

Глава 2

НЕЛИНЕЙНЫЕ СОПРОТИВЛЕНИЯ В БЕЗИНЕРЦИОННЫХ СХЕМАХ. ОГРАНИЧИТЕЛИ. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

§ 2.1. Содержание главы

В этой главе рассматриваются работа и методы анализа некоторых безынерционных схем, используемых в радиотехнике.

Безынерционными схемами будем называть схемы, в которых можно пренебречь токами смещения (токами через конденсаторы), зависящими от производных напряжений по времени, и эдс, вызванными изменениями магнитных потоков и зависящими от производных тока по времени. Таким образом, схемы, в которых напряжения и токи постоянны или меняются достаточно медленно, а также схемы, не содержащие реактивных элементов, мы будем считать безынерционными. *В безынерционных схемах токи зависят только от напряжений, а не от производных напряжений, а напряжения только от токов, а не от производных токов.*

Вначале рассмотрим наиболее простой случай, когда можно считать, что в схеме имеется лишь одно нелинейное сопротивление, причем значение управляющего им параметра (если сопротивление управляемое) известно. К этому случаю можно отнести ограничители, которые широко применяются в радиотелеграфии и радиолокации и служат для изменения формы колебаний, а также усилители постоянного напряжения, применяющиеся в самых разнообразных областях радиотехники.

В дальнейшем в §§ 2.6 и 2.7 будут рассмотрены более сложные схемы, содержащие несколько нелинейных сопротивлений, и схемы, в которых ток, текущий через нелинейное сопротивление, обратно воздействует на параметр, управляющий этим сопротивлением (схемы с обратным воздействием).

§ 2.2. Анализ схем с одним нелинейным сопротивлением при известной величине управляющего параметра

Пусть в схеме имеется одно нелинейное сопротивление и, если оно управляемое, задана величина управляющего им параметра.

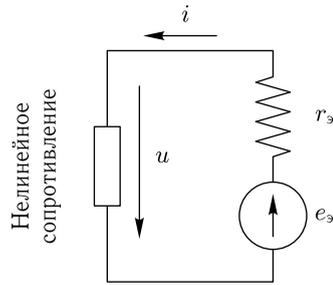


Рис. 2.1

Всю линейную часть схемы, к которой присоединено нелинейное сопротивление, можно заменить эквивалентным генератором эдс e_3 (приложение 1, теорема II). Тогда схема с нелинейным сопротивлением будет иметь вид, изображенный на рис. 2.1, где r_3 для безинерционной схемы активно и не зависит от частоты.

Обходя цепь, получим

$$e_3 = ir_3 + u. \quad (2.1)$$

Для определения двух неизвестных: i и u , необходимо иметь еще одно уравнение. Им является вольтамперная характеристика нелинейного сопротивления:

$$i = f(u), \quad (2.2)$$

взятая для заданного значения управляющего параметра (если сопротивление управляемое).

Решая ур-ния (2.1) и (2.2) совместно, найдем искомые величины i и u . Обычно эти уравнения решаются графически, путем построения соответствующих им линий в координатах u , i и нахождения точки их пересечения. Координаты точки пересечения удовлетворяют обоим уравнениям и являются решением.

Уравнение (2.1) можно записать так:

$$i = \frac{e_3 - u}{r_3} = -\frac{1}{r_3} u + \frac{e_3}{r_3}. \quad (2.3)$$

Это — уравнение прямой, которую удобнее всего построить по двум точкам. Положив, например, $i = 0$, получим $u = e_3$ (точка А на рис. 2.2), положив $u = 0$, получим $i = \frac{e_3}{r_3}$ (точка Б). Прямая, соответствующая ур-нию (2.3), называется *нагрузочной прямой*. Если при постоянном значении e_3 изменять r_3 , то нагрузочная прямая будет вращаться около точки А, переходя из вертикального положения (при $r_3 = 0$) в горизонтальное (при $r_3 = \infty$). При изменении e_3 угловой коэффициент нагрузочной прямой, равный $-\frac{1}{r_3}$, не изменяется, и прямая перемещается параллельно самой себе.

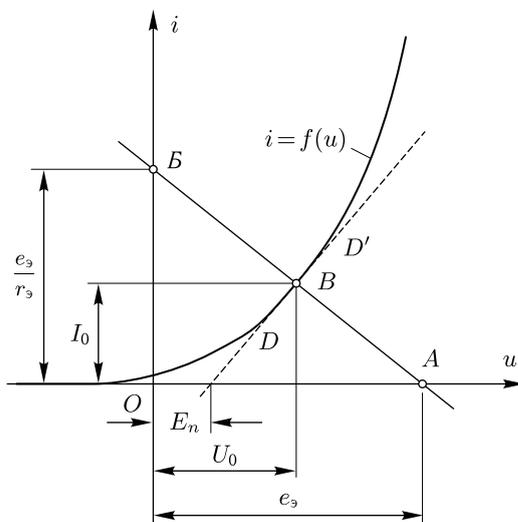


Рис. 2.2

Точка пересечения B нагрузочной прямой с вольтамперной характеристикой $i = f(u)$ (рис. 2.2) называется *рабочей точкой*. Ее координаты $u = U_0$ и $i = I_0$ дают искомое решение.

Иногда для того, чтобы получить аналитическое решение, участок вольтамперной характеристики, где предполагается рабочая точка, заменяют прямой линией (например, DD' рис. 2.2), полагая

$$i = f(u) \approx \frac{u - E_{\Pi}}{r_{\Pi}}. \quad (2.4)$$

После получения аналитического решения необходимо проверить, лежит ли оно на том участке характеристики, где сделанная замена допустима. Для токов и напряжений, соответствующих такому участку, нелинейное сопротивление может быть в соответствии с равенством (2.4) заменено схемой рис. 2.3.

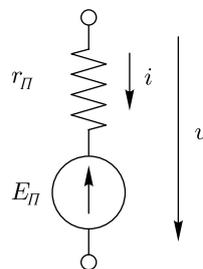


Рис. 2.3

Пример 2.1

Триод 6С2С включен в схему, изображенную на рис. 2.4. Данные схемы следующие:

$$r = 20 \text{ кОм}; \quad r_a = 20 \text{ кОм}; \quad r_{ac} = r_c = 90 \text{ кОм}; \quad E_a = 200 \text{ В}; \quad E_c = 100 \text{ В}.$$

Характеристики лампы приведены на рис. 2.5 и 2.6.

Найти ток, протекающий через анодную цепь лампы, и напряжение на ее аноде.

Решение

1. Находим напряжение на сетке лампы. Участок сетка-катод рассматриваем как нелинейное сопротивление (его вольтамперная характеристика

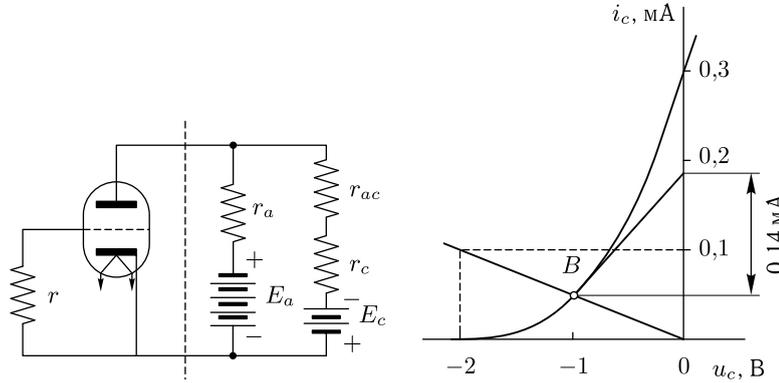


Рис. 2.4

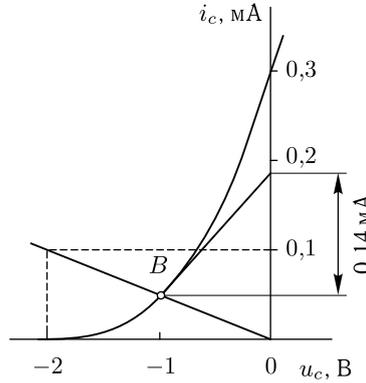


Рис. 2.5

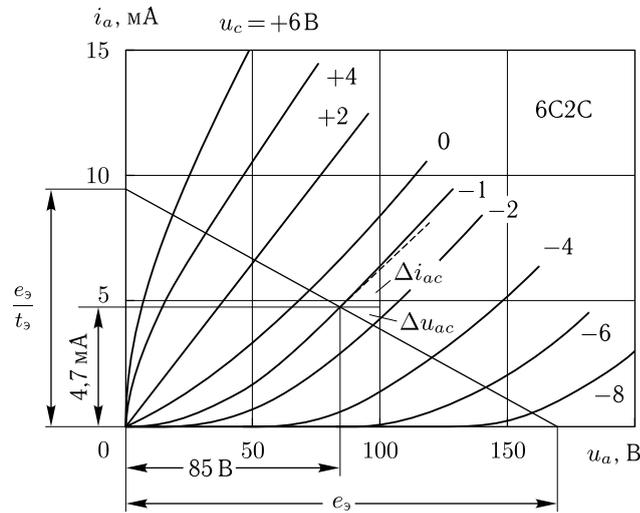


Рис. 2.6

изображена на рис. 2.5). В координатах рис. 2.5 строим нагрузочную прямую, которая на основании ф-лы (2.3) должна соответствовать уравнению:

