

МИНОБРАЗОВАНИЯ РОССИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ
ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«САРАТОВСКИЙ НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ИМЕНИ Н.Г. ЧЕРНЫШЕВСКОГО»

Кафедра электроники, колебаний и волн

**Характеристики ЛБВ и способы их оценки, как первоначальный этап
проектирования**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

Студента 4 курса 4031 группы
направления 03.03.03 «Радиофизика»
Института Физики
Сотникова Романа Дмитриевича

Научный руководитель
доцент кафедры электроники,
колебаний и волн, к.ф.-м.н.



дата, подпись
03.06.2024

В.Н. Титов

Заведующий кафедрой
электроники, колебаний и волн.
к.ф.-м.н., доцент



дата, подпись
03.06.2024г.

С.В. Гришин

Саратов 2024 год

Введение

Актуальность темы исследования. Выбранная для исследования тема бакалаврской работы «Характеристики ЛБВ и способы их оценки как первоначальный этап проектирования» в настоящее время, как и ранее, вызывает особый интерес у специалистов в области радиоэлектроники, о чем свидетельствует значительное количество публикаций и написанных научных работ, успешно реализованных проектов на данную тему. В радиоэлектронике лампа бегущей волны является одним из широко используемых вакуумных приборов, усиливающий входной сигнал широкой полосы частот от 300 МГц до 300 ГГц, а также преобразующий и приумножающий частоты сигнала и др. целей.

Среди актуальных вопросов, над которыми работают ученые сегодня, следует выделить работы в области мощных вакуумных приборов СВЧ, таких как ЛБВ для базовых станций мобильной связи 5G; проектирование и разработка широкополосной спиральной ЛБВ 8мм диапазона длин волн; ЛБВ-W диапазона; новые технологии и продукции для космических программ с использованием ЛБВ; электронно-оптические системы мощных импульсных ЛБВ с сеточным управлением; проблемы прогнозирования перегрева ЛБВ при эксплуатации в аппаратуре для улучшения защиты и ряд других направлений.

Однако, несмотря на столь широкий интерес к ЛБВ, круг нерешенных вопросов, над которыми работают ученые и практики сегодня, только расширяется, так как осуществляется поиск создания наиболее оптимальных характеристик ЛБВ для различных областей применения в радиоэлектронной промышленности.

Многие из характеристик ЛБВ требуют проведения аналитической оценки на первоначальном этапе ее проектирования с помощью математических методов с реализацией расчетов на ЭВМ, причем применение различных методов определяется их теми или иными

преимуществами, что и определило актуальность выбранной темы исследования.

Цель исследования – обобщить и систематизировать основные характеристики ЛБВ и провести анализ теоретических подходов к их расчету, в частности, на примере расчета коэффициента усиления в зависимости от параметра рассинхронизма провести сравнение различных методов расчетов.

Для достижения поставленной цели в работе необходимо было решить **следующие задачи:**

- рассмотреть историю создания ЛБВ и применение ее в электронике;
- рассмотреть основные конструктивные элементы ЛБВ;
- исследовать основные физические величины, характеризующие режим работы ЛБВ;
- рассмотреть теории ЛБВ и методы вычисления;
- систематизировать отдельные подходы к определению характеристик ЛБВ в рамках стационарной линейной и нелинейной теориях;
- в среде программирования Wolfram Mathematica написать программу для вычисления коэффициента усиления ЛБВ в зависимости от параметра рассинхронизма в рамках стационарной линейной теории методом последовательных приближений и методом дисперсионного уравнения;
- провести аналогичные расчеты для коэффициента усиления для стационарной нелинейной теории с применением метода крупных частиц и сравнить полученные результаты вычисления всех трех методов;
- рассмотреть современные направления разработок ЛБВ.

Работа состоит из трех разделов: 1 Основные характеристики и теории ЛБВ; 2 Способы оценки характеристик ЛБВ на первоначально этапе проектирования на примере расчета коэффициента усиления ЛБВ – О с СЗС на основе стационарных линейной и нелинейной теорий; 3. Современные направления разработок ЛБВ.

Основное содержание работы.

