 3, узкой щелью с дроссельным устройством для предотвращения утечки электромагнитной энергии. Эти соединители могут использоваться для низкого и высокого уровней мощности.

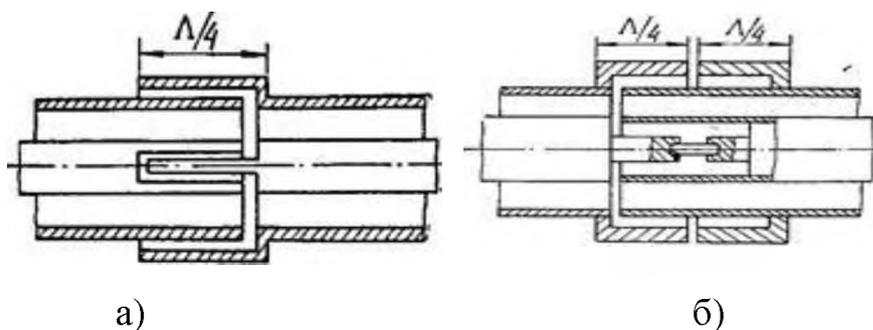


а-прямоугольный волновод; б-круглый волновод

Рисунок 3 – Способы возбуждения волны  $E_{01}$  в круглом волноводе

Вращающиеся коаксиальные соединения делятся на два основных типа: контактные, применяемые при малых скоростях вращения и низких уровнях мощности во всем диапазоне СВЧ, и бесконтактные (дроссельные), применяемые при больших скоростях вращения и всех уровнях мощности в дециметровом и сантиметровом диапазонах. Вращающиеся соединители с трущимися контактами ненадежны и могут приводить к стиранию и разрушению трущихся поверхностей. Более надежны «бесконтактные» вращающиеся соединители с дроссельными канавками, хотя их параметры зависят от частоты.

В бесконтактном вращающемся коаксиальном соединителе как на рисунке 4 а во внутреннем проводнике неподвижной части фидера имеется осевое отверстие длиной  $\Lambda/4$ , в которое, не касаясь стенок и дна отверстия, входит цилиндрический стержень, являющийся продолжением внутреннего проводника вращающейся части фидера. Стержень и отверстие образуют четвертьволновую линию, разомкнутую на конце и имеющую входное сопротивление, равное нулю, что и обеспечивает соединение по высокой частоте внутренних проводников обеих частей фидера. На этом же принципе основывается и контакт внешних проводников фидера. Четвертьволновая линия образуется наружной поверхностью внешнего проводника неподвижной части фидера и внутренней поверхностью концентрической муфты, насаженной на вращающуюся часть фидера. Недостатком такого соединения является наличие кольцевого зазора между внешними проводниками фидера, что приводит к нежелательному излучению энергии. Этот недостаток устраняется во вращающемся соединении, показанном на рисунке 4 б благодаря использованию еще одной четвертьволновой линии на внешних проводниках. Сопротивление контакта или наличие зазора в месте стыка двух четвертьволновых линий не играет роли, так как стык находится в узле тока. Необходимость в отрезках линий длиной четверть волны ограничивает применение дроссельных соединений диапазоном дециметровых и сантиметровых волн. Полоса рабочих частот таких соединений составляет  $\pm 10\%$ .



а - внутренний проводник; б - внешний проводник

Рисунок 4 – Бесконтактное коаксиальное вращающееся соединение

В коаксиальном дроссельном вращающемся соединителе как на рисунке 5 дроссельные канавки устанавливаются как во внешнем, так и во внутреннем проводниках.

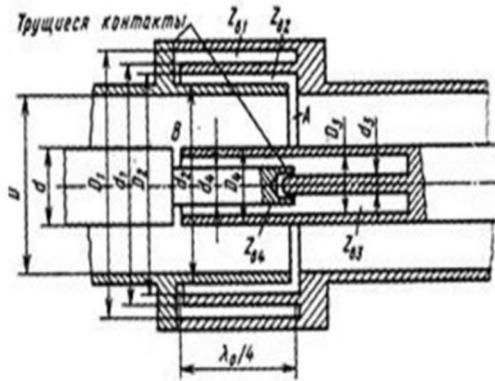
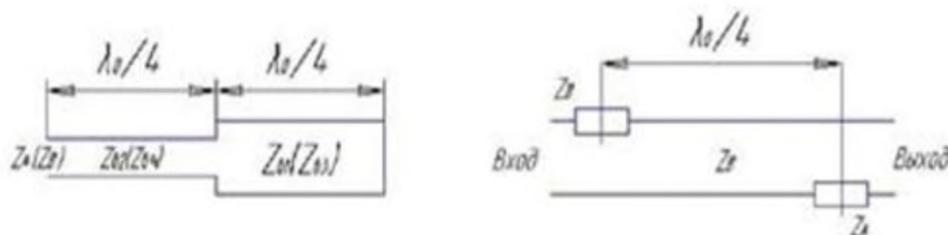


Рисунок 5 – Коаксиальное дроссельное вращающееся соединение

Аналогичные схемы замещения имеют дроссельные канавки в волноводном фланце как на рисунке 6 б. В схеме замещения показано, что волновые сопротивления проходного и короткозамкнутого отрезков неодинаковы:  $Z_{B2} < Z_{B1}$ , что повышает широкополосность вращающегося соединителя. Внутри дросселя образуется стоячая электромагнитная волна с узлом распределения тока в точке соединения четвертьволновых отрезков, т.е. в точке расположения трущихся контактов, отнесенных на расстояние  $\lambda_0/4$  от короткозамкнутых концов шлейфов. Поэтому падение напряжения на сопротивлениях контактов равно нулю, потери мощности СВЧ отсутствуют и электрические характеристики вращающегося соединителя на рабочей частоте не зависят от качества трущихся контактов. Разнос зазоров во внутреннем и внешнем проводниках на  $\lambda_0/4$  приводит к компенсации отражений и повышает широкополосность. Каждый дроссель представляет собой последовательный двухступенчатый короткозамкнутый шлейф длиной

$\lambda_0/2$ , где  $\lambda_0$  - рабочая частота волны. Схемы замещения дросселей во внешнем и внутреннем проводниках волновода одинаковы и показаны отдельно как на рисунке 6 а, б. При реализуемых значениях волновых сопротивлений канавок, КБВ соединителя превышает уровень 0,9 в полосе частот 50-70% рабочей частоты. Электрическая прочность коаксиального дроссельного вращающегося соединителя несколько снижается по сравнению с электрической прочностью тракта, так как максимальная напряженность электрического поля в средней части дроссельной канавки внутреннего проводника повышается по сравнению с напряженностью поля у поверхности центрального проводника тракта.



а)

б)

а - внешний дроссель; б - внутренний дроссель

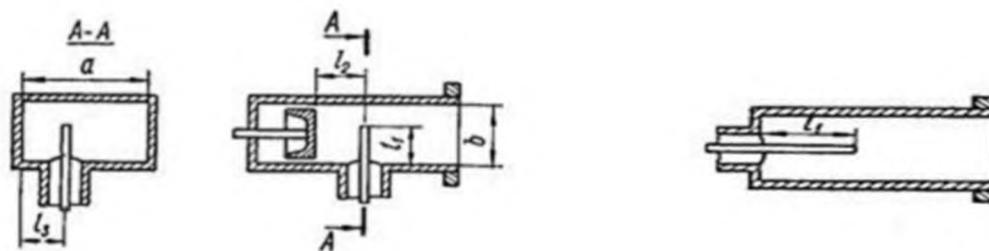
Рисунок 6 – Схемы замещения дросселей

## 1.2 Переходы между линиями передачи различных типов

Очень распространенными узлами трактов СВЧ являются переходы с одной линии передачи на другую, в которых используются различные типы волн. Эти переходы могут называться также трансформаторами типов волн или возбуждателями волны заданного типа. При проектировании переходов основное внимание уделяется достижению хорошего качества

согласования в полосе частот при обеспечении необходимой электрической прочности. В технике СВЧ применяют большое число таких устройств различных конструкций. Рассмотрим характерные конструкции переходов.

