

Триод и пентод

Форма характеристик и параметры триода

Для усиления сигналов, а также для их генерации, преобразования формы и т.п. применяются электронные лампы с управляющим электродом (сеткой) - триоды и, как их дальнейшее развитие, многосеточные лампы. Сетка имеет обычно вид спирали из тонкой проволоки, укрепленной между катодом и анодом лампы.

Анодный ток триода при постоянной температуре катода является функцией двух переменных: потенциала анода U_a и потенциала сетки U_g .

Для описания работы лампы удобно рассматривать зависимость величины анодного тока от потенциала сетки при постоянном напряжении на аноде:

$$I_a = f(U_g) \quad U_a = const$$

и зависимость величины анодного тока от потенциала анода при постоянном напряжении на сетке:

$$I_a = f(U_a) \quad U_g = const$$

Эти зависимости дают два семейства характеристик: семейство статических сеточных характеристик и семейство статических анодных характеристик лампы.

Для установления формы характеристик триода рассмотрим сначала протекание тока через двухэлектродную лампу.

Типичная вольтамперная характеристика диода показана на рис.1. Из теории двухэлектродной лампы ясно, что анодный ток, или, что то же, число электронов, вылетающих из области объемного заряда в единицу времени, определяется полем, создаваемым анодным напряжением в непосредственной близости от катода. По теореме Гаусса, это поле определяется зарядом катода¹. Таким образом, кривая на рис.1 в сущности, дает зависимость анодного тока от заряда катода:

$$Q_k = C_{ak} U_a$$

где C_{ak} - емкость конденсатора, образованного анодом и катодом. В лампе с сеткой заряд катода складывается из заряда, индуцированного напряжением на аноде, и из заряда, индуцированного сеткой

$$Q_k = C_{ak} U_a + C_{gk} U_g$$

где C_{gk} - междуэлектродная емкость сетка-катод.

Зависимость числа электронов, вылетающих из прикатодной области, от заряда катода дается по-прежнему кривой рис.1, но теперь эти электроны не обязательно попадут на анод - часть их может попасть на сетку. В этом случае кривая рис. 1 определяет не анодный, а катодный ток I_k .

Практически удобнее откладывать по оси абсцисс не заряд катода - величину трудно измеряемую, а так называемое *эквивалентное*, или *управляющее, напряжение*. За величину управляющего напряжения² U_{st} принимается такое напряжение, которое, будучи приложенным к сетке, создаст такое же поле у катода, как фактически существующие напряжения на аноде и сетке вместе:

$$U_{st} = \frac{Q_k}{C_{gk}} = U_g + \frac{C_{ak}}{C_{gk}} U_a = U_g + D U_a \quad (1)$$

Коэффициент $D = C_{ak}/C_{gk}$, показывающий, во сколько раз сетка сильнее влияет на прикатодное поле, чем анод, называется *проницаемостью* лампы.

Формула (1) позволяет сразу построить семейство сеточных и анодных характеристик триода. Сеточные характеристики получаются из кривой рис.1 простыми смещением по горизонтали влево на отрезок $D U_a$ (см. рис.2).

Так как сеточные токи при обычно применяемых напряжениях малы, то различие между I_k и I_a незначительно. На рис. 2 это различие не отмечено.

На характеристиках лампы различаются следующие участки:

1. При больших отрицательных потенциалах сетки анодный ток отсутствует - лампа заперта.
2. При некотором значении U_a , которое называется *напряжением запираения*, или *напряжением отсечки*, появляется анодный ток.
3. Возрастание анодного тока происходит сначала по вогнутой кривой (приблизительно закон 3/2) - так называемая область *нижнего изгиба* характеристики.

¹ Точнее, той частью заряда, которая индуцирована на катоде анодным напряжением. Хотя объемный заряд в лампе также индуцирует заряд на катоде, но он уже учтен в теории, приведенной в кривой рис.1.

² st- от немецкого *Steuerspannung* - управляющее напряжение.

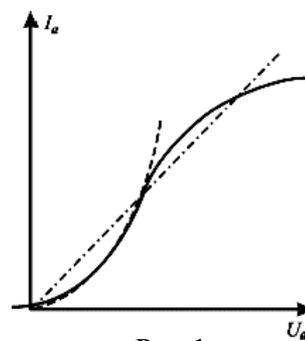


Рис. 1

4. Дальнейшее возрастание анодного тока происходит приблизительно линейно и дает *линейный участок* характеристики.

5. Область *верхнего изгиба* и *область насыщения* (для современных приемно-усилительных ламп недостижимы).

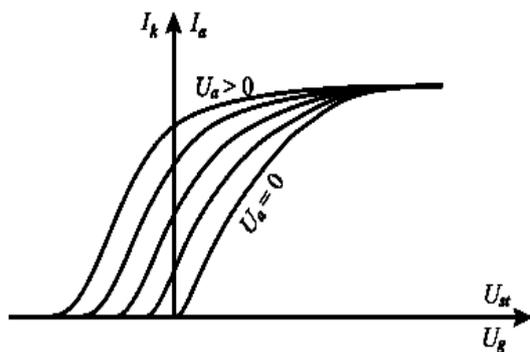


Рис. 2.

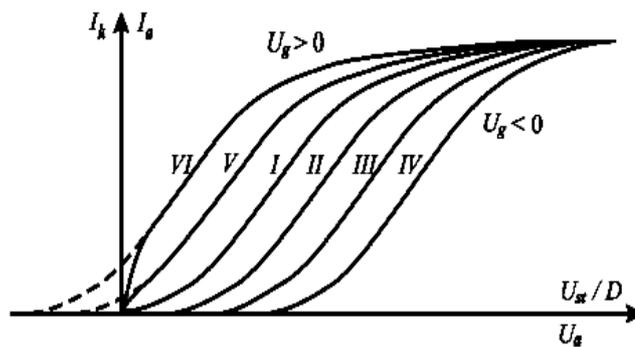


Рис. 3.

Для работы лампы очень существенно, является ли потенциал сетки положительным или отрицательным. Дело в том, что при $U_g > 0$ возникают сеточные токи, ведущие к искажению усиливаемого сигнала, и поэтому в большинстве случаев вредные.

В связи с этим приемно-усилительные лампы, как правило, изготавливают с *"левыми характеристиками"*. Это означает, что при обычно применяемых анодных напряжениях большая часть линейного участка характеристик лежит в области $U_g < 0$. Если линейная часть характеристики лежит в области $U_g > 0$, то говорят, что лампа имеет *"правые характеристики"*.

