

МИНОБРНАУКИ РОССИИ
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
**«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ
Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»**

Кафедра общей физики

**Проектирование лампы бегущей волны
для систем локации X-диапазона**

АВТОРЕФЕРАТ МАГИСТЕРСКОЙ РАБОТЫ

студента 2 курса 2223 группы Института физики
направления 03.04.02 «Физика»

Шаталова Евгения Дмитриевича

Научный руководитель,
зав. кафедрой общей
физики, д.ф.-м.н.,
профессор

_____ А.А. Игнатьев
подпись, дата

Саратов 2021

Введение

В выходных каскадах бортовых радиолокационных станций современной авиации используют электровакуумные сверхвысокочастотные (СВЧ) приборы типа ЛБВ с замедляющей системой (ЗС) цепочка связанных резонаторов (ЦСР) [1]. Эти приборы позволяют получать выходную СВЧ мощность порядка единиц, сотен киловатт в требуемых диапазонах частот, так как обладают высокой теплорассеивающей способностью. Наиболее востребованным является X-диапазон. По сравнению с клистродами эти ЛБВ широкополосные - их мгновенная полоса частот может достигать 10%. Для решения вопросов локации и сопровождения используют двухрежимные ЛБВ, которые работают в импульсном и квазиимпульсном (практически непрерывном) режиме работы [2]. При этом импульсная выходная мощность иногда на порядок превышает квазинепрерывную, однако средняя квазинепрерывная превышает среднюю импульсную.

В последнее время широкое распространение получило цепочечное построение усилителя из двух ЛБВ [3,4]. Первая обеспечивает квазинепрерывный режим с большим усилением, а вторая работает в импульсном с усилением около 15 дБ. В качестве выходного прибора обычно используют так называемые «прозрачные» ЛБВ с ЗС ЦСР без поглощающей вставки. Обычно они состоят из нескольких резонаторов соединенных «фасолевыми» щелями связи.

Принцип работы ЛБВ заключается во взаимодействии электронного потока, распространяющегося внутри ЗС, с электромагнитной волной, усилении входного ВЧ сигнала и последующего оседания провзаимодействующего электронного потока в коллекторе.

Целью данной работы является проектирование выходного прибора усилительной цепочки и сравнение расчётных и экспериментальных результатов.

Проектирование включало в себя решение следующих задач:

- расчёт электродинамических характеристик ЗС ЦСР с использованием программного кода HFSS;
- расчёт пространства взаимодействия электронного потока с электромагнитной волной и получение выходных характеристик;
- расчёт и оптимизация конфигурации коллектора с целью получения оптимального распределения удельной мощности токооседания и устранения его проплавления;
- сопоставление результатов расчёта и эксперимента.

Глава 1 Расчёт электродинамических характеристик замедляющей системы цепочка связанных резонаторов (ЦСР)

В первой главе представлены соотношения позволяющие с помощью расчётов по программе HFSS определить основные электродинамические параметры ЗС ЦСР – замедление, сопротивление связи. Проведены расчёты характеристик ЗС ЦСР в X-диапазоне, определены основные размеры резонатора для получения необходимого замедления при заданном напряжении.

Рассмотрим расчёт дисперсионных характеристик замедляющей системы типа цепочка связанных резонаторов. ЗС типа ЦСР представляет собой последовательность резонаторов, имеющих один или несколько общих пролётных каналов и связанных между собой посредством отверстий в смежных стенках, называемых щелями связи. Пример такой ЗС представлен на рис.1.

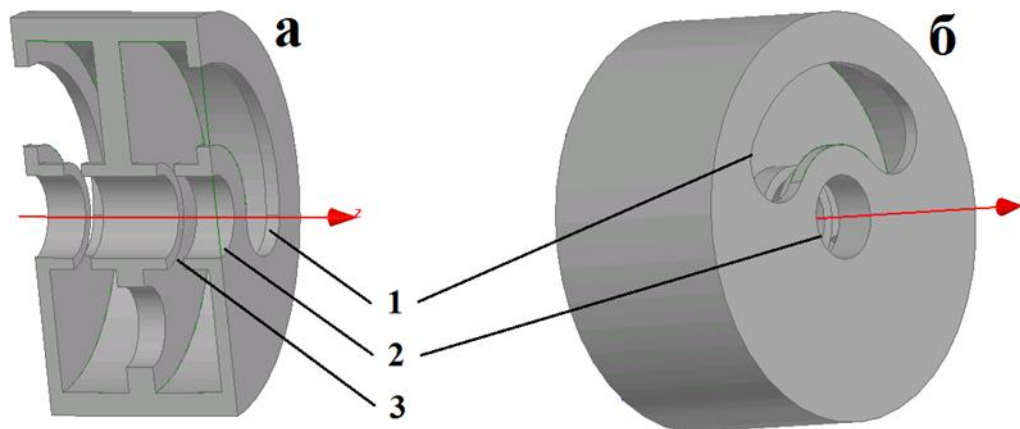


Рис.1. ЗС типа ЦСР: а – продольный разрез, б – общий вид

Видно, что ЗС представляет собой последовательность цилиндрических резонаторов, связанных фасолевидной щелью связи «1» и с общим пролётным каналом «2». Для повышения эффективности взаимодействия электронного потока с полем ЗС имеется емкостной зазор «3», концентрирующий электрическое поле.

На рис. 2 представлена ячейка ЗС ЦСР и показаны основные её размеры. Данная ЦСР обеспечивает необходимое замедление в X диапазоне и ускоряющем напряжении 12,7 кв. Проведенный расчёт электродинамических характеристик данной ЗС в соответствии с описанной методикой по программе HFSS позволил получить зависимость замедления (рис. 3) и сопротивления связи (рис. 4) в необходимом диапазоне частот.

