

В. С. Усов, Б. А. Мартынов, Ю. Н. Новиков

**ТРАНЗИСТОРНЫЕ УСИЛИТЕЛИ,
КЛЮЧИ, ИМПУЛЬСНЫЕ УСТРОЙСТВА**

Учебное пособие и методические указания к лабораторным работам

Часть II

**ТРАНЗИСТОРНЫЕ КЛЮЧИ И
УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ**

Санкт-Петербург
2005

Описание процессов в транзисторном ключе и импульсных устройствах

1. Транзисторный ключ

Переключающие схемы, кратко именуемые *ключами*, — необходимые элементы практически всех импульсных и цифровых устройств. В одной из простейших реализаций ключа используется *транзисторный каскад с общим эмиттером (ОЭ)*, представленный на рис. 2.1. Зависимость напряжения на выходе каскада (u_k) от управляющего напряжения, подаваемого на вход (e_y), называют *характеристикой передачи напряжения* или *передаточной характеристикой ключа* (рис. 2.2).

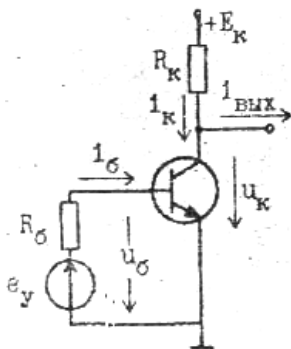


Рис 2.1. Транзисторный ключ (каскад с общим эмиттером)



Рис. 2.2 Передаточная характеристика ключа

Передаточная характеристика иллюстрирует изменение состояний транзистора. Действительно, по мере увеличения напряжения на базе транзистор оказывается в разных режимах, которым соответствуют характерные области на передаточной кривой. Это:

- *режим отсечки* (на кривой — *область отсечки*); эмиттерный и коллекторный переходы транзистора заперты;
- *режим усиления* (на кривой — *активная область*); эмиттерный переход открыт, а коллекторный заперт;
- *режим насыщения* (на кривой — *область насыщения*); оба перехода открыты.

Поскольку для транзисторного ключа, построенного по схеме ОЭ, рост входного напряжения приводит к уменьшению выходного, его называют *ключом-инвертором*.

Если выходной ток каскада $i_{\text{вык}}$ пренебрежимо мал (ненагруженный ключ), передаточную характеристику сравнительно несложно получить при помощи входных и выходных характеристик биполярного транзистора (рис. 2.3) и соотношений

$$e_y - u_б = R_б i_б, \quad E_k - u_k = R_к i_к.$$

На рис. 2.3, б последнему уравнению соответствует наклонная прямая, отсекающая на координатных осях отрезки E_k и $E_k/R_к$.

По мере увеличения управляющего напряжения обеспечивается базовый ток, достаточный для *насыщения транзистора*. Транзистор оказывается в режиме насыщения, то есть, открыт. Имеем состояние ключа: включено. Напряжение коллектор-эмиттер в режиме насыщения ($u_{\text{кн}}$) очень мало (как и положено для замкнутого ключа). В случае кремниевых транзисторов можно считать $u_{\text{кн}} \approx 0,2$ В. Коллекторный ток в режиме насыщения $i_{\text{кн}}$ принимает значения, лежащие на *линии критического режима*. Как можно увидеть (см. рис. 2.3, б), он равен $i_{\text{кн}} \approx E_k/R_к$. На рис. 2.3, б особой линией выделена выходная характеристика при токе базы, равном наименьшему значению $i_{\text{бн}}$, необходимому для насыщения транзистора. Известно, что $i_к = \beta i_б$, где β — коэффициент передачи тока базы. Отсюда имеем $i_{\text{бн}} = i_{\text{кн}}/\beta$. «Глубину» насыщения транзистора в состоянии включено характеризуют отношением $i_б/i_{\text{бн}}$, которое называют *степенью*

насыщения транзистора. С одной стороны, транзистор должен быть надежно открыт, однако глубокое насыщение транзистора обычно нежелательно из-за снижения быстродействия ключевого каскада (об этом речь пойдет позднее). Обычно на практике степень насыщения транзистора ограничивают пределами: от 1,5 до 3.

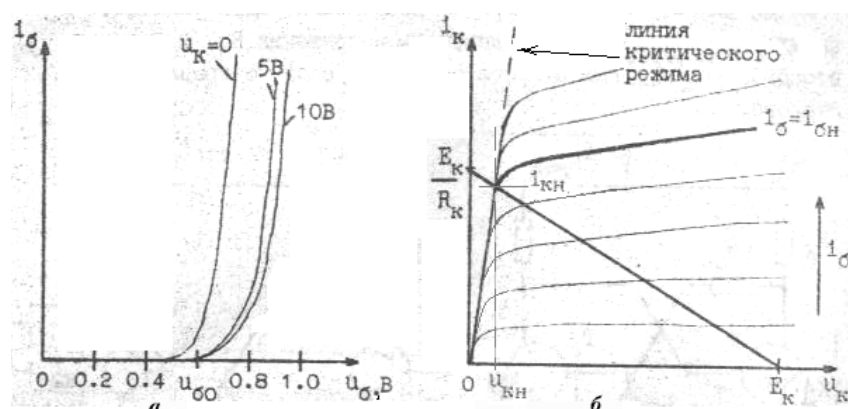


Рис. 2.3. Входные (а) и выходные (б) характеристики транзистора

При управляющих напряжениях, для которых u_b меньше напряжения отсечки $u_{б0}$, коллекторный ток очень мал, практически отсутствует. В этом случае транзистор можно считать *запертым* (состояние ключа выключено). Для кремниевых транзисторов напряжение отсечки $u_{б0} \approx 0,6$ В.

