

МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
имени М. В. Ломоносова

Физический факультет
кафедра общей физики и физики конденсированного состояния

Методическая разработка
по общему физическому практикуму

Лаб. работа № 43

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТРИОДА

Работу поставила доц. Талалаева Е.В.

Москва - 2012

Подготовил методическое пособие к изданию доц. Авксентьев Ю.И.

ИЗУЧЕНИЕ РАБОТЫ ТРИОДА

Цель работы: Изучение работы триода в статическом и динамическом режимах.

Устройство и принцип действия триода

Внутри стеклянного баллона, из которого удален воздух (давление 10^{-3} — 10^{-4} Па), находятся три электрода (рис.1). Один из электродов (нить K)

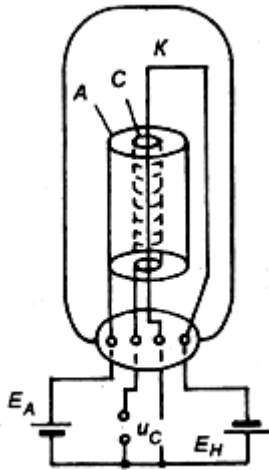


Рис. 1

выполнен в виде металлической проволоочки, накаливаемой электрическим током от низковольтного трансформатора накала или же от батареи. Второй электрод — металлический цилиндр A — охватывает первый. Третий электрод C — спираль, окружающая электрод K . Электрод K (катод) при работе нагревается до температуры сотен градусов и на него подается отрицательный потенциал. На электрод A (анод) подается положительный потенциал. На электрод C (сетка) в зависимости от условий может подаваться потенциал любого знака. В металлах достаточно много (10^{22} — 10^{23} эл/см³) практически свободных электронов, каждый из которых свободно перемещается по всему объему нейтрального проводника, однако как только он выходит

за границу металла, унося с собой заряд " $-e$ ", в металле возникает заряд " $+e$ ". Их взаимодействие "заталкивает" электрон обратно в металл. Если металл нагреть, то при достаточно высоких температурах кинетическая энергия электронов позволяет им преодолеть потенциальную энергию кулоновского притяжения и какое-то время находиться вблизи поверхности раскаленного металла. Образуется так называемое "электронное облако" (пространственный заряд), плотность которого тем больше, чем выше температура. Таким образом, вокруг катода при работе создается пространственный заряд и, если при этом подать на электроды напряжение, то от катода к аноду пойдет электрический ток, при этом будет наблюдаться сложная зависимость тока от приложенного напряжения. Ток в триоде зависит не только от напряжения, приложенного к аноду, но и от знака и величины потенциала электрода C (сетки): $I_A = f(U_A, U_C)$. Эту зависимость можно записать также в дифференциальном виде:

$$dI_A = \partial I_A / \partial U_C dU_C + \partial I_A / \partial U_A dU_A \quad (1)$$

Таким образом, оставляя напряжение на аноде постоянным, можно в широких пределах изменять анодный ток, регулируя управляющее напряжение за счет изменения потенциала сетки. Из формулы следует, что при определенном отрицательном потенциале на сетке ток через лампу идти не будет (лампа "заперта").

Характеристики и параметры триода

Характеристики ламп представляют в виде графиков зависимости тока анода от напряжения на сетке (сеточные характеристики) или зависимости анодного тока от напряжения на аноде (анодные характеристики) (рис. 2, 3).

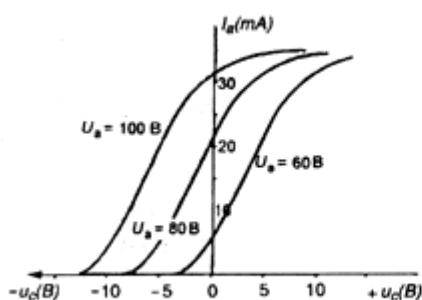


Рис. 2

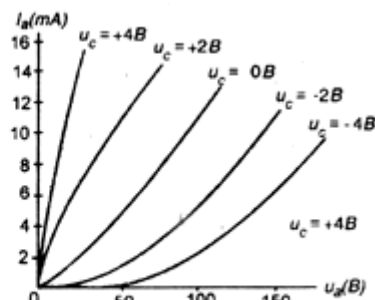


Рис. 3

Пользуясь характеристиками можно легко вычислить параметры лампы, определяющие ее функциональные возможности: крутизну сеточной характеристики (S), внутреннее сопротивление (R) и коэффициент усиления (μ). Крутизна сеточной характеристики лампы

