



**Кафедра Сверхвысокочастотной  
и Квантовой Радиотехники**

---

**ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ( ТУСУР )**

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА**

Руководство к лабораторной работе по дисциплинам  
“Микроволновые приборы и устройства”, “Электронные СВЧ и  
квантовые приборы” “Основы СВЧ электроники”  
для специальности 210105 (200300) – «Электронные приборы и устройства»,  
210100 -«Электроника и микроэлектроника»,  
210302 – «Радиотехника»

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

ТОМСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ СИСТЕМ  
УПРАВЛЕНИЯ И РАДИОЭЛЕКТРОНИКИ ( ТУСУР )

Кафедра сверхвысокочастотной и квантовой  
радиотехники ( СВЧиКР )

УТВЕРЖДАЮ  
заведующий кафедрой  
\_\_\_\_\_С.Н.Шарангович

## **ИССЛЕДОВАНИЕ ОТРАЖАТЕЛЬНОГО КЛИСТРОНА**

Руководство к лабораторной работе по дисциплинам  
“Микроволновые приборы и устройства”, “Электронные СВЧ и  
квантовые приборы” “Основы СВЧ электроники”  
для специальности 210105 (200300) – «Электронные приборы и устройства»,  
210100 -«Электроника и микроэлектроника»,  
210302 – «Радиотехника»

Разработчик  
доц. каф.СВЧиКР  
Ж.М.Соколова  
доц. каф. СВЧ и КР  
Е.В .Падусова

## СОДЕРЖАНИЕ

I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ.....	4
2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ.....	4
2.1. Принцип работы и условие возбуждения. Зоны генерации.....	4
2.2. Выходная мощность клистрона, коэффициент полезного действия, пусковой ток.....	10
2.3 Электронная настройка клистрона .....	12
3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ.....	15
4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ЗАДАНИЕ .....	17
5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ .....	19
6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА .....	20
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ .....	20

## I. ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Изучение физических процессов, происходящих в отражательном клистроне.

Изучение экспериментальной схемы для исследования отражательного клистрона.

Экспериментальное снятие зависимостей мощности и частоты от напряжений на электродах клистрона. Определение величины пускового и рабочего токов.

## 2. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ТЕОРИИ

### 2.1. Принцип работы и условие возбуждения. Зоны генерации.

Отражательный клистрон представляет собой маломощный генератор колебаний сверхвысоких частот [1,2]. Благодаря ряду достоинств (простота конструкции и эксплуатации, малый вес и габариты, возможность механической и электронной перестройки), отражательный клистрон получил широкое распространение в аппаратуре СВЧ диапазона, в частности, в качестве гетеродинов радиолокационных приемников. Схема устройства отражательного клистрона показана на рис.1. Оксидный катод косвенного накала К помещен внутри полого цилиндра У, служащего для регулировки силы тока пучка и для его фокусировки. В зависимости от необходимой силы тока пучка на этот электрод подается отрицательное или положительное напряжение. Ускоряющее напряжение  $U_0$  подается на сделанный в виде сетки ускоряющий электрод А, связанный с резонатором; в некоторых конструкциях специального ускоряющего электрода не делают и напряжение прикладывает непосредственно к резонатору. Схема статического распределения потенциала в междуэлектродном пространстве приведена на рис.2. Резонатор выполняет функции колебательной системы генератора и обычно имеет вид тороида. Центральная часть резонатора выполняется в виде зазора с сетками или дисков с отверстиями. Благодаря такой конструкции резонатора электрическое высокочастотное поле преимущественно сконцентрировано в зазоре резонатора, зазор является емкостью колебательного контура.

Электронный поток, ускоряясь, полем в пространстве катод-резонатор, достигает емкостного зазора резонатора и подвергается кратковременному действию электрического высокочастотного поля.

После выхода из резонатора, электронный поток оказывается промодулированным по скорости. За резонатором на расстоянии  $D$  от сеток расположен отражательный электрод  $R$ .

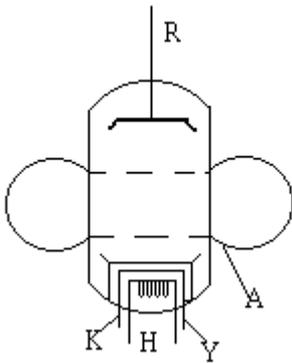


Рис.1.

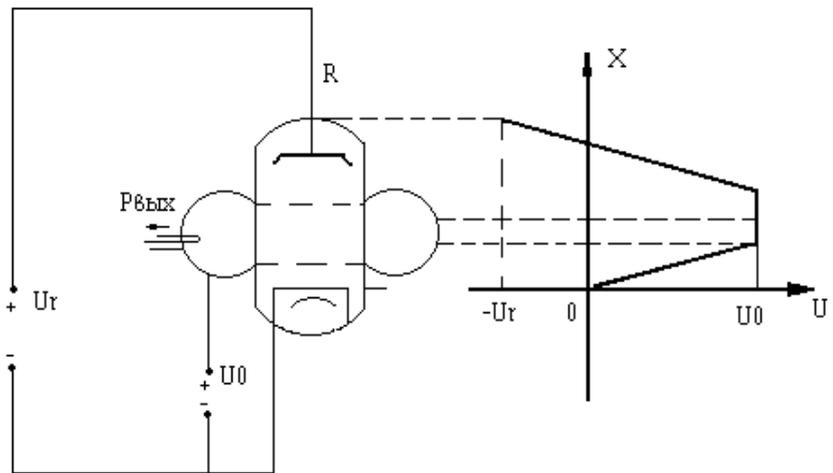


Рис.2.

