

Рис. 8.1

остается закрытым, так как напряжение на барьерных емкостях переходов $C_э$ и $C_к$ мгновенно изменяться не может. Для появления базового тока необходимо, чтобы входная емкость $C_{вх} \approx C_{эб} + C_{кб}$ перезарядилась до некоторого положительного напряжения, называемого пороговым. Обычно для кремниевых транзисторов $U_{пор} = 0,6 \div 0,8$ В. Полагая, что базовый ток возрастает мгновенно до значения $I_{б1} \approx (E_B - U_{пор}) / (R_B + r_b)$, методом заряда можно показать, что ток коллектора изменяется по экспоненциальному закону с постоянной времени $\tau = \tau_b + C_k R_k (\beta + 1)$, стремясь от нуля к значению $I_{б1} \beta$ вследствие возрастания заряда в базе.

Коллекторный ток при конечном сопротивлении резистора R_k может возрасти только до значения $I_{кн} = (E_K - U_{кн}) / R_k \approx E_K / R_k$. В этот момент транзистор входит в режим насыщения. Коллекторный ток остается постоянным, а заряд в базе продолжает возрастать до значения $I_{б1} \bar{\tau}_b$ ($\bar{\tau}_b$ — среднее время жизни носителей в базовом и коллекторном слоях). Происходит накопление неосновных зарядов в базе.

При подаче запирающего тока $I_{б2}$ ток $I_k = I_{кн}$ остается постоянным до тех пор, пока заряд в базе не рассосется до граничного значения. В момент времени t_4 транзистор выходит из режима насыщения и коллекторный ток уменьшается до нуля.

Таким образом, весь процесс переключения транзистора можно разделить на три этапа: формирование фронта t_ϕ (активный режим транзистора), рассасывание заряда в базе $t_{рас}$ (режим насыщения) и формирование среза коллекторного тока t_c (активный режим).

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

8.1. Определить время задержки выходного сигнала транзисторного ключа (рис. 8.1, а) при скачкообразном изменении ба-

зового напряжения от значения $E_{r2} = -2$ В до $E_{r1} = +1$ В. Принять $C_3 = C_k = 60$ пФ, $R_r = 5$ кОм, $U_{пор} = 0,6$ В.

Ответ:

$$t_{зад} = (r_6 + R_r) C_{вх} \ln \frac{|E_{r2}| + E_{r1}}{E_{r1} - U_{пор}} \approx \\ \approx (r_6 + R_r)(C_k + C_3) \ln \frac{|E_{r2}| + E_{r1}}{E_{r1} - U_{пор}} \approx 0,6 \text{ мкс.}$$

8.2. Используя метод заряда, написать уравнения и вывести формулы для определения длительностей фронта и среза выходного импульса, а также времени рассасывания неосновных носителей в базе при скачкообразном изменении напряжения источника входного сигнала в схеме транзисторного ключа (рис. 8.1, а) от значения $-E_{r2}$ до значения $+E_{r1}$.

Ответ:

- 1) $t_\phi = \tau \ln [I_{61}\beta / (I_{61}\beta - I_{6н}\beta)] = \tau \ln S / (S - 1)$, где $\tau = \tau_\beta + C_{кб}R_k(\beta + 1)$, $I_{6н} = I_{кн}/\beta$, $I_{61} \approx (E_{r1} - U_{63}) / (R_r + r_6)$, $S = I_{61}/I_{6н}$;
- 2) $t_{рас} = \bar{\tau}_\beta \ln \frac{(I_{61} + I_{62})\beta}{I_{кн} + I_{62}\beta}$, где $\bar{\tau}_\beta \approx 0,5\tau_\beta$, $I_{62} \approx (E_{r2} - U_{63}) / (R_r + r_6)$;
- 3) $t_c = \tau \ln (I_{6н} + I_{62}) / I_{62}$.

8.3. Используя метод заряда, получить выражения для определения времен фронта, среза и рассасывания носителей в базе при переключении транзисторного ключа (рис. 8.1, а) импульсом базового тока. Передний фронт импульса базового тока нарастает по экспоненциальному закону $I_6(t) = I_{61}(1 - e^{-at})$, а задний спадает по закону $I_6(t)e^{-bt}$ (a, b — некоторые величины, обратные постоянным времени).

