

Работа 8.1. Исследование инвертора на биполярном транзисторе

8.1.1. Характеристики логического инвертора

Инвертор реализует функцию НЕ и является простейшим базовым логическим элементом. Свойства инвертора характеризует его передаточная характеристика $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$, представляющая зависимость выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$ от медленно изменяющегося напряжения на входе $U_{\text{ВХ}}$. Передаточная характеристика инвертора показана на рис. 8.1.1. Высокий уровень напряжения соответствует логической единице, а низкий – логическому нулю.

Передаточная характеристика инвертора на рис. 8.1.1 имеет три области. Область I соответствует логической единице на выходе, область III – логическому нулю. Область II является переходной. В этой области инвертор работает как усилитель.

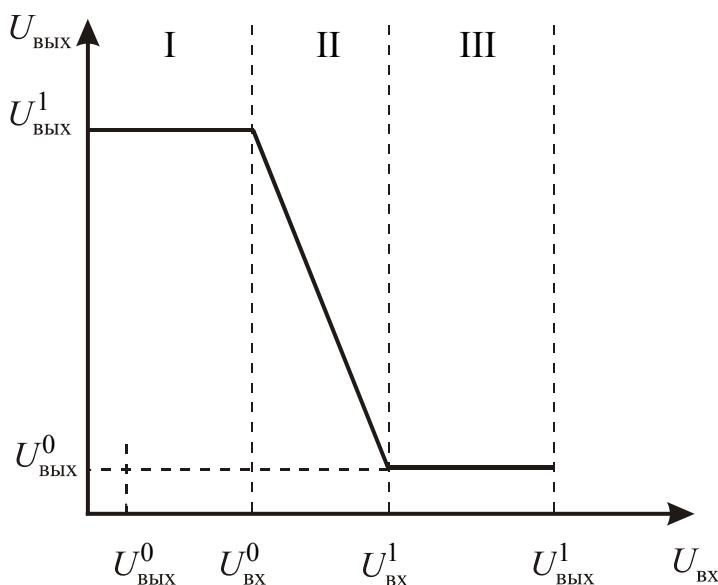


Рис. 8.1.1

Высокий уровень напряжения на выходе инвертора не зависит от точного значения входного напряжения, пока последнее не превысит величину $U_{\text{ВХ}}^0$. Таким образом, $U_{\text{ВХ}}^0$ – это максимальное значение входного напряжения, соответствующее логическому нулю. Точно так же низкий уровень выходного напряжения не зависит от величины входного напряжения, если оно остается больше величины $U_{\text{ВХ}}^1$. Следовательно, $U_{\text{ВХ}}^1$ – это минимальное значение входного напряжения, соответствующее логической единице.

Пример расчета передаточной характеристики. Построить передаточную характеристику инвертора на биполярном транзисторе (рис. 8.1.2, а). Параметры элементов схемы: $R_{\text{б}} = 10 \text{ кОм}$, $R_{\text{к}} = 1 \text{ кОм}$, $E_{\text{к}} = 5 \text{ В}$, $\beta = 50$.

Решение. Рассмотрим два режима работы транзистора: насыщения и отсечки.

1. Транзистор находится в режиме отсечки, если $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}}^0 < 0.7 \text{ В}$. При этом $I_{\text{К}} \approx 0$ и напряжение на выходе $U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ}}^1 \approx 5 \text{ В}$.

