Министерство образования и науки Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего профессионального образования

«Волгоградский государственный технический университет» Факультет электроники и вычислительной техники Кафедра «Физика»

Методические указания к лабораторной работе

«Исследование характеристик клистрона К-97»

Выполнили:

студенты группы Ф-1н Абдрахманов В. Л. Аликов С. А.

Проверил:

д.ф.-м.н., профессор Шеин А. Г.

Волгоград, 2015

Введение

В данной работе определяются характеристики отражательного клистрона К-97Р: его рабочая частота и добротность резонатора. Все измерения проводятся в "горячем"режиме.

1 Теоретическая часть

1.1 Устройство отражательного клистрона и принцип его работы Отражательный клистрон представляет собой резонансный генератор ко-

лебаний СВЧ малой мощности. Работа отражательного клистрона основана на кратковременном взаимодействии электрического поля резонатора с электронным потоком. Электроны, эмитируемые катодом, ускоряются в пространстве между катодом и резонатором, к которому приложено ускоряющее напряжение *U*0.

Возникающее между сетками резонатора CBЧ-напряжение *U* (*t*) = *Um* sin *ωt* производит модуляцию скорости электронов. В кинетической теории клистрона доказывается следующее приближённое выражение для скорости на выходе из модулирующего промежутка:

*v* = *v*0

(1 + *Um*

2*U*0

*β* sin

(

*ωt*0 +

Φ 2

= *v*0

(

1 + *X* sin

(

*ωt*0 +

Φ 2

*,* (1)

где *v*0, *t*0 – скорость электронов на влёте в резонатор и время влёта в резона- тор соответственно, скорость определяется положительным потенциалом *U*0 на

резонаторе:

*mv*2

0

= *eU*0*,*

2

*m* и *e* соответственно масса и абсолютное значение заряда электрона, *β* – параметр эффективной модуляции:

Φ

sin

*β* = 2 *,*

Φ

2

Φ = *dω/v*0 угол пролёта электрона через высокочастотный зазор, *d* – расстояние между сетками резонатора. После вылета из резонатора электроны, двигаясь рав-

нозамедленно в тормозящем поле отражателя (*U*0 + *|Ur|*)*/l*, где *Ur* – потенциал

отражателя, *l* – расстояние от резонатора до отражателя, уменьшают свою ско- рость до нулевого значения, затем начинают обратное движение и возвращаются в резонатор. В процессе этого движения к отражателю и обратно из-за различия скоростей электронов происходит образование сгустков. Движение в тормозящем поле происходит по параболам. Обозначив время вылета из резонатора *t*1, полу- чим уравнения траекторий в виде:

*z* = *v*(*t − t*1) *−*

*e*(*U*0 + *|Ur|*)(*t − t* )2

*.* (2)

2*ml* 1

Найдём время возвращения в резонатор. Очевидно, что оно равно:

*t*2 = *t*1 + *ve*(*U*

2*ml*

+ *|U*

*.* (3)

*|*)

0 *r*

Чтобы образовавшиеся электронные сгустки отдавали энергию СВЧ-полю и поддерживали колебания в резонаторе, они должны возвращаться в резо- натор в тормозящий полупериод. Для этого необходимо, как это видно из пространственно-временной диаграммы (рисунок [1),](#_bookmark0) чтобы сгустки электронов возвращались в резонатор через целое число периодов без одной четверти, т.е.

*ω*(*t*2 *− t*1) = 2*π*

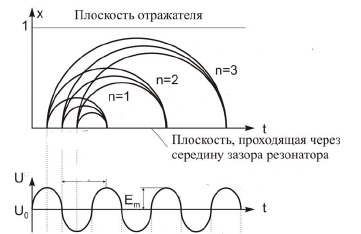
( 3

*n* +

4

где n = 0, 1, 2, 3, 4, ...