$$S = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_C}, \quad (2)$$

при $U_A = const$ — величина, равная отношению изменения анодного тока к вызвавшему его изменению сеточного напряжения при постоянном напряжении на аноде. Например, используя график $I_A = f(U_C)$ (рис.4,а), можно найти

$$\Delta U_C = 2 - 1 = 1 \text{ B};$$

$$\Delta I_A = 6,5 - 3,2 = 3,3 \text{ mA};$$

$$S = 3,3 : 1 = 3,3 \text{ mA/B}$$

Внутреннее сопротивление триода

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \quad (3)$$

при $U_C = const$ — величина, равная отношению изменения анодного напряжения к вызванному им изменению анодного тока при постоянном напряжении на сетке. Например, используя график $I_A = f(U_C)$ при разных значениях U_a (рис. 4,б), можно найти

$$\Delta U_A = 100 - 80 = 20 \text{ B};$$

$$\Delta I_A = 8,6 - 3 = 5,6 \text{ mA} = 0,0056 \text{ A};$$

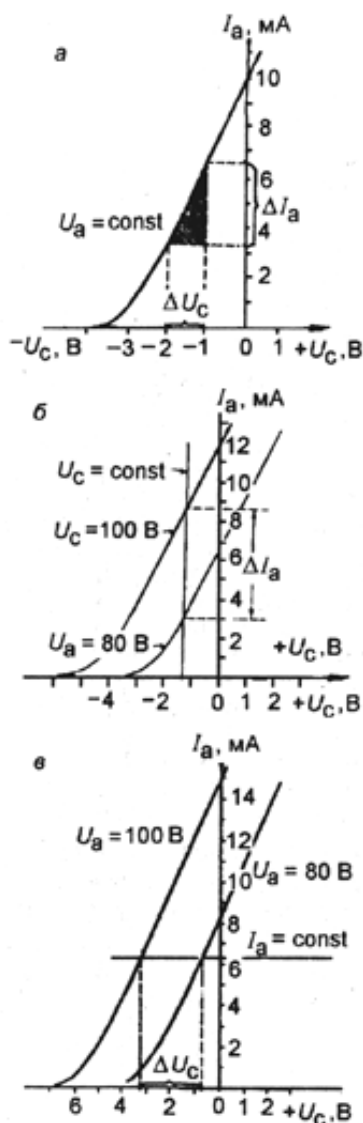


Рис. 4

$$R_i = 20:0,0056 = 3540 \text{ Ом.}$$

Коэффициент усиления

$$\mu_{cm} = - \frac{\Delta U_A}{\Delta U_C}, \quad (4)$$

при $I_A = \text{const}$ — величина, равная отношению изменения анодного напряжения к соответствующему изменению сеточного напряжения, необходимому для того, чтобы величина тока осталась постоянной. Например, используя график $I_A = f(U_C)$, (Рис.4в) найдем

$$\Delta U_C = 2,4 \text{ В}, \Delta U_A = 20 \text{ В}, \mu_{cm} = 8,3.$$

Связь между параметрами:

$$R_i S = \mu. \quad (5)$$

Режимы работы триода

Характеристики и параметры триода зависят от режима работы лампы: статического (рис. 5) и динамического (рис. 6).

