

image not found or type unknown

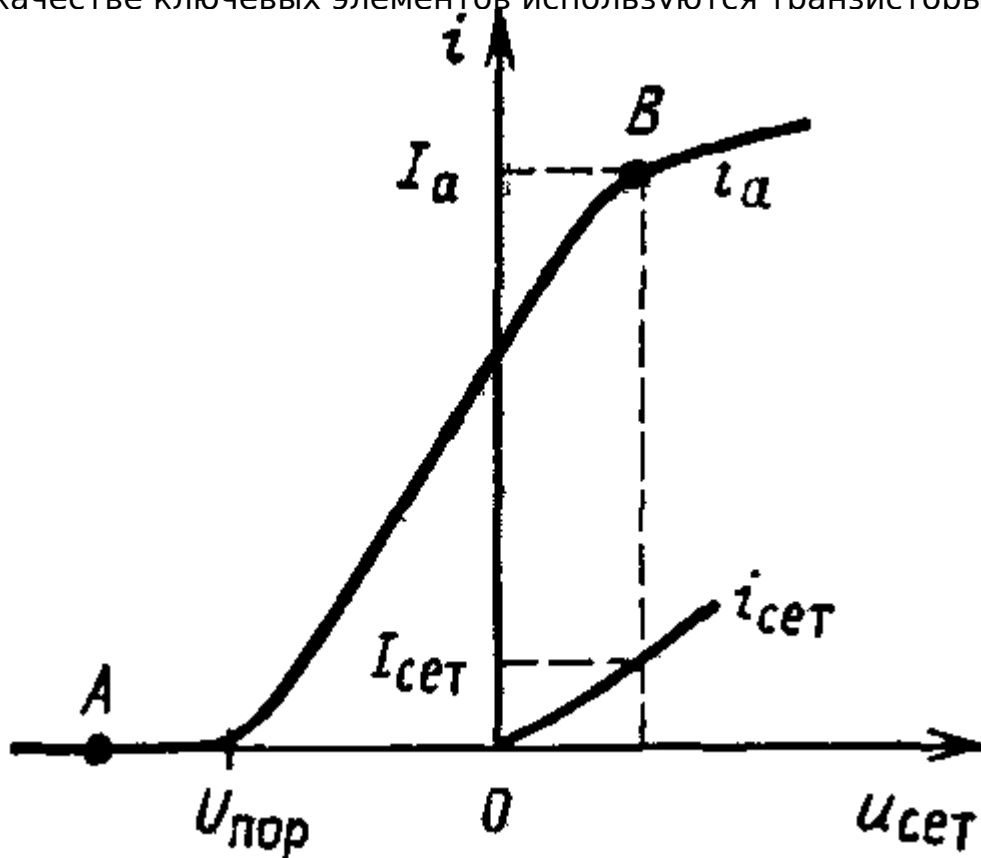


При работе в импульсных схемах электронные приборы (лампы, транзисторы, тиристоры и др.) имеют два рабочих состояния. В одном из них электронный прибор закрыт, ток через него практически не проходит и его внутреннее сопротивление R_i велико; в другом состоянии прибор открыт, ток в выходной цепи имеет заданное значение, а внутреннее сопротивление мало. Переход из одного состояния в другое сопровождается переходным процессом, время которого определяет длительность фронта и среза импульса. Такой режим работы электронного прибора называется ключевым.

1. КЛЮЧЕВОЙ РЕЖИМ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОННОЙ ЛАМПЫ

Когда коммутируемая импульсная мощность не превышает десятков ватт, в качестве ключевых элементов используются транзисторы.

