

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

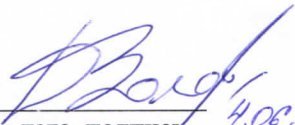
Кафедра электроники, колебаний и волн

**Минимизация выделяемой тепловой мощности коллекторного узла
ЛБВ, предназначенной для применения в космических аппаратах**

АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ

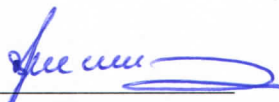
Студента 4 курса 4031 группы
направления 03.03.03 «Радиофизика»
Института Физики
Шелухина Алексея Павловича

Научный руководитель
доцент кафедры электроники,
колебаний и волн, к.т.н.


дата, подпись 09.06.25

Д.Н. Золотых

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


дата, подпись 09.06.2025г.

С.В. Гришин

Саратов 2025 год

ВВЕДЕНИЕ

Для усиления электромагнитных волн средней и большой мощности в диапазоне частот от 0.5 ГГц до 100 ГГц широко используются лампы бегущей волны (ЛБВ). Они нашли широкое применение в системах космической, тропосферной и наземной связи, локации и навигации, радиопротиводействия, в гражданских и военных целях.

Лампа бегущей волны состоит из основных функциональных узлов, таких как электронная пушка, магнитная фокусирующая система, коллектор, высокочастотный пакет, ввод и вывод энергии. Электронная пушка, магнитная фокусирующая система и коллектор формируют, сопровождают и принимают электронный пучок. Высокочастотный пакет содержит замедляющую систему, которая замедляет электромагнитную волну, распространяющуюся со скоростью света и делает возможным ее взаимодействие со сплошным цилиндрическим электронным потоком, движущимся внутри замедляющей системы. Ввод и вывод энергии служат для подачи входного сигнала и съема усиленного.

В настоящее время актуальной является проблема создания ЛБВ с низким энергопотреблением (выделением тепла) в системах спутниковых передатчиков. Снижение энергопотребления ЛБВ позволит:

1. Повысить КПД прибора.
2. Снизить тепловую нагрузку, продлив срок службы оборудования.

Целью дипломного проекта является получение такой конструкции пространства взаимодействия ЛБВ, которая бы обеспечила требуемые выходные характеристики при минимальном энергопотреблении. Для достижения результата необходимо:

1. Рассчитать базовую конструкцию пространства взаимодействия и проверить выходные характеристики ЛБВ на соответствие ТЗ.
2. Рассчитать мощности, выделяемые на ступенях коллектора, для базовой конструкции ЛБВ.
3. Последовательно изменяя закон распределения шагов спирали добиться минимизации мощностей, выделяемых на ступенях коллектора, при выходных характеристиках, соответствующих ТЗ.

1 Основное содержание работы

В первой главе описывается схематическое устройство и принцип работы лампы бегущей волны. По мере движения электронного пучка вдоль замедляющей системы, образуются электронные сгустки, которые формируют ВЧ-поле, отбирающее кинетическую энергию пучка и усиливающее электромагнитную волну. На рисунке 1 представлено схематическое устройство лампы бегущей волны со спиралью и многоступенчатым коллектором[1-5].