В импульсных и цифровых устройствах транзистор обычно используется в *ключевых режимах*. Большую часть времени он выполняет функцию ключа: находится в состояниях включено и выключено. Промежуточные состояния относятся к *активной области* передаточной характеристики (см. рис. 2.2). При смене состояний ключевого режима (при переключениях) транзистор кратковременно оказывается в *режиме усиления*. Крутизна участка активной области передаточной характеристики тем выше, чем больше коэффициент усиления каскада с ОЭ, который на этом участке «превращается» в *линейный усилитель*.

ПРИМЕЧАНИЕ

Полезно для оценок иметь в виду характерные для кремниевых приборов численные значения. В режиме отсечки (выключено): $u_b < 0,6$ В, $u_k = E - R_k i_{\text{вых}}$, для ненагруженного ключа $i_{\text{вых}} = 0$ и $u_k = E$; в режиме насыщения (включено): $u_b \approx 0,6-0,8$ В, $u_k = u_{кн} \approx 0,2$ В.

2. Импульсные устройства на основе транзисторного ключа

В данном пособии главное внимание уделено применению ключей в импульсных устройствах. Далее рассматриваются характерные импульсные устройства разного принципа действия и назначения. Все они содержат транзисторные ключи на биполярных транзисторах и цепи, обеспечивающие обратную связь. Перечислим эти устройства.

Триггеры

Это — устройства с двумя устойчивыми состояниями, которые скачком изменяются под воздействием входных сигналов. Различные модификации триггеров относятся к числу основных элементов импульсной и цифровой техники. Их используют в качестве ячеек памяти, амплитудных дискриминаторов, в пересчетном режиме и для других целей. Далее рассматривается разновидность триггера, называемая *триггером Шмитта*. В триггере Шмитта управление состояниями на выходе осуществляется сигналом, подключенным к единственному входу. Триггер Шмитта обычно используют в качестве *компаратора* — устройства, изменяющего состояние на выходе при переходе входного сигнала через определенные пороговые уровни.

Однотактные релаксаторы, ждущие мультивибраторы, таймеры

Так называют устройства, которые могут находиться в устойчивом состоянии и оно единственное. Внешним сигналом, действующим на входе, ждущий мультивибратор

выводится из устойчивого состояния и далее в него возвращается, вырабатывая импульсное напряжение (ток) определенной формы. Форма и параметры выходного импульса, в частности, его длительность, определяются параметрами цепей устройства. Изменяя параметры элементов цепи, можно формировать импульсы нужной длительности.

Мультивибраторы

Так обычно именуют *автогенераторы*, вырабатывающие периодические колебания, форма которых существенно отличается от синусоидальной (насыщена гармониками). Форма и временные характеристики периодического процесса (период колебаний, длительность отдельных интервалов) определяются параметрами цепей мультивибратора.

3. Триггер Шмитта

На рис. 2.4, а показан *триггер Шмитта*, реализованный путем каскадного соединения двух ключей, замкнутых «кольцом». Выход первого ключа (на транзисторе T_1) через делитель напряжения R_c, R_b связан с входом второго (на транзисторе T_2), а нагрузкой второго ключа является вход первого. Триггер (по определению) — устройство с двумя устойчивыми состояниями. Выясним сначала, в каких состояниях может находиться это устройство при управляющем напряжении $e_y=0$. Анализ удобно начать с рассмотрения каскадного соединения тех же ключей при разорванной обратной связи (рис. 2.4, б). Чтобы не нарушить условия, существующие для протекания токов в исходной цепи, нагрузим второй каскад на сопротивление, равное входному сопротивлению первого каскада. (На рисунке этот фрагмент схемы выполнен штриховыми линиями.)

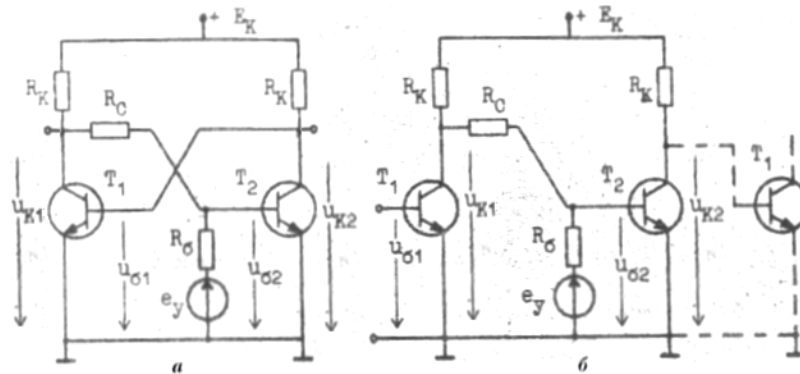


Рис. 2.4. Триггер Шмитта (а) и каскадное соединение ключей в отсутствие обратной связи (б)

Предположим, что передаточные характеристики ключей известны, тогда последовательно (по каскадам) рассматривая передачу напряжения в схеме, показанной на рис. 2.4, б, можно получить зависимость напряжения u_{k2} от напряжения u_{b1} . Будем считать, что при $e_y=0$ эта зависимость выглядит так, как показано сплошной линией на рис. 2.5. При значениях u_{b1} , соответствующих наиболее крутому, практически прямолинейному участку зависимости $u_{k2}(u_{b1})$, рассматриваемая двухкаскадная схема является *линейным* (пропорциональным) *усилителем* с *коэффициентом усиления* $K = du_{k2}/du_{b1}$. Нижнему ($u_{k2} \approx U_2^0$) и верхнему ($u_{k2} \approx U_2^1$) пологим участкам графика $u_{k2}(u_{b1})$ соответствуют открытое и закрытое состояния транзистора T_2 .

