

Саратовский государственный университет
им. Н.Г.Чернышевского

Кафедра общей физики

«Физические основы твердотельной электроники»

Руководство к лабораторной работе

**«Изучение ключевого режима работы биполярного
транзистора и его применение в цифровых схемах»**

Составители:

доцент

В.А.Костяков

вед. инженер

Т.Н.Сиротинина

Саратов – 2005г.

1 Введение

Основой современных ЭВМ являются полупроводниковые интегральные микросхемы, на которых реализованы различные сложные функциональные устройства: цифровые коммутаторы, логические и арифметические устройства, цифровые преобразователи сигналов, запоминающие устройства и др. Эти функциональные устройства, содержат большое количество элементарных импульсных схем, к которым относятся электронные ключи, логические схемы, триггеры, мультивибраторы и др. Элементарные импульсные схемы в свою очередь реализованы на активных полупроводниковых элементах (транзисторах). Современные интегральные микросхемы могут объединять в одном корпусе большое число транзисторов, а также пассивных элементов (диоды, резисторы, конденсаторы, индуктивности и т.д.).

В качестве активных элементов интегральных схем (ИС) в настоящее время используется в основном два класса транзисторов – биполярные транзисторы (БТ) и полевые транзисторы (ПТ). В качестве ПТ большей частью применяются ПТ с изолированным затвором на структуре металл-диэлектрик-полупроводник (МДП-структура). Соответственно цифровые интегральные микросхемы подразделяются на два больших класса: биполярные ИС и МДП ИС. (Если в качестве диэлектрика в МДП-структуре используется пленка окисла полупроводника, она называется структурой металл-окисел-полупроводник или МОП-структурой. ИС на МОП-транзисторах называются МОП ИС).

В данной лабораторной работе исследуются физические принципы, которые лежат в основе работы цифровых устройств на БТ. Функционирование таких устройств связано с переключением БТ из режима отсечки в режим насыщения и обратно. Такой режим работы транзистора называется ключевым режимом.

Целью данной работы является ознакомление с ключевым режимом работы БТ и примерами его применения для реализации простейших импульсных и цифровых схем.

2 Теоретические замечания

2.1 Ключевой режим работы биполярного транзистора

В подавляющем большинстве практических схем на БТ с ключевым режимом работы используется схема с общим эмиттером, показанная на рис. 1. На рис. 2 показаны выходные (а) и входные (б) статические характеристики транзистора в этой схеме. На плоскости выходных характеристик можно выделить, три режима работы: активный, насыщения и отсечки. Ключевым режимом работы называется режим, при котором входной сигнал скачком переводит транзистор из состояния отсечки тока в состояние насыщения и наоборот. На рис. 2,а показана нагрузочная прямая, положение которой определяется напряжением источника коллекторного питания E_k и сопротивлением в цепи коллектора R_k в соответствии с уравнением

$$I_k \cdot R_k + U_k = E_k. \quad (1)$$

При изменении входного сигнала рабочая точка может перемещаться только по нагрузочной прямой. При работе в ключевом режиме стационарное состояние транзистора характеризуется либо точкой 1 (область отсечки), либо точкой 2 (область насыщения). Переход из точки 1 в точку 2 и наоборот происходит через область активного режима очень быстро за время, которое называется временем переключения.

Для задания исходного рабочего состояния транзистора в области отсечки на базу подается положительное или нулевое смещение $U_{б0} \geq 0$.