Рисунок 1 - Условие генерации



Отсюда следует формула для расчёта зон генерации:

*ωmlv*0

3 2*m*

*ωl√U*0 3

*n*

*≈*

*πe*(*U*0

+ *|Ur*

*|*) *−* 4 *≈*

*e π*(*U*0

+ *|Ur*

*|*) *−* 4*.* (4)

Воспользовавшись представлениями об эквивалентной схеме клистрона [1, 2, 3] или более точным методом, в котором решается уравнение возбуждения [2, 4], можно получить следующие соотношения для частоты генерируемого сигнала *f* и его мощности *P* (рисунок [2):](#_bookmark3)

( 1 (2*π*(*n* + 3*/*4)

*f* = *f*0

1 *−* 2*Q*tg

*U*0 + *|Ur*

*δUr*

*|*

*,* (5)

*P* = *I*0*U*0

cos(2*π*(*n* + 3*/*4)*δUr/*(*U*0 + *|Ur|*)*XJ* (*X*)*,* (6)

*π*(*n* + 3*/*4) 1

где *f*0 = *ω/*2*π* – частота соответствующая центру зоны генерации, *Q* – доброт- ность резонатора, *δUr* – перестройка напряжения от центра зоны генерации, *I*0 – ток резонатора, *J*1(*X*) – функция Бесселя первого порядка, *X* = *Umβ/*2*U*0 – па- раметр модуляции. Отсюда следует, что для определения добротности резонатора необходимо определить перестройку частоты в малом диапазоне напряжений от- ражателя в окрестности центра зоны генерации.

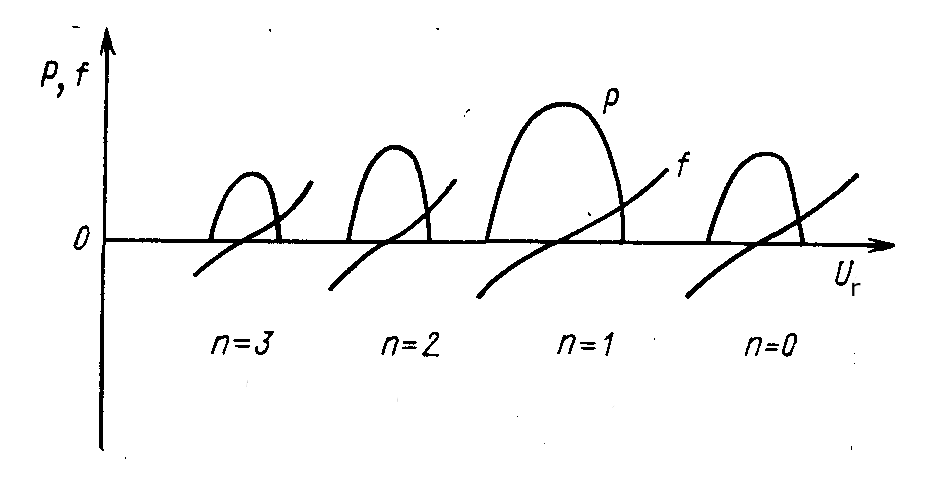
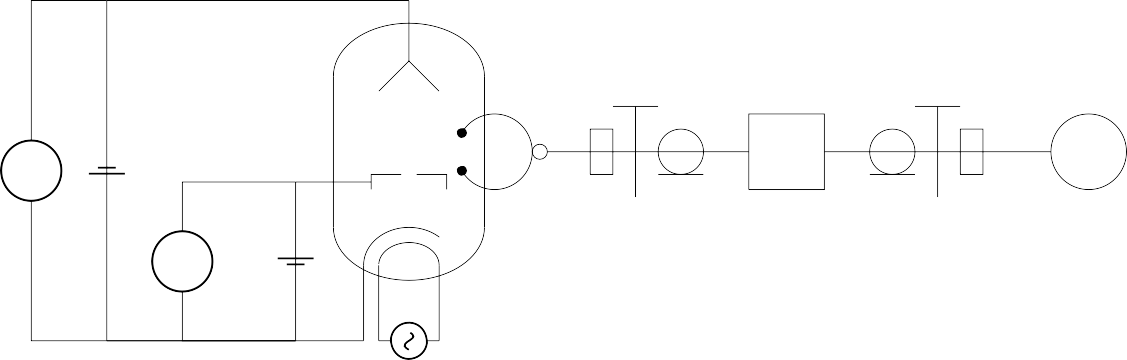


Рисунок 2 - Зоны генерации, мощность и перестройка частоты внутри зоны

1. Методика проведения измерений
   1. Описание установки

В работе используются следующие приборы: клистрон, блок питания кли- строна, анализатор спектра С4-27, ваттметр поглощаемой мощности, термистор- ная головка к ваттметру, а также соединительные элементы (коаксиальный ка- бель, 2 волноводнокоаксиальных переходника, коаксиальные аттенюаторы (ис- пользуются при необходимости)). Последовательно собираются две схемы изме- рений.

Первая схема измерений предназначена для определения напряжений отра- жателя, соответствующих зонам генерации. Она представлена на рисунке [3.](#_bookmark4)



V2

*Ur*

*α*

W

V1 *U*0

Рисунок 3 - Функциональная схема установки для определения частоты клистрона.