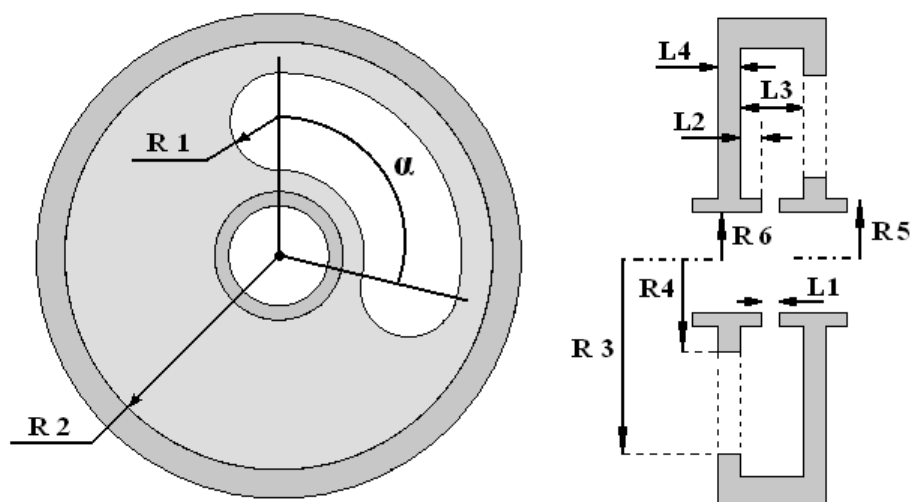


Рис. 2 Ячейка 3С ЦСР

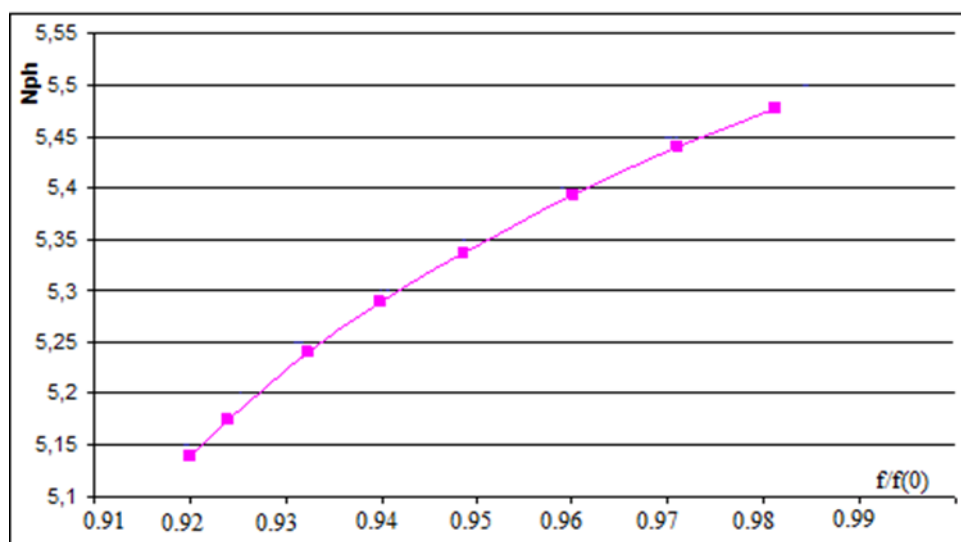


Рис. 3 Зависимость замедления в рабочей полосе частот

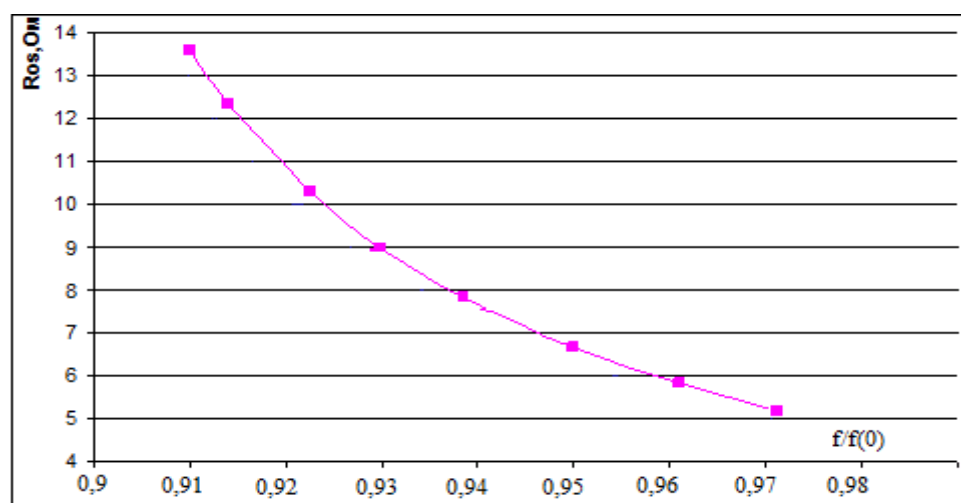


Рис.4 Зависимость сопротивления связи в рабочей полосе частот

Глава 2 Расчёт выходных характеристик ЛБВ с ЗС ЦСР

Во второй главе описаны основные результаты расчёта выходной мощности односекционной ЛБВ без поглощающей вставки в X-диапазоне с усилением 15 дБ. Представлены амплитудная и амплитудно-частотные характеристики ЛБВ для двух заполнений электронным потоком пролётного канала ЗС.