Они отличаются наличием (в динамическом режиме) в анодной цепи сопротивления нагрузки R_A . В отсутствие R_A (статический режим) анодное напряжение U_A равно ЭДС источника ε_A и остается постоянным, несмотря на колебания анодного тока. При наличии анодной нагрузки анодное напряжение

$$U_A = \varepsilon_A - I_A R_A. \quad (6)$$

При этом, если в результате изменения напряжения на сетке U_C , изменится анодный ток I_A , то вместе с ним изменится напряжение на R_A ($\Delta U_R = R_A \Delta I_A$) и, в соответствии с (6), анодное напряжение изменится на величину ($\Delta U_A = R \Delta I_A$). Таким образом,

при работе лампы в динамическом режиме три величины U_C , I_A , U_A связаны и меняются одновременно. Отметим, что увеличение U_C вызывает увеличение анодного тока I_A , что увеличивает $I_A R_A$ и, следовательно, уменьшает U_A . Поэтому по сравнению со статическими характеристиками динамические анодно-сеточные характеристики идут более полого, причем, чем больше R_A , тем более полого идет динамическая характеристика (рис. 7, 8).

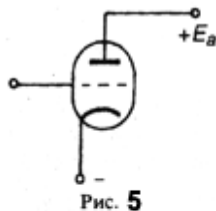


Рис. 5

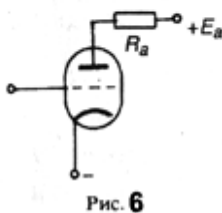


Рис. 6

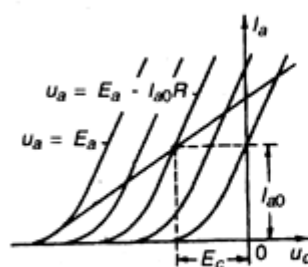


Рис. 7

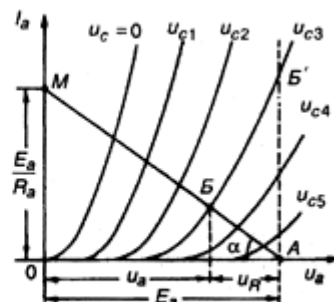


Рис. 8

Каждой точке динамической анодно-сеточной характеристики

соответствует свое значение анодного напряжения. Из (6) следует, что

$$I_A = \frac{\varepsilon_A}{R_a} - \frac{U_A}{R_a}$$

— полученное соотношение называется нагрузочной прямой (рис. 8).

С помощью динамической анодной характеристики можно определить анодный ток (а значит, и падение напряжения на нагрузке) и анодное напряжение при любом напряжении на сетке. Вследствие того, что эта характеристика строится просто и позволяет удобно находить величины U_A и U_R , именно ее чаще всего используют для различных практических расчетов с лампами (рис. 8).

Динамическая крутизна сеточной характеристики лампы

$$S_{дин} = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_C} \quad (8)$$

при $R = const$, $\varepsilon = const$ характеризует зависимость анодного тока от напряжения на сетке в режиме с нагрузкой в анодной цепи. Связь $S_{дин}$ со статической крутизной $S_{ст}$:

$$S_{дин} = \frac{S_{ст}}{1 + R_A / R_i} \quad (9)$$

Динамический коэффициент усиления $\mu_{дин}$ — величина, равная отношению усиленного переменного напряжения $U_R(t)$, создаваемого на сопротивлении нагрузки, и переменного напряжения, действующего в цепи сетки. Например, если на сетку подать напряжение типа $U_C(t) = U_{CO} \sin \omega t$, то на анодной нагрузке появится напряжение $U_A(t) = U_{RO} \sin \omega t$. В этом случае

$$\mu_{дин} = \frac{U_{RO}}{U_{CO}} \quad (10)$$

Связь $\mu_{дин}$ со статическим коэффициентом усиления $\mu_{ст}$ (4) выражается формулой

$$\mu_{дин} = \frac{\mu_{ст}}{1 + R_A / R_i} \quad (11)$$

Установка: *трехэлектродная лампа (триод), укрепленная на монтажной панели; стабилизированный источник постоянных напряжений: ± 300 В, $0 — \pm 15$ В и переменного напряжения 6,3 В; трансформатор; осциллограф С1-72; многошкальные вольтметры на 15 и 300 В; амперметр; высокоомный реостат, используемый в качестве потенциометра R ; ключ $Kл$; переключатель $Перекл$; сопротивление R ; панель с клеммами, на которую подается общий минус схемы.*

Для выполнения работы следует собрать схему, изображенную на рис.9.

