

§ 53. Усилительные электронные лампы (триоды)

Описанный выше диод имеет сравнительно ограниченный круг применения. Более важным типом электронной лампы является *триод* (*трехэлектродная лампа*). Схема триода показана на рис. 193. Мы видим, что все отличие заключается в спиральном электроде *D*, окружающем катод. В триоде ток зависит не только от напряжения, приложенного к аноду, но и от знака и величины заряда электрода *D*, который несет обычно название *сетки* или *управляющего электрода*.

Когда сетке *D* сообщен отрицательный заряд, то это тормозит движение электронов от нити к аноду (к цилиндру *A*). Очевидно, что если сообщить сетке *D* достаточно большой отрицательный заряд, то движение электронов от катода к аноду станет невозможным.

Если сетка заряжена положительно, то некоторые увлекаемые ею электроны, падая на сетку, частью нейтрализуют ее положительный заряд. Однако большинство электронов вследствие большого расстояния между витками спирали пролетит по инерции мимо проводников сетки и достигнет анода; следовательно, при положительном потенциале сетки (положительном заряде на сетке) ток в анодной цепи растет. Мы располагаем, таким образом, возможностью *изменять ток в анодной цепи лампы, изменяя напряжение между сеткой и нитью*.

На первый взгляд может показаться, что в этом нет особого преимущества триода в сравнении с диодом. В самом деле, ведь и в двухэлектродной лампе мы имеем возможность влиять на ток в цепи анода, изменяя напряжение между анодом и нитью. Однако нетрудно понять, что влияние напряжения сетки на анодный ток проявляется гораздо резче, чем воздействие (на ток) анодного напряжения.

Действительно, поскольку сетка находится значительно ближе к катоду, чем анод, то даже при небольшом отрицательном заряде сетка будет сильнее отталкивать электроны, эмиттируемые катодом, чем анод притягивать их. При положительном потенциале анода (по отношению к катоду) в 100—200 в отрицательный потенциал сетки всего в несколько вольт может полностью приостановить ток через лампу — «запереть лампу». Рис. 194 показывает создающуюся при этом картину поля в триоде.

С другой стороны, даже при небольшом положительном потенциале сетка будет сообщать эмиттированным электронам ускорение от катода большее, чем более удаленный анод.

Оценим действие сетки количественно. Число электронов, увлекаемых сеткой и анодом, определяется величиной положительного

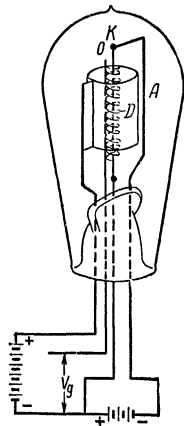


Рис. 193 Схема триода.

заряда этих электродов. При этом почти все увлекаемые сеткой электроны проходят через ячейки сетки и достигают анода, лишь небольшая часть их составляет ток сетки.

Таким образом; ток анода определяется суммарным зарядом Q сетки и анода:

$$Q = C_a V_a + C_g V_g.$$

Здесь C_a — емкость между анодом и катодом, C_g — емкость между сеткой и катодом, V_a и V_g — соответствующие напряжения. Мы видим, что если C_g (как обычно бывает) значительно больше C_a , так как спираль сетки расположена ближе к катоду, чем

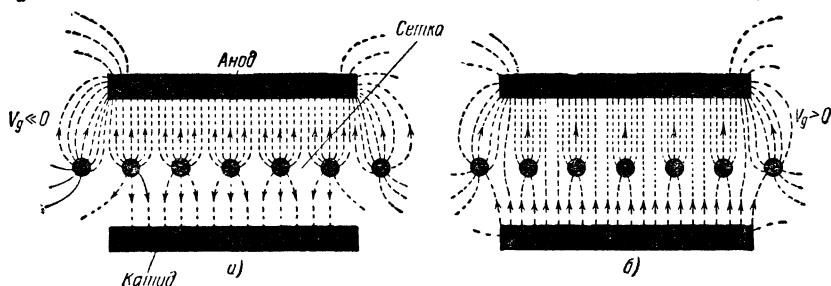


Рис. 194. Картина поля в триоде при различных значениях потенциала сетки V_g . Стрелки показывают направление сил, действующих на электроны; а — лампа «заперта», б — проходит анодный ток.