ие импульсные



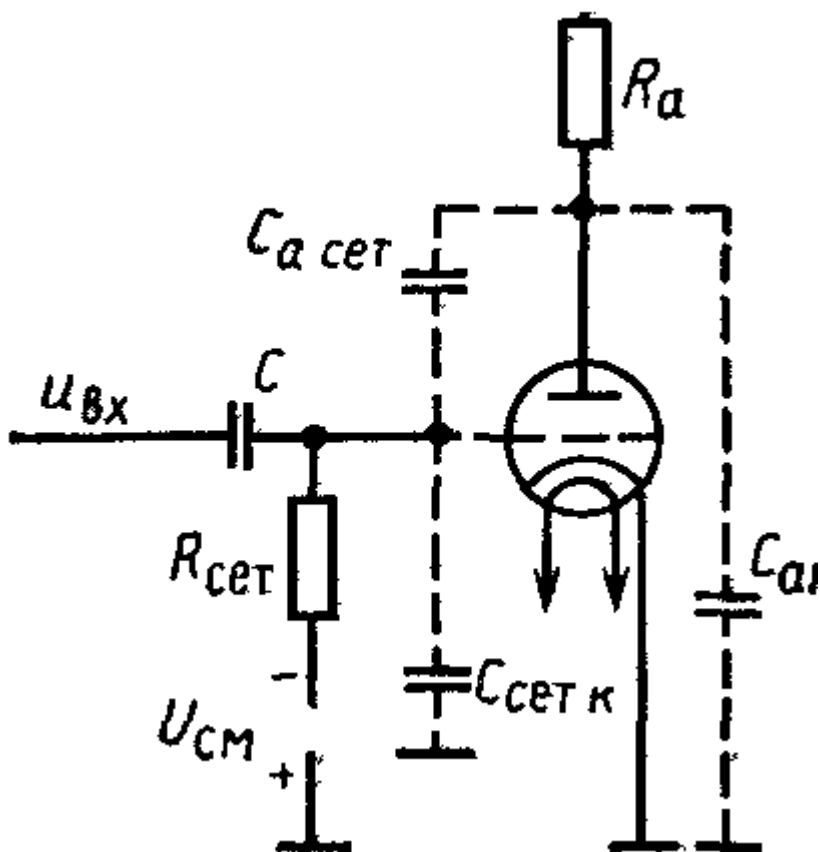


Рис. 7.1. Анодно-сеточная и сеточная характеристики лампы.

Рис. 7.2. Схема ключа на электронной лампе.

электронной лампы соответствуют определенные положения рабочей точки на анодно-сеточной характеристике (рис. 7.1). Лампа закрыта (*режим отсечки*), когда напряжение на сетке $u_{\text{сет}}$ меньше порогового $U_{\text{пор}}$ и рабочая точка (точка А) находится на горизонтальном участке характеристики. Анодный и сеточный токи лампы при этом практически равны нулю. Когда $u_{\text{сет}} > U_{\text{пор}}$, лампа открыта. В анодной цепи протекает ток I_a , а если при этом напряжение на сетке положительное, то имеет место сеточный ток $I_{\text{сет}}$ (точка В). Участок характеристики между этими двумя точками нельзя аппроксимировать отрезком прямой линии.

Таким образом, электронная лампа в ключевом режиме ведет себя как существенно *нелинейный элемент*. Естественно, что при анализе импульсных схем необходимо учитывать эту нелинейность.

Чтобы, с одной стороны, учесть нелинейность электронных приборов, а с другой — не усложнять расчет, используют искусственный прием расчета импульсных схем. Сущность его состоит в том, что рассматривают процессы в схеме для двух состоя-

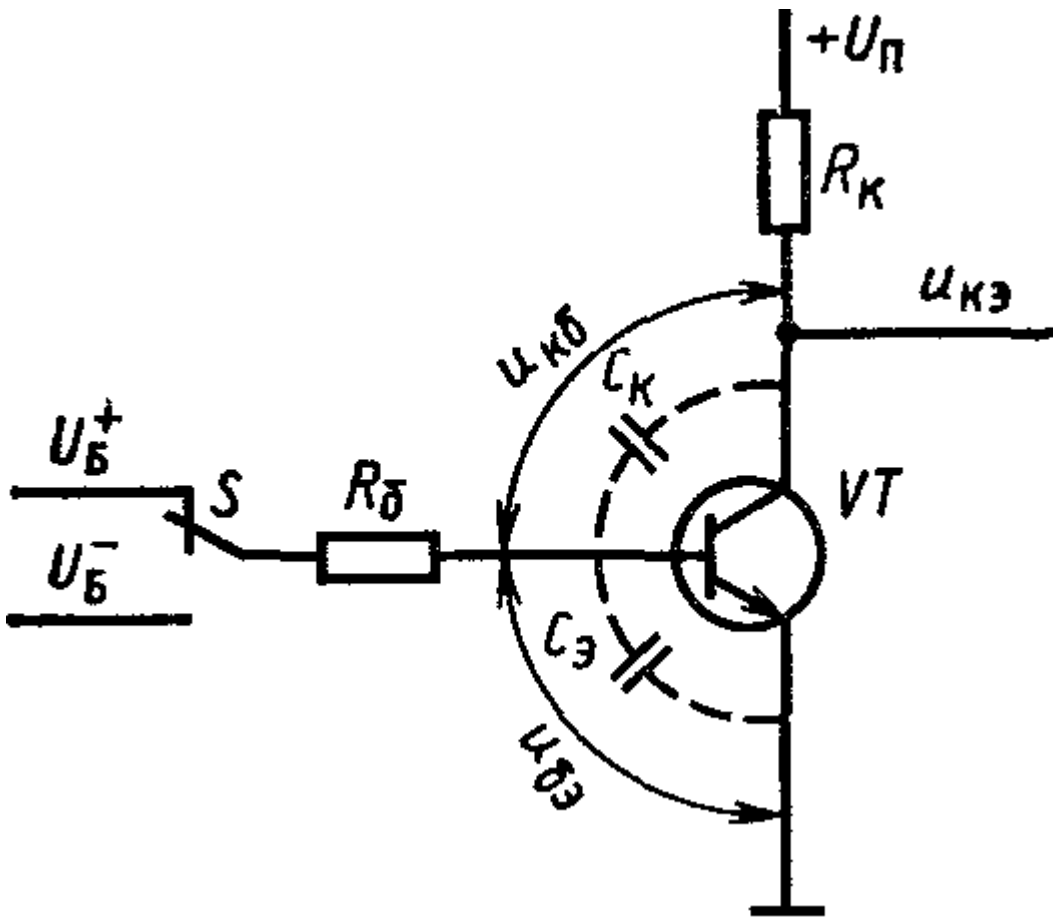
ний электронного прибора: открытого и закрытого, который представляется соответствующими эквивалентными параметрами. Вид анодно-сеточной характеристики электронной лампы (ее нелинейность) не имеет существенного значения, поскольку закон изменения напряжения или тока при формировании фронта и среза импульса не является главным. Определяющей является длительность переходного процесса, которая должна быть минимальной.