2. Транзистор находится в состоянии насыщения, если эмиттерный и коллекторный переходы смещены в прямом направлении. При этом $U_{\text{КЭ}} = U_{\text{КЭнас}} = 0.2 \text{ В}$. Ток коллектора

$$I_{\text{КЭнас}} = \frac{E_{\text{К}} - U_{\text{КЭнас}}}{R_{\text{К}}} = \frac{5 - 0.2}{1} = 4.8 \text{ мА}.$$

Ток базы

$$I_{\text{Бнас}} = \frac{I_{\text{Кнас}}}{\beta} = \frac{4.8}{50} = 0.096 \text{ мА}.$$

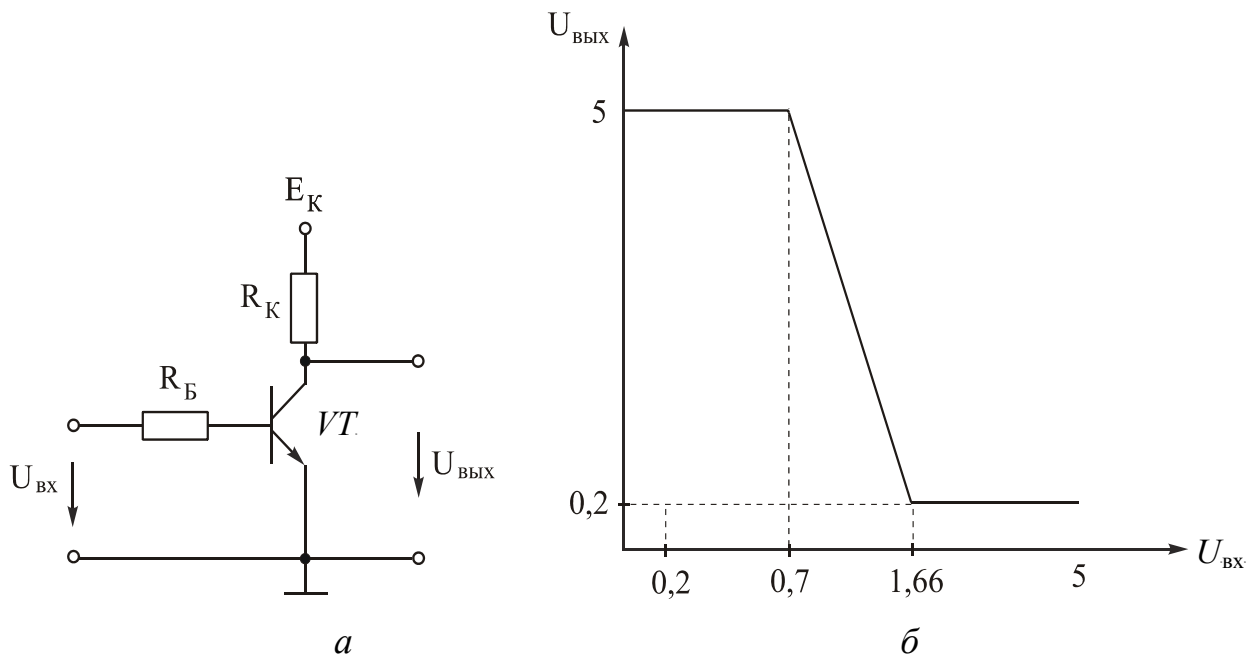


Рис. 8.1.2

Напряжение логической единицы на входе

$$U_{\text{ВХ}}^1 = R_{\text{Б}} I_{\text{Б}} + U_{\text{БЭ}} = 10 \cdot 0.096 + 0.7 = 1.66 \text{ В}.$$

Итак, $U_{\text{ВХ}}^0 = 0.7 \text{ В}$, $U_{\text{ВХ}}^1 = 1.66 \text{ В}$, $U_{\text{ВЫХ}}^1 = 5 \text{ В}$, $U_{\text{ВЫХ}}^0 = 0.2 \text{ В}$. Передаточная характеристика инвертора показана на рис. 8.1.2, б.

8.1.2. Инвертор на биполярном транзисторе

Простейший инвертор на биполярном транзисторе показан на рис. 8.1.3. Резистор $R_{\text{б}}$ в цепи базы служит для задания необходимого тока базы. Резистор $R_{\text{к}}$ является внутренней нагрузкой инвертора, а резистор $R_{\text{н}}$ – его внешней нагрузкой. Величина внешней нагрузки может меняться в широких пределах. При $R_{\text{к}} = \infty$ инвертор работает в режиме холостого хода. Предельной нагрузкой, при которой инвертор еще должен сохранять свои параметры, считают величину $R_{\text{к}} = R_{\text{н}}$.