Вторая схема измерений предназначена для определения частот в пределах зон генерации и представлена на рисунке [4.](#_bookmark5)

*α*

S

V2

*Ur*

V1 *U*0

Рисунок 4 - Функциональная схема установки для определения частоты клистрона.

* 1. Описание приборов
     1. Клистрон

Параметры клистрона по паспорту, который есть в лаборатории, представ- лены в таблице [1.](#_bookmark6)

Таблица 1 - Параметры клистрона

|  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- |
| Параметры прибора | не менее | номинал | не более |
| Напряжение накала, В | 6*,*0 | 6*,*3 | 6*,*6 |
| Напряжение резонатора, В | 345 | 350 | 355 |
| Напряжение отражателя, В | 30 | 90*..*190 | 200 |
| Ток накала, А | 0*,*6 |  | 1*,*55 |
| Ток катода, мА |  |  | 55 |
| Время готовности, с |  |  | 90 |

Цвета, номера и назначение проводов клистрона представлены в таблице [2](#_bookmark7)

Таблица 2 - Цвета и назначение проводов клистрона

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| Цвет | Номер | Назначение |
| белый | 7 | нагреватель |
| зелёный | 2 | катод и нагреватель |
| красный | 6 | общий(резонатор) |
| жёлтый | 1 | отражатель |

Нагрев катода осуществляется через белый и зелёный провода. Жёлтый провод идёт к отражателю, а красный провод соединяется с землёй и идёт к резо- натору. Второй белый провод соединён с зелёным проводом и предназначен для подачи отрицательного напряжения *−*350 В на катод. Можно не соединять белый провод с отрицательным напряжением, а с помощью дополнительного провода соединить зелёный провод с выходом *−*350 В. Перед началом работы требуется проверить, что ни один из белых проводов не оторван от зелёного провода, для этого нужно убедиться в наличии тока в цепи нагревателя.

* + 1. Блок питания клистрона

Блок питания клистрона представлен на рисунке [5.](#_bookmark8) Клеммы 1 отвечают за напряжение отражателя, клемма 2 – земля(резонатор), клеммы 3 напряже- ние резонатора. Ручка 4 регулирует напряжение отражателя, ручка 7 регулирует напряжение катода. Клеммы 6 отвечают за нагрев катода. Тумблер 5 переклю- чает показания вольтметра 10 с напряжения отражателя на напряжение катода. Тумблеры 8 включают-выключают напряжения отражателя, нагрева и катода. Переключатель 9 включает-выключает блок питания.

1 2 3 6

100

200

300

0

400

V

*−* + *−* +

190 350

*∼* 6*.*3

6*.*3

*−*190

1

0 *−*350

4

7

5

8

9

10

Рисунок 5 - Блок питания клистрона

* + 1. Измеритель мощности

В работе используется ваттметр проходной мощности М3-22А (представлен на рисунке [6),](#_bookmark9) подключаемый к волноводному выходу с помощью измеритель- ного преобразователя М5-40 (термисторная головка). Измеритель мощности М3- 22А предназначен для измерения среднего значения мощности непрерывных и импульсно-модулированных СВЧ-сигналов и коаксиальных и волноводных трак- тах. Индикаторный блок прибора М3-22А имеет автоматические установку нуля

и выбор пределов измерения.

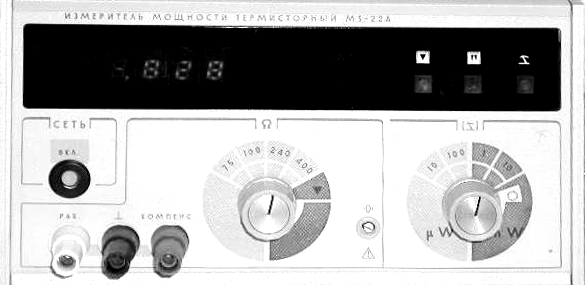


Рисунок 6 - Измеритель мощности М3-22А

Принцип действия прибора основан на автоматическом замещении погло- щаемой мощности термистором СВЧ мощности, эквивалентной по тепловому воз- действию, мощностью постоянного тока, а также на эквивалентности измерения сопротивления термистора при нагреве его рабочего тела постоянным током и током СВЧ.

Основные технические данные М3-22А:

1. Диапазон частот: 0,03 – 53,6 ГГц.
2. Пределы измерения мощности: 1 мкВт – 10 мВт.