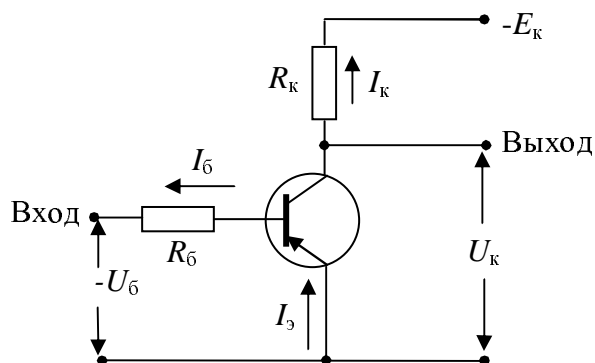


Рис. 1 Схема включения БТ (*p-n-p*) с общим эмиттером

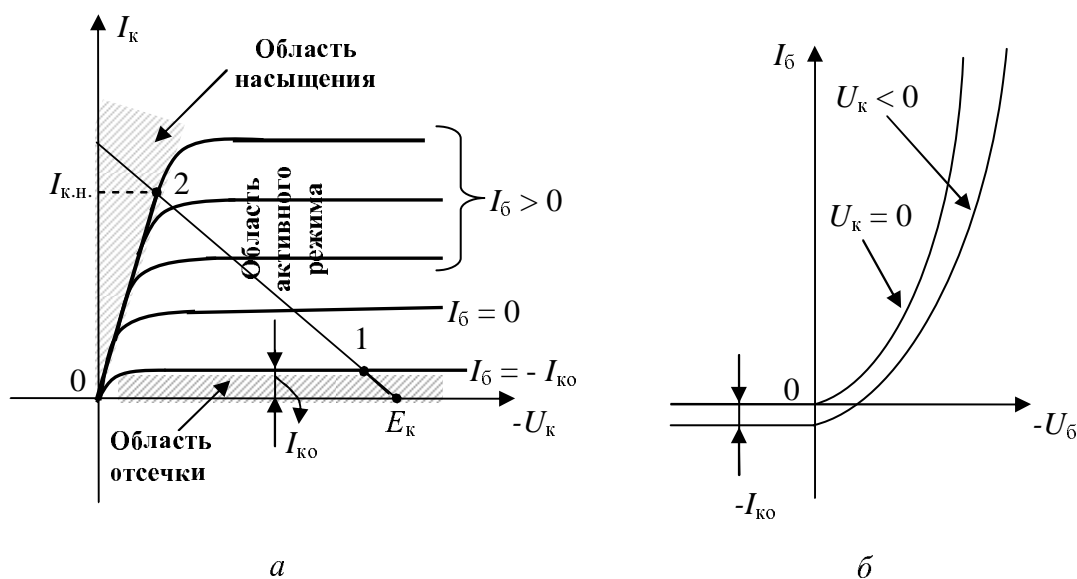


Рис. 2 Статические характеристики БТ в схеме с общим эмиттером:

a- выходные характеристики,
б- входные характеристики,
 $I_{ко}$ -начальный ток коллектора,
 $I_{к.н.}$ -ток насыщения коллектора

Из входных характеристик на рис. 2,*б* видно, что при $U_б \geq 0$ базовый ток примерно равен $-I_{ко}$, что соответствует закрытому эмиттерному переходу, следовательно, при этом оба перехода (эмиттерный и коллекторный) закрыты и через них протекают обратные токи, причем можно считать

$$I_б \approx -I_{ко}; \leftrightarrow I_k \approx I_{ко}; \leftrightarrow I_э = I_б + I_k \approx 0.$$

Переход в режим насыщения обеспечивается подачей на вход схемы импульса отрицательной полярности, который отпирает эмиттерный и коллекторный переходы. При этом коллекторный ток должен достиг-

нуть значения насыщения $I_{\text{кн}}$ (точка 2 на рис. 2,а). Величина тока базы, при котором наступает насыщение, определяется по формуле

$$I_{\text{бн}} = \frac{I_{\text{кн}}}{\beta}, \quad (2)$$

где β – коэффициент передачи тока базы. Отпирающий входной импульс должен обеспечить базовый ток $I_{\text{б1}} \geq I_{\text{бн}}$, для чего его амплитуда должна удовлетворять условию

$$U_{\text{вх}} \geq I_{\text{бн}} \cdot R_{\text{вх}}, \quad (3)$$

где $R_{\text{вх}} = R_{\text{б}} + r_{\text{вх}}$, $r_{\text{вх}}$ – входное сопротивление открытого транзистора. При этом входной ток составит

$$I_{\text{б1}} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}}} \geq I_{\text{бн}}. \quad (4)$$

При достижении насыщения дальнейшее увеличение тока базы не приводит к увеличению тока коллектора. Оба перехода в режиме насыщения открыты и имеют очень маленькое сопротивление. Поэтому остаточное напряжение коллектора $U_{\text{к}} = U_{\text{кн}}$ невелико и составляет обычно десятые доли вольта. Следовательно, величина $I_{\text{кн}}$ может быть определена по формуле

$$I_{\text{кн}} = \frac{E_{\text{к}} - |U_{\text{кн}}|}{R_{\text{к}}} \approx \frac{E_{\text{к}}}{R_{\text{к}}}. \quad (5)$$

Определив $I_{\text{кн}}$ можно найти необходимые значения $I_{\text{бн}}$ и $U_{\text{вх}}$ по формулам (2) и (3).

Проведенное рассмотрение показывает, что транзистор в ключевом режиме играет роль ключа, размыкающего или замыкающего точки электрической цепи, к которым присоединены выводы эмиттера и коллектора. Действительно, в режиме отсечки оба перехода транзистора закрыты, их сопротивление велико и участок цепи между эмиттером и коллектором можно считать разомкнутым. В режиме насыщения оба перехода оказываются включенными в прямом направлении, их сопротив-

ление можно считать равным нулю, а участок цепи эмиттер-коллектор короткозамкнутым.

2.2 Переходные процессы при переключении БТ

Одной из важнейших характеристик ключевого режима работы транзистора является длительность переходных процессов нарастания и убывания коллекторного тока при переключении.

Переходные процессы обусловлены перезарядкой барьерных емкостей эмиттерного и коллекторного переходов и процессами накопления, и рассасывания неосновных носителей в базе. В большинстве случаев основной вклад в длительность переходных процессов вносят процессы накопления и рассасывания неосновных носителей.

Ниже без вывода приведены приближенные формулы длительности отдельных стадий переключения транзистора.

На рис. 3 показаны временные диаграммы токов и напряжений транзистора при воздействии на него входного импульса напряжения $U_{вх}$, удовлетворяющего соотношению (3).

Процесс замыкания транзисторного ключа состоит из трех стадий: задержка, формирование переднего фронта импульса выходного тока и накопление заряда в базе.

Задержка обусловлена перезарядкой входной емкости $C_{вх}$ транзистора под действием скачка напряжения входного сигнала. Время задержки t_3 (рис. 3,б) определяется выражением

$$t_3 = \tau_{вх} \ln \left(1 + \frac{U_{б0}}{U_{вх}} \right), \quad (6)$$

где $U_{б0}$ – положительное напряжение на базе транзистора в закрытом состоянии, $U_{вх}$ – амплитуда отрицательного отпирающего импульса, $\tau_{вх}$ – постоянная времени входной цепи.

$$\tau_{\text{BX}} = C_{\text{BX}} \cdot R_{\text{б}}. \quad (7)$$

Если $R_{\text{к}}$ достаточно мало, то барьерные емкости эмиттерного $C_{\text{э}}$ и коллекторного $C_{\text{к}}$ переходов можно считать параллельно соединенными и входная емкость представляет собой их сумму $C_{\text{BX}} = C_{\text{э}} + C_{\text{к}}$.