В режиме отсечки участки схемы, к которым подключены сетка и анод лампы (рис. 7.2), представляются разомкнутыми. В открытом состоянии анодная цепь заменяется эквивалентным резистором, сеточная цепь также представляется эквивалентным резистором.

Длительность перехода лампы из открытого состояния в закрытое и обратного перехода определяется временем изменения напряжения на электродах, которое в основном зависит от постоянной времени цепей перезарядки межэлектродных емкостей. Инерционность электронного потока лампы при анализе переходного процесса обычно не учитывают, так как время пролета электронами между электродного пространства составляет доли наносекунды. Поскольку длительность фронта и среза импульсов, генерируемых схемами с модуляторными лампами, гораздо больше этого времени, такое допущение правомерно.

2. СТАТИЧЕСКИЕ РЕЖИМЫ РАБОТЫ ТРАНЗИСТОРНОГО КЛЮЧА

Рис. 7.3. Схема транзисторного ключа с общим эмиттером



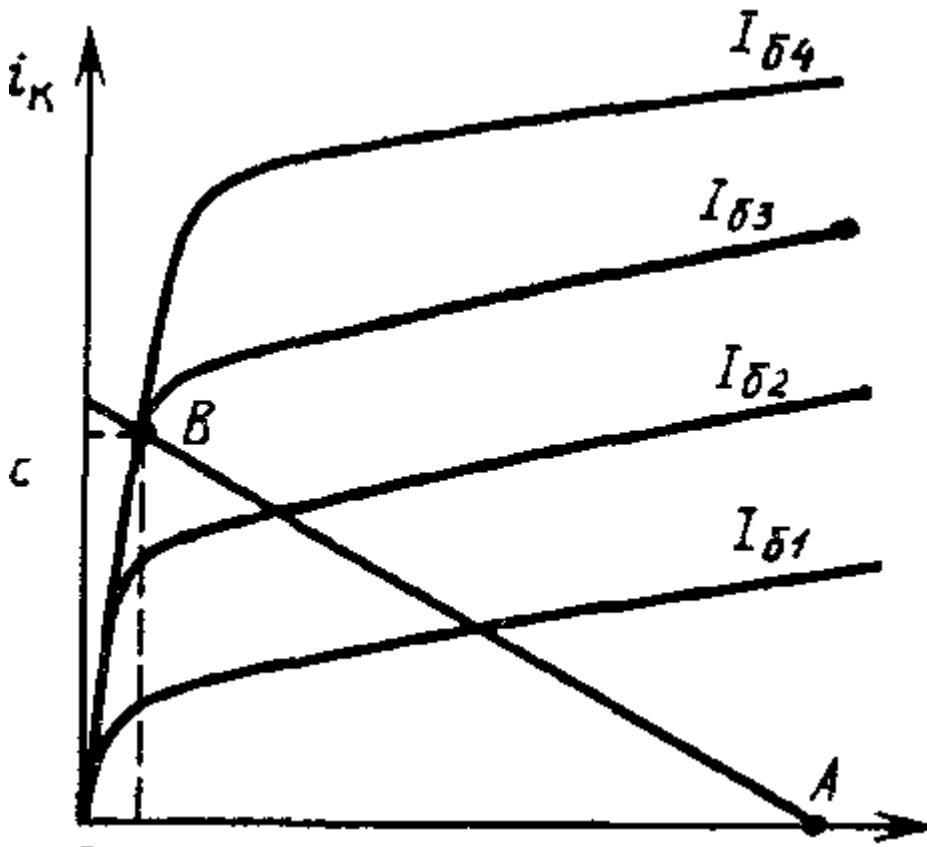
В силу ряда неоспоримых преимуществ (отсутствие накала, малые габариты, малая потребляемая мощность, высокая надежность) транзисторы полностью заменили электронные лампы в маломощных импульсных схемах. Более того, использование транзисторов позволило создать такие схемы, реализация которых с помощью ламп принципиально невозможна. В импульсных схемах используются германиевые и кремниевые, биполярные и полевые транзисторы. В дальнейшем будем рассматривать схемы на кремниевых транзисторах $n-p-n$ -типа, поскольку они наиболее широко применяются.