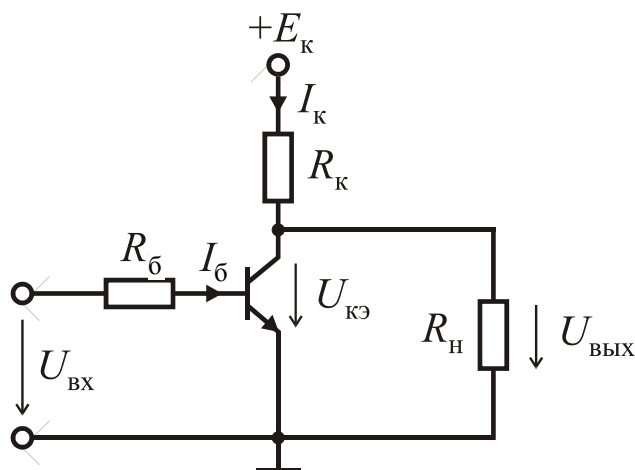


Рис. 8.1.3

Рассмотрим статический (по постоянному току) и динамический режимы работы инвертора.

Статический режим. В статическом режиме логический инвертор может быть закрыт (транзистор находится в режиме отсечки) либо открыт (транзистор находится в режиме насыщения). Инвертор закрыт, когда напряжение на входе меньше напряжения логического нуля $U_{\text{вх}}^0$. Для инверторов на кремниевых биполярных транзисторах оно составляет 0.4–0.5 В. В этом режиме $I_{\text{к}} = I_{\text{б}} \approx 0$, $U_{\text{кэ}} = E_{\text{к}} - R_{\text{к}} I_{\text{к}} \approx E_{\text{к}}$. Сопротивление закрытого инвертора составляет сотни кОм.

Если на входе действует импульс напряжения такой величины, чтобы транзистор находился в режиме насыщения, то ток базы

$$I_{\text{б}} = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{бэ}}}{R_{\text{б}}} \approx \frac{U_{\text{вх}}}{R_{\text{б}}}.$$

В режиме насыщения оба перехода смещены в прямом направлении, и ток коллектора возрастает до наибольшего значения:

$$I_{\text{к}} = I_{\text{кнас}} = \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{кэ}}}{R_{\text{к}}} \approx \frac{E_{\text{к}}}{R_{\text{к}}}.$$

Напряжение $U_{\text{кэ}}$ в режиме насыщения составляет 0.2–0.3 В, а выходное сопротивление – несколько десятков Ом. Для насыщения транзистора необходимо, чтобы ток базы стал больше минимального значения, при котором начинается насыщение транзистора:

$$I_{\text{б}} > \frac{I_{\text{кнас}}}{\beta} \approx \frac{E_{\text{к}}}{\beta R_{\text{к}}}.$$

Глубину насыщения транзистора характеризуют коэффициентом (степенью) насыщения, который определяет, во сколько раз реальный ток базы превосходит минимальное значение, при котором имеет место режим насыщения:

$$Q = \frac{I_{\text{б}}}{I_{\text{бнас}}}.$$

Величину коэффициента насыщения выбирают от 1.5 до 3.

Транзистор должен входить в режим насыщения, когда входное напряжение превышает напряжение логической единицы $U_{\text{вх}}^1$. Для инверторов на биполярных транзисторах $U_{\text{вх}}^1 \approx 1.5$ В.

Передаточная характеристика инвертора на БТ показана на рис. 8.1.4. Рабочими являются участки переходной характеристики, соответствующие отсечке и насыщению.

