

## ЭЛЕКТРОННЫЕ РЕЛЕ С УСИЛИТЕЛЯМИ

### § 4.1. Электронные реле. Общие замечания

*Электронными реле называются устройства с электронными лампами, в которых существует несколько (обычно два) различных устойчивых режимов равновесия, причем под действием подаваемого извне напряжения происходит переброс из одного режима равновесия в другой. Это значит, что в электронных реле при одних и тех же напряжениях источников питания устанавливаются и могут существовать неограниченно долго постоянные токи и напряжения, соответствующие одному или другому режиму равновесия — в зависимости от условий, в которых схема была до этого. При воздействии импульса на электронное реле оно может перейти (как говорят, «переброситься») из одного режима равновесия в другой и остаться в нем после прекращения действия импульса. Переход из одного режима равновесия в другой происходит «скачком», т. е. весьма быстро (обычно за доли микросекунды), и сопровождается очень быстрыми изменениями напряжений.*

Электронные реле используются для получения импульсов с очень быстрым нарастанием и спаданием напряжения, а также для «запоминания» и для счета числа импульсов.

Электронные реле обычно осуществляются или путем использования усилителей постоянного напряжения или путем использования нелинейных сопротивлений с характеристикой, имеющей спадающий участок, т. е. участок, на котором  $\frac{di}{du} < 0$ . Электронные реле первого типа будут рассмотрены в этой главе, второго типа — в гл. 6.

### § 4.2. Общая теория электронных реле с усилителями

*Электронное реле с усилителем состоит обычно из безынерционного усилителя постоянного напряжения, у которого выходное напряжение подается обратно на вход, т. е. из усилителя постоянного напряжения, замкнутого обратной связью. Общая схема такого реле изображена на рис. 4.1. На этой схеме усилитель символически изображен прямоугольником;  $a_1-b_1$  — зажимы входа усилителя,  $a_2-b_2$  — зажимы выхода. В цепь обратной связи может быть включена эдс  $e$ .*

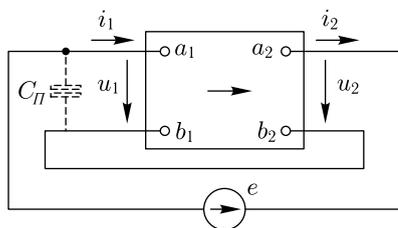


Рис. 4.1

Вначале будем считать, что ток  $i_1$ , текущий через входные зажимы усилителя, равен нулю, что обычно имеет место, если первая лампа усилителя работает без сеточных токов.

Пусть напряжение на выходе без учета токов, текущих через паразитные емкости, выражается функцией:

$$u_{2y} = f_{2y}(u_1), \quad (4.1)$$

где  $u_1$  — напряжение на входе (рис. 4.2).

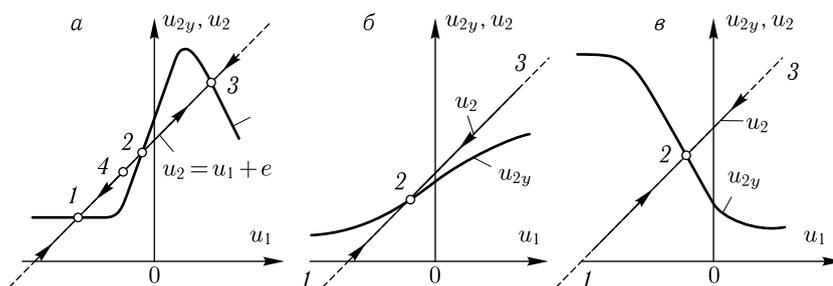


Рис. 4.2

Эта зависимость может быть получена экспериментально, если разомкнуть цепь обратной связи и менять напряжение на входе настолько медленно, чтобы токи через паразитные емкости не сказывались на величине выходного напряжения. Таким образом,  $u_{2y}$  есть напряжение на выходе усилителя при данном  $u_1$  в установившемся режиме.

Из рис. 4.1 следует, что напряжение на выходе усилителя при замкнутой обратной связи должно быть равно

$$u_2 = u_1 + e. \quad (4.2)$$

Эта зависимость также нанесена на рис. 4.2 (прямые 1–3).

Прямые 1–3 или аналогичные, соответствующие линейной зависимости между токами или напряжениями, обусловленной наличием обратной связи, называются прямыми обратной связи.

Напряжение  $u_2$  на выходе усилителя соответствует выражению (4.2) как в установившемся режиме, так и при быстрых изменениях напряжения.

В режимах равновесия, когда напряжения постоянны и режим установившийся, имеем  $u_{2y} = u_2$ . Следовательно, эти режимы должны соответствовать точкам пересечения кривой  $u_{2y}$  с прямой обратной связи.

Для случаев, изображенных на рис. 4.2б и 4.2в, мы имеем один режим равновесия, соответствующий точке 2; для случая, изображенного на рис. 4.2а, — три режима, соответствующих точкам 1, 2 и 3. Выясним, когда будет существовать тот или иной из трех возможных режимов. Для этого необходимо учесть влияние малых паразитных емкостей, существующих в усилителе.

Несмотря на то, что паразитные емкости обычно малы (единицы, редко десятки пФ), при быстрых процессах установления режима токи через них оказываются значительными.

Если паразитные емкости неограниченно уменьшать, то скорости изменения напряжений в процессе установления будут стремиться к бесконечности, поскольку других инерционных элементов схема рис. 4.1 не содержит. Таким образом, как бы малы ни были паразитные емкости в электронном реле, они всегда играют существенную роль в процессе установления.

Вначале учтем лишь паразитную емкость на входе усилителя  $C_{\Pi}$  и приступим к анализу схемы рис. 4.1.

Напряжение на выходе усилителя  $u_2$  зависит от напряжения на его входе  $u_1$  и от тока  $i_2$ , текущего в выходной цепи усилителя.

