

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


Кафедра электроники, колебаний и волн

**Клистрон, как прибор с резонансным взаимодействием**

**АВТОРЕФЕРАТ БАКАЛАВРСКОЙ РАБОТЫ**

Студента 4 курса 4031 группы  
направления 03.03.03 «Радиофизика»  
Института Физики  
Грунтовского Дмитрия Алексеевича

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

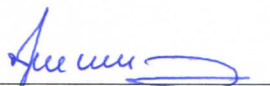


дата, подпись

08.06.2026

В.Н. Титов

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



- дата, подпись

08.06.2026г.

С.В. Гришин

Саратов 2026

## **Введение**

Приборы вакуумной СВЧ электроники являются актуальными генераторами и усилителями в диапазоне от единиц до сотен гигагерц. Среди них приборы с резонансным взаимодействием выделяются как относительно простые в технологическом плане устройства, находящие применение для генерации и усиления сигналов с узкополосным спектром. Специалист в области электроники СВЧ должен понимать суть физических процессов и владеть основными понятиями, методами и подходами, применяемыми в разработке подобных устройств. Таким образом актуальность данного исследования заключается в теоретическом и экспериментальном исследовании пролетного и отражательного клистрона как приборов с резонансным взаимодействием.

**Цель** настоящей квалификационной работы заключается в освоении основных подходов и методов электроники СВЧ для систем с резонансным взаимодействием на примере пролетного и отражательного клистрона.

В рамках данной работы были поставлены и выполнены следующие **задачи**:

- Ознакомление с основами классической аналитической теории пролетного и отражательного клистрона;
- Проведение экспериментального исследования отражательного клистрона, включая определение основных характеристик и параметров прибора;
- Ознакомление с основными методами численного моделирования приборов О-типа с резонансным взаимодействием (метод комплексных амплитуд, частиц в ячейках);
- Осуществление численного моделирования режимов генерации. Сравнение результатов моделирования с экспериментальными данными и аналитическими оценками.

## Основное содержание работы

В первом разделе приведены определения и схемы пролётного и отражательного клистрона.

*Пролётный клистрон* — электровакуумный прибор О-типа с резонансным взаимодействием. В основном, он используется как усилитель мощности или напряжения (примечания 1). Пролётный клистрон — узкополосный прибор, то есть имеет довольно узкую полосу пропускания.

*Отражательный клистрон* — прибор О-типа, вместо коллектора которого установлен отражатель электронного потока. Обладая отрицательным потенциалом, отражатель создаёт замедляющее поле, оно способно не только замедлять, но и разворачивать частицы с отрицательным зарядом. Отражаясь, электроны возвращаются и возбуждают колебания в резонаторе на его резонансной частоте. Отражательный клистрон используется как генератор СВЧ-колебаний. Резонатор играет роль группирователя, а также вывода СВЧ-энергии.

Во втором разделе рассматривается классическая теория клистрона.

В первой части представлены выражения, объясняющие каким образом происходит группировка электронов по скорости, а также рассматривается случай  $\tau \ll T$ , называемый условием кратковременного взаимодействия.

Во второй части объясняется каким образом происходит группировка электронов по плотности.

В третьей части объясняются соотношения в ВЧ-зазорах выходных резонаторов. Рассматривается как получить коэффициент усиления пролётного клистрона, в зависимости от входных параметров.

В четвёртой части рассматриваются процессы, происходящие в отражательном клистроне – влияние ускорения, придаваемое отражателем, на электронный поток; уравнение кинематического движения электронов; условие фазового синхронизма.

В третьем разделе представлено экспериментальное изучение, а также моделирование отражательного клистрона.

В первой части проводится определение основных характеристик и параметров прибора.