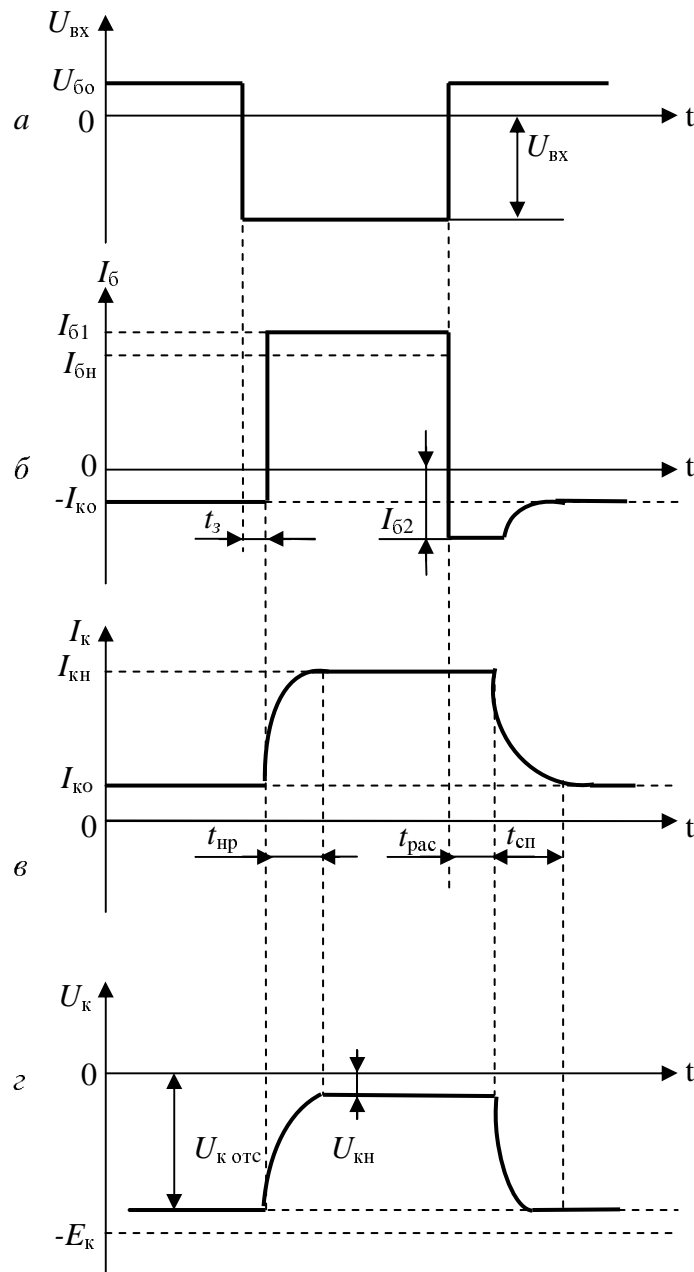


Рис. 3 Временные диаграммы токов и напряжений при переключении p - n - p БТ

В ряде случаев задержка может быть сравнима с длительностью фронта и даже превышать ее. Однако задержка проявляется только в сдвиге переходной характеристики и не влияет на ее форму.

После полного разряда входной емкости транзистор открывается. При этом ток базы практически мгновенно увеличивается (рис. 3,б), а ток коллектора нарастает постепенно за счет инерционных переходных процессов (рис. 3,в), которые связаны в основном с накоплением неосновных носителей в базе. Длительность нарастания коллекторного тока $t_{\text{нр}}$ можно определить по формуле

$$t_{\text{нр}} = \tau \ln \frac{1}{1 - \frac{I_{\text{кн}}}{\beta \cdot I_{\text{б1}}}}, \quad (8)$$

где τ – время жизни неосновных носителей в базе.

Если $t_{\text{нр}}$ измерено экспериментально, то формула (8) позволяет определить время жизни неосновных носителей в базе τ . Приблизительно $t_{\text{нр}}$ можно рассчитать, если воспользоваться формулой

$$\tau \approx \tau_{\beta} = \frac{\beta + 1}{2\pi f_{\alpha}}, \quad (9)$$

где τ_{β} – постоянная времени коэффициента передачи тока базы, f_{α} – граничная частота коэффициента усиления транзистора. Граничной частотой f_{α} называется частота, на которой коэффициент передачи тока эмиттера α уменьшается до уровня 0,707 от величины этого коэффициента на постоянном токе α_0 . Значение f_{α} приводится в справочниках по транзисторам.

Из формулы (8) видно, что, чем больше $I_{\text{б1}}$, т.е. чем больше глубина насыщения, тем короче передний фронт выходного импульса $t_{\text{нр}}$.

После достижения коллекторным током насыщения этот ток перестает расти (рис. 3,в), но процесс накопления носителей в базе еще некоторое время продолжается. Однако он не влияет уже на форму фронта коллекторного тока.

Процесс запираания транзистора протекает в два этапа. На первом этапе происходит рассасывание избыточных носителей, накопленных в базе. После этого транзистор переходит в активную область характеристик (рис. 2,а) и далее следует уменьшение тока коллектора, вплоть до отсечки.