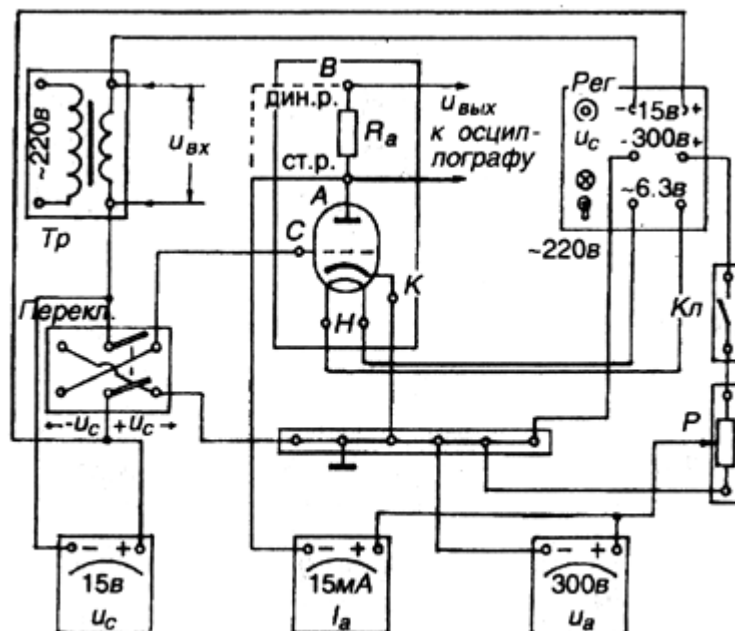
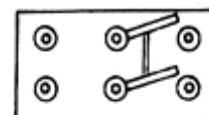


Рис. 9

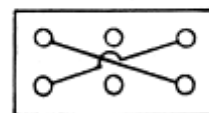
Анализ схемы показывает, что она состоит из двух основных частей: анодной цепи, создающей разность потенциалов между анодом и катодом U_A и цепи, создающей разность потенциалов между сеткой и катодом. На накал лампы подается переменное напряжение $6,3 В$. При сборе схемы сначала собирают одну цепь, а затем — вторую. При этом источник анодного напряжения (клеммы $\pm 300 В$) подключают только в присутствии преподавателя или лаборанта.

Из рис.9 ясно, что с помощью потенциометра P можно плавно изменять разность потенциалов между анодом и катодом U_A от 0 до $300 В$, перемещая движок потенциометра снизу вверх (см. Рис.9).

Потенциометр для изменения разности потенциалов между катодом и сеткой вмонтирован в корпус стабилизированного выпрямителя и имеет на передней панели ручку $Рег. U_C (0-15В)$. Переключатель "Перекл." имеет 6 клемм, укрепленных на подставке из эбонита. Напряжение подводится к средним клеммам переключателя, а снимается — с крайних (правых или левых — безразлично). Принцип работы переключателя ясен из рис. 10, на котором изображен вид сверху и вид снизу.



Вид сверху



Вид снизу

Рис. 10

Отметим, что в цепь сетки постоянно включена вторичная обмотка трансформатора, которая используется для подачи переменного сигнала на сетку при экспериментальном определении динамического коэффициента усиления лампы (см. упр. 4). Во всех других упражнениях эта вторичная обмотка (2-4 витка) играет роль некоторого дополнительного, малого по величине, активного сопротивления, так как на первичную обмотку трансформатора в этих упражнениях напряжение не подается.

Упражнение 1

СНЯТИЕ СТАТИЧЕСКИХ АНОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИОДА

Для получения зависимости $I_A = f(U_A)$ при $U_C = const$ следует изменять анодное напряжение и записывать для каждого значения U_A силу анодного тока I_A .

