

ЛЕКЦИЯ 13 БИПОЛЯРНЫЕ ТРАНЗИСТОРЫ

Динамический и ключевой режимы работы биполярного транзистора

План занятия:

1. Динамический режим работы транзистора
2. Ключевой режим работы транзистор
3. Динамические свойства транзисторного ключа
4. Методы повышения быстродействия транзисторного ключа

Динамический режим работы транзистора

В динамическом режиме токи и напряжения на электродах транзистора не остаются постоянными, а непрерывно меняются. Таким образом, характеристики транзистора, находящегося в динамическом режиме отличаются от характеристик статического режима, так как они определяются не только свойствами самого транзистора, но и свойствами элементов схемы.

В схеме (рис.13.1) напряжение источника E_K распределяется между участком коллектор-эмиттер (выходом схемы) и нагрузочным сопротивлением R_K так, что напряжение

$$U_{КЭ} = E_K - I_K R_K.$$

Это выражение представляет собой уравнение динамического режима транзистора для выходной цепи.

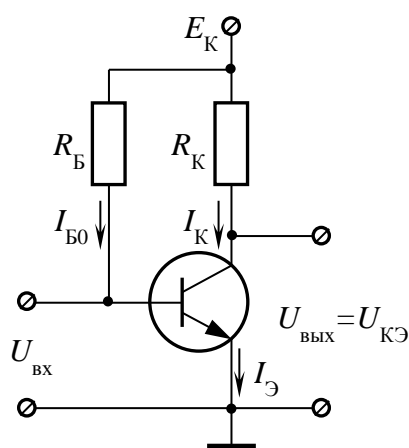


Рис.13.1. Схема включения транзистора с ОЭ

Изменение напряжения на входе транзистора вызывает соответствующее изменение тока базы, а, следовательно, и тока коллектора I_K . Это приводит к изменению напряжения на R_K , вследствие чего изменяется и напряжение $U_{КЭ}$.

Рабочая точка – точка, связывающая текущие значения напряжений и токов на координатной плоскости характеристик усилителя в конкретный

момент времени.

Рабочая точка по постоянному току (точка покоя) – точка соответствующая состоянию усилителя при отсутствии входного сигнала.

Выходная нагрузочная характеристика (рис.13.2) может быть легко построена по двум точкам – точкой ее пересечения с осью тока коллектора *A* ($I_K = \max, U_{КЭ} = 0$) и точкой ее пересечения с осью напряжения *B* ($I_K = 0, U_{КЭ} = E_K$).