Выясним зависимость  $u_2$  от  $i_2$ . При достаточно малых изменениях токов и напряжений схема усилителя может быть приведена к линейной схеме путем замены ламп линейными схемами замещения. В этом случае безынерционный усилитель со стороны выходных зажимов может быть заменен схемой рис. 4.3, где  $r_3 = r_2$  — сопротивление усилителя между зажимами  $a_2$ – $b_2$ ,  $\Delta e_3$  — приращение  $u_2$ , вызванное приращением  $u_1$ . Если  $u_1$  постоянно, то  $\Delta e_3 = 0$  и

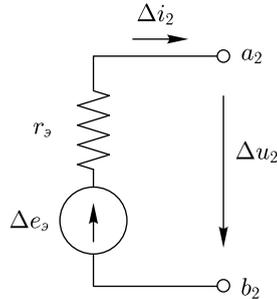


Рис. 4.3

$$\Delta u_2 = -\Delta i_2 r_3 = -\Delta i_2 r_2. \quad (4.3)$$

Для схемы рис. 2.30  $r_3 = r_2 = \frac{r_i r_a}{r_i + r_a}$  — при открытой лампе и  $r_3 = r_a$  — при запертой лампе. Вообще говоря,  $r_2$  может несколько меняться при изменении  $i_2$ . Поэтому при больших приращениях  $i_2$  следует в ф-ле (4.3) вместо  $r_2$  брать некоторое среднее  $r_{2cp}$  и считать

$$\Delta u_2 = -\Delta i_2 r_{2cp}. \quad (4.4)$$

Точно определять величину  $r_{2cp}$  обычно не требуется. Достаточно указать, что  $r_{2cp}$  больше минимально возможного значения  $r_2$  и меньше максимально возможного.

Из сказанного следует, что при сохранении  $u_1$  постоянным увеличение  $u_2$  уменьшает ток  $i_2$ , отдаваемый усилителем, а уменьшение  $u_2$  усиливает его.

При постоянном значении  $u_1$  или при сравнительно медленном изменении его можно считать, что ток  $i_2 = 0$  (мы условились считать  $i_1 = 0$ ). Для этого случая выходное напряжение  $u_2$  равно  $u_{2y}$ .

При быстром изменении напряжения  $u_1$  ток  $i_2$  получит приращение  $\Delta i_2 = C_{\Pi} \frac{du_1}{dt}$  за счет тока через паразитную емкость  $C_{\Pi}$ . При этом  $u_2$  получит приращение  $\Delta u_2$  и в соответствии с равенством (4.4) будет равно

$$u_2 = u_{2y} - \Delta i_2 r_{2cp} = u_{2y} - r_{2cp} C_{\Pi} \frac{du_1}{dt}. \quad (4.5)$$

Это выражение для  $u_2$  справедливо как в установившемся, так и в неустановившемся режиме.

Полагая

$$r_{2cp} C_{\Pi} = \tau_{\Pi}, \quad (4.6)$$

получим

$$u_{2y} - u_2 = \tau_{\Pi} \frac{du_1}{dt}. \quad (4.7)$$

Поскольку  $u_{2y}$  связано нелинейно с величиной  $u_1$  и величина  $u_2$  в соответствии с выражением (4.2) также определяется  $u_1$ , то левая часть этого уравнения является нелинейной функцией  $u_1$ . Следовательно, ур-ние (4.7) является нелинейным дифференциальным уравнением первого порядка для  $u_1$ . Зная начальное значение  $u_1$ , из ур-ния (4.7) можно найти дальнейшее изменение  $u_1$  во времени.

Уравнение (4.7) можно пояснить следующим образом. Если  $u_2 = u_{2y}$ , то  $i_2 = 0$ . Конденсатор  $C_{\Pi}$  при этом не заряжается и не разряжается — в схеме равновесие. Если уменьшить  $u_2$ , т. е. сделать  $u_2 < u_{2y}$ , то, как указывалось,  $i_2$  увеличится и станет положительным. Ток потечет в емкость  $C_{\Pi}$ , заряжая ее и увеличивая  $u_1$ . Если  $u_2$  увеличить, т. е. сделать  $u_2 > u_{2y}$ , то получим  $i_2 < 0$ . Ток  $i_2$  будет разряжать  $C_{\Pi}$ , уменьшая  $u_1$ .

Исследуем на основании дифференциального ур-ния (4.7) режимы электронного реле сначала качественно. Качественное рассмотрение решений нелинейных дифференциальных уравнений получило большое распространение, поскольку их количественное решение часто бывает весьма затруднительным и не наглядным.

Из ур-ния (4.7) следует, что, если  $u_2$  соответствует точке над кривой  $u_{2y}$  ( $u_2 > u_{2y}$ ), то  $u_1$  уменьшается, и, если  $u_2$  соответствует точке под кривой  $u_{2y}$ , то  $u_1$  увеличивается.

Напряжение  $u_2$  на выходе усилителя связано с напряжением  $u_1$  на его входе уравнением (4.2). Поэтому точка  $(u_1, u_2)$  (назовем ее рабочей точкой) всегда должна лежать на прямой обратной связи 1–2–3 (рис. 4.2а).

Как следует из сказанного, для участков этой прямой, лежащих в области под кривой  $u_{2y}$  (участок левее точки 1 и участок 2–3),  $\frac{du_1}{dt} > 0$  и рабочая точка  $(u_1, u_2)$  должна двигаться по прямой обратной связи 1–2–3 вправо и вверх.

Аналогично для участков прямой, лежащих в области над кривой  $u_{2y}$  (участок 1–2 и участок правее точки 3),  $\frac{du_1}{dt} < 0$  и рабочая точка  $(u_1, u_2)$  должна двигаться по прямой обратной связи 1–2–3 влево и вниз.

В точках пересечения прямой с кривой  $u_{2y}$  производная  $\frac{du_1}{dt} = 0$  и рабочая точка  $(u_1, u_2)$  неподвижна.

Аналогичные рассуждения можно привести и для рис. 4.2б и 4.2в.

Направления движения точки  $(u_1, u_2)$  на различных участках прямой обратной связи отмечены на рис. 4.2 стрелками.

Начальные условия для схемы рис. 4.1 определяются напряжением  $u_1$  на конденсаторе  $C_{\Pi}$ . Если вначале  $u_1$  соответствовало точке, лежащей левее точки 2 рис. 4.2а, скажем, точке 4, то  $u_1$  и за ним  $u_2$  уменьшаются. При этом рабочая точка двигается по прямой 1–2–3, пока не дойдет до точки 1. Нетрудно убедиться, что электронное реле приходит к режиму, соответствующему точке 1 при любых начальных условиях, при которых  $u_1$  меньше абсциссы точки 2, и к режиму, соответствующему точке 3 при  $u_1$ , большем абсциссы точки 2.

Так как емкость  $C_{\Pi}$  обычно мала и постоянная времени  $\tau_{\Pi}$  также мала, то процессы установления протекают весьма быстро (за доли микросекунды).

Если вначале  $u_1$  точно равно абсциссе точки 2 (рис. 4.2а), то  $u_2 = u_{2y}$  и  $\frac{du_1}{dt} = 0$ . При этом имеет место равновесие.

Однако это равновесие *неустойчиво*. Действительно, если  $u_1$  немного изменится, либо несколько изменится положение точки 2, то точка  $(u_1, u_2)$  окажется на участке 1–2 или 2–3 и начнет двигаться в направлении стрелок *от точки 2*. Поэтому схема в режиме, соответствующем точке 2, долго оставаться не может.