Проверенные расчёты показывают, что для работы в X – диапазоне и получения усиления около 15 дБ необходимо использовать 15 идентичных тороидальных резонаторов с внутренним диаметром тубуса равным 3,5 мм и внешним диаметром резонатора 7,5 мм.

Для получения выходной мощности не менее 1.1 ед. и усилении около 15 дБ необходима входная ВЧ мощность равная 400 Вт, ускоряющее напряжения – 12700 кВ, а ток электронной пушки = 2А. Исходные числовые данные, использовавшиеся в расчёте, соответствовали параметрам необходимой ЛБВ.

В работе подбирались необходимые размеры резонаторов для получения необходимого диапазона частот, их число для получения усиления и подводимая постоянная мощность электронного пучка, чтобы получить требуемую выходную мощность.

На рисунке 5 представлены зависимости рассчитанных значений выходной мощности в рабочем диапазоне частот. Отметим, что рассматриваемая ЛБВ работает в импульсном режиме, который осуществляется модуляцией напряжения на сеточном электроде, расположенном вблизи катода.

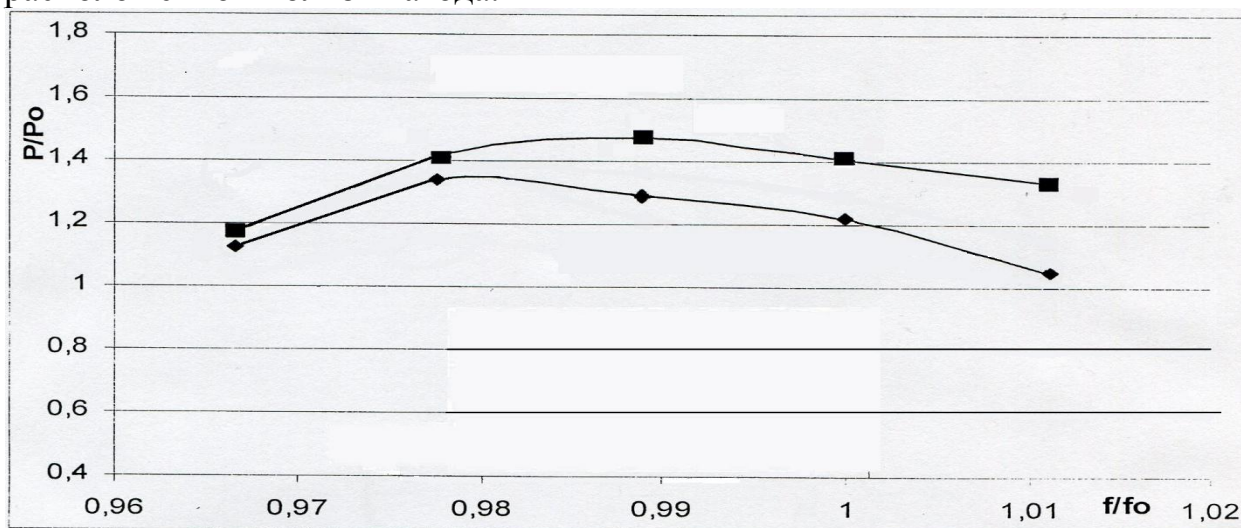


Рис. 5 Амплитудно-частотная характеристика ЛБВ.

Вследствие этого электронный пучок имеет большие поперечные составляющие полной скорости и большие пульсации в пролётном канале.

Глава 3 Траекторный анализ электронного пучка в коллекторе

В третьей главе описаны модель, алгоритм и используемая программа для расчёта характеристик одноступенчатого коллектора. Проведены расчёты траекторий электронов в коллекторе с магнитным полем. Показано, что в существующей конструкции электронный поток фокусируется и оседает на дно коллектора с удельной мощностью приводящей к проплавлению коллектора.

Характеристики пучка на входе в коллектор были определены из результатов расчёта процесса взаимодействия в ЗС ЦСР. Было определено и задано распределение электронов по энергиям, что позволило задать их скорость на входе в коллектор. Диаметр пучка задавался из-за полнения пучком пролётного канала $v/a=0,4$ и $v/a=0,6$.

Потенциал коллектора определялся по минимальной скорости электронов из расчётов процесса взаимодействия и равен 8300В при потенциале ЗС равном 12700В. Для фокусировки электронного пучка в данной ЛБВ используется постоянный магнит, собранный из плиток материала SmCo5 (Самарий кобальтовые магниты).

Для равномерного токооседания по внутренней поверхности обычно используют магнитное поле в коллекторе равное нулю. Электронный пучок под действием сил собственного пространственного заряда расширяется и равномерно оседает на внутренней поверхности коллектора.

Особенностью используемого для фокусировки и сопровождения электронного пучка в пролётном канале ЗС постоянного магнита является наличие магнитного поля обратной полярности внутри коллектора. Причем во входной части коллектора оно равно нулю и начиная с длины 30мм увеличивается до величины равной 900Гс и затем спадает до 400Гс у дна коллектора.

На рис.6-9 представлены результаты расчёта движения электронного пучка на выходе из ЗС ЦСР и в коллекторе в различных режимах прибора.

Приведены распределения внутренней полости коллектора и напряженности магнитного поля по длине коллектора. В связи с тем, что коллектор является аксиально-симметричным, то все результаты расчётов представлены в координатах R, Z. В статическом режиме работы без входного сигнала электронный пучок тормозится, увеличивает свой диаметр, часть его оседает на входной части коллектора, а остальная часть фокусируется увеличивающимся магнитным полем и оседает на дно коллектора. В комбинированном режиме электронный ток и выходная мощность меньше, однако из-за значительно меньшей величины скважности средняя мощность пучка значительно больше, а распределение электронного пучка в коллекторе практически такое же. Значительная часть пучка фокусируется увеличивающимся магнитным полем и оседает на дно коллектора.