$$i_c = -\frac{u_c}{r} = -\frac{1}{20 \cdot 10^3} u_c.$$

Эта прямая должна проходить через начало координат и, например, точку с координатами $u_c = -2$ В; $i_c = 0,1$ мА. Рабочая точка (точка B) определяет напряжение на сетке, равное в данном случае $u_c = -1$ В.

2. Далее рассчитываем анодную цепь. Заменяем двухполюсник, расположенный правее пунктирной линии (рис. 2.4), эквивалентным генератором

с источником эдс (см. приложение 1, теорему II). Нетрудно убедиться, что

$$e_э = E_a - \frac{E_a + E_c}{r_a + r_{ac} + r_c} \cdot r_a =$$

$$= 200 - \frac{200 + 100}{20 \cdot 10^3 + 90 \cdot 10^3 + 90 \cdot 10^3} \cdot 20 \cdot 10^3 = 170 \text{ В},$$

$$r_э = \frac{r_a(r_{ac} + r_c)}{r_a + r_{ac} + r_c} = \frac{20 \cdot 10^3(90 \cdot 10^3 + 90 \cdot 10^3)}{20 \cdot 10^3 + 90 \cdot 10^3 + 90 \cdot 10^3} = 18000 \text{ Ом}.$$

В координатах рис. 2.6 строим нагрузочную прямую, которая должна пересекать ось абсцисс в точке $u_a = e_э$, а ось ординат в точке $i_a = \frac{e_э}{r_э}$. Точка пересечения этой нагрузочной прямой с вольтамперной характеристикой, соответствующей $u_c = -1 \text{ В}$, дает искомое решение:

$$u_a = 85 \text{ В}; \quad i_a = 4,7 \text{ мА}.$$

§ 2.3. Диодный ограничитель электрических колебаний

Рассмотрим работу *диодного ограничителя*, схема которого изображена на рис. 2.7. В этой схеме на зажимы $1-1'$ подается напряжение e , форму которого надо преобразовать, а с зажимов $2-2'$ снимается преобразованное напряжение $u_{огр}$. Пока $e < E_{огр}$, напряжение на диоде направлено от катода к аноду и ток i равен нулю. При этом на сопротивлении r нет падения напряжения и поэтому $u_{огр} = e$. Как только e станет больше $E_{огр}$, через диод пойдет ток, и, если r достаточно велико, падение напряжения u на диоде будет много меньше, чем падение напряжения на сопротивлении r .

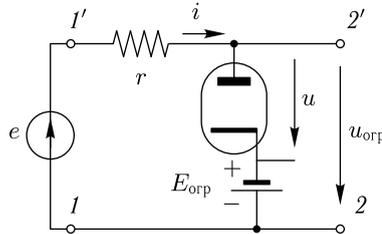


Рис. 2.7

Напряжение на выходе ограничителя $u_{огр} = E_{огр} + u$, и если u невелико, то $u_{огр} \approx E_{огр}$. Таким образом, как только e достигнет значения $E_{огр}$ и будет расти дальше, $u_{огр}$ достигнет величины $E_{огр}$ и дальше расти почти не будет. Говорят, что $u_{огр}$ *ограничено по максимуму величиной $E_{огр}$* .

Количественное рассмотрение может быть произведено методом, изложенным в предыдущем параграфе. В данном случае $e_э = e - E_{огр}$. Строя нагрузочные прямые для различных $e_э$, находим соответствующие падения напряжения u на диоде.

На рис. 2.8 изображена характеристика диода 6Х6С и нагрузочные прямые для e_{ε} от -8 В до $+12$ В и $r = 10$ кОм. Как видно из этого графика, при открытом диоде величина u действительно невелика (колеблется от нуля до $+1,2$ В). На основании рис. 2.8 построен рис. 2.9, на котором по оси абсцисс отложена величина $e = e_{\varepsilon} + E_{огр}$, а по оси ординат $u_{огр} = E_{огр} + u$. Этот рисунок подтверждает сказанное. На нем и на рис. 2.8 одинаковыми цифрами обозначены точки, соответствующие друг другу.

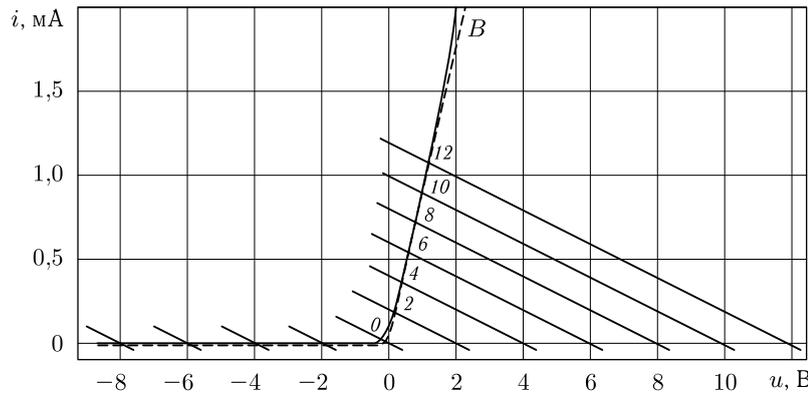


Рис. 2.8

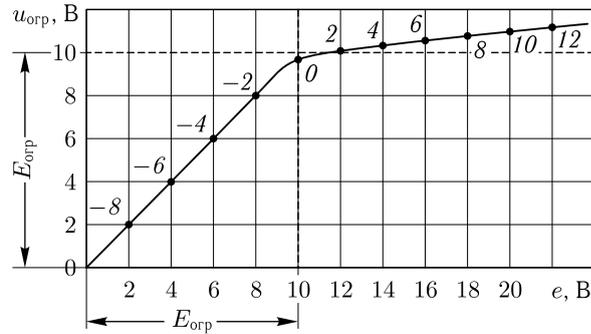


Рис. 2.9

Для приближенных аналитических подсчетов характеристику открытого диода можно заменить выражением (2.4). Если оно соответствует прямой AB рис. 2.8, то его параметры будут следующими: $E_{\Pi} = 0$; $r_{\Pi} \approx 1$ кОм. Заменяя в этом случае диод в схеме рис. 2.7 схемой рис. 2.3, получим схему рис. 2.10. Из этой схемы при открытом

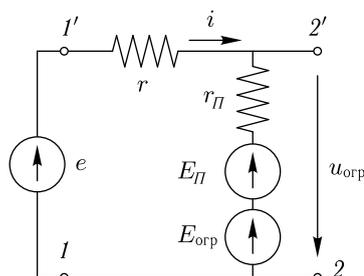


Рис. 2.10

диоду будем иметь:

$$u - ir_{\text{П}} + E_{\text{П}} = \frac{e - E_{\text{огр}} - E_{\text{П}}}{r + r_{\text{П}}} r_{\text{П}} + E_{\text{П}}$$

и

$$u_{\text{огр}} = u + E_{\text{огр}} = (e - E_{\text{огр}} - E_{\text{П}}) \cdot \frac{r_{\text{П}}}{r + r_{\text{П}}} + E_{\text{П}} + E_{\text{огр}}. \quad (2.5)$$

Необходимо иметь в виду, что при большом изменении e или r рабочий участок характеристики может сместиться и параметры $r_{\text{П}}$ и $E_{\text{П}}$ изменятся.