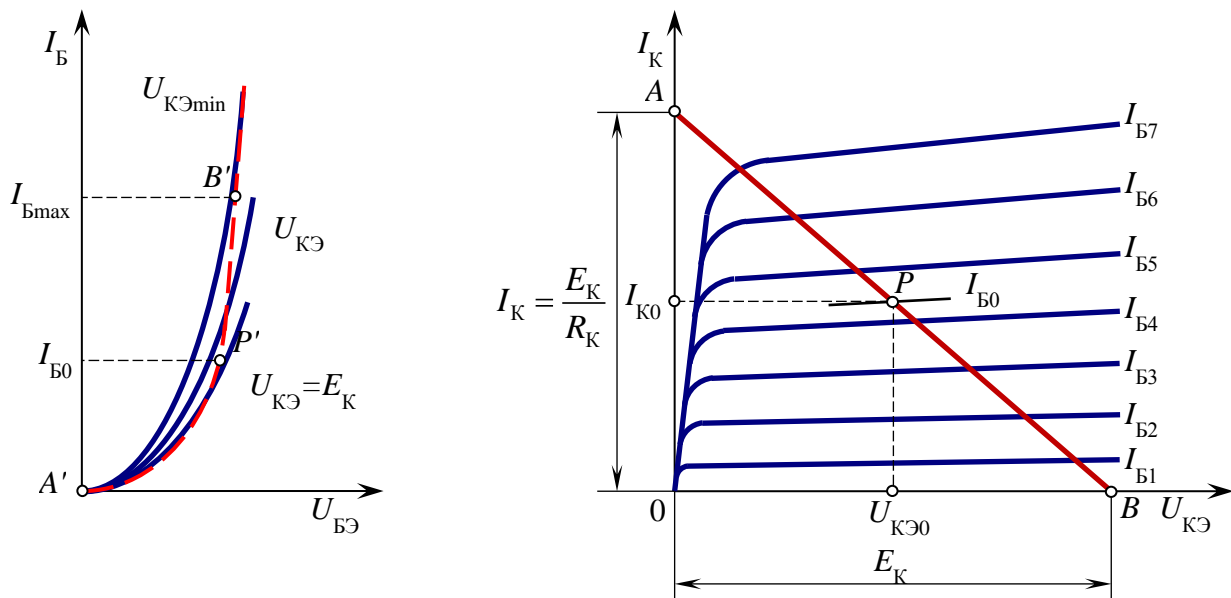


Рис.13.2. Построение ВАХ транзистора в динамическом режиме

Напряжение на эмиттерный переход транзистора подается через резистор R_B в цепи базы. Величина сопротивления этого резистора определяет исходную величину постоянного тока базы транзистора при отсутствии входного сигнала. Если в режиме покоя был установлен ток базы I_{B0} , то рабочая точка *P*, на нагрузочной прямой, укажет соответствующие этому току значения I_{K0} и $U_{КЭ0}$.

Что бы построить входную динамическую характеристику, нужно для каждого напряжения на коллекторе, для которого имеется статическая входная характеристика, определить по выходной динамической характеристике ток базы. Затем на входных статических характеристиках следует отметить точки, которые соответствуют найденным значениям токов базы (*A' P' B'* на рис.13.2). Соединив эти точки плавной кривой (штрихпунктирная красная линия) получим входную динамическую характеристику транзистора.

Ключевой режим работы транзистора

В современной цифровой электронной аппаратуре полупроводниковые элементы работают в ключевом режиме, формируя сигналы логического "0" и "1". Построение выходных усилительных каскадов таких схем требуют знаний специфики работы и расчетов электронных ключей.

Простейшей реализацией электронного ключа является транзисторный каскад с общим эмиттером (ОЭ), представленный на рис.13.3. Выходное напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ при этом определяется положением рабочей точки, которое, в свою очередь, зависит от тока базы. Движение рабочей точки при изменении тока базы происходит по определенной траектории ab (нагрузочной прямой), положение которой определяется напряжением E_K и сопротивлением в цепи коллектора R_K .

