

чение коэффициента β в свою очередь позволяет на основе соотношений (6) вычислить величину e/m и ее ошибку.

Расчет выполняется на ЭВМ. При работе на дисплее в машину вводятся следующие данные: число измерений N при снятии зависимости $I(U)$, радиус анода r_a , длина катода l и массивы значений тока I и напряжения U . После окончания вычислений ЭВМ выдает значения силы тока, вычисленные по формуле (5), в которую в качестве коэффициента β подставлено его значение, найденное методом наименьших квадратов. Таким образом, точки $[A, U]$ лежат на искомой линии, которую и следует провести на графике.

ЭВМ выдает также данные для графического построения зависимости $I(U^{3/2}) = I(X)$.

Построить эту зависимость, нанеся на плоскость (I, X) точки $[I, X]$, а прямую линию через них провести под углом, тангенс которого есть β . Эта линия — лучшая в смысле МНК.

Упражнение 2. ОПРЕДЕЛЕНИЕ УДЕЛЬНОГО ЗАРЯДА ЭЛЕКТРОНА МЕТОДОМ МАГНЕТРОНА

Включить ток через соленоид I_c . Снять 2—3 кривые зависимости $I = f(I_c)$ при разных анодных напряжениях U_a и построить графики $I(B)$. Отметив на каждой кривой индукцию B_0 соленоида, при которой анодный ток начинает уменьшаться, подставить это значение индукции B_0 в формулу (3).

Значения B_0 на графике выбирать в самом начале спада кривой тока. Проанализировать возможные погрешности определения e/m за счет «размазывания» спада.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Сформулировать закон «трех вторых». При каких условиях он выполняется?
2. Почему ток диода должен быть далек от насыщения?
3. Как влияет объемный заряд на распределение потенциала в пространстве между анодом и катодом?
4. Каков характер электрического и магнитного полей в диоде, помещенном внутрь соленоида?
5. Какие траектории описывает электрон при разных индукциях магнитного поля?
6. Чему равно отношение e/m в системе СИ?
7. Нарисовать электрическую схему установки. Объяснить порядок действий при измерениях. Перечислите основные правила техники безопасности при работе на установке.
8. Какова точность приборов, используемых на установке?
9. Чем определяется «размазывание» спада анодного тока диода при увеличении индукции магнитного поля?
10. Какие факторы приводят к неточности определения e/m на данной установке в упражнениях 1 и 2?

Литература

1. Матвеев А. Н. Электричество и магнетизм. М.: Высшая школа, 1983.
2. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 157.

Лабораторная работа 9

ЭЛЕКТРОННАЯ ЛАМПА

Изучается устройство вакуумного пентода, снимаются его анодно-сеточные и анодные характеристики, определяются его основные параметры. В заключение студенты знакомятся с простейшим усилителем на пентоде.

Устройство лампы

Электрический ток в лампе образуется электронами. Их источником служит катод — электрод, нагреваемый до высокой температуры (600—1200°С). В простейшем случае катод делают в виде металлической проволочки, накаливаемой вспомогательным током. Такие катоды называют катодами прямого или непосредственного накала. Большое распространение получили также катоды косвенного накала, иначе называемые подогревными. Катод такого типа имеет металлический цилиндр, поверхность которого покрыта активным слоем, испускающим электроны при меньшей по сравнению с чистым металлом температуре. Подогреватель в виде проволочки находится внутри цилиндра.

Электроны, покинувшие анод, устремляются к электроду лампы, называемому анодом, — на него обычно подают положительный потенциал относительно катода.

Для управления электронным потоком в лампе служат электроды, называемые сетками. Обычно они представляют собой тонкие проволочки, навиваемые на специальный держатель так, чтобы сетка охватывала катод.

Вакуум в электронных лампах, необходимый для свободного движения электронов, должен быть не хуже 10^{-6} мм рт. ст.

