

## Работа 2.3. Источники тока на биполярных транзисторах

Источники тока (ИТ) используются в интегральных схемах для смещения рабочих точек транзисторов. Назначение источника тока – поддерживать неизменный ток при изменении сопротивления нагрузки. Как известно, внутреннее сопротивление идеального источника тока бесконечно велико. В реальной цепи этого достичь невозможно: такой источник должен иметь бесконечную мощность. Кроме того, реальные схемы способны поддерживать неизменный ток только в определенном диапазоне изменения сопротивления нагрузки. Качество реального источника тока тем выше, чем больше его внутреннее сопротивление.

### 2.3.1. Источник тока на основе схемы с общим эмиттером

Простейшим источником тока является схема с общим эмиттером и отрицательной обратной связью по току (рис. 2.3.1). Нагрузкой является резистор  $R_H$  в цепи коллектора.

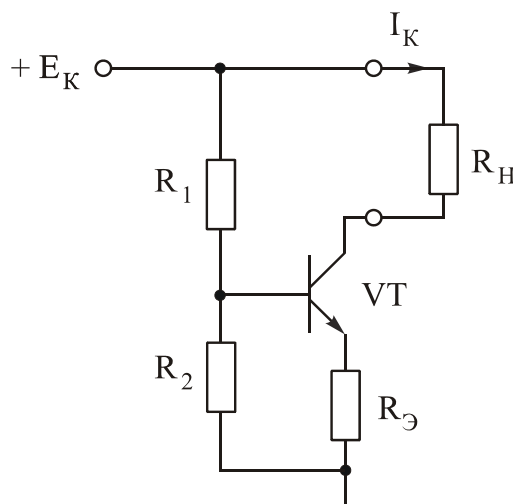


Рис. 2.3.1

Ток коллектора

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

Здесь

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

*Пример 2.3.1.* Рассчитать источник тока (рис. 2.3.1), обеспечивающий ток коллектора  $I_k = 1 \text{ мА}$ . Напряжение источника питания  $E_k = 15 \text{ В}$ , коэффициент усиления тока базы  $\beta = 100$ .

*Решение.* Выберем напряжения коллектора и эмиттера равными приблизительно одной третьей напряжения источника (правило одной трети). Напряжение базы  $U_б = E_k / 3 = 5 \text{ В}$ . Напряжение эмиттера  $U_э = U_б - 0.7 = 4.3 \text{ В}$ .

Полагая  $I_э \approx I_k = 1 \text{ мА}$ , находим сопротивление эмиттерного резистора

$$R_э = \frac{U_э}{I_э} \approx \frac{4.3}{1} = 4.3 \text{ кОм}.$$

Ток делителя напряжения  $R_1 - R_2$   $I_1 = 0.1 I_э = 0.1 \text{ мА}$ . Входное сопротивление делителя

$$R_1 + R_2 = \frac{E_k}{I_1} = \frac{15}{0.1} = 150 \text{ кОм}.$$

Поскольку напряжение базы

$$U_б = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_k = 5 \text{ В},$$

сопротивления резисторов должны быть равны:  $R_1 = 100 \text{ кОм}$ ,  $R_2 = 50 \text{ кОм}$ . Максимальное значение сопротивления резистора  $R_k$ , при котором транзистор остается в активном режиме

$$R_k = \frac{E_k - U_э - U_{кэнас}}{I_э} = \frac{15 - 4.3 - 0.2}{0.1} = 10.5 \text{ кОм}.$$

Выберем  $R_k = 5 \text{ кОм}$ . При этом напряжение на сопротивлении нагрузки  $U_k = R_k I_k = 5 \text{ В}$ .

### 2.3.2. Отражатель тока (токовое зеркало)

В аналоговых интегральных схемах в качестве источников тока используются схемы, получившие название «отражатель тока» или «токовое зеркало». Схема простейшего токового зеркала на биполярных транзисторах показана на рис. 2.3.2.