В первом разделе описывается История создания ЛБВ и ее применение в электронике. Особенно отмечается современное состояние отрасли производства ЛБВ, где одними из крупнейших холдингов России является «Росэлектроника», который входит в Госкорпорацию «Ростех» и объединяет около 27 предприятий только в области связи и телекоммуникаций. Среди них следует отметить АО НПП «Исток» им. Шокина, АО «Плутон», АО НПП «Алмаз», АО «НПП «Салют» и другие. ЛБВ, выпущенные на АО НПП «Исток» им. Шокина, установлены в передатчиках спутников – исследователей планет Венеры и Марса. АО «НПП «Алмаз» представило первую российскую бортовую ЛБВ с выводом системы охлаждения в открытое космическое пространство. Широкополосные вакуумные приборы СВЧ с уровнем мощности до нескольких десятков киловатт применяются в системах дальней, тропосферной и космической связи. В настоящее время на АО НПП «Исток» им. Шокина» разработано более 40 типов ЛБВ. Второй подраздел данного раздела раскрывает устройство и принцип действия ЛБВ со спиральной ЗС. Приводится систематизация физических величин, характеризующих режим работы ЛБВ в зависимости от конструктивных особенностей. Основные классификационные признаки которых представлены в таблице 1

Таблица 1 – Классификация ЛБВ

Классификационный признак	Содержание
По принципу действия	ЛБВ-О ЛБВ-М
По уровню выходной мощности	маломощные - до 1 Вт; средней мощности - от 1 Вт до 100 Вт; большой мощности от 100 Вт до 100 кВт; сверхмощные - свыше 100 кВт.
По режиму работы	в импульсном, непрерывном режиме
По типу замедляющей системы	встречно-штыревого типа спиральные гребенка цепочки связанных резонаторов «петляющий волновод» меандр

В третьем подразделе обобщены основные положения теорий ЛБВ, на основании которых проводятся экспериментальные расчеты характеристик ЛБВ, а также обобщены и систематизированы основные методы, которые используются при оценке характеристик ЛБВ. Схематично основные теории ЛБВ представлены на рисунке 3 бакалаврской работы.



Рисунок 3 – Основные теории ЛБВ

Таким образом, были систематизированы основные теоретико-технические аспекты ЛБВ, определив приоритетное значение в развитии радиоэлектроники именно ЛБВ-О, создавая их с наилучшими физическими характеристиками. Рассмотренные теории и методы решения задач ЛБВ позволили выбрать наиболее подходящий метод для расчета коэффициента усиления ЛБВ в зависимости от параметра рассинхронизма с позиции быстроты расчета и точности решения.

Во втором разделе приводятся практические аспекты исследования, демонстрирующие способы оценки характеристик ЛБВ на первоначально этапе проектирования на примере расчета коэффициента усиления ЛБВ – О с СЗС в зависимости от параметра рассинхронизма на основе стационарных линейной и нелинейной теорий. В первом подразделе раскрываются основные положения взаимодействия электронного потока с бегущей электромагнитной волной с позиции стационарной линейной теории, позволяющей изучать волны пространственного заряда малой

амплитуды. Анализ зависимости коэффициента усиления от параметра рассинхронизма для разных CN проведен с помощью метода последовательных приближений и дисперсионного метода, которые отличаются между собой количеством допущений относительно реальных условий, Данные решения были реализованы с применением среды программирования Wolfram Mathematica.

Полученные результаты позволили сделать вывод, что с увеличением CN наблюдается тенденция к увеличению расхождений графиков, описывающих изменения коэффициента усиления указанными методами. Различия в полученных графиках связаны с тем, что метод дисперсионных уравнений является более точным при больших значениях параметров CN, так как он учитывает основные физические законы и свойства распространения волн в среде. А метод последовательных приближений использует аппроксимации и приближения, что характеризует его простоту, однако его погрешности в случаях больших параметров скорости распространения энергии в системе могут стать принципиальными.