Из ф-лы (2.5) следует, что $u_{\text{огр}}$ превосходит величину $E_{\text{огр}} + E_{\text{П}}$ на величину $(e - E_{\text{огр}} - E_{\text{П}}) \frac{r_{\text{П}}}{r + r_{\text{П}}}$, которая тем меньше, чем больше r по сравнению с $r_{\text{П}}$.

Следовательно, для лучшего ограничения следует выбирать величину r достаточно большой. Однако брать сопротивление r слишком большим нельзя, так как в этом случае на нем будет создаваться значительное падение напряжения от слабых токов, протекающих при закрытом диоде через монтажные емкости и емкость анод-катод. Это падение напряжения исказит форму напряжения $u_{\text{огр}}$.

Если необходимо ограничить не максимальное, а *минимальное* значение напряжения, то применяют схему, изображенную на рис. 2.11. Работает эта схема аналогично предыдущей. При $e \geq E_{\text{огр}}$ диод не проводит тока и $u_{\text{огр}} = e$. При $e < E_{\text{огр}}$ диод открыт и $u_{\text{огр}} \approx E_{\text{огр}}$ (если сопротивление r достаточно велико).

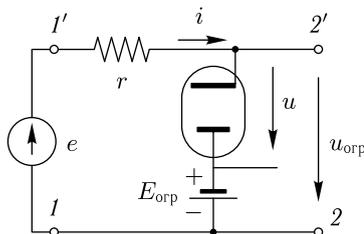


Рис. 2.11

В тех случаях, когда необходимо ограничить *максимальное и минимальное* значения напряжения, применяют схему, изображенную на рис. 2.12. При использовании этой схемы необходимо, чтобы выполнялось неравенство:

$$E_{1огр} > E_{2огр}.$$

Тогда:

- 1) при $e > E_{1огр} > E_{2огр}$ открыт диод I и $u_{огр} \approx E_{1огр}$;
 - 2) при $E_{1огр} > e > E_{2огр}$ закрыты оба диода и $u_{огр} \approx e$;
 - 3) при $e_{1огр} > E_{2огр} > e$ открыт диод II и $u_{огр} \approx E_{2огр}$.
- Зависимость $u_{огр}$ от e для схемы рис. 2.12 дана на рис. 2.13.

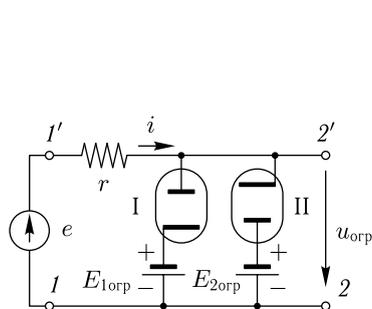


Рис. 2.12

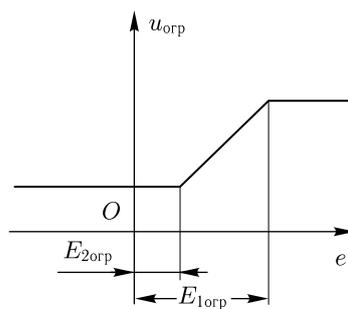


Рис. 2.13

Из сказанного очевидно, что ограничители следует применять в тех случаях, когда желательно срезать напряжение выше или ниже некоторой величины.

На рис. 2.14 показано преобразование с помощью ограничителей синусоидального напряжения в трапецевидное, из которого дифференцированием можно получить периодическую последовательность коротких импульсов. Такое преобразование уже встречалось в гл. 1 при рассмотрении блок-схемы радиолокатора.

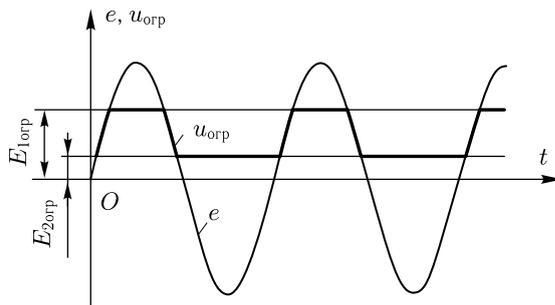


Рис. 2.14

Описанный принцип действия ограничителей не является единственно возможным. В следующем параграфе будут рассмотрены усилители, которые также могут быть использованы как ограничители.

Пример 2.2

Нарисовать схему ограничителя, найти эдс $E_{1огр}$, $E_{2огр}$ и сопротивление r , если известно, что форма выходного напряжения должна соответствовать рис. 2.15. На вход ограничителя подано синусоидальное напряжение с амплитудой 50 В. Характеристика диода приведена на рис. 2.16.

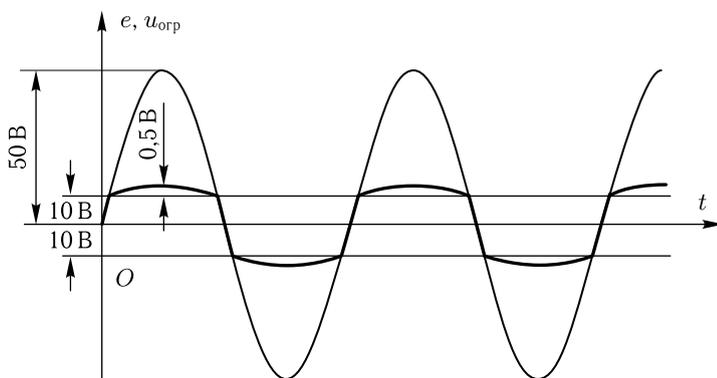


Рис. 2.15

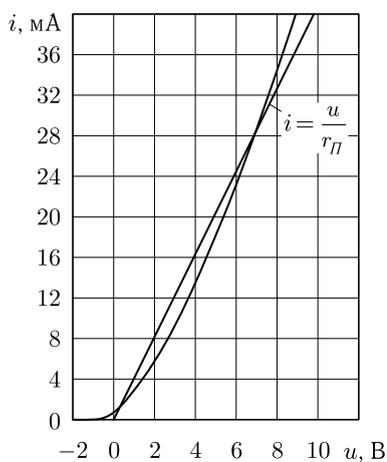


Рис. 2.16

Решение

1. Схема ограничителя изображена на рис. 2.12. $E_{1огр} = +10$ В.
2. Из рис. 2.16 находим $r_{П} = 250$ Ом; $E_{П} = 0$.

3. Сопротивление r находится из условия:

$$(e - E_{огр} - E_{п}) \frac{r_{п}}{r_{п} + r} + E_{п} = 0,5 \text{ В (рис. 2.15).}$$

Отсюда

$$r = \frac{e - E_{огр} - E_{п}}{0,5 - E_{п}} r_{п} - r_{п} = \frac{50 - 10}{0,5} \cdot 250 - 250 = 19\,750 \text{ Ом.}$$

§ 2.4. Одноламповые усилители постоянного напряжения

Усилителями постоянного напряжения (часто их называют также усилителями постоянного тока) называют устройства, служащие для усиления приращений напряжения, причем эти приращения могут меняться как быстро, так и сколь угодно медленно.

В отличие от этого усилителями переменного напряжения называют устройства для усиления только переменных, достаточно быстро меняющихся приращений напряжения.

В основе усилителей постоянного напряжения, использующих управляемые нелинейные сопротивления, лежит принципиальная схема, изображенная на рис. 2.17.

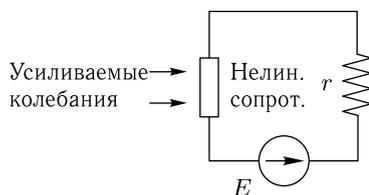


Рис. 2.17

Усиливаемые колебания являются управляющим параметром нелинейного сопротивления. При воздействии их на нелинейное сопротивление изменяется текущий через него ток и падение напряжения на сопротивлении r . Параметры схемы можно выбрать так, что колебания падения напряжения на сопротивлении r будут больше, чем вызвавшие их колебания, воздействующие на нелинейное сопротивление. С сопротивления r можно снять в этом случае усиленные колебания.

Энергия, необходимая для поддержания тока в цепи r , обеспечивается источником эдс E , а не усиливаемыми колебаниями, управляющими нелинейным сопротивлением. Здесь дело обстоит так же, как если бы вместо нелинейного сопротивления стоял ключ или реостат, управляющий током в цепи r . Поэтому *мощность усиленных колебаний*, развиваемая в сопротивлении r , может *значительно превышать мощность усиливаемых колебаний*, которые управляют нелинейным сопротивлением. Это отличает усилитель от повышающего

трансформатора, который может увеличить напряжение, но не может увеличить мощность.