Основные типы ламп

Диод — двухэлектродная лампа. Анодное напряжение создает в пространстве между анодом и катодом электрическое поле, которое заставляет электроны, вылетевшие из катода, лететь к аноду. Эти электроны в пространстве катод—анод создают отрицательный объемный (пространственный) заряд. Наибольшую плотность заряд, называемый часто «электронным облаком», имеет вблизи катода. Отрицательный объемный заряд затрудняет движение электронов от катода к аноду. Результирующее электрическое поле в пространстве катод—анод таково, что между анодным током I_a и напряжением на аноде U_a (все напряжения в лампе измеряются относительно катода) существует зависимость, выра-

жаемая законом «трех вторых», установленным Ленгмюром:

$$I_a = KU_a^{3/2}.$$

Коэффициент K зависит от формы и размеров электродов.

Электроны в диоде могут двигаться только от накаливаемого катода к аноду, но не обратно, и только тогда, когда анод имеет положительный потенциал относительно катода. Если же на аноде отрицательный потенциал относительно катода, то диод «заперт».

Таким образом, диод обладает односторонней проводимостью и, подобно полупроводниковому диоду, может использоваться для выпрямления переменного тока.

Триод. В триоде имеется третий электрод — сетка, помещенная вблизи катода. Если изменить потенциал сетки, то будет изменяться количество электронов, улетающих от катода к аноду. Вследствие того что в сетке имеются значительные просветы, она пропускает электроны, летящие от катода к аноду, но для электрического поля, создаваемого анодным напряжением, сетка является электростатическим экраном (при условии, что сетка соединена с катодом). Сетка ослабляет действие поля анода на электроны, вылетающие с катода. Говорят, что сетка «перехватывает» большую часть силовых линий электрического поля, создаваемого анодом. Вследствие этого сетка действует на анодный ток значительно сильнее, чем анод.

Характеристики триода. Наиболее важными являются анодно-сеточные характеристики — зависимость анодного тока I_a от нап-

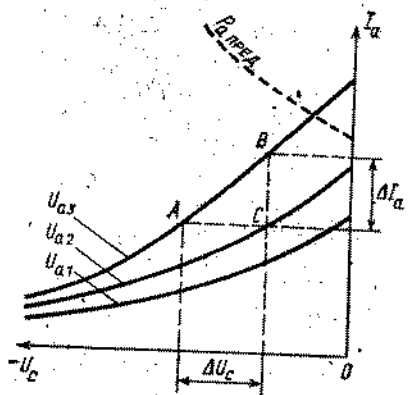


Рис. 1. Анодно-сеточные характеристики триода.

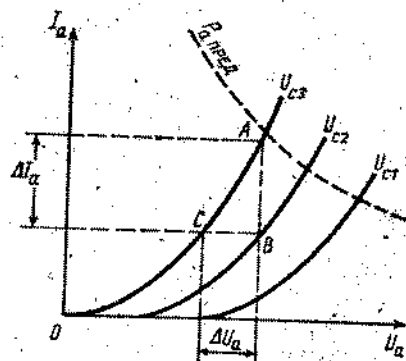


Рис. 2. Анодные характеристики триода.

ряжения на сетке U_c при постоянном анодном напряжении U_a , и анодные характеристики — зависимость анодного тока I_a от напряжения на аноде U_a при постоянном сеточном напряжении U_c . На рис. 1 представлено семейство анодно-сеточных характеристик триода ($U_{a1} < U_{a2} < U_{a3}$).

На рис. 2 представлено семейство анодных характеристик триода ($U_{c1} < U_{c2} < U_{c3}$).

Параметры триода. К характеристикам триода относятся: напряжение накала, ток накала, а также рекомендуемые нормальные постоянные анодное и сеточное напряжения и соответствующий им постоянный анодный ток.

Важным параметром триода является предельная мощность, выделяемая на аноде $P_{a \text{ пред}}$. Мощность P_a , выделяемая на аноде, равна кинетической энергии n электронов, подлетевших к аноду с энергией eU_a в течение времени t :

$$P_a = \frac{neU_a}{t}.$$

Но

$$ne = I_a t,$$

поэтому

$$P_a = I_a U_a.$$

Зная величину $P_{a \text{ пред}}$ для данного триода, из этого соотношения легко определить допустимые комбинации I_a и U_a . Границы допустимых значений пар I_a и U_a часто обозначают на семействах анодных и анодно-сеточных характеристик пунктирными линиями (см. рис. 1 и 2).