В первый момент после окончания действия входного импульса ток базы скачком изменяется до величины $-I_{62}$ (рис. 3,б). Отрицательный базовый ток означает вывод накопленного заряда из базы. Однако в течение некоторого времени концентрации дырок у обоих переходов остаются выше равновесных и напряжения на переходах сохраняют небольшую положительную величину. При этом токи коллектора и базы практически не изменяются. Этот этап называется рассасыванием заряда. Рассасывание заканчивается, когда избыточный заряд в базе исчезает. Время рассасывания $t_{\text{рас}}$ можно определить по формуле

$$t_{\text{рас}} = \tau_{\text{н}} \ln \frac{I_{61} - I_{62}}{\frac{I_{\text{кн}}}{\beta} - I_{62}}, \quad (10)$$

где $\tau_{\text{н}}$ – постоянная времени накопления, которая определяется выражением

$$\tau_{\text{н}} = \frac{\tau}{1 + \beta(1 - \gamma)}, \quad (11)$$

где γ – коэффициент инжекции, который очень близок к единице. Если считать $\gamma = 1$, то из формулы (11) следует, что $\tau_{\text{н}} = \tau$.

По окончании рассасывания заряда начинается спад импульса коллекторного тока (рис. 3,в), длительность которого можно определить по формуле

$$t_{\text{сп}} = \tau \ln \left(1 - \frac{I_{\text{кн}}}{\beta I_{62}} \right). \quad (12)$$

В формулах (10) и (12) ток I_{62} берется со своим знаком, то есть в данном случае со знаком минус.

Форма напряжения на коллекторе (рис. 3,з) практически повторяет форму коллекторного тока, поскольку напряжение U_k в соответствии с (1) определяется формулой

$$-U_k = -E_k + I_k \cdot R_k. \quad (13)$$

2.3 Применение ключевого режима в цифровых схемах

Задачей аналоговых усилительных устройств является усиление сигнала с минимальными искажениями. Поэтому такие устройства должны работать в линейном режиме. Рабочая точка транзистора, работающего в линейной аналоговой схеме, выбирается в активной области, а входной сигнал перемещает ее внутри этой области в небольших пределах. При этом выходной сигнал почти линейно зависит от входного и усиление входного сигнала происходит с минимальными нелинейными искажениями.

В отличие от линейных аналоговых схем, транзисторы, используемые в цифровых схемах на основе двоичной системы счисления, могут находиться только в двух рабочих состояниях: состоянии с высоким внутренним сопротивлением (запертом) и в состоянии с низким внутренним сопротивлением (открытом). Соответственно, в одном состоянии выходное напряжение транзисторной схемы $U_{\text{вых}}$ должно быть не менее некоторого заданного значения $U_{\text{вых}}^1$, называемого напряжением высокого уровня (уровня "1"). В другом состоянии выходное напряжение схемы не может превышать некоторого небольшого заданного значения $U_{\text{вых}}^0$, называемого напряжением низкого уровня (уровня "0"). При этом $U_{\text{вых}}^0 < U_{\text{вых}}^1$. Промежуточные значения напряжения считаются запрещенными.

Иными словами, цифровая схема может выдавать сигналы только в двоичной форме, то есть в виде последовательности импульсов напря-

жения высокого и низкого уровней ("1" и "0"). Переход от одного уровня к другому происходит в течение короткого времени за счет подачи входного сигнала в двоичной импульсной форме.

Транзистор, работающий в цифровой схеме, скачком переключается из режима отсечки в режим насыщения и наоборот. Длительность процесса переключения является определяющей характеристикой быстрого действия цифровых схем.

Нетрудно увидеть, что рассмотренная выше схема ключа может служить элементом цифровых схем. Будем считать, что входное напряжение может принимать только два значения

$$U_{\text{вх.1}} = 0; U_{\text{вх.2}} = -I_{\text{бн}} \cdot R_{\text{вх}}. \quad (14)$$

При этом выходные токи будут принимать значения

$$I_{\text{к1}} = I_{\text{к0}}; I_{\text{к2}} = I_{\text{кн}}, \quad (15)$$

а выходные напряжения в соответствии с формулой (13)

$$U_{\text{вых.1}} = U_{\text{к отс}} = -(E_{\text{к}} - R_{\text{к}} I_{\text{к0}}), \quad (16)$$

$$U_{\text{вых.2}} = U_{\text{кн}} = -(E_{\text{к}} - R_{\text{к}} I_{\text{кн}}). \quad (17)$$

Значение $U_{\text{вых.1}}$ можно принять за выходное напряжение высокого уровня $U_{\text{вых}}^1 = U_{\text{к отс}}$, а значение $U_{\text{вых.2}}$ за выходное напряжение низкого уровня $U_{\text{вых}}^0 = U_{\text{кн}}$. Переход от одного уровня к другому происходит в течение короткого времени за счет подачи входного сигнала в импульсной форме, как показано на рис. 3. При этом рассмотренная ключевая схема становится элементом цифровой схемотехники. Графики зависимости напряжений $-U_{\text{вх}}$ и $-U_{\text{вых}} = -U_{\text{к}}$ от времени t показаны на рис. 4. Небольшие изменения входного сигнала $U_{\text{вх}}$, которые не выводят транзистор из режима отсечки или режима насыщения, практически не изменяют выходного тока, а следовательно, и выходного напряжения. Поэтому выходным напряжениям низкого и высокого уровня соответствуют некоторые интервалы входного напряжения

$$U_{\text{вх}} \geq 0 \rightarrow U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^1, \quad (18)$$

$$U_{\text{вх}} < 0, |U_{\text{вх}}| \geq I_{\text{бн}} R_{\text{вх}} \rightarrow U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}}^0. \quad (19)$$