При заданных параметрах:

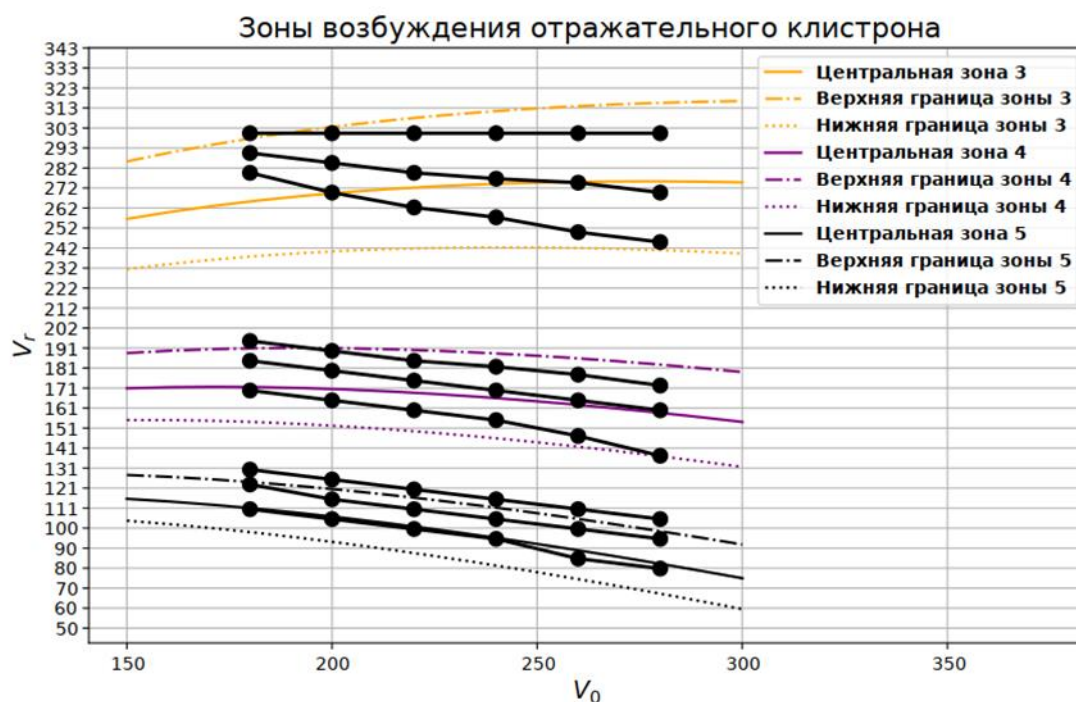
Модель клистрона: К – 54;

Расстояние между второй сеткой резонатора и отражателем:  $D = 2$  мм;

Расстояние между сетками резонатора:  $d = 0,2$  мм;

Частота колебаний:  $f = 9,2307$  ГГц

приводится расчёт идеальных зон генерации отражательного клистрона и сравнение их с экспериментально полученными зонами генерации:



**Рис. 1** Экспериментальные (чёрные) и теоретические (цветные: жёлтый, фиолетовый, серый) зоны возбуждения

Во второй части приводится расчёт характеристик отражательного клистрона методами комплексных амплитуд и частиц в ячейках