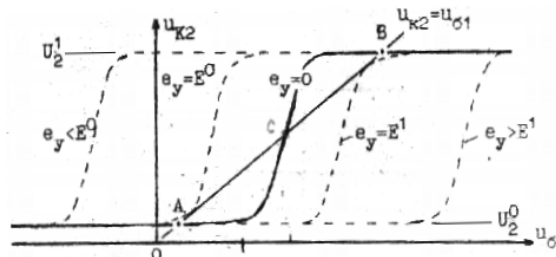


Рис. 2.5 Определение равновесных состояний триггера

Из рис. 2.5 видно, что каскадное соединение двух ключей-инверторов ведет себя как *неинвертирующий ключ (ключ-повторитель)*. Понятно, что при $e_y > 0$ для запираания транзистора T_2 нужно подавать большее, чем при $e_y = 0$, входное напряжение $u_{б1}$. При $e_y < 0$ имеет место обратная ситуация. Отсюда следует, что зависимостью $u_{к2}$ от $u_{б1}$ можно управлять путем изменения напряжения e_y (см. рис. 2.5).

Обратимся теперь к исходной схеме (см. рис. 2.4, а). Для нее остается в силе связь между $u_{к2}$ и $u_{б1}$, полученная для каскада ключей без обратной связи. Наряду с этим, благодаря непосредственному соединению коллектора второго транзистора с базой первого, имеем дополнительно: $u_{б1} = u_{к2}$. Таким образом, при наличии обратной связи напряжения $u_{б1}$ и $u_{к2}$ не могут принимать других значений, помимо тех, которые определяются координатами точек пересечения характеристики $u_{к2} = f(u_{б1})$ и прямой $u_{к2} = u_{б1}$. Предположим, что при $e_y = 0$ имеются три такие точки. (Легко видеть, что случай трех точек пересечения возможен лишь при коэффициенте усиления $K > 1$.) Это означает, что данное устройство может находиться в трех состояниях (*в состояниях равновесия*), характеризующихся разными значениями напряжений на коллекторах и базах транзисторов. Однако можно показать, что *устойчивыми состояниями равновесия* оказываются только крайние точки А и В (см. рис. 2.5), а средняя точка С соответствует *неустойчивому равновесию*. Неустойчивость точки С вытекает, в частности, из того, что в этой точке *коэффициент петлевого усиления* усилителя, охваченного положительной обратной связью, больше единицы. Таким образом при $e_y = 0$ исследуемое устройство обладает двумя устойчивыми состояниями, следовательно, является *триггером*. В рассмотренном примере в состоянии А транзистор T_1 заперт, транзистор T_2 открыт, в состоянии В — наоборот, транзистор T_1 открыт, а транзистор T_2 заперт. Напряжение $u_{к2}$ в состояниях А и В принимает значения, относящиеся соответственно к нижнему U_2^0 и верхнему U_2^1 уровням потенциала (см. рис. 2.5). Аналогичные уровни («верхний» U_1^1 в состоянии А и «нижний» U_1^0 в состоянии В) можно ввести в рассмотрение для напряжения $u_{к1}$.

На рис. 2.5 показано, что при управляющем напряжении e_y , превышающем определенное значение E^1 , у триггера имеется только одно состояние равновесия, соответствующее нижнему уровню напряжения $u_{к2}$. Отсюда вытекает возможность перевода триггера из состояния В в состояние А путем временной подачи положительного (отпирающего) напряжения на базу запертого транзистора T_2 . Для обратного перевода триггера — из состояния А в состояние В — требуются управляющие напряжения, которые закроют открытый транзистор T_2 : $e_y < E^0$. Значения E^1 и E^0 называют *верхним и нижним порогами срабатывания*, а переход триггера из одного состояния в другое — *опрокидыванием*. Отметим, что опрокидывание — быстрый процесс. Его скорость определяется скоростью переключения транзисторов.

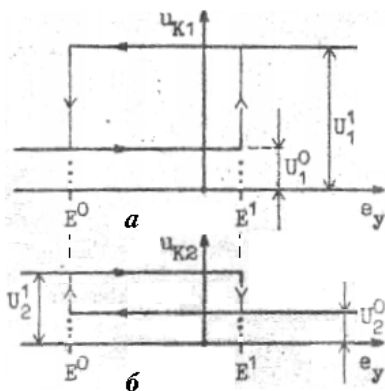


Рис. 2.6. Передаточные характеристики триггера Шмитта для прямого (а) и инверсного (б) выходов

Выходами триггера являются выводы коллекторов и корпус. Выход, соединенный с коллектором транзистора T_1 , называют *прямым*, или *неинвертирующим*, а тот, что соединен с коллектором T_2 — *инверсным*, *инвертирующим*. *Передаточные характеристики триггера Шмитта*, изображенные на рис. 2.6 для прямого и инверсного выходов, выглядят как *гистерезисные петли*. Ширина петель определяется разностью напряжений *порогов срабатывания* $E^1 - E^0$. Гистерезисный эффект является следствием разных значений порогов срабатывания для опрокидывания «вверх» и «вниз». После скачка выходного напряжения порог срабатывания также скачком изменяется. В противном случае — если бы порог был

единственным (при вырождении петли гистерезиса в линию) — слабые флуктуационные изменения входного напряжения вблизи порогового значения приводили бы к хаотическим скачкам (*дребезгу*) напряжения на выходе.

Рис. 2.7 иллюстрирует применение триггера Шмитта для преобразования синусоидальных колебаний в прямоугольные импульсы. Хорошо видно, что значения синусоидального напряжения, при которых происходит опрокидывание выходного напряжения вверх и вниз, отличаются. Они соответствуют разным уровням порогов срабатывания.