В итоге, можно сделать вывод, что метод последовательных приближений позволяет добиться простое и в тоже время точное аналитическое решение расчета коэффициента усиления ЛБВ-О с СЗС в случаях, когда скорость распространения энергии в системе (CN) мала, тогда оно совпадает с результатами более сложного метода дисперсионного уравнения. Также в методе последовательных приближений нет необходимости рассматривать много приближений, поскольку оказывается достаточным ограничиться вторым или даже первым приближением.

Во втором подразделе дана оценка коэффициента усиления ЛБВ – О с СЗС в рамках стационарной нелинейной теории. Анализ зависимости коэффициента усиления от параметра рассинхронизма для разных CN с учетом амплитуды входящего сигнала проведен с помощью метода крупных частиц. Также представлены графики, демонстрирующие «траектории»

крупных частиц для разных CN. Решения были реализованы также с применением среды программирования Wolfram Mathematica. В результате пришли к выводу, что рассмотренные классические подходы к расчету уравнений стационарной нелинейной теории ЛБВ с СЗС позволяют производить расчеты с достаточным приближением при малых сигналах, где уравнения приводятся к линейному виду.

Далее для получения обобщенных результатов по 2 разделу был проведен сравнительный анализ решений в виде графиков, полученных с помощью всех трех методов (дисперсионного уравнения, последовательных приближений и крупных частиц). В итоге результат сравнительного анализа расчетов коэффициента усиления от параметра рассинхронизма для разных CN тремя методами представлен на графиках (рисунки 25 и 26 в работе)

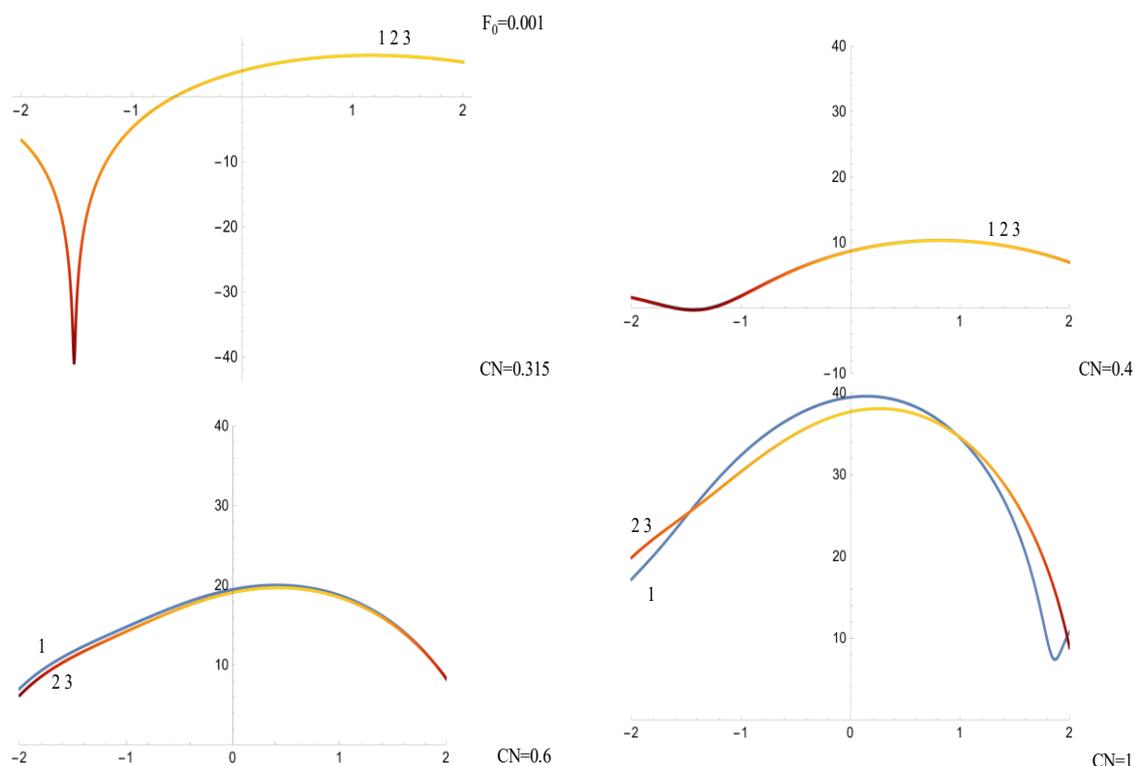


Рисунок 25 – Сравнительный анализ результатов зависимости коэффициента усиления от параметра рассинхронизма для разных CN, по методу крупных частиц при амплитуде входного сигнала $F_0= 0,001$ (график 3), для дисперсионного метода (график 2) и метода последовательных приближений (график 1)