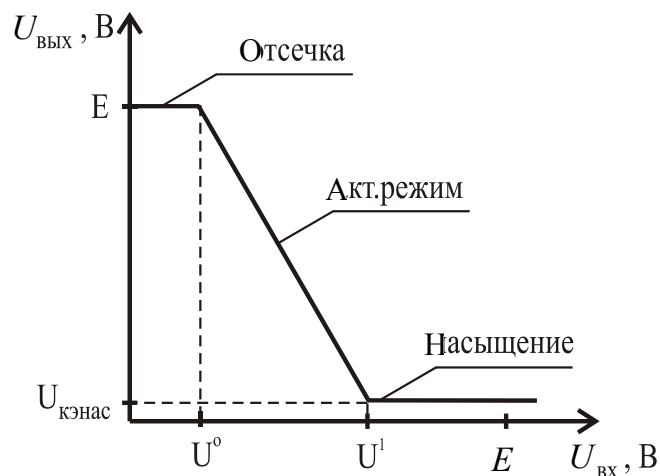


Рис. 8.1.4

Пример расчета инвертора на БТ. Рассчитать сопротивление в цепи базы инвертора на рис. 8.1.3, при котором транзистор находится в состоянии

насыщения. Значения элементов: $R_k = 1 \text{ кОм}$, $E_k = 5 \text{ В}$, $U_{\text{вх}} = 5 \text{ В}$, $\beta = 50$. Коэффициент насыщения $S = 2$.

Решение. Поскольку транзистор находится в состоянии насыщения, $U_{\text{кэ}} = U_{\text{кэнас}} \approx 0.2 \text{ В}$. Ток коллектора

$$I_{\text{кнас}} = \frac{E_k - U_{\text{кэ}}}{R_k} = \frac{5 - 0.2}{1} = 4.8 \text{ мА}.$$

Минимальный ток базы, при котором транзистор переходит в насыщение,

$$I_{\text{бнас}} = \frac{I_{\text{кнас}}}{\beta} = \frac{4.8}{50} = 0.096 \text{ мА}.$$

Сопротивление резистора в цепи базы, обеспечивающее коэффициент насыщения $S = 2$,

$$R_b = \frac{U_{\text{вх}} - U_{\text{бэ}}}{SI_{\text{бнас}}} = \frac{4.3}{2 \cdot 0.096} \approx 22 \text{ кОм}.$$

Динамический режим работы инвертора. Переходные процессы в инверторе на биполярном транзисторе определяются следующими причинами.

1. Наличием емкостей эмиттерного и коллекторного переходов. При переключениях происходит заряд и разряд этих емкостей.

2. Накоплением и рассасыванием неосновных носителей в базе при переходе транзистора в режимы насыщения и отсечки.

Рассмотрим упрощенно процессы в транзисторе при действии на входе прямоугольного импульса (рис. 8.1.5). На интервале времени $0 - t_1$ инвертор закрыт. Процесс открывания инвертора после подачи входного импульса можно разделить на три этапа: задержка фронта, формирование фронта и накопление избыточного заряда в базе.

Задержка фронта коллекторного тока t_3 – это интервал времени между моментом начала действия импульса и моментом, когда ток коллектора достигает значения, равного $0.1I_{\text{кнас}}$. Задержка фронта обусловлена зарядом барьерной емкости эмиттерного перехода.

С момента начала отпирания транзистора начинается *формирование фронта* выходного импульса (интервал t_ϕ на рис. 8.1.4). Когда ток коллектора достигает уровня $I_{\text{кнас}}$, напряжение на коллекторе уменьшается до величины $U_{\text{кэнас}}$. Ток базы достигает величины $I_{\text{бнас}}$ и продолжает увеличиваться, а в базе происходит накопление неосновных носителей.