На этот электрод подается достаточно большое отрицательное, относительно катода, напряжение  $U_R$  вследствие чего между резонатором и отражателем создается тормозящее электрическое поле.

Под действием тормозящего поля электроны останавливаются, не доходя до отражателя, возвращаются обратно ("отражаются") в резонатор, причем, так как электроны имеют различные скорости и различные фазы выхода из резонатора и пролета, то при движении к отражателю и обратно происходит их группировка.

При правильном выборе напряжения  $U_R$  электроны возвращаются в резонатор уплотненными группами в те моменты времени, когда переменное поле резонатора является для них тормозящим. Вследствие этого электроны отдают часть своей кинетической энергии полю, за счет чего в резонаторе поддерживаются незатухающие высокочастотные колебания. Отдавшие энергию электроны, попадают на резонатор.

Рассмотрим процесс группирования в отражательном клистроне, воспользовавшись пространственно-временными диаграммами, рис.2.3. В нижней части рисунка показано синусоидальное напряжение на сетках резонатора  $U_1 = U_{m1} \cdot \sin(\omega \cdot t)$

В положительные полупериоды переменное поле между сетками резонатора ускоряет электроны, движущиеся от катода к отражателю,

и тормозит электроны, возвращающиеся от отражателя в резонатор. Во время отрицательных полупериодов действие поля будет обратным - замедляющим для электронов, идущих от катода, и ускоряющим для возвращающихся от отражателя электронов.

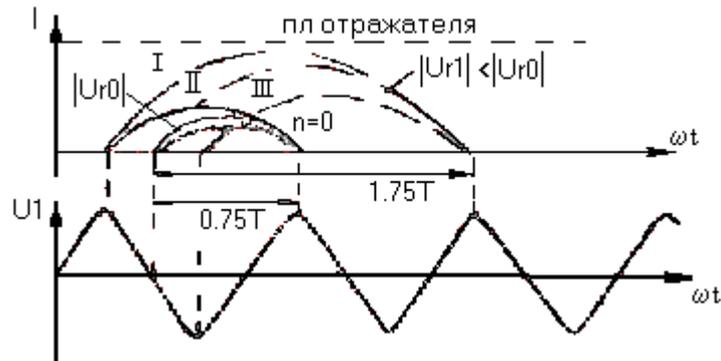


Рис.3. Графики движения электронов в пространстве резонатор - отражатель

В верхней части рис.3 даны графики движения  $r=\psi(t)$  в пространстве между резонатором и отражателем для электронов, вылетающих из резонатора в различные моменты времени.

Электрон, пролетающий через резонатор при наибольшем ускоряющем напряжении на его сетках, будет иметь наибольшую скорость  $V_{\max}$  и сможет глубоко проникнуть в тормозящее поле отражателя (кривая I, рис.3).

Заторможенный вблизи отражателя этот электрон вернется обратно в резонатор, причем, на его движение к отражателю и обратно потребуется наибольшее по сравнению с другими электронами время. Электрон, пролетающий через резонатор в тот момент, когда напряжение на сетках резонатора проходит через нуль, изменяясь от положительных значений к отрицательным, выйдет из резонатора с неизменной скоростью  $V_0$  и пройдет в тормозящем поле меньший путь (кривая II).

Наименьшее расстояние от резонатора до отражателя (кривая III) будет проходить электрон, пролетающий через резонатор при максимальном отрицательном значении поля и имеющий наименьшую скорость  $V_{\min}$ . Но этот электрон находится в пути меньшее время. Возвращаться в резонатор электроны будут все вместе, как показано на рис. 3.

Таким образом, группировка электронов в отражательном клистроне происходит вокруг электронов, пролетавших резонатор при нулевом значении переменного поля в резонаторе, при изменении

его с ускоряющего на тормозящее. Возвращающиеся группы электронов должны входить в резонатор при наибольшем тормозящем поле резонатора (рис.3).

<sup>1</sup>Среднее время пролета электронов в отражательном клистроне от резонатора до отражателя и обратно должно равняться целому числу периодов переменного напряжения резонатора плюс 0,75 периода:

$$\tau_{np} = T \cdot (n + 0.75) \quad (2.1)$$

где  $n=0, 1, 2$

Пользуясь формулой (2.1), можно определить, при каких напряжениях на электродах отражательного клистрона возможно возбуждение колебаний. Для этого необходимо найти время пролета электронов в зависимости от ускоряющего напряжения  $U_0$  и напряжения отражателя  $U_R$ .

Найдем это время для электронов, являющихся центрами групп, предполагая тормозящее поле между резонатором и отражателем однородным. Так как разность потенциалов между резонатором и отражателем равна  $U_0 + |U_R|$ , то напряженность тормозящего поля будет

$$E = \frac{1}{D} \cdot (U_0 + |U_R|) \quad (2.2)$$

Электрон, движущийся вдоль силовых линий этого поля, будет испытывать ускорение, равное частному от деления силы, действующей на электрон, на массу электрона, т.е.

$$a = \frac{e}{m} \cdot E \quad (2.3)$$

Так как электрон начинает свое движение со скоростью

$$V_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot e}{m} \cdot U_0},$$

то путь его будет равен

$$S = V_0 \cdot \tau_{np} + 0.5 \cdot a \cdot \tau_{np}^2$$

В результате движения от резонатора к отражателю и обратно, пройденный электроном путь равен нулю.

$$V_0 \cdot \tau_{np} + 0.5 \cdot a \cdot \tau_{np}^2 = 0$$

Откуда находим  $\tau_{np}$  для двух значений:

- 1)  $\tau_{np}=0$ - для электронов, которые ещё не начинали своего движения;
- 2)  $\tau_{np} = \frac{2 \cdot V_0}{a}$  - для электронов, вернувшихся в резонатор.