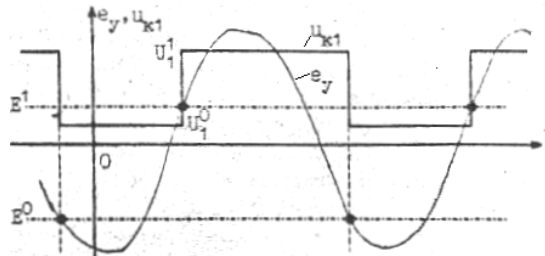


Рис. 2.7. Напряжения на входе и выходе триггера Шмитта в режиме формирования прямоугольного напряжения

ПРИМЕЧАНИЕ

Триггеры Шмитта опрокидывают отпиранием (включением) или запирающим (выключением) одним и тем же ключом. В других разновидностях триггеров (в частности в *RS-триггере*) для опрокидывания воздействуют на разные ключи, входящие в состав устройства.

4. Однотактный релаксатор, ждущий мультивибратор

На основе каскадного соединения двух ключей, охваченных обратной связью, можно реализовать устройство с одним устойчивым состоянием равновесия, вырабатывающее одиночный импульс при соответствующем внешнем воздействии (запуске). Такое устройство имеет несколько названий, используемых в литературе: *спусковая схема с одним устойчивым состоянием, однотактный релаксатор, мультивибратор, реле времени, таймер, ждущий мультивибратор*.

Однотактный релаксатор (рис. 2.8) структурно напоминает триггер Шмитта (рис. 2.4, а), только непосредственная связь коллектора T_2 с базой T_1 заменена связью через конденсатор C . Если схема, представленная на

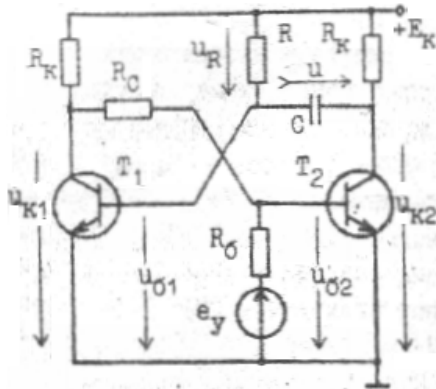


Рис. 2.8. Однотактный релаксатор

рис. 2.8, в течение продолжительного времени не подвергается внешним воздействиям, она окажется в состоянии равновесия. В этом состоянии транзистор T_1 открыт, а транзистор T_2 заперт. Действительно, если нет внешнего воздействия ($e_y=0$), напряжение u_{B2} оказывается малым. Напряжение на конденсаторе u_C при этом приблизительно равно $-E_K$. (Коллекторный ток через закрытый транзистор T_2 не течет, а напряжение u_{B1} на эмиттерном переходе открытого транзистора T_1 примерно равно 0,6 В, и по сравнению с E_K его можно считать пренебрежимо малым.)

Пусть в момент времени $t=0$ на базу транзистора T_2 подается отпирающий положительный импульс (рис. 2.9). В первом приближении допустимо считать, что в результате отпирания напряжение u_{k2} упадет практически до нуля. Тогда, поскольку напряжение u_C не может измениться мгновенно, напряжение u_{B1} станет равным $u_C(0)=-E_K$ и транзистор T_1 заперется. В итоге произойдет опрокидывание схемы. Теперь транзистор T_2 по цепи положительной обратной связи будет поддерживаться в открытом состоянии, даже если входное (управляющее) напряжение станет равным нулю.

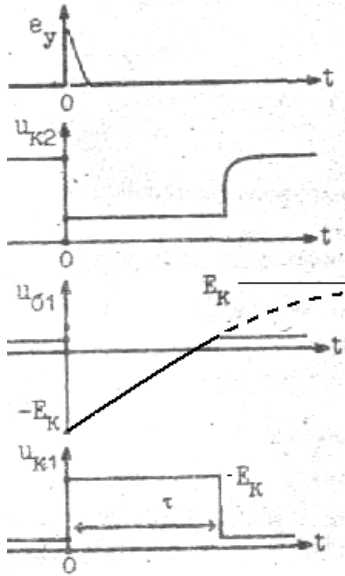


Рис. 2.9. Временная диаграмма работы одноконтурного релаксатора

нетрудно найти длительность импульса, формируемого схемой: $\tau \approx RC \ln 2 \approx 0,7 RC$. На рис. 2.9 приведена временная диаграмма напряжений в различных точках схемы.

ПРИМЕЧАНИЕ

Кроме рассмотренного варианта одноконтурного релаксатора находят применение также схемы с эмиттерной связью и другие.

5. Автоколебательный мультивибратор

Установив в схеме одноконтурного релаксатора (рис. 2.8) вместо резистора обратной связи R_c второй конденсатор, получим устройство, называемое *мультивибратором* (рис. 2.10). Если эту цепь однажды возбудить, она станет в последующем непрерывно опрокидываться из одного состояния в другое, то есть поведет себя как автоколебательная система (*автогенератор*).

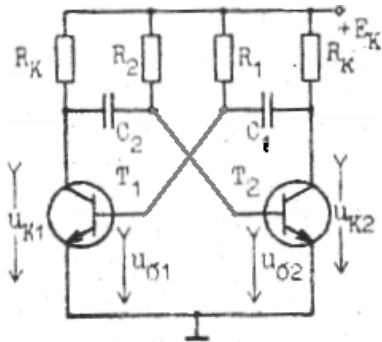


Рис. 2.10. Мультивибратор

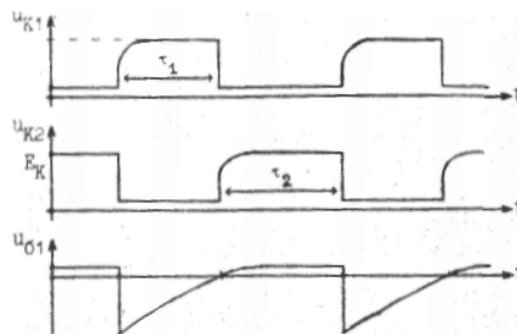


Рис. 2.11. Временная диаграмма работы мультивибратора

Поведение напряжений во времени в различных точках мультивибратора демонстрируется на рис. 2.11. Для приближенного вычисления длительностей выходных импульсов применимы формулы: $\tau_1 = R_1 C_1 \ln 2$, $\tau_2 = R_2 C_2 \ln 2$.