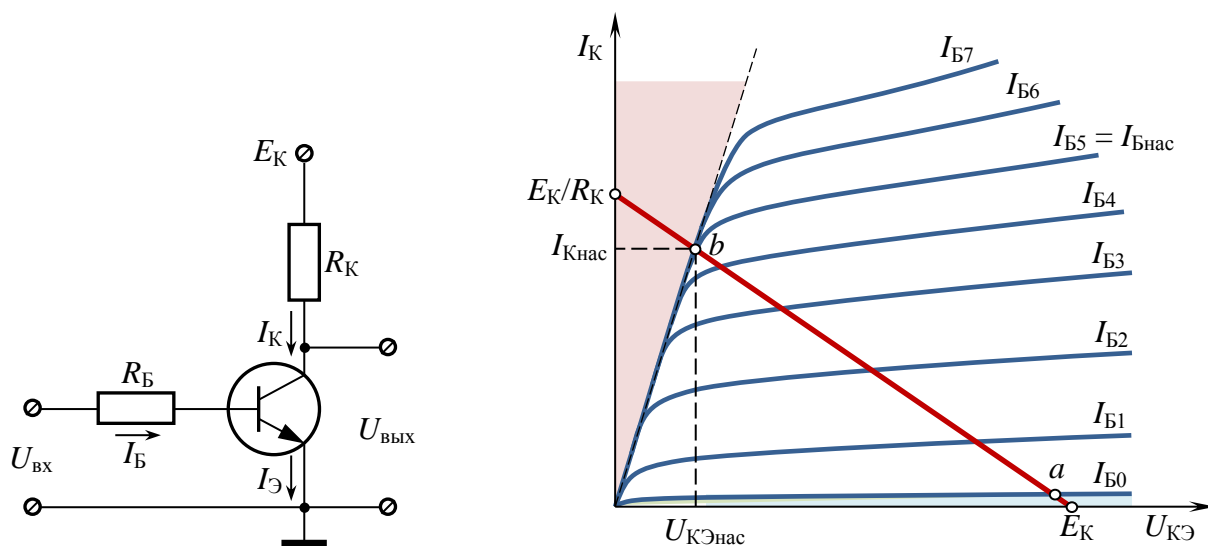


Рис.13.3. Работа транзистора в ключевом режиме

При работе в качестве электронного ключа биполярный транзистор может находиться в трех режимах: отсечки (ключ закрыт) – точка a , $U_{\text{ВЫХ}} \approx E_K$, $I_K \approx 0$; насыщения (ключ открыт) – точка b , $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{КЭнас}}$, $I_K \approx E_K/R_K$; и активном режиме (при переходе из закрытого состояния в открытое и обратно).

Для электронных ключей активный режим является невыгодным, поскольку в этом режиме на коллекторе рассеивается значительная мощность, снижающая КПД схемы и вызывающая нагрев транзистора. Поэтому активный режим допустим только в течение переходных процессов, длительность которых, по возможности, необходимо сделать как можно меньше.

При недостаточном токе базы I_B открытый транзистор может находиться в активном режиме. Для обеспечения насыщения необходимо, чтобы выполнялось соотношение $I_B > I_{\text{Бнас}}$. Ток базы можно определить по формуле:

$$I_B = \frac{U_{\text{ВХ}} - U_{\text{БЭнас}}}{r_B + R_B}.$$

Ток насыщения определяется сопротивлением резистора в цепи коллектора, усилительными свойствами транзистора и сопротивлением между коллектором и эмиттером в насыщенном состоянии:

$$I_{\text{Бнас}} = \frac{I_{\text{Кнас}}}{\beta} = \frac{E - U_{\text{КЭнас}}}{\beta R_{\text{К}}}.$$

При расчетах целесообразно пользоваться наименьшим значением $\beta = \beta_{\text{min}}$. Отношение $I_{\text{Б}}/I_{\text{Бнас}}$ характеризует глубину обратной связи и называется степенью насыщения транзистора $q_{\text{нас}}$. С одной стороны, транзистор должен быть надежно открыт, поскольку, как отмечалось выше, при нарушении условия насыщения транзистор переходит в активный режим, что сопровождается ростом напряжения на коллекторе и увеличением мощности рассеяния. С другой – глубокое насыщение транзистора приводит к снижению быстродействия ключевого каскада. Обычно на практике степень насыщения транзистора выбирают в пределах от 1,5 до 3.

В режиме насыщения выходную цепь транзистора можно представить эквивалентным источником напряжения, величина ЭДС которого $U_{\text{КЭнас}}$ приводится в справочниках. Следовало бы также учитывать внутреннее сопротивление этого источника, величина которого определяется крутизной наклона линии граничного режима. Однако, в большинстве практических случаев для инженерных расчетов можно ограничиться величиной $U_{\text{КЭнас}}$.

Резисторы $R_{\text{Б}}$ и $R_{\text{К}}$ должны обеспечивать надежное запираание транзистора при низком уровне управляющего сигнала во всем диапазоне рабочих температур и насыщение при высоком уровне управляющего сигнала. При расчете необходимо учитывать обратный ток коллектора $I_{\text{КБ0}}$, протекающий через резистор $R_{\text{Б}}$ и создающий на нем падение напряжения. Суммарное напряжение на эмиттерном переходе определяется выражением:

$$U_{\text{БЭ}} = U_0 + I_{\text{КБ0max}} R_{\text{Б}},$$

где $I_{\text{КБ0max}}$ – максимальный обратный ток коллектора;

U_0 – напряжение низкого уровня управляющего сигнала.

Очевидно, для надежного запираания транзистора необходимо, чтобы $U_{\text{БЭ}} < U_{\text{БЭотс}}$. Следует учитывать сильную температурную зависимость обратного тока коллектора, и для расчета выбирать максимальное значение. В противном случае ключ может «подтекать» при изменении температуры.

Динамические свойства транзисторного ключа

Необходимой частью проектирования электронных ключей является оценка их динамических свойств, определяющих скорость переключения и потери энергии на этом этапе (динамические потери).

Работу транзистора в ключевом режиме под действием входного напряжения прямоугольной формы можно разделить на несколько отдельных этапов (рис.13.4). Изначально транзистор заперт, ток базы определяется обратным током коллектора, заряд в базе практически отсутствует, на выходе ключа высокий уровень.