Семейство анодных характеристик строится точно таким же образом, как семейство сеточных характеристик (см. рис.3). Строим кривую рис.1 в координатах $I_k - U_{st}/D$ (Кривая I). При переходе к U_a кривая смещается на отрезок U_g / D вправо, если $U_g < 0$ (кривые II - IV), и влево, если $U_g > 0$ (кривые V и VII, пунктир). Для перехода от I_k к I_a надо учесть сеточные токи. Когда $U_g < 0$, сеточный ток отсутствует и анодный ток равен катодному. Но когда $U_g > 0$, кривые анодного тока (сплошные) заметно отклоняются от кривых катодного тока (пунктир). При отрицательных U_a электроны, очевидно, не смогут долететь до анода, $I_a = 0$. Когда $U_a \gg U_g$, сеточный ток мал, $I_a \approx I_k$. Область пунктирных кривых соответствует условиям $U_a \approx U_g$, когда значительная часть электронов отклоняется к виткам сетки.

В изложенной выше простой картине не учитывалась неоднородность поля сетки. В действительности, например, при отрицательных потенциалах сетки эквипотенциальные поверхности сильно искривляются, так что области положительного потенциала приближаются к катоду. Поэтому уменьшение тока при увеличении отрицательного потенциала сетки происходит медленнее, чем показано на рис.2, нижняя часть характеристик вытягивается влево. Характеристики не получаются одна из другой простым горизонтальным переносом - наклон их несколько различен. Однако в общих чертах предыдущее рассуждение верно описывает работу лампы.

Трехэлектродная лампа как усилитель

Принципиальная схема усилителя напряжения показана на рис.4. Если U_g - потенциал сетки лампы - изменяется под действием внешнего сигнала, например, увеличивается, то это приводит к увеличению анодного тока I_a . Тогда падение напряжения $I_a R_a$ на сопротивлении анодной нагрузки тоже увеличивается. При этом потенциал анода лампы, очевидно, понизится, так что возрастание анодного тока окажется меньшим, чем было бы при поддержании постоянного анодного напряжения.

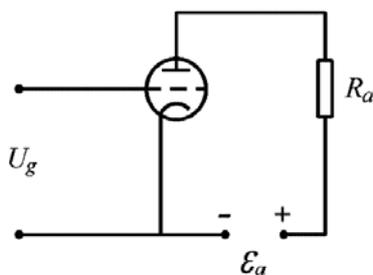


Рис. 4.

Однако, поскольку анодное напряжение влияет на ток значительно слабее, чем сеточное, при достаточно большом сопротивлении анодной нагрузки R_a мы можем получить на аноде большее изменение напряжения, чем задали на сетке.

Разберем работу лампы на схеме рис.4 подробнее. Анодный ток лампы I_a является функцией двух переменных U_g и U_a . Эту функцию можно задать графически, например, семейством сеточных характеристик (см. рис.5, где даны характеристики лампы 6С5). Каждая из кривых на этом рисунке дает зависимость $I_a = f(U_g)$ при постоянном, указанном на кривой, анодном напряжении.

Но, как сказано выше, в усилительной схеме анодное напряжение не является постоянным, а, в свою очередь, зависит от анодного тока. Действительно, по второму закону Кирхгофа,

$$U_a = E_a - I_a R_a. \quad (2)$$

Пользуясь семейством характеристик рис.5 и уравнением (2), можно, задавая значения I_a или U_a , по точкам построить кривую зависимости I_a от U_g для схемы рис.4 - так называемую *динамическую характеристику* (характеристики,

снятые при $U_a = const$, называются *статическими*). На рис.5 показана динамическая характеристика для $U_a = 300$ в и $R_a = 10$ кОм.

Построение динамической характеристики на основе семейства статических сеточных характеристик и уравнения (2) удобно проводить следующим образом. Задавая значение U_a , для которого построена одна из статических сеточных характеристик, находим значение анодного тока I_a из уравнения (2). Точка на статической сеточной характеристике для заданного U_a с ординатой I_a и есть точка динамической характеристики.

Начальной точкой ($U_a = E_a, I_a = 0$) динамической характеристики, построенной на основе сеточных, будет точка отсечки, поэтому важно получить её в опыте. Чем подробнее будет снято семейство сеточных статических характеристик, тем достовернее будет построенная динамическая характеристика, и чем больший интервал значений анодных напряжений U_a у семейства сеточных характеристик, тем протяжённее будет динамическая характеристика вдоль оси сеточных напряжений U_g . А это важно для правильного выбора рабочей точки усилителя на нагрузочной характеристике.

Динамическая характеристика позволяет качественно рассчитывать усиление, даваемое схемой рис.4. Пусть напряжение на сетке лампы изменяется от $U_g = -6$ в до $U_g = -2$ в, т.е. возрастает на $\Delta U_g = 4$ в. Это соответствует точкам *A* и *B* на динамической характеристике. По чертежу находим, что анодный ток изменяется от точки 10,5 ма до 14,5 ма, т.е. возрастает на $\Delta I_a = 4,0$ ма. Падение напряжения на сопротивлении нагрузки увеличивается на $R_a \Delta I_a = 40$ в, а анодное напряжение уменьшается на ту же величину: $\Delta U_a = -40$ в. (Величину ΔU_a можно найти и непосредственно из рис.5, определяя значения U_a в точках *A* и *B* интерполированием между статическими характеристиками.)

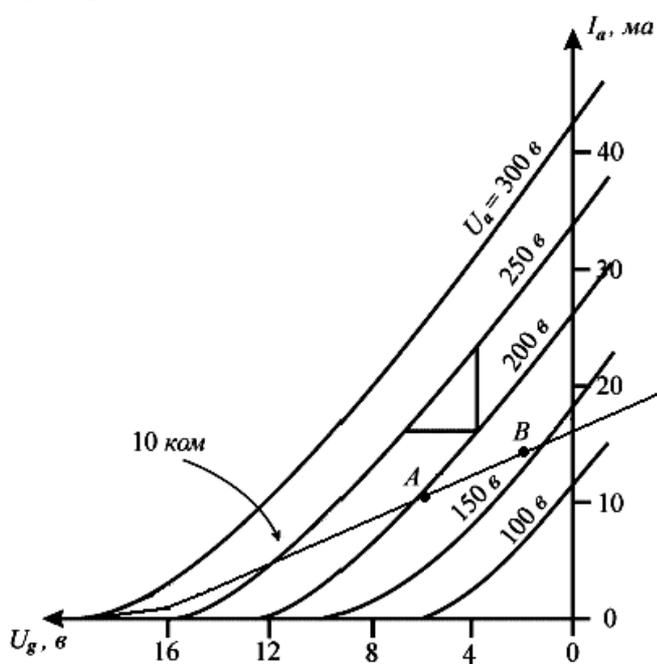


Рис.5

Динамический коэффициент усиления представляет собой полную производную

$$\mu_d = - \frac{dU_a}{dU_g}$$

так как анодный ток в схеме рис.4 не является независимой переменной (см. уравнение (2)).