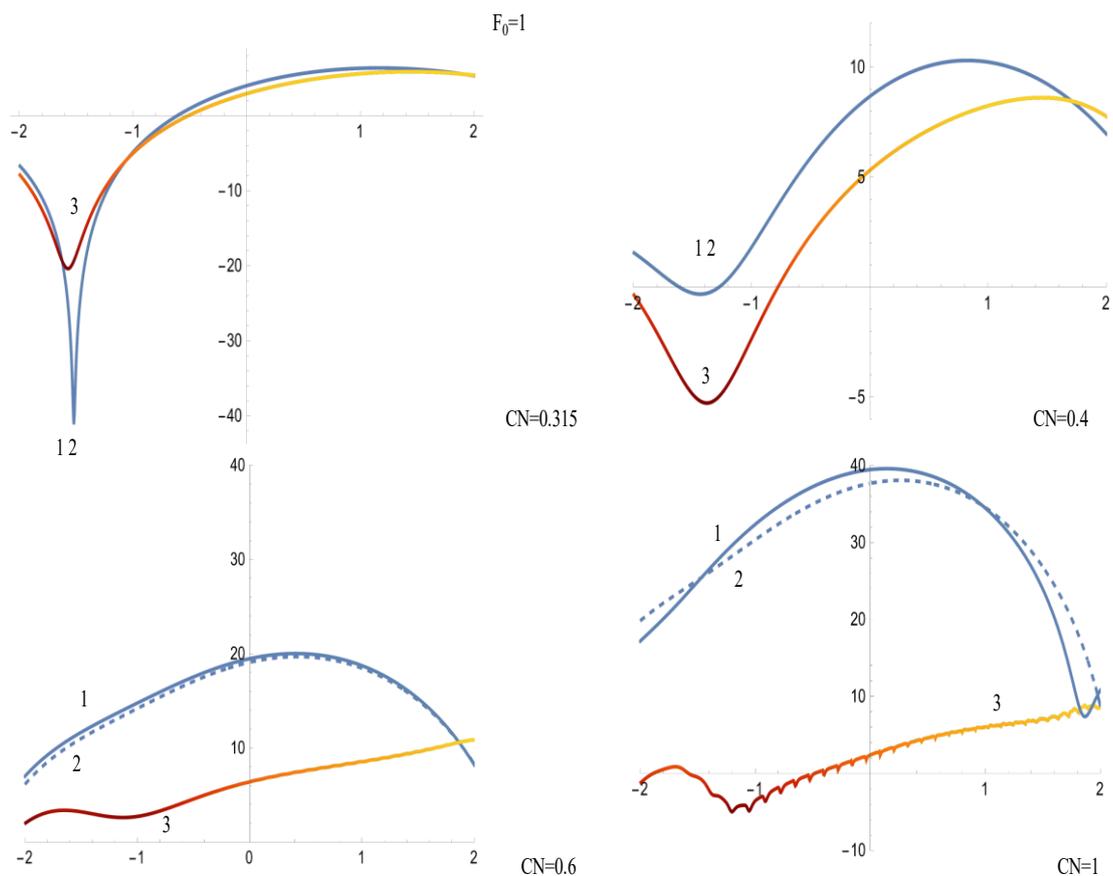


Рисунок 26 – Сравнительный анализ результатов зависимости коэффициента усиления от параметра рассинхронизма для разных CN, по методу крупных частиц при амплитуде входного сигнала $F_0=1$ (график 3), для дисперсионного метода (график 2) и метода последовательных приближений (график 1)

Проведенный анализ показал, что результаты, полученные методом последовательных приближений и методом дисперсионного уравнения в рамках стационарной линейной теории с результатами, полученными методом крупных частиц в рамках стационарной нелинейной теории, где учитывается дополнительно влияние амплитуды входного сигнала при сопоставимой скорости распространения энергии в пространстве взаимодействия (CN), пришли к выводу, что они совпадают при малой амплитуде входного сигнала в методе крупных частиц, и малых CN. При увеличении значения CN, а также амплитуды входного сигнала (в методе

крупных частиц) полученные результаты не совпадают. А в условиях больших сигналов требуется применение нелинейных нестационарных уравнений, решение которых проводится с применением ЭВМ.