В большинстве случаев используют *транзисторный ключ с общим эмиттером (ОЭ)*, в котором нагрузочный резистор включен в коллекторную цепь (рис. 7.3). (Если в схеме используется

не $n-p-n$, а $p-n-p$ -транзистор, то на коллектор подается отрицательное напряжение.) Напряжения и токи, соответствующие закрытому и открытому состояниям транзистора, могут быть определены с помощью входных и выходных статических характеристик транзистора, включенного по схеме ОЭ (рис. 7.4).

Режим отсечки. Закрытому состоянию транзистора соответствует *режим отсечки*, при котором на коллекторном и эмиттерном переходах действуют обратные напряжения. Через переходы проходят токи, обусловленные процессами тепловой генерации носителей заряда в объеме полупроводника. При включении

транзистора по схеме ОЭ в режиме отсечки в коллекторной цепи протекает ток, близкий обратному току коллекторного перехода. Этот ток закрытого кремниевого транзистора ничтожно мал (менее 1 нА), поэтому его обычно в расчетах не учитывают и



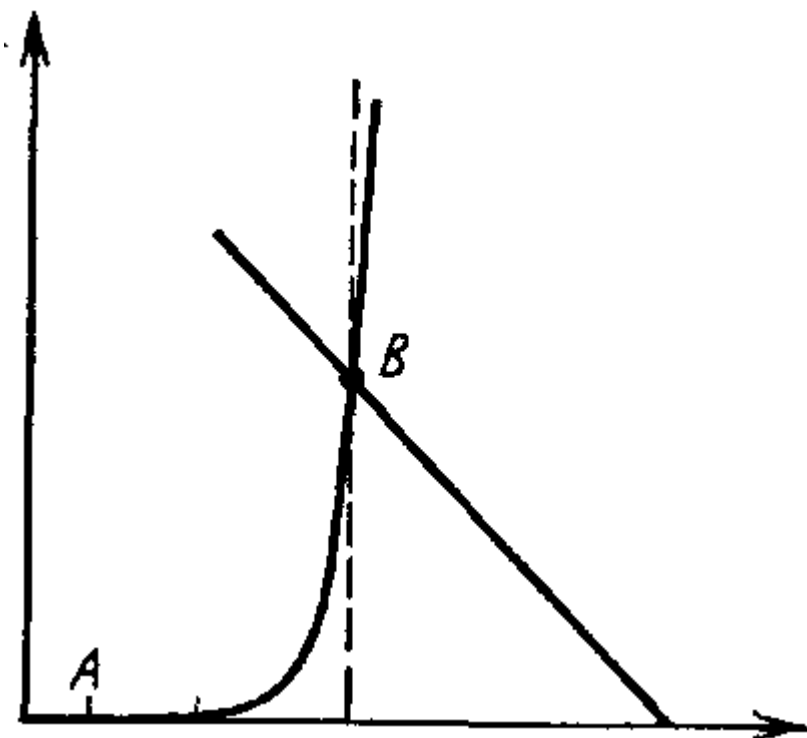


Рис. 7.4. Входная (а) и выходная (в) характеристики транзисторного ключа ОЭ

входное и выходное сопротивления закрытого кремниевого транзистора, определяемые сопротивлениями обратносмещенных коллекторного и эмиттерного переходов, при расчетах принимают бесконечно большими.

Ток коллекторного перехода закрытого германиевого транзистора на несколько порядков больше, чем ток кремниевого. Поэтому при анализе импульсных схем с германиевыми транзисторами его учитывают и транзистор в режиме отсечки представляют источником тока, действующим в цепи коллектор — база.

Прямые ветви входных статических характеристик в первом приближении представляются экспоненциальной зависимостью тока базы от напряжения база — эмиттер. Следовательно, сколь угодно малое увеличение напряжения $u_{бэ}$ приводит к росту $I_б$. Однако ток базы становится заметным лишь при определенном значении $u_{бэ} = U_{отп}$. Поэтому при расчетах импульсных схем удобно пользоваться напряжением отпирания (открывания) $U_{отп}$.

Режиму отсечки соответствует точка А на статических характеристиках транзистора.

Режим насыщения. Транзистор открывается, когда на вход подается положительное напряжение, и при условии $u_{бэ} > U_{отп}$. коллекторный и базовый токи увеличиваются. По мере нарастания тока базы растет коллекторный ток и

уменьшается коллекторное напряжение $u_{кэ}$ за счет падения напряжения на резисторе а также уменьшается обратное напряжение, приложенное к коллекторному переходу.