В справочниках часто приводятся не сеточные, а анодные характеристики ламп, дающих зависимость I_a от U_a при постоянном U_g (различном для разных характеристик). На рис.6 дано семейство анодных характеристик для лампы 5С6.

Пунктирная кривая на рис.6 соответствует уравнению

$$U_a I_a = const = W_m,$$

где W_m - максимальная мощность, которая может выделяться на аноде лампы при опасности перегрева. Режимы лампы, изображаемые точками на этой кривой, недопустимы. Для лампы 5С6 $W_m = 2,5$ вт.

Проанализируем работу лампы с помощью семейства анодных характеристик.

Для построения динамической характеристики необходимо найти значения I_a при каждом значении U_g , учитывая, что U_a зависит от I_a согласно уравнению (2), т.е. необходимо решить уравнение анодной характеристики совместно с уравнением (2). Для этого строят прямую, изображающую уравнение (2) - так называемую *нагрузочную характеристику* (рис.6; $E_a = 310$ в, $R_a = 10$ ком). Точки пересечения нагрузочной характеристики с анодными

Величина $\mu_d = - \Delta U_a / \Delta U_g$, показывающая, во сколько раз уменьшение анодного напряжения превышает вызвавшее его увеличение сеточного напряжения, называется *динамическим коэффициентом усиления лампы* в данной схеме (или просто коэффициентом усиления усилителя). Легко видеть, что максимально возможный коэффициент усиления получается, когда сопротивление нагрузки очень велико, так что анодный ток почти не изменяется. Предельное значение μ_d , измеренное при постоянном анодном токе, называется *статическим коэффициентом усиления лампы*

$$\mu = - \left(\frac{\Delta U_a}{\Delta U_g} \right)_{I_a = const}$$

Эта величина, равная отношению взаимно компенсирующихся приращений анодного и сеточного напряжений, показывает, во сколько раз сеточное напряжение действует на анодный ток сильнее, чем анодное напряжение.

Математически коэффициент усиления μ можно записать как частную производную

$$\mu = - \left(\frac{\partial U_a}{\partial U_g} \right)_{I_a}$$

характеристиками для разных U_g позволяют найти значения I_a (и U_a) для соответствующих значений U_g . Эти значения используются для построения динамической характеристики $I_a = f(U_g)$.

С помощью семейства анодных характеристик и нагрузочной характеристики можно провести анализ работы усилителя и непосредственно в координатах I_a, U_a не находя динамической сеточной характеристики. Попробуйте, например, самостоятельно определить из рис.6 величину μ_d .

В случае малых изменений потенциала на сетке лампы мы можем провести исследование работы усилителя также и аналитически, в дифференциальной форме. Связь между малыми приращениями анодного тока и напряжений на сетке и аноде лампы можно получить дифференцированием функции $I_a = f(U_a, U_g)$, которую можно считать известной (она задана графически семейством характеристик). Дифференцирование дает:

$$\Delta I_a = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_g} \right) U_a \Delta U_g + \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_a} \right) U_g \Delta U_a \quad (3)$$

Коэффициенты при ΔU_g и ΔU_a в этом уравнении имеют важное значение, и поэтому для них введены специальные обозначения. Величина

$$S = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_g} \right) U_a$$

называется *крутизной статической сеточной характеристики*, или просто *крутизной*. Величина

$$R_i = \left(\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right) U_g$$

называется *внутренним сопротивлением лампы для переменного тока* (сопротивление лампы для постоянного тока не имеет, очевидно, определенной величины, и поэтому для него не вводят специального обозначения).

Введенные здесь параметры лампы S и R_i , а также μ , легко найти из семейства характеристик, заменяя производные отношением конечных приращений. Эти приращения прежде всего находятся с помощью треугольника, построенного на двух соседних характеристиках (см. рис.5 и 6). На рис.5, например, величины ΔU_a и ΔU_g определяются катетами треугольника, а ΔU_a есть разность между значениями U_a для двух соседних характеристик.

Для треугольника, построенного на рис.5, $\Delta U_g = 2,0$ в, $\Delta I_a = 6,5$ ма, $\Delta U_a = 50$ в. Отсюда

$$S = \Delta I_a / \Delta U_g = 3,2 \text{ ма/в}$$

$$R_i = \Delta U_a / \Delta I_a = 7,5 \text{ ком}$$

$$\mu = |\Delta U_a / \Delta U_g| = 25$$

Из свойств частных производных известно, что

$$\mu = - \left(\frac{\partial U_a}{\partial U_g} \right) I_a = \left(\frac{\partial U_a}{\partial I_a} \right) U_g \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_g} \right) U_a = S R_i \quad (4) \quad \text{Рис. 6}$$

Это так называемое *основное уравнение лампы*.

Часто вместо μ вводят обратную величину – *проницаемость*³ D

$$D = \frac{1}{\mu} = - \left(\frac{\partial U_g}{\partial U_a} \right) I_a$$

Тогда основное уравнение принимает вид $S R_i D = 1 \quad (5)$

Приведем еще типичные значения параметров триодов. Крутизна характеристики S зависит от размеров электродов лампы и в усилительных лампах обычно лежит в пределах от 1 до 10 ма/в. В генераторных лампах крутизна обычно бывает больше - от 2 до 10-20 ма/в.

Внутренне сопротивление R_i триода колеблется для разных типов лампы от 1 ком до 50 ком. Коэффициент усиления триодов μ лежит в пределах от 4-5 до 100.

Пользуясь введенными параметрами, перепишем уравнение (3) в виде

$$\Delta I_a = S \Delta U_g + \frac{1}{R_i} \Delta U_a \quad (6)$$

Это уравнение определяет зависимость анодного тока от напряжения на электродах лампы. Но, как указывалось выше, напряжение U_a само зависит от анодного тока. Эта зависимость дается уравнением (2), которое мы также запишем через приращения:

³ Как было показано в предыдущем параграфе, проницаемость равна отношению междуэлектродных емкостей лампы: $D = C_{ak}/C_{gk}$.

$$\Delta U_a = - \Delta R_a \Delta I_a \quad (7)$$

Формулы (6) и (7) представляют собой систему линейных уравнений, позволяющих найти ΔI_a и ΔU_a при заданном приращении сеточного напряжения ΔU_g .

Решение этой системы дает

$$\Delta I_a = \frac{S R_i}{R_i + R_a} \Delta U_g = S_d \Delta U_g \quad (8)$$

$$\Delta U_a = - \frac{S R_i R_a}{R_i + R_a} \Delta U_g = - \frac{\mu R_a}{R_i + R_a} \Delta U_g = - \mu_d \Delta U_g \quad (9)$$

Здесь введены обозначения:

$$S_d = S \frac{R_i}{R_i + R_a} \quad (10)$$

- крутизна динамической характеристики,

$$\mu_d = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a} \quad (11)$$

- динамический коэффициент усиления. Физический смысл величины μ_d был уже выяснен выше.