Для рис. 4.2б и 4.2в точка  $(u_1, u_2)$  при любых начальных условиях приходит в положение 2.

Точки 1 и 3 (рис. 4.2а) и точки 2 (рис. 4.2б и 4.2в) соответствуют *устойчивым* состояниям равновесия — при небольших отклонениях рабочей точки  $(u_1, u_2)$  от них она возвращается обратно.

Вообще, *если при равновесии в рабочей точке  $(u_1, u_2)$  коэффициент усиления  $K = \frac{du_{2y}}{du_1} > 1$ , то равновесие неустойчиво.*

Действительно, если в рабочей точке, соответствующей состоянию равновесия, для которой  $u_2 = u_{2y}$ , крутизна наклона кривой  $u_{2y}$ , равная  $\frac{du_{2y}}{du_1}$ , больше крутизны наклона прямой обратной связи, равной единице, то при смещении рабочей точки вправо получим  $u_2 < u_{2y}$  и  $\frac{du_1}{dt} > 0$ , т. е. рабочая точка станет удаляться от состояния равновесия. Аналогично, при смещении влево  $u_2 > u_{2y}$  и  $\frac{du_1}{dt} < 0$ , т. е. рабочая точка также станет удаляться от состояния равновесия, но в другую сторону.

Таким же способом можно показать, что *если при равновесии в рабочей точке  $(u_1, u_2)$  коэффициент усиления  $K = \frac{du_{2y}}{du_1} < 1$ , то равновесие устойчиво.*

Эти положения подтверждаются рис. 4.2. В общем виде для случая многих паразитных емкостей они будут доказаны в примере 7.6 при рассмотрении общей теории устойчивости схем.

В случае кривых  $u_{2y}$ , изображенных на рис. 4.2б и 4.2в, при любых значениях  $e$  имеет место лишь одно и притом устойчивое состояние равновесия, так как при любых  $u_1$  величина  $K < 1$ .

Для того, чтобы получить электронное реле, которое должно иметь несколько состояний равновесия, необходимо, чтобы на некотором участке значений  $u_1$  коэффициент усиления усилителя  $K$  был больше +1.

Рассмотрим работу схемы рис. 4.1 при изменении эдс  $e$ . Пусть вначале  $e = e_0$  и рабочая точка занимает положение 1 (рис. 4.4). Пусть, далее, эдс  $e$  уменьшается. Тогда прямая обратной связи станет сдвигаться вниз, и рабочая точка из положения 1 будет перемещаться в положение 4 и затем в 5. Мы считаем движение достаточно медленным, так что при этом  $C_{\Pi} \frac{du_1}{dt}$  настолько мало, что можно принять  $i_2 = 0$  и  $u_2 = u_{2y}$ , т. е. считать, что при движении прямой обратной связи точка  $(u_1, u_2)$  находится на пересечении прямой обратной связи с кривой. Положение 5 неустойчиво, так как при небольшом случайном отклонении от него вправо точка  $(u_1, u_2)$  попадает в область, где  $\frac{du_1}{dt} > 0$ , вследствие чего  $u_1$  и  $u_2$  начинают расти и рабочая точка быстро, как говорят, скачком переходит в устойчивое положение 6. При дальнейшем уменьшении  $e$  рабочая точка перейдет в положение 7.

Отметим, что даже если рабочая точка и не отклонится от положения 5 под действием каких-либо случайных причин, то все равно она перейдет из положения 5 в положение 6 скачком. Действительно, пусть прямая обратной связи дойдет до положения 5–6 и будет двигаться дальше. Рабочая точка  $(u_1, u_2)$  дойдет до положения 5 и дальше будет двигаться с прямой обратной связи, так как сойти с нее она не может. При этом  $u_2$  станет меньше  $u_{2y}$  и рабочая точка быстро перейдет в положение, близкое к положению 6.

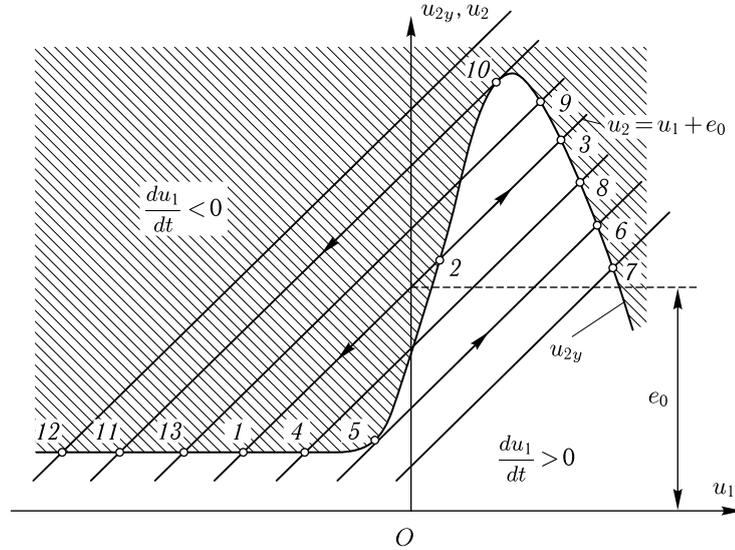


Рис. 4.4

При возвращении эдс  $e$  к первоначальному значению  $e_0$  рабочая точка, пройдя положения 6 и 8, переместится в точку 3. Положения 6, 8 и 3, как легко видеть, устойчивы.

Если теперь эдс  $e$  увеличивается, то прямая поднимается вверх и рабочая точка занимает положения 9 и 10. Положение 10 неустойчивое, так как при небольшом отклонении от него влево точка  $(u_1, u_2)$  попадает в область, где  $\frac{du_1}{dt} < 0$ ,  $u_1$  и  $u_2$  начинают быстро уменьшаться, и рабочая точка скачком переходит в устойчивое положение 11.

При дальнейшем увеличении  $e$  рабочая точка перейдет в устойчивое положение 12.

При возвращении эдс  $e$  к первоначальному значению  $e_0$  рабочая точка, пройдя положения 11 и 13, вернется в положение 1.

Отметим, что в точках 5 и 10, с которых начинаются скачки и которые называются *точками срыва*, коэффициент усиления усилителя  $K = \frac{du_{2y}}{du_1} = 1$ , поскольку в этих точках кривая  $u_{2y}$  касается прямой обратной связи.