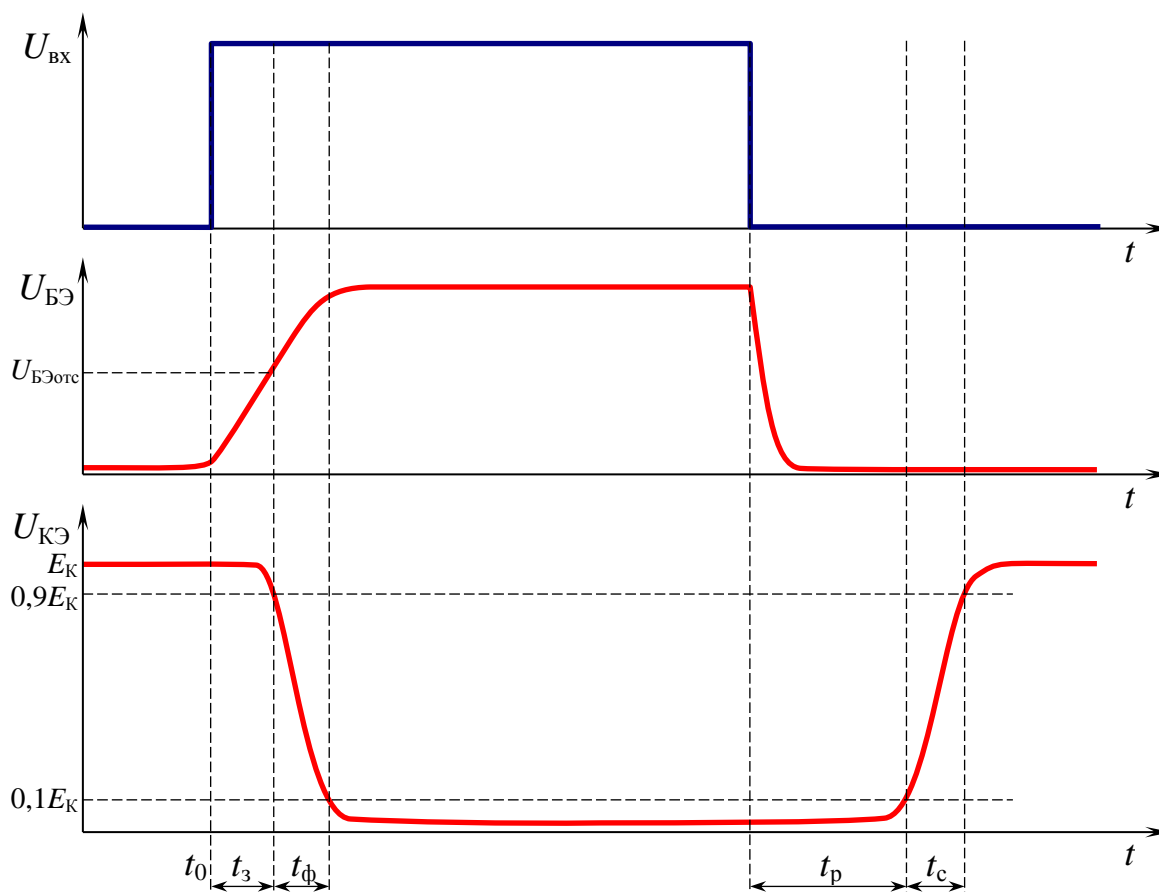


Рис.13.4. Переходные процессы в ключе на биполярном транзисторе

Пусть в момент времени t_0 потенциал на входе ключа скачкообразно увеличивается, начинается заряд входной емкости транзистора, напряжение база-эмиттер $U_{БЭ}$ постепенно нарастает. Токи базы и коллектора не изменяются, пока напряжение на переходе база-эмиттер не превысит напряжения отсечки $U_{Б0}$. Этот интервал t_3 называют *временем задержки включения* транзистора или *временем подготовки*. На практике его измеряют как время, за которое выходное напряжение спадает на 10%, то есть до $0,9E_K$.