Рассмотрим конкретную схему усилителя на триоде (рис. 2.18). Здесь усилимые колебания u_c подаются между сеткой и катодом (зажимы 1–1'), изменяют анодный ток i_a , падение напряжения u_r на сопротивлении r_a и напряжение на аноде лампы $u_a = E_a - u_r$. Усиленные колебания u_a снимаются с зажимов 2–2'.

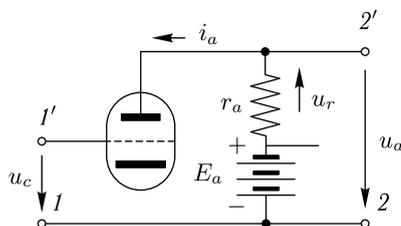


Рис. 2.18

Количественную зависимость u_a от напряжения на сетке u_c проследим на конкретном примере с триодом типа 6С2С. Для этого на плоскости вольтамперных характеристик лампы (они называются также *анодными характеристиками*) (рис. 2.19) построим нагрузочную прямую, соответствующую уравнению:

$$i_a = \frac{E_a - u_a}{r_a}$$

(на рис. 2.19 нагрузочная прямая проведена для случая $E_a = 200$ В; $r_a = 8$ кОм).

Для каждого значения u_c величина u_a определяется абсциссой точки пересечения нагрузочной прямой с соответствующей данному u_c характеристикой. Так, для $u_c = -12$ В, -16 В и т. д. рабочей точкой будет точка 1. В ней $u_a = E_a$; анодного тока i_a и падения напряжения u_r на сопротивлении r_a нет. При $u_c = -8$ В получим рабочую точку 2, где $u_a = 182$ В и $u_r = 18$ В. С дальнейшим увеличением u_c рабочая точка будет последовательно занимать положения 3, 4, 5, 6, 7, 8. При этом u_a сначала будет уменьшаться, а затем, начиная с некоторого u_c (в нашем случае равного +16 в), перестанет меняться.

Зависимость u_a и u_r от u_c , полученная таким образом, изображена на рис. 2.20. Из этого рисунка видно, что при больших положительных и отрицательных напряжениях на сетке величина u_a ограничивается как по минимуму, так и по максимуму.

Иногда вводят понятие *динамической сеточной характеристики лампы*, понимая под ней зависимость анодного тока i_a от напряжения u_c , учитывающую изменение напряжения u_a из-за падения напряжения на сопротивлении в анодной цепи. Эту зависимость можно получить, находя i_a при различных значениях u_c из рис. 2.19. Динамическая характеристика для рассмотренного случая изображена на рис. 2.20 б.

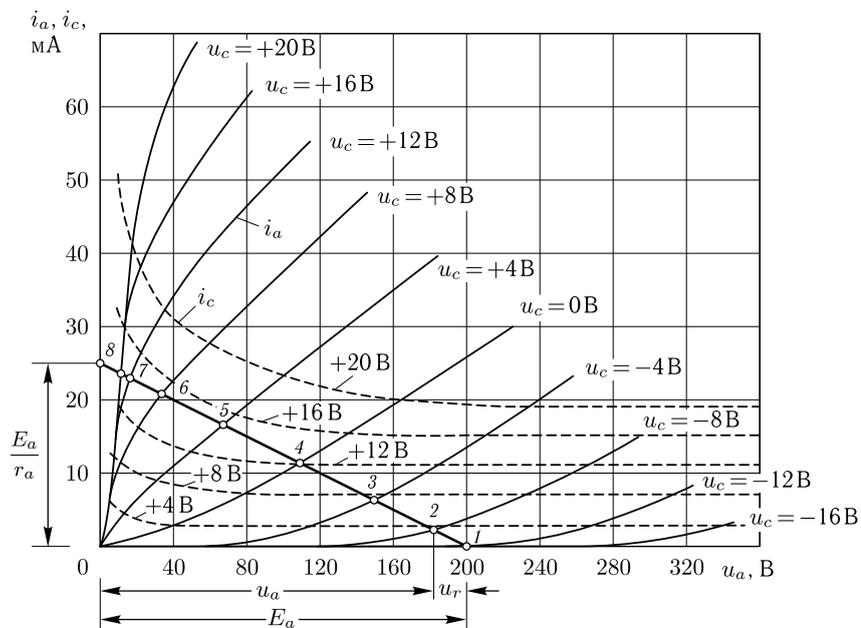


Рис. 2.19

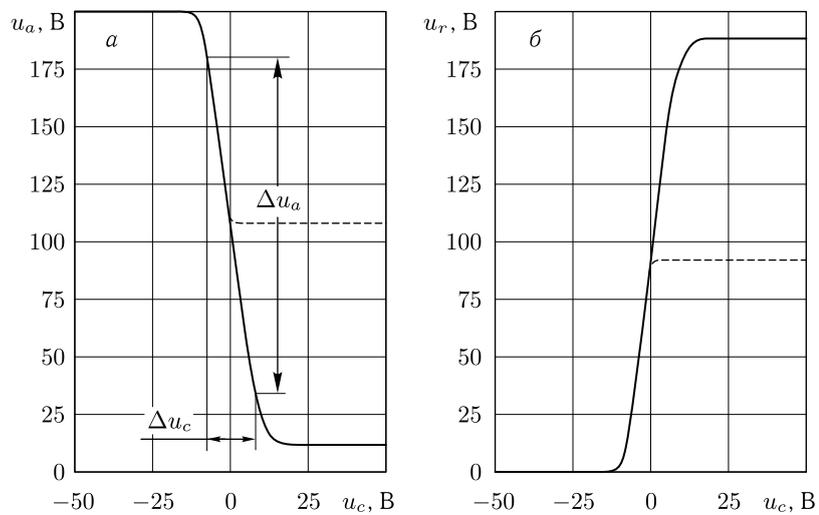


Рис. 2.20

Она совпадает с кривой u_r поскольку $u_r = i_a r_a$, т. е. отличается от i_a только масштабом.

Зависимость i_a от u_c при постоянном напряжении между анодом и катодом называется *статической сеточной характеристикой лампы*.

В том случае, когда изменения напряжения на выходе усилителя пропорциональны изменениям на его входе и превосходят их, усилитель усиливает поданные на него колебания без искажений. При этом зависимость выходного напряжения от входного изображается прямой линией. Такой случай мы имеем на участке $-8 \text{ В} < u_c < +8 \text{ В}$ (рис. 2.20), где изменения u_a пропорциональны изменениям u_c и превосходят их в несколько раз.

Усилители обычно характеризуются *коэффициентом усиления*, под которым подразумевается отношение приращения напряжения на выходе усилителя (в нашем случае Δu_a) к вызвавшему его приращению напряжения на входе (Δu_c). Из рис. 2.20 следует, что для рассматриваемого случая коэффициент усиления равен

$$K = \frac{\Delta u_a}{\Delta u_c} = -\frac{145}{16} \approx -9.$$

Заметим, что пока зависимость u_a от u_c линейна, коэффициент усиления K не зависит от величины Δu_c .

Отрицательный знак коэффициента усиления означает, что при увеличении напряжения на входе напряжение на выходе уменьшается, что учитывается противоположными знаками приращений Δu_a и Δu_c .

Если необходимо получить ограничение и нежелательно, чтобы через источник усиливаемых колебаний протекал значительный сеточный ток, что будет при положительных значениях u_c , применяют схему (рис. 2.21), имеющую в цепи сетки большое сопротивление r . В этом случае сеточная цепь работает аналогично диодному ограничителю, рассмотренному в § 2.3: при отрицательных e_c сеточного тока нет и $u_c = e_c$; при положительных e_c возникает сеточный ток, и напряжение u_c остается примерно равным нулю. Зависимость u_a и u_r от e_c для схемы, изображенной на рис. 2.21, показана на рис. 2.20 пунктиром.

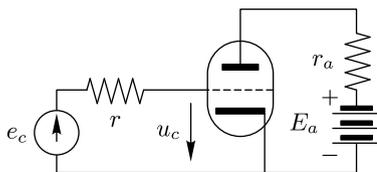


Рис. 2.21

Рассмотренный усилитель имел коэффициент усиления $K < 0$.

Опишем еще одноламповый *сеточный* (транзитронный) *усилитель на пентоде*, который имеет $K > 0$.