Главными параметрами триода, определяющими его свойства, являются: крутизна анодно-сеточной характеристики S (или просто крутизна), внутреннее сопротивление R_i и коэффициент усиления лампы μ .

Крутизна характеризует управляющее действие сетки, т. е. влияние сеточного напряжения на анодный ток. Если при постоянном анодном напряжении изменить сеточное напряжение на величину ΔU_c и при этом анодный ток изменится на величину ΔI_a , то крутизна S определится по формуле

$$S_a = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} \text{ при } U_a = \text{const.}$$

Таким образом, крутизна представляет собой отношение изменения анодного тока к вызвавшему его изменению сеточного напряжения при постоянном анодном напряжении. Выражают крутизну в миллиамперах на вольт (мА/В) или в амперах на вольт (А/В). Можно сказать, что величина крутизны показывает, на сколько миллиампер изменяется анодный ток при изменении сеточного напряжения на один вольт; если анодное напряжение постоянно.

Крутизна S определяется наклоном анодно-сеточной характеристики. Наиболее просто крутизна определяется методом двух точек (см. рис. 1):

$$S_{AB} = \frac{I_B - I_A}{U_{cB} - U_{cA}} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c}.$$

Определенная таким образом крутизна S_{AB} является средней для участка AB характеристики.

Крутизну анодно-сеточной характеристики можно найти из анодных характеристик (см. рис. 2). Если имеются две близкие анодные характеристики, снятые при сеточных напряжениях U_{c3} и U_{c2} , то следует взять на этих характеристиках точки A и B , соответствующие одному и тому же анодному напряжению. Изменение тока ΔI_a при переходе от точки A к точке B надо разделить на соответствующее изменение сеточного напряжения $\Delta U_c = U_{c3} - U_{c2}$:

$$S_{AB} = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_c} = \frac{I_A - I_B}{U_{c3} - U_{c2}}$$

Внутреннее сопротивление R_i характеризует влияние изменения анодного напряжения на анодный ток — это сопротивление между анодом и катодом для переменного тока. Если при изменении анодного напряжения на ΔU_a анодный ток изменится на ΔI_a , то внутреннее сопротивление равно

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} \text{ при } U_c = \text{const.}$$

Таким образом, внутреннее сопротивление представляет собой отношение изменения анодного напряжения к вызванному им изменению анодного тока при постоянном сеточном напряжении.

Для определения R_i из анодно-сеточных характеристик необходимо взять при постоянном сеточном напряжении приращение ΔI_a между точками C и B на характеристиках для напряжений U_{a2} и U_{a3} (см. рис. 1):

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_{a3} - U_{a2}}{I_B - I_C}$$

На анодных характеристиках (см. рис. 2) внутреннее сопротивление связано с их наклоном. Как видно из рисунка, по методу двух точек

$$R_i = \frac{\Delta U_a}{\Delta I_a} = \frac{U_A - U_C}{I_A - I_C}$$

Коэффициент усиления лампы μ показывает, во сколько раз изменение напряжения сетки действует на анодный ток сильнее, чем такое же изменение анодного напряжения. Определяют коэффициент усиления μ по формуле

$$\mu = \frac{\Delta U_a}{\Delta U_c}$$

где ΔU_a и ΔU_c берутся такими, которые вызывают одинаковое изменение анодного тока ΔI_a .

Для определения μ из анодно-сеточных характеристик (см. рис. 1) на них следует взять точки A и C для одного и того же анодного тока. Тогда

$$\mu = \frac{U_{a3} - U_{a2}}{\Delta U_c}$$

Нахождение μ из анодных характеристик аналогично рассмотренному определению μ из анодно-сеточных характеристик. Точки C и B берутся при одном и том же токе на двух характеристиках для U_{c3} и U_{c2} (см. рис. 2):

$$\mu = \frac{U_B - U_C}{U_{c3} - U_{c2}}$$

Параметры лампы S , R_i и μ связаны друг с другом уравнением

$$\frac{SR_i}{\mu} = 1.$$

Недостатки триодов. Вакуумные триоды до сих пор находят применение в различных радиосхемах. Однако они имеют ряд существенных недостатков. У них небольшой коэффициент усиления μ (обычно несколько десятков единиц), небольшое внутреннее сопротивление и сравнительно большая емкость между анодом и сеткой. Последние два недостатка заметно проявляются при работе на высоких частотах.