Решение

Для отрезка времени $t_\phi = t_2 - t_1$

$$I_k(t) = I_{61}\beta \left(1 - \frac{e^{-at} - a\tau e^{-t/\tau}}{1 - a\tau} \right)$$

Полагая $t \ll 1/a$, $t \ll \tau$, разложим функции e^{-at} и $e^{-t/\tau}$ в степенные ряды и возьмем первые три члена. Тогда после несложных преобразований получим

$$I_k = I_{61}\beta \frac{at^2}{2\tau}$$

В момент времени $t = t_2$

$$I_{кн} = I_{61}\beta \frac{at_\phi^2}{2\tau}$$

откуда

$$t_{\Phi} = \sqrt{\frac{2I_{\text{кн}}\tau}{a\beta I_{\text{б1}}}},$$

или

$$t_{\Phi} = \sqrt{\frac{2\tau}{aS}}.$$

Для отрезка времени $t_{\text{рас}} = t_4 - t_3$

$$Q(t) = \frac{I_{\text{б1}}\bar{\tau}_{\beta}}{1 - b\bar{\tau}_{\beta}} (e^{-bt} - b\bar{\tau}_{\beta}e^{-t/\bar{\tau}_{\beta}}). \quad (8.4)$$

Упростим выражение (8.4) при условии $t \ll 1/b$, $t \ll \bar{\tau}_{\beta}$, разлагая функции e^{-bt} и $e^{-t/\bar{\tau}_{\beta}}$ в ряды и ограничиваясь учетом первых трех членов каждого ряда:

$$Q(t) = I_{\text{б1}}\bar{\tau}_{\beta} [1 - bt^2/(2\bar{\tau}_{\beta})].$$

В момент выхода транзистора из режима насыщения $t = t_4$ имеем

$$Q(t_4) = I_{\text{бн}}\bar{\tau}_{\beta}.$$

Тогда

$$I_{\text{бн}} = I_{\text{б1}} [1 - bt_{\text{рас}}^2/(2\bar{\tau}_{\beta})].$$

Следовательно,

$$t_{\text{рас}} = \sqrt{\frac{2\bar{\tau}_{\beta}}{b} (1 - 1/S)}.$$

Для отрезка времени $t_c = t_5 - t_4$ получим

$$Q(t) = \frac{I_{\text{бн}}\tau}{1 + b\tau} (e^{-bt} - b\tau e^{-t/\tau}),$$

или приближенно

$$Q(t) = I_{\text{бн}}\tau (1 - bt^2/(2\tau)).$$

При этом заряд в базе уменьшается до нуля. Следовательно, $t_c = \sqrt{2\tau/b}$.

8.4. Определить длительности фронта, среза и рассасывания при переключении транзисторного ключа, нагруженного на RC-цепь (рис. 8.2), прямоугольным импульсом напряжения, изменяющимся от значения $E_{r2} = -2$ В до $E_{r1} = 1$ В. Внутреннее сопротивление генератора входного сигнала $R_r = 1$ кОм. Исходные данные для расчета: $E_{\text{к}} = 10$ В, $R_{\text{н}} = R_{\text{к}} = 1$ кОм, $C_{\text{н}} = 100$ пФ, тип транзистора МП41.

Имеем

$$t_{\phi} = \tau' \ln \frac{I_{61}}{I_{61} - I_{6H}},$$

$$t_c = \tau' \ln \left(1 + \frac{I_{KH}}{\beta I_{62}} \right),$$

где $I_{61} \approx E_{r1}/(R_r + r_6)$, $I_{62} = E_{r2}/(R_r + r_6)$; $\tau' = \tau_{\beta} + [C_k(1 + \beta) + C_H](R_H \parallel R_K)$.

Подставляя исходные данные в вышеприведенные формулы, получим $t_{\phi} \approx 80$ нс, $t_c \approx 60$ нс.