Соединение коаксиальной линии с прямоугольным волноводом как на рисунке 7 является трансформатором волны типа  $T$  в коаксиальной линии в волны типа  $H$  или  $E$  в прямоугольном волноводе и относится к числу так называемых зондовых переходов. Для возбуждения волны типа  $H$  в волновод вводится штырь (зонд), перпендикулярный продольной оси волновода как на рисунке 7 а, т.е. поперек волновода, а для возбуждения волны типа  $E$  штырь вводится с торца волновода параллельно продольной оси волновода как на рисунке 7 б. Штырь, являющийся продолжением внутреннего проводника коаксиальной линии, служит антенной, излучающей электромагнитную энергию в волновод или отбирающей ее из волновода. Для получения минимального отражения волн от перехода, необходимо коаксиальную линию и волновод согласовать, т. е. создать режим бегущих волн. Согласование осуществляется подбором длины штыря  $l_1$ , расстояния  $l_2$  от штыря до заглушки (поршня), замыкающей накоротко волновод, и расстояния  $l_3$  от штыря до ближайшей узкой стенки волновода рисунке 6 а. Для согласования перехода в диапазоне частот используется подвижный короткозамыкающий поршень, компенсирующий реактивную составляющую входного сопротивления штыря.



а – для всех типов  $H$ ; б – для всех типов  $E$

Рисунок 7 – Волноводно–коаксиальные переходы

Широкополосный коаксиально-волноводный переход с поперечным стержнем рисунок 8, имеет полосу пропускания более 30% за счет того, что поперечный стержень обеспечивает равномерность и малую зависимость от частоты распределения тока на вертикальной части зонда.

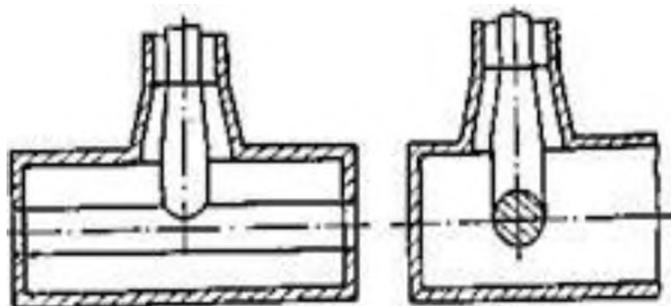
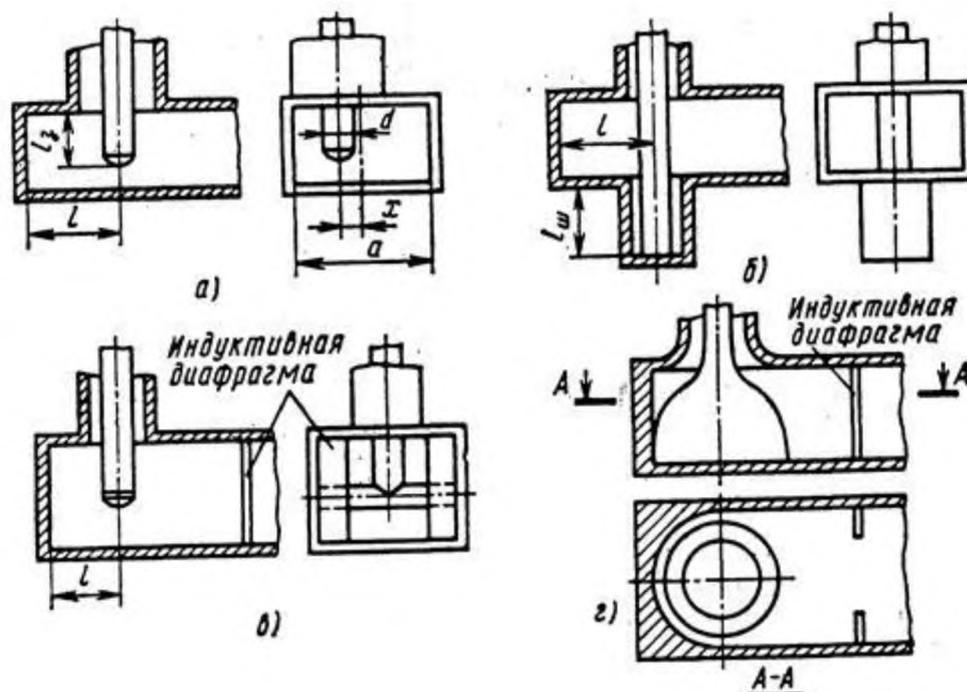


Рисунок 8 – Широкополосный коаксиально – волноводный переход

Возбуждение прямоугольного волновода с волной типа  $H_{11}$  от коаксиального волновода с Т-волной производится с помощью коаксиально-волноводных переходов как на рисунке 8. Основным элементом таких переходов являются обтекаемые электрическим током штыри, размещаемые в короткозамкнутом с одной стороны волноводе параллельно силовым линиям электрического поля  $E$ . В зондовом переходе рисунок 9 а согласование входов обеспечивается изменением длины зонда  $l_z$ , а также подбором расстояний  $l$  и  $x$ , определяющих положение зонда. Для расширения полосы частот согласования желательно увеличивать диаметр зонда  $d$ . При тщательном выполнении зондовый переход обеспечивает полосу частот согласования 15-20 % относительно расчетной частоты при КБВ не менее 0,95. Недостатком зондового перехода является снижение электропрочности из-за концентрации силовых линий электрического поля  $E$  на конце зонда. В определенной мере этот недостаток преодолевается в коаксиально-волноводном переходе с последовательным шлейфом как рисунке 9 б, однако даже при самом тщательном подборе расстояний  $l$  и  $l_{ш}$  рабочая полоса частот составляет около 7%.



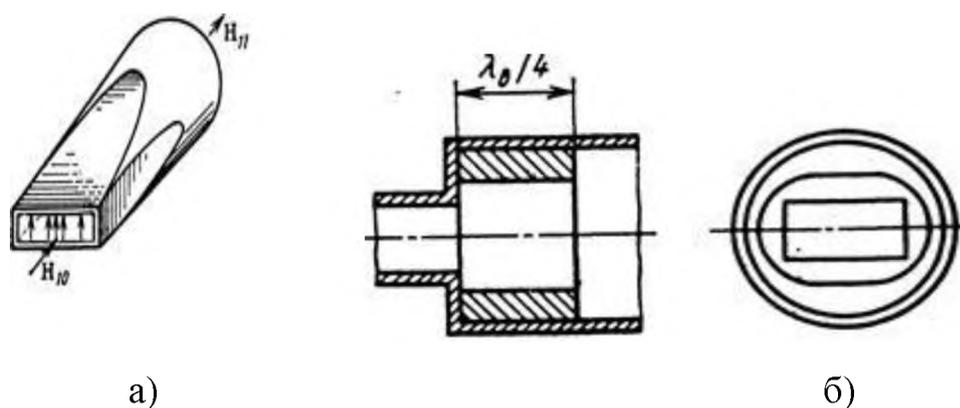
а - зондовый; б - с коаксиальным шлейфом; в - с поперечным стержнем; г - «пуговичный»

Рисунок 9 – Коаксиально–волноводные переходы

Лучшие результаты по согласованию и электропрочности имеет переход с поперечным стержнем как на рисунке 9 в, дополненный согласующей индуктивной диафрагмой. В таком переходе достижима относительная полоса частот согласования около 15%. Максимальные широкополосность (около 20% при КБВ не менее 0,95) и электропрочность достигаются в коаксиально-волноводных переходах так называемого пуговичного типа как на рисунке 9 г, требующих, однако, тщательного подбора формы проводников в сочетании с дополнительным согласованием с помощью индуктивной диафрагмы.

### 1.3 Переходы от прямоугольного волновода к круглому

Переход от прямоугольного волновода с волной  $H_{10}$  к круглому волноводу с волной  $H_{11}$  осуществляется путем постепенной деформации поперечного сечения волновода от прямоугольного к круглому как на рисунке 10 а. Если длина перехода составляет примерно длину волны в волноводе или больше ее, то его полоса пропускания равна полосе частот круглого волновода с волной типа  $H_{11}$ . Размеры волнопроводов выбираются такими, чтобы в них в заданном диапазоне частот могли распространяться только низшие типы волн, соответственно  $H_{10}$  в прямоугольном и  $H_{11}$  — в круглом волноводе. Если длина такого перехода превышает длину волны, то отражения в широкой полосе частот оказываются незначительными. Для уменьшения размеров перехода можно использовать компактные, но более узкополосные ступенчатые переходы как на рисунке 10 б. В данном случае сочленение соосных прямоугольного и круглого волнопроводов осуществляется через согласующую четвертьволновую вставку с овальной формой поперечного сечения.



а - постепенная деформация; б - ступенчатая деформация

Рисунок 10 – Переходы от прямоугольного волновода к круглому волноводу

Большинство используемых на практике трансформаторов типов волн являются обратимыми элементами, т.е. конструкция, обеспечивающая переход,  $H_{10} \leftrightarrow H_{11}$ , обеспечивает и обратный переход  $H_{11} \leftrightarrow H_{10}$ .