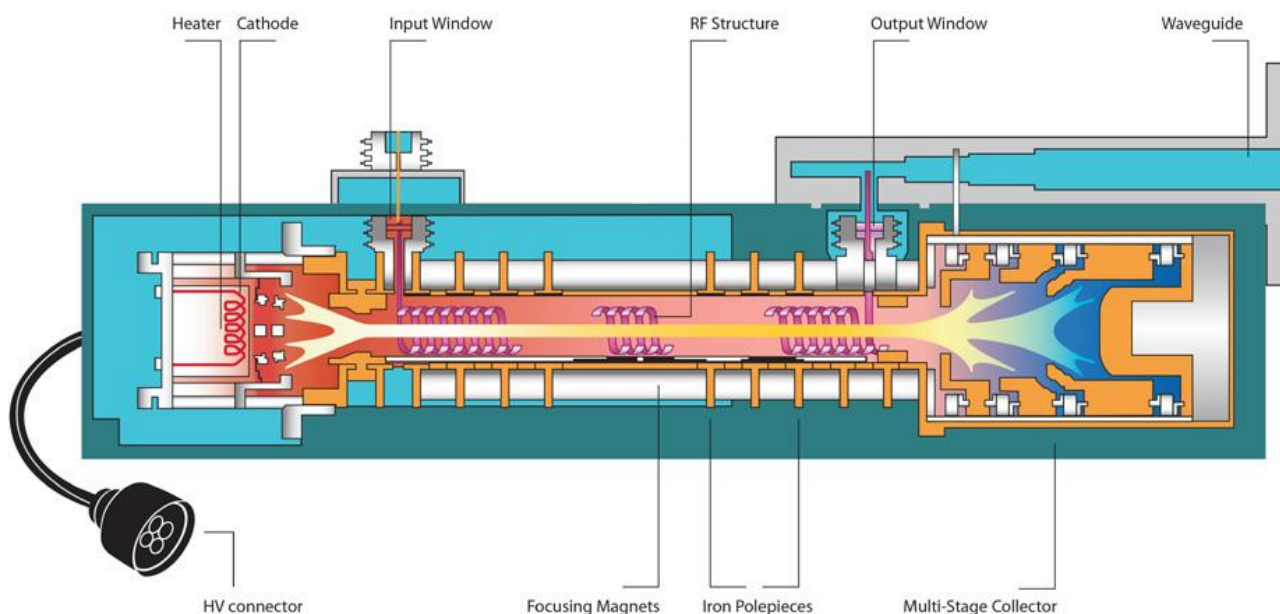


Рисунок 1 – Схематическое устройство лампы бегущей волны со спиралью и многоступенчатым коллектором

Во второй главе рассказывается о повышении КПД ЛБВ путем торможения электронов в коллекторе. Для ЛБВ средней и большой мощности наиболее важной характеристикой является КПД, который характеризует эффективность прибора. КПД ЛБВ по сравнению с КПД других приборов СВЧ (клистроны, усилители М-типа) низкий. В связи с этим представляет интерес исследование путей повышения КПД ЛБВ. Рассмотрим такой путь повышения КПД, который связан с уменьшением постоянной мощности, потребляемой прибором. Он осуществляется понижением потенциала коллектора. При этом выходная мощность прибора не изменяется[6-8].

В третьей главе описываются методы достижения высокого технического КПД ЛБВ. Для достижения высокого технического КПД ЛБВ было предложено проводить оптимизацию параметров замедляющей системы (ЗС) непосредственно по этому параметру с учетом многоступенчатой рекупера-

ции и показано, что полученный закон изменения шага спиральной ЗС отличается от закона, оптимального для достижения максимального электронного КПД, меньшими значениями параметра несинхронности на выходном участке ЗС и соответственно меньшими значениями электронного КПД[9].

Другим способом повышения эффективности, но уже не самой ЛБВ, а ретранслятора в целом является отвод тепла от самого теплонагруженного элемента ЛБВ - коллектора - излучением в окружающее пространство, что позволяет упростить, уменьшить массу и габариты системы термостабилизации спутника. Из всех предлагавшихся ранее конструкций отвода тепла излучением от коллектора в современных ЛБВ используется самая технологичная - передача тепла от электродов коллектора на внешний радиатор осуществляется за счет теплопроводности и далее с радиатора излучением в окружающее пространство[10].

В главе 4 проводится расчёт базовой конструкции пространства взаимодействия ЛБВ. Для расчёта базовой конструкции пространства взаимодействия ЛБВ было выбрано программное обеспечение Shell2. Причинами выбора являются высокая степень безопасности, отличная точность результатов и поддержка компетентных людей. Для расчёта было необходимо спроектировать ЛБВ с выходной мощностью не менее 173 Вт в диапазонах рабочих частот $0,98f_0 - 1,01f_0$.

Для указанного диапазона частот ЛБВ была спроектирована спиральная замедляющая система с диаметром канала 0,9 мм. Учитывая выходную мощность ЛБВ и возможные тепловые нагрузки замедляющей системы, для навивки спирали была выбрана микролента прямоугольного сечения $0,15 * 0,2$ мм из сплава МАГТ. Удельное сопротивление проволоки 210000 1/(Ом*см) . Крепление спирали осуществляется с помощью трёх диэлектрических опор, представляющих собой клиновидные стержни с углом 15° из окиси бериллия толщиной 0,2 мм у спирали. Значения относительной диэлектрической проницаемости и тангенса угла ВЧ-потерь применяемой для изготовления диэлектрических опор окиси бериллия равны 6,4 и 0,0005 соответственно.

Спираль с диэлектрическими опорами закрепляется в металлической трубке (экране) с внутренним диаметром 2,8 мм. Экран выполнен из меди с удельной проводимостью 380000 1/(Ом*см) .