Подставляя во второе решение выражения (2.2) и (2.3), найдем время пролета электронов от резонатора к отражателю и обратно.

$$\tau_{np} = \frac{2 \cdot V_0 \cdot m}{e \cdot E} = 6,7 \cdot 10^{-8} \cdot \frac{D \cdot \sqrt{U_0}}{U_0 + |U_R|} \quad (2.4)$$

Угол пролета электронов будет равен

$$\Theta = \omega \cdot \tau_{np} = \frac{4 \cdot \pi \cdot 10^3}{\lambda} \cdot \frac{D \cdot \sqrt{U_0}}{U_0 + |U_R|} \quad (2.5)$$

Здесь  $\lambda$  - длина волны в сантиметрах.

Так как из формулы (2.1) угол пролета должен равняться

$$\Theta = \omega \cdot T \cdot (n + 0.75) = 2\pi (n + 0.75) \quad (2.6)$$

то, приравнивая формулы (2.5) и (2.6), получим

$$\frac{4\pi \cdot 10^3 \cdot D \sqrt{U_0}}{\lambda \cdot (U_0 + |U_R|)} = 2\pi (n + 0.75) \quad (2.7)$$

или

$$|U_R| = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot D}{(n + 0.75) \cdot \lambda} \cdot \sqrt{U_0} - U_0 \quad (2.7a)$$

Формула (2.7) определяет условие возбуждения колебаний в отражательном клистроне. Видно, что в клистроне при известных  $D$  и  $\lambda$  колебания будут возбуждаться не при любых значениях  $U_0$  и  $U_R$ , а лишь при тех, которые удовлетворяют формуле при  $n = 1, 2, 3 \dots$  Можно построить в координатах  $U_0$ ,  $U_R$  области, называемые зонами возбуждения, используя соотношение (2.7a) для различных значений  $n$ . Области возбуждения объясняются тем, что сгусток электронов необязательно должен подходить к зазору, когда поле в нем будет максимально тормозящим. Чтобы в резонаторе поддерживались незатухающие колебания, достаточно, чтобы в среднем за период энергия, теряемая в стенках резонатора и в нагрузки, восполнялась энергией, отдаваемой полю СВЧ электронами при торможении. Очевидно, что это может иметь место и при

некотором отклонении угла  $\Theta$  в пространстве торможения от оптимального значения (2.6) на величину  $\pm 0.25 \cdot 2\pi$ . Тогда верхняя и нижняя границы зоны возбуждения будут определяться формулами

$$|U_R|_{\text{верх}} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot D}{(n+0.5) \cdot \lambda} \cdot \sqrt{U_0} - U_0 \quad (2.7\text{в})$$

$$|U_R|_{\text{нижн}} = \frac{2 \cdot 10^3 \cdot D}{(n+1) \cdot \lambda} \cdot \sqrt{U_0} - U_0$$

Кроме зон возбуждения в отражательном клистроне существуют зоны генерации (зависимости колебательной мощности от напряжения), которые могут быть установлены или одновременным подбором напряжений  $U_0$  и  $U_R$  или изменением какого-либо одного из этих напряжений при другом напряжении постоянном. На практике чаще пользуются изменением отрицательного напряжения на отражателе  $U_R$ , так как в цепи отражателя почти не потребляется мощность. На рис.4 показана типичная зависимость колебательной мощности от напряжения отражателя при  $U_0 = \text{Const}$ .

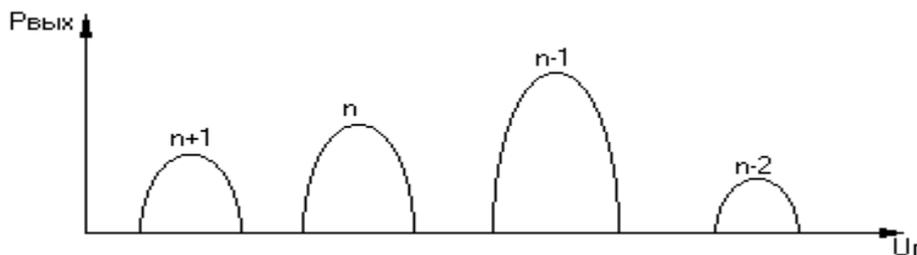


Рис.4. Зависимости колебательной мощности от напряжения отражателя при  $U_0 = \text{const}$  - зоны генерации.

В рабочих режимах существующих конструкций отражательных клистронов  $n$  может принимать значения от 5 до 10.

В таблице 2.1 приведены данные некоторых отражательных клистронов.

Таблица 2.1

Параметры некоторых отечественных отражательных клистронов.