Вольтамперные характеристики для второй сетки пентода типа 6Ж7 при использовании напряжения на третьей сетке u_{c3} как управляющего

параметра изображены на рис. 2.22. При этом напряжения на аноде и первой сетке постоянны.

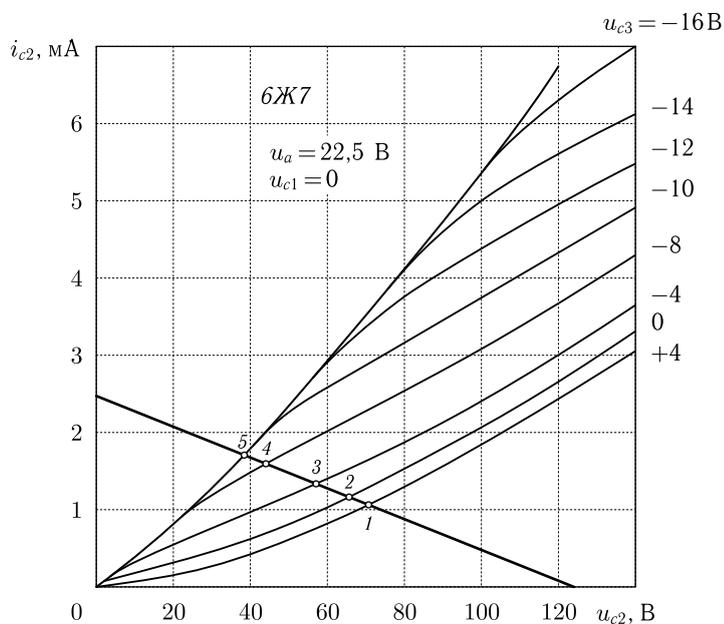


Рис. 2.22

Как видно из рис. 2.22, с увеличением напряжения u_{c3} ток второй сетки i_{c2} падает. Это объясняется тем, что в данном режиме при увеличении u_{c3} больше электронов пролетает на анод и вследствие этого количество электронов, попадающих на вторую сетку, уменьшается.

Если включить в цепь второй сетки сопротивление (рис. 2.23), то при увеличении u_{c3} ток через это сопротивление и падение напряжения на нем будут уменьшаться и, следовательно, u_{c2} увеличиваться.

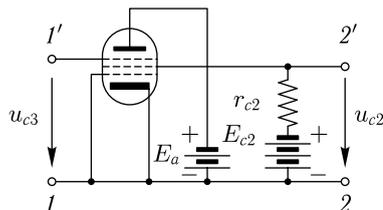


Рис. 2.23

Проводя на семействе характеристик i_{c2} нагрузочную прямую (рис. 2.22), найдем зависимость u_{c2} от u_{c3} . Эта зависимость приведена на рис. 2.24. Соответствующие друг другу точки этого рисунка

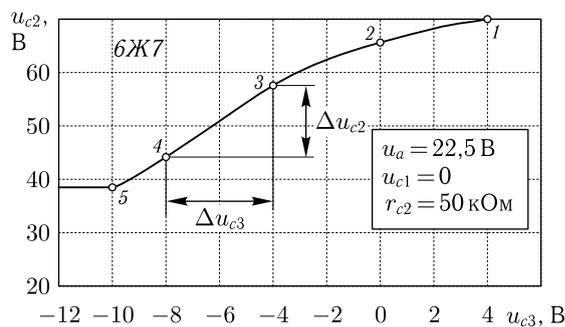


Рис. 2.24

и рис. 2.22 обозначены одинаковыми цифрами. Из полученной зависимости видно, что в данном случае

$$K = \frac{\Delta u_{c2}}{\Delta u_{c3}} = \frac{14}{4} = +3,5 > 0.$$

Пример 2.3

Построить зависимость u_a от u_c для схемы на пентоде 6Ж4, изображенной на рис. 2.25. Характеристики лампы даны на рис. 2.26.

Задано: $E_a = 150$ В; $E_{c2} = 150$ В; $r_a = 15$ кОм.

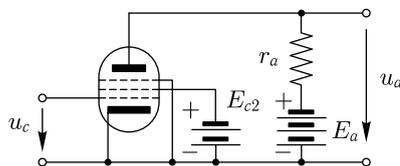


Рис. 2.25

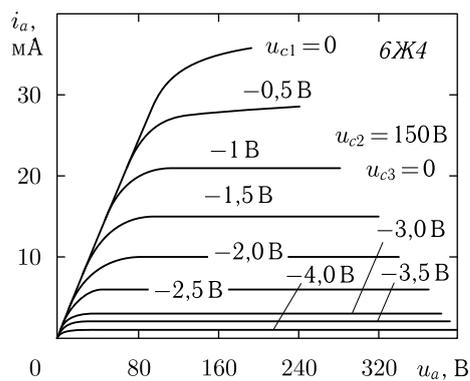


Рис. 2.26

Решение

1. В координатах рис. 2.26 строим нагрузочную прямую. Она должна пересекать ось абсцисс в точке $u_a = E_a = 150$ В и ось ординат в точке $t_a = \frac{E_a}{r_a} = \frac{150}{15000} = 0,01$ А = 10 мА/

2. Для каждого значения u_c находим u_a как абсциссу точки пересечения характеристики, соответствующей данному u'_c , с нагрузочной прямой. По полученным точкам строим требуемую зависимость (рис. 2.27).

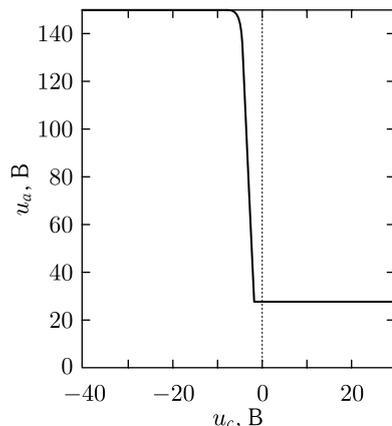


Рис. 2.27

§ 2.5. Многоступенные усилители постоянного напряжения

Если коэффициент усиления рассмотренных выше одноламповых усилителей оказывается недостаточно большим, то применяют многоламповые усилители, состоящие из ряда включенных друг за другом одноламповых. Каждый одноламповый усилитель называют в этом случае *ступенью усиления* или просто *ступенью*.

На рис. 2.28а приведена одна из схем такого усилителя.

Приращение напряжения на сетке лампы L_1 вызывает большее приращение на ее аноде, которое передается без изменения на сетку лампы L_2 и вызывает на ее аноде еще большее приращение напряжения. Приращение, таким образом, увеличивается от ступени к ступени.

Батареи E_{c1} и E_{c2} в рассматриваемой схеме необходимы для того, чтобы установить такое начальное напряжение на сетках ламп, при котором лампы хорошо усиливают, а сеточный ток отсутствует. Если характеристики ступеней усилителя соответствуют рис. 2.20, то начальное напряжение на сетке должно быть равно -4 В (середины линейного участка, лежащего в области отрицательных напряжений

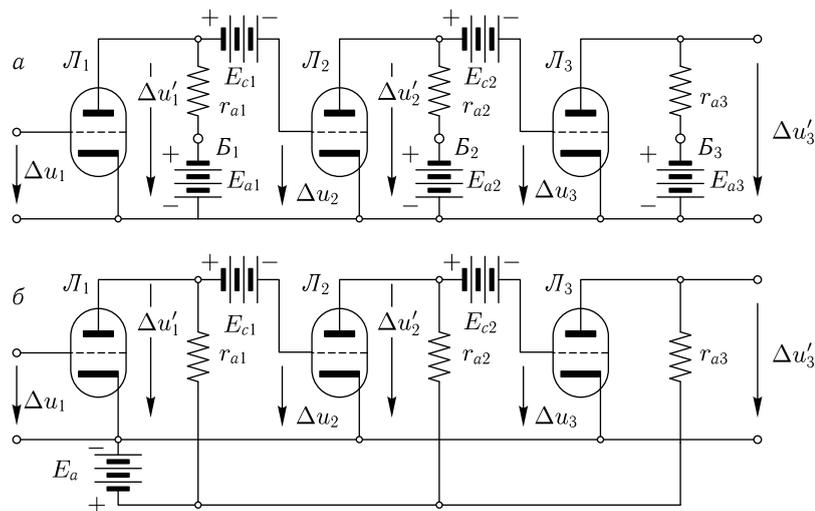


Рис. 2.28

на сетке). Начальное напряжение на анодах при этом равно 150 В. Следовательно, надо взять $E_{c1} = E_{c2} = 154$ В.