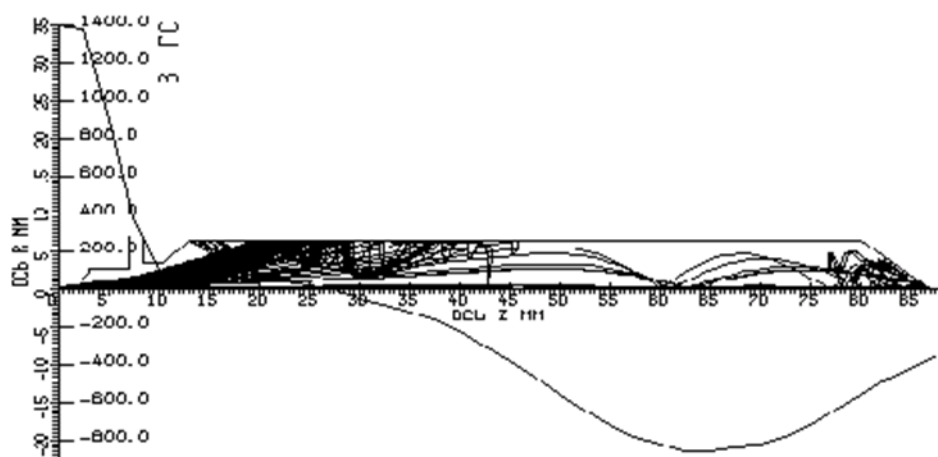


Рис. 6 Большой ток, статика

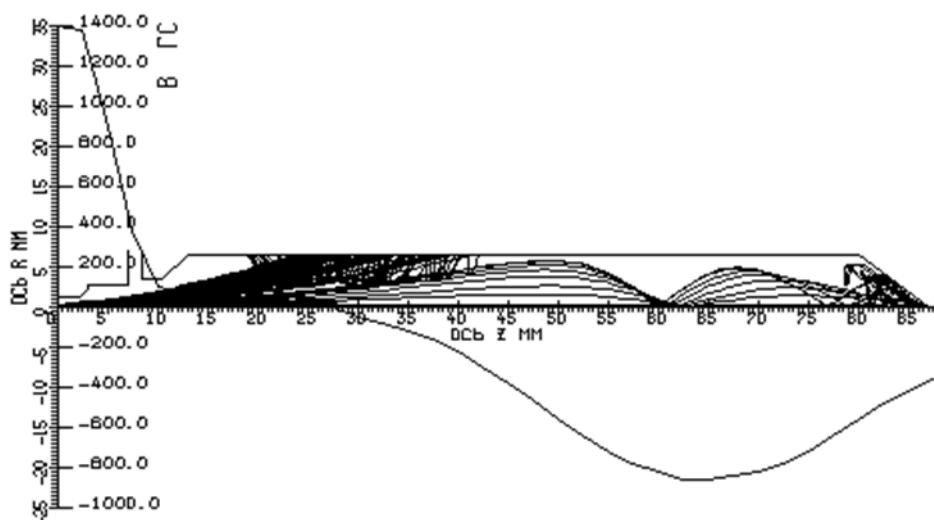


Рис.7 Комбинированный режим, статика

В динамическом режиме работы при подаче на вход ЗС ЦСР сигнала электронный пучок также оседает на входной части и дне коллектора как в режиме большого тока, так и комбинированном.

