

Работа 2.2. Цепи смещения биполярных транзисторов

Параметры биполярных транзисторов зависят от многих факторов (температуры, напряжения питания и т. д.). Вследствие этого изменяется положение рабочей точки транзистора. Пассивная цепь, в которую включается транзистор, должна свести к минимуму влияние разброса параметров и обеспечить стабильное положение рабочей точки на участке передаточной характеристики, соответствующей режиму усиления.

Основное назначение резистивной цепи смещения – стабилизация тока эмиттера. Ее необходимо выбрать таким образом, чтобы минимизировать влияние изменений коэффициента усиления тока базы β на величину $I_э$. В этом случае стабильным будет и ток коллектора, поскольку $I_к = (0.98–0.995)I_э$, а также напряжение $U_{кэ}$.

Рассмотрим цепи смещения биполярных транзисторов, используемые на практике.

2.2.1. Классическая цепь смещения

На рис. 2.2.1 показана схема, обеспечивающая стабильное положение рабочей точки транзистора. Прямое смещение эмиттерного перехода обеспечивается делителем напряжения R_1, R_2 . Это позволяет обойтись одним источником питания $E_к$. Сопротивления R_1 и R_2 выбирают такими, чтобы напряжение база-эмиттер было равным 0.6–0.7 В. Резистор $R_э$ является цепью отрицательной обратной связи.

Чтобы снять выходное напряжение с коллектора, в цепь коллектора включают резистор $R_к$. Напряжение коллектор-эмиттер

$$U_{кэ} = E_к - R_к I_к.$$

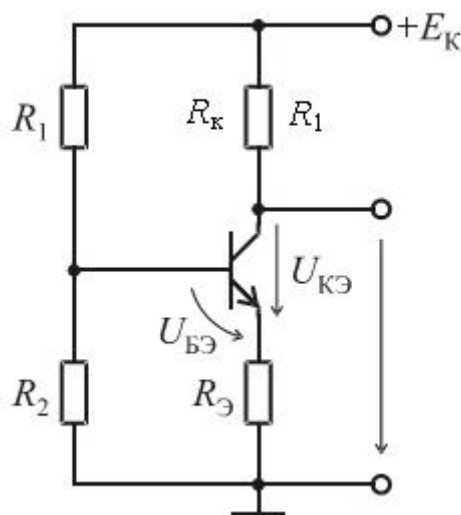


Рис. 2.2.1

Расчетная схема для определения токов коллектора и эмиттера показана на рис.2.2.2. Транзистор заменен моделью для активного режима. Делитель напряжения, образованный резисторами R_1 , R_2 , заменен эквивалентной схемой Тевенина. Здесь

$$E_{\sigma} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_{\kappa}, \quad R_{\sigma} = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}.$$

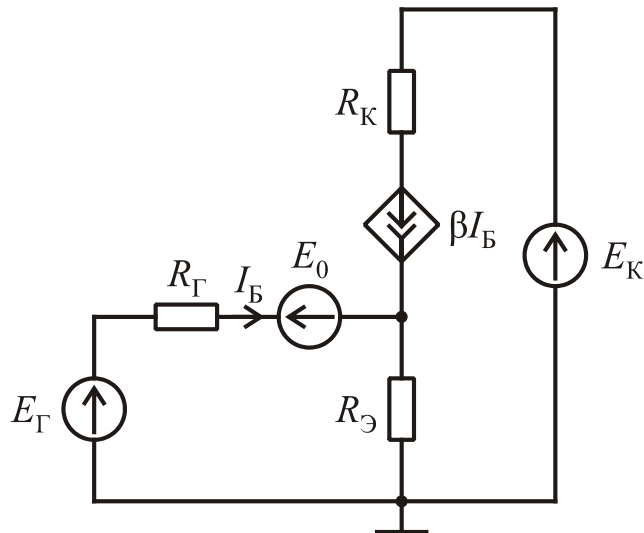


Рис. 2.2.2

Ток базы

$$I_{\sigma} = \frac{E_{\sigma} - E_0}{R_{\sigma} + R_{\epsilon}(\beta + 1)}.$$

Ток коллектора

$$I_{\kappa} = \beta I_{\sigma} = \frac{\beta(E_{\sigma} - E_0)}{R_{\sigma} + R_{\epsilon}(\beta + 1)}. \quad (2.2.1)$$

Из последнего выражения следует, что изменение тока коллектора пропорционально изменению $E_{\sigma} - E_0$. Источник E_0 моделирует напряжение эмиттерного перехода $U_{\epsilon\epsilon}$, смещенного в прямом направлении. Влияние изменений напряжения $U_{\epsilon\epsilon}$ на ток коллектора будет невелико, если выполняется условие

$$E_{\sigma} \gg U_{\epsilon\epsilon}. \quad (2.2.2)$$

Однако увеличение напряжения E_6 при заданном напряжении питания E_k приводит к уменьшению размаха выходного напряжения, если схема используется в качестве усилителя.