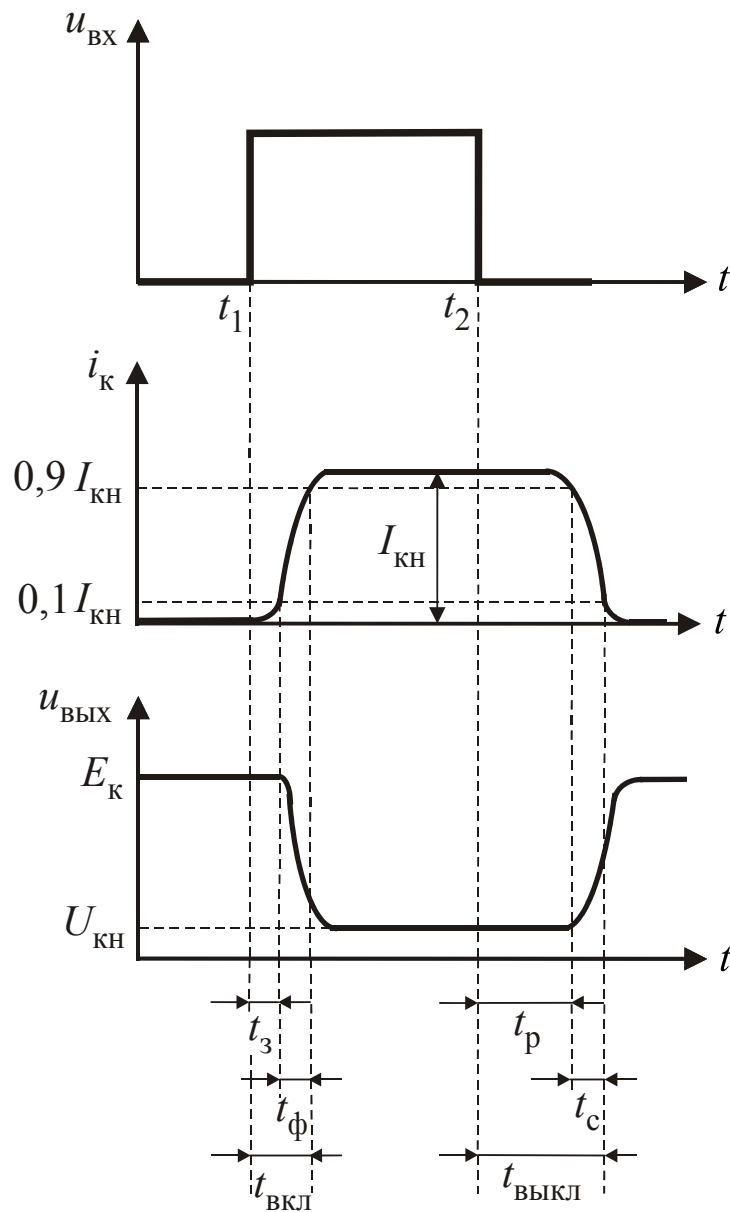


Рис. 8.1.5

Общее время включения $t_{\text{вкл}}$ складывается из времени задержки и длительности фронта:

$$t_{\text{вкл}} = t_3 + t_\phi.$$

После окончания действия входного импульса начинается рассасывание избыточного заряда в базе. За счет этого коллекторный ток не меняется в течение времени t_p . Затем начинается спад коллекторного тока. Одновременно растет напряжение коллектора. Общая длительность выключения

$$t_{\text{выкл}} = t_p + t_c.$$

Здесь t_c – время спада коллекторного тока.

Основным фактором, ограничивающим быстродействие инвертора на рис. 8.1.2, является насыщение транзистора. Время рассасывания t_p существенно превышает остальные временные интервалы.

Для исключения глубокого насыщения транзистора коллекторный переход шунтируют диодом Шоттки (рис. 8.1.6), имеющим малое время переключения, низкое напряжение отпираания (0.2–0.3 В) и малое сопротивление в открытом состоянии.

Когда транзистор открыт и находится в активном режиме, напряжение коллектор-база положительно ($U_{кб} > 0$), и к диоду приложено обратное напряжение. С ростом коллекторного тока напряжение на коллекторном переходе уменьшается и диод открывается. Последующее увеличение тока базы приводит к увеличению тока через диод. Поскольку напряжение отпираания диода Шоттки меньше напряжения отпираания коллекторного перехода, последний остается закрытым и накопление неосновных носителей в базе транзистора не происходит.