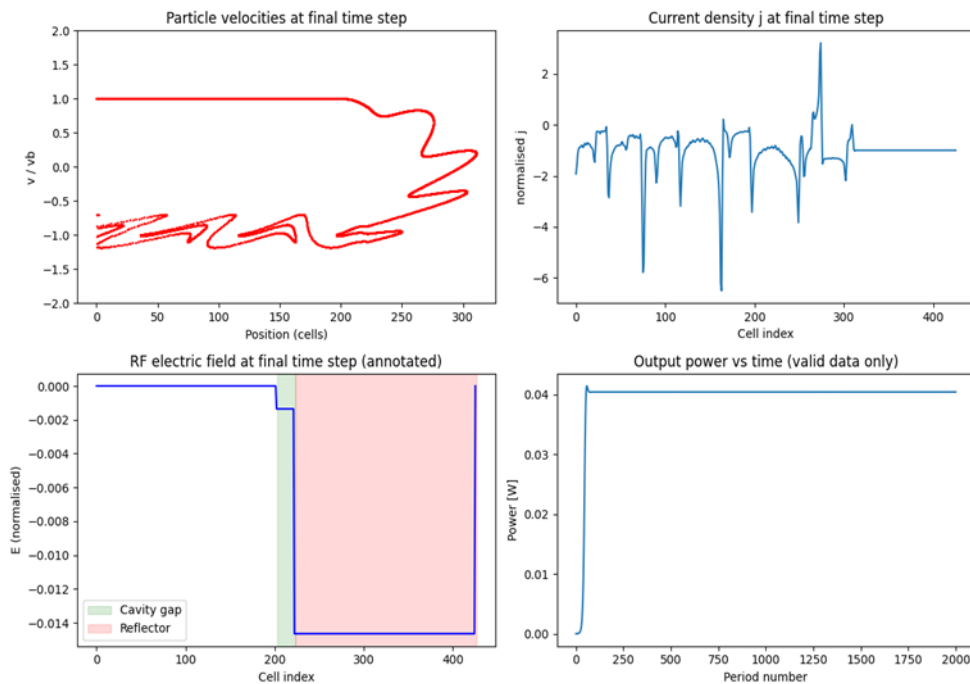
а) Моделирование отражательного клистрона и расчёт мощности от потенциала отражателя:

В основе программного кода, используемого для моделирования, лежит упрощённое одномерное нестационарное уравнение возбуждения:

$$\frac{dC_s}{dt} + \frac{\omega_0 C_s}{2Q_s} = - \frac{\omega_0 Z_0 M}{2V_0} I_\omega(x, t),$$

где  $C_s$  — безразмерная комплексная амплитуда,  $\omega_0$  — несущая частота,  $Q_s$  — нагруженная добротность,  $V_0$  — ускоряющее напряжение,  $I_\omega$  — первая гармоника сгруппированного тока,  $Z_0$  — характеристическое сопротивление резонатора.

Используя программу (см. Приложение 1) для численного моделирования отражательного клистрона, можно получить графики зависимостей (Рис.2)



**Рис. 2** Моделирование отражательного клистрона при ускоряющем напряжении  $V_0 = 150$  В

И) а) Нормированной скорости от номера ячейки на последнем временном шаге:

$$\frac{v}{v_b}(\text{position}(\text{cells})).$$

б) Нормированной плотности тока от индекса ячейки на последнем временном шаге:

normalised  $j(\text{cell index})$ ,

в) Нормированного электрического поля отражателя от индекса ячейки на последнем временном шаге:

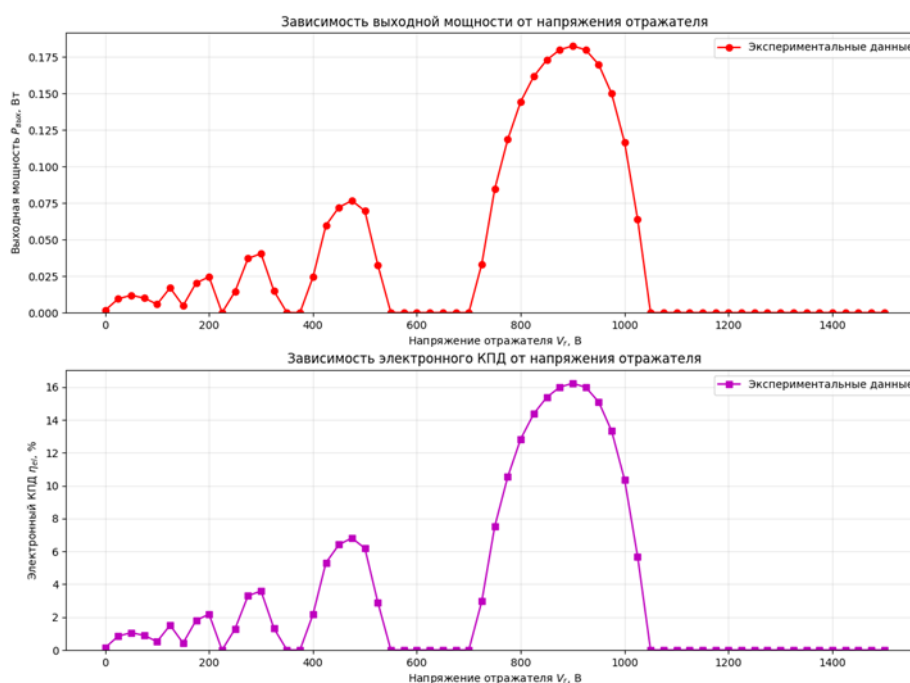
normalised  $E(\text{cell index})$

г) Выходной мощности от времени (номера периода СВЧ колебаний):