В третьем разделе рассматриваются современные направления разработок ЛБВ, которые связаны с созданием ЛБВ, имеющих более высокие характеристики, что стало возможным в связи с развитием вычислительной техники, компьютерных программ для проведения расчетов с большим объемом данных при изучении физических явлений и процессов, происходящих в ЛБВ в реальном времени, что позволяет автоматизировать сложные расчеты характеристик более мощных ЛБВ, которые только с помощью стационарных теорий, особенно линейной теории, невозможно проанализировать и требуют иного подхода, который раскрывается в нелинейной нестационарной теории, позволяющей исследовать в динамических системах переходные процессы. Выделены современные характеристики мощных ЛБВ в зависимости от конструктивных особенностей (таблица 4 работы) [5].

Таблица 4 - Основные характеристики мощных ЛБВ в зависимости от конструкции

Виды ЛБВ	Параметры							
	Рабочий диапазон, ГГц	Выходная непрерывная мощность, кВт	Выходная импульсная мощность, кВт	Полоса рабочих частот, %	Коэффициент усиления, дБ	КПД, %	Рабочие напряжения, кВ	Напряжение модуляции, % от ускоряющего напряжения
Непрерывного действия	4...1,5	1,5...2	-	0,5...20	До 40	27	10...11	-
Импульсные	8...17	-	0,3...10	10	40...60	26...35	8...30	3...10
Спиральные непрерывного действия	5,5...8,5	1,2	-	40	40	30	11...12	-
Многолучевые «прозрачные»	8...14,5	-	5...30	10	10...13	30...35	8...25	10...15
ЛБВ-мм диапазона	27 - 9	0,02...0,15	0,02...2	0,6...5	30...40	-	18...25	10...12

Достижение рассмотренных выше характеристик стало возможным в связи с развитием вычислительной техники и использования методов, анализирующих характеристики ЛБВ с позиции нестационарной нелинейной теории, учитывающую их пространственно-временную составляющую.

Заключение. В результате проведенного исследования в бакалаврской работе были рассмотрены исторические аспекты и современная практика применения ЛБВ. Рассмотрено устройство и принцип действия ЛБВ – О с СЗС.

Особое внимание было уделено рассмотрению основных теорий ЛБВ, в которых представлены подходы к расчету характеристик ЛБВ, были обобщены основные методы расчета характеристик ЛБВ. Более подробно дана оценка стационарным линейной и нелинейной теориям ЛБВ.

Произведены расчеты и дан сравнительный анализ полученным результатам расчета зависимости коэффициента усиления ЛБВ-О с СЗС от параметров рассинхронизма для нескольких значений CN в рамках стационарной линейной теории методом последовательных приближений и методом дисперсионного уравнения.

Также в рамках стационарной нелинейной теории была проанализирована зависимость коэффициента усиления ЛБВ-О с СЗС от параметров рассинхронизма для нескольких значений CN , полученного методом крупных частиц уже при учете влияния амплитуды входного сигнала ($F_0= 1$ и $F_0= 0,001$). Причем был выявлен срыв Компфнера, который наблюдается для $CN=0,315$.

Сравнивая результаты, полученные методом последовательных приближений и методом дисперсионного уравнения в рамках стационарной линейной теории с результатами, полученными методом крупных частиц в рамках стационарной нелинейной теории, пришли к выводу, что они совпадают при малой амплитуде входного сигнала в методе крупных частиц и малых значениях CN .