Зависимости  $u_1$  от  $e$  и  $u_2$  от  $e$ , полученные на основании рис. 4.4, изображены на рис. 4.5. Точки, соответствующие одинаковым режимам, обозначены на рис. 4.4 и 4.5 одинаковыми цифрами.

Если характеристика усилителя имеет вид, изображенный на рис. 4.2б или 4.2в, т. е. коэффициент усиления усилителя для любых  $u_1$  меньше, чем +1, то схема рис. 4.1 неустойчивых рабочих точек не имеет и для нее  $u_1$  и  $u_2$  являются непрерывными однозначными функциями  $e$ .

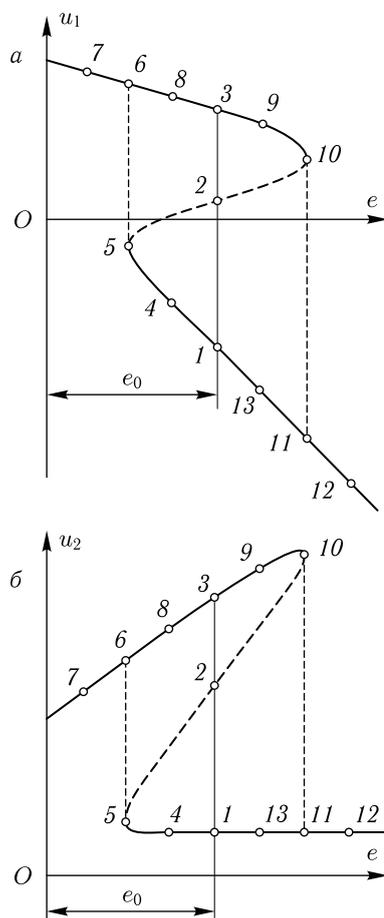


Рис. 4.5

На рис. 4.6 изображен пример временной диаграммы эдс  $e$  в виде двух импульсов, наложенных на напряжение  $e_0$ , и соответствующие ей временные диаграммы напряжений  $u_1$  и  $u_2$ , построенные на основании рис. 4.5. На рис. 4.5 и 4.6 точки, соответствующие одинаковым режимам, обозначены одинаковыми цифрами. Участки 5–6 и 10–11 на рис. 4.6 проходятся обычно за время, измеряемое долями микросекунды.

Как видно из рис. 4.6, при наложении на эдс  $e_0$  отрицательного импульса схема переходит из устойчивого состояния 1 в устойчивое состояние 3 и остается в нем до воздействия нового импульса. При наложении положительного импульса схема возвращается из положения 3 в положение 1 и остается в нем до следующего отрицательного

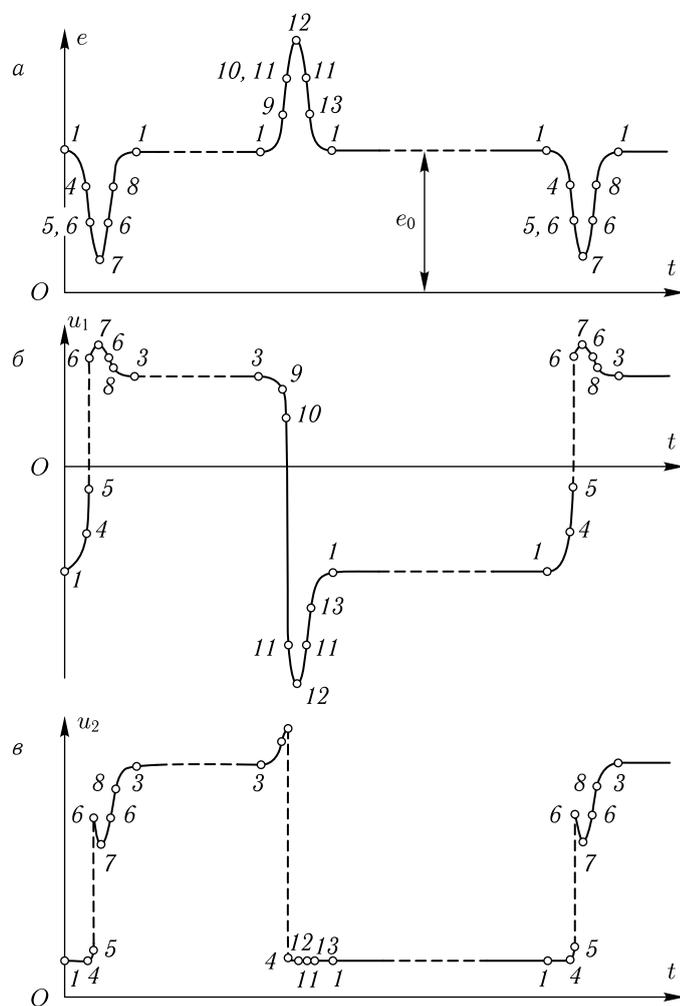


Рис. 4.6

импульса. Таким образом, электронное реле «запоминает» знак последнего импульса.

Случай, когда эдс  $e$  меняется по синусоидальному закону, представлен на рис. 4.7. Обозначения на этом рисунке те же, что и на рис. 4.6. Из рис. 4.7 видно, что если напряжение  $u_2$  подать на ограничитель и ограничить по максимуму до напряжения  $E_{огр}$  (рис. 4.7в), то получатся прямоугольные импульсы, время нарастания и спада которых весьма мало (равно долям микросекунды).