3. Волноводы: 35*×*15, 28*×*12, 23*×*10, 17*×*8, 11*×*5,5, 7,5*×*3,4, 5,2*×*2,6 мм.

Назначение ваттметра – определение зон генерации, по этой причине пока- зания ваттметра роли не играют и в работе не снимаются.

* + 1. Анализатор спектра

В работе для определения частоты применяется анализатор спектра С4-27.

Внешний вид анализатора спектра представлен на рисунке [7.](#_bookmark10)

Анализатор спектра С4-27 предназначен для исследования спектров пери- одически повторяющихся импульсов и непрерывных сигналов. Диапазон частот

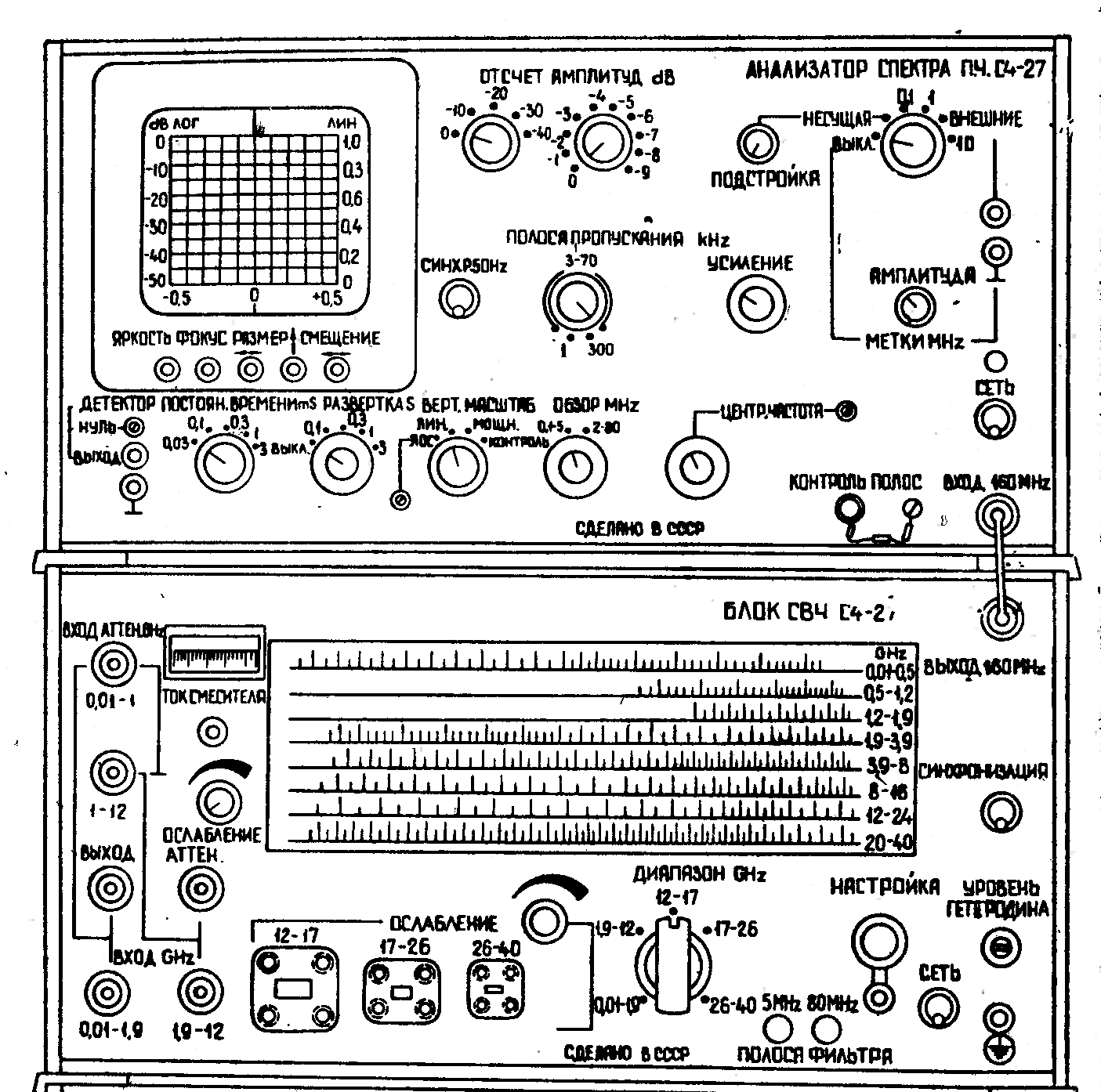


Рисунок 7 - Анализатор спектра С4-27

прибора от 0,01 до 39,6 ГГц с разбивкой на пять поддиапазонов: 0,01 – 1,9; 1,9 – 12;