Формула (11) показывает, что для повышения динамического коэффициента усиления необходимо выбирать сопротивление R_a большим по сравнению с R_i . Однако при большом сопротивлении R_a сильно снижается U_a , так что динамическая характеристика проходит очень низко и может оказаться целиком в области нижнего изгиба характеристик. Практически удобно выбрать $R_a \approx R_i$. При этом μ_d оказывается порядка $1/2 \mu$. Дальнейшее увеличение R_a ведет к сравнительно малому повышению μ_d .

Величина

$$S_d = \frac{\Delta I_a}{\Delta U_g}$$

определяет скорость увеличения анодного тока при повышении сеточного напряжения в данной схеме. В отличие от величины

$$S = \left(\frac{\partial I_a}{\partial U_g} \right) U_a$$

ее можно записать в виде полной производной

$$S_d = \frac{dI_a}{dU_g}$$

На практике приведенный выше анализ обычно можно применять не только для бесконечно малых, но и для конечных приращений ΔU_g , ΔU_a , ΔI_a . Дело в том, что усилители напряжения, как правило, работают в области линейного участка характеристики, и поэтому дифференциальное уравнение (3) применимо и для конечных значений ΔU_g , ΔU_a , ΔI_a при условии, что "рабочая точка" (т.е. точка, определяемая мгновенными значениями приращений U_g , U_a , I_a) при работе усилителя не выходит за пределы линейного участка динамической характеристики. Для того, чтобы это условие выполнялось, необходимо правильно выбрать начальную рабочую точку (т.е. значения приращений U_g , U_a , I_a при отсутствии внешнего усиливаемого сигнала), которую чаще всего и называют просто рабочей точкой.

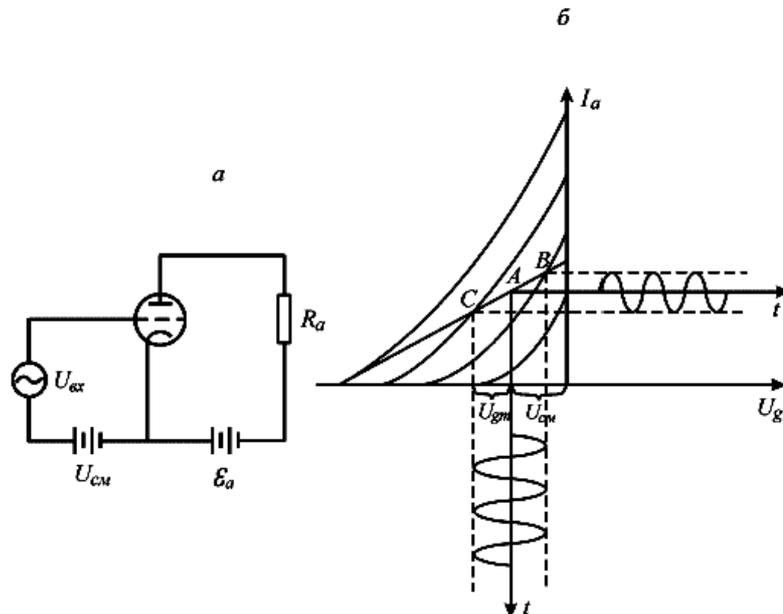


Рис. 7.

Рабочая точка (начальная) задается постоянным напряжением ("смещением"), подаваемым на сетку лампы. Для этого можно, например, включить между сеткой и катодом, последовательно с источником входного (усиливаемого) переменного напряжения, батарею соответствующей э.д.с. $E = U_{см}$ (см. рис.7,а). Мгновенное значение напряжения на сетке лампы равно в этом случае

$$U_g = U_{вх} + U_{см}.$$

Рис.7, б иллюстрирует работу лампы при синусоидальном входном напряжении.

Выбор рабочей точки производится на основании следующих соображений:

1. Как уже указывалось, необходимо, чтобы при максимально ожидаемом сигнале $U_{вх}$, напряжение на сетке $U_g = U_{вх} + U_{см}$ не выходило за пределы линейной части динамической характеристики. Только в этом случае форма кривой анодного тока и анодного напряжения в зависимости от времени будет без искажений воспроизводить форму входного напряжения.
2. Рабочая точка должна выбираться так, чтобы потенциал сетки U_g при работе лампы всегда оставался отрицательным. Если это условие не будет выполняться, то в момент, когда $U_g > 0$, возникнет сеточный ток. Сопротивление промежутка сетка - катод при $U_g > 0$ невелико - обычно не больше 10 ком. Так как внутреннее сопротивление источника переменного напряжения бывает обычно гораздо больше этой величины (чаще всего это выходное сопротивление предыдущего каскада усиления), то большая часть э.д.с. $U_{вх}$ будет падать на его внутреннем сопротивлении, а на сетку лампы придется только незначительная ее часть. Таким образом, напряжение сигнала будет как бы обрезано по линии $U_g = 0$. Это явление применяется при так называемом сеточном детектировании, но если требуется неискаженное усиление сигнала, то оно вредно. Поэтому необходимо выбирать рабочую точку достаточно далеко в области отрицательных U_g .
3. При обязательном выполнении первых двух условий следует обращать внимание также на экономичность схемы. Нежелательно пользоваться слишком высоким напряжением анодного питания, и следует по возможности снижать постоянную составляющую анодного тока.

Рассмотрим теперь работу усилителя при усилении синусоидального переменного напряжения $U_{вх} = U_{gm} \cos \omega t$, где ω - круговая частота. В этом случае напряжение на сетке изменяется по закону

$$U_g = U_{см} + U_{gm} \cos \omega t.$$

Если напряжение смещения выбрано правильно, то U_g не выходит за пределы линейной части динамической характеристики, и мы можем пользоваться уравнениями (6-9), подставляя в них

$$\Delta U_g = U_{gm} \cos \omega t; \Delta U_a = U_{am} \cos \omega t; \Delta I_a = I_{am} \cos \omega t.$$

Таким образом, мы сразу получаем связь между амплитудами переменных составляющих тока и напряжений:

$$I_{am} = S_d U_{gm}; U_{am} = -\mu_d U_{gm},$$

где параметры S_d и μ_d даны уравнениями (10) и (11).

Выходное напряжение, снимаемое с анода лампы, будет также синусоидальным: $U_{вых} = U_{am} \cos \omega t$.

Из предыдущего ясно, что эти результаты применимы только при не слишком больших амплитудах входного напряжения. Если изменение U_g выходит за пределы линейной части характеристики - либо в область нижнего изгиба характеристики, либо в область сеточных токов ($U_g > 0$), то появляются искажения, а среднее значение μ_d уменьшается.