поверхность анода, то влияние V_g на величину Q значительно сильнее, чем влияние V_a .

Обозначим:

$$\frac{C_g}{C_a} = \mu$$

(эту величину называют коэффициентом усиления лампы; важное замечание о таком определении коэффициента усиления сделано ниже). Тогда, очевидно,

$$Q = C_a (V_a + \mu V_g). \quad (6)$$

Мы видим, что можно представить себе трехэлектродную лампу обладающей только анодом и не имеющей сетки, но тогда для достижения той же величины анодного тока нам пришлось бы приложить к аноду не напряжение V_a , а напряжение $V_a + \mu V_g$.

Таким образом, если для диода исчерпывающей характеристикой являлась зависимость между напряжением на аноде и током в анодной цепи, то, чтобы получить аналогичную характеристику триода, мы должны откладывать на оси абсцисс не V_a , а $V_a + \mu V_g$. Это суммарное напряжение, которое определяет собой электронный ток, носит название *управляющего напряжения*.

Мы видим, что, оставляя напряжение на аноде постоянным, можно в широких пределах изменять анодный ток, регулируя управляющее напряжение за счет изменения напряжения V_g сетки.

Этот результат чрезвычайно важен. Дело в том, что коэффициент усиления μ зависит от устройства лампы и может быть сделан весьма большим. С другой стороны, важно то, что благодаря чрезвычайно малой массе электронов управление анодным током в электронной лампе практически безынерционно. Изменение тока (достигающего в мощных лампах десятков ампер) мгновенно следует за изменением напряжения на сетке. Именно это обстоятельство и делает электронную лампу столь необходимой в технике быстропеременных токов («токов высокой частоты»).

Мы видели в § 52, что двухэлектродная лампа характеризуется ее внутренним сопротивлением и током насыщения. Для трехэлектродной лампы дело обстоит несколько сложнее.

Прежде всего, следует отметить, что, определяя коэффициент усиления μ как отношение емкости сетка — катод C_g к емкости анод — катод C_a , нельзя пользоваться обычными значениями межэлектродной емкости холодной лампы.

Как показывает более полная теория лампы, межэлектродные емкости C_g и C_a зависят от многих факторов и в зажженной лампе не могут быть приняты такими же, как в незажженной. Если бы мы сообщили аноду и сетке одинаковый потенциал по отношению к катоду, то величина μ указывала бы, во сколько раз число силовых линий, исходящих из катода и перехватываемых сеткой, превышает число силовых линий, достигающих анода. Понятно, что пространственный заряд сильно влияет на распределение силовых линий; будучи сосредоточен между катодом и сеткой, он значительно увеличивает емкость C_g (как бы приближает поверхность катода к сетке). Поэтому электродные емкости, определенные для незажженной лампы, не пригодны для вычисления коэффициента усиления μ по формуле $\mu = \frac{C_g}{C_a}$. Здесь должны разумеются динамические емкости, зависящие от режима работы лампы. Их определение является затруднительным, поэтому коэффициент усиления, как пояснено ниже, вычисляют иначе.

Если бы мы решили заменить триод диодом, то, как было показано, для сохранения прежней величины тока мы должны были бы приложить к аноду управляющее напряжение $V_a + \mu V_g$. Для прямолинейного участка характеристики¹⁾, где справедлив закон Ома, сопротивление лампы, как и в случае двухэлектродной лампы,

¹⁾ Для начального криволинейного участка характеристики зависимость тока от управляющего напряжения выражается согласно закону Богуславского — Ленгмюра (§ 52) формулой

$$I_a = KV_{\text{упр}}^{\frac{3}{2}}$$

называют *внутренним сопротивлением* R_i :

$$I_a = \frac{V_{\text{упр. анода}}}{R_i} = \frac{1}{R_i}(V_a + \mu V_g). \quad (7)$$

В общем случае для криволинейных участков характеристики под внутренним сопротивлением лампы понимают аналогично случаю диода:

$$R_i = \frac{dV_a}{dI_a} \quad (\text{при } V_g = \text{const}). \quad (8)$$

Коэффициент усиления лампы μ показывает, во сколько раз напряжение, приложенное к сетке, действует сильнее, чем то же напряжение, приложенное к аноду; иначе говоря, он показывает, на сколько милливольт нужно уменьшить анодное напряжение, чтобы сохранить неизменным ток при повышении потенциала сетки на 1 мв. Точнее,

$$\mu = -\frac{dV_a}{dV_g} \quad (\text{при } I_a = \text{const}). \quad (9)$$

Легко видеть, что такое определение μ совпадает с тем, которое получается из дифференцирования уравнения (7), поскольку для прямолинейного участка характеристики $R_i = \text{const}$.