Возбуждение волны  $H_{11}$  в круглом волноводе может производиться от прямоугольного волновода через отверстие в боковой стенке. Если широкие стенки прямоугольного волновода ориентированы параллельно оси круглого волновода как на рисунке 11 а, то в круглом волноводе возбуждаются волны  $H_{11}$ , распространяющиеся в обе стороны от ответвления с одинаковыми фазами. При поперечном расположении возбуждающей щели в круглом волноводе как на рисунке 11 б волны  $H_{11}$ , возбуждающиеся справа и слева от нее, противофазны. Если требуется обеспечить передачу волны  $H_{11}$  в одном направлении, то один из концов круглого волновода закорачивают, причем для разветвления как на рисунке 11 а расстояние между центром щели и короткозамыкателем должно быть близким  $\lambda_B/4$ , а в случае, показанном на рисунке 11 б близким  $\lambda_B/2$ .

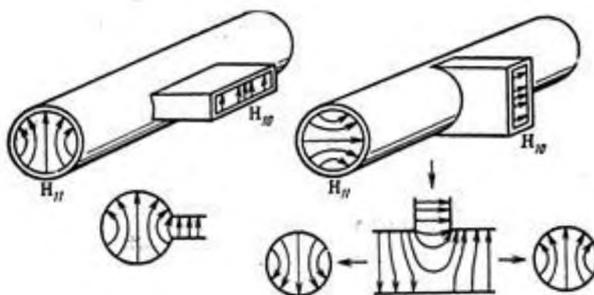


Рисунок 11 – Тройниковые разветвления прямоугольного и круглого волновода

Особенно трудной задачей является конструирование возбуждателей волны  $H_{01}$  в круглом волноводе. Здесь главное требование состоит в обеспечении высокой степени чистоты возбуждения волны  $H_{01}$  при глубоком подавлении ряда низших и высших волн, способных к распространению в круглом волноводе большого диаметра. На рисунке 12 показана одна из

возможных конструкций перехода от прямоугольного волновода с волной  $H_{10}$  к круглому волноводу с волной  $H_{01}$ , основанная на принципе плавной деформации формы поперечного сечения волновода и структуры электрического поля.

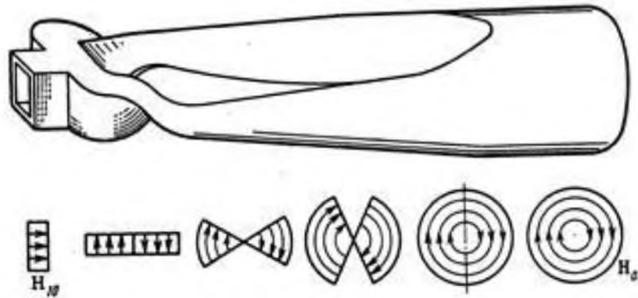


Рисунок 12 – Плавный переход для возбуждения волны  $H_{01}$  в круглом волноводе

Волноводный E-тройник и две продольные скрутки на углы  $90^\circ$  в противоположных направлениях образуют систему двух прямоугольных волноводов, соединенных узкими стенками и содержащих поля равной амплитуды с противоположными фазами. Затем эта система плавно преобразуется к двум секторным волноводам с общим ребром. По мере увеличения угла раскрыва секторных волноводов образуется круглый волновод с продольной металлической перегородкой. Обрыв этой перегородки не изменяет структуру электромагнитного поля, и на выходе перехода получается круглый волновод с волной  $H_{01}$ . Для обеспечения требуемой чистоты возбуждения волны  $H_{01}$  этот переход должен иметь длину  $l \gg \lambda_0$ .

## 2 Анализ существующих конструкций волноводных вращающихся соединений

### 2.1 Вращающиеся волноводные соединения

Вращающиеся соединения предназначены для передачи высокочастотной энергии от неподвижного передатчика к антенне, вращающейся в вертикальной или горизонтальной плоскостях. Главная задача таких соединений - обеспечение передачи постоянной мощности при вращении антенны. Для этой цели в соединениях применяются линии передачи, в которых возможно существование типов волн с осевой симметрией поля в поперечном сечении. Обычно используются коаксиальные линии с волной типа TEM и круглые волноводы с волнами типа  $E_{01}$  и  $H_{01}$ .

Диаграмма типов волн коаксиальной линии передачи имеет вид, показанный на рисунке 13. Из нее видно, что волна TEM является основной, а первая волна высшего типа  $H_{11}$  имеет критическую длину волны  $\lambda_{кр11} = \pi(a+b)$ .

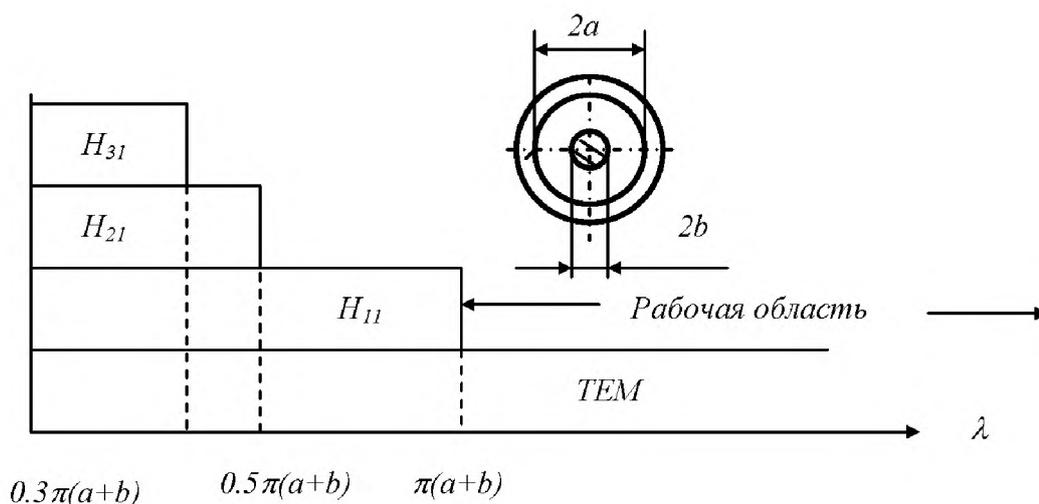


Рисунок 13 - Диаграмма типов волн для коаксиальной линии передачи

Размеры коаксиальной линии определяются ее волновым сопротивлением  $Z_E$  (для передачи максимальной мощности его следует принимать равным 50 Ом), а также границей возникновения волны  $H_{11}$   $\lambda_{крH_{11}} = n(a + b)$ .

$$b \leq \frac{\lambda}{\pi(1+\frac{a}{b})}. \quad (1)$$

Значение  $a/b$  зависит от величины выбранного волнового сопротивления, так как

$$Z_B = 60 \ln \frac{a}{b}. \quad (2)$$

Предельная мощность при этом

$$P_{пред.} \leq \frac{E_{пред.}^2 \sqrt{\epsilon} \ln \frac{a}{b}}{120\pi^2 \left(1 + \frac{a}{b}\right)^2}. \quad (3)$$

Обычно с учетом возможностей короткого замыкания линии допустимая мощность составляет примерно 0,2-0,3  $P_{пред.}$ . Коэффициент запаса электрической прочности  $K = P_{доп}/P_{пред.}$  учитывает наличие шайб и различного рода неоднородностей в линии передачи. Структура TEM волны в коаксиальной линии передачи имеет вид, показанный на рисунке 14.

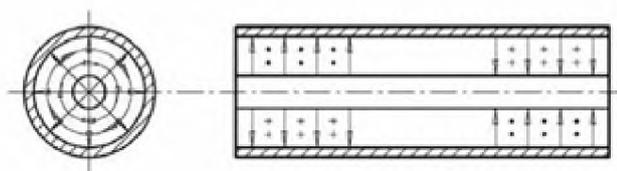


Рисунок 14 - Структура волны TEM в коаксиальной линии передачи.

Затухание волны ТЕМ в коаксиальной линии достаточно большое, что обусловлено наличием внутреннего проводника

$$\alpha \geq \frac{\sqrt{\varepsilon} \left(1 + \frac{a}{b}\right)^2}{\pi \sqrt{480} \sigma \lambda^3 \left(\frac{a}{b} \ln \frac{a}{b}\right)} \quad (4)$$

При выборе размеров коаксиальной линии передачи должны выполняться три основных требования: обеспечение необходимого рабочего диапазона, обеспечение передачи больших мощностей, обеспечение малого затухания.

Диаграмма типов волн круглого волновода показана на рисунке 15.