Пока при увеличении тока на коллекторном переходе имеется обратное напряжение, транзистор находится в активном режиме и имеет место следующее соотношение между токами:

$$I_{к} = h_{21э} I_{б} + I_{кэо} \simeq h_{21э} I_{б}.$$

При некотором значении базового тока напряжение на коллекторном переходе становится равным нулю и дальнейшее увеличение тока $I_{б}$, а следовательно, и тока $I_{к}$ приводит к появлению прямого напряжения на коллекторном переходе, т. е. потенциал базы относительно коллектора становится положительным. В прямом направлении оказывается включенным не только эмиттерный, но и коллекторный переход. Это приводит к тому, что не все носители, инжектированные эмиттером и дошедшие до коллекторного перехода, перехватываются им. Навстречу потоку неосновных носителей, идущих из базы в коллектор, движется поток таких же носителей из коллектора в базу, и суммарный их ток определяется разностью этих потоков. В результате коллекторный ток при дальнейшем увеличении тока базы перестает расти. Транзистор переходит в *режим насыщения*, который характеризуется постоянством тока коллектора В связи с тем что в режиме насыщения коллекторный переход не осуществляет полной экстракции носителей из базы, там происходит их накопление и интенсивная рекомбинация и пропорциональная зависимость между токами $I_{б}$ и $I_{к}$ не выполняется.

Напряжения на коллекторе и базе насыщенного транзистора остаются практически постоянными.

Токи, протекающие во внешней цепи транзистора в насыщении, определяются следующими соотношениями:

$$I_{Б \text{ нас}} = (U_{Б}^{+} - U_{БЭ \text{ нас}}) / R_{б},$$
$$I_{К \text{ нас}} = (U_{п} - U_{КЭ \text{ нас}}) / R_{к} \simeq U_{п} / R_{к},$$

где U_B^+ , U_{Π} - напряжения источников питания базы и коллектора.

Как видно, токи транзисторного ключа в режиме насыщения определяются внешними параметрами схемы и практически не зависят от характеристик транзистора. Режиму насыщения соответствует точка B на статических характеристиках.

Режим насыщения кремниевого транзистора определяется условием $u_{кб} = -U_{отп}$. При заданных коллекторном и базовом токах удобным для расчетов является критерий насыщенного состояния по току. Его можно установить, рассуждая так. Пропорциональная зависимость между токами $I_{\text{б}}$ и $I_{\text{к}}$, справедливая для активного режима, сохраняется вплоть до отпирания коллекторного перехода.

Следовательно, на границе активного режима и режима насыщения также имеет

место соотношение $I_{\text{к нас}} = h_{21э} I_{\text{б}}$ где $I_{\text{б гр}}$ - базовый ток, при котором транзистор входит в режим насыщения. Как было отмечено, дальнейшее увеличение базового тока не приводит к росту коллекторного тока. Таким образом, критерий насыщенного состояния транзистора можно записать в виде

$$I_{\text{Б нас}} > I_{\text{Б гр}} = I_{\text{К нас}} / h_{21э}. \quad (7.1)$$

Если в соотношение (7.1) подставить выражения для токов получим:

$$(U_B^+ - U_{\text{БЭ нас}}) / R_{\text{б}} > (U_{\text{п}} - U_{\text{КЭ нас}}) / (h_{21э} R_{\text{к}}).$$

В реальных условиях работы транзисторного ключа напряжения источников питания могут изменяться, имеет место также разброс сопротивлений резисторов и коэффициента передачи тока $h_{21э}$. Это может привести к невыполнению неравенства (7.1), выходу транзистора из режима насыщения и соответственно к изменению коллекторного тока и выходного напряжения. Для обеспечения устойчивого режима работы транзисторного ключа параметры его рассчитывают таким образом, чтобы неравенство (7.1) выполнялось при изменениях в некоторых пределах входящих в него величин.

Помехоустойчивость транзисторного ключа тем больше, чем выше коэффициент насыщения:

$$K_{\text{нас}} = I_{\text{Б нас}} / I_{\text{Б гр}} = h_{21э} I_{\text{Б нас}} / I_{\text{К нас}}$$

Хотя для повышения помехоустойчивости желательно увеличивать коэффициент насыщения, однако следует помнить, что при этом растет время переключения транзисторного ключа.

3. ВКЛЮЧЕНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО КЛЮЧА

Транзистор переходит из режима отсечки в режим насыщения и обратно не мгновенно, а в течение определенного времени. Эта инерционность биполярного транзистора обусловлена двумя основными факторами: накоплением заряда неосновных носителей в базе и емкостями коллекторного $C_{\text{к}}$ и эмиттерного $C_{\text{э}}$ переходов. Кроме того, на длительность переходных процессов транзисторного ключа оказывает влияние емкость нагрузки $C_{\text{н}}$.

Расчет длительности переходных процессов в транзисторном ключе проводится методом заряда, базирующимся на том факте, что в базе объемный заряд неосновных носителей скомпенсирован, т. е. база электрически нейтральна.