Тетрод — лампа с двумя сетками. Вторая сетка расположена между управляющей сеткой и анодом. Если вторая сетка соединена с катодом (хотя бы через резистор), то она экранирует катод и управляющую сетку от действия анода. Поэтому вторую сетку называют экранирующей, или экранной. Сквозь экранирующую сетку проникает лишь небольшая доля силовых линий электрического поля анода. В результате возрастают коэффициент усиления лампы μ и внутреннее сопротивление R_i , а емкость анод — управляющая сетка уменьшается.

Недостатком тетрода является *динаatronный эффект анода*. Электроны, ударяя в анод, выбивают из него вторичные электроны. В рабочем режиме тетрода возможны такие ситуации, когда потенциал экранной сетки окажется выше потенциала анода. Тогда вторичные электроны не вернуться на анод, как это имеет место в диодах и триодах, а притянутся к экранной сетке. В результате анодный ток уменьшится. Это приводит к искажению анодных характеристик тетрода и далее — к искажению сигнала, если тетрод используется для усиления.

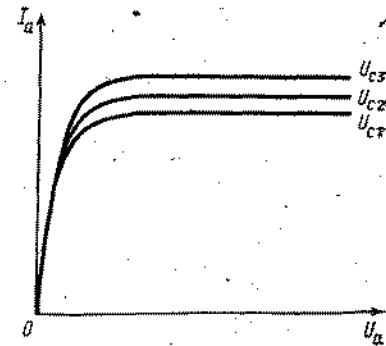


Рис. 3. Анодные характеристики пентода

Пентод — лампа с тремя сетками. Третья сетка, расположенная между анодом и экранирующей сеткой, предназначена для

устранения динаatronного эффекта. Действительно, если потенциал экранирующей сетки обычно составляет 20—50% от потенциала анода, то третью антидинаatronную сетку обычно непосредственно соединяют с катодом. В результате вторичные электроны, выбитые из анода, тормозятся этой сеткой и возвращаются на анод. Наряду с устранением динаatronного эффекта третья сетка улучшает все положительные свойства тетродов. Анодные характеристики пентода имеют вид, изображенный на рис. 3 ($U_{c1} < U_{c2} < U_{c3}$).

Усилительный каскад. Одним из простейших применений лампы является ее использование для усиления электрических сигналов. На рис. 4, а показана схема усилительного каскада. К сетке

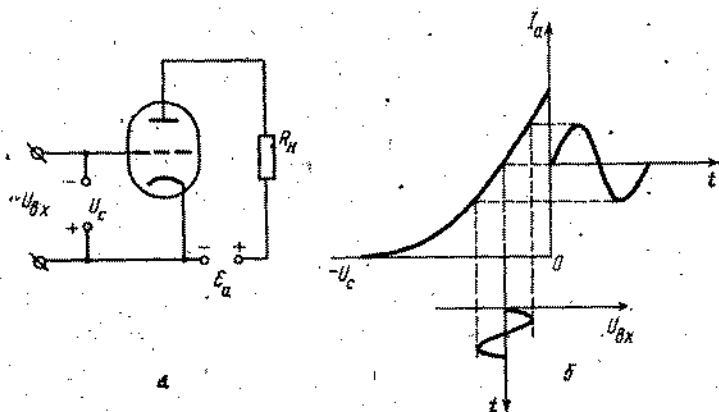


Рис. 4. Схема усилительного каскада (а); схематическое пояснение влияния изменения сеточного напряжения на анодный ток (б)

лампы подводится переменное напряжение $U_{вх}$, подлежащее усилению. Это напряжение вызывает появление в анодной цепи переменного тока I_a (рис. 4, б) в соответствии с анодно-сеточной характеристикой лампы. Этот ток, протекая по резистору нагрузки R_H , создает на нем падение напряжения. Это и есть выходное напряжение усилителя $U_{вых}$. Его величину можно рассчитать (приближенно) по формуле

$$U_{вых} = I_a R_H = U_{вх} SR_H.$$

Измеряют выходное напряжение обычно между анодом и катодом лампы. Измеряемое таким образом напряжение практически совпадает с падением переменного напряжения на резисторе R_H , так как источник анодного питания E_a обладает пренебрежимо малым сопротивлением переменному току.