Тип	Рабочий Диапазон $\lambda$ , см	Расстояние резонатор - отражатель $D$ , мм	Размер зазора резонатора $d$ , мм	Ускоряющее напряжение $U_0$ , В	Напряжение на отражателе $U_R$ , В	Ток прибора $J_{\text{раб}}$ , мА
К-19	3.15-3.27	2.37	0.4	150-300	-(10-400)	26
К-20	3.13-3.50	2.24	0.44	150-300	-(10-400)	23
К-54	3.15-3.32	2.0	0.2	150-300	-(10-400)	30
К-72	3.12-3.50	2.20	0.25	150-300	-(10-400)	30

## 2.2. Выходная мощность клистрона, коэффициент полезного действия, пусковой ток.

Как показывает анализ [3], выходная мощность клистрона при оптимальных углах пролета равна

$$P_{\text{вых}} = \frac{K \cdot J_0 \cdot U_0}{\Theta} \cdot \left[ 2 \cdot \mathfrak{K} \cdot \mathfrak{Z}_1(\mathfrak{K}) - \frac{G_p}{G_0} \cdot \mathfrak{K}^2 \right] \quad (2.8)$$

где  $\mathfrak{K} = \frac{M \cdot U_{m1} \cdot \Theta}{2 \cdot U_0}$  - параметр группировки;

$\mathfrak{Z}_1(\mathfrak{K})$  - функция Бесселя первого рода и первого порядка;

$\Theta = \Theta_1 - \Theta_2$  - разность углов пролета в пространстве тормозящего поля и в пространстве между сетками резонатора;

$G_p$  - активная проводимость резонатора;

$G_0 = \frac{K \cdot M^2 \cdot J_0 \cdot \Theta}{2 \cdot U_0}$  - предельная проводимость электронного потока

$M$  - коэффициент взаимодействия высокочастотного зазора с электронным потоком;

$K$  - коэффициент прозрачности сетки, имеющий значения 0,5 - 0,85.

Для возникновения колебаний в клистроне необходимо, чтобы в

(2.8) величина  $2 \cdot \kappa \cdot \mathfrak{Z}_1(\kappa)$  была больше  $\frac{G_p}{G_0} \cdot \kappa^2$ .

Это условие начинает выполняться при некотором значении тока  $J_{0\text{пуск}}$ , которое может быть названо пусковым:

$$J_{0\text{пуск}} = \frac{U_0 \cdot G_p}{M^2 \cdot \pi \cdot (n + 0.75)}$$

На рисунке 5 изображена зависимость выходной мощности клистрона от тока пучка для различных зон генерации.

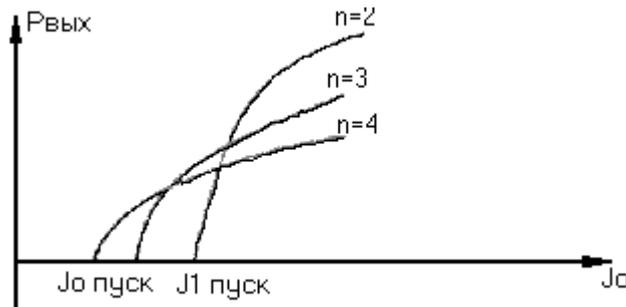


Рис.5. Зависимости выходной мощности клистрона от тока пучка

Для определения максимально возможной мощности и КПД клистрона формула (2.8) можно придать иной вид

$$P_{\text{вых}} = M \cdot K \cdot J_0 \cdot U_{m1} \cdot \mathfrak{Z}_1(\kappa) - 0.5 \cdot G_p \cdot U_{m1}^2 \quad (2.9)$$

Возможную максимальную мощность клистрона можно найти на условия

$$\frac{\partial P_{\text{вых}}}{\partial \Theta} = 0 \quad \text{при} \quad U_{m1} = \text{const} ,$$

что дает

$$\frac{\partial \mathfrak{Z}_1(\kappa)}{\partial \Theta} = 0 \quad \text{или} \quad \mathfrak{Z}_1(\kappa) = \text{max} ,$$

откуда  $\kappa = 1.84$  - есть параметр группировки, при котором выходная мощность клистрона максимальна. Можно также показать [3], что оптимальная величина  $G_p/G_0 = 0.317$ .

При  $G_p/G_0 = 0.317$  и  $\kappa = 1.84$  из (2.8) с учетом (2.6) получаем значение наибольшей выходной мощности клистрона в виде

$$P_{\text{выхMAX}} = \frac{K \cdot J_0 \cdot U_0}{\Theta} = \frac{K \cdot J_0 \cdot U_0}{2\pi(n + 0.75)} \quad (2.10)$$

Формула (2.10) показывает, что выходная мощность клистрона растет с уменьшением номера зоны генерации и при  $n = 0$  должна быть максимальна. В действительности этого не наблюдается. Максимум выходной мощности достигается при  $n > 0$  (рис.4). Это объясняется тем, что хотя колебательное напряжение  $U_{m1}$  и растет с ростом выходной мощности, но потери в резонаторе растут пропорционально  $U_{m1}^2$  (рис.6) и поэтому максимум будет при некотором промежуточном значении  $U_{m1np}$ , для которого номер зоны  $n$  отличен от нуля.