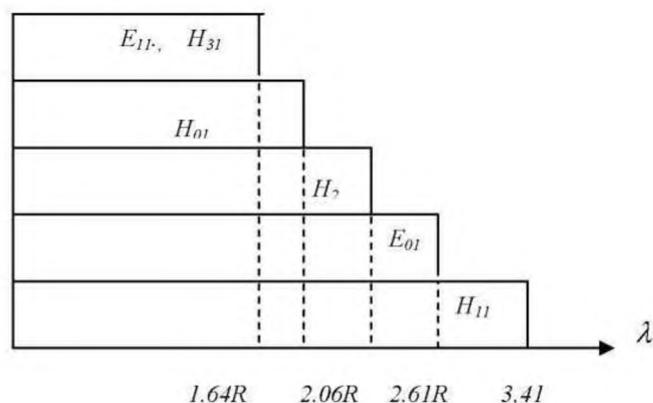


Рисунок 15 - Диаграмма типов волн для круглого волновода

Из диаграммы типов волн круглого волновода видно, что основной волной является волна Нц. Волны  $E_{01}$  и  $H_{01}$ , которые имеют осесимметричную структуру поля являются высшими и для их применения во вращающихся соединениях необходимо применение фильтров типов волны для их выделения. Предельные мощности для типов волн  $H_{11}$ ,  $E_{01}$  и  $H_{01}$

определяются следующими соотношениями для волны  $H_{11}$  в круглом волноводе.

$$P_{\text{пред.}} = \frac{\pi R^2 E_{\text{пред.}}^2}{1590} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{3,41R}\right)^2}. \quad (5)$$

Для волны  $E_{01}$  в круглом волноводе

$$P_{\text{пред.}} = \frac{\pi R^2 E_{\text{пред.}}^2}{411\lambda^2} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2,61R}\right)^2} \quad (6)$$

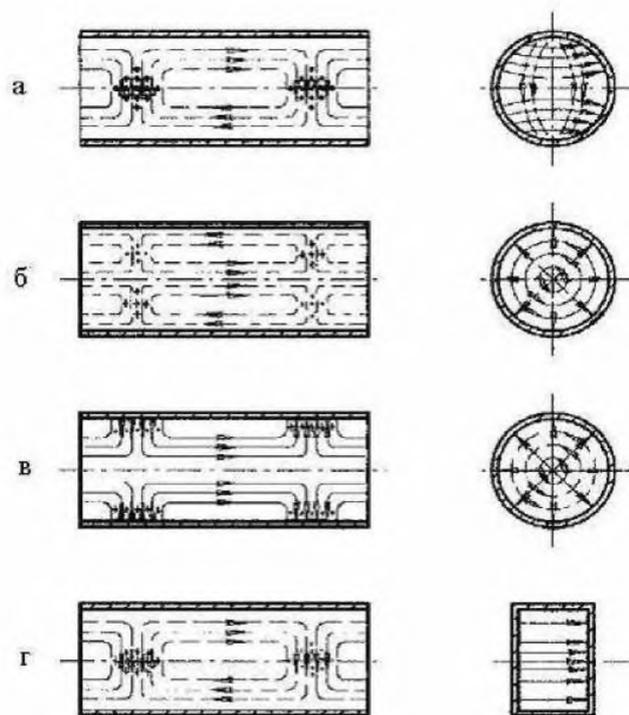
Для волны  $H_{01}$  в круглом волноводе

$$P_{\text{пред.}} = \frac{\pi R^2 E_{\text{пред.}}^2}{1570} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{1,64R}\right)^2} \quad (7)$$

Для волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе

$$P_{\text{пред.}} = \frac{a \cdot b \cdot E_{\text{пред.}}^2}{1508} \sqrt{1 - \left(\frac{\lambda}{2a}\right)^2}. \quad (8)$$

В этих выражениях:  $R$  – радиус круглого волновода,  $a$ ,  $b$  – поперечные размеры прямоугольного волновода,  $E_{\text{пред.}} = 2,9 \cdot 10^3$  В/мм – напряжение пробоя воздушного промежутка. Структура волн  $H_{11}$ ,  $E_{01}$ ,  $H_{01}$ ,  $H_{10}$  показана на рисунке 16.



а - волна  $H_{11}$  в круглом волноводе; б- волна  $H_{01}$  в круглом волноводе; в- волна  $E_{01}$  в круглом волноводе; г- волна  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе

Рисунок 16 - Структура типов волн

Основными параметрами вращающихся соединений являются: диапазон рабочих частот, величина передаваемой мощности, максимальное значение  $K_{\text{сти}}$  в диапазоне частот, скорость вращения. Характеристики: зависимость передаваемой мощности (или  $K_{\text{сти}}$  от угла поворота); зависимость  $K_{\text{сти}}$  от частоты. Конструктивные требования: прочность, антикоррозийность, надежность.

## 2.2 Коаксиальные вращающиеся соединения

Существуют два вида вращающихся коаксиальных соединений: контактные коаксиальные соединения, применяющиеся при малых скоростях

вращения и низких уровнях мощности в метровом, дециметровом и сантиметровом диапазонах волн; бесконтактные дроссельные вращающиеся соединения, применяющиеся при больших скоростях вращения на всех уровнях мощности (главным образом в сантиметровом диапазоне). Первый вид (контактные соединения) широкого применения в настоящее время не имеет.

Одними из основных элементов конструкции второго вида коаксиальных вращающихся соединений являются дроссели. В сочленении внутренних проводников подвижной и неподвижной частей соединения применяются четвертьволновые дроссельные секции. В сочленении наружных проводников применяются полуволновые дроссельные секции. Конструкция бесконтактного четвертьволнового разомкнутого дросселя показана на рисунке 17. Четвертьволновый отрезок линии является инвертором сопротивления

$$Z_{\text{вх.}} = \frac{1}{Z_{\text{н.}}} \quad (9)$$

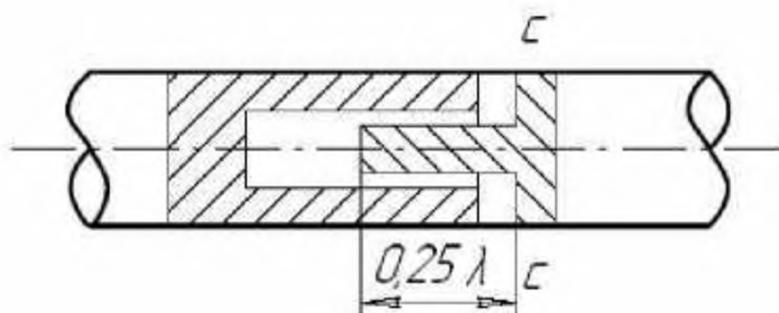


Рисунок 17 - Бесконтактный четвертьволновый разомкнутый дроссель для внутреннего проводника коаксиального вращающегося соединения

Конструкция полуволнового дросселя показана на рисунке 18.

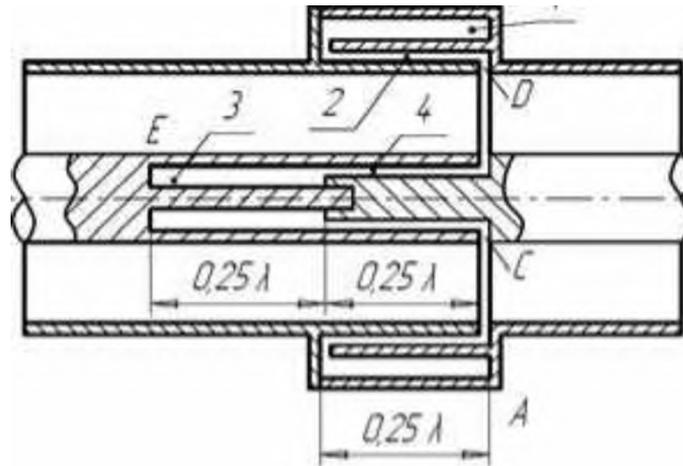
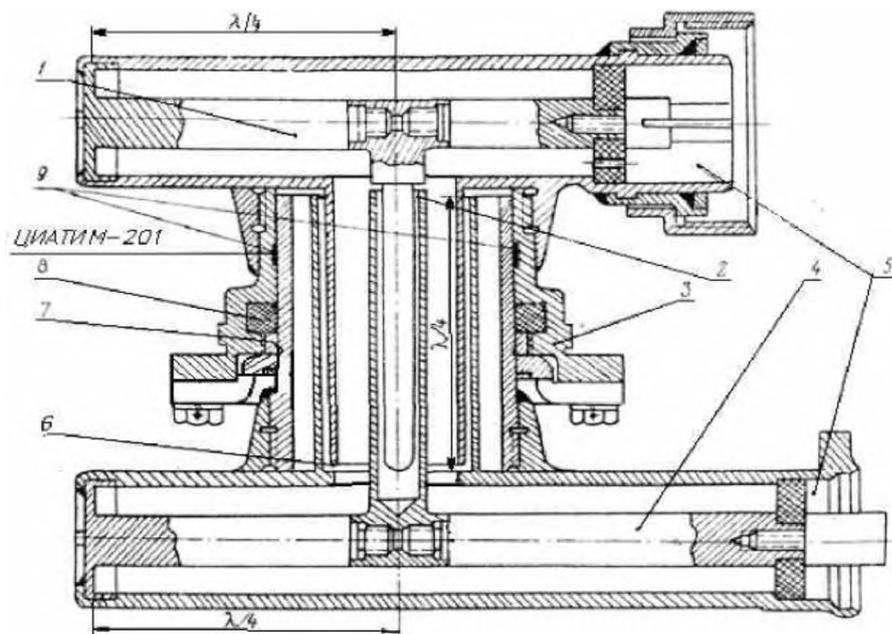