Величину, обратную коэффициенту усиления, называют *проницаемостью лампы*:

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

Кроме указанных независимых параметров триода (тока насыщения, R_i и μ), часто пользуются еще одним параметром (который зависит от R_i и μ) — так называемой *крутизной лампы* S . Крутизна лампы показывает, на сколько миллиамперов возрастает ток при увеличении напряжения сетки на 1 в. Точнее,

$$S = \frac{dI_a}{dV_g} \quad (\text{при } V_a = \text{const}). \quad (10)$$

Крутизну лампы называют также *проводимостью лампы по сетке*. Это название имеет следующее происхождение. Если бы, заменяя триод диодом, мы расположили анод на месте сетки, то для сохранения прежнего тока нужно было бы приложить к сетке (ставшей теперь анодом) управляющее напряжение $V_g + \frac{V_a}{\mu}$ (это видно из формулы (6), если в ней за знак скобок вынесено не C_a , а C_g). Таким образом,

$$I_a = S V_{\text{упр. сетки}} = S \left(V_g + \frac{V_a}{\mu} \right). \quad (11)$$

Величина S больше $\frac{1}{R_i}$ в μ раз. Действительно, сравнивая оба выражения для анодного тока (7) и (11), получаем:

$$S = \frac{\mu}{R_i}. \quad (12)$$

Это соотношение между основными величинами, характеризующими трехэлектродную лампу, было дано Баркгаузенем.

Руководствуясь дифференциальным определением параметров лампы (8), (9), (10), уравнение Баркгаузена можно вывести просто из выражения полного дифференциала тока:

$$dI_a = \left(\frac{\partial I_a}{\partial V_a}\right)_{V_g} dV_a + \left(\frac{\partial I_a}{\partial V_g}\right)_{V_a} dV_g = \frac{1}{R_i} dV_a + S dV_g.$$

Отсюда при $I_a = \text{const}$

$$-\left(\frac{\partial V_a}{\partial V_g}\right)_{I_a} = \mu = SR_i.$$

Обычно характеристики усилительных ламп представляют в виде графиков зависимости тока от напряжения на сетке (*сеточные характеристики*) или от напряжения на аноде (*анодные характеристики*)¹⁾.

На рис. 195 приведена сеточная характеристика одной из усилительных ламп.

Для определения параметров лампы, например при анодном напряжении в 200 в, в прямолинейном участке кривой, изображающей для этого напряжения зависимость тока от потенциала сетки, строят треугольник, как показано на рис. 195 пунктиром. В рассматриваемом случае ΔI_a (вертикальный катет треугольника, изображенного на рис. 195 пунктиром) ≈ 2 ма и ΔV_g (горизонтальный катет) ≈ 1 в, стало быть,

$$S \approx 2 \text{ ма/в}.$$

В приведенном примере $\Delta V_a \approx 40$ в, а $\Delta I_a \approx 2$ ма, следовательно,

$$R_i = 20 \text{ в/ма} = 20\,000 \text{ омов}.$$

Как видно из рис. 195, при изменении анодного напряжения на 40 в характеристика смещается в горизонтальном направлении (т. е. с сохранением $I_a = \text{const}$) на 1 в сеточного напряжения. Следовательно, $\mu \approx 40$.

Параметры электронных ламп и ток насыщения имеют в зависимости от типа лампы самое разнообразное значение. Так, у усилительных трехэлектродных ламп радиоприемников R_i бывает порядка 10 000—50 000 омов; μ около 10—60, соответствующая крутизна получается порядка 1—2 ма/в, ток насыщения 10—40 ма, напряжение источника тока в анодной цепи 100—240 в.