Коэффициент усиления лампового усилителя можно вычислить по формуле

$$K = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = SR_H.$$

Описание экспериментальной установки

В настоящей задаче снимаются некоторые характеристики пентода 6К4П и наблюдается эффект усиления переменного напряжения.

Для снятия характеристик лампы собирается следующая схема (рис. 5). Лампа размещена на специальной панели, имеющей

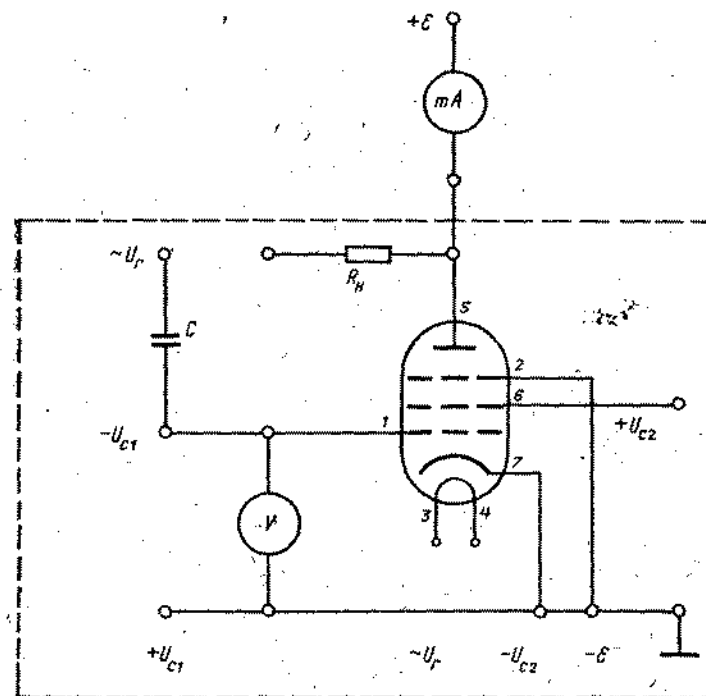


Рис. 5. Схема экспериментальной установки

гнезда для подключения источников питания и приборов. Питание схемы осуществляется от источников, имеющих выходы: переменное напряжение 6,3 В при токе 0,3 А для накала лампы (гнезда 3—4 панели); постоянное регулируемое напряжение 0—250 В при токе до 15 мА для питания анодной цепи лампы (гнезда +E —E панели); постоянное регулируемое напряжение 0—15 В при токе менее 1 мА для питания цепи первой сетки лампы (гнезда «—U_C» и «⊥» панели); постоянное напряжение 100 В при токе не менее 5 мА (гнезда «+U_C2» и «⊥» панели) для питания цепи второй сетки.

Напряжения и токи измеряются приборами, расположенными на лицевых панелях источников или непосредственно на столе.

На панели расположен резистор R_n , выполняющий роль сопротивления нагрузки при наблюдении эффекта усиления переменного сигнала с помощью пентода. Этот сигнал подается с выхода генератора (ГЗ-1) на управляющую сетку лампы через конденсатор, размещенный на панели. Для сопоставления этого напряжения с усиленным используется осциллограф (С1-72), подключаемый соответственно или к входу усилителя (между первой сеткой и катодом), или к его выходу (между анодом и катодом).

Упражнение 1. СНЯТИЕ АНОДНО-СЕТОЧНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Собрать схему в соответствии с рис. 5. Включить источники питания. Установить напряжение на первой сетке примерно -3 В, напряжение на аноде $U_a = 50$ В, напряжение на второй сетке $U_{c2} = 100$ В (третья сетка должна быть соединена с катодом) и дать прогреться установке в течение 10 мин.

Анодно-сеточные характеристики пентода, снятые даже при сильно различающихся анодных напряжениях, идут очень близко друг к другу, так что использование их для расчета параметров лампы затруднительно. Чтобы уловить разницу в анодных токах, соответствующих одному и тому же напряжению на управляющей сетке, но разным анодным напряжениям, будем снимать измерения сразу для двух анодно-сеточных характеристик при U_a' и U_a'' .