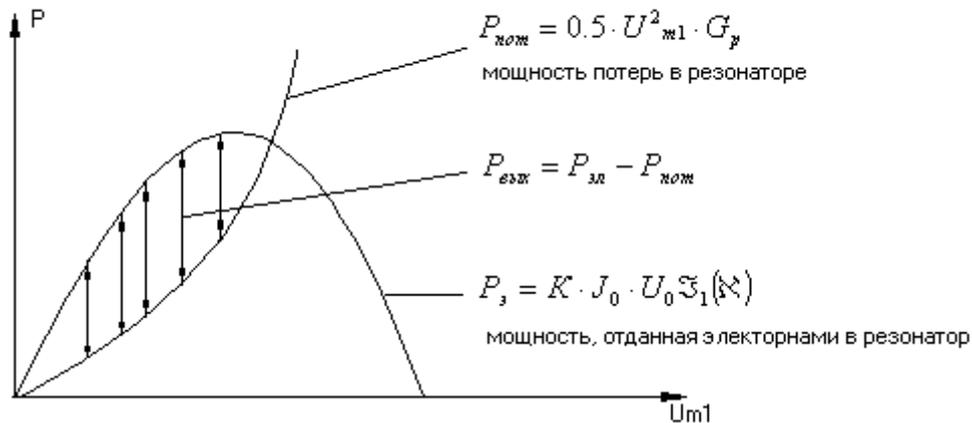


Рис.6. Баланс мощностей в отражательном клистроне

Из (2.10) максимальный коэффициент полезного действия получается равным

$$\eta_{\max} = \frac{P_{\text{выхMAX}}}{J_0 \cdot U_0} = \frac{K}{2\pi(n+0.75)}$$

Учитывая, что для клистронов (табл.2.1.) коэффициент прозрачности сеток  $K=0,5$ , получим для КПД при оптимальной мощности в зоне следующие значения

Номер зоны	1	2	3	4
$\eta_{\max}$	4.5%	3%	2%	1.5%

### 2.3 Электронная настройка клистрона

Одним из важнейших параметров отражательных клистронов является зависимость частоты генерируемых колебаний от напряжений на его электродах, называемая электронной настройкой.

Эта зависимость обусловлена тем, что наводимый ток в резонаторе (колебательный ток) может иметь сдвиг по фазе относительно напряжения резонатора, следовательно, может иметь реактивную составляющую, за счет которой изменяются реактивные свойства резонатора клистрона и его резонансная частота. Фаза колебательного тока определяется углом пролета в пролетном пространстве. Когда угол пролета электронов равен  $2\pi(n + 0,75)$ , то наведенный ток и переменное напряжение резонатора совпадают по фазе, реактивная составляющая колебательного тока равна нулю и частота колебаний в резонаторе,  $f_0$ , определяется только параметрами контура  $L_0, C_0$ . Если изменять напряжение отражателя  $U_R$  или резонатора  $U_0$  в небольших пределах, то угол пролета  $\Theta$  перестает быть равным  $2\pi(n + 0,75)$ . В этом случае наводимый в резонаторе ток и переменное напряжение на резонаторе не совпадают по фазе, вследствие чего в резонатор будет вноситься добавочная емкостная или индуктивная проводимость  $B_{эл}$ . Это приведет к изменению частоты клистронного генератора. Связь между частотой автоколебаний, параметрами резонатора и пучка выражается формулой

$$f = f_0 \cdot \left( 1 + \frac{B_{эл}}{2 \cdot G_{эл} \cdot Q_n} \right) \quad (2.11)$$

Для практических целей удобно выразить зависимость частоты генерируемых колебаний от одного из постоянных напряжений, приложенных к электродам клистрона  $f = \phi(U_0)$  или  $f = \psi(U_R)$ . Производить изменение частоты клистрона путем изменения напряжения на резонаторе нецелесообразно, так как в цепи резонатора протекает большой ток. Управление частотой клистрона путем изменения напряжения на отражателе представляет большой интерес, так как при высоком напряжении  $U_R$  ток в цепи отражателя практически равен нулю.

После замены  $\frac{B_{эл}}{G_{эл}}$ , формуле (2.11) можно придать вид

$$f = f_0 \left\{ 1 - \frac{1}{Q_n} \cdot \operatorname{tg} \left[ \frac{2\pi \cdot (n + 0.75)}{U_0 + |U_R|} \Delta U_R \right] \right\} \quad (2.12)$$

здесь  $\Delta U_R$  - изменение напряжения на отражателе относительно напряжения, соответствующего центру зоны генерации -  $U_R$ . Из уравнения (2.12) следует, что частота колебаний в пределах зоны генерации изменяется по закону тангенсоиды (рис.7).

Важными параметрами характеристики электронной настройки являются: **крутизна и диапазон** электронной настройки. Под крутизной электронной настройки понимают изменений частоты генератора при изменении напряжения на отражателе на  $I \text{ В}$  в пределах линейного участка А-Б характеристики (рис.7).

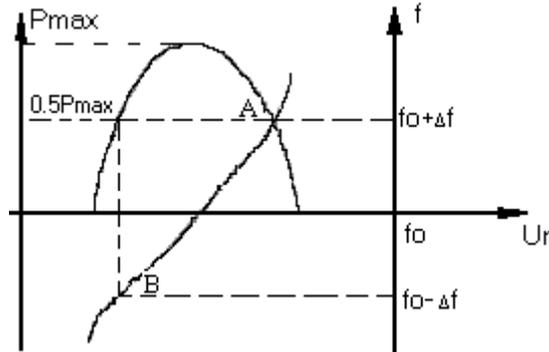


Рис.7. Характеристики выходной мощности и электронной настройки

**Крутизна** электронной настройки связана с добротностью нагруженного резонатора и напряжениями на электродах клистрона соотношением

$$\frac{\partial f}{\partial U_R} = f_0 \cdot \frac{\pi \cdot (n + 0.75)}{Q_H (U_0 + |U_R|)} \quad (2.13)$$

формула (2.13) получается из выражения (2.12) заменой  $tg\beta$  аргументом  $\beta$ , что возможно при значениях  $\beta \leq \frac{\pi}{9}$ . В пределах линейного участка тангенсоиды это выполняется хорошо.