Для мощной же лампы на 20 кт: $\mu = 40$, $S = 25$ ма/в, $R_i = 1600$ омов, ток насыщения 15 а, рабочее анодное напряжение 10 000 в, «Нить» такой лампы

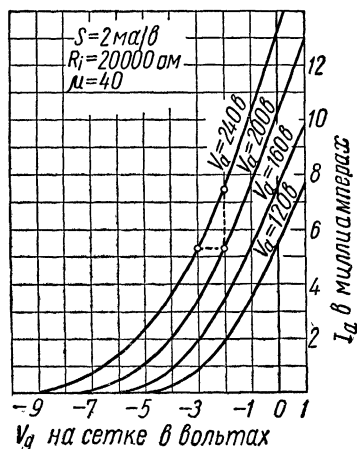


Рис. 195. Сеточная характеристика триода.

¹⁾ Потенциал катода считают равным нулю.

представляет собой вольфрамовую проволоку толщиной 1 мм. Ток, потребный для накала такой «нити», достигает 50 а.

Чтобы разобраться в том, как проявляется усиительное действие трехэлектродной лампы обратимся к схеме, изображенной на рис. 196. Здесь показано, что в цепь анода лампы включается некоторое сопротивление, так называемая *анодная нагрузка*. Для отдачи максимальной мощности анодную нагрузку бывает выгодно брать такой же, каково внутреннее сопротивление лампы. Потенциал V_a анода лампы равен, очевидно, потенциалу анодной батареи $V_{\text{бат}}$ за вычетом падения напряжения на анодной нагрузке, падение же напряжения на анодной нагрузке определяется величиной тока, проходящего через лампу:

$$V_a = V_{\text{бат}} - I_a R_a. \quad (13)$$

Небольшое увеличение потенциала сетки ΔV_g вызывает сильное увеличение анодного тока ΔI_a . Соответственно резко возрастает падение напряжения на

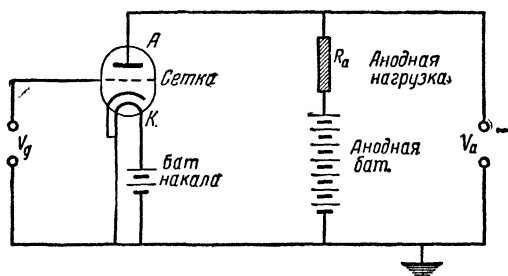


Рис. 196. Схема использования триода для усиления электрических колебаний

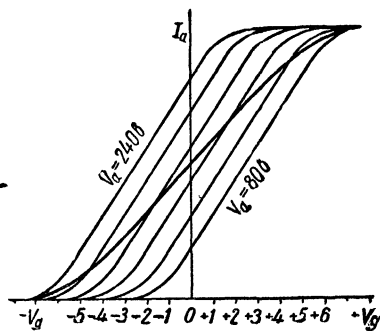


Рис. 197. Динамическая характеристика триода.

анодной нагрузке $\Delta I_a R_a$. Это мгновенно приводит к многократному в сравнении с ΔV_g уменьшению потенциала анода: $-\Delta V_a = \Delta I_a R_a$. По формуле (7)

$$\Delta I_a = \frac{1}{R_i} (\Delta V_a + \mu \Delta V_g).$$

Подставляя сюда $\Delta I_a = -\frac{\Delta V_a}{R_a}$, находим, что

$$-\Delta V_a = \frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a}} \Delta V_g. \quad (14)$$

Отношение $-\frac{\Delta V_a}{\Delta V_g}$ показывает, во сколько раз получаемое изменение напряжения на анодной нагрузке превосходит тот сдвиг напряжения, который был сообщен сетке. Мы видим, таким образом что *электронная лампа в каскаде усилителя на сопротивлениях увеличивает колебания напряжения, подведенные к сетке, в $\frac{\mu}{1 + \frac{R_i}{R_a}}$ раз.*

Если для лампы, имеющей определенную нагрузку R_a в цепи анода, мы выразим графически зависимость тока от напряжения на сетке (при $V_{\text{бат}} = \text{const}$), то получим так называемую *динамическую характеристику* лампы (рис. 197). Наклон динамической характеристики — ее крутизна — всегда меньше наклона статических характеристик.