В представленной на рис. 2.10 схеме после запираания транзистора напряжение на его коллекторе не сразу достигает максимального значения E_k , поскольку должно пройти время, чтобы зарядился конденсатор, подключенный к этому коллектору. В результате форма выходного напряжения существенно отличается от прямоугольной.

Неудачный выбор параметров элементов схемы может вызвать дополнительное искажение формы выходного напряжения. Покажем, например, что при $R_2 > BR_k$ (B — коэффициент передачи тока базы) может получиться «двухступенчатая» форма импульса напряжения $u_{к2}$ (рис. 2.12). Обозначения на рисунке имеют следующий смысл: $u_{к1}(t') = u_{к0}$, $i_{б2}(t'') = i_{бн}$, T — период повторения импульсов.

Данный эффект обусловлен преждевременным выходом транзистора T_2 из насыщения. Он происходит в момент t'' (см. рис. 2.12), предшествующий моменту отпирания транзистора T_1 (обозначен на рисунке символом t'). Чтобы в этом убедиться, начнем рассмотрение с момента $t=0$, в который происходит отпирание транзистора T_2 и запираание транзистора T_1 . Примем во внимание, что непосредственно после отпирания T_2 резистор R_k , подключенный к коллектору T_1 , оказывается под напряжением E_k . В

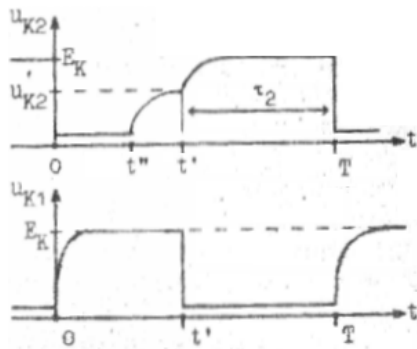


Рис. 2.12 Искажение формы напряжения $u_{к2}$ при $R_2 > BR_k$

дальнейшем происходит заряд конденсатора C_2 и напряжение на R_k экспоненциально убывает с постоянной времени $R_k C_2$. Учитывая, что ток базы T_2 складывается из токов через резистор R_2 и конденсатор C_2 , приходим к выводу, что при $0 < t < t'$, то есть пока транзистор T_1 заперт,

$$i_{б2}(t) = \frac{E_k}{R_2} + \frac{E_k}{R_k} \exp\left(-\frac{t}{R_k C_2}\right).$$

При этом, как и ранее, напряжение на эмиттерном переходе отпертого транзистора считаем пренебрежимо малым. Остается в силе и предположение о том, что сразу после отпирания транзистор T_2 насыщен, то есть $i_{б2}(0) > i_{бн}$, где $i_{бн} = i_{кн}/B = E_k/(BR_k)$ — базовый ток насыщения.

Транзистор T_1 заперт тем дольше, чем медленнее идет перезаряд конденсатора C_1 током, протекающим через резистор R_1 и транзистор T_2 , то есть чем больше постоянная времени $R_1 C_1$. Обычно выбирают $R_1 C_1 > R_k C_2$. Из формулы для $i_{б2}$ вытекает следующее. Если $E_k/R_2 < i_{бн}$ (то есть $R_2 > BR_k$), то базовый ток T_2 еще до отпирания транзистора T_1 становится равным, а затем меньшим $i_{бн}$, и транзистор T_2 выходит из насыщения. При этом отмечается некоторый рост напряжения $u_{к2}$ (см. рис. 2.12). Поскольку $i_{б2}$ стремится к $i'_{б2} = E_k/R_2$, коллекторный ток транзистора T_2 уменьшится по окончании заряда конденсатора C_2 до значения $i'_{к2} = \beta i'_{б2} = \beta E_k/R_2$. Следовательно, напряжение $u_{к2}$ вырастет до значения: $u'_{к2} = E_k - R_k i'_{к2} = E_k(1 - \beta BR_k/R_2)$, которое меньше E_k . В итоге до наступления момента t' образуется первая «ступенька» импульса, а далее начнется формирование второй «ступеньки».

Рассмотренное искажение формы напряжения $u_{к2}$ не возникает, если $E_k/R_2 < i_{бн}$, то есть $R_2 > BR_k$. При выполнении последнего условия транзистор T_2 после отпирания (и запираания транзистора T_1) остается насыщенным до тех пор, пока не откроется транзистор T_1 . Следует отметить, что при определенных начальных условиях описанный вариант мультивибратора (при R_1 и R_2 меньших BR_k) может оказаться в устойчивом состоянии равновесия. При этом оба транзистора будут в режиме насыщения. В таком случае автоколебания начнутся только под воздействием внешнего толчка, что является характерной чертой жесткого режима самовозбуждения. Если такой режим нежелателен, используют модификации автоколебательных мультивибраторов, в которых обеспечивается мягкое самовозбуждение.