Под **диапазоном** электронной настройки понимают ширину зоны генерации в МГц на уровне половинной мощности, т. е. на линейном участке характеристики электронной настройки. Режим работы отражательного клистрона очень сильно зависит от связи резонатора клистрона с нагрузкой.

### 3. ОПИСАНИЕ ЛАБОРАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Схема лабораторной установки приведена на рис.8. Исследуется клистрон (К-20), основные данные которого приведены выше в табл.2.1.

Установка состоит из блока генератора и блока питания. В блоке

генератора находятся: исследуемый клистрон - У1 в термостате, элементы его настройки (Э1, Э2), направленный ответвитель - Э3, аттенюатор - Э4, частотомер - У5, детекторная секция-У2. Описание работы отдельных элементов СВЧ тракта предложены в [4].

Регулировка величины высокочастотной мощности, отдаваемой клистроном, осуществляется изменением степени погружения высокочастотного вывода в волновод (Э1) – связь с нагрузкой.

Изменение частоты клистрона в значительных пределах осуществляется посредством изменения размера зазора резонатора. Это действие осуществляется ручкой с надписью - ЧАСТОТА, выведенной на панель блока генератора.

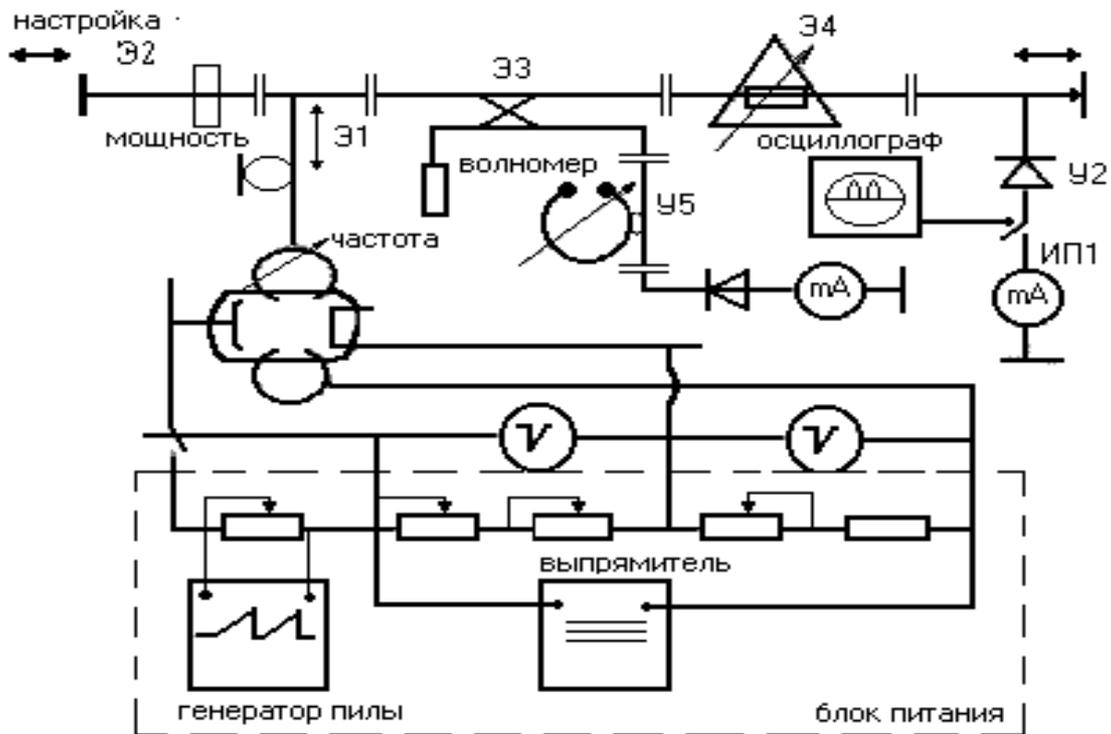


Рис .8 Схема лабораторной установки

Перемещением коротко замыкающего поршня в генераторной секции СВЧ тракта (ручка НАСТРОЙКА) осуществляется дополнительная подстройка клистрона, посредством регулировки фазы отраженной от поршня волны.

Поданная в волновод мощность через регулируемый аттенюатор Э4 поступает на детекторную секцию - У2 для измерения. Индикация частотного резонанса производится по минимуму показания микроамперметра - ИП1, связанного с детекторной головкой У2. Объясняется это тем, что в момент резонанса часть энергии из тракта поступает на частотомер, а на детекторе, соответственно,

уменьшается. На частотомере фиксируется резонанс в значениях  $\alpha$  дел. Абсолютное значение частоты определяется с помощью градуировочного графика (рис.9).

В блоке питания находится выпрямитель, с которого подается напряжение на электроды клистрона; схема, осуществляющая модуляцию напряжения на отражателе; микроамперметр для измерения тока клистрона. Напряжения на отражателе клистрона и резонаторе измеряются вольтметрами, выведенными отдельно. Кроме отрицательного постоянного напряжения в положении ВКЛ. МОДУЛЯТОР на отражатель клистрона подается пилообразное напряжение, а в положении ВЫКЛ. МОДУЛЯТОР на отражателе имеется только постоянное напряжение. Амплитуда пилообразного напряжения регулируется с помощью потенциометра.