Рисунок 18 - Короткозамкнутый бесконтактный полуволновый дроссель коаксиального вращающегося соединения

Соединение имеет два полуволновых дросселя, каждый из которых состоит из двух четвертьволновых отрезков коаксиальной линии. Внешний полуволновый дроссель состоит из отрезков коаксиальных линий 1 и 2. Внутренний - из отрезков коаксиальных линий 3 и 4. Основное свойство полуволнового отрезка заключается в трансформации сопротивления нагрузки во входное сопротивление отрезка  $Z_{\text{вх}} = Z_{\text{н}}$ . Во внешнем дросселе - короткое замыкание в отрезке коаксиальной линии 1 в т. А трансформируется в короткое замыкание в т. Д в отрезке коаксиальной линии 2. Во внутреннем дросселе короткое замыкание в отрезке 3 т. Е трансформируется в короткое замыкание в т. С коаксиальной линии

На рисунке 18 показано коаксиальное вращающееся соединение для линии с волновым сопротивлением 50 Ом.



1 - четвертьволновый изолятор; 2 - дроссельная секция длиной  $\lambda/4$  на внутреннем проводнике коаксиала; 3-корпус сочленения; 4-коаксиальная линия с волновым сопротивлением 50 Ом; 5-высокочастотные разъемы; 6-дроссельная секция длиной  $\lambda/2$  на наружном проводнике коаксиала; 7-сжимающая гайка; 8-изопреновое кольцо; 9-пазы для смазки.

Рисунок 18 - Коаксиальное вращающееся соединение

В этом соединении применяется один из наиболее распространенных способов герметизации - с помощью изопренового кольца 8 (скорость вращения до 70 об/мин). Трущиеся поверхности корпуса сочленения выполняются из материалов, которые образуют хорошо скользящую пару хромированная поверхность - латунь. С помощью гайки 7, сжимая или освобождая кольцо, регулируют начальный натяг изопренового кольца на вращающийся цилиндр. Такая герметизация эффективна при температурах до  $-50^{\circ}\text{C}$ . На наружном проводнике коаксиальной линии использована полуволновая дроссельная секция, состоящая из двух четвертьволновых участков с разным волновым сопротивлением. Дроссельная секция на внутреннем проводнике представляет собой разомкнутый четвертьволновый

отрезок коаксиальной линии. Для уменьшения трения при вращении в резы 9 корпуса 3 между трущимися частями набивается смазка ЦИАТИМ-201. Для согласования входной и выходной коаксиальных линий применяются четвертьволновые короткозамкнутые отрезки линий (шлейфы), которые трансформируют  $Z_H=0$  в  $Z_{EX}=\text{да}$ .

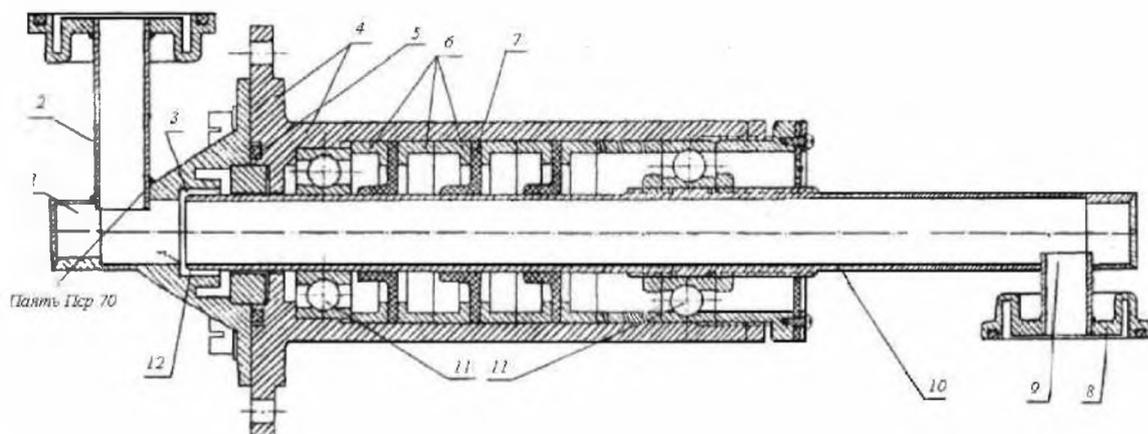
### **2.3 Волноводные вращающиеся соединения со шлейфами и кольцами**

В волноводных вращающихся соединениях применяются круглые волноводы с несимметричными по структуре поля типами волн  $E_{01}$  и  $H_{01}$ . Наиболее часто применяется волна  $E_{01}$ . Из диаграммы типов волн для круглого волновода видно, что волна  $E_{01}$  является более низшей по сравнению с волной  $H_{01}$ . Поэтому при применении волны  $E_{01}$  требуется только устранение одного типа волны  $H_{11}$ . В сантиметровом диапазоне обычно применяются прямоугольные волноводы с основной волной  $H_{10}$ , в связи с этим возникает необходимость в состав вращающихся соединений включать элементы перехода от прямоугольного волновода к круглому.

Вращающиеся соединения с волной  $H_{01}$  имеют ряд особенностей. Волна  $H_{01}$  при распространении по волноводу имеет наименьшее из других практически используемых типов волн затухание. Кроме того, волна  $H_{01}$  не создает на стенках волновода продольных составляющих поверхностных токов. Это позволяет применять круглый волновод соединения подвижной и неподвижной частей, не применяя дроссельной секции. Такое соединение может работать в широком диапазоне частот ( $Af=45-50\%$ ). Но из-за сложности подавления одновременно возбуждающихся с волной  $H_{01}$  волн типа  $H_{11}$ ,  $E_{01}$ ,  $H_{21}$ ,  $E_{11}$ , такой тип соединения не получил широкого практического применения.

Существуют два вида волноводных вращающихся соединений, работающих с применением волны  $E_{01}$  в круглом волноводе:

соединения с короткозамкнутыми шлейфами, соединения с резонансными кольцами.



1 - гасящий объём; 2-прямоугольный волновод; 3-полуволновая дроссельная секция; 4-корпус соединения; 5-войлочно-масляная пробка; 6-металлические кольца для крепления и регулировки зазора; 7-изопреновые уплотнения; 8- фланец прямоугольного волновода; 9-прямоугольный волновод; 10, 12-круглый волновод; 11-шарикоподшипник

Рисунок 19 - Волноводное вращающее соединение с гасящими объёмами

Короткозамыкающий шлейф представляет собой круглый волновод, включенный последовательно с возбуждающим прямоугольным волноводом и основным круглым волноводом. Эквивалентная сила такого соединения показана на рисунке 20.