Для того чтобы ток коллектора был нечувствителен к изменениям β , должно выполняться условие

$$R_3 \gg \frac{R_6}{\beta + 1}. \quad (2.2.3)$$

Рассмотрим подробнее влияние резистора в цепи эмиттера на стабилизацию рабочей точки транзистора. Резистор R_3 в схеме на рис. 2.2.1 является цепью отрицательной обратной связи. Предположим, что по какой-либо причине ток эмиттера увеличился. Это приведет к увеличению падения напряжения на резисторе R_3 , так как $U_3 = R_3 I_3$. Если выполняется условие (2.2.2), напряжение базы останется прежним. Следовательно, напряжение эмиттерного перехода $U_{63} = U_6 - U_3$ уменьшится, что приведет к уменьшению I_3 . Таким образом, отрицательная обратная связь стабилизирует ток эмиттера, делает его нечувствительным к вариациям напряжения U_{63} и коэффициента β .

2.2.2. Цепь смещения с двухполярным питанием

Классическую цепь смещения, рассмотренную выше, можно упростить, если использовать два разнополярных источника питания (рис. 2.2.3).

Из уравнения для левого контура, включающего резисторы R_6 , R_3 , эмиттерный переход и источник E_3 , следует, что ток базы

$$I_6 = \frac{E_3 - U_{63}}{R_6 + R_3(\beta + 1)},$$

соответственно, ток коллектора

$$I_k = \beta I_6 = \frac{\beta(E_3 - U_{63})}{R_6 + R_3(\beta + 1)}.$$

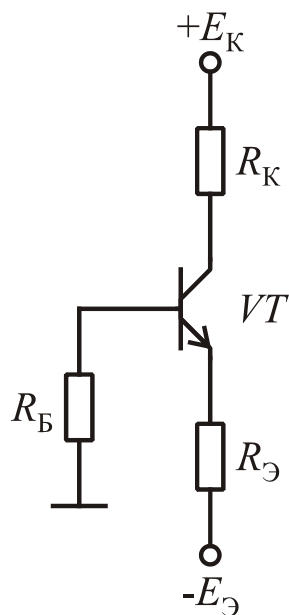


Рис. 2.2.3

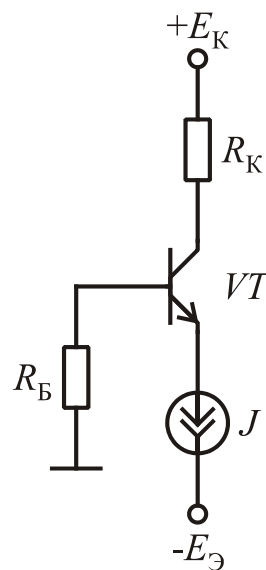


Рис. 2.2.4

Последнее равенство аналогично уравнению (2.2.1), только E_6 заменен источником $E_э$. Следовательно, для обеспечения стабильного тока коллектора должны выполняться условия (2.2.2) и (2.2.3).

2.2.3. Смещение с помощью источника тока

Цепи смещения, изображенные на рис. 2.2.1 и 2.2.3, неудобны для интегральных схем, так как резисторы относительно больших номиналов занимают на кристалле слишком большую площадь. Простую цепь смещения, очень удобную для интегральной схемотехники, можно получить, включив в цепь эмиттера источник постоянного тока (рис. 2.2.4).

Преимущество такой цепи смещения заключается в том, что ток эмиттера, следовательно, и ток коллектора не зависят от коэффициента β и сопротивления резистора в цепи базы. Поэтому сопротивление R_6 можно выбрать большим, и за счет этого увеличить входное сопротивление цепи.