Метод заряда. Так как в базе (р-область) неосновными носителями являются электроны, то при $u_{\text{бэ}} > U_{\text{отп}}$ ток базы $i_{\text{б}}(t)$ определяет скорость накопления электронов dq/dt в ней (q — заряд неосновных носителей) и компенсирует их убывание q/t в результате рекомбинации (t — время жизни неосновных носителей в базе). Кроме того, ток базы идет на перезарядку емкостей $C_{\text{к}}$ и $C_{\text{э}}$ при изменении напряжения на переходах. Следовательно,

$$\frac{dq}{dt} + \frac{q}{\tau} + C_{\text{к}} \frac{du_{\text{кб}}}{dt} + C_{\text{э}} \frac{du_{\text{бэ}}}{dt} = i_{\text{б}}(t). \quad (7.2)$$

$$\left(C_{\text{к}} \frac{du_{\text{кб}}}{dt} \right)$$

Если емкостные токи коллекторного

$$\left(C_{\text{э}} \frac{du_{\text{бэ}}}{dt} \right)$$

и эмиттерного

переходов невелики, то уравнение (7.2) упрощается:

$$dq/dt + q/t = i_{\text{б}}(t) \quad (7.3)$$

В стационарном состоянии, когда $dq/dt = 0$,

$$q = \tau I_{\text{б}}, \quad (7.4)$$

т. е. избыточный заряд неосновных носителей в базе пропорционален базовому току. Это соотношение справедливо не только в активном режиме, но и в режиме насыщения транзистора.

С помощью уравнений (7.2) или (7.3) можно определить объемный заряд неосновных носителей в базе в функции времени. Однако при расчете импульсных схем на транзисторах основной интерес представляет определение закона изменения коллекторного тока.

В активном режиме работы транзистора при условии, что распределение концентрации неосновных носителей заряда в базе является линейным, имеет место соотношение, которое с известным приближением дает связь между зарядом неосновных носителей в базе и коллекторным током транзистора:

$$q(t) \simeq \tau I_{\text{к}}(t) / h_{21Э}. \quad (7.5)$$

Это соотношение в стационарном режиме справедливо с высокой точностью. Однако в переходном режиме, длительность которого соизмерима с временем распространения носителей вдоль базы, линейный характер распределения неосновных носителей в базе нарушается.

Решая уравнения (7.2) или (7.3) и используя соотношение (7.5), можно определить закон изменения коллекторного тока при заданном базовом токе. Преобразуем по Лапласу уравнение (7.3), поскольку это упрощает процедуру решения при различных начальных условиях:

$$q(p) = \frac{I_{\text{б}}(p) + q(0)}{p + 1/\tau}, \quad (7.6)$$

где $q(0)$ — начальное значение заряда неосновных носителей в базе; p — оператор Лапласа.

Задержка включения. Рассмотрим процесс включения транзисторного ключа при условии, что в момент времени $t=0$ на его входе напряжение скачком изменяется

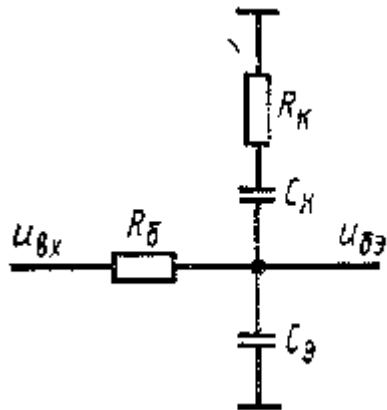
от $U_{\text{БЭ}}^+$ до $U_{\text{БЭ}}^+$ (рис. 7.5) в базовой цепи устанавливается ток

$$I_{\text{Б}}^+ = (U_{\text{Б}}^+ - U_{\text{БЭ}}^+_{\text{нас}}) / R_{\text{Б}}.$$