Простейшим примером цифровой схемы на транзисторе является инвертор, показанный на рис. 1. В исходном состоянии при $U_{\text{вх}} = 0$ транзистор заперт, коллекторный ток пренебрежимо мал, напряжение на выходе примерно равно $E_{\text{к}}$. Подача на вход схемы отпирающего импульса отрицательной полярности переводит транзистор в состояние с низким сопротивлением участка эмиттер - коллектор и на выходе получается импульс отрицательной полярности, напряжение скачком повышается до 0. Таким образом, входное и выходное напряжения в этой схеме изменяются в противофазе, то есть низкому входному уровню соответствует высокий выходной и наоборот, как показано на рис. 4. Схемотехнический элемент с такими свойствами и получил название инвертора.

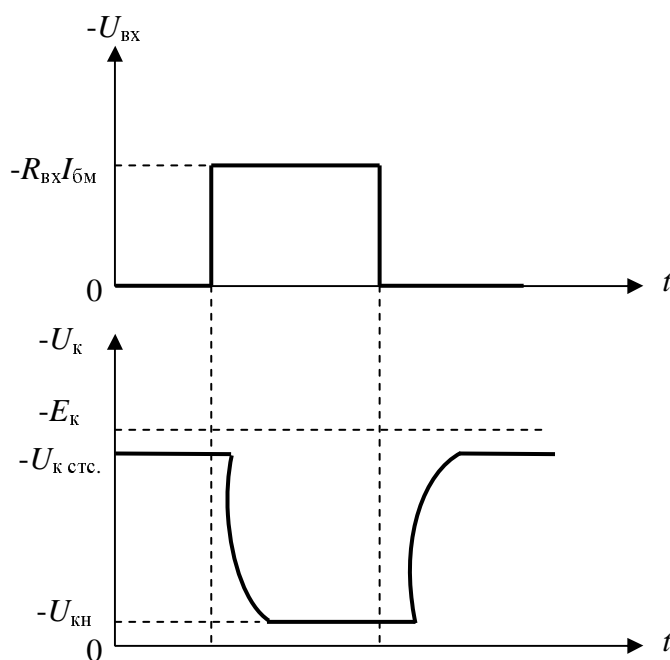


Рис. 4 Временные диаграммы входного и выходного напряжений в транзисторном инверторе

Инвертор имеет самостоятельное и важное значение в цифровой схемотехнике. На основе инвертора могут быть выполнены различные функциональные элементы цифровой техники.

2.4 Триггер

Триггером называется бистабильная схема (схема с двумя устойчивыми состояниями), которая переходит из одного состояния в другое под действием внешних переключающих импульсов.

Триггеры широко применяются в цифровых устройствах для деления частоты, хранения информации, счета числа импульсов и др. целей.

Так называемый симметричный триггер (или *RS*-триггер) получается, если включить последовательно два инвертора и охватить их положительной обратной связью, соединив выход схемы со входом, как показано на рис. 5.

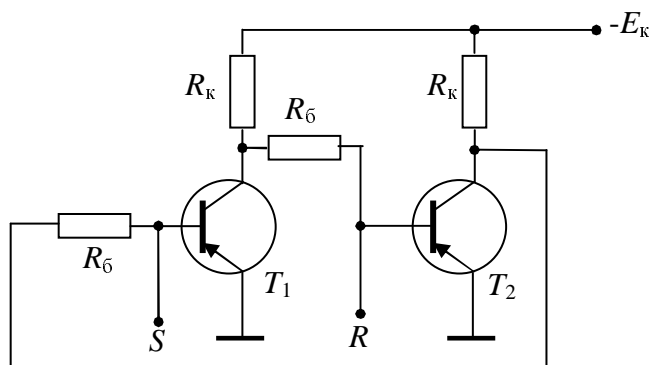


Рис. 5 Схема *RS*-триггера

В каждом инверторе выходной сигнал противофазен входному. Поэтому выходной сигнал второго инвертора синфазен с входным сигналом первого инвертора, что и обуславливает положительную обратную связь. Поскольку оба инвертора на рис. 5 равноправны, схему можно представить в симметричном виде (рис. 6). *RS*-триггер имеет два входа, обозначаемые как R и S и два выхода Q и \bar{Q} . Если на входе Q устанавливается высокий уровень напряжения ("1"), то на выходе \bar{Q} — низкий ("0"), или наоборот.