6. Динамические свойства транзисторного ключа

Быстродействие описанных выше импульсных устройств ограничивается инерционностью транзисторов. Чтобы в этом убедиться, рассмотрим процессы включения и выключения транзисторного ключа под действием крутых перепадов

входного (управляющего) напряжения e_y (рис. 2.13). Пусть в момент времени $t=0$ на вход ключа (см. рис. 2.1) подается отпирающий перепад напряжения. Напряжение u_6 достигает напряжения отсечки u_{60} не мгновенно, а по истечении интервала времени τ_3 , необходимого для изменения заряда входной емкости транзистора. Этот интервал называют *временем задержки включения* транзистора или *временем подготовки*. На практике его во многих случаях измеряют как время, за которое выходное напряжение спадает на 10%, то есть до $0,9E_k$.

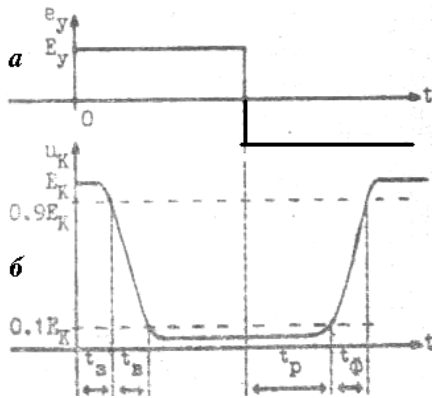


Рис. 2.13 Напряжение на входе (а) и выходе ключа (б) при отпирании и запирании

С момента $t=\tau_3$ начинается процесс отпирания, скорость которого тем больше, чем выше перепад входного напряжения E_y . За время τ_b , называемое *длительностью включения*, выходное напряжение u_k изменяется от $0,9E_k$ до $0,1E_k$, после чего в течение некоторого времени в базе транзистора продолжается накопление заряда неосновных носителей.

Пусть теперь входное напряжение скачком становится отрицательным. Транзистор должен закрыться, а напряжение на коллекторе вырасти. Но до тех пор, пока не произойдет рассасывание заряда неосновных носителей в базе, транзистор остается насыщенным и потому проводящим. *Время рассасывания* τ_p , называемое также *временем задержки*

выключения транзистора определяют по уровню $u_k = 0,1E_k$ (см. рис. 2.13). Оно тем меньше, чем меньше степень насыщения транзистора. Интервал времени τ_ϕ , в течение которого выходное напряжение u_k изменяется от $0,1E_k$ до $0,9E_k$, может быть назван *длительностью выключения*.

Время рассасывания τ_p обычно существенно превышает временные интервалы τ_3 , τ_b , τ_ϕ . Для его уменьшения используют различные способы предотвращения глубокого насыщения транзистора. Быстродействующие цифровые схемы, работающие по этому принципу, называют *ненасыщенной логикой*.

Контрольные вопросы

1. Что называется передаточной характеристикой ключа? Как связаны различные области передаточной характеристики с возможными состояниями ключа? Чем определяется напряжение на выходе ненагруженного ключа-инвертора в состоянии выключено?
2. Что называется триггером? Что называют верхним и нижним порогами срабатывания триггера, и какие можно предложить способы для их изменения? Почему передаточные характеристики триггера Шмитта имеют вид петель гистерезиса? От чего зависит ширина этих петель?
3. Если триггер Шмитта построен на кремниевых транзисторах, чему примерно равен верхний уровень потенциала на инверсном выходе (имеется в виду значение U_2^1 напряжения $u_{к2}$ на рис. 2.5)?
4. Сравните одноктактный релаксатор и триггер с точки зрения числа возможных состояний в отсутствие внешнего воздействия. Как формируется импульс в одноктактном релаксаторе? Чем определяются его амплитуда и длительность? Получите расчетную оценку длительности импульса при $R = 10$ кОм, $C = 100$ нФ.
5. Чем различаются с точки зрения условий получения импульсных напряжений одноктактный релаксатор и автоколебательный мультивибратор? Почему импульсы, генерируемые схемой, приведенной на рис. 2.10, отличаются по форме от прямоугольных?

Лабораторная работа «Транзисторные ключи и устройства на их основе»

В процессе подготовки к работе и в ходе ее выполнения студенты получают и углубляют знания принципов построения и характеристик транзисторного ключа, триггера, одноконтурного релаксатора, автоколебательного мультивибратора и приобретают умение проводить измерения и оценочные расчеты основных параметров этих устройств.

Исследуемые устройства собираются на монтажной плате, содержащей часть соединительных проводников, в том числе шину питания ($+E_k$) и шину заземления. На плате установлены биполярные $n-p-n$ транзисторы и имеются контактные гнезда для подключения резисторов, конденсаторов, измерительных приборов. Для наблюдений и измерений используются двухканальный осциллограф, генератор гармонических и прямоугольных колебаний. Приборы снабжены инструкциями по применению.

При подготовке к выполнению лабораторных работ необходимо изучить теоретический материал данной части пособия. В процессе выполнения работы составляется протокол измерений. Протокол должен иметь вид документа, в котором фиксируются этапы исследований, и который войдет составной частью в итоговый отчет. В протоколе надлежит озаглавить каждый пункт исследований, привести схемы измерений, зафиксировать параметры элементов, используемых в установке. Данные измерений следует заносить в протокол в виде таблиц или графиков на миллиметровой бумаге, а также осциллограмм, снятых на кальку. После выполнения программы работы составляется итоговый отчет, в котором приводятся схемы исследуемых устройств с указанием измерительных приборов, результаты расчетов и измерений в виде графиков, осциллограмм, численных значений и сопоставительных таблиц. Отчет должен заканчиваться выводами, в которых анализируются и объясняются полученные результаты.