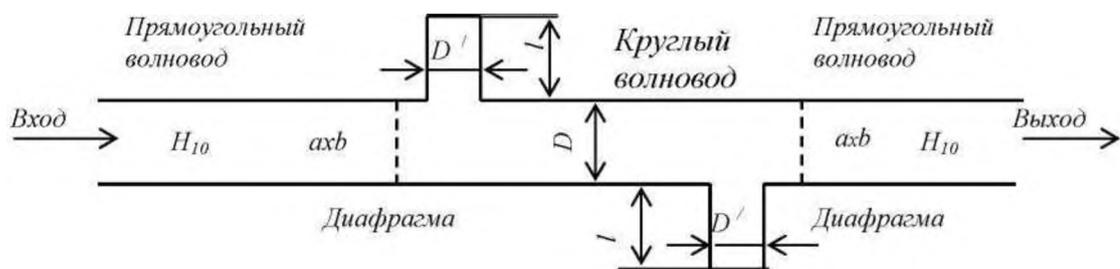


Рисунок 20 - Эквивалентная электрическая схема волноводного вращающегося соединения с гасящими объемами

Длина шлейфа выбирается из двух условий. Первое условие - обеспечение возможно меньшего входного сопротивления шлейфа для волны  $E_{01}$  для того, чтобы она без затухания распространялась в круглом волноводе. Условие выполняется при длине шлейфа, равной целому числу полуволн типа  $E_{01}$ .

$$1 = n \frac{\lambda E_{01}}{2}. \quad (10)$$

Второе условие – обеспечение возможно большего входного сопротивления для волны  $H_{11}$  для того, чтобы она имела наибольшее затухание (гасилась в объеме шлейфа) и не распространялась по круглому волноводу диаметра  $D$ . Следовательно, необходимо выбрать длину шлейфа, равную нечетному числу четвертей длины волны.

$$1 = (2m + 1) \frac{\lambda H_{11}}{4}. \quad (11)$$

Обычно для увеличения диапазонности соединения принимают  $n=1$   $m=1$ . При этом условии диаметр  $D$  шлейфа определяется из соотношения.

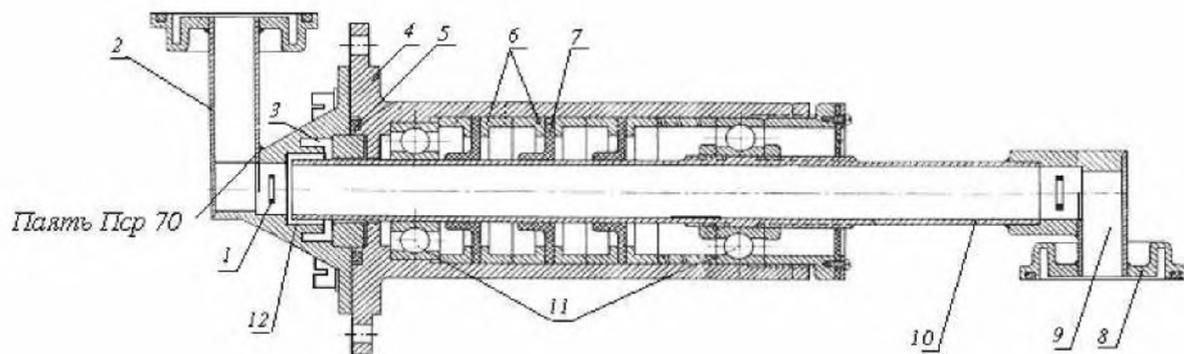
$$\frac{1}{2} \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{\lambda}{1,350D}}} = \frac{3}{4} \frac{\lambda}{\sqrt{1 - \frac{\lambda}{1,71D}}}. \quad (12)$$

где  $\lambda_{крН11} = 1,71D$ ;  
 $\lambda_{крЕ11} = 1,350D$ .

Для передачи согласования волновых сопротивлений прямоугольного и круглого волноводов применяются емкостные диафрагмы, емкостные винты на дне круглого волновода и четвертьволновые трансформаторы в продольном волноводе. Длина вращающегося соединения  $L$  зависит от необходимости избежать резонансов волн  $E_{01}$  и  $H_{11}$ . Резонанс на волне  $E_{01}$  улучшает условие передачи энергии, но полоса пропускания соединения уменьшается. Резонанс на волне  $H_{11}$  приводит к увеличению этого типа колебаний и возникает при вращении паразитная модуляция передаваемого сигнала. Для избежания паразитного резонанса на волне  $H_{11}$  требуется выбирать длину.

$$1 = (2n + 1) \frac{\lambda_{H_{11}}}{4}. \quad (13)$$

Полоса пропускания вращающихся соединений со шлейфами не превышает 1-2% при  $K_{сти}=1,18$ . На рисунке 10 показана конструкция вращающегося соединения с резонансными кольцами. Этот вид соединений имеет по сравнению с предыдущим более компактную конструкцию и более широкую полосу пропускания.



1 - резонансное кольцо; 2 - прямоугольный волновод; 3 - полуволновая дроссельная секция; 4 - корпус соединения; 5 - войлочно-масляная пробка; 6 - металлические кольца для крепления и регулировки зазора; 7 - изопреновые уплотнения; 8 – фланец прямоугольного волновода; 9 - прямоугольный волновод; 10 - круглый волновод; 11- шарикоподшипник; 12 - фланец.

Рисунок 21 - Конструкция волноводного вращающегося соединения с резонансными кольцами

Принцип работы такого устройства заключается в следующем. Для волны  $E_{01}$  металлическое кольцо представляет эквипотенциальную поверхность, поскольку оно соединяет точки равного потенциала, как показано на рисунке 22.

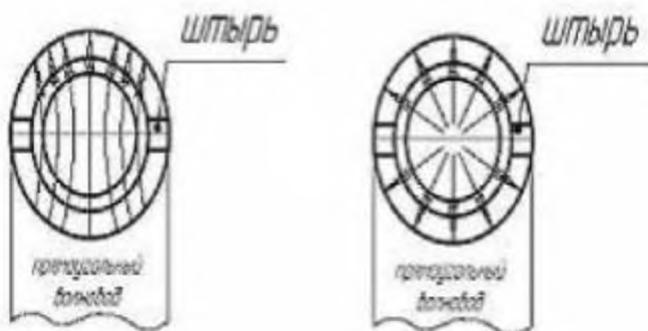


Рисунок 22 - Резонансные кольца в круглом волноводе с волнами типа  $H_{11}$  и  $E_{01}$ .

Для волны  $H_{11}$  металлическое кольцо замыкает точки с разными потенциалами, поэтому в нем протекают токи, имеющие наибольшую величину при длине кольца, равной длине волны в воздухе. Эти токи возбуждают в волноводе волну  $H_{11}$  с фазой поля, сдвинутой на  $180^\circ$  по отношению к фазе возбуждающего поля. Поэтому в круглом волноводе такого соединения за кольцом поля волны  $H_{11}$  взаимно уничтожаются, что обеспечивает высокую степень ее фильтрации. Кольца крепятся с помощью металлических штырей, которые в зависимости от взаимного положения входного и выходного прямоугольных волноводов по-разному влияют на работу соединения. Если угол между прямоугольными волноводами равен  $0^\circ$  и  $180^\circ$ , то крепежные металлические штыри будут перпендикулярны диаметральному вектору напряженности электрического поля волны  $H_{11}$ , как показано на рисунке 11, и резонансное кольцо хорошо отсекает эту волну. В этом случае возникший резонанс волны  $H_{11}$  определяется расстоянием  $L$  между фильтрующими кольцами. Для устранения резонанса расстояние  $L$  необходимо взять кратным нечетному числу четвертей длины волны  $H_{11}$ .

$$L = (2n + 1) \frac{\gamma_{H_{11}}}{4}. \quad (14)$$

Обычно  $n=1,2$ , так как при больших значениях  $n$  запасается значительная энергия волны  $H_{11}$  между кольцами.

Если угол между входными и выходными прямоугольными волноводами равен  $90^\circ$  или  $180^\circ$ , то крепежные штыри будут параллельны диаметральному вектору напряженности электрического поля волны  $H_{11}$ , как показано на рис. 11, и кольцо окажется расстроенным. При этом большая часть энергии волны  $H_{11}$  пройдет до конца круглого волновода и отразится. В этом случае резонанс на волне  $H_{11}$  определяется расстоянием  $L+L'$ . Для исключения этого резонанса длина  $L+L'$  должна быть кратной нечетному

числу четвертей длин волн  $H_{11}$  в круглом волноводе. А так как  $L$  выбрано из условия (14), то расстояние  $L'$  определяется как

$$L = n \frac{\lambda_{H_{11}}}{2}. \quad (15)$$

где  $n=1,2$ .

Вращающиеся соединения с фильтрующими кольцами имеют полосу пропускания 7-8% при  $K_{\text{сти}}=1,1-1,2$ .