В усилителе переменного тока анодная нагрузка часто бывает не омическим сопротивлением, а каким-то комплексным (Z_a). В этом случае между переменными составляющими анодного тока и анодного напряжения будет наблюдаться некоторый сдвиг фаз. Вследствие этого будет существовать сдвиг фаз также и между переменными составляющими анодной тока и сеточного напряжения. Тогда динамическая характеристика представится эллипсом. Количественный анализ работы усилителя с комплексной нагрузкой удобно вести в операторной форме, представляя U_g как $U_{см} + U_{gm} e^{j\omega t}$.

Дальнейший расчет проводится по той же формальной схеме, что и раньше, но в уравнении (7) надо заменить R_a на Z_a :

$$U_{am} = -Z_a I_{am}$$

Тогда для динамической крутизны и коэффициента усиления получим комплексные значения:

$$S_d = \frac{R_i}{R_i + Z_a} \quad (12)$$

$$\mu_d = \mu \frac{Z_a}{R_i + Z_a} \quad (13)$$

Абсолютные значения μ_d и S_d вычисляются, как обычно, для комплексной величины. Так, для нагрузки в виде дросселя, т.е. катушки самоиндукции L с малым омическим сопротивлением, имеем

$$|S_d| = S \frac{R_i}{\sqrt{R_i^2 + \omega^2 L^2}} \quad (14)$$

$$|\mu_d| = \mu \frac{\omega L}{\sqrt{R_i^2 + \omega^2 L^2}} \quad (15)$$

Из этих формул видно, что коэффициент усиления в случае реактивной нагрузки зависит от частоты.

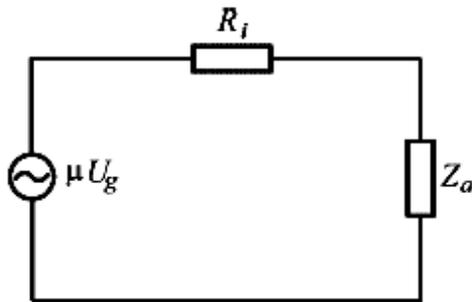


Рис. 8.

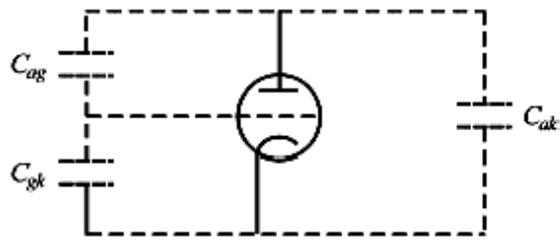


Рис. 9.

Эквивалентная схема усилителя показана на рис.8. Нетрудно убедиться, что ток через нагрузку и падения напряжения в этой схеме имеют ту же величину, что и в усилителе.

Многосеточные лампы (тетрод и пентод)

Недостатком триодов является сравнительно небольшая величина коэффициента усиления. Однако гораздо важнее другой их недостаток, делающий почти невозможным использование триодов в высокочастотных усилителях, - большая величина междуэлектродных емкостей. Эти емкости показаны на рис.9, их величина зависит от размеров и формы электродов и от расстояний между ними⁴. С учетом междуэлектродных емкостей эквивалентная схема усилителя на триоде должна быть представлена в виде схемы рис.10. При работе лампы переменные разности потенциалов, действующие между электродами, создают через междуэлектродные емкости емкостные токи, которые могут привести к изменению рабочего режима лампы, к потере усиления и т. п.

Допустим, что на сетку подается переменное напряжение $U_{вх} = U_{gm} \cos \omega t$. Тогда напряжение на аноде лампы будет тоже иметь переменную составляющую $-\mu_d U_g$, где μ_d - динамически коэффициент усиления. В цепи сетки будет протекать суммарный ток заряда двух емкостей - C_{gk} и C_{ag} . Амплитуда тока через емкость C_{gk} равна $I_{gkm} = U_{gm} \omega C_{gk}$; амплитуда тока через емкость C_{ag} , определяемая разностью переменных напряжений сетки и анода, равна

$$I_{agm} = (U_{gm} - U_{am}) \omega C_{ag} = (U_{gm} + \mu_d U_{gm}) \omega C_{ag} \approx \mu_d U_{gm} \omega C_{ag}.$$

Общий емкостный ток в цепи сетки равен

$$I_{gm} = I_{gkm} + I_{agm} \approx \omega (C_{gk} + \mu_d C_{ag}) U_{gm}.$$

Таким образом, если считать, что весь емкостный ток в цепи сетки I_{gm} создается только переменным напряжением U_{gm} , то мы имеем дело со значительным увеличением эквивалентной входной реактивной проводимости. Входная динамическая емкость в этом случае будет равна

$$C_{gd} \approx C_{gk} + \mu C_{ag},$$

т.е. будет значительно больше простой суммы емкостей C_{gk} и C_{ag} . Наибольшее значение в этом действующем значении C_{gd} имеет емкость C_{ag} , действие которой увеличивается примерно в μ_d раз.

Другим вредным проявлением емкости C_{ag} является то, что через эту емкость осуществляется обратная связь анодной цепи с сеточной, и при известных условиях усилительная лампа начинает самовозбуждаться, т.е. работать как генератор (усилитель "генерирует").

Для улучшения параметров и характеристики усилительных ламп стали применять двухсеточные, или четырехэлектродные лампы (тетроды). Между анодом a и управляющей сеткой g располагается добавочная, экранирующая сетка g' (рис.11,а); так как она перехватывает почти все силовые линии, выходящие сетки к аноду, то емкость C_{ag} уменьшается примерно в 100 раз (0,02 - 0,03 $n\phi$ вместо 3 - 4 $n\phi$ в триодах). Чтобы обеспечить прохождение электронов сквозь эту сетку к аноду, на нее приходится подавать высокое положительное напряжение, равное примерно $1/2 U_a$, иначе анодный ток будет или равен нулю или близок к нулю.

Благодаря малой емкости C_{ag} в тетрадах, последние могут быть использованы и усилителях высокой частоты и в генераторах, но в приемно-усилительных схемах экранированные лампы в настоящее время уже вытеснены трехсеточными лампами, так называемыми пентодами. Основным недостатком тетродов является *динатронный эффект*, т.е. вторичная эмиссия, искажающая форму анодной характеристики.

Пусть на экранную и управляющую сетку поданы постоянные напряжения U_g и $U_{g'}$, а анодное напряжение изменяется. При увеличении U_a анодный ток вначале быстро растет, а ток в цепи экранной сетки I_g падает (рис.11,б). При дальнейшем увеличении U_a первичные электроны с катода начинают выбивать вторичные электроны из анода, которые будут притягиваться экранной сеткой, имеющей большой положительный потенциал. В анодной цепи ток

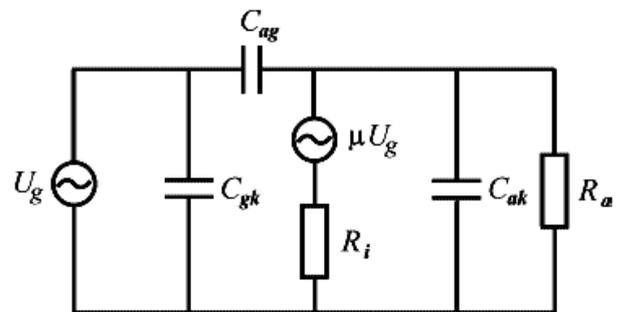


Рис. 10.