На основании полученных электродинамических характеристик замедляющей системы был проведен расчёт выходных параметров ЛБВ по программе, использующей модель нелинейного взаимодействия электронного потока с полем замедляющей системы в одномерном приближении. Напряжение взаимодействия выбрано равным 5800 В, ток пучка равен 0,125 А, заполнение пучком пролетного канала равно 0,6. На рисунке 2 представлены результаты расчёта данной ЛБВ.

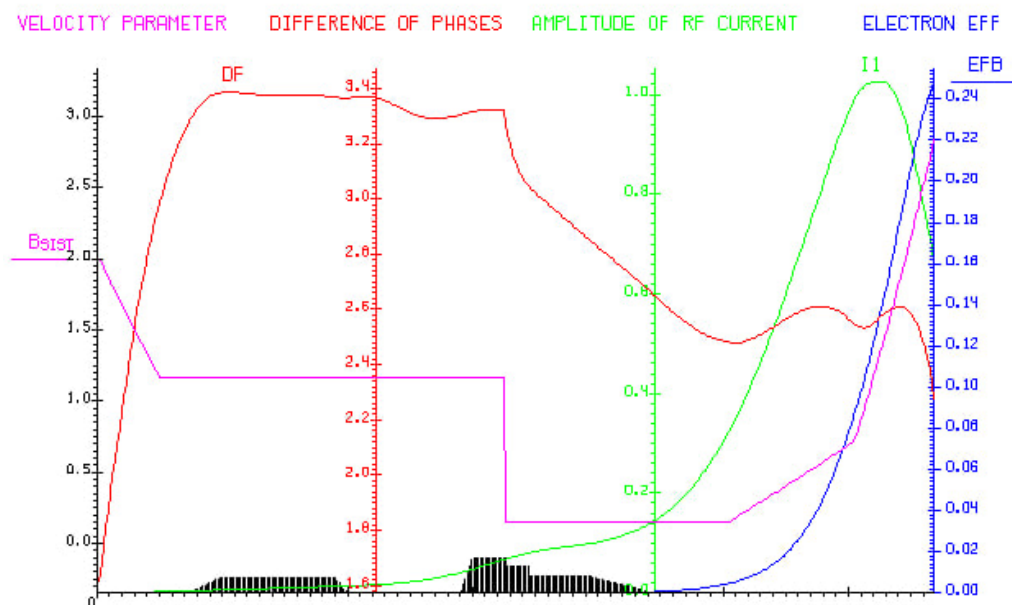


Рисунок 2 – Результат расчёта базовой конструкции пространства взаимодействия ЛБВ

В главе 5 проводится разработка ЛБВ с низким энергопотреблением. Для разработки ЛБВ с низким энергопотреблением было использовано то же программное обеспечение Shell2, что и для расчёта базовой конструкции пространства взаимодействия ЛБВ. Также было выбрано программное обеспечение для расчёта потребляемой мощности коллектора и выделяемых мощностей на каждой ступени коллектора.

Для разработки был выбран четырехсекционный коллектор, что выгодно использовать в системах спутниковых передатчиков. Выходная мощность разрабатываемой ЛБВ должна быть не менее 173 Вт в диапазонах рабочих частот $0,98f_0 - 1,01f_0$. Потребляемая мощность ЛБВ должна быть не более 268,2 Вт, учитывая накал и ток замедляющей системы. Напряжение взаимодействия выбрано равным 5600 В, ток пучка равен 0,125 А.

За основу была взята базовая конструкция пространства взаимодействия ЛБВ, которая описана ранее. Последовательно изменяя закон распределения шагов спирали, была достигнута минимизация мощностей, выделяемых на ступенях коллектора. Сумма выделяемых мощностей равна 29,93 Вт, что меньше на 13,45 Вт относительно базовой конструкции. На рисунке 3 представлены распределение шагов спирали энергоэффективной конструкции пространства взаимодействия ЛБВ. На рисунке 4 представлены локальные поглотители энергоэффективной конструкции пространства взаимодействия ЛБВ. На рисунке 5 представлен результат расчёта энергоэффективной конструкции пространства взаимодействия ЛБВ.