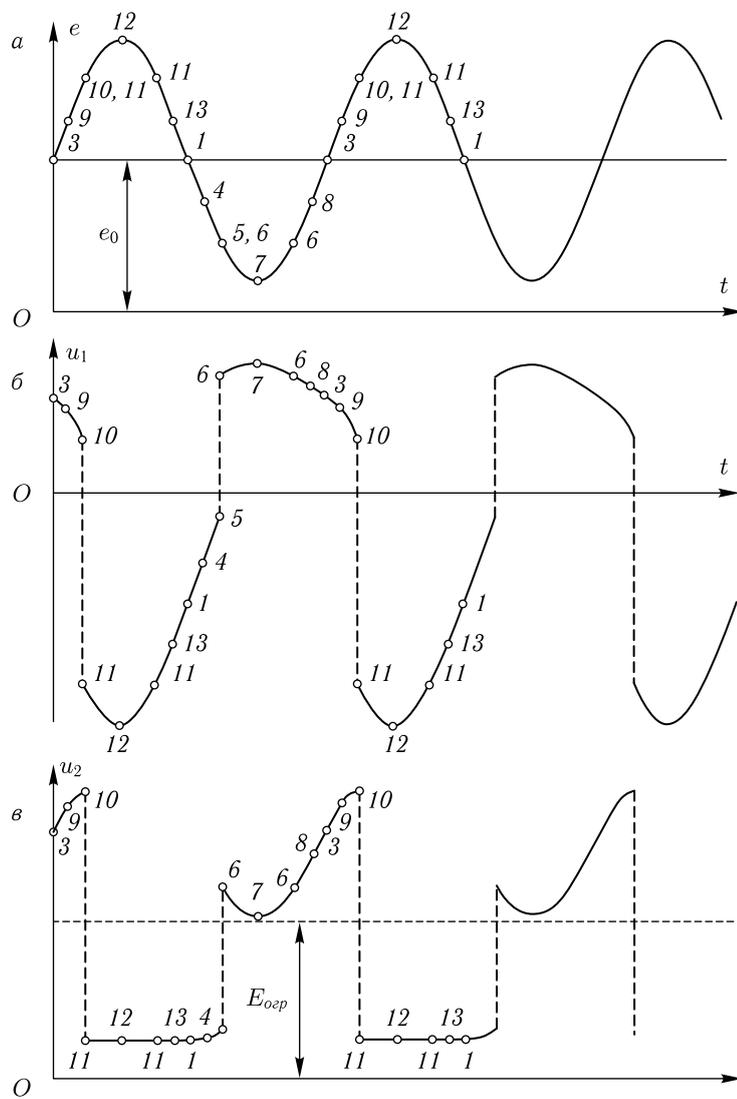


Рис. 4.7

Выясним влияние тока  $i_1$  на работу электронного реле. При наличии этого тока  $i_2 = \Delta i_2 = i_1 + C_{\Pi} \frac{du_1}{dt}$  и вместо равенства (4.5) получим:

$$u_2 = u_{2y} - \Delta i_2 r_{2cp} = u_{2y} - i_1 r_{2cp} - r_{2cp} C_{\Pi} \frac{du_1}{dt} = u_{2y}^* - r_{2cp} C_{\Pi} \frac{du_1}{dt},$$

где

$$u_{2y}^* = u_{2y} - i_1 r_{2cp}. \quad (4.8)$$

Теперь вместо ур-ния (4.7) получим:

$$u_{2y}^* - u_2 = \tau_{П} \frac{du_1}{dt}. \quad (4.9)$$

Поэтому при наличии тока  $i_1$  все приведенные выше рассуждения останутся справедливыми, только надо вместо кривой  $u_{2y}$  от  $u_1$  брать кривую  $u_{2y}^*$  от  $u_1$ .

Напряжение  $u_{2y}^*$  является напряжением на выходе усилителя в установившемся режиме при токе на выходе  $i_2$ , равном току на входе  $i_1$ .

Величина  $u_{2y}^*$  может быть легко найдена из  $u_{2y}$  с помощью равенства (4.8), если известна зависимость тока  $i_1$  от  $u_1$ . При малых  $u_1$ , когда обычно  $i_1 = 0$ , величина  $u_{2y}^*$  совпадает с  $u_{2y}$ . При больших  $u_1$ , когда появляется  $i_1$ , кривая  $u_{2y}^*$  идет ниже  $u_{2y}$  (рис. 4.8).

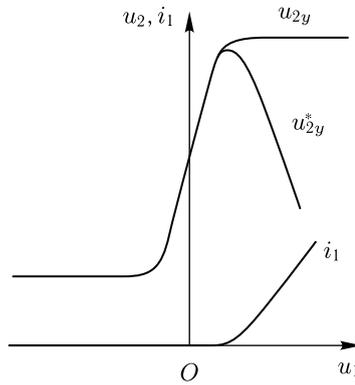


Рис. 4.8

Величину  $u_{2y}^*$  можно найти экспериментально, разорвав цепь обратной связи, медленно меняя  $u_1$  и каждый раз подбирая нагрузку на выходных зажимах усилителя, так чтобы  $i_2 = i_1$ .

На электронное реле можно воздействовать не только с помощью включенной в цепь обратной связи эдс  $e$ . Напряжение, управляющее электронным реле, можно также подавать на какую-либо цепь внутри усилителя и этим менять зависимость  $u_{2y}^*$  от  $u_1$ . Например, как было показано в § 2.7, в двухламповом усилителе с катодной связью (рис. 2.37) можно путем изменения напряжения  $e_2$  на сетке второй лампы смещать зависимость  $u_2$  от  $u_1$ , или — в обозначениях этой главы — зависимость  $u_{2y}^*$  от  $u_1$  (рис. 2.38). При этом прямая обратной связи остается на месте, а кривая  $u_{2y}^*$  смещается. Рисунок 4.9 иллюстрирует этот случай.

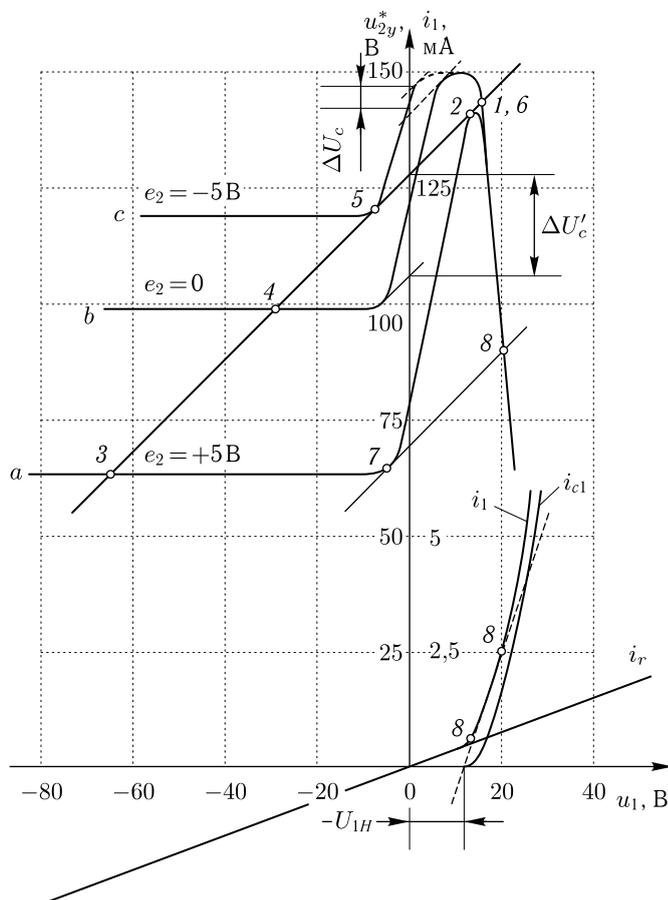


Рис. 4.9

Пусть вначале напряжение  $e_2$ , воздействующее на усилитель, равно нулю и ему соответствует кривая  $b$  на рис. 4.9. Пусть при этом рабочая точка занимает положение 1. Предположим, что при увеличении  $e_2$  кривая  $u_{2y}^*$  займет положение  $a$ . Рабочая точка займет тогда положение 2, которое будет неустойчивым, и рабочая точка поэтому скачком перейдет в положение 3. Если теперь  $e_2$  примет первоначальное значение, равное нулю (кривая  $b$ ), то рабочая точка перейдет в положение 4. Для обратного переброса рабочей точки надо уменьшить  $e_2$  так, чтобы кривая  $u_{2y}^*$  перешла в положение  $c$ . Тогда рабочая точка перейдет в положение 5 и затем скачком в положение 1, где и останется при возвращении  $e_2$  к первоначальному значению.