⁴В отличие от емкостей C_{gk} и C_{ak} , введенных ранее, в образовании тех емкостей, о которых говорится сейчас, участвуют также держатели и выводы электродов. На практике надо учитывать также и емкость монтажа лампы.

уменьшается, в цепи экранной сетки ток увеличивается. При увеличении U_a вторичная эмиссия с анода возрастает, и анодный ток будет падать до тех пор, пока U_a не становится сравнимым с $U_{g'}$, тогда I_a начнет резко возрастать, а ток $I_{g'}$ так же резко падает. Провал на анодной характеристике получается тем более глубоким, чем больше положительное напряжение на экранирующей сетке.

Таким образом, вторичная эмиссия нарушает нормальное распределение токов в экранированных тетрадах. Если подать на анод потенциал $U_a = 2U_{g'}$, но работать со схемой, в которой анодное напряжение изменяется, а потенциал $U_{g'}$ остается постоянным, то в отдельные моменты времени потенциал анода может становиться меньше потенциала экранирующей сетки, что вызывает резкое уменьшение I_a . Последнее обстоятельство ведет к искажению формы сигнала при усилении.

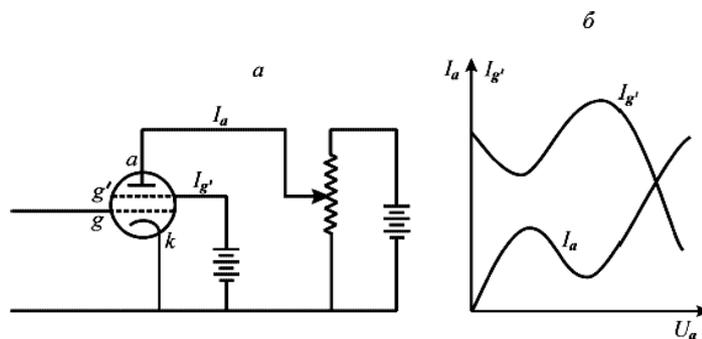


Рис. 11.

Для устранения динаatronного эффекта применяются трехсеточные лампы, или *пентоды*, у которых между анодом a и экранной сеткой g' помещается третья, так называемая антидинаatronная сетка g'' (рис.12,а). Эта сетка обычно соединяется с катодом и, имея нулевой потенциал, задерживает вторичные электроны, выбитые с анода, отбрасывая их назад на анод.

Путем переключения сеток пентод можно превращать в триод, что позволяет использовать его как универсальную лампу.

Пентод имеет относительно большой коэффициент усиления, так как, благодаря двум дополнительным сеткам, управляющая сетка действует на анодный ток намного сильнее, чем анод. У пентодов μ , бывает от 150 до 6000, а внутреннее сопротивление - от 50 до 2000 *ком*. Крутизна характеристики также обычно, несколько больше, чем у триодов.

Рассмотрим более подробно форму характеристик пентода. Управляющее напряжение для пентода можно записать

в форме, аналогичной (1):

$$U_{st} = U_g + DU_a + D'U_{g'} + D''U_{g''} \quad (16)$$

Здесь добавлены члены, учитывающие напряжения на экранной ($U_{g'}$) и антидинаatronной ($U_{g''}$) сетках. Коэффициенты D' и D'' имеют такой же смысл, как проницаемость (например, $D' = g'k / C_{gk}$). Для построения типовых характеристик пентода будем опять исходить из кривой рис.1. Сеточные характеристики, как и для триода, смещены влево на величину $DU_a + D'U_{g'}$. Поскольку D очень малая величина, то семейство сеточных характеристик для разных U_a практически изображается одной общей кривой.

Для построения семейства анодных характеристик удобно будет изменить масштаб рис.1. На рис.12,б кривая 1 повторяет кривую рис.1 в другом масштабе (координаты $I_k, U_{st}/D$). Поскольку D мало, эта кривая очень растянута по горизонтали (на нашем рисунке наклон кривой пришлось сильно преувеличить). При переходе к зависимости I_k от U_a кривая очень сильно (на отрезок $U_{g'}D'/D$) смещается влево.

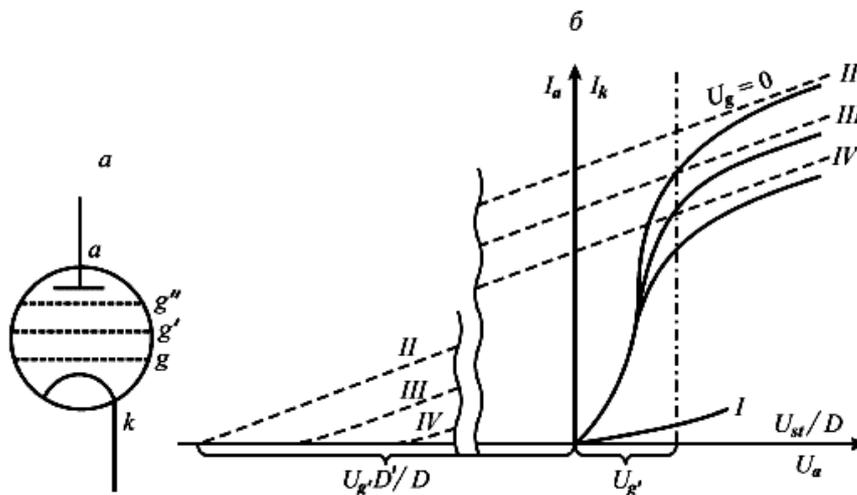


Рис. 12.

Потенциал управляющей сетки дополнительно смещает кривую на отрезок U_g/D (вправо, так как $U_g < 0$). Таким образом, мы получаем семейство пунктирных кривых II, III, IV - кривые зависимости I_k от U_a .

Наконец, как и раньше, переходим от I_k , к анодному току I_a (сплошные кривые II, III, IV). Поскольку в случае пентода U_g сравнимо с U_a , ток экранированной сетки всегда довольно велик, и полного слияния кривых I_a с кривыми I_k (как было для триода в случае $U_a \gg U_g$) не происходит.

Из нашего построения ясно, что рабочим участком характеристик пентода, на котором проявляются его положительные свойства (большой коэффициент усиления), является область справа от штрих - пунктирной прямой на рис.12, б; это область, в которой $U_a > U_g$. Область начального быстрого роста анодного тока называется областью перенапряженного режима и обычно не используется.