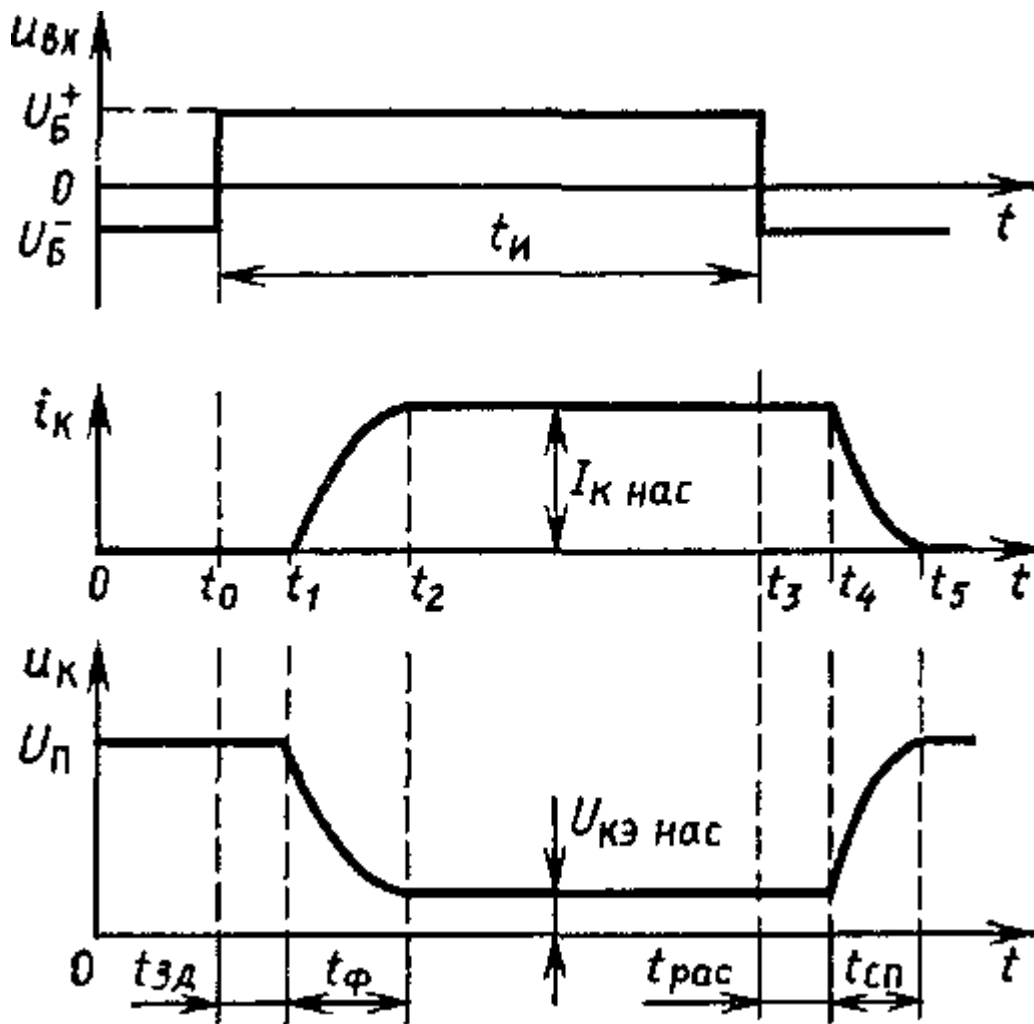
Хотя управляющее напряжение

изменяется скачком, разность потенциалов между базой и эмиттером из-за наличия прежде всего емкостей $C_{\text{Э}}$ и $C_{\text{К}}$ нарастает до значения $U_{\text{отп}}$ при котором транзистор открывается, но не сразу, а в течение определенного времени. Таким образом, импульс коллекторного тока начинается в момент времени, т. е. с некоторой задержкой относительно момента подачи отпирающего напряжения. Интервал времени $t_{\text{зд}} = t_1 - t_0$ определяет *длительность стадии задержки - время*, в течение которого происходит перезарядка емкостей $C_{\text{Э}}$ и $C_{\text{К}}$. Так как в это время через транзистор протекают емкостные токи, то эквивалентная схема транзисторного ключа

Рис. 7.5. Переходные процессы в ключе ОЭ



ключа



на этапе задержки включает внешние резисторы и емкости переходов (рис. 7.6).

В транзисторном ключе обычно $R_{б} > R_{к}$ поэтому, пренебрегая $R_{к}$ получим цепь первого порядка, переходной процесс в которой определяется соотношением

$$u_{бэ}(t) = u_{бэ}(\infty) - [u_{бэ}(\infty) - u_{бэ}(0)] e^{-t/\tau_{зд}},$$

где

$$\tau_{зд} = R_{б}(C_{к} + C_{э}); \quad u_{бэ}(\infty) = U_{б}^+; \quad u_{бэ}(0) = -U_{б}^-$$

. Когда емкость нагрузки транзисторного ключа $C_{н}$ соизмерима или больше

$$\tau_{зд} = R_{б}(C_{к} + C_{э} + C_{н}).$$

суммарной емкости переходов,

После подстановки получим

$$u_{бэ}(t) = U_б^+ - (U_б^+ + U_б^-) e^{-t/\tau_{зд}}.$$

Стадия разворота заканчивается, когда

$$u_{бэ}(t) = U_{отп} \simeq U_{БЭ} \quad \text{поэтому}$$

$$t_{зд} = \tau_{зд} \ln \frac{U_б^+ + U_б^-}{U_б^+ - U_{БЭ \text{нас}}}.$$

Формирование фронта. Когда в момент времени t_1 эмиттерный переход открывается, начинается процесс нарастания коллекторного тока, сопровождающийся снижением коллекторного напряжения. Коллекторный ток увеличивается до момента времени t_2 , когда транзистор входит в режим насыщения. В интервале времени $t_1 \dots t_2$ происходит формирование фронта импульса тока. Длительность фронта $t_{\text{ф}} = t_1 + t_2$ можно определить из уравнения