Измерения

1. Передвигают движок потенциометра в то нижнее положение, при котором $U_A = 0$.
2. Ручку сеточного потенциометра "*Per.U_C*" поворачивают против часовой стрелки до упора (при этом $U_C = 0$).
3. При разомкнутом ключе "*Кл.*" включают в сеть стабилизированный выпрямитель на 220 В и выжидают 2-3 мин, пока прогреваются лампы прибора.
4. Замыкают ключ "*Кл.*" Постепенно повышают анодное напряжение U_A и наблюдают по миллиамперметру за появлением тока I_A .
5. При некотором (небольшом) токе I_A , текущем через лампу, замыкают переключатель "*Перекл.*" в одно из крайних положений. Немного увеличивая потенциал сетки с помощью ручки "*Per.U_c*" (0-15 В), наблюдают за изменением анодного тока I_A . Переключатель оставляют замкнутым в том крайнем положении, при котором увеличение U_C приводит к уменьшению I_A , что соответствует отрицательному напряжению на сетке. Движок потенциометра *P* возвращают вниз ($U_A = 0$).

6. Снимают анодную характеристику при $U_C = 0$. Для этого ручкой "*Per.U*" устанавливают $U_C = 0$ (при замкнутом переключателе). Постепенно увеличивая анодное напряжение U_A от 0 до 220 В (или от 0 до 120 В — в зависимости от типа лампы), измеряют соответствующие каждому фиксированному значению U_A значение I_A анодного тока. Измерения от 0 до 100 В проводят через каждые 10 В, а от 100 до 220 В через 20 В. Значения U_A и соответствующие им значения I_A записывают в табл.1.

Таблица 1.

$U_A, В$	$U_C = 0 В$	$U_C = -2 В$	$U_C = +1 В$
	I_A, mA	I_A, mA	I_A, mA
0			
10			
20			
...			
220 В			

7. Повторяют измерения и снимают еще две анодных характеристики при разных смещениях на сетке: -1 , -2 , -3 , -4 , $+1$ В — по указанию преподавателя.

УКАЗАНИЕ: на сетки большинства современных ламп положительные смещения, превышающие $+2$ В, подавать не следует, так как при этом резко возрастает ток сетки и лампа может выйти из строя.

Используя полученные данные, на миллиметровой бумаге строят график для семейства анодных характеристик триода, откладывая по оси абсцисс значения U_A , а по оси ординат — I_A (см. рис.4).

Упражнение 2

СНЯТИЕ СТАТИЧЕСКИХ СЕТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ СТАТИЧЕСКИХ ПАРАМЕТРОВ ЛАМПЫ

Семейство сеточных характеристик триода изображено на рис. 2. Для снятия сеточной характеристики необходимо при некотором постоянном анодном напряжении изменять разность потенциалов, подаваемую на сетку, измеряя для каждого значения U_C анодный ток I_A . Снятие сеточных характеристик обычно начинают с такого достаточно большого отрицательного потенциала на сетке, при котором лампа заперта ($I_A = 0$). Например, на рис. 2 для $U_A = 60$ В запирающее напряжение на сетке U_C — -4 В, а при $U_A = 100$ В запирающее сеточное напряжение равно примерно -13 В. Таким образом, U_C , при котором $I_A = 0$, зависит от разности потенциалов между анодом и катодом.

Измерения

1. Устанавливают определенное анодное напряжение $U_A = const$ (по указанию преподавателя или лаборанта, поскольку значения $U_A = const$, при которых снимаются сеточные характеристики, зависят от типа лампы).
2. Переключатель "Перекл." замыкают в том положении, при котором на сетку подается отрицательное напряжение. Постепенно увеличивая ручкой "Per. U_C " отрицательное напряжение на сетке, находят такое значение U_C , при котором $I_A = 0$. Эти значения U_C и $I_A = 0$ записывают в табл. 2.
3. Начиная со значения U_C , установленного в предыдущем пункте, уменьшают U_C каждый раз на 1 вольт и записывают соответствующие им значения I_A в табл. 2.
4. Записав значение I_A при $U_C = 0$, перекидывают ручку переключателя в противоположное положение (при котором на сетку подается

Таблица 2

U_C	$U_{A1} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$	$U_{A2} = \underline{\hspace{2cm}} \text{ В}$
	$I_A, \text{ mA}$	$I_A, \text{ mA}$
-...		
-3 В		
-2 В		
-1 В		
0		
+1 В		
+2 В		

положительное напряжение) и записывают значения I_A при $U_0 = +1 \text{ В}$ и при $U_0 = +2 \text{ В}$.