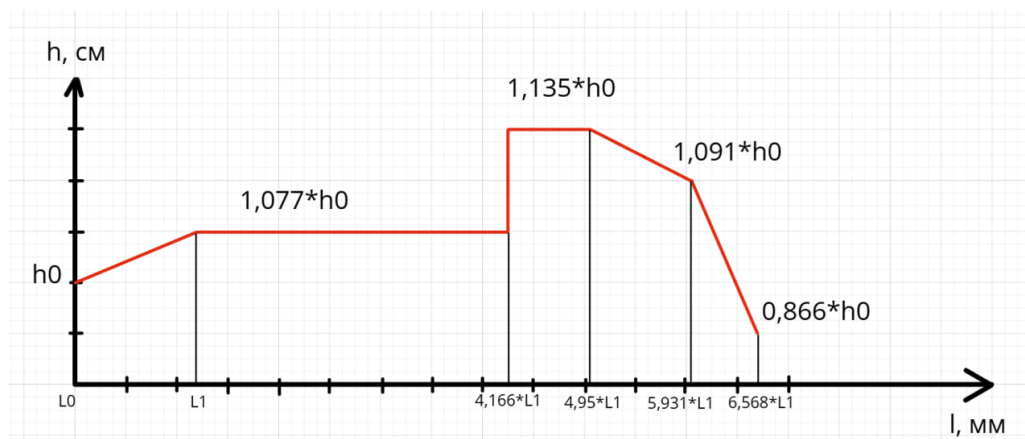


Рисунок 3 – Распределение шагов спирали энергоэффективной конструкции пространства взаимодействия ЛБВ

Для расчёта потребляемой мощности коллектора и выделяемых мощно-

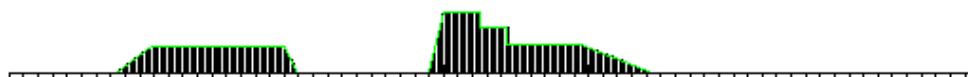


Рисунок 4 – Локальные поглотители энергоэффективной конструкции пространства взаимодействия ЛБВ

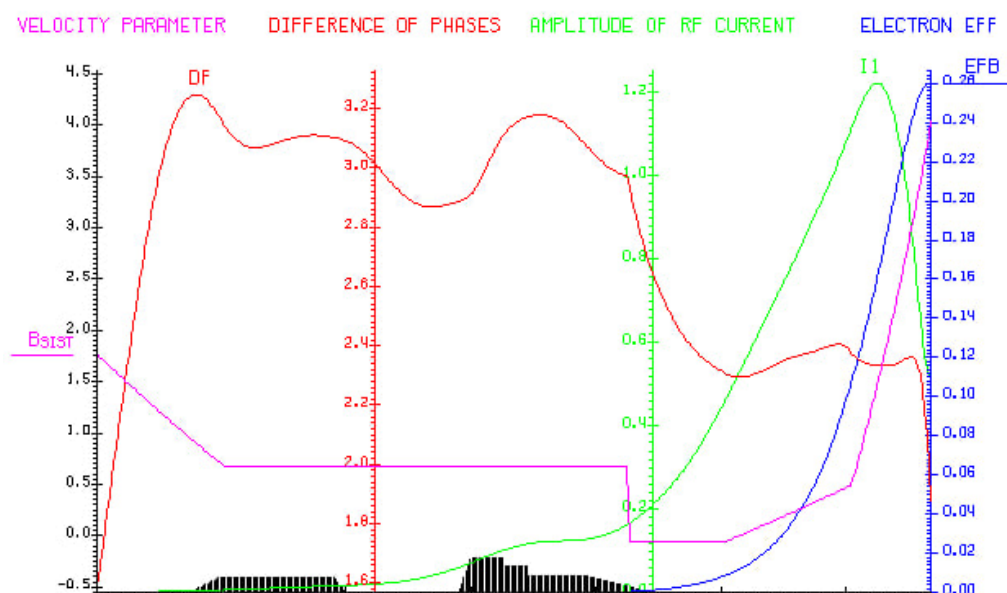


Рисунок 5 – Результат расчёта энергоэффективной конструкции пространства взаимодействия ЛБВ

стей на ступенях коллектора было выбрано программное обеспечение «Лестница». На рисунке 6 представлена потребляемая мощность коллектора. На рисунке 7 представлены выделяемые мощности на каждой ступени коллектора.

На рисунке 6 видно, что потребляемая мощность равна 265,66 Вт, что не превышает предельное допустимое значение равное 268,2 Вт.