Коллектор и база транзистора VT1 закорочены. Такое включение транзистора называют *диодным*. Поскольку при диодном включении  $U_{кэ} = U_{бэ} > U_{кэнас}$ , VT1 работает в активном режиме. Напряжения база-

эмиттер обоих транзисторов одинаковы. Если параметры транзисторов идентичны (это легко обеспечить в интегральных схемах), то  $I_{\beta 1} = I_{\beta 2} = I_{\beta}$ . При этом управляющий ток  $I_0 = \beta I_{\beta} + 2I_{\beta}$ . Ток нагрузки

$$I_H = \beta I_{\beta} = \frac{\beta}{\beta + 2} I_0 \approx I_0.$$

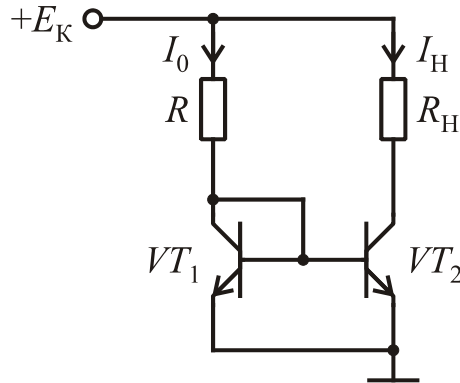


Рис. 2.3.2

Таким образом, транзистор  $VT2$  передает в нагрузку ток, равный управляющему.

Максимальное сопротивление нагрузки, при котором транзистор  $VT2$  находится в активном режиме и обеспечивает заданное значение тока,

$$R_{H\max} = \frac{E_K - U_{кэ\text{нас}}}{I_H} = \frac{E_K - 0.2}{I_H}.$$

С помощью токового зеркала можно получить нагрузочный ток, кратный управляющему:  $I_H = mI_0$ . Для этого необходимо, чтобы площади эмиттерных переходов  $VT1$  и  $VT2$  отличались в  $m$  раз:

$$\frac{S_2}{S_1} = mI_0.$$

Если  $m$  – целое, то в качестве  $VT2$  можно рассматривать  $m$  идентичных транзисторов, включенных параллельно. При этом отношение нагрузочного и управляющего токов

$$\frac{I_H}{I_0} = \frac{\beta m}{\beta + m + 1}.$$

Выходное сопротивление отражателя тока равно динамическому сопротивлению запертого коллекторного перехода транзистора  $VT2$  и может составлять сотни кОм.

*Пример 2.3.2.* Рассчитать сопротивление резистора  $R$  в схеме токового зеркала на рис. 2.3.2, обеспечивающего выходной ток  $I_H = 1 \text{ мА}$ . Напряжение питания  $E_K = 10 \text{ В}$ . Параметры транзисторов одинаковы.

*Решение.* Поскольку транзистор  $VT1$  включен по диодной схеме, напряжение коллектора  $U_K = 0.7 \text{ В}$ . Транзисторы  $VT1$  и  $VT2$  одинаковы, поэтому их коллекторные токи равны:  $I_H = I_0$ . Сопротивление резистора

$$R = \frac{E_K - U_K}{I_0} = \frac{10 - 0.7}{1} = 9.3 \text{ кОм}.$$

Отражатели тока широко используются в аналоговых интегральных схемах. Это объясняется тем, что в ИС легко обеспечить идентичность транзисторов. Схема токового зеркала содержит минимальное число резисторов и за счет этого занимает малую площадь на кристалле.

### 2.3.3. Модифицированные отражатели тока

Характеристики отражателя тока на рис. 2.3.2 отличаются от идеальных. Можно показать, что его внутреннее сопротивление равно выходному сопротивлению транзистора и зависит от наклона выходных характеристик на участке, соответствующем активному режиму.

На рис. 2.3.3 показана схема источника тока, имеющая значительно лучшие характеристики. Ее называют токовым зеркалом Уилсона.