Время рассасывания неосновных носителей

$$t_{\text{рас}} = \bar{\tau}_{\beta} \ln \frac{(I_{61} + I_{62})\beta}{I_{KH} + I_{62}\beta} \approx 84 \text{ нс.}$$

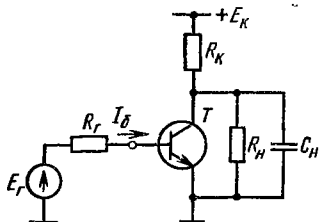


Рис. 8.2

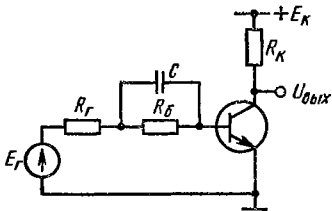


Рис. 8.3

8.5. Рассчитать параметры ключа с ускоряющим конденсатором (рис. 8.3), выполненного на транзисторе типа КТ312, и определить его быстродействие при подаче на вход прямоугольного импульса напряжения. Нижний уровень входного сигнала $E_{r2} = -1$ В, верхний уровень $E_{r1} = +2$ В, сопротивление генератора $R_r = 1$ кОм. Степень насыщения транзистора S не должна превышать значения 4. Принять $\beta_{\min} = 80$.

Решение

Исходя из максимально допустимых коллекторных напряжения и тока выбираем $E_k = 10$ В и $I_{KH} = 2$ мА. Тогда $R_K \approx E_k/I_{KH} = 5$ кОм.

Определим ток I_{61} , обеспечивающий заданную степень насыщения транзистора:

$$I_{61} = \frac{SI_{KH}}{\beta_{\min}} = 0,1 \text{ мА.}$$

Тогда сопротивление резистора в цепи базы R определяется из выражения $R_6 = (E_{r1}/I_{61}) - (R_r + r_6) = 3,2$ кОм, где r_6 — омическое сопротивление базы. Для маломощных транзисторов $r_6 = 80 \div 150$ Ом.

Запирающий ток базы после подачи напряжения E_{r2}

$$I_{62} = E_{r2}/(R_r + r_6).$$

Найдем величину емкости ускоряющего конденсатора из формулы

$$C = \tau_\beta/R_6.$$

Длительность фронта при подаче скачка напряжения E_{r1}

$$t_\phi = t_c \ln \frac{I_{61}(0)}{I_{61}(0) - I_{кн}/\beta} \approx 0,14 \text{ мкс},$$

где $I_{61}(0) = E_{r1}/(R_r + r_6)$ — минимальный ток базы в момент подачи напряжения E_{r1} . Предполагаем, что $I_{61}(0)$ мало изменится за время формирования фронта:

$$\tau_c = C [R_6 \parallel (R_r + r_6)] \approx 0,2 \text{ мкс}.$$

Так как при подаче напряжения $E_{r2} = -1$ В амплитуда запирающего базового тока в первоначальный момент возрастает, то процессы рассасывания и формирования длительности среза t_c будут также протекать с постоянной времени τ_c , т. е.

$$t_{\text{рас}} = \tau_c \ln \left(1 - \frac{SI_{кн}}{\beta (I_{61} + I_{62})} \right),$$

$$t_c = \tau_c \ln \frac{I_{6н} + I_{62}(0)}{I_{62}(0)},$$

где $I_{62}(0) = E_{r2}/(R_r + r_6)$ — максимальный запирающий ток базы.

8.6. Определить сопротивления резисторов R_1, R_2, R_k транзисторного ключа, изображенного на рис. 8.4. Исходные данные: тип транзистора МП41А, напряжение питания $E_k = 10$ В, амплитуда входного и выходного сигналов соответственно $U_{вх} = 3$ В, $U_{вых} \geq 8$ В, сопротивление резистора нагрузки $R_n = 3$ кОм, степень насыщения транзистора $S = 3$, температура окружающей среды $t = 20 \div 60$ °С. Сопротивлением источника входного сигнала R_r можно пренебречь.

Решение

1. Напряжение смещения обеспечивает закрытое состояние транзистора при отсутствии входного сигнала:

$$U_6 = E_{см} \frac{R_1}{R_1 + R_2} - I_{кБ0\text{max}} \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} \leq 0, \quad (8.5)$$

где $I_{КБ0\max}$ — значение обратного тока транзистора при максимальной температуре. Для транзистора типа МП41А при температуре 60°C имеем $I_{КБ0\max} = 250$ мкА.