Общая программа лабораторной работы

Программой работы предусмотрены:

- сборка ключа-инвертора и снятие его передаточной характеристики в автоматическом режиме с применением встроенного в осциллограф генератора напряжения развертки;
- сборка триггера Шмитта и снятие его передаточных характеристик с разных выходов;
- получение временных диаграмм для триггера Шмитта, работающего в режиме формирования прямоугольных импульсов;
- сборка одноконтурного релаксатора, получение временных диаграмм при запуске одноконтурного релаксатора от генератора прямоугольных импульсов;
- сборка автоколебательного мультивибратора, изучение влияния параметров элементов мультивибратора на форму генерируемых импульсов;
- исследование динамических свойств транзисторного ключа.

Порядок выполнения работы

1. Транзисторный ключ

1.1. Соберите транзисторный ключ, установив резисторы $R_k=1$ кОм, $R_6=10$ кОм (рис. 2.14, а). Получите на экране осциллографа и зарисуйте передаточную характеристику ключа-инвертора (рис. 2.14, б).

В качестве управляющего напряжения e_y используйте пилообразное напряжение развертки, которое снимается с соответствующих гнезд (у осциллографа С1-83 они расположены в нише на правой боковой стенке). Подайте управляющее напряжение на

вход ключа. Напряжение u_k с выхода ключа подайте на вход канала I осциллографа. Установите скорость развертки, не превышающую 10 дел/мс.

1.2 Измерьте крутизну S активной области передаточной характеристики ($S = du_k / de_y$), а также напряжение отсечки $u_{б0}$ и значения выходного напряжения $u_{к0}$ и $u_{кн}$, соответствующие областям отсечки и насыщения. Измеренные значения укажите на рисунке передаточной характеристики.

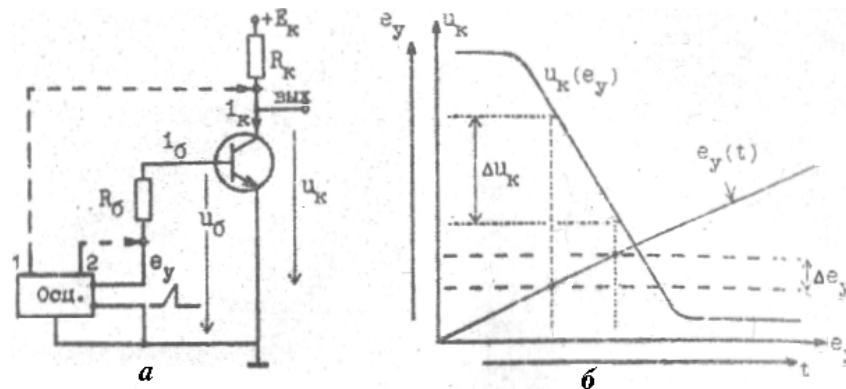


Рис. 2.14. Схема исследования транзисторного ключа (а) и его передаточная характеристика (б)

Для измерений воспользуйтесь калиброванными значениями коэффициентов отклонения каналов I и II осциллографа. (Ручки плавной регулировки усиления каналов должны быть установлены в крайнее положение при вращении по часовой стрелке.) Для калибровки отклонения луча по горизонтали напряжение развертки подайте на вход канала II. Переключатели входов осциллографа установите в положение \sim . Положения лучей при $u_k = 0$ и $e_y = 0$ определяются при временном закорачивании на корпус входов соответствующих каналов.

1.3. По измеренному значению S найдите коэффициент передачи тока базы транзистора. Воспользуйтесь для этого формулой $\beta = |S| R_б / R_к$.

2. Триггер Шмитта

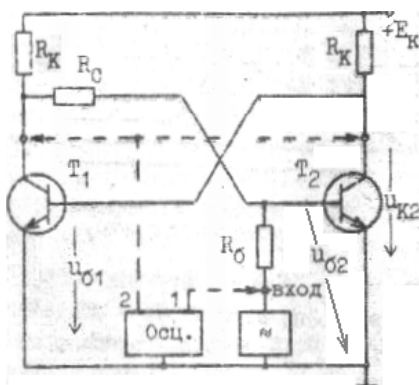


Рис. 2.15 Схема исследования триггера Шмитта

2.1. Соберите триггер Шмитта (рис. 2.15). Получите и зарисуйте передаточные характеристики триггера Шмитта для прямого и инверсного выходов при разных значениях сопротивления R_c : 10 кОм и 100 кОм.

Для обоих ключей в этом и последующих пунктах сопротивление R_k должно иметь значение 1 кОм. Подайте на вход триггера от генератора гармонических колебаний управляющее напряжение e_y частотой 100 Гц. Осциллограф переведите в режим X-Y; вход канала I подключите к входу триггера, вход канала II присоединяйте поочередно к прямому и инверсному выходам.

2.2. Измерьте значения уровней потенциала U_1^0 , U_1^1 , U_2^0 , U_2^1 и порогов срабатывания E^0 , E^1 и отметьте их на рисунках передаточных характеристик.

В отчете объясните: а) чем вызвано в случае $R_c = 100$ кОм существенное уменьшение разности $E_1 - E_0$ по сравнению со случаем другого сопротивления $R_c = 10$ кОм; б) почему в обоих случаях U_2^1 заметно меньше U_1^1 .

2.3. Получите и зарисуйте осциллограммы входного (e_y) и выходного ($u_{к1}$) напряжений триггера, работающего как формирователь прямоугольных импульсов. Отметьте на осциллограммах значения E^0, E^1, U_1^0, U_1^1 .

Исследование проводите в двухлучевом режиме осциллографа, установив в цепь триггера резистор $R_c=10$ кОм.

3. Однотактный релаксатор

3.1. Соберите схему однотактного релаксатора (рис. 2.16, а).