Аналогичные процессы могут быть получены при включении эдс в другие цепи усилителя электронного реле.

### § 4.3. Процесс скачка в электронном реле с усилителем

Рассмотрим более подробно процесс скачка при перебросе электронного реле из неустойчивого состояния в устойчивое. Этот процесс описывается дифференциальным уравнением (4.9), которое можно решить методом разделения переменных, если принять, что эдс  $e$ , входящая в выражение для  $u_2$  [ф-ла (4.2)], за время скачка постоянна. Действительно, из этого уравнения следует:

$$\frac{dt}{\tau_{\Pi}} = \frac{du_1}{u_{2y}^* - u_2}. \quad (4.10)$$

Величина  $u_{2y}^* - u_2$  при  $e = \text{const}$  определяется целиком величиной  $u_1$ . Она может быть найдена, например, графически, как разность ординат кривой  $u_{2y}^*$  и прямой обратной связи.

Интегрируя обе части равенства (4.10), получим:

$$\frac{t}{\tau_{\Pi}} = \int_{U_{10}}^{u_1} \frac{du_1}{u_{2y}^* - u_2},$$

где  $U_{10}$  — начальное значение напряжения на входе в момент  $t = 0$ ,  $u_1$  — значение напряжения на входе в момент  $t$ .

Этот интеграл можно взять, в зависимости от способа задания функции  $u_{2y}^*$ , либо аналитически, либо численным интегрированием.

Рассмотрим процесс скачка приближенно.

Как видно из рис. 4.10, в начальный момент скачка, когда точка  $(u_1, u_2)$  отходит, например, от положения  $A$  вправо, разность  $u_{2y}^* - u_2$  мала. При этом мала и скорость изменения  $u_1$ , равная  $\frac{du_1}{dt}$  [ф-ла (4.9)]. Затем, по мере роста  $u_1$  разность  $u_{2y}^* - u_2$  и скорость увеличиваются, пока разность не достигнет максимального значения  $CC'$ , после чего начнет уменьшаться, пока точка  $(u_1, u_2)$  не дойдет до положения  $B$ , где разность  $u_{2y}^* - u_2$  станет равной нулю и процесс скачка прекратится.

Построенная в соответствии с этим рассуждением временная диаграмма напряжения  $u_1$  изображена на рис. 4.11.

Для оценки скорости скачка введем понятие «*времени нарастания по касательной*». Под этим временем мы подразумеваем время  $\vartheta_n$  (рис. 4.11), которое потребовалось бы для нарастания  $u_1$  с постоянной максимальной скоростью, соответствующей отрезку  $CC'$ .

Из рис. 4.10 и 4.11 и ф-лы (4.9) следует, что

$$\left(\frac{du_1}{dt}\right)_{\text{макс}} = \frac{AB'}{\vartheta_n} = \frac{(u_{2y}^* - u_2)_{\text{макс}}}{\tau_{\Pi}} = \frac{CC'}{\tau_{\Pi}},$$

где  $AB' = BB'$  — разность между начальным и конечным значением  $u_1$  (или, что то же,  $u_2$ ) при скачке.

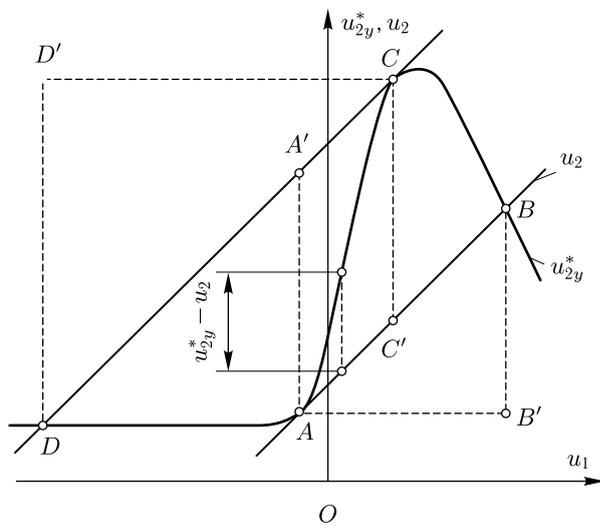


Рис. 4.10

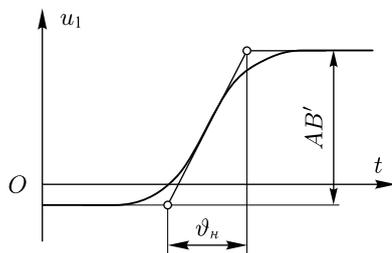


Рис. 4.11

Отсюда

$$\vartheta_n = \frac{BB'}{CC'} \tau_{П}. \tag{4.11}$$

Поскольку обычно отношение  $\frac{BB'}{CC'}$  порядка единицы,  $\vartheta_n$  имеет тот же порядок, что и  $\tau_{П}$ .

При обратном скачке из точки  $C$  в точку  $D$  процесс также вначале идет медленно, потом быстро, а затем снова медленно. «*Время спада- ния  $u_1$  по касательной*» определяется аналогично времени нарастания:

$$\vartheta_c = \frac{DD'}{AA'} \tau_{П} \tag{4.12}$$

и имеет тот же порядок, что и  $\tau_{П}$ .

Если ориентировочно положить  $r_{2cp} = 3$  кОм;  $C_{П} = 30$  пФ, то  $\tau_{П} = = r_{2cp} C_{П} = 3 \cdot 10^3 \cdot 30 \cdot 10^{-12} = 9 \cdot 10^{-8}$  с = 0,09 мкс. Такого же порядка будут величины  $\vartheta_n$  и  $\vartheta_c$ .

Учтем влияние, оказываемое на скачок паразитной емкостью на выходе усилителя, а также внутренними емкостями усилителя.