Из выражения (8.5) следует, что

$$|E_{\text{см}}|/R_2 \geq I_{КБ0\max} \quad (8.6)$$

Напряжение смещения выбираем из условия $|E_{\text{см}}| = (0,1 \div 0,3) E_{\text{к}}$. Положив $E_{\text{см}} = 0,2E_{\text{к}}$, из условия (8.6) определим сопротивление резистора R_2 :

$$R_2 \leq \frac{|E_{\text{см}}|}{I_{КБ0\max}} = \frac{0,2E_{\text{к}}}{I_{КБ0\max}} = 8 \text{ кОм.}$$

Принимаем $R_2 = 4$ кОм.

2. Для закрытого транзисторного ключа можно записать уравнение

$$E_{\text{к}} - U_{\text{вых}} = (I_{КБ0} + I_{\text{н}}) R_{\text{к}} \quad (8.7)$$

где $I_{\text{н}} = U_{\text{вых}}/R_{\text{н}}$:

Из (8.7) определяем величину резистора $R_{\text{к}}$, учитывая, что для обеспечения минимального уровня выходного напряжения необходимо брать максимальное значение обратного тока транзистора $I_{КБ0\max}$:

$$R_{\text{к}} \leq \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{вых min}}}{I_{КБ0\max} + (U_{\text{вых min}}/R_{\text{н}})} = 0,67 \text{ кОм.}$$

3. Для обеспечения заданной степени насыщения транзистора необходим ток базы:

$$I_{\text{б}} = \frac{SE_{\text{к}}}{\beta_{\text{min}} R_{\text{к}}} = 1,5 \text{ мА.} \quad (8.8)$$

С другой стороны, полагая, что напряжение на переходах открытого транзистора $U_{\text{бэ}} = 0,7$ В, имеем

$$I_{\text{б}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{бэ}}}{R_1} - \frac{E_{\text{см}} - U_{\text{бэ}}}{R_2}. \quad (8.9)$$

Подставляя (8.8) в (8.9) и выражая из полученного уравнения параметр R_1 , будем иметь

$$R_1 = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{бэ}}}{SE_{\text{к}}/(\beta R_{\text{к}}) + (E_{\text{см}} - U_{\text{бэ}})/R_2} = 2,8 \text{ кОм.}$$

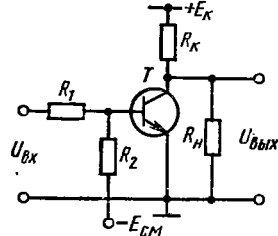


Рис. 8.4

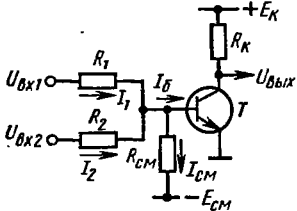


Рис. 8.5

8.7. Определить амплитуду прямоугольного импульса $U_{вх2}$, необходимую для отпирания ключа и насыщения транзистора со степенью $S = 4$, если одновременно с $U_{вх2}$ действует импульс $U_{вх1}$ с амплитудой, равной 1 В (рис. 8.5).

Исходные данные: $E_K = 6$ В, $R_K = 2$ кОм, $E_{см} = -1$ В, $R_1 = R_2 = 1$ кОм, $R_{см} = 0,5$ кОм, $\beta_{\min} = 27$.

Решение

Определяем базовый ток, необходимый для насыщения транзистора со степенью $S = 4$:

$$I_б \approx \frac{E_K S}{R_K \beta_{\min}} = 0,45 \text{ мА.}$$

По входной характеристике транзистора $I_б = f(U_{бэ})$ определим падение напряжения на открытом переходе эмиттер — база, соответствующее току $I_б = 0,45$ мА, $U_{бэ} = 0,6$ В.

На основании закона Кирхгофа

$$I_б = I_1 + I_2 - I_{см} = \frac{U_{вх1} - U_{бэ}}{R_1} + \frac{U_{вх2} - U_{бэ}}{R_2} - \frac{E_{см} + U_{бэ}}{R_{см}},$$

откуда

$$U_{вх2} = \left(I_б + \frac{E_{см} + U_{бэ}}{R_{см}} - \frac{U_{вх1} - U_{бэ}}{R_1} \right) R_2 + U_{бэ} = 3,75 \text{ В.}$$

8.8. Можно ли использовать транзистор типа ГТ308А в схеме транзисторного ключа (рис. 8.1, а) с параметрами $R_K = 630$ Ом, $E_K = -28$ В?