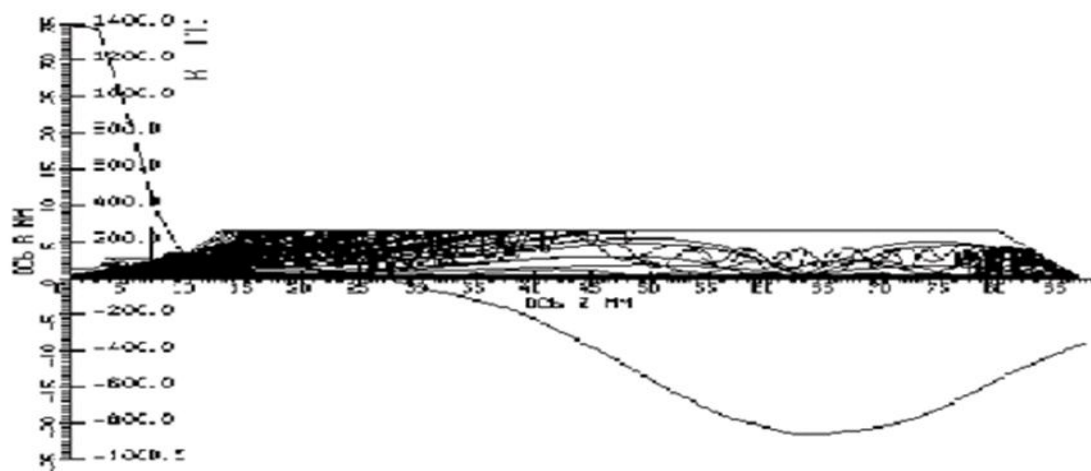


Рис.8 Большой ток, динамика

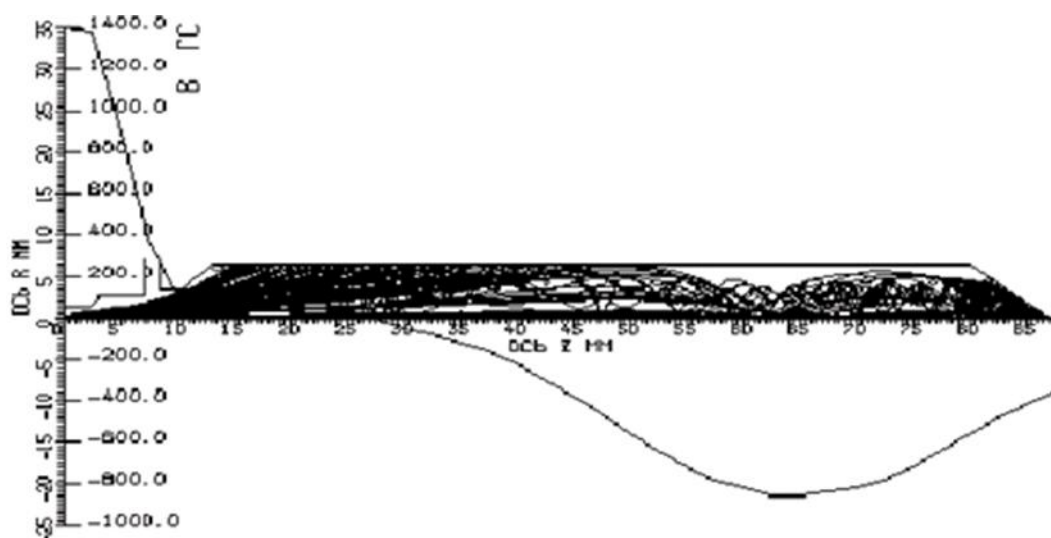


Рис.9 Комбинированный режим, динамика

Расчёт теплового режима работы коллектора показал, что удельная мощность электронного пучка оседающего на дне коллектора на всех режимах велика и вызывает его проплавление. Для уменьшения мощности пучка оседающего на дне коллектора рассмотрен вариант удлиненного коллектора с 78 мм до 130 мм.. Удельная мощность токооседания значительно уменьшилась, что обеспечило уменьшение температуры до приемлемой. Однако такое увеличение длины коллектора привело к значительному увеличению веса коллектора и является недопустимым.

Было предложено уменьшить удельную мощность токооседания на дно коллектора за счёт изменения его внутренних размеров, а также уменьшить длину коллектора с $Z=87$ мм до $Z=78$ мм.

Так как диаметр пучка на этой длине больше чем на 87 мм, то следовательно и удельная мощность оседания меньше. Начиная с длины $Z=39$ мм плавно уменьшается диаметр коллектора с 12 мм до 6 мм при $Z=50$ мм и остается без изменения до $z=70$ мм (рис.10).

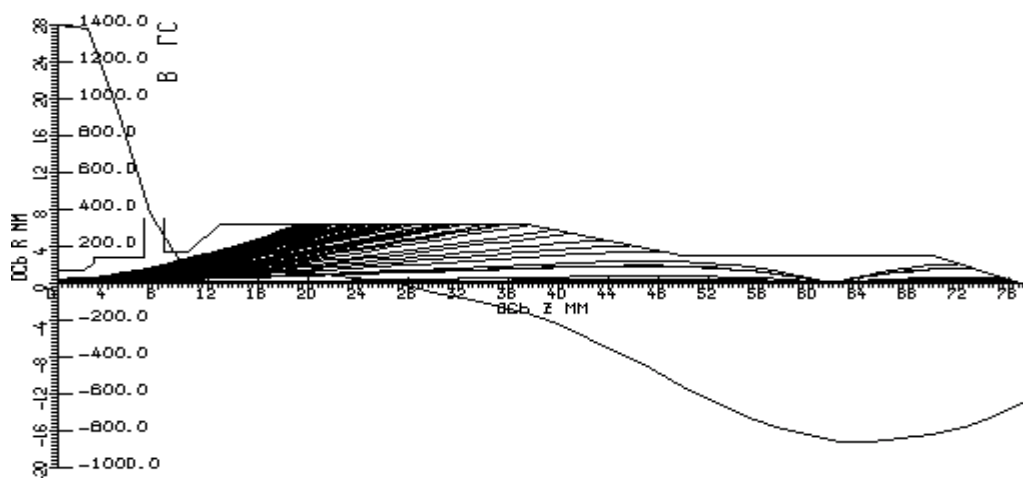


Рис. 10 Большой ток, статика

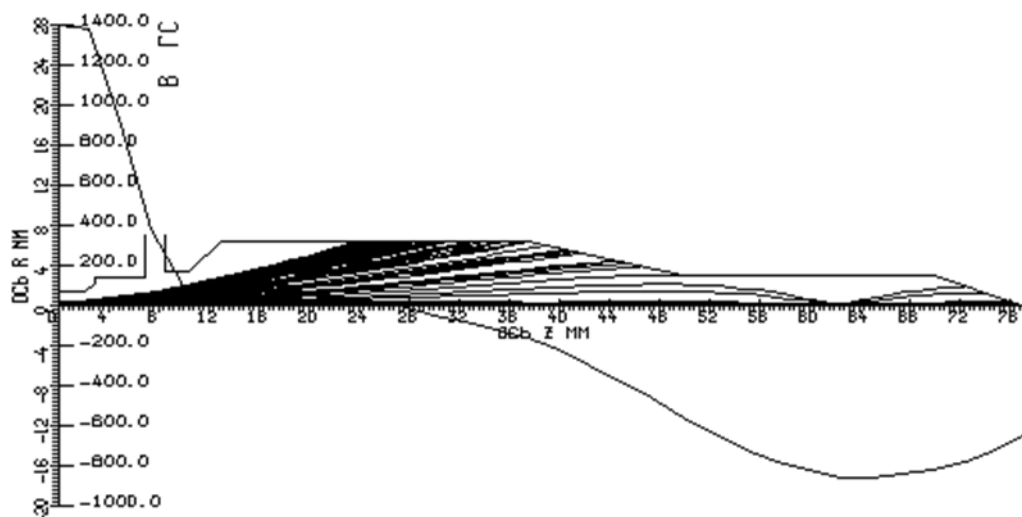


Рис. 11 Комбинированный режим, статика

За счет перехвата части пучка суживающейся частью коллектора тепловая нагрузка на дно модифицированного коллектора уменьшилась. В предложенной конструкции наблюдается равномерное оседание электронного пучка по внутренней поверхности коллектора и отсутствует большая удельная мощность токооседания на дно коллектора.