Power [W](Period Number)

Устанавливая напряжение на отражателе  $V_r = 300$  В, снимались для различных значений ускоряющих напряжений  $V_0 = 150$  В различные графики I(a–г):

II) Далее, изменяя напряжение на отражателе  $V_r$  в диапазоне  $[0, 1500]$  получим (см. Приложение 2) набор графиков зависимости выходной мощности от напряжения на отражателе ( $P(V_r)$ ), а так же зависимостей электронного КПД от напряжения на отражателе (при различных значениях ускоряющего напряжения  $V_0$ )



**Рис. 3** Зависимость выходной мощности  $P_{\text{вых}}$ , Вт от напряжения на отражателе  $V_r$ , В, при заданном ускоряющем напряжении  $V_0 = 150$  В

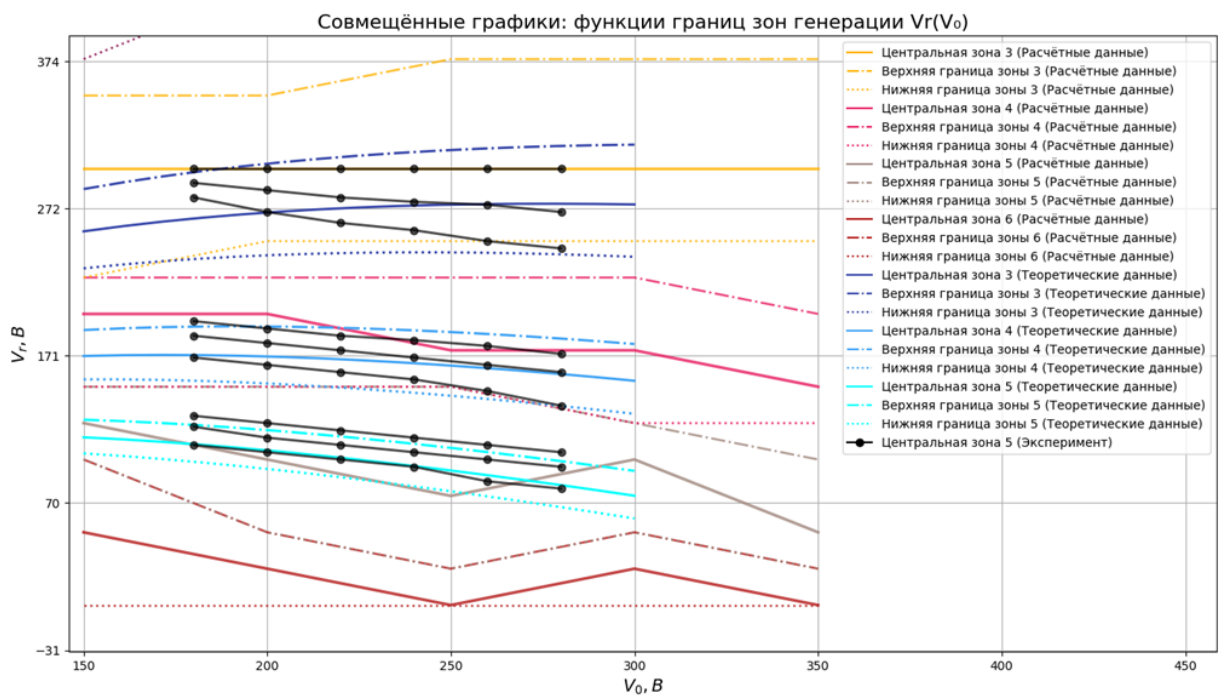
б) Построение зон генерации и сравнение их с экспериментальными и теоретическими данными.