Усилитель переменного тока на сопротивлениях

Усилители на сопротивлениях (реостатные) чаще всего применяются как усилители звуковых частот, а также и на высоких частотах, когда надо получить равномерное усиление в широком частотном диапазоне.

На рис.13 приведена типовая схема усилительного каскада (т.е. одной ступени усиления в многоламповом усилителе).

Так как этот усилитель рассчитан на усиление переменного напряжения, то входное напряжение подается на сетку лампы через разделительный конденсатор C_g ; это делается для того, чтобы на сетку не попадала постоянная составляющая анодного напряжения предыдущей лампы усилителя. Точно так же выходное (усиленное) напряжение снимается с анода лампы не непосредственно, а через переходной конденсатор C'_g . Но при таком способе подачи напряжения на сетку ее средний потенциал (рабочая точка) оказывается неопределенным, так как сетка не соединена электрически ни с одним из электродов лампы; потенциал сетки при отсутствии сигнала на входе будет определяться случайными соотношениями между сеточным током и различными токами утечек через изоляцию. Для того чтобы можно было задать потенциал сетки, она должна быть электрически присоединена, например, к катоду. Для этого служит *сопротивление утечки сетки* R_g , которое должно быть очень большим, чтобы не слишком нагружать источник входного напряжения: усилитель должен обладать высоким входным сопротивлением. Для обычно применяемых в радиотехнике усилителей R_g лежат в пределах от нескольких сот килоом до нескольких мегом.

При вычислении динамического коэффициента усиления лампы в этой схеме необходимо учитывать, что для переменного тока сопротивление анодной нагрузки шунтировано входным сопротивлением следующего каскада R'_g .

Сопротивление R_k служит для создания постоянного сеточного смещения, т.е. задает рабочую точку на динамической характеристике лампы. Простейший способ задания рабочей точки с помощью специальной батареи, как показано на рис.7,б, очень неудобен и применяется на практике только в редких случаях, когда требуется особенно высокая стабильность. Чаще всего применяется *схема автоматического смещения* за счет анодного тока, приведенная на рис.13. Сетка подключается через сопротивление утечки R_g прямо к заземленному минусу источника анодного напряжения, а потенциал катода оказывается выше потенциала земли (и, следовательно, сетки) на величину падения напряжения на сопротивлении R_k . Таким образом, на сетке создается отрицательный потенциал по отношению к катоду:

$$U_g = U_{см} = -R_k I_a \quad (17)$$

Для того чтобы при работе усилителя величина напряжения смещения не изменялась, сопротивление R_k шунтируется большой емкостью C_k . Эта емкость выбирается таким образом, чтобы на самой низкой рабочей частоте ее сопротивление $1/\omega C_k$ было во много раз меньше, чем R_k . Тогда для переменного тока сопротивление оказывается закороченным, и рабочая точка не смещается при изменении I_a .

Уравнение (17) позволяет непосредственно выбрать сопротивление R_k , необходимое для задания автоматического сеточного смещения, если рабочая точка выбрана заранее. Более трудную задачу представляет нахождение рабочей точки при известном сопротивлении R_k . Для этого надо совместно решить уравнение динамической характеристики $I_a = f(U_g)$ и уравнение (17), дающее зависимость U_g от I_a . Решение производится графически: строится прямая $U_g = -R_k I_a$ и точка ее пересечения с динамической характеристикой дает рабочую точку.

Наличие емкостей в схеме рис.13 приводит к тому, что коэффициент усиления каскада $\mu_d = U_{вых}/U_{вх}$ зависит от частоты. При низких частотах коэффициент усиления уменьшается вследствие того, что сопротивление переходного конденсатора C'_g становится сравнимым с сопротивлением утечки R_g , так что амплитуда напряжения на сетке оказывается меньше, чем на входе усилителя. На высоких частотах начинают сказываться паразитные емкости - междуэлектродные, емкости лампы, емкость монтажа и т.п., которые шунтируют сопротивление нагрузки и этим уменьшают коэффициент усиления.

В усилителях низких (звуковых) частот приходится опасаться преимущественно уменьшения μ_d при низких частотах, а в усилителях для высоких частот обычно оказываются наиболее вредными паразитные емкости, ограничивающие полосу пропускания усилителя со стороны высоких частот.

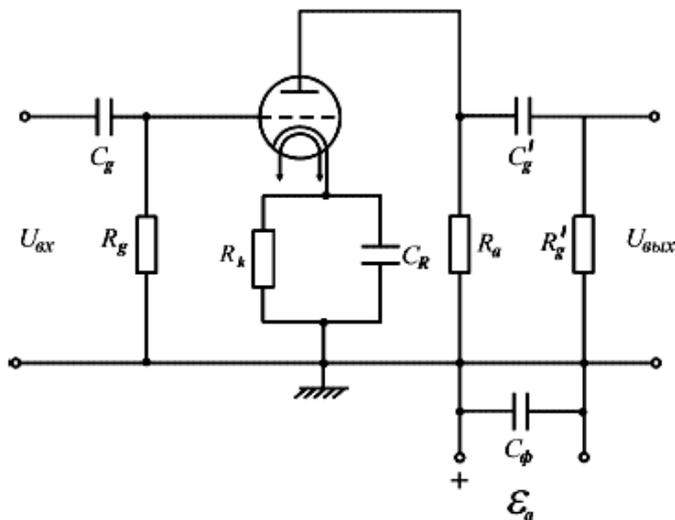


Рис. 13.

Содержание работы и порядок ее выполнения

I. Получение статических характеристик триода и пентода.

В настоящей работе изучается лампа 6Ж7 в триодном и пентодном включениях. Триодное включение осуществляется путем присоединения экранной сетки к аноду; антидинаatronная сетка соединена с катодом внутри лампы, так что ее соединение с анодом неосуществимо.

На испытательном стенде находятся потенциометры для изменения напряжений, подаваемых на управляющую и экранную сетки и на анод лампы, и вольтметры для измерения этих напряжений.

Источниками питания служат выпрямители на 15 в (сетка) и на 240 в (анод и экранная сетка). Напряжение для питания накала 6,3 в дает накальная обмотка силового трансформатора выпрямителя.

Знак потенциала управляющей сетки должен меняться с помощью переключателя. Экранная сетка может подключаться либо к соответствующему потенциометру, либо к аноду.

Анодный ток измеряется миллиамперметром на 15 ма, сеточный ток (управляющей сетки) – миллиамперметром на 1 ма. В схеме необходимо также предусмотреть возможность включения анодной нагрузки и автоматического смещения. При снятии статических характеристик соответствующие гнезда должны быть замкнуты накоротко (вилками).