УКАЗАНИЕ: поскольку каждое изменение потенциала на сетке изменяет внутреннее сопротивление лампы, то будет изменяться и анодное напряжение U_A . Поэтому прежде, чем записать значение I_A при данном U_C , следует сначала подрегулировать U_A до значения $U_{A1} = \text{const}$, при котором снимается характеристика, и только после этого записать значение I_A .

5. Снимают вторую сеточную характеристику, повторяя все измерения при другом анодном напряжении U_{A2} .

Обработка результатов измерений

По полученным данным строят график на миллиметровой бумаге, откладывая по оси абсцисс $\pm U_C$ (вправо и влево от нуля), а по оси ординат — значения I_A . Обе снятые характеристики строят на одном графике.

По графику (на линейном участке характеристики) определяют статические параметры лампы:

- 1) крутизну сеточной характеристики $S = \Delta I_A / \Delta U_C$ при $U_A = \text{const}$;
- 2) статический коэффициент усиления $\mu = -(\Delta U_A / \Delta U_C)$ при $I_A = \text{const}$;
- 3) внутреннее сопротивление лампы $R_i = \Delta U_A / \Delta I_A$ при $U_C = \text{const}$.

Проверяют связь, существующую между параметрами лампы, найденными на одном и том же участке сеточных характеристик

$$R_i S \frac{1}{\mu} = 1.$$

Упражнение 3

СНЯТИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ СЕТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ТРИОДА. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОЙ КРУТИЗНЫ

Измерения и обработка результатов измерения

1. В анодную цепь лампы между точками A и B (рис.9) включают сопротивление R_A (нагрузку) порядка $10\text{-}25 \text{ кОм}$. Для этого провод,

идуший к точке A , переключают в точку B схемы.

2. Снимают сеточные характеристики лампы при двух значениях напряжения U_A , показываемого вольтметром так, как указано в упр.2. Данные измерений записывают в табл.3, аналогичную табл. 2 из упр. 2.

3. По данным измерений на одном графике строят обе динамические сеточные характеристики.

4. Определяют на линейной части характеристик (например, при $U_C = -2 В$) динамическую крутизну характеристики $S_{дин}$. (также, как было описано выше для статической крутизны). **ЗАМЕЧАНИЕ:** поскольку в анодную цепь включена нагрузка R_A , то вольтметр U_A показывает в этом случае не падение потенциала U_A на лампе, а суммарное падение потенциала U на лампе и на нагрузке:

$$U = U_A + U_R = U_A + I_A R_A.$$

При снятии динамической сеточной характеристики именно величина U поддерживается постоянной, тогда как U_A меняется.

Упражнение 4

ОПРЕДЕЛЕНИЕ ДИНАМИЧЕСКОГО КОЭФФИЦИЕНТА УСИЛЕНИЯ ТРИОДА С ПОМОЩЬЮ ОСЦИЛЛОГРАФА

Динамическим коэффициентом усиления $\mu_{дин}$ называется величина, показывающая, во сколько раз амплитуда напряжения переменной составляющей напряжения на нагрузке U_{Rm} больше амплитуды вызвавшего его переменного напряжения на сетке U_{cm}

$$\mu_{дин} = \frac{U_{Rm}}{U_{cm}} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}.$$

Для определения $U_{вх}$ и $U_{вых}$ используют осциллограф $C1-72$. Для подачи переменного сигнала между сеткой и катодом в цепь сетки включена вторичная обмотка трансформатора (рис.9).

Измерения

Прежде чем начать измерения, следует ознакомиться с устройством передней панели осциллографа $C1-72$ и органами его управления (по специальному описанию).

1. Устанавливают при динамическом режиме работы лампы $U_A = 140$ или $U_A = 160 В$ (или $80-100 В$ по указанию преподавателя).

2. Переключатель замыкают в то крайнее положение, при котором на сетку подается отрицательное смещение, и устанавливают $U_C = -2 В$ или $-4 В$ (в зависимости от типа лампы).

3. Включают осциллограф (в сеть $220 В$).

4. Включают на $220 В$ первичную обмотку трансформатора.