С момента превышения напряжения отсечки начинается процесс отпирания, скорость которого тем больше, чем выше амплитуда входного напряжения, транзистор переходит в активный режим. Инжектируемые в базу неосновные носители нарушают равновесное состояние базы, и начинается накопление заряда. Пропорционально увеличивается ток коллектора, обусловленный экстракцией носителей в область коллектора. Время t_ϕ до перехода в режим насыщения называется *временем формирования фронта импульса* или *временем включения*. За время включения выходное напряжение изменяется от $0,9E_K$ до $0,1E_K$.

В режиме насыщения все токи и напряжения остаются постоянными, при этом заряд в базе продолжает нарастать, хотя и с меньшей скоростью. Заряд, превышающий величину, соответствующую переходу в режим насыщения, называется избыточным.

Скачкообразное снижение напряжения на входе ключа приводит к быстрому снижению тока базы, нарушается равновесное состояние заряда базы и начинается его рассасывание. Транзистор остается насыщенным, а потому проводящим, до тех пор, пока заряд не уменьшится до граничной величины. После чего транзистор переходит в активный режим. Время t_3 , в течение которого происходит рассасывание накопленного заряда базы, называется *временем рассасывания* или *временем задержки выключения* транзистора и определяется как время с момента опрокидывания входного сигнала до момента достижения выходного напряжения уровня $0,1E_K$.

В период времени t_c происходит формирование среза импульса, транзистор находится в активном режиме заряд базы и ток коллектора уменьшаются до тех пор, пока транзистор не перейдет в режим отсечки. *Время выключения* транзистора определяется как период в течение которого выходное напряжение изменяется от $0,1E_K$ до $0,9E_K$.

После перехода транзистора в режим отсечки напряжение на выходе возрастает до E_K , заряжается емкость коллектора.

Время рассасывания t_p обычно существенно превышает временные интервалы t_3 , t_f и t_c . Очевидно, что ключевую роль здесь играет степень насыщения транзистора $q_{нас}$.

При расчете и анализе высокочастотных схем необходимо также учитывать процессы заряда емкостей монтажа и нагрузки, которые не имеют прямого отношения к транзистору, но могут существенно влиять на длительность переходного процесса в целом.

Влияние изменения параметров схемы ключа на его работу

Значения элементов и напряжений в схеме транзисторного ключа оказывают существенное влияние на длительности переходных процессов.

Изменение параметров коллекторной цепи R_K и E_K приводит к изменению тока $I_{Кнас}$ и влияет на длительности всех трех процессов. Например, уменьшение E_K до E'_K (рис.13.5) ведет к уменьшению тока коллектора с $I_{Кнас}$ до $I'_{Кнас}$. В цепи с неизменной постоянной времени это приведет к уменьшению длительности фронта, однако транзистор выходит на границу насыщения при меньшем токе базы $I_{Б4}$, поэтому дальнейшее увеличение тока базы (при неизменных значениях $U_{вх}$ и R_B) вызывает накопление избыточного заряда, что ведет к увеличению времени рассасывания.

Увеличение E_K до E''_K (рис.13.5) приведет к росту тока коллектора с $I_{Кнас}$ до $I''_{Кнас}$ и соответственно будет иметь обратное влияние на временные процессы переключения ключа. Однако при неизменных значениях $U_{вх}$ и R_B , тока базы $I_{Б5}$ будет недостаточно для достижения границы насыщения, и транзистор будет находиться в активном режиме. Увеличение напряжения коллектор-эмиттер до $U''_{КЭнас}$ приведет к увеличению мощности, рассеиваемой транзистором, и соответственно к его нагреву.

Аналогичное влияние на работу транзисторного ключа оказывает изменение сопротивления R_K , определяющее угол наклона нагрузочной прямой, а соответственно и значение $I_{Кнас}$.