Ручка регулировки вынесена на переднюю панель блока питания с надписью ГЛУБИНА МОДУЛЯЦИИ. При подаче на отражатель клистрона пилообразного и постоянного напряжения возникает генерация клистрона, когда сумма мгновенного значения пилообразного напряжения и отрицательного постоянного напряжения оказывается равной напряжению в пределах зоны генерации. Напряжение, подаваемое с детектора У2, просматривается на экране осциллографа и, так как характеристика детектора при малых напряжениях практически квадратичная, изображение на экране осциллографа представляет собой зависимость мощности клистрона  $P_{\text{вых}}$  от модуля напряжения на отражателе  $|U_R|$

Изменяя амплитуду пилообразного напряжения (ручка ГЛУБИНА МОДУЛЯЦИИ), можно изменять число наблюдаемых зон генерации, и используя регулировку НАПРЯЖЕНИЕ ОТРАЖАТЕЛЯ исследовать каждую зону в отдельности. При настройке волномера в резонанс на видео зоны генерации появляется провал, соответствующий частоте настройки волномера.

#### **4. ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ И ЗАДАНИЕ**

**4.1.** Ознакомиться со схемой установки и устройством клистрона (К-20). Ознакомиться с аппаратурой, служащей для измерения длины волны, генерируемой мощности, а также с другими элементами высокочастотного тракта.

**4.2.** Рассчитать и построить по соотношению (2.7в) три зоны возбуждения. Воспользоваться для этого (табл.2.1) паспортными значениями для исследуемого клистрона: длиной волны из указанного диапазона, геометрическими размерами. Расчет провести, изменяя ускоряющее напряжение резонатора от  $0,5U_0$  до  $U_0$ , где  $U_0$ - рабочее напряжение на резонаторе задается преподавателем. Номера зон  $n$ , для которых следует проводить расчет, определяются исходя из рабочего напряжения  $U_0$  и предельно допустимого напряжения на отражателе (формула 2.7, табл. 2.1). (Номер зоны брать не менее 5).

**4.3.** Включить с разрешения преподавателя блок питания клистрона. Для этого вывести полностью аттенуатор А и ВЫКЛ. МОДУЛЯТОР. Включить тумблер СЕТЬ. Прогреть 5 мин. и подать высокое напряжение  $U_c, U_R$

**4.4.** Снять зависимости генерируемой мощности от потенциала отражателя для всех зон генерации при 2-х значениях напряжения

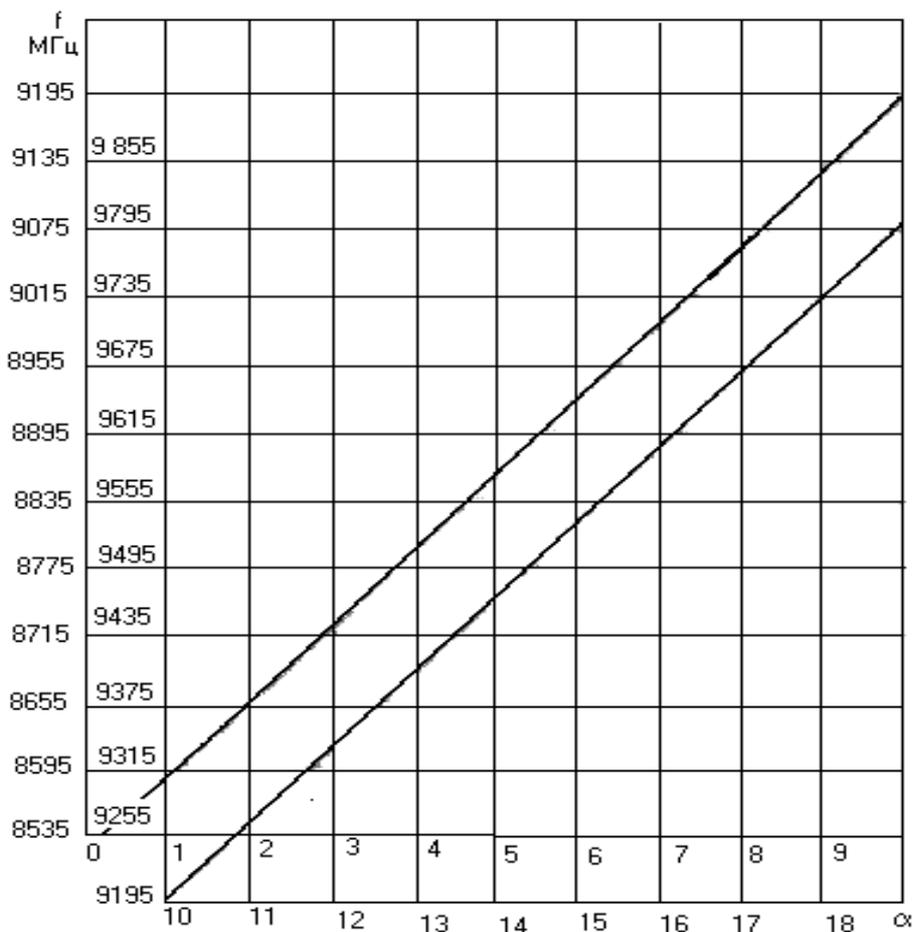


Рис.9. Градуировочный график частотомера

резонатора (напряжение на резонаторе  $U_0$  рекомендуется выбирать в пределах 200-300 В). Отсчет мощности вести в относительных единицах по микроамперметру, соединенному с кристаллическим детектором  $J_{дет} \approx P_{вых}$ . Снятие точек производить в пределах областей генерации возможно чаще. Точно зафиксировать значения  $U_R$ , соответствующие центрам зон генерации, так как они, будут использованы в следующем пункте, а также началу и концу каждой зоны генерации.