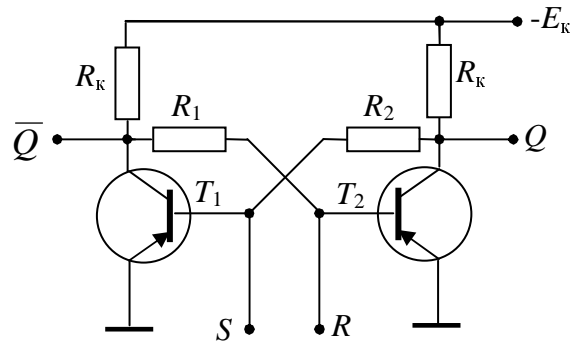


Рис. 6 Схема *RS*-триггера на БТ

Принцип действия триггера заключается в следующем. Если на вход S подано отрицательное напряжение, то транзистор T_1 открывается. Потенциал его коллектора падает (по абсолютной величине) приближаясь к нулю. Этот потенциал через резистор R_1 передается на базу транзистора T_2 . Потенциал базы T_2 также приближается к нулю, т.е. к потенциалу эмиттера. Поэтому транзистор T_2 – закрывается. При этом отрицательный потенциал его коллектора увеличивается. Через резистор R_2 это увеличение передается на базу транзистора T_1 , что вызывает более интенсивное открывание этого транзистора. Устойчивое состояние будет достигнуто, когда транзистор T_1 будет открыт до состояния насыщения, а транзистор T_2 закрыт до состояния отсечки. При этом на выходе Q будет высокий уровень напряжения, а на выходе \bar{Q} – низкий. После достижения этого состояния отрицательное напряжение со входа S может быть снято, а состояние триггера не изменится. Схему триггера можно "опрокинуть" в обратную сторону, подав отрицательный импульс на вход R или положительный импульс на вход S .

Если отрицательное напряжение подается сразу на оба входа R и S , то открываются оба транзистора. Однако такое состояние не является устойчивым. После снятия входного напряжения в силу неабсолютной симметрии схемы один из транзисторов приходит в открытое состояние,

а другой – в закрытое. Однако нельзя заранее определенно сказать, какое из двух возможных состояний триггера установится. Поэтому подача сигнала переброса сразу на два входа считается логически недопустимой.

Припишем наличию отрицательного сигнала на входе символ "1", а его отсутствию – символ "0". Высокий уровень напряжения на выходе будем считать "1", а низкий уровень – "0". Тогда таблица переключений RS – триггера будет иметь вид:

Таблица

| R | S | Q | \bar{Q} |
|-----|-----|-------------|-----------|
| 1 | 1 | недопустимо | |
| 1 | 0 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | не меняется | |

Последняя строка таблицы показывает, что без воздействия входного сигнала установленное состояние триггера может сохраняться сколь угодно долго, что и определяет возможность применения триггера в качестве элемента хранения информации (памяти).

Условие устойчивой работы триггера изображенного на рис. 6, при условии $R_1 = R_2$ выражается формулой

$$R_1 \leq \beta R_K \quad (20)$$

Напряжения на коллекторе открытого транзистора $U_{ко}$ и закрытого транзистора $U_{кз}$ (выходные напряжения) выражаются формулами

$$U_{ко} = E_K - I_{кн} \cdot R_K \approx 0 \quad (21)$$

$$U_{кз} = -(E_K - I_{ко} R_K) \frac{R_1}{R_1 + R_K} \approx -E_K \frac{R_1}{R_1 + R_K}. \quad (22)$$

Важным параметром триггера является скорость опрокидывания, которая определяет быстродействие триггера. Для ускорения опрокидывания схемы желательно на время переходного процесса увеличить ток базы отпираемого транзистора. С этой целью резистор R_1 шунтируют

так называемой "убыстряющей" емкостью C . В. начальный период опрокидывания эта емкость вносит очень низкое сопротивление, что вызывает большое приращение тока базы отпираемого транзистора за счет изменения тока коллектора запираемого транзистора. Аналогичным образом шунтируют емкостью C и резистор R_2 . Оптимальная величина "убыстряющей" емкости, при которой обеспечивается максимальное быстроедействие $C_{\text{опт}} = \frac{0,3}{f_{\alpha} R_k}$, где f_{α} – граничная частота. При таком выборе емкости C максимальная частота переключения триггера может быть оценена приближенной формулой $f_{\text{max}} \approx 0.7 \cdot f_{\alpha}$.

Рассмотренный способ переключения триггера с разных входов называется раздельным запуском. При наличии в триггере убыстряющих емкостей C может быть осуществлен так называемый общий или счетный запуск, при котором импульсы одной полярности подаются на один общий вход.

На рис. 7 приведена схема триггера с общим запуском на базы транзисторов. Управляющие импульсы одной полярности подаются на базы сразу обоих транзисторов, через разделительные диоды D . При этом каждый последующий импульс переводит триггер в состояние, противоположное предыдущему.

В данной схеме "убыстряющие" емкости, кроме обычной функции ускорения опрокидывания, выполняют и другую принципиальную функцию. При их отсутствии состояние триггера после подачи управляющего импульса на базы обоих транзисторов будет случайным. Включение же этих ёмкостей приводит к тому, что они "запоминают" предыдущее состояние триггера и определяют направление его опрокидывания. Следовательно, наличие емкостей C в данной схеме является обязательным.

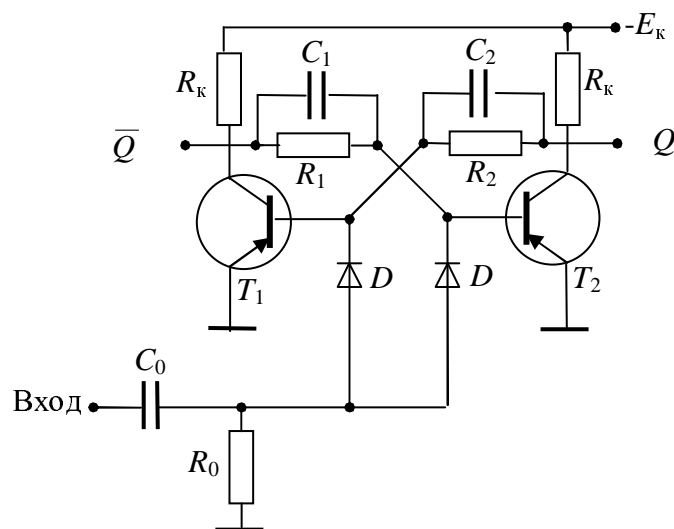


Рис. 7 Схема RS-триггера со счетным запуском

Триггеры со счетным запуском применяются в качестве счетных ячеек, делителей частоты и других устройств. Быстродействие триггера со счетным запуском приблизительно в два раза меньше, чем для триггера с раздельным запуском и может быть определено по приближенной формуле $f_{max} \approx \frac{1}{3} f_{\alpha}$