Рассмотрены основные направления развития ЛБВ на основе анализа последних публикаций выступлений на ежегодно проводимых Всероссийских научно-технических конференциях в Москве, Санкт-Петербурге (например, в Санкт-Петербурге «Электроника и микроэлектроника СВЧ») и в других городах, а также на научно-технических конференциях, организованных на научно-производственных предприятиях, производящих приборы СВЧ (например, на конференциях в Москве в АО «НПП «Торий», в Саратове АО «Научно-производственное предприятие «Алмаз»), в которых представлены результаты последних разработок ЛБВ обобщена информация о полученных характеристиках ЛБВ-О различных типов ЗС и их конструктивных особенностях и сделан акцент на необходимость применения нестационарной нелинейной теории для расчета характеристик более мощных ЛБВ.

Задачи, поставленные при написании бакалаврской работы выполнены в полном объеме. Цель бакалаврской работы достигнута.

Значимость исследования заключается в обобщении основных характеристик ЛБВ и систематизации теоретических подходов к их оценке, которые имеют педагогическую ценность, заключающуюся в возможности применения их в учебном процессе при начальном знакомстве с процессом проектирования ЛБВ, а также носят прикладную направленность при расчете значения коэффициента усиления в зависимости от параметра рассинхронизма на первоначальном этапе моделирования маломощных ЛБВ - О с СЗС, которые используются для предварительного усиления СВЧ сигналов.

Список использованных источников

1. Трубецков, Д. И. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков : В 2 т. Т1. / Д. И. Трубецкой, А. Е. Храмов. - Москва : ФИЗМАТЛИТ, 2003.-269 с.

2. Лампа бегущей волны: как это работает / новости 27.09.2019 [Электронный ресурс]: [сайт]. – URL: <http://rostec.ru/news/lampa-begushchey-volnu> (дата обращения 05.04.2024) Загл. с экрана. – Яз. рус.;
3. Мощные СВЧ-приборы – АО НПП «Исток» [Электронный ресурс]: [сайт]. – URL: <https://istokmw.ru/products/powerful-microwave-devices/> (дата обращения 02.05.2024) Загл. с экрана. – Яз. рус.;
4. Белявский, Б. А., Бородин, В. А., Носовец, А. Ф. Мощные импульсные ЛБВ миллиметрового диапазона / Б. А. Белявский, В. А. Бородин, А. Ф. Носовец, // Сборник статей четвертой всероссийской конференции «Электроника и микроэлектроника СВЧ», 2015, том 1, с. 176.
5. Галдецкий, А. В., Богомолова, Е. А., Натура, И. П., Сапрынская, Л. А., Соколова, И. М. АО «НПП «Исток» им. Шокина» «Проектирование лампы бегущей волны W- диапазона» [Электронный ресурс]: [сайт]. – URL: https://mwelectronics.etu.ru/assets/files/2017/1/09_03.pdf (дата обращения 02.04.2024) Загл. с экрана. – Яз. рус.;
6. Торгашов, Д. А., Ножкин, А. В., Стародубов, А. Г., Рожнёв, Н. М., Рыскин «Исследование мощной лампы бегущей волны W-диапазона с замедляющей системой меандрового типа и двухлучевым электронным потоком» [Электронный ресурс]: [сайт]. – URL: <https://mwelectronics.etu.ru/2023/ru/> (дата обращения 02.04.2024) Загл. с экрана. – Яз. рус.;
7. Вайнштейн, Л. А., Солнцев, В. А, Лекции по сверхвысокочастотной электронике / Л. А. Вайнштейн, В. А. Солнцев. - М.: Сов. радио, 1973. - 400 с.
8. Цейтлин, М. Б., Кац, А. М. Лампа с бегущей волной / М. Б. Цейтлин, А. М. Кац. - М.: Советское радио, 1964.
9. Гришин, С. В., Дмитриев, Б. С., Разуваев, Ф. П., Скороходов, В. Н., Титов, В. Н., Трубецков, Д. И. Нелинейное подавление сигналов в лампе бегущей волны / С. В. Гришин, Б. С. Дмитриев, Ф. П. Разуваев, В. Н. Скороходов, В. Н. Титов, Д. И. Трубецков // Журнал технической физики, 2021. том 91, вып. 11. С. 1774 – 1784.