5. С помощью специального коаксиального кабеля со штекерами на

концах (имеющего разделительный конденсатор) подают на вход осциллографа Y переменную составляющую сигнала $U_{вх}$, подаваемого на сетку лампы (см. рис.9).

6. Изменяя частоту генератора развертки осциллографа с помощью ручки *Время/деления*, добиваются появления на экране осциллографа синусоидального сигнала. Рекомендуемое положение ручки — 5 мс .

7. Добиваются устойчивой, неподвижной картины сигнала на экране с помощью небольшого поворота ручки "*стабильность*".

8. Изображение фокусируют и устанавливают необходимую для четкой картины яркость с помощью ручек (*фокусировка*) и (*яркость*).

9. Поворотом ручки *V/ДЕЛ* выбирают то максимальное усиление сигнала, при котором этот сигнал полностью укладывается в пределах шкалы осциллографа (рис. 11). Рекомендуемое положение ручки: $0,1$ или $0,2$.

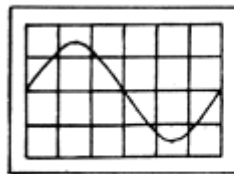


Рис. 11

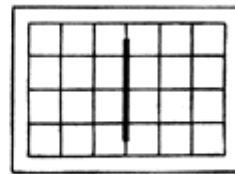


Рис. 12

10. Измеряют амплитуду сигнала $U_{вх}$ в делениях шкалы и переводят полученное значение в вольты, умножая для этого число делений на показатель положения ручки *V/ДЕЛ*.

УКАЗАНИЕ: Для удобства отсчета можно выключить развертку сигнала по горизонтали, для чего следует нажать кнопку "*Вход X*" и затем, пользуясь ручками вертикального и горизонтального смещения луча, совместить изображение с центром шкалы экрана (рис.12).

11. На вход Y осциллографа подают напряжение с выхода усилителя, т.е. с анодной нагрузки R_A (клеммы A и B , рис.9).

12. Переключая ручку *V/ДЕЛ*, подбирают необходимое усиление сигнала $U_{вых}$ (обычно положение ручки 1 или 2).

13. Измеряют амплитуду сигнала $U_{вых}$ в делениях, а затем переводят полученное значение в вольты.

14. Находят значение $\mu_{дин} = U_{вых}/U_{вх}$

15. Находят значение $\mu_{дин}$ по формулам

$$\mu_{дин} = R_A S_{дин}, \quad \mu_{дин} = \mu \frac{R_A}{R_A + R_i}.$$

Сравнивают все три значения $\mu_{дин}$

В справедливости формулы $\mu_{дин} = R_A S_{дин}$ легко убедиться. Действительно, $\Delta U_R = \Delta I_A R_A$, но $S_{дин} = \Delta I_A / \Delta U_C$, откуда $\Delta I_A = S_{дин} \Delta U_C$. Следовательно,

$$\Delta U_R = R_A S_{дин} \Delta U_C.$$

$$\mu_{дин} = \frac{\Delta U_R}{\Delta U_C} = R_A S_{дин}$$

Контрольные вопросы

1. В чем причина усилительных свойств триода?
2. Что вы знаете о термоэлектронной эмиссии?
3. Как изображается сеточная характеристика вакуумного триода?
4. Как изображается вольтамперная характеристика триода?
5. Чем отличается работа триода в статическом и динамическом режимах?
6. Какие основные параметры характеризуют триод и какова связь между ними?
7. Что такое нагрузочная прямая?
8. Запишите связь между статической и динамической крутизной лампы.
9. Запишите связь между статическим и динамическим коэффициентами усиления триода.

ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев И.В. Курс общей физики: Учебное пособие. Книга 2 5
“Квантовая оптика. Атомная физика. Физика твердого тела. Физика
атомного ядра и элементарных частиц. 2 “Электричество и магнетизм”,
Издание 4-е, переработанное. Москва. Наука. Физматлит. 1998.
Глава 9. Контактные и термоэлектрические явления.
9.1. Работа выхода.
9.2. Термоэлектронная эмиссия. Электронные лампы.