На рис. 6 и 7 приведены простейшие схемы RS-триггера, так называемого триггера без смещения. Практически часто используют более сложные схемы. Однако принцип их работы подобен принципу работы описанной здесь схемы.

2.5 Одновибратор

Одновибратор имеет одно стабильное состояние. Второе возможное состояние стабильно только в течение некоторого интервала времени, зависящего от параметров схемы. По истечению этого интервала времени схема вновь возвращается в исходное стабильное состояние.

Одновибратор называют еще моностабильной релаксационной схемой, спусковой схемой, моностабильным триггером.

Одновибратор представляет собой RS -триггер, в котором один из резисторов положительной обратной связи заменен конденсатором (рис. 8). В исходном состоянии транзистор T_2 открыт отрицательным напряжением, поступающим на базу T_2 через резистор R . На выходе Q , напряжение низкого уровня. При подаче на вход отрицательного импульса транзистор T_1 , до этого закрытый, открывается, потенциал его коллектора падает (по абсолютной величине) почти до нуля и конденсатор C начинает заряжаться. Ток заряда протекает через резистор R , на котором падают почти все напряжение и потенциал базы T_2 также понижается почти до нуля. Поэтому транзистор T_2 закрывается, а напряжение на его коллекторе скачком возрастает до высокого уровня.

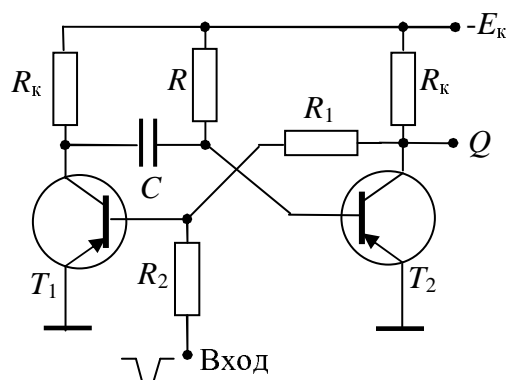


Рис. 8 Схема одновибратора

После полного заряда конденсатора C схема возвращается в исходное состояние, так как ток через резистор R прекращается, напряжение на нем не падает и потенциал $-E_k$ прикладывается к базе T_2 , закрывая его.

Длительность выходного импульса высокого уровня совпадает с временем заряда конденсатора и равна $t_{и} = RC \cdot \ln 2$. Эта формула справедлива при условии, что длительность входного импульса меньше времени $t_{и}$.

2.6 Мультивибратор

Если в схеме одновибратора входной резистор обратной связи также заменить конденсатором (рис. 9), то оба возможных состояния схемы будут стабильными только в течение определенного интервала времени. Следовательно, такая схема, называемая мультивибратором, будет непрерывно опрокидываться из одного состояния в другое, генерируя на выходе импульсы.

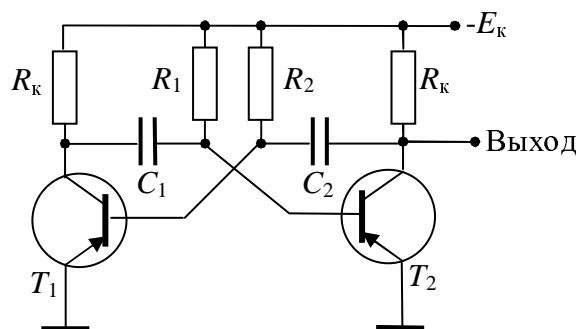


Рис. 9 Схема мультивибратора

В общем случае длительности двух состояний могут быть различными. Они определяются выражениями

$$t_1 = R_1 C_1 \ln 2 \text{ и } t_2 = R_2 C_2 \ln 2. \quad (23)$$

Если $R_1 = R_2$, $C_1 = C_2$, то период колебаний T мультивибратора будет равен

$$T = t_1 + t_2 = 2RC \ln 2. \quad (24)$$

При расчете мультивибратора необходимо обеспечить выполнение условия, что в состоянии насыщения ток коллектора не должен превышать максимально допустимой величины $I_K \leq I_{K \max}$ ($I_{K \max}$ – справочная величина). Поскольку в состоянии насыщения оба перехода одного из транзисторов открыты, то токи коллектора и базы определяются напря-

жением источника питания и сопротивлениями R_k и R_1 (R_2). Отсюда следует условия

$$R_k \geq \frac{E_k}{I_{k \max}} \quad (25)$$

$$R_1(R_2) \geq \beta \frac{E_k}{I_{k \max}} \quad (26)$$

3 Экспериментальная часть

3.1 Экспериментальная установка

Схема экспериментальной установки для исследования ключевого режима работы БТ показана на рис. 10. Потенциометр R_0 позволяет изменять ток базы. С помощью миллиамперметров mA_1 , mA_2 измеряются токи базы I_b и коллектора I_k , соответственно. Переключатель П позволяет изменять сопротивление нагрузки R_k . Клеммы "Вх" предназначены для подачи входного сигнала от импульсного генератора. С клемм "Вых" можно снять выходной сигнал для просмотра на осциллографе или измерения напряжения $U_{\text{вых}}$. Измерение выходного напряжения производится электронным вольтметром типа В7-26. Напряжение питания составляет $E_k = 5$ В. Исследуется транзистор типа МП16Б.