При наличии паразитной емкости на выходе получим:

$$i_2 = C_{П_{вых}} \frac{du_2}{dt} + C_{П_{вх}} \frac{du_1}{dt} + i_1, \quad (4.13)$$

где  $C_{П_{вых}}$  — паразитная емкость на выходе усилителя,  $C_{П_{вх}}$  — паразитная емкость на входе усилителя.

Если принять, что эдс  $e$  за время скачка меняется незначительно, то из ур-ния (4.2) получим:

$$\frac{du_2}{dt} = \frac{du_1}{dt}.$$

В этом случае ур-ние (4.13) можно записать так:

$$i_2 = (C_{П_{вых}} + C_{П_{вх}}) \frac{du_1}{dt} + i_1.$$

Из полученного выражения следует, что все сказанное выше справедливо и в рассматриваемом случае, если положить

$$C_{П} = C_{П_{вых}} + C_{П_{вх}}, \quad (4.14)$$

т. е. включить в величину  $C_{П}$  как входную, так и выходную емкости усилителя.

При использовании многоступенных усилителей на процесс скачка влияют также паразитные емкости, находящиеся внутри усилителя. В этом случае при скачке фактическое напряжение на выходе усилителя  $u_2 = u_1 + e$  будет так же, как и в ранее рассмотренном случае, не равно напряжению  $u_{2y}^*$ , которое было бы на выходе в установившемся режиме при данном  $u_1$ . Разность между  $u_{2y}^*$  и  $u_2$  обуславливается тем, что паразитные емкости не успевают сразу получить заряд, соответствующий установившемуся режиму, и  $u_2$ , стремясь к значению  $u_{2y}^*$ , принимает его с некоторым запозданием. При этом ур-ние (4.9) не будет точным, однако качественная картина, полученная выше, сохранится. Действительно, при  $u_{2y}^* > u_2$  напряжение  $u_2$ , стремясь к установившемуся значению  $u_{2y}^*$ , растет и увеличивает с помощью обратной связи  $u_1$ . Таким образом, имеем  $\frac{du_1}{dt} > 0$ . При  $u_{2y}^* < u_2$  напряжение  $u_2$ , стремясь к  $u_{2y}^*$ , уменьшается, уменьшая  $u_1$ , поэтому имеем  $\frac{du_1}{dt} < 0$ . Наконец, при  $u_{2y}^* = u_2$ , величины  $u_2$  и  $u_1$  не меняются. Сказанное справедливо, если  $u_2$ , стремясь к  $u_{2y}^*$ , всегда меняется монотонно (не колебательно) при монотонно изменяющемся  $u_1$ , что обычно имеет место в усилителях, используемых в электронных реле.

В случае, когда  $u_2$  устанавливается колебательно (см. например, рис. 4.12, который соответствует разорванной обратной связи и изменению  $u_1$  от внешнего источника), высказанные соображения будут несправедливыми. Действительно, в этом случае  $u_2$ , достигнув  $u_{2y}^*$ ,

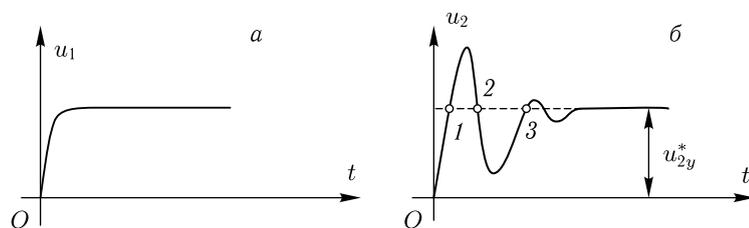


Рис. 4.12.

будет продолжать меняться дальше (например, в точках 1, 2 или 3), что может привести к появлению в схеме колебаний.

Наличие паразитных емкостей внутри усилителя увеличивает время переброса электронного реле. Ориентировочно можно это время рассчитать по ф-лам (4.11) и (4.12), взяв в качестве  $\tau_{\Pi}$  суммарную постоянную времени отдельных ступеней усилителя.

### § 4.4. Некоторые схемы электронных реле

Электронное реле может быть получено из любого усилителя постоянного напряжения, если он имеет в некоторой области значений  $u_1$  коэффициент усиления  $K > +1$ .

Для того, чтобы избежать применения эдс в цепи обратной связи, управление электронным реле часто осуществляют, вводя управляющую эдс в какую-либо цепь усилителя.

В качестве примера такого управления рассмотрим схему так называемого *симметричного* электронного реле (рис. 4.13). Это электронное реле имеет усилитель, отличающийся от усилителя рис. 2.29 тем, что вместо эдс  $E_c$  используется такое же по величине падение напряжения на сопротивлении  $r_k$ . При отпирании одной из ламп другая запирается и падение напряжения на  $r_k$  остается примерно постоянным.

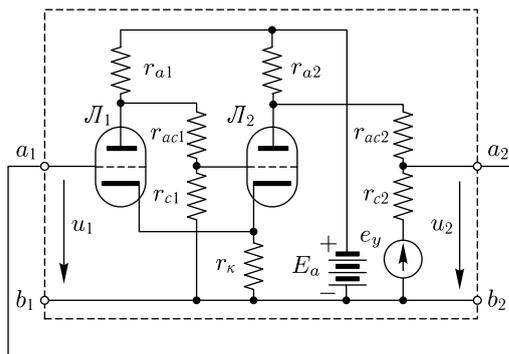


Рис. 4.13

Управление кривой  $u_{2y}^*$  осуществляет эдс  $e_y$ , которая при положительном знаке увеличивает  $u_{2y}^*$ , а при отрицательном уменьшает. Семейство кривых  $u_{2y}^*$  дано на рис. 4.14. Параметры усилителя обычно выбираются так, чтобы при  $e_y = 0$  прямая обратной связи пересекала кривую в трех точках.

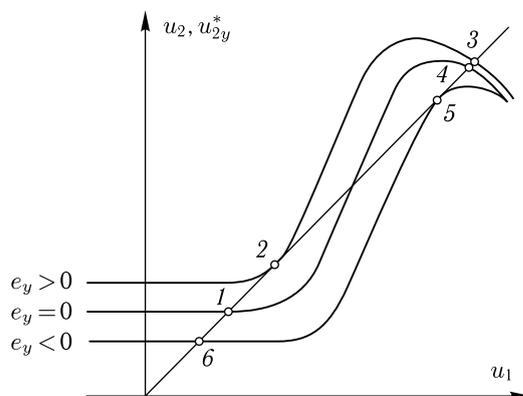


Рис. 4.14.