12 – 17; 17 – 26; 26 – 39,6 ГГц. Прибор обеспечивает свои характеристики после времени прогрева не менее одного часа, но при широкой полосе обзора, когда не требуется высокая точность измерений достаточно 10 минут. На вход смесителей – непосредственно на ВХОД GHz, для волноводных – в крайнем положении ручки ОСЛАБЛЕНИЕ нельзя подавать сигнал мощностью более 1 мВт. В этом случае сигнал на прибор следует подавать только через аттенюатор прибора или внеш- ний аттенюатор. Максимальная мощность, подаваемая на входные аттенюаторы

приборы не должна превышать 0,2 Вт. Для клистрона с волноводным выходом

23 *×* 10 мм, используется диапазон шкалы 1,9 – 12 ГГц частотами > 6,52 ГГц.

Ручкой НАСТРОЙКА находят диапазон, в котором есть отклики сигнала, выставляя на блоке СВЧ частоту в нужном диапазоне на некоторое деление, затем переходят в режим меток 10 МГц на блоке ПЧ, после чего отсчитывают количе- ство меток от центральной метки до исследуемого сигнала на экране и вычитают или прибавляют полученное значение к значению по шкале блока СВЧ. Точность такого измерения составляет 10 МГц. Её можно повысить, если уменьшить полосу пропускания исследуемого сигнала и воспользоваться метками с шагом 0,1 ГГц и 1 ГГц.

* + 1. Аттенюаторы

В работе используются 3 коаксиальных аттенюатора. Так как с самого на- чала уровень выходной мощности не известен, то требуется последовательно под- ключая аттенюаторы на 10 дБ, 6 дБ и 3 дБ, провести измерения уровня мощности до тех пор пока он не окажется в пределах 10 мВт, также аттенюаторы следует применить при измерении частоты по анализатору спектра, но здесь важно сле- дить за тем, чтобы сигнал можно было отличить от шума.

* 1. Проведение измерений

2.3.1 Определение зон генерации, рабочей частоты и добротности

1. Проверьте, что на рабочем столе присутствуют 3 соединительных про- вода, клистрон, блок питания, коаксиальный кабель, 2 волноводно-коаксиальных переходника, волновод (сечением больше либо равный сечению выходного фланца клистрона), термисторная головка для данного волновода, измеритель мощности, вольтметр (или мультиметр).
2. Соберите установку по схеме измерений [4.](#_bookmark5) Включите измеритель мощ- ности и дайте ему прогреться. Подключите к нему термисторную головку, и со- едините её с волноводом нужного сечения или сразу с волноводно-коаксиальным

переходником. Переходник соедините с аттенюатором пока на 10 дБ. Аттенюатор соедините с коаксиальным кабелем, а коаксиальный кабель с клистроном.

1. Включите блок питания и проверьте, что напряжения катода и отража- теля соответствуют номинальным напряжениям таблицы [1.](#_bookmark6) Выключите блок пи- тания.
2. Выставьте 0 на измерителе мощности с помощью кнопок грубой и точной настройки (первая и вторая кнопка соответственно, в режиме грубой настройки воспользуется винтом и добейтесь максимально близкого к 0 значения, затем вос- пользуйтесь кнопкой точной настройки), нажмите третью кнопку для того чтобы перейти в режим измерений.
3. На блоке питания переключите тумблер вольтметра 5 в режим напряже- ний катода. Включите блок питания. Когда показания вольтметра начнут падать (подождите 90 c.), начнётся генерация клистрона. Переключите тумблер 5 в ре- жим напряжений отражателя и проверьте наличие генерации во всём диапазоне от 90 до 190 В, если показания измерителя мощности слишком малы во всём диа- пазоне напряжений, измените аттенюатор на другой с меньшим затуханием. Если и это не дало результата, уберите аттенюатор. Обычно в этом случае в центрах зон генерации показания ваттметра достигают нескольких мВт.
4. Занесите в таблицу [3](#_bookmark11) границы зон генерации *Ur,min Ur,max*, центры зон генерации *Ur,*ц по вольтметру 10 или внешнему вольтметру и количество зон гене- рации в данном диапазоне напряжений отражателя. Запишете также напряжения на катоде в этих точках.