**4.5.** Определить номера зон генерации, снятых в п. 4.4. Для этого следует воспользоваться формулой (2.7), преобразовав её к следующему виду

$$(n + 0.75) \cdot (U_0 + |U_{R1}|) = [(n - 1) + 0.75] \cdot (U_0 + |U_{R2}|)$$

$|U_{R1}| < |U_{R2}|$ . Зоне с номером  $n$  соответствует напряжение на отражателе  $U_{R1}$  (напряжение в центре зоны).

**4.6.** Выбрав самую широкую по значениям  $U_R$  зону генерации, снять зависимость частоты от напряжения отражателя, построить график  $f = \psi(U_R)$ . Определить величину крутизны экспериментальной зависимости электронной настройки. Пользуясь формулой (2.13), определить нагруженную добротность клистрона, рассчитать и построить теоретическую кривую электронной настройки по формуле (2.12). Сравнить экспериментальную и теоретическую кривые, сделать выводы.

Определить диапазон электронной настройки, для чего необходимо измерить частоту клистрона в точках зон  $\Delta f$  соответствующих  $0.5P_{max}$ .

**4.7.** Измерить диапазон механической перестройки частоты клистрона. Для этого, поставить ручку ЧАСТОТЫ в два крайних положения, получить зону генерации, замерить частоту в центре зоны генерации с помощью частотомера.

**4.8.** Определить величину пускового и рабочего токов для различных зон генерации клистрона. Для этого установить напряжение на резонаторе  $U_0$  (200 В, 250 В, 300 В) и напряжением на отражателе получить максимум мощности в зоне генерации.

Измерить рабочий ток. Затем напряжением  $U_0$  вывести мощность на край зоны (момента исчезновения тока детектора при наличии генерации), снять показания для пускового тока. Пользоваться прибором, регистрирующим ток резонатора в блоке питания.

**4.9.** Получить осциллограммы зон генерации. Перевести переключатель П2 в положение ОСЦ. и подать напряжение с детектора на экран осциллографа. Регулировкой НАПРЯЖЕНИЙ ОТРАЖАТЕЛЯ и ГЛУБИНА МОДУЛЯЦИИ, просмотреть на экране осциллографа и снять эпюры зон генерации клистрона. Пункт 4.7 можно выполнять с помощью осциллографа.

## **5. КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ**

**5.1.** Написать условие возникновения колебаний в отражательном клистроне.

**5.2.** От каких параметров зависит мощность, генерируемая клистроном?

**5.3.** Какова должна быть форма зон генерации клистрона?

**5.4.** Что подразумевается под электронной настройкой клистрона, какими параметрами она характеризуется, каков вид зависимости?

**5.5.** Как определяется диапазон электронной настройки?

**5.6.** Как определяется диапазон механической перестройки?

**5.7.** От чего зависит величина пускового тока клистрона?

**5.8.** На чем основан метод визуального наблюдения зон генерации клистрона?

**5.9.** Почему при изменении амплитуды модулирующего напряжения происходит изменение ширины наблюдаемых зон генерации и их количества?

**5.10** Что такое зоны возбуждения?

**5.11.** Почему при настройке волномера в резонанс с генерируемой частотой наблюдается провал на кривой зоны генерации?

**5.12.** Как рассчитать номер зоны генерации?

## 6. СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

- 6.1. Цель работы, схема экспериментальной установки.
- 6.2. Таблица и графики рассчитанных зон возбуждения  $U_R = \psi(U_0)$ .
- 6.3. Таблицы и графики зависимостей зон генерации  $P = \psi(U_R)$  при фиксированных напряжениях  $U_0 = \text{const}$ .
- 6.4. Таблицы и графики зависимостей электронной настройки (экспериментальной и теоретической).
- 6.5. По результатам пунктов 5, 6, 7 определить диапазон электронной и механической настройки и крутизну электронной настройки, значение нагруженной добротности  $Q_H$ .
- 6.6. Результаты измерения пускового и рабочего тока.
- 6.7. Результаты осциллографического исследования зон генерации при амплитудной модуляции.
- 6.8. Краткий анализ и выводы по результатам проделанной работы.

## *СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ*

1. Соколова Ж.М. Микроволновые приборы и устройства.- Томск: Изд.-во ТМЦДО ТУСУР, 2009.-276с.
2. Электронные приборы СВЧ: Учеб. Пособие для вузов спец. "Электронные приборы"/ Березин В.М., Буряк В.С., Гутцайт Э.М., Марин В.П. –М.: Высш.шк , 1985. –296с.
3. Лебедев И.В. Техника и приборы СВЧ. Т.П. - М.: Высшая школа, 1972.
4. Описание аппаратуры к лабораторным работам / Под ред. Соколовой Ж.М.–Томск, ТИАСУР, 1977, ротапринт