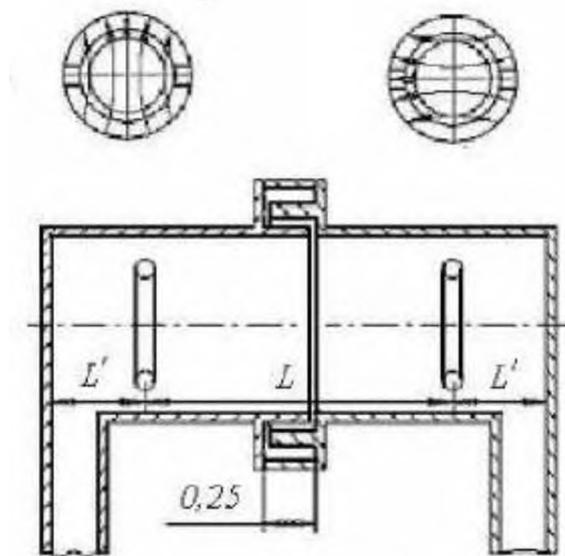
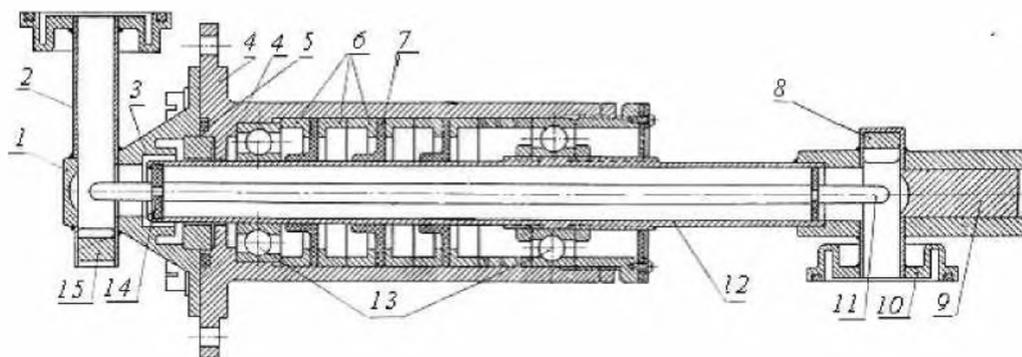


Рисунок 23 - Вращающиеся соединения с фильтрующими кольцами

## 2.4 Коаксиально-волноводные вращающиеся соединения

Коаксиально-волновое вращающееся соединение состоит из входных прямоугольных волноводов, работающих на основном типе волны  $H_{10}$ , и коаксиального вращающегося соединения. Для перехода от прямоугольного волновода с волной  $H_{10}$  к коаксиальной линии с волной ТЕМ используются различные конструкции коаксиально-волновых переходов. Конструкция одного из коаксиально-волноводных вращающихся соединений приведена на

рисунке 24. Основным элементом соединения является коаксиально-волновой переход.



1,8,9,15-настраиваемые короткозамкнутые заглушки; 2-прямоугольный вращающийся волновод; 3-полуволновая дроссельная секция; 4- корпус соединения; 5 – войлочно-масляная пробка; 6-металлическое кольцо для крепления и регулировки зазора; 7 -изопреновое уплотнение; 10-фланец прямоугольного волновода; 11-зонд; 12 - неподвижная коаксиальная линия; 13-шарикоподшипник; 14 – опорная полистироловая шайба.

Рисунок 24 - Коаксиально - волноводное вращающееся соединение

Переход служит для преобразования волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе в волну ТЕМ в коаксиальной линии передачи. Наиболее простой коаксиально-волноводный переход показан на рисунке 25.

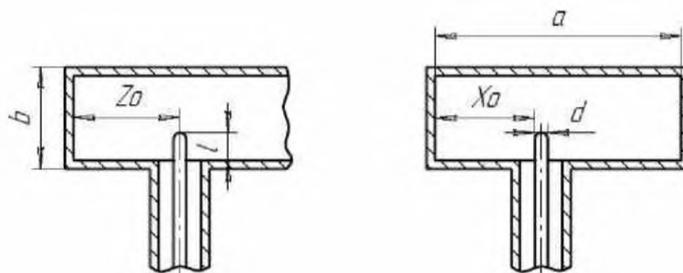
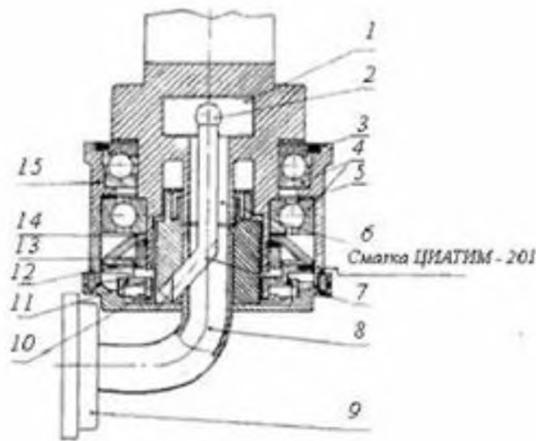


Рисунок 25 - Зондовый переход от коаксиальной линии к прямоугольному волноводу

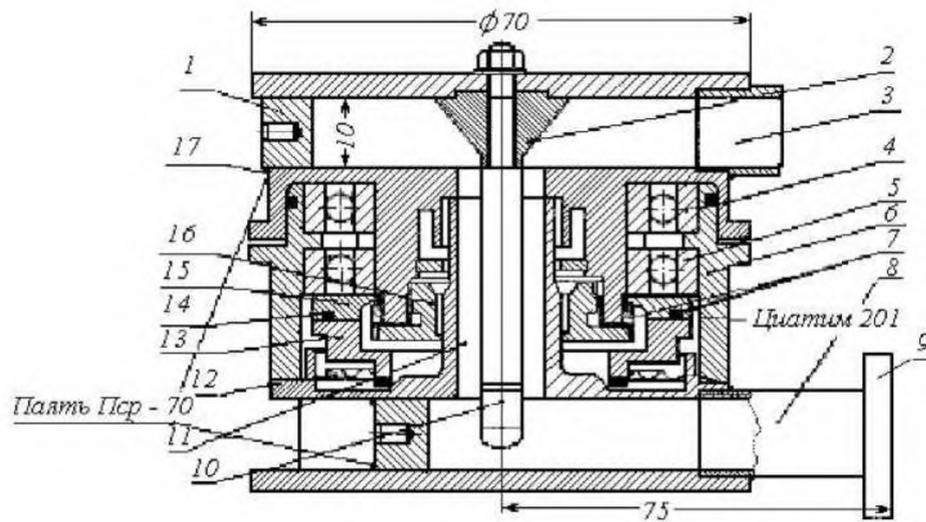
Центральный проводник коаксиальной линии входит в волновод и служит антенной. Для выполнения условий возбуждения волны  $H_{10}$  в прямоугольном волноводе на расстоянии  $Z_0$  от входа устанавливается короткозамкнутая стенка или короткозамкнутый поршень и подбирается с помощью поршня расстояние  $X_0$  от зонда до боковой стенки волновода. С помощью подбора длины зонда  $l$ ,  $Z_0$  и  $X_0$  на одной частоте можно точно выполнить условия равенства активной составляющей входного сопротивления зонда волновому сопротивлению коаксиальной линии и равенства нулю реактивной части входного сопротивления зонда. Такой коаксиально-волновой переход имеет небольшую полосу пропускания. Применяя шариковые и каплевидные излучатели, а также излучатели больших диаметров можно полосу пропускания расширить до 30 - 35% при  $K_{стп}$  не выше 1,4 (величина отраженной мощности не более 3%). На рисунке 26 показано вращающееся коаксиально-волновое соединение с шариковым излучателем и петлевым переходом.



1 - неподвижный прямоугольный волновод; 2 - зондовый переход; 3 - войлочно-масляная пробка; 4 - шарикоподшипники; 5 - полуволновая дроссельная секция на наружном проводнике коаксиала; 6 - неподвижная коаксиальная линия; 7 - петлевой переход от коаксиального к прямоугольному волноводу; 8 - подвижный изогнутый прямоугольный волновод; 9 - фланец волновода; 10 - мембрана; 11 - подвижная притертая поверхность; 12 - пазы для смазки; 13 - гайка для крепления; 14 - неподвижная притёртая поверхность; 15 - корпус соединения

Рисунок 26 - Коаксиально-волноводное вращающееся соединение с зондолоопевым переходом

На рисунке 27 показано коаксиально-волноводное соединение с пуговично-зондовым переходом, такие переходы применяются при передаче большой мощности. Передаваемая мощность такого перехода ограничивается мощностью, передаваемой коаксиальной линией. Недостаток перехода большая зависимость  $K_{Сми}$  перехода от геометрии «пуговицы», которая должна быть изготовлена и установлена в волноводе с большой точностью.