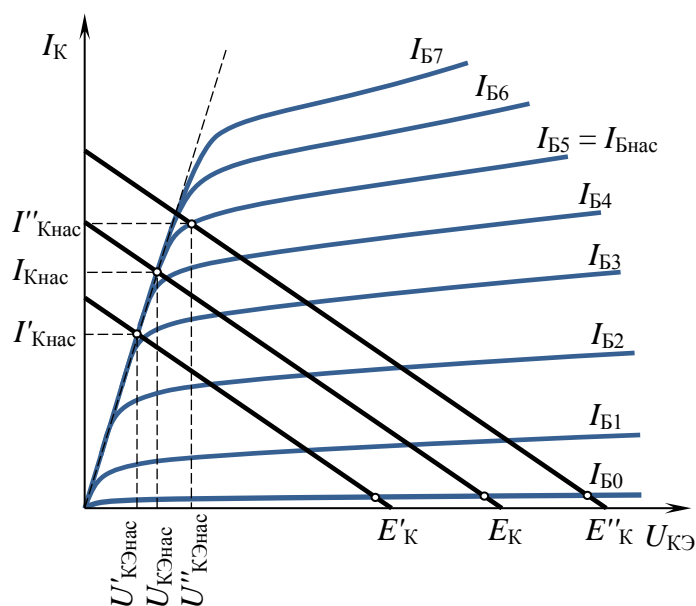


Рис.13.5. Влияние изменения E_K на нагрузочные характеристики ключа

Ток включения транзисторного ключа I_B находится в непосредственной зависимости от амплитуды входного сигнала $U_{вх}$ и сопротивления в цепи базы R_B . Увеличение скорости нарастания тока базы приводит к уменьшению времени включения транзистора, но при большем значении I_B длительность рассасывания увеличивается вследствие накопления избыточного заряда.

Рассмотренные примеры показывают, что изменение параметров схемы транзисторного ключа не позволяет заметно повысить его быстродействие, поскольку при неизменной потребляемой мощности уменьшение длительности одних процессов сопровождается увеличением длительности других. Для повышения быстродействия используют различные схемотехнические способы предотвращения глубокого насыщения транзистора, такие как форсирующая цепочка (рис.13.6) и нелинейная обратная связь (рис.13.7).

Методы повышения быстродействия транзисторного ключа

Ключ с форсирующей емкостью

Анализ работы транзисторного ключа показывает, что его быстродействие можно увеличить, переключая его током базы $I_{Бг}$, временная диаграмма которого представлена на рис.13.6,а. В момент t_1 , для ускорения процесса, на базу транзистора подается большой ток $I_{Б1}$, затем, в момент времени t_2 , ток уменьшается до значения $I_{Б2}$, то есть транзистор выводится на границу режима насыщения для уменьшения времени рассасывания. В момент t_3 транзистор запирается большим обратным базовым током $I_{Б3}$.

Форму тока, близкую к оптимальной, можно получить применяя схему ключа с форсирующей (ускоряющей) емкостью (рис.13.6,б). Принцип работы форсирующей цепочки очевиден: при подаче входного сигнала разряженный конденсатор шунтирует резистор в цепи базы, пропуская импульс тока $I_{Бр}$ в

базовую цепь (рис.13.6,а). В первый момент времени этот ток ограничивается только внутренним сопротивлением источника входного сигнала. Он быстро заряжает барьерные емкости и накапливает заряд в базе транзистора, это позволяет ускорить переход транзистора в режим насыщения. Благодаря большому току время задержки включения и формирования фронта импульса существенно уменьшаются.