Ответ: нельзя.

8.9. На входе схемы (рис. 8.1, а) действует периодическая последовательность прямоугольных положительных импульсов напряжения с амплитудой $E_{г1} = 3$ В. Выйдет ли из строя транзистор типа КТ306А в схеме рис. 8.1, а, если случайно замкнуть накоротко резистор R_K ? Параметры схемы $E_K = 5$ В, $R_г = 1$ кОм. Падение напряжения на открытых переходах транзистора $U_{бэ} = U_{бк} = 0,8$ В. Температура окружающей среды 20°C .

Ответ: транзистор останется работоспособным.

8.10. На вход схемы рис. 8.1, а поступает последовательность прямоугольных импульсов, максимальные и минимальные значения которых равны $E_{г1} = 2$ В, $E_{г2} = -1$ В. Определить амплитуду выходных импульсов в двух случаях: а) $R_г = 10$ кОм, б) $R_г = 100$ кОм. Остальные параметры

схемы: $E_k = 8$ В, $R_k = 2$ кОм. Тип транзистора КТ312Б. Падение напряжения на открытых переходах транзистора $U_{бэ} \approx U_{бк} = 0,6$ В, на насыщенном транзисторе $U_{кн} = 0,2$ В. Температура окружающей среды 20°C .

Ответ: а) $\sim 7,7$ В, б) $\sim 1,3$ В.

8.11. Как изменится амплитуда выходного напряжения в схеме транзисторного ключа (см. рис. 8.1, а) при повышении температуры окружающей среды? Принять $U_{кн} = \text{const}$.

Ответ: уменьшится.

8.12. Какая мощность расходуется в транзисторном ключе (см. рис. 8.2): а) в открытом; б) в закрытом состояниях? Параметры ключа: $E_k = 5$ В, $R_k = 1,2$ кОм, $U_{кн} = 0,2$ В, $I_{к60} = 10$ мкА.

Ответ: а) 20 мВт, б) 50 мкВт.

8.13. Выйдет ли из строя транзистор типа КТ316В в схеме транзисторного ключа (см. рис. 8.1, а), если параллельно резистору $R_k = 1$ кОм подключить нагрузочный резистор $R_n = 560$ Ом? Остальные параметры схемы: $E_k = 18$ В, амплитуда отпирающего тока базы $I_{б1} = 1$ мА.

Ответ: транзистор выйдет из строя.

8.14. Резистор $R_6 = 2$ кОм в базовой цепи транзистора (см. рис. 8.3) зашунтировали конденсатором C . Во сколько раз изменится при этом амплитуда базового тока при действии на входе схемы однополярного положительного прямоугольного импульса $E_{г1} = 2$ В? Сопротивление генератора $R_r = 1$ кОм, падение напряжения $U_6 = 0,8$ В. Входная емкость транзистора мала по сравнению с емкостью конденсатора C .

Ответ: амплитуда базового тока увеличится в три раза.

§ 8.2. МДП-ТРАНЗИСТОРНЫЕ КЛЮЧИ

Известны три разновидности МДП-транзисторных ключей: с резистивной нагрузкой, с динамической (транзисторной) нагрузкой и комплементарные (на транзисторах с каналами противоположного типа проводимости). В данном разделе рассмотрен только первый тип ключей. Два других типа ключей используются главным образом в составе интегральных схем и будут рассмотрены в § 9.2.

Схема МДП-транзисторного ключа с резистивной нагрузкой показана на рис. 8.6. Для запираания ключа на затвор подают напряжение $E_{з.выкл} < U_0$, где U_0 — пороговое напряжение; для отпираания следует подать напряжение $E_{з.вкл} > U_0$ (обычно в логических схемах $E_{з.выкл} = 0$, $E_{з.вкл} = E_c$). Выходные вольт-амперные характеристики ключа приведены на рис. 8.7. Слева от штриховой линии $U_{сн} = U_{зи} - U_0$ расположена крутая область