В усилителе, изображенном на рис. 2.28а, точки B_1 , B_2 и B_3 имеют одно и то же напряжение относительно катодов ламп (если $E_{a1} = E_{a2} = E_{a3}$), поэтому их можно соединить между собой и три батареи E_{a1} , E_{a2} и E_{a3} заменить одной. Так обычно и поступают на практике. Схема усилителя в этом случае имеет вид, показанный на рис. 2.28б. Этот усилитель обладает тем недостатком, что в нем содержатся батареи E_{c1} и E_{c2} , которые нельзя объединить, так как напряжение на их зажимах относительно катодов ламп разное и переменное. Более удобен в этом отношении усилитель, схема которого приведена на рис. 2.29. Здесь необходимое начальное напряжение между сеткой и анодом предыдущей ступени создается падением напряжения на сопротивлениях r_{ac1} и r_{ac2} , заменяющих батареи E_{c1} и E_{c2} .

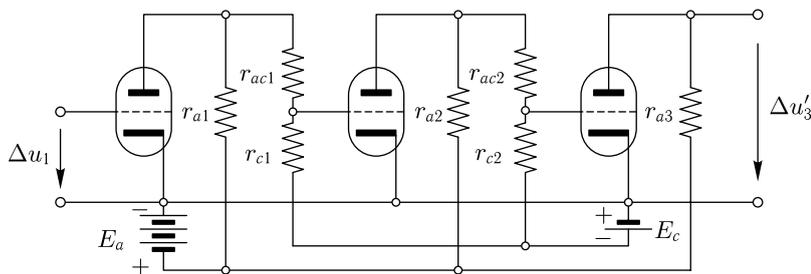


Рис. 2.29

Коэффициент усиления этой схемы меньше, чем предыдущей, ибо приращение напряжения на аноде передается на сетку следующей лампы не полностью, так как делится на сопротивлениях r_{ac} и r_c . Для уменьшения этого эффекта следует увеличивать сопротивление r_c , что, однако, приводит к необходимости иметь большое напряжение E_c батареи смещения.

Коэффициент усиления n -ступенного усилителя равен:

$$\begin{aligned} K &= \frac{\Delta u'_n}{\Delta u_1} = \frac{\Delta u'_1}{\Delta u_1} \cdot \frac{\Delta u'_2}{\Delta u_2} \cdot \frac{\Delta u'_3}{\Delta u_3} \dots \frac{\Delta u'_n}{\Delta u_n} = \\ &= K_1 K_2 \cdot K_3 \dots K_n, \end{aligned} \quad (2.6)$$

где Δu_m — приращение напряжения на входе m -й ступени, $\Delta u'_m$ — приращение напряжения на выходе m -й ступени, $K_m = \frac{\Delta u'_m}{\Delta u_m}$ — коэффициент усиления m -й ступени.

Формула (2.6) легко доказывается, если учесть, что

$$\Delta u_2 = \Delta u'_1; \quad \Delta u_3 = \Delta u'_2; \quad \Delta u_4 = \Delta u'_3 \quad \text{и т. д.}$$

Таким образом, коэффициент усиления многоступенного усилителя равен произведению коэффициентов усиления его ступеней.

Для построения общей характеристики многоступенного усилителя (зависимости выходного напряжения от входного) нужно сначала построить характеристики его отдельных ступеней. Затем, задавшись напряжением на выходе последней ступени, найти напряжение на выходе предпоследней ступени. По известному напряжению на выходе предпоследней ступени — напряжение на ее входе и т. д.

Если лампы усилителя работают с сеточными токами (при положительных напряжениях на сетках относительно катодов), то их надо учитывать.

Пример 2.4

Построить зависимость выходного напряжения u_{a2} от входного u_{c1} для усилителя на лампах 6С2С, изображенного на рис. 2.30.

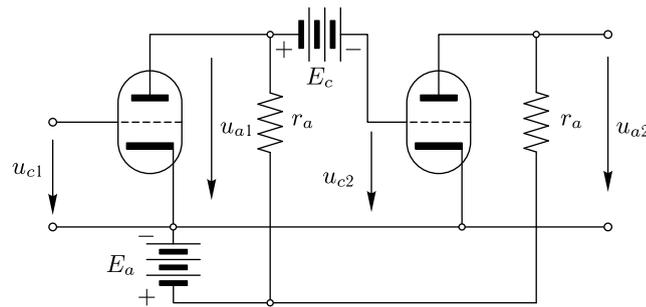


Рис. 2.30

Задано: $E_a = 200$ В; $r_a = 8$ кОм. Построение произвести для двух значений E_c : $E_c = 200$ В и $E_c = 120$ В.

Таблица 2.1

u_{a2} , В	u_{c2} , В	$E_c = 200$ В		$E_c = 120$ В	
		u_{a1} , В	u_{c1} , В	u_{a1} , В	u_{c1} , В
200	-12,0	188	-9,1	108	0,0
180	-7,7	192	-9,8	112	-0,5
160	-5,3	195	-10,3	115	-0,7
140	-3,3	197	-10,9	117	-0,9
120	-1,3	199	-11,5	119	-1,2
108	0,0	200	-12,0	120	-1,3
90	1,7	—	—	122	-1,8
77	3,0	—	—	123	-2,3
57	5,0	—	—	125	-3,4
48	6,0	—	—	126	-4,3
40	7,0	—	—	127	-5,5
34	8,0	—	—	128	-8,0

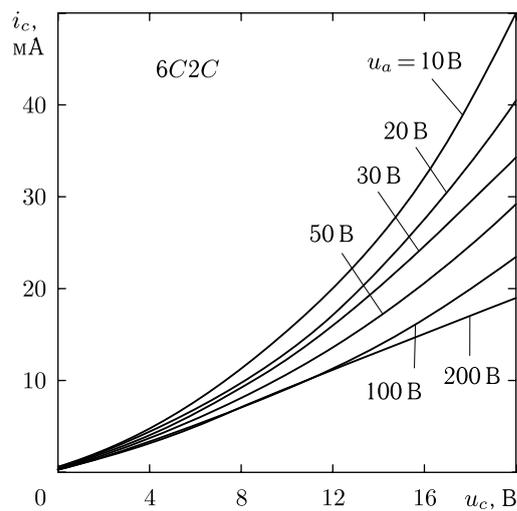


Рис. 2.31

Решение

Зависимости напряжения u_{a2} на аноде второй лампы от напряжения u_{c2} на ее сетке и напряжения u_{a1} на аноде первой лампы от u_{c1} соответствуют случаю, рассмотренному в § 2.4, и определяются кривой рис. 2.20а.

По этой кривой, задаваясь значениями u_{a2} , находим значения u_{c2} , по ним — значения $u_{a1} = u_{c2} + E_c$; по u_{a1} и кривой рис. 2.20а находим u_{c1} . Этот расчет сведен в табл. 2.1.

В случае, если u_{c2} положительно и вторая лампа работает с сеточным током (например, при $u_{a2} = 90$ В и $E_c = 120$ в) для определения u_{c1} нельзя пользоваться кривой рис. 2.20а. В этом случае надо по u_{c2} и характеристикам рис. 2.31 найти сеточный ток второй лампы. Затем находим анодный ток первой лампы по формуле:

$$i_{a1} = \frac{E_a - u_{a1}}{r_a} - i_{c2}.$$

По найденным t_{a1} и u_{a1} с помощью характеристик рис. 2.19 находим u_{c1} . На основании таблицы построены графики рис. 2.32.

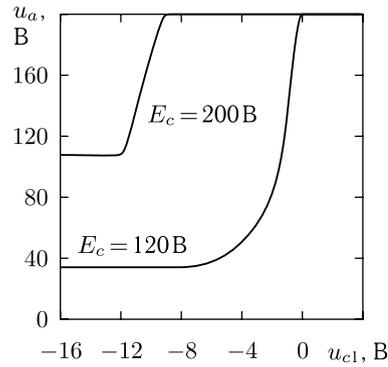


Рис. 2.32

§ 2.6. Схемы с несколькими нелинейными сопротивлениями

Пусть имеются два нелинейных сопротивления с характеристиками:

$$i_1 = f_1(u_1), \quad i_2 = f_2(u_2). \quad (2.7)$$

Эти нелинейные сопротивления могут быть управляемыми. Тогда характеристики (2.7) должны соответствовать заданному заранее известному значению управляющего параметра.