Расчёты токооседания при большом токе и в комбинированном режиме тока в статике без входного сигнала (рис.10, 11) практически идентичны и только отличаются значением мощности пучка.

В динамических режимах (рис.12, 13) также наблюдается равномерное токооседание.

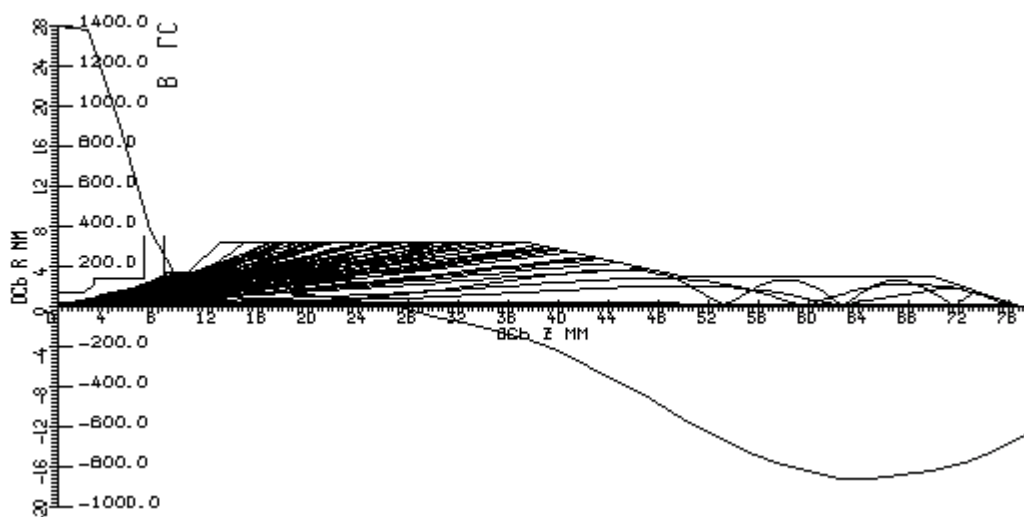


Рисунок 12 Большой ток, динамика

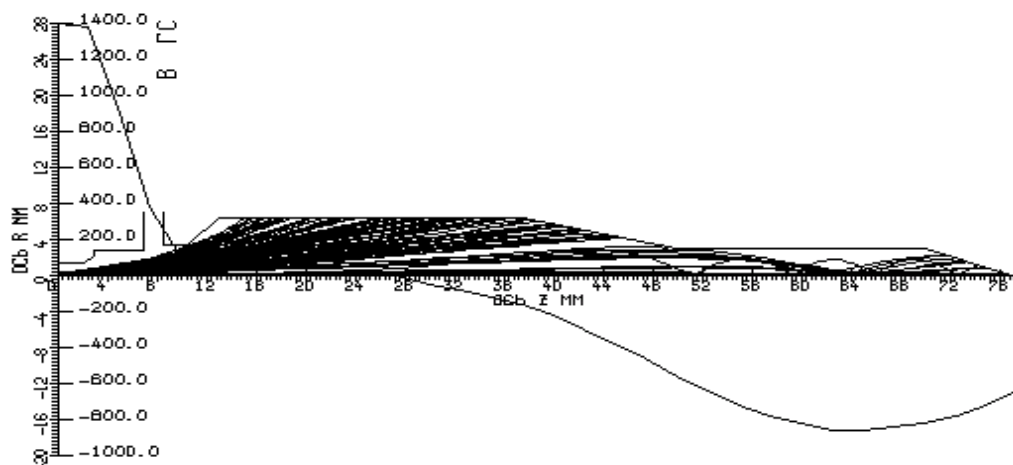


Рисунок 13 Комбинированный ток, динамика

В таблице 1 представлены расчетные величины средней по времени тепловой нагрузки на дно существующего и модифицированного коллектора в различных режимах работы.

Таблица 1

Режим	Статический		Динамический	
	Большой ток	Комбинированный режим	Большой ток	Комбинированный режим
Существ. кол-р, (Вт)	777	3050	522	2303
Модиф. кол-р, (Вт)	476	1744	225	682

В комбинированном режиме локальная тепловая нагрузка на дно существующего коллектора превосходит допустимую и вызывает проплавление дна. В модифицированном коллекторе тепловая нагрузка уменьшается в 1.32 раза и обеспечивает надёжный режим работы коллектора.

Глава 4 Выходные характеристики ЛБВ и сопоставление экспериментальных и расчётных величин

В главе 4 проведено сопоставление полученных расчётных и экспериментальных выходных характеристик ЛБВ и показано их приемлемое для практики совпадение.

Результаты расчёта электродинамических характеристик ЗС ЦСР, пространства взаимодействия электронного пучка с электромагнитной волной распространяющейся в ЗС ЦСР и оптимизация конфигурации коллектора были использованы для конструирования и корректировки ЛБВ.