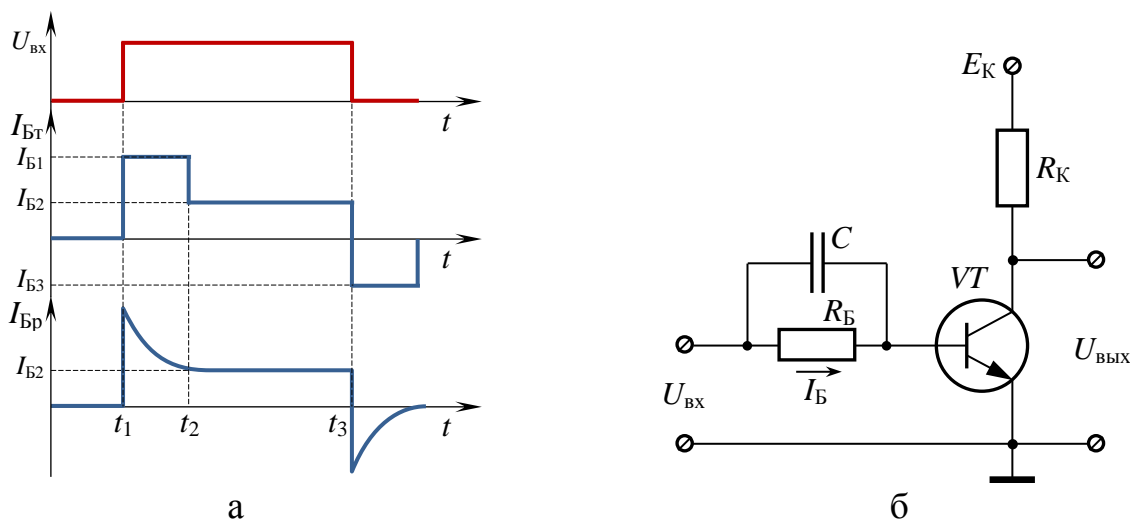


Рис.13.6 Ключ с форсирующей емкостью:
а – диаграммы входных сигналов; б – схема ключа

По мере заряда конденсатора ток базы уменьшается до значения $I_{Б2}$, определяемого сопротивлением $R_{Б}$, величина которого выбирается таким образом, чтобы обеспечить неглубокое насыщение транзистора, что позволяет ускорить рассасывание неосновных носителей в базе и уменьшить время выключения транзистора.

Емкость конденсатора C должна удовлетворять противоречивым условиям – с одной стороны, слишком малое ее значение приводит к тому, что длительность всплесков токов будет меньше, чем длительность процессов переключения, которую они уменьшают. При этом процесс переключения будет протекать при сравнительно малых токах базы и ускоряться не будет. С другой стороны, нельзя выбирать ускоряющий конденсатор и слишком большой емкости, поскольку, во-первых, ток базы не будет успевать уменьшиться до уровня $I_{Б2}$ к концу входного импульса, и в базе будет накапливаться избыточный заряд; во-вторых, конденсатор не будет успевать заряжаться до уровня входного импульса к моменту его окончания – процессы рассасывания и включения будут протекать медленнее.

Ключ с нелинейной обратной связью

Обеспечить большой базовый ток включения и одновременно уменьшить время рассасывания можно, используя схему ключа с отрицательной обратной связью, в которой не допускается режим глубокого насыщения транзистора. Нелинейная отрицательная обратная связь осуществляется через диод VD ,

включенный между базой и коллектором транзистора (рис.13.7).

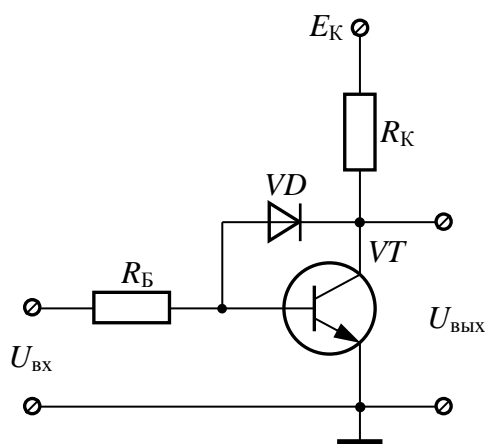


Рис.13.7. Ключ с нелинейной обратной связью

Состояние диода определяется полярностью и величиной напряжения, действующего между анодом и катодом. В исходном состоянии диод закрыт за счет высокого положительного потенциала на катоде. Отрицательная обратная связь не действует. При подаче входного сигнала ток вначале протекает через R_B в базу транзистора, обеспечивая большой ток включения. При отпирании транзистора напряжение коллектор-эмиттер уменьшается, стремясь к 0. Когда потенциал на коллекторе станет меньше потенциала базы, диод оказывается смещенным в прямом направлении, а транзистор охвачен отрицательной обратной связью (часть входного тока будет протекать через диод и коллектор транзистора на землю в обход базы). В результате, ток базы уменьшается до значения $I_B \leq I_{\text{Бнас}}$, и транзистор не заходит в область насыщения.

Для работы ключа с нелинейной обратной связью необходимо, чтобы диод, включенный параллельно коллекторному переходу транзистора, открывался при сравнительно малом напряжении, когда коллекторный переход еще закрыт. А для уменьшения времени выключения необходимо обеспечить малое время восстановления обратного сопротивления диода. Поэтому в качестве диода обратной связи преимущественно применяют диоды с барьером Шоттки, которые имеют низкое значение падения напряжения в прямом включении (0,5...0,7 В) и более высокие частотные характеристики, чем у обычных выпрямительных диодов.