1-заглушка для настройки перехода; 2- пуговичный переход; 3 - подвижный прямоугольный волновод; 4- войлочно-масляная пробка; 5-шарикоподшипники; 6- корпус; 7-пружина для крепления подвижной притертой поверхности; 8-неподвижный прямоугольный волновод; 9-фланец; 10-зонд; 11- неподвижная коаксиальная линия; 12-мембрана; 13-неподвижная притертая поверхность; 14-пазы для смазки; 15-подвижная притертая поверхность; 16-гайка для крепления; 17-полуволновая

Рисунок 27 - Коаксиально-волноводное вращающееся соединение с пуговично-зондовым переходом

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Прогресс современной радиотехники сопровождается быстрым развитием теории и техники устройств СВЧ. В большинстве случаев эти устройства представляют собой конструктивное сочетание проводников, диэлектриков и ферритов и относятся к классу линейных радиотехнических устройств. Все они в совокупности образуют фидерный тракт радиотехнической системы, который занимает место между антенной и радиопередающим и радиоприёмным устройствами.

Была разработана новая конструкция волноводного вращающегося соединения Ka-диапазона с минимальными потерями электрического контакта между подвижной и неподвижной частями волноводов. Изучены принципы работы вращающихся волноводных соединений, проведены анализы существующих конструкций волноводных вращающихся соединений, проведено электродинамическое проектирование, создана электронная модель вращающегося волноводного соединения.

Новая конструкция позволяет минимизировать потери электрического контакта между неподвижной и подвижной частями волновода в составе волноводного вращающегося соединения.

## СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

КПД – коэффициент полезного действия;

КБВ – коэффициент бегущей волны;

ЛП – линия передач;

СВЧ – сверхвысокочастотное излучение.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Пименов, Ю.В. Техническая электродинамика / Ю.В. Пименов, В.И. Вольман, А.Д. Муравцов; под ред. Ю.В. Пименова: Учеб. Пособие для вузов. – Москва: Радио и связь, 2000. - 536 с. ISBN 5-256-01287-8.

2 Фуско, В. СВЧ-цепи. Анализ и автоматизированное проектирование: пер. с англ. / В. Фуско. - Москва: Радио и связь, 1990. - 288 с. - ISBN 5-256-00663-0.

3 Нефедов, Е. И. Техническая электродинамика: учебное пособие для вузов / Е. И. Нефедов. – Москва : Академия, 2008. – 416 с.

4 Максимов, В. М. Устройства СВЧ: основы теории и элементы тракта : учебное пособие для вузов / В. М. Максимов. – Москва : САЙНСПРЕСС, 2002. – 72 с.

5 Малков, Н.А. Устройства сверхвысоких частот: учеб. пособие / Н.А. Малков, А.П. Пудовкин. - Тамбов: Изд-во Тамб. гос. техн. ун-та, 2008. - 92 с. - ISBN 978-5-8265-0735-3.

6 Колесников, В. Г. Электроника: Энциклопедический словарь / Гл. ред. В.Г. Колесников. - Москва: Сов. Энциклопедия, 1991. - 668 с. - ISBN 5-85270-062-2

7 Панасюк, Ю. Н. Микроволновая техника : учебное методическое пособие для проведения практических занятий / Ю. Н. Панасюк, А. П. Пудовкин. – Тамбов : Издательство Першина Р. В., 2012. – 32 с.

8 Бова, Н.Т. Антенны и устройства СВЧ / Н. Т. Бова, Г. Б. Резников - Киев : Высшая школа, 1982 - 278 с.

9 Сазонов, Д.М. Антенны и устройства СВЧ. – Москва : Высшая школа, 1988 - 432с.

10 Сазонов, Д.М. Устройства СВЧ : учебное пособие для вузов / Д. М. Сазонов, А. Н. Гридин, Б.А. Мишустин. - Москва: Высшая школа, 1981 - 296 с.

11 Курушин, А.А. Проектирование СВЧ устройств в среде CST MicrowaveStudio / А.А. Курушин, А.Н. Пластиков. – Москва : Издательство МЭИ, 2010.

12 Григорьев, А. Д. Электродинамика и микроволновая техника: учебник для вузов / А. Д. Григорьев. – 2-е изд., доп. – Санкт-Петербург. : Лань, 2007. – 704 с. ISBN 978-5-8114-0706-4.

13 Джурицкий, К. Б. Миниатюрные коаксиальные радиокомпоненты для микроэлектроники СВЧ. Соединители, коаксиально-микрополосковые переходы, адаптеры, СВЧ-вводы, низкочастотные вводы, изоляционные стойки, фильтры помех / К. Б. Джурицкий. – 2-е изд., испр. и доп. – Москва : Техносфера, 2006. – 216 с. ISBN 5-94836-095-4.

14 Жеребцов, И.П. Введение в радиотехнику дециметровых и сантиметровых волн : учебное пособие / И. П. Жеребцов. - Москва-Ленинград :Госэнергоиздат, 1953. - 200 с.

15 Тестоедов, Н.А. Технология производства космических аппаратов: учебное пособие / Н.А. Тестоедов; Сибирский государственный аэрокосмический университет - Красноярск: СибГАУ, 2009. – 352 с. - ISBN 978-5-86433-404-1.

16 Патент № 2719628 Российская Федерация, МПК H01P1/067 (2006.01), H01P1/067(2019.08). Вращающееся волноводное соединение: № : 2019117940, заявл. 10.06.2019, опубл. 21.04.2020, / Белов О.А., Данилов И.Ю., Ниткин А.Н., Романов А.Г., заявитель акционерное общество "Информационные спутниковые системы" имени академика М.Ф. Решетнёва" (RU)". - 10 с.

17 Филонов, А.А. Устройства СВЧ и антенны: учебник / А.А. Филонов, А.Н. Фомин, Д.Д. Дмитриев. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2014 – 492 с. – ISBN 978-5-7638-3099-6.

18 Голубева, Н.С. Основы радиоэлектроники сверхвысоких частот: учебное пособие / Н.С. Голубева, В.Н. Митрохин. – Москва: Издательство МГТУ имени Н.Э. Баумана, 2008 – 488 с. ISBN 5-7038-2740-1.

19 Ходосов, В.В. Основы создания деталей в САПР CATIAV5: учебное пособие / В.В. Ходосов. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет, 2019 – 66 с. ISBN 978-5-907054-79-0.

20 Басов, К.А. CATIAV5 Геометрическое моделирование: иллюстрированное издание / К.А. Басов. – Санкт-Петербург: Питер, 2008 – 269 с. ISBN 978-5-388-00019-4.

21 Алдонин, Г.М. Основы конструирования и технологии производства радиоэлектронных средств: учебное пособие / Г.М. Алдонин, А.К. Дашкова, Ф.В. Зандер [и др.]. - Красноярск: Сибирский федеральный университет, 2019 – 372 с. ISBN 978-5-7638-4106-0.

22 Князев, А.Д. Конструирование радиоэлектронной и электронно-вычислительной аппаратуры с учётом электромагнитной совместимости / А.Д. Князев, Л.Н. Кечнев, Б.В. Петров. – Москва: Радио и связь, 1989 – 222 с. ISBN 5-256-00361-5.

23 Смирнов, В.В. Устройства СВЧ и антенны: учебное пособие / В.В. Смирнов, В.П. Смолин. – Санкт-Петербург: Балтийский государственный технический университет, 2012 – 188 с. ISBN 978-5-85546-719-2.

Министерство науки и высшего образования РФ  
Федеральное государственное автономное  
образовательное учреждение высшего образования  
**«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

Политехнический институт

институт

Межинститутская базовая кафедра

«Прикладная физика и космические технологии»

кафедра

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой

 В.Е. Косенко

подпись инициалы, фамилия

«30» 06 2023 г.

**МАГИСТЕРСКАЯ ДИССЕРТАЦИЯ**

«Разработка новой конструкции волноводного вращающегося соединения  
Ka-диапазона при производстве спутников-ретрансляторов»

тема

15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение  
машиностроительных производств»

код и наименование направления

15.04.05.02 «Технологии производства космических аппаратов»

код и наименование магистерской программы

Научный  
руководитель

  
подпись, дата

профессор МБК ПФ и  
КТ доктор техн. наук  
должность, ученая  
степень

Г.В. Двирный  
инициалы, фамилия

Выпускник

  
подпись, дата

И.Н. Марейкин  
инициалы, фамилия

Рецензент

  
подпись, дата

Начальник сектора  
отдела 115 АО  
«РЕШЕТНЁВ»  
должность, ученая  
степень

Д.О. Роганов  
инициалы, фамилия

Нормоконтролер

  
подпись, дата

профессор МКБ ПФиКТ  
д-р техн.наук, доцент  
должность, ученая  
степень

В.Е. Чеботарев  
инициалы, фамилия

Красноярск 2023