На левых горизонтальных участках напряжение  $u_1$  настолько мало, что лампа  $\mathcal{L}_1$  заперта за счет падения напряжения на сопротивлении  $r_k$ . Напряжение на ее аноде большое, и лампа  $\mathcal{L}_2$  открыта. Падение напряжения на сопротивлении  $r_{a2}$  за счет анодного тока лампы  $\mathcal{L}_2$  снижает напряжение на аноде этой лампы и напряжение на выходе  $u_{2y}^*$ . При увеличении напряжения  $u_1$  лампа  $\mathcal{L}_1$  начинает отпираться, ее анодный ток увеличивает падение напряжения на  $r_{a1}$ , лампа  $\mathcal{L}_2$  начинает запирается, а ее анодное напряжение и  $u_{2y}^*$  расти. Наконец, при некотором  $u_1$  лампа  $\mathcal{L}_2$  полностью запирается. Дальнейшее увеличение  $u_1$  не будет увеличивать  $u_{2y}^*$ . При напряжении  $u_1$  больше, чем падение напряжения на  $r_k$ , появится сеточный ток  $i_1$ . Этот ток приводит к тому, что кривые  $u_{2y}^*$  при дальнейшем увеличении напряжения  $u_1$  загибаются вниз.

Пусть вначале рабочая точка занимает положение 1, т. е. лампа  $\mathcal{L}_1$  заперта, а лампа  $\mathcal{L}_2$  открыта. Это положение устойчиво. При подаче положительной эдс  $e_y$  напряжение  $u_1 = u_2$  увеличивается. Когда рабочая точка займет положение 2, произойдет скачок в устойчивое положение 3. Обратный перебор происходит при отрицательном  $e_y$ , опускающем кривую  $u_{2y}^*$  до положения 5–6.

Рассмотрим еще своеобразное электронное реле, применяемое в *схемах счета импульсов* и изображенное на рис. 4.15. Оно отличается от симметричного электронного реле (рис. 4.13) тем, что сопротивления  $r_{ac1}$  и  $r_{ac2}$  в нем зашунтированы конденсаторами и управляющий импульс воздействует сразу на оба анода.

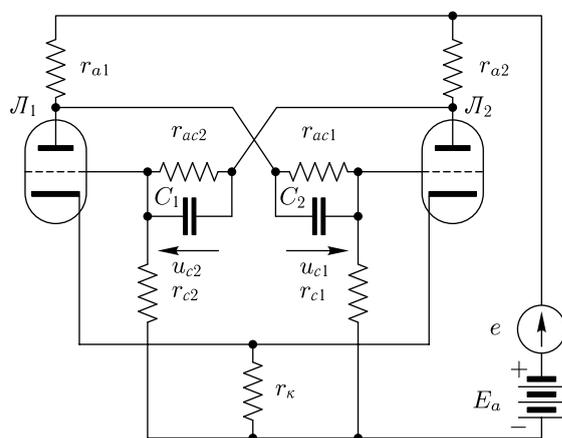


Рис. 4.15

Положения равновесия в этой схеме будут теми же, что и в схеме рис. 4.13, поскольку при постоянных напряжениях ток через конденсаторы  $C_1$  и  $C_2$  не течет. В одном положении равновесия лампа  $L_1$  открыта, а лампа  $L_2$  заперта. В другом положении равновесия, наоборот, открыта лампа  $L_2$  и заперта лампа  $L_1$ .

Пусть вначале лампа  $L_1$  открыта, а лампа  $L_2$  заперта. В этом случае напряжение на аноде лампы  $L_1$  меньше, чем напряженке на аноде лампы  $L_2$ . В соответствии с этим

$$u_{C1} < u_{C2},$$

где  $u_{C1}$  — падение напряжения на  $r_{ac1}$  и  $u_{C2}$  — падение напряжения на  $r_{ac2}$  и  $C_2$ .

Если теперь эдс  $e$  создаст отрицательный импульс на анодах ламп, при котором обе лампы закроются, причем импульс будет настолько коротким, что за время его действия напряжения  $u_{C1}$  и  $u_{C2}$  не успеют существенно измениться, то при исчезновении импульса первой откроется лампа  $L_2$ . Это произойдет потому, что пока лампы заперты, напряжения на их анодах растут одинаково и напряжение на сетке лампы  $L_2$  больше, чем напряжение на сетке лампы  $L_1$ , поскольку  $u_{C1} < u_{C2}$ . Открываясь, лампа  $L_2$  запирает лампу  $L_1$ . Таким образом, после импульса окажется открытой лампа  $L_2$  и запертой  $L_1$ . В этом положении через некоторое время напряжения на конденсаторах примут значения  $u_{C1} > u_{C2}$ . Если теперь снова подать на аноды ламп отрицательный импульс, то после его прекращения окажется открытой лампа  $L_1$  и закрытой лампа  $L_2$ .

На рис. 4.16 изображены импульсы эдс  $e$ , напряжение  $u_{a1}$  на аноде лампы  $L_1$  и импульсы напряжения  $e'$  после дифференцирующей ячейки, на которую подано напряжение  $u_{a1}$  (на рис. 4.15 эта ячейка не изображена). Как видно из этого рисунка, отрицательный импульс

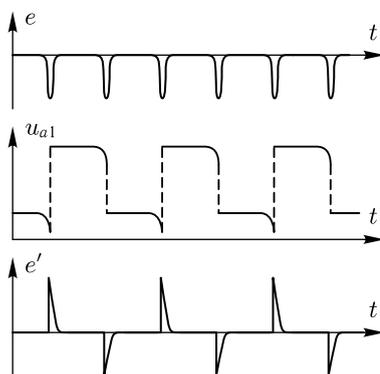


Рис. 4.16

напряжения  $e'$  появляется после двух импульсов эдс  $e$ . Подавая импульсы  $e'$  на схему, аналогичную схеме рис. 4.15, мы получим на ее выходе отрицательный импульс после двух отрицательных импульсов  $e'$  или после четырех отрицательных импульсов  $e$ . Подавая импульсы с этой схемы на следующую аналогичную, мы получим с нее один отрицательный импульс на восемь первоначальных и т. д.

Для подсчета числа импульсов эдс  $e$  используется несколько схем делителей, включенных одна за другой. Деление происходит до тех пор, пока частота импульсов не снизится настолько, что окажется возможным на выходе последнего делителя включить механический счетчик. Зная изменение показаний счетчика за время отсчета, коэффициент деления схемы и состояние каждой лампы в начале и конце времени отсчета, можно определить число импульсов эдс  $e$ , подававшихся на вход первого делителя за это время.

Для определения состояния каждой из ламп счетчика они шунтируются газоразрядными лампочками, которые загораются при закрывании лампы и гаснут при отпирании (на схеме рис. 4.15 не показаны).