При исследовании других транзисторов режимы измерений должны выбираться в соответствии со справочными данными на конкретный прибор.

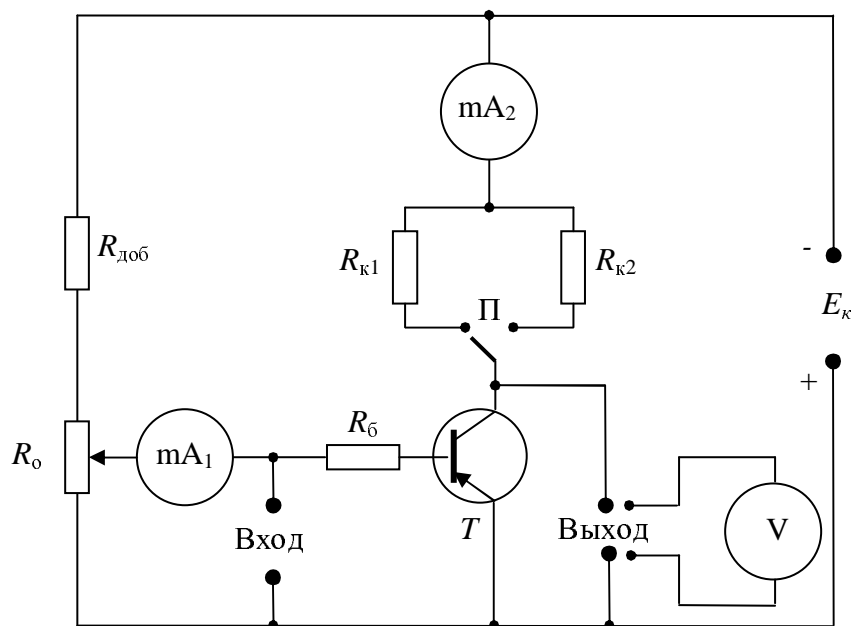


Рис. 10

В работе изучаются также макеты триггера и мультивибратора, собранные на БТ. Принципиальные схемы этих устройств приведены на панели этих макетов.

3.2 Порядок выполнения работы

1. Снять зависимости тока коллектора от тока базы при $E_K = const$ для двух значений R_K , изменяя I_B от 0 до 450 мкА через 50 мкА. Построить графики $E_K(I_B)$. Определить на них области отсечки и насыщения.
2. Измерить напряжения на выходе транзистора $U_{ВЫХ}$ в состоянии отсечки и насыщения $U_{ВЫХ}^1$ и $U_{ВЫХ}^0$ при двух значениях R_K .
3. По полученным графикам рассчитать значение β транзистора по формуле (2) и напряжений низкого $U_{ВЫХ}^0$ и высокого $U_{ВЫХ}^1$ уровня по формулам (16) и (17) для двух значений R_K .

Сравнить рассчитанные значения $U_{\text{ВЫХ}}^0$ и $U_{\text{ВЫХ}}^1$ с измеренными экспериментально в предыдущем пункте.

4. На плоскости $(I_{\text{к}}, U_{\text{к}})$ построить нагрузочные прямые для двух значений $R_{\text{к}}$, отметить на ней точки перехода в режим насыщения, используя зависимости $I_{\text{к}}(I_{\text{б}})$.
5. Включить схему триггера и пронаблюдать его работу при запуске с общего и отдельных входов. Объяснить работу триггера.
6. Включить схему мультивибратора. Определять период его колебаний. По известному значению $R_1 = R_2 = 20 \text{ кОм}$ рассчитать величину емкости $C = C_1 = C_2$ по формуле (24).

Контрольные вопросы

1. Какой режим работы БТ называется ключевым?
2. Покажите на плоскости выходных характеристик БТ рабочие точки ключевого режима работы.
3. Нарисуйте форму импульса коллекторного тока при воздействии на базу транзистора прямоугольного импульса напряжения.
4. Какие процессы происходят в транзисторе после начала действия входного отпирающего импульса?
5. Какие процессы происходят в транзисторе после окончания действия входного отпирающего импульса?
6. Каким образом представляется информация в современных цифровых схемах?
7. Какая схема в цифровой технике называется инвертором?
8. Напишите формулы для выходного напряжения низкого и высокого уровней инвертора на БТ.
9. Нарисуйте схему простейшего триггера и объясните принцип его работы
10. Каково функциональное назначение триггера?

11. Что такое одновибратор?
12. Что такое мультивибратор, каково его функциональное назначение?
13. Как определяется период колебаний симметричного мультивибратора?

Литература

1. Пасынков В.В., Чиркин Л.К. Полупроводниковые приборы М.: Высшая школа, 1987.
2. Тугов Н.М., Глебов Б.А., Чарыков Н.А. Полупроводниковые приборы М.: Энергоатомиздат, 1990.
3. Степаненко И.П. Основы теории транзисторов и транзисторных схем М.: Энергия, 1973.