Из рисунка 7 можно сделать вывод, что сумма выделяемых мощностей стала меньше относительно базовой конструкции.

```

ENTER A NAME OF PARTICLES ENERGY FILE
35
VALUE OF ELECTRON EFFICIENCY, INTERACTION EFFICIENCY
MAX TECHNICAL EFFICIENCY    MAX COLLECTORS EFFICIENCY
ELECTRONIC EFFICIENCY    .260
INTERACTION EFFICIENCY    .307
HIGH FREQUENCY LOSSES    .047
1ST OVERALL EFFICIENCY    .4627
    COLLECTOR EFFICIENCY    .6324
    CONSUME POWER (W)    393.35
2ST OVERALL EFFICIENCY    .5605
    COLLECTOR EFFICIENCY    .7739
    CONSUME POWER (W)    324.74
3ST OVERALL EFFICIENCY    .6467
    COLLECTOR EFFICIENCY    .8633
    CONSUME POWER (W)    281.41
4ST OVERALL EFFICIENCY    .6851
    COLLECTOR EFFICIENCY    .8957
    CONSUME POWER (W)    265.66

```

Рисунок 6 – Потребляемая мощность коллектора

```

RETURN TO THE BEGINNING OF CALCULATION (y/n)
n
ENTER
THE NUMBER OF COLLECTOR STAGES
4
TERMAL LOAD ON STAGES (WT)
    1CT.    3.35
    2CT.    15.97
    3CT.    5.60
    4CT.    5.01
NUMBER OF STAGES 4
VK(REL. UN.)    .5619    .4496    .2000    .0102
VK(VOLT)    3146.8    2517.5    1120.0    57.2
IH(L(R(EL.UN.)    .0000
IH(L(MA)    .0
I1(REL.UN.)    .190
I1(MA)    23.69
I2(REL.UN.)    .540
I2(MA)    67.45
I3(REL.UN.)    .146
I3(MA)    18.21
I4(REL.UN.)    .125
I4(MA)    15.64
CALCULATION FOR ANOTHER POTENCIALS (y/n)

```

Рисунок 7 – Выделяемые мощности на каждой ступени коллектора

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе выполнения дипломной работы была исследована проблема минимизации выделяемой тепловой мощности коллекторного узла ЛБВ, предназначенной для применения в космических аппаратах с акцентом на оптимизацию конструкции замедляющей системы. Проведённый анализ подтвердил, что геометрия ЗС играет ключевую роль в распределении электромагнитных полей и энергии вдоль структуры, что напрямую влияет на мощность, выделяемую на ступенях коллектора. Корректировка профиля замедляющей системы обеспечила снижение кинетической энергии электронов на входе в коллектор, что уменьшило тепловую нагрузку на его ступени.

Результаты работы демонстрируют, что управление геометрическими параметрами ЗС остаётся мощным инструментом для снижения выделяемой тепловой мощности коллектора ЛБВ без ущерба для их выходных характеристик.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Трубецков Д.И., Храмов А.Е. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для физиков. — М.: Физматлит, 2003. — Т. 1. — 496 с.
- 2 Трубецков Д.И., Вдовина Г.М. Лампа с бегущей волной (история в лицах и судьбах) // УФН. — 2020. — Т. 190. — С. 543–556.
- 3 Шевчик В. Н., Григорьев М. А. Электронные приборы сверхвысоких частот. 2014.
- 4 Силин Р. Периодические волноводы. «Сов. радио», Москва, 2002.
- 5 Цейтлин М. Б., Кац А. М. Лампа с бегущей волной. «Сов. радио», Москва, 1964.
- 6 Денисов А. Н. Влияние секционирования на мощность насыщения ЛБВ. «Радиотехника и электроника», 1961, т. 6, № 9, стр. 1585.
- 7 Геккер И. Р. Повышение КПД электронных приборов СВЧ путем торможения электронов в коллекторе. Диссертация ИРЭ АН СССР, 1959.
- 8 Sterzer F. Improvement of traveling-wave tube efficiency trough collector potential depression. IRE Trans., 1958, v. ED-5, № 9, p. 300.
- 9 Роговин В. И. Многоступенчатые коллекторы для ламп бегущей волны / В. И. Роговин, С. О. Семенов // Радиотехника. — 2002. — № 2. — С. 57 – 62.
- 10 Роговин В. И. Расчет характеристик спутниковой ЛБВ Ka -диапазона с высоким техническим ЛБВ и охлаждением коллектора излучением / В. И. Роговин, С. О. Семенов, И. П. Медведков // Электронная техника. — 2020. — С. 37 – 47.