Если эти нелинейные сопротивления включены параллельно, то $u_1 = u_2 = u$ и общий ток $i = i_1 + i_2$. Таким образом, два нелинейных сопротивления, включенные параллельно, могут быть заменены одним с характеристикой:

$$i = f(u) = f_1(u) + f_2(u). \quad (2.8)$$

При последовательном включении двух нелинейных сопротивлений ток, текущий через оба сопротивления, одинаков ($i_1 = i_2 = i$). Общее напряжение на них равно $u = u_1 + u_2$. Поэтому два нелинейных сопротивления, включенных последовательно, могут быть заменены одним с характеристикой:

$$\begin{aligned} i_1 = i_2 = i &= f(u), \\ u &= u_1 + u_2, \end{aligned} \quad (2.9)$$

где по заданному i величины u_1 и u_2 берутся из ур-ний (2.7).

Исходя из сказанного, при построении вольтамперной характеристики для двух параллельно включенных нелинейных сопротивлений следует складывать ординаты, сохраняя абсциссы, а для двух последовательно включенных нелинейных сопротивлений складывать абсциссы при сохранении ординат. Это положение иллюстрируется рис. 2.33.

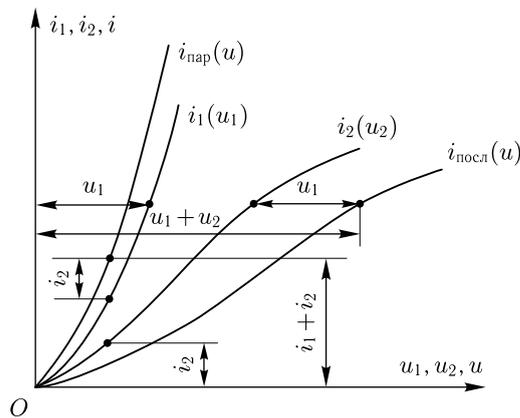


Рис. 2.33

Сказанное можно обобщить и на большее число сопротивлений. Этим способом можно упрощать сложные схемы, содержащие линейные и нелинейные сопротивления.

§ 2.7. Схемы с обратным воздействием

Рассмотрим еще схемы, в которых ток, текущий через управляемое нелинейное сопротивление, воздействует обратно на параметр, управляющий этим нелинейным сопротивлением.

Этот случай довольно сложный. За неимением универсального метода решения таких задач рассмотрим три схемы, имеющие большое распространение в радиотехнике, на которых покажем применяемую в данном случае методику.

В ряде случаев бывает необходимо получить приращение напряжения на малом сопротивлении, не отбирая тока от источника напряжения. В этих случаях применяют так называемый *катодный повторитель*, схема которого приведена на рис. 2.34.

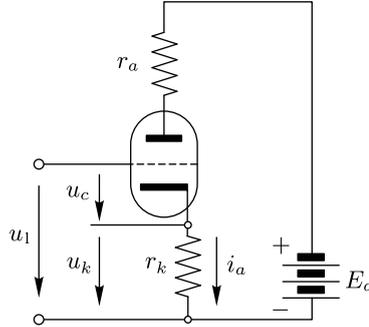


Рис. 2.34

При изменении напряжения u_1 , подаваемого на вход схемы, изменяется напряжение u_c между сеткой и катодом лампы, анодный ток i_a и, следовательно, падение напряжения u_k на сопротивлении r_k . Напряжение u_k является выходным напряжением схемы.

Для отыскания зависимости u_k от u_1 построим динамическую сеточную характеристику лампы (см. § 2.4), учитывая, что в рассматриваемом случае сопротивление в анодной цепи равно $r_a + r_k$. Для ее построения надо на семейство характеристик лампы нанести нагрузочную прямую:

$$i = \frac{E_a - u_a}{r_a + r_k}.$$

На рис. 2.35 изображена динамическая характеристика лампы 6С2С при $E_a = 150$ В и $r_a + r_k = 12$ кОм.

Для определения зависимости u_k от u_1 воспользуемся динамической характеристикой и нагрузочной прямой, определяемой уравнением, вытекающим из рис. 2.34:

$$u_1 = u_c + u_k = u_c + i_a r_k \quad (2.10)$$

или

$$i_a = \frac{u_1 u - c}{r_k}.$$

Абсцисса точки пересечения нагрузочной прямой с динамической характеристикой определяет u_c с при заданной величине u_1 , а отрезок AD — напряжение u_k . Действительно,

$$AD = u_1 - u_c = u_k.$$

Так как угол наклона нагрузочной прямой зависит только от r_k , то, перемещая прямую параллельно самой себе и проводя ее через точки

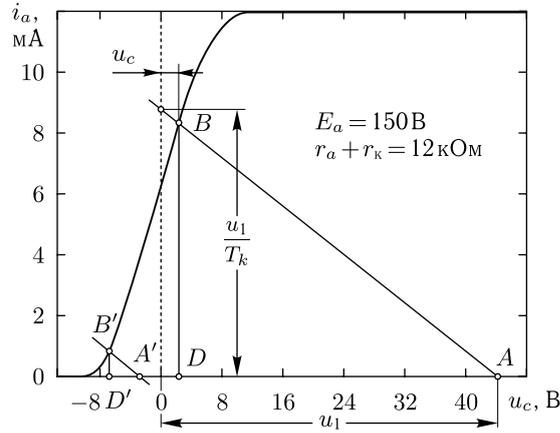


Рис. 2.35

на оси абсцисс, соответствующие заданным значениям u_1 , мы сможем определить величины u_k , соответствующие этим u_1 . Так, например, при отрицательном u_1 , равном отрезку OA' , напряжение $u_k = A'D'$.

На рис. 2.36 изображена построенная таким способом зависимость u_k от u_1 . Из этого рисунка видно, что в нашем случае

$$K = \frac{\Delta u_k}{\Delta u_1} = +\frac{16}{20} = +0,8.$$

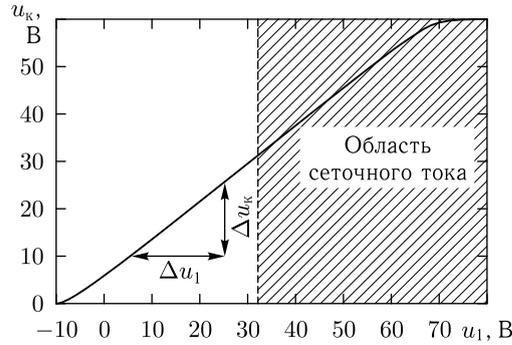


Рис. 2.36

Заметим, что если r_k велико и $u_k \gg u_c$, то на основании ф-лы (2.10) можно считать, что $u_k \approx u_1$. При этом u_k мало зависит от параметров схемы, что иногда бывает весьма существенным. В этом случае напряжение u_k на выходе катодного повторителя как бы повторяет напряжение на входе u_1 . Отсюда и название схемы.

Отметим еще, что сеточный ток в рассмотренном катодном повторителе появляется при $u_c = u_1 - u_k > 0$, т. е. при $u_1 > u_k$.

Найти с помощью рис. 2.35 значения u_1 , при которых $u_c > 0$, не представляет труда.

В рассмотренном случае сеточный ток появляется при $u_1 = 32$ В. Область, в которой имеет место сеточный ток, отмечена на рис. 2.36.

В ряде случаев сопротивление r_a в катодных повторителях отсутствует.

Двухламповый усилитель с катодной связью (рис. 2.37) часто применяют там, где нужно иметь простой усилитель постоянного напряжения, в котором можно легко менять зависимость между входным и выходным напряжениями, что в данной схеме достигается изменением величины эдс e_2 . С использованием этого усилителя мы встретимся в гл. 4 и 5.