Использовались основные размеры элементов конструкции определяющих выходные характеристики ЛБВ. Изготовленная ЛБВ была

подключена к установке динамических испытаний и проведены экспериментальные измерения её выходных характеристик.

При подаче на вход ЛБВ сигнала (рис.14) выходная мощность увеличивается практически линейно с постоянным коэффициентом усиления и достигает максимального значения равного 1 при входном сигнале 0.4

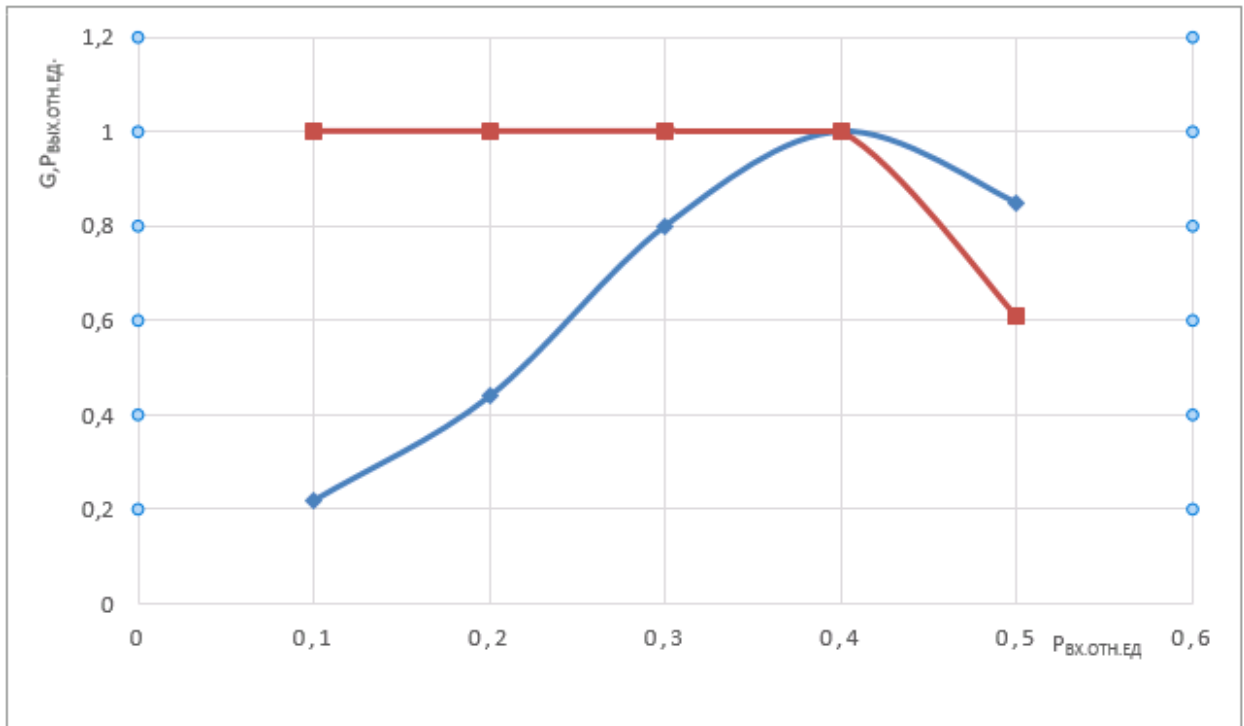


Рис.14 Зависимость выходной мощности $P_{\text{отн.ед.}}$ (◆-◆) и усиления G (■-■)

от входной мощности.

Сравнение результатов расчёта и экспериментальных данных по выходной мощности (рис.15) показывает, что наиболее близкие к экспериментальным данным результаты получаются при коэффициенте заполнения $v/a=0,4$.