Для пропускания переменной составляющей тока при работе схемы в качестве усилителя, потенциометры питающих напряжений, измерительные приборы и гнезда сопротивления смещения шунтируются конденсаторами.

Рабочую схему необходимо разработать самостоятельно.

В первой части работы необходимо получить:

1. Семейство сеточных характеристик триода $I_a = f(U_g)U_{a=const}$. Характеристика снимается от точки запираания лампы ($I_a = 0$) до максимальных напряжений и токов, допускаемых лампой. Необходимо получить 4-5 характеристик при анодных напряжениях от максимально допустимого до 1/4 - 1/3 этого напряжения. Значения U_a должны выражаться круглыми числами и равномерно отстоять друг от друга. Кроме того, следует получить кривую зависимости сеточного тока I_g от потенциала сетки для одного из анодных напряжений. Эту кривую можно построить на том же графике.

2. Семейство анодных характеристик триода $I_a = f(U_a)U_{g=const}$. Характеристики снимаются для $U_g = 0$, 4-5 отрицательных значений U_g (через 1 или 2 в) и для 1-2 положительных значений U_g .

3. Сеточную характеристику пентода при анодном напряжении U_a , близком к максимальному допустимому, и напряжении экранной сетки $U_{g'} = 100$ в.

4. Семейство анодных характеристик пентода. Характеристики снимаются для $U_g = 0$ и 2-3 значений $U_g < 0$ (через 1 или 2 в). Напряжение экранной сетки надо поддерживать равным 100 в. Особое внимание необходимо обратить на рабочую (плоскую) часть характеристики.

Все характеристики следует снимать непосредственно на миллиметровку, не записывая данных отдельно.

По полученным характеристикам подсчитать параметры лампы S , R_i , и μ для рабочей линейной части характеристики как в триодном включении лампы, так и в пентодном.

II Получение динамической характеристики триода

1. Самостоятельно выбрать (на основании статических характеристик) величину сопротивления анодной нагрузки для усилителя. При выборе исходить из требования неискаженного усиления сигналов большой амплитуды (до нескольких вольт) при высоком динамическом коэффициенте усиления. Получить у лаборанта соответствующее сопротивление (предварительно согласовав его величину с преподавателем), включите его в качестве анодной нагрузки и снимите динамическую сеточную характеристику лампы в такой схеме.

2. Построить теоретическую динамическую характеристику лампы в том же режиме двумя способами: по семейству сеточных и по семейству анодных характеристик и сравните с экспериментальной характеристикой. (Для этого все три характеристики построить на общем графике разноцветными карандашами).

3. Рассчитать Динамический коэффициент усиления вашего усилителя. Выбрать рабочую точку. Рассчитать величину сопротивления смещения. Оценить максимальную амплитуду неискаженного усилителя.

Получите у лаборанта сопротивление смещения в соответствии с рассчитанной величиной, включите его и проверьте правильность расчета рабочей точки.

При снятии характеристик необходимо учитывать, что **мощность, рассеиваемая на аноде лампы, не должна превосходить величины $W_m = 2$ вт** (номинальное значение W_m для лампы 6Ж7 равно 0,8 вт, но при не очень продолжительной работе такое превышение допустимо). Поэтому необходимо до начала работы построить кривую $I_a U_a = 2$ вт (см. рис.6) и при снятии анодных характеристик не переходить эту кривую. При снятии сеточных характеристик нужно для каждого значения U_a заранее подсчитать максимально допустимую величину I_a (можно воспользоваться той же кривой).

Кроме величины рассеиваемой мощности, следует иметь в виду предельные допустимые напряжения $U_a = 330$ в, $U_g = 140$ в и максимальный ток управляющей сетки $I_g = 2$ ма.

III Исследование усилителя

Для исследования работы лампы в режиме усилителя в схеме надо предусмотреть возможность подавать на сетку лампы переменное напряжение частоты 50 гц. С этой целью в цепь сетки необходимо включить потенциометр, на который можно подать напряжение от цепи накала лампы (рис.14).

При включении напряжения на потенциометр должна загореться сигнальная лампочка.

Величину подаваемого на сетку лампы переменного напряжения $U_{вх} = U_{gm} \cos \omega t$ можно определить по шкале потенциометра (указано эффективное напряжение в вольтах). Для измерения входного напряжения и для наблюдения искажений служит электронный осциллограф. Амплитуду выходного напряжения $U_{вых} = U_{am} \cos \omega t$ можно определить, пользуясь сеткой на экране осциллографа. Предварительно нужно определить его чувствительность. Для этого можно использовать напряжение 6,2 в (эффективное) из цепей накала осциллографа, которое выведено на клеммы "контрольный сигнал", расположенные на его передней панели. Этот сигнал нужно подать на вход вертикального усилителя (вертикально отклоняющих пластин) осциллографа; ручка "усиление" должна при этом стоять в том же положении, что и при измерении выходного напряжения.

В этой части работы требуется:

- 1) проверить работу усилителя с подобранными в предыдущем задании сопротивлениями нагрузки и смещения;
- 2) изучить искажения при различных сеточных смещениях.

Для проверки работы усилителя необходимо получить график зависимости амплитуды переменной составляющей анодного напряжения (т.е. выходного напряжения) U_{am} от амплитуды переменной составляющей потенциала сетки (входного напряжения) U_{gm} . Далее нужно определить практическую величину динамического коэффициента усилителя $\mu_d = U_{am} / U_{gm}$ (при малых U_{gm}) и сравнить ее с теоретической. На графике $U_{am} = f(U_{gm})$ определить, при каком значении U_{gm} начинаются искажения (величина μ_d начинает падать), и сравнить со значением, полученным теоретически из формы динамической характеристики. По виду кривой на экране осциллографа определить характер искажений. Выяснить причину искажений (появляются сеточные токи или сказывается нижний изгиб характеристики).

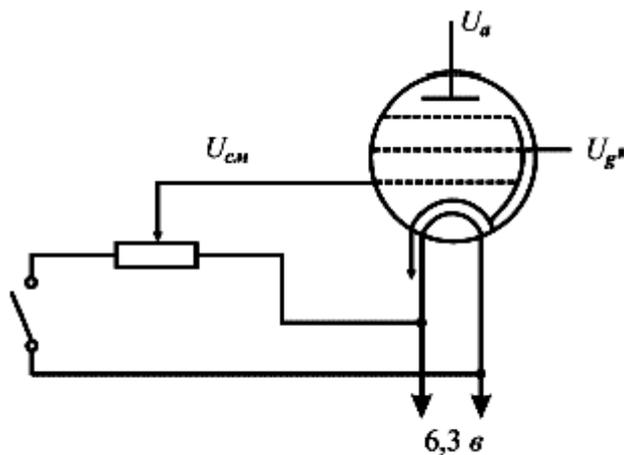


Рис. 14.