Установить $U_a' = 50$ В, $U_{c1} = -15$ В и зарегистрировать соответствующее значение анодного тока. Затем увеличить анодное напряжение до $U_a'' = 250$ В — при этом напряжении будем снимать вторую анодно-сеточную характеристику. Зарегистрировать силу анодного тока при U_a'' . Результаты измерений оформить в виде таблицы. Не меняя анодное напряжение $U_a'' = 250$ В, установить $U_{c1} = -14$ В и зарегистрировать соответствующий ток I_a . Затем перейти к характеристике при $U_a' = 50$ В, установив на аноде это напряжение (U_{c1} остается равным -14 В). И так далее, снимая попарно точки для двух характеристик, повышать напряжение на первой сетке U_{c1} .

При подходе к участку характеристики, где анодный ток большой, следует помнить, что предельная мощность, рассеиваемая на аноде для лампы 6К4П, составляет 3 Вт. При ее превышении анод перегревается, ток «плывет». Поэтому в этой части характеристики измерения надо производить по возможности быстрее.

Окончив измерения, установить $U_{c1} = -15$ В, $U_a = 50$ В.

Обработка результатов эксперимента

Сглаживание экспериментально полученных характеристик

По завершении снятия характеристик необходимо представить их графически. Для этого на плоскости (I_a , U_{c1}) нанести экспери-

ментальные точки [I_a , U_{c1}]. Линии же по этим точкам, имеющим обычно некоторый разброс, проведем после математической обработки полученных результатов. Для каждой характеристики методом наименьших квадратов найдем уравнение такой линии, которая наилучшим образом удовлетворяет экспериментальным точкам. Так как характеристика не описывается какой-либо простой функцией, представляя собой довольно сложную зависимость, будем искать линию, описываемую полиномом пятой степени. При этом, располагая 10—15 экспериментальными точками, мы получим, с одной стороны, довольно плавную линию — без излишних изгибов, с другой стороны, эта линия пройдет довольно близко к экспериментальным точкам.

Для расчета необходимо ввести в ЭВМ массивы значений напряжения на первой сетке и соответствующих значений анодного тока для характеристик при анодных напряжениях U_a' и U_a'' , значения U_a' и U_a'' . После расчета ЭВМ выдает для всех значений U_{c1} значения анодного тока, по которым следует построить линии на графике $I_a(U_{c1})$. Это будут линии, наилучшим образом в смысле МНК проходящие по экспериментальным точкам.

Расчет параметров лампы

Теперь, когда мы располагаем двумя близкими анодно-сеточными характеристиками, расстояние между которыми изменяется монотонно, можно вычислить параметры лампы S , R_i и μ для каждого значения напряжения на первой сетке U_{c1} и, таким образом, получить представление о том, как эти параметры ведут себя при изменении U_{c1} .

Программа, заложенная в ЭВМ, предусматривает этот расчет, по окончании которого ЭВМ выдает таблицу значений S , R_i и μ , а также параметра $Z = SR_i/\mu$, по близости которого к единице можно судить о качестве измерений в данной точке.

Построить графики $S(U_{c1})$, $R_i(U_{c1})$ и $\mu(U_{c1})$.

Упражнение 2. СНЯТИЕ АНОДНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК

Напряжение на экранирующей сетке оставить прежним ($U_{c2} = 100$ В). Напряжение на управляющей сетке установить $U_{c1} = 0$. Изменяя анодное напряжение от нуля до 250 В, снять зависимость $I_a(U_a)$. Результаты измерений занести в таблицу.

Затем снять аналогичные зависимости при $U_{c1} = -1$; -2 ; -3 ; -4 В и занести результаты измерений в таблицу.

Анодные характеристики представить графически.