Установите резисторы $R_c = R = 10$ кОм и конденсатор $C = 100$ нФ. Для запуска релаксатора используйте стандартный генератор, вырабатывающий прямоугольные импульсы (меандр) с частотой повторения 500 Гц. Генератор соедините с базой транзистора T_2 конденсатором $C_\delta = 1$ нФ, при помощи которого осуществляется дифференцирование напряжения e_y — прямоугольное по форме напряжение превращается в импульсное.

3.2. Получите и зарисуйте в одном масштабе времени осциллограммы напряжений $e_y, u_{б1}, u_{к1}, u_{б2}, u_{к2}$. Измерьте длительность импульса $u_{к1}$ и сравните результат с расчетной оценкой: $\tau = 0,7 RC$.

3.3. Исследуйте связь длительности импульса релаксатора с периодом напряжения запуска e_y . Проведите измерения длительности импульса $u_{к1}$ при частотах меандра 200 Гц, 1 кГц, 2 кГц.

В отчете объясните, почему, начиная с определенных значений частоты запуска, длительность импульса отличается от той, которая получена в п. 3.2.

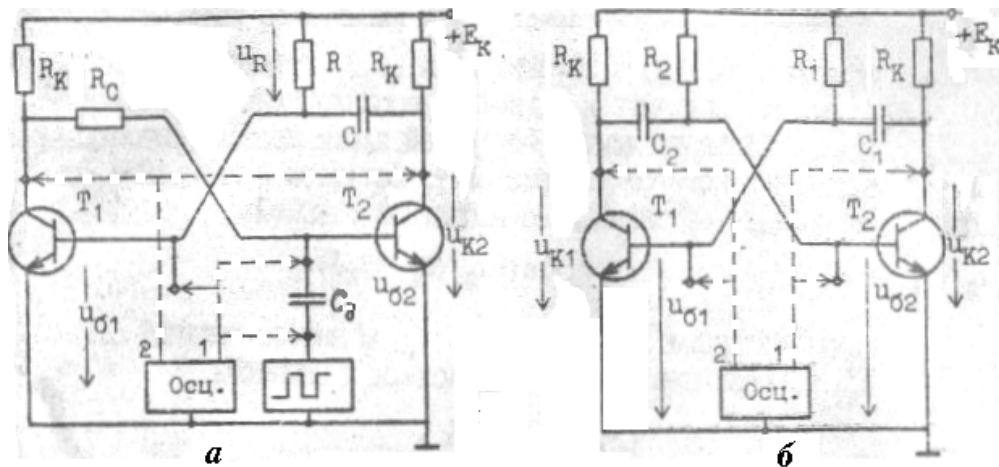


Рис. 2.16. Схемы исследования однотактного релаксатора (а) и мультивибратора (б)

4. Автоколебательный мультивибратор

4.1. Соберите схему автоколебательного мультивибратора (рис. 2.16, б), установив резисторы $R_1 = R_2 = 10$ кОм и конденсаторы $C_1 = C_2 = 100$ нФ. Используя двухлучевой режим осциллографа, получите и зарисуйте осциллограммы напряжений $u_{б1}, u_{к1}, u_{к2}$. Измерьте длительности импульсов (по основанию).

4.2. Исследуйте эффект жесткого самовозбуждения мультивибратора.

Переведите мультивибратор в состояние равновесия. Для этого сорвите автоколебания, кратковременно соединив проводником базы транзисторов. Убедитесь в жестком самовозбуждении автоколебаний, запустив мультивибратор внешним толчком. Его

можно реализовать посредством резкого изменения на короткое время параметров схемы. Можно, например, замкнуть временно какой-либо из резисторов.

4.3. Измените параметры элементов R_2 , C_2 , установив $R_2 = 100 \text{ кОм}$, $C_2 = 10 \text{ нФ}$. Получите и зарисуйте осциллограммы напряжений $u_{к2}$ и $u_{к1}$. Измерьте параметры импульсного напряжения для этого случая и сравните результаты измерений и расчетов.

Измерьте длительность той части периода автоколебаний, в течение которой транзистор T_2 остается в насыщении, и сравните ее с расчетной оценкой: $t'' = R_к C_2 \ln [BR_2 / (R_2 - BR_к)]$. Измерьте амплитуду импульсов ($E_к$) и высоту «нижней ступеньки» $u_{к2}$. Последнюю сравните с расчетной оценкой: $u'_{к2} = E_к (1 - BR_к / R_2)$.

5. Динамические свойства транзисторного ключа

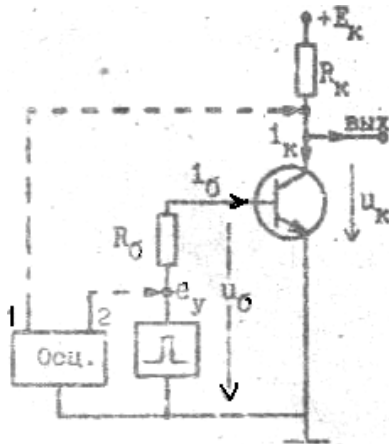


Рис. 2.17 Схема исследования динамических свойств транзистора ключа

Отметьте измеренные значения на осциллограммах.

5.1. Соберите транзисторный ключ с параметрами $R_б = 10 \text{ кОм}$, $R_к = 1 \text{ кОм}$ и подайте на его вход (рис. 2.17) управляющее напряжение e_y — меандр с высокой частотой повторения: 200 кГц. Для амплитуд входных импульсов $E_y = 4 \text{ В}$ и $E_y = 20 \text{ В}$ получите и зарисуйте на кальку осциллограммы управляющего и выходного напряжений. Проведите измерения параметров выходного импульса, характеризующих инерционность ключа (см. рис. 2.13): длительность включения ($\tau_в$) и длительность рассасывания ($\tau_р$).