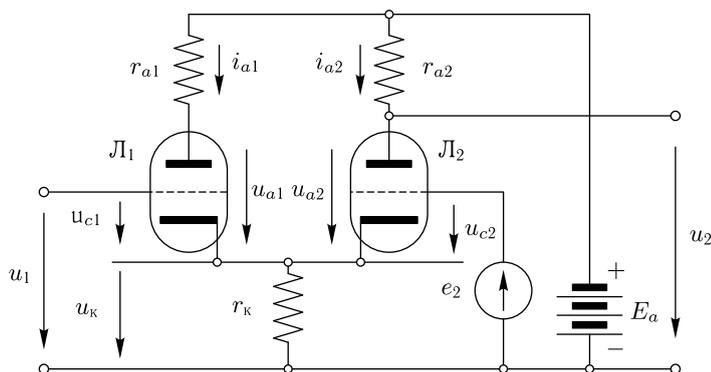


Рис. 2.37

При увеличении напряжения u_1 на входе схемы увеличиваются анодный ток i_{a1} лампы \mathcal{L}_1 и падение напряжения u_k на сопротивлении r_k . Это ведет к тому, что напряжение на сетке второй лампы $u_{c2} = e_2 - u_k$ будет уменьшаться, что вызовет уменьшение ее анодного тока i_{a2} , уменьшение падения напряжения на сопротивлении r_{a2} и увеличение выходного напряжения u_2 .

Этот процесс при увеличении u_1 будет продолжаться, пока u_k не сделается такой величины, что вторая лампа заперется и u_2 сделается равным E_a .

При уменьшении входного напряжения происходит обратный процесс. Выходное напряжение u_2 будет уменьшаться. Уменьшение u_2 прекратится, когда заперется первая лампа.

Построение зависимости u_2 от u_1 осложняется тем, что u_k определяется токами обеих ламп. Эту зависимость можно найти так:

- 1) задаемся u_k и находим $u_{c2} = e_2 - u_k$;
- 2) зная u_k и u_{c2} , находим из анодных характеристик лампы \mathcal{L}_2 с помощью нагрузочной прямой

$$i_{a2} = \frac{E_a - u_k - u_{a2}}{r_{a2}}$$

величины u_{a2} и i_{a2} ;

- 3) находим $u_2 = u_{a2} + u_k$;
- 4) по известным i_{a2} и u_k находим

$$i_{a1} = \frac{u_k}{r_k} - i_{a2};$$

- 5) находим напряжение на аноде лампы \mathcal{L}_1 :

$$u_{a1} = E_a - u_k - i_{a1}r_{a1};$$

6) по известным величинам u_{a1} и i_{a1} из анодных характеристик лампы \mathcal{L}_1 находим u_{c1} ;

- 7) находим $u_1 = u_{c1} + u_k$;

8) строим зависимость напряжения u_2 , полученного в п. 3, от напряжения u_1 , полученного в п. 7.

Зависимости u_2 от u_1 для различных e_2 приведены на рис. 2.38. При увеличении e_2 ток лампы \mathcal{L}_2 растет и напряжение u_2 уменьшается. На рис. 2.38 указаны также значения u_1 , при которых $u_1 = u_k$ и начинается сеточный ток первой лампы.

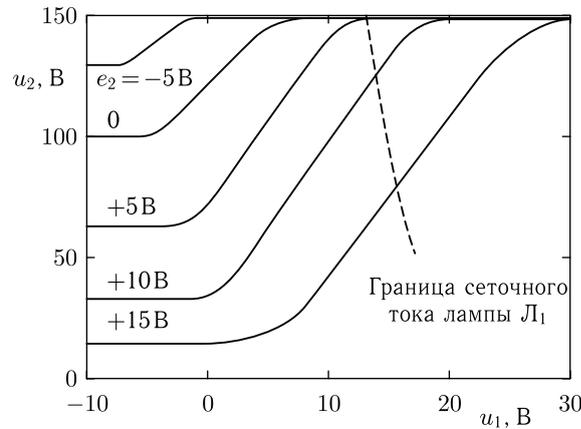


Рис. 2.38.

На рис. 2.39 показан *катодный усилитель на пентагриде* (фантас-тронный усилитель).

При большом отрицательном u_1 лампа заперта, ток $i_a = 0$ и $u_2 = E_a$. С увеличением u_1 лампа начнет отпираться, i_a расти, а u_2 падать.

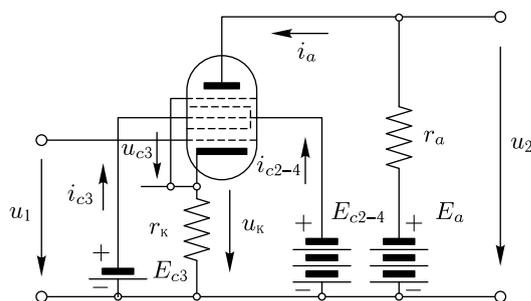


Рис. 2.39.

При этом за счет падения напряжения на сопротивлении r_k , равного

$$u_k = (i_a + i_{c1} + i_{c2-4} + i_{c3}) \cdot r_k,$$

напряжение на катоде также растет, как это имеет место в катодном повторителе. Напряжение на третьей сетке по отношению к катоду $u_{c3} = E_{c3} - u_k$ падает. При достаточно большом u_1 и u_k это приведет к тому, что u_{c3} станет отрицательным и настолько большим, что электроны не будут пропускаться на анод, i_a делается равным нулю, а u_2 снова вырастет до величины E_a . Напряжение u_k в этом случае поддерживается за счет токов первой и второй сеток, в особенности за счет тока последней, так как на нее подается довольно большое положительное напряжение. Зависимости i_a и u_2 от u_1 приведены на рис. 2.40. Эти зависимости обычно получают экспериментально, поскольку для их расчета не хватает типовых характеристик пентагрида, приводимых в справочниках. Здесь необходимо знать зависимость i_a и i_{c2-4} от напряжений на аноде и на всех сетках, кроме пятой, поскольку эти напряжения в процессе работы меняются. Снятие этих зависимостей и пользование ими получается сложнее, чем снятие результирующих характеристик экспериментально. Усилитель, обладающий аналогичными свойствами, может быть осуществлен также на пентоде.

Случаи, подобные рассмотренному, когда теория дает лишь общую, качественную картину явления, а получить количественные данные о работе схемы и осуществить выбор ее параметров целесообразнее экспериментально, встречаются в радиотехнике довольно часто.

Схемы, в которых ток, протекающий через нелинейное сопротивление, влияет на величину управляющего параметра, весьма разнообразны и отнюдь не исчерпываются тремя рассмотренными случаями.

Для каждой из схем, рассмотренных в этой главе, возможно составление уравнений, связывающих токи и напряжения в различных цепях усилителя. Однако наличие нелинейных зависимостей, входящих в эти уравнения, затрудняет получение аналитического выражения для выходного напряжения как функции напряжения на входе. Поэтому

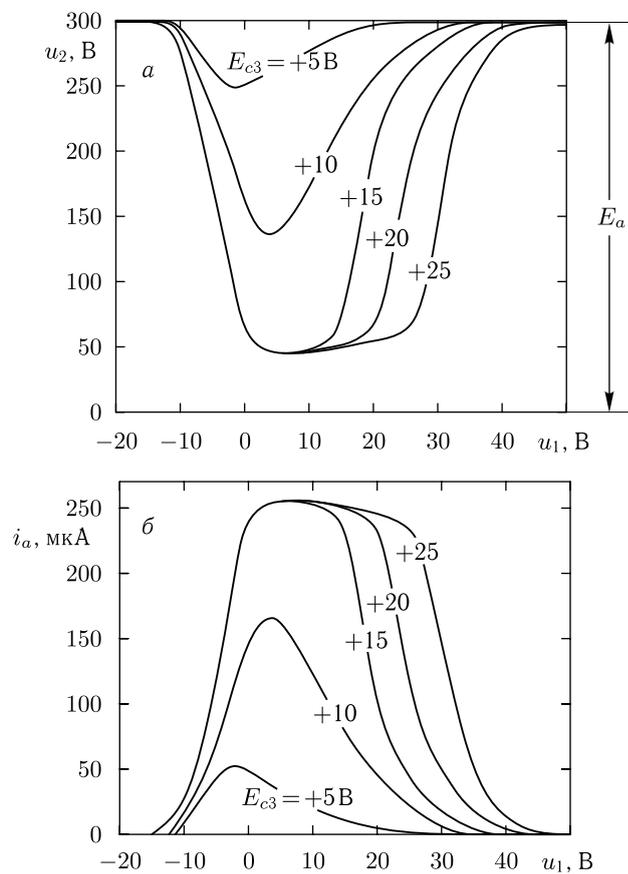


Рис. 2.40.

пользуются графическими методами анализа, которые в каждом конкретном случае должны иметь свои особенности. Наиболее сложны и разнообразны методы графического анализа схем с обратным воздействием, где имеет место связь управляющего параметра с током, текущим через нелинейное сопротивление.