Упражнение 3. НАБЛЮДЕНИЕ УСИЛЕНИЯ ПЕРЕМЕННОГО НАПРЯЖЕНИЯ ЛАМПОВЫМ УСИЛИТЕЛЬНЫМ КАСКАДОМ

Включить генератор и осциллограф. Источник анодного питания лампы подключить к аноду через резистор R_n , расположенный

на панели. Установить $U_{c1} = -2В$, $U_a = 150 В$, $U_{c2} = 100 В$. С генератора на вход усилительного каскада подать напряжение $U_{ген} = 50 мВ$ частоты $f = 1 кГц$. К входу усилительного каскада (можно непосредственно к первой сетке лампы) подключить осциллограф. С помощью регулировок осциллографа установить на его экране изображение нескольких периодов усиливаемого переменного напряжения.

Определить величину наблюдаемого сигнала $U_{вх}$.

Переключить осциллограф с входа усилительного каскада на его выход, т. е. на анод лампы.

Записать величину наблюдаемого сигнала $U_{вых}$.

Вычислить коэффициент усиления каскада:

$$K_{экср} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}$$

Для указанного режима лампы определить ее параметры S , R_i и μ по анодным и анодно-сеточным характеристикам.

Вычислить значение комбинации этих параметров лампы:

$$Z = \frac{SR_i}{\mu}$$

Вычислить коэффициент усиления каскада по формуле

$$K_{теор} = SR_n$$

и сравнить его с $K_{экср}$.

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Каково устройство электронной лампы?
2. Для чего применяют активированные катоды?
3. Что выражают основные параметры лампы: коэффициент усиления μ , внутреннее сопротивление R_i , крутизна S ?
4. Какой вид имеют анодно-сеточные характеристики триода, тетрода, пентода?
5. Как определяются S , R_i , μ по анодно-сеточным и анодным характеристикам?
6. Какова роль сеток в пентоде?
7. Как определить максимально допустимые анодный ток и анодное напряжение лампы?
8. Как выбирается режим пентода при использовании его в схеме усилителя?
9. Каким образом усилить сигнал с помощью пентода?
10. Показать на схеме установки цепи тока накала, анодного тока.
11. Объяснить влияние сеточного смещения на коэффициент усиления усилителя на пентоде.
12. Какие меры предосторожности в отношении электробезопасности следует соблюдать при выполнении настоящей задачи?

Литература

1. Калашников С. Г. Электричество. М.: Наука, 1985, § 160, 161.
2. Сивухин Д. В. Общий курс физики. Т. III. Электричество. М.: Наука, 1977, § 102, 103.
3. Жеребцов И. П. Основы электроники. М.: Энергия, 1977.

Лабораторная работа 10

ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЙ ДИОД

В данной лабораторной работе снимается вольт-амперная характеристика диода, изучается применение диодов в различных схемах выпрямления переменного тока.

Описание экспериментальной установки. Объектом исследования являются полупроводниковые германиевые диоды типа Д226Б. Диоды, резисторы и конденсаторы, необходимые для выполнения эксперимента, смонтированы на специальной панели. Резисторы имеют сопротивление по 330 Ом, а емкости — 1, 5 и 30 мкФ. На панели имеется ряд дополнительных гнезд, облегчающих монтаж нужных схем.

Источник постоянного напряжения I обеспечивает плавное изменение выходного напряжения до 25 В при токе до 500 мА.

Источником переменного напряжения служит генератор, имеющий симметричный и несимметричный выходы, обеспечивающий 2 В на частотах 20 ÷ 1000 Гц. Для измерения постоянного напряжения используется вольтметр с пределом 1,5 В, для измерения постоянного тока — миллиамперметр с пределом 75 ÷ 150 мА. Осциллограф имеет входы «Y» и «X».

Упражнение 1. СНЯТИЕ ВОЛЬТ-АМПЕРНОЙ ХАРАКТЕРИСТИКИ ДИОДА

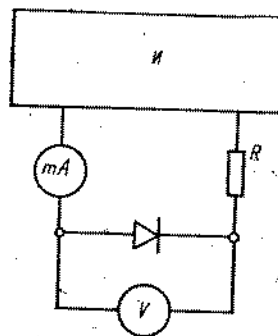


Рис. 1. Схема экспериментальной установки

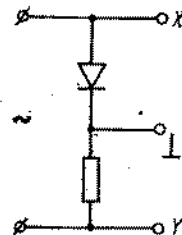


Рис. 2. Схема для наблюдения вольт-амперной характеристики диода на экране осциллографа