Таблица 3 - Определение зон генерации

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *U*0*,* В | *|Ur|,* В | | | n |
| минимум | центр | максимум |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |  |  |

1. Используя формулу [(4)](#_bookmark1) для напряжений в центрах зон генерации опре- делите номера полученных зон.
2. Отсоедините коаксиальный кабель с аттенюатором от переходника к тер- мисторной головке и подсоедините его ко входу анализатора спектра 1,9 – 12 ГГц через аттенюатор 10 дБ. Ручкой настройка найдите сигнал. Меняя аттенюаторы и ручкой ТОК СМЕСИТЕЛЯ, добейтесь максимального уровня сигнала.
3. Наблюдая спектр на экране анализатора, определите наименьшую часто- ту – это и будет основная частота клистрона.
4. Изменяя напряжение на отражателе снимите зависимость частоты от напряжения отражателя в пределах зоны, которая полностью лежит в диапазоне изменений напряжений отражателя. Занесите данные в таблицу [4.](#_bookmark12)

Таблица 4 - Определение основной частоты и добротности

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *U*0*,* В | *|Ur|,* В | *f,* ГГц | *f*0*,* ГГц | *Q* |
|  |  |  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |
|  |  |  |

1. Используя формулу [(5)](#_bookmark2) определите добротность клистрона.
2. Результаты

На этапе подготовки выяснилось, что имеющийся клистрон К-97Р со стан- дартным волноводным выходом не работает – на его выходе не обнаруживается СВЧ-сигнал, а через 5 минут после начала работы в цепи катода прекращает течь ток. Остальные клистроны К-97Р, имеющиеся в нашем распоряжении, работали нормально, однако, не обладали подходящим волноводным выходом. Попытки от- соединить волноводный выход от неисправного клистрона не увенчались успехом, поэтому измерения производились на единственном рабочем клистроне со стан- дартным выходным окном К-54А.

В ходе выполнения работы были определены зоны генерации и для одной

из зон была снята зависимость частоты генерируемого сигнала от напряжения отражателя. Эти данные представлены в таблицах [5](#_bookmark13) и [6](#_bookmark14) и на рисунке [8.](#_bookmark15)

Напряжение на резонаторе *U*0 в процессе измерения при вращении соот- ветствующей ручки на источнике питания почти не изменялось, поэтому во всех опытах оно одинаково. Для получения на отражателе напряжения, меньшего 80 В использовался резисторный делитель.

Таблица 5 - Определение зон генерации

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *U*0*,* В | *|Ur|,* В | | | n |
| минимум | центр | максимум |
| 180 | 61 | 79 | 93 | 6 |
| 105 | 128 | 146 | 5 |
| 182 | 202 | – | 4 |

Для определения электронной перестройки была выбрана зона с *n* = 5, так как она полностью помещалась в диапазон напряжений источника питания.

Таблица 6 - Определение основной частоты и добротности

|  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- |
| *U*0*,* В | *|Ur|,* В | *f,* ГГц | *f*0*,* ГГц | *Q* |
| 180 | 145 | 8,27 | 8,22*±*0,01 | 200*±*50 |
| 140 | 8,24 |
| 132 | 8,23 |
| 127 | 8,22 |
| 123 | 8,21 |
| 117 | 8,20 |
| 110 | 8,19 |

8*.*28

8*.*26

8*.*24

*f,* ГГц

8*.*22

8*.*2

8*.*18

60 80 100 120 140 160 180 200

*|Ur|,* В

Рисунок 8 - Зависимость частоты от напряжения на отражателе для одной из зон генерации; зоны генерации отмечены цветом

Список использованных источников

1. Вальднер, О. А. Техника сверхвысоких частот / О. А. Вальднер, О. С. Милованов, Н. П. Собенин. Москва : Атомиздат, 1974. 232 c.
2. Трубецков, Д. И. Лекции по сверхвысокочастотной электронике для фи- зиков. В 2 т. / Д. И. Трубецков, А. Е. Храмов. Москва : Физматлит, 2003. Т. 1. 496 с.
3. Федоров, Н. Д. Электронные приборы СВЧ и квантовые приборы / Н. Д. Федоров. Москва : Атомиздат, 1979. 288 c.
4. Вайнштейн, Л. А. Лекции по сверхвысокочастотной электронике / Л. А. Вайнштейн, В. А. Солнцев. Москва : Советское радио, 1973. 400 c.