Используя данные зависимостей,  $P_{\text{вых}}(V_r)$ , будем подбирать значения  $V_0$ , чтобы получить зависимости  $V_r(V_0)$  для крайних и центральных значений зон генерации (Рис.3)

Построение зон генерации происходит с помощью кода (см. Приложение 3)

На графике (Рис. 4) данные, полученные путём расчётов по коду соответствуют цветам тёплого цветового оттенка (красный, жёлтый) — данные, полученные путём моделирования. Цветам холодного цветового оттенка (синий, бирюзовый) соответствуют графики теоретически рассчитанных зон генерации.

Чёрным цветом обозначены графики экспериментально полученных зон генерации отражательного клистрона.



**Рис. 4** Зоны генерации отражательного клистрона для данных моделирования (тёплые цвета (красный, жёлтый)), теоретических данных холодные цвета (синий, бирюзовый), экспериментально полученных данных (чёрный)

## Заключение

В ходе выполнения бакалаврской работы были изучены основы классической аналитической теории пролетного и отражательного клистрона и получены следующие основные результаты:

1. В двухрезонаторном клистроне при заданной добротности  $Q = 1000$  ширина полосы  $\Delta f$  не может быть больше 1% от резонансной частоты без серьёзных потерь мощности сигнала на основной частоте.
2. Сужение зон генерации наблюдаемое на рис. 3.15, можно объяснить тем, что при снижении по модулю напряжения на отражателе  $|V_r|$ , растёт время пролёта электронов от резонатора до отражателя  $t_{np}$ , из-за этого нарушается условие фазового синхронизма:  $t_{np} = \left(n + \frac{3}{4}\right) T$ , где  $T$  – период колебаний,  $n$  – номер зоны генерации (0, 1, 2, ...). После нарушения фазового синхронизма, даже небольшие изменения потенциала отражателя  $V_r$  ведут к значительным сдвигам фаз возврата электронов. Часть электронов при этом попадают в ускоряющую фазу, забирая энергию у резонатора.
3. Из-за увеличения времени пролёта усиливается расфазировка электронных сгустков: электроны с разным временем пролёта начинают возвращаться в резонатор в разные моменты периода СВЧ-поля, что приводит к размыванию сгустков.
4. Одновременно возрастает влияние пространственного заряда: кулоновское отталкивание между электронами внутри сгустка усиливается, дополнительно нарушая его компактность. При моделировании этот эффект не всегда учитывается, поскольку его расчёт требует сложных самосогласованных методов.
5. Размывание сгустков снижает эффективность передачи энергии от электронного потока к СВЧ-полю резонатора. Это ограничивает допустимый диапазон рабочих напряжений на отражателе, что, в

свою очередь, вызывает сужение зон генерации при уменьшении  $|V_r|$ .

6. Так как графики зон генерации строились с параметрами близкими к параметрам отражательного клистрона К-54, но не все точные параметры клистрона доступны в открытой литературе, соотношение границ зон генерации при расчёте по коду (см. Приложение 1) может отличаться от теоретически рассчитанных, однако, в целом, согласуется с этими данными. Это может говорить о применимости данной модели отражательного клистрона методом частиц в ячейках и комплексных амплитуд.

### Список литературы.

- [1] «КЛИСТРОНЫ» перевод с английского под редакцией Е. Д. Науменко, издательство «Советское радио», Москва — 1952;
- [2] В. Н. Шевчик, Д.И. Трубецков «АНАЛИТИЧЕСКИЕ МЕТОДЫ РАСЧЕТА В ЭЛЕКТРОНИКЕ СВЧ», издательство «Советское радио», Москва — 1970;
- [3] А. З. Хайков «КЛИСТРОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ», издательство «Связь», Москва — 1974;
- [4] Клистрон, Wikipedia — <https://ru.wikipedia.org/wiki/Клистрон>