$$I_б(p) = \frac{1}{p} I_б^+, \quad \text{то}$$

$$q(t) = I_б^+ \tau (1 - e^{-t/\tau}). \quad (7.9)$$

Подставив выражение (7.9) в (7.5), получим:

$$i_{\text{к}}(t) = h_{21э} I_б^+ (1 - e^{-t/\tau}). \quad (7.10)$$

Таким образом, и объемный заряд неосновных носителей в базе, и коллекторный ток во время формирования фронта изменяются по экспоненциальному закону. Когда $i_{\text{к}}(t_2) = I_{\text{кнас}}$ и заряд неосновных носителей в базе достигает значения $q(t_2) = I_{\text{кнас}} / h_{21э}$, формирование фронта заканчивается. Воспользовавшись соотношением

(7.9) получим формулу для расчета длительности фронта

$$t_{\phi} = \tau \ln \frac{h_{21Э} I_{\phi}^{+}}{h_{21Э} I_{\phi}^{+} - I_{К \text{ нас}}} \quad (7.11)$$

Из полученного соотношения следует, что увеличение базового тока включения приводит к уменьшению длительности фронта импульса коллекторного тока. Если при формировании фронта емкостный ток соизмерим с коллекторным током транзистора, то для расчета t_{ϕ} в формуле (7.11) необходимо заменить t на $t_{\text{экв}}$ из (7.8).

После того как транзистор войдет в режим насыщения, ток $i_{\text{к}}$ и напряжение $u_{\text{кэ}}$ перестают изменяться, но процесс накопления заряда продолжается по экспоненциальному закону в соответствии с выражением (7.9), однако постоянная времени здесь другая: $t_{\text{нас}} = (0,8 \dots 0,9)t$.

Поскольку процесс накопления носит экспоненциальный характер, то время, в течение которого заряд неосновных носителей достигает стационарного значения, можно вычислить по формуле $t_{\text{нас}} = (0,8 \dots 0,9)t_{\text{нас}}$.

На этом процесс включения транзисторного ключа заканчивается.

4. ВЫКЛЮЧЕНИЕ ТРАНЗИСТОРНОГО КЛЮЧА

Когда в момент времени t_3 происходит переключение входного напряжения с U_{ϕ}^{+} на U_{ϕ}^{-} (см. рис. 7.3), начинается процесс выключения транзисторного ключа. При переключении входного напряжения ток базы меняет направление и становится равным

$$I_{\phi}^{-} = (U_{\text{Б}}^{-} - U_{\text{БЭ \text{ нас}}}) / R_{\phi}$$

Стадия рассасывания. В результате изменения направления базового тока начинается процесс рассасывания неосновных носителей. Несмотря на уменьшение заряда, транзистор некоторое время находится в режиме насыщения и коллекторный ток остается равным $I_{\text{к нас}}$. В момент времени t_4 (см. рис. 7.5) концентрация неосновных носителей около коллекторного перехода уменьшается до нуля и на коллекторном переходе восстанавливается обратное напряжение.

Таким образом, интервал времени $t_{рас} = t_4 - t_3$ определяет задержку среза импульса коллекторного тока. Время $t_{рас}$, которое называется *временем рассасывания*, можно определить из уравнения (7.6), положив

$$\dot{I}_6(p) = -\frac{1}{p} I_6^- \quad \text{и} \quad q(0) = I_6^+ \tau_{нас}:$$

Переходя от изображения к оригиналу, получим

Этап рассасывания заканчивается, когда транзистор входит в активный режим, и если положить, что в момент времени t_4 объемный заряд $q(t_4) = t_{нас} I_{к\ нас} / h_{21э}$, то получим

(7.12)

Иногда зарядом $q(t_4)$ пренебрегают, и формула для расчета времени рассасывания принимает вид

Стадия формирования спада. В дальнейшем начинается уменьшение базового и коллекторного токов, что сопровождается увеличением напряжения $u_{кэ}$ и формируется спад вершины импульса коллекторного тока. Процессы, протекающие в транзисторном ключе в этой стадии, довольно сложны, и количественная оценка длительности спада зависит от того, какие факторы преобладают. Принимая во внимание, что в момент окончания стадии спада $q(t_5) = 0$, получаем

(7.13)

Данная формула получена при довольно грубом приближении, поскольку в действительности ток базы не остается постоянным и нельзя пренебрегать токами зарядки и емкости нагрузки транзисторного ключа. Когда определяющим является процесс зарядки этих емкостей, то длительность спада рассчитывается по формуле

5. СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Быстров Ю. А. Мироненко И. Г. "Электронные цепи и устройства"
2. Манаев Е. И. "Основы радиоэлектроники"
3. Степаненко И. П. "Основы микроэлектроники"
4. Пасынков В. В. "Полупроводниковые приборы"