Смещение рабочей точки транзистора с помощью источников тока широко используют в аналоговой интегральной схемотехнике. В качестве таких источников применяются специальные транзисторные схемы – отражатели тока. Это позволяет экономить площадь кристалла, так как отражатель тока занимает меньшую площадь на кристалле ИС, чем резистор номиналом в несколько кОм.

2.2.4. Порядок расчета классической цепи смещения биполярного транзистора

Расчет элементов цепи смещения на рис. 2.2.1 проводится в следующем порядке. Исходными данными для расчета являются положение рабочей точки $U_{кэ}, I_{к}$.

1. Напряжение питания $E_{к}$ выбирается из соотношения:

$$E_{к} = (3 \div 5)U_{кэ}.$$

Окончательное значение $E_{к}$ определяют, учитывая имеющиеся источники питания.

2. Затем определяют напряжение на резисторе обратной связи $R_{э}$

$$U_{э} = (0.1 \div 0.3)E_{к}$$

3. Поскольку $I_{к} \approx I_{э}$, сопротивление резистора $R_{э}$ определим по формуле

$$R_{э} = \frac{U_{э}}{I_{к}}.$$

4. Максимальный ток базы

$$I_{БМАХ} = \frac{I_{к}}{\beta_{МИН}}.$$

5. Ток делителя напряжения $R_1 - R_2$ (полагаем, что база отключена от делителя)

$$I_1 = (10 \div 100)I_{БМАХ}.$$

6. Суммарное сопротивление делителя

$$R_1 + R_2 = \frac{E_{к}}{I_1}.$$

7. Напряжение на резисторе R_2 равно сумме напряжения на резисторе в цепи эмиттера и напряжения эмиттерного перехода:

$$U_{R2} = U_{э} + U_{БЭ}.$$

Для кремниевых транзисторов напряжение $U_{БЭ}$ принимают равным 0.6 – 0.7 В.

8. Сопротивления резисторов R_1 и R_2 :

$$R_2 = \frac{U_{R2}}{I_1}; \quad R_1 = (R_1 + R_2) - R_2.$$

Изложенная процедура расчета является приближенной и базируется на трех ключевых моментах. Во-первых, напряжение питания в 3-5 раз превышает напряжение коллектор-эмиттер. Во-вторых, напряжение на резисторе в цепи эмиттера примерно равно напряжению коллектор-эмиттер. И, наконец, ток резистора R_1 должен в 10-100 раз превышать ток базы. В дальнейшем номиналы элементов уточняются по результатам моделирования спроектированной цепи.

Пример расчета цепи смещения биполярного транзистора.

Координаты рабочей точки транзистора $I_K = 1 \text{ мА}$, $U_{КЭ} = 5 \text{ В}$.
Коэффициент усиления тока базы $\beta = 100$.

Выберем напряжение питания

$$E_K = 5U_{КЭ} = 25 \text{ В}.$$

Напряжение резистора в цепи эмиттера примем равным напряжению коллектор-эмиттер: $U_{Э} = U_{КЭ} = 5 \text{ В}$.

Сопротивление резистора $R_{Э}$

$$R_{Э} = \frac{U_{Э}}{I_K} = 5 \text{ кОм}.$$

Максимальный ток базы

$$I_{БМАХ} = \frac{I_K}{\beta_{MIN}} = 10 \text{ мкА}.$$

Ток делителя напряжения $R_1 - R_2$

$$I_1 = 50I_{БМАХ} = 500 \text{ мкА}.$$

Сопротивление делителя

$$R_1 + R_2 = \frac{E_K}{I_1} = \frac{25}{0.5 \cdot 10^{-3}} = 50 \text{ кОм}.$$

Напряжение на резисторе R_2

$$U_{R2} = U_{Э} + U_{БЭ} = 5 + 0,6 = 5,6 \text{ В}.$$

Рассчитаем сопротивление резисторов R_2 и R_1 :

$$R_2 = \frac{5.6}{0.5 \cdot 10^{-3}} = 11.2 \text{ кОм}; \quad R_1 = 50 - 11.2 = 38.8 \text{ кОм}.$$

Рекомендации по сборке схем

При сборке схем использовать модели *n-p-n* транзисторов Q2N3904 или Q2N2222 из библиотеки EVAL.slb. Примеры схем можно найти в файлах W2_2_1, W2_2_2 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. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл: пер. с англ. – 6-е изд. – М.: Мир, 2003. – 704 с., ил.
5. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с.