

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  $20^\circ\text{C}$ .

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

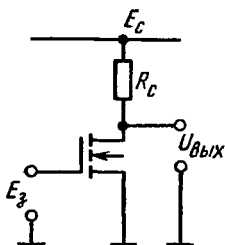


Рис. 8.6

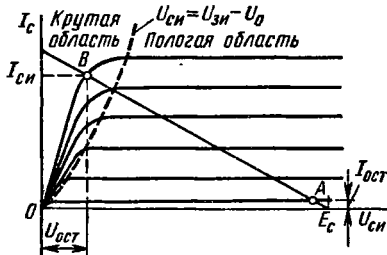


Рис. 8.7

характеристик, справа располагается пологая область (здесь  $U_{сн}$  — напряжение между стоком и истоком,  $U_{зи}$  — напряжение между затвором и истоком). В крутой области ток стока определяется выражением

$$I_c = b \left[ (U_{зи} - U_0) U_{сн} - \frac{1}{2} U_{сн}^2 \right]. \quad (8.10)$$

В пологой области ток стока

$$I_c = \frac{b}{2} (U_{зи} - U_0)^2. \quad (8.11)$$

Здесь  $b = \mu C_0 \frac{w}{L}$  — удельная крутизна, где  $\mu$  — подвижность носителей заряда в канале,  $C_0$  — удельная емкость подзатворного диэлектрика,  $w$  — ширина канала,  $L$  — длина канала.

В выключенном состоянии (точка  $A$  на рис. 8.7) ключ характеризуется остаточным током  $I_{ост}$ , во включенном состоянии (точка  $B$ ) — остаточным напряжением  $U_{ост}$ .

В выключенном состоянии типичная величина  $I_{ост}$  составляет  $10^{-9} - 10^{-10}$  А. Во включенном состоянии ключа ток стока насыщения  $I_{сн}$  определяется внешними элементами схемы:

$$I_{сн} = (E_c - U_{ост})/R_c \approx E_c/R_c. \quad (8.12)$$

При малых  $U_{сн}$  пренебрежем вторым членом  $\frac{1}{2} U_{сн}^2$  в формуле (8.10). Дифференцируя это выражение, находим

$$r_k = \frac{1}{dI_c/dU_{сн}} = \frac{1}{b(U_{зи} - U_0)}. \quad (8.13)$$

Полагая  $U_{зи} = E_{вкл}$ , находим

$$U_{ост} = I_{сн} r_k = \frac{E_c}{R_c b (E_{з,вкл} - U_0)}. \quad (8.14)$$

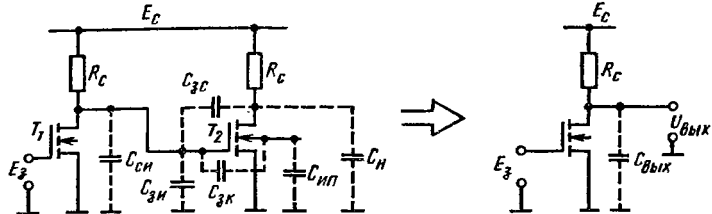


Рис. 8.8

Быстродействие МДП-транзисторных ключей обусловлено главным образом временем перезаряда паразитных емкостей. Паразитные емкости МДП-транзисторного ключа показаны на рис. 8.8, где схема ключа на транзисторе  $T_1$ , нагруженного на аналогичный ключ  $T_2$ , заменена эквивалентной схемой с одной суммарной емкостью:

$$C_{\text{вых}} = C_{\text{сп}} + C_{\text{м}} + C_{\text{зк}} + C_{\text{зн}} + C_{\text{зс}} K_U. \quad (8.15)$$

Здесь  $C_{\text{сп}}$  — емкость  $p$ - $n$ -перехода сток — подложка;  $C_{\text{м}}$  — монтажная емкость проводников;  $C_{\text{зк}}$  — емкость затвор — канал;  $C_{\text{зн}}$  — емкость затвор — исток;  $C_{\text{зс}}$  — емкость затвор — сток;  $K_U$  — коэффициент усиления второго ключа при его работе в активном режиме.

Длительность включения  $t_{\text{вкл}}$  ключа с резистивной нагрузкой можно определить по формуле

$$t_{\text{вкл}} \approx 1,5 \frac{E_c C_{\text{вых}}}{I_c(0)}, \quad (8.16)$$

где

$$I_c(0) = \frac{b}{2} (E_{\text{з,вкл}} - U_0)^2.$$

Длительность выключения определяют по формуле

$$t_{\text{выкл}} = 2,2 R_c C_{\text{вых}}. \quad (8.17)$$

Основным путем увеличения быстродействия ключа является уменьшение емкости  $C_{\text{вых}}$ . При заданной емкости быстродействие можно увеличить путем увеличения рабочего тока  $I_c(0)$ , в частности путем уменьшения напряжения  $U_0$ .

## ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

**8.15.** Определить крутизну МДП-транзистора в схеме ключа с резистивной нагрузкой, необходимую для получения остаточного напряжения  $U_{\text{ост}} = 0,1$  В, при следующих параметрах