Таким образом, увеличение быстродействия инвертора с диодом Шоттки происходит в основном за счет уменьшения времени рассасывания при выключении. Выходное напряжение такого инвертора в открытом состоянии больше, чем напряжение транзистора в режиме насыщения.

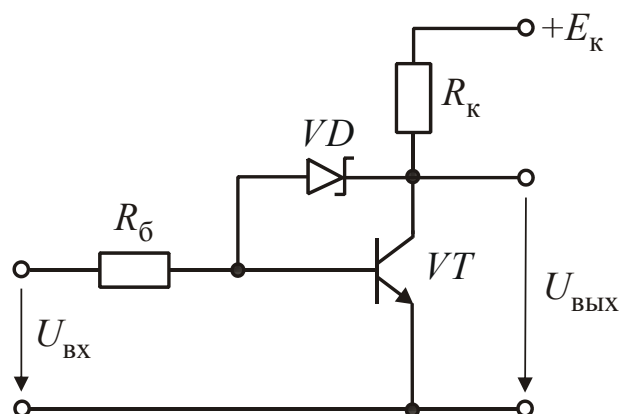


Рис. 8.1.6

Изготавливаются диоды Шоттки на общем кристалле одновременно с остальными элементами в едином технологическом процессе. Транзисторы с диодами Шоттки часто называют *транзисторами с барьером Шоттки* или *транзисторами Шоттки*.

8.1.3. Порядок расчета инвертора на биполярном транзисторе

1. Задаемся током коллектора в режиме насыщения $I_{нас}$. Для транзистора Q2N3904 значение этого параметра принять равным 10 - 12 мА.
2. Рассчитываем величину резистора $R_к$ по формуле:

$$R_K = \frac{E_K - U_{KЭНАС}}{I_{НАС}}.$$

Напряжение коллектор-эмиттер в режиме насыщения $U_{KЭНАС}$ принимаем равным 0.2 В.

3. Определяем ток базы I_B по формуле

$$I_B = Q \frac{I_{НАС}}{\beta}.$$

Величину коэффициента насыщения Q принимаем равной 1.5 - 3, коэффициент $\beta = 100$.

4. Рассчитываем сопротивление резистора R_B :

$$R_B \approx \frac{(U_{\text{вх}}^1 - 0.7)}{I_B}.$$

Считаем, что напряжение логической единицы на входе $U_{\text{вх}}^1$ имеет минимальное значение, равное $E_K/2$.

5. Рассчитываем напряжение логической единицы на выходе инвертора, учитывая, что нагрузкой являются L аналогичных ключей, подключенных к выходу:

$$U_{\text{вых}}^1 \approx \frac{E_K \left(\frac{R_B}{L} \right)}{\left(\frac{R_B}{L} \right) + R_K}.$$

Рекомендации по сборке схем

В схеме инвертора использовать модель $n-p-n$ транзистора Q2N3904 из библиотеки EVAL.slb. Пример схемы инвертора можно найти в файле W5_1 в папке Electronics/Labs.

Рекомендуемая литература

1. Гусев, В. Г. Электроника и микропроцессорная техника: учеб. для вузов / В. Г. Гусев, Ю. М. Гусев. – 3-е изд. перераб. и доп. – М.: Высш. шк., 2004. – 790 с.
2. Быстров, Ю. А. Электронные цепи и микросхемотехника: учеб. / Ю. А. Быстров, И. Г. Мироненко. – М.: Высш. шк., 2002. – 384 с.: ил.
3. Степаненко, И. П. Основы микроэлектроники: учеб. пособие для вузов / И.П. Степаненко. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Лаборатория Базовых Знаний, 2003. – 488 с.: ил.
4. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с.