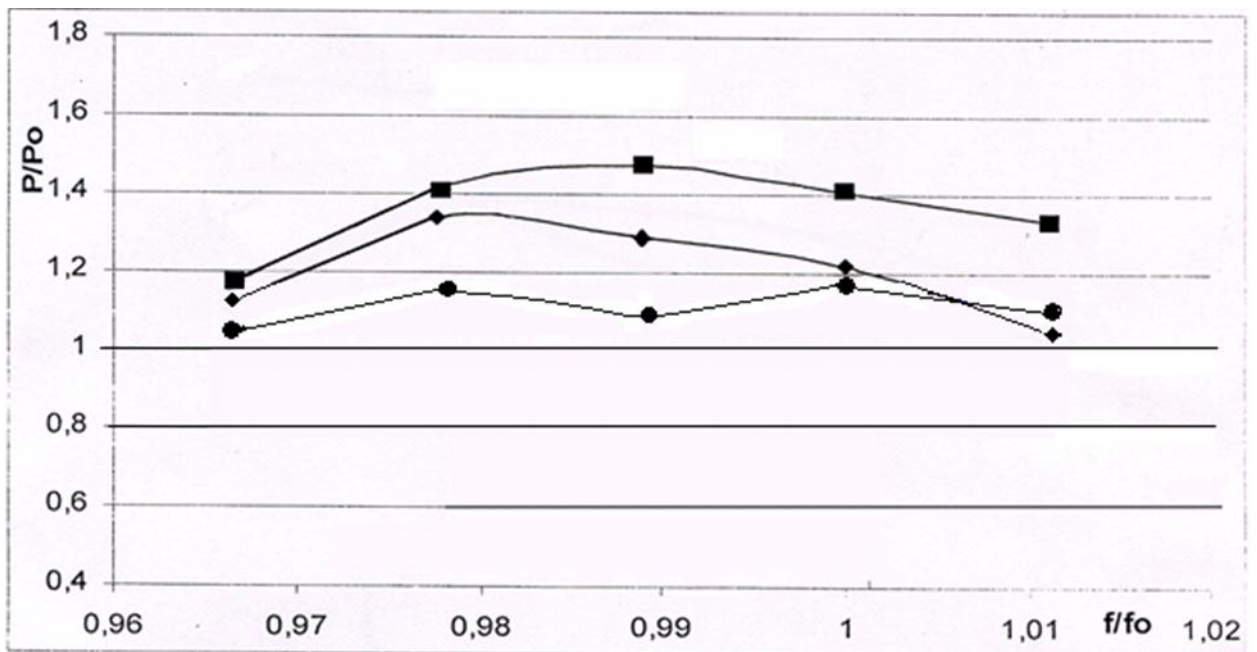


Рис.15 Зависимость выходной мощности P/P_0 от частоты f/f_0 :

■-■ – заполнение $v/a=0.6$, ●-●- эксперимент, ◆-◆ заполнение $v/a=0.4$

Это понятно, так как распределение плотности электронного потока при расчёте имеет прямоугольную форму с нулевыми фронтами. На практике это распределение имеет колоколообразную форму и эффективный диаметр взаимодействующего пучка меньше чем определённый из заполнения.

На длинноволновом краю отличие составляет 8,2%, в середине диапазона – 14,4%, а на коротковолновом - -7%. Данные отличия являются приемлемыми и позволяют получать требуемые значения выходной мощности в соответствии с техническими требованиями.

Основными причинами расхождения расчётных и экспериментальных данных является одномерная модель пучка, используемая при расчётах, отсутствие учёта отражений электромагнитной волны в моделях взаимодействия ее с электронным пучком.

Заключение

В ходе выполнения выпускной магистерской работы были достигнуты все поставленные цели и задачи.

Был проведён обзор ЛБВ с ЗС ЦСР. Изучены методы, алгоритмы и программы расчёта позволяющие получить наиболее приближенные к реальным результатам.

Проведено проектирование основных узлов ЛБВ с ЗС ЦСР, таких как замедляющая система, пространство взаимодействия электронного пучка с электромагнитной волной, коллектора.

Приведены соотношения для расчёта с помощью программы HFSS основных электродинамических параметров ЗС ЦСР – замедления, сопротивления связи, затухания. Проведён расчёт ЗС ЦСР в X - диапазоне, определены основные размеры резонатора для получения необходимого замедления. Описаны результаты расчёта выходной мощности односекционной ЛБВ без поглощающей вставки в X - диапазоне частот.

Представлена амплитудно-частотная характеристика в рабочем диапазоне частот.

Расчёты проведены для двух значений заполнения электронным пучком пролётного канала и проведено их сопоставление с результатами экспериментальных измерений. Получено приемлемое для практики совпадение расчётных и экспериментальных результатов.

Проведён расчёт электронного пучка в одноступенчатом коллекторе с торможением.

Показано, что в существующей конфигурации коллектора наблюдается фокусировка пучка в магнитном поле, которая приводит к оседанию электронного пучка с большой плотностью на дно коллектора и его проплавление.

Предложена конструкция модифицированного коллектора отличающаяся размерами внутренней полости, которая обеспечивает равномерное распределение мощности токооседания, уменьшает удельную плотность тока на дно коллектора и устраняет его проплавление.

Список использованных источников

- 1) А.Гилмор-мл. Лампа бегущей волны, мир радиоэлектроники, Техносфера, с.618
- 2) Сазонов Б.В. многолучевые многорежимные «прозрачные» ЛБВ и усилительные цепочки на их основе/ Сазонов Б.В., Победоносцев, Электронная техника Сер.1. СВЧ-техника-2003-Вып. 2-С.5-8
- 3) Т.Е. Колобаева, Л.П. Смирнова Программа электродинамических характеристик цепочек связанных резонаторов с произвольными щелями связи. Электронная техника. Сер. Электроника СВЧ, Вып. 8(356), 1983.
- 4) А.А.Борисов, основные направления развития отечественной СВЧ – электроники, электронная техника, Сер.1, СВЧ – техника. Вып.3(518), 2013 г.
- 5) www.ansys.com/products/electronics/ansys-hfss
- 6) Кац А.М., Ильина Е.М., Манькин И.А. Нелинейные явления в СВЧ приборах О-типа с длительным взаимодействием. М.: Сов. Радио, 1975. 296 с.
- 7) Манькин И.А., Ушерович Б.Л., Шульман Л.И. нелинейный расчёт ЛБВ на цепочках связанных резонаторов // Электронная техника. Сер.1. Электронная СВЧ. 1979. №8. С. 56-68.
- 8) Малыхин А.В., Якушкин Е.П., Копылов В.В. Математическое моделирование процессов в мощных клистродах и ЛБВ //электронная промышленность. 1992. №4. С. 9-17.
- 9) Компьютерное моделирование современных ламп бегущей волны различного назначения, В.Д.Журавлёв, Е.М.Ильина, Ю.Ф.Конторин, С.П.Морев, В.В.Пензяков, А.Н.Петросян, В.И.Роговин, С.О.Семенов, «Радиотехника», 2001 год, №2
- 10) А.П.Кузнецев, С.П.Кузнецев, А.Г.Рожнев, Е.В.Блохина, Л.В.Булгакова. Волновая теория ЛБВ вблизи границы полосы пропускания // Изв. вузов. Радиофизика. 2004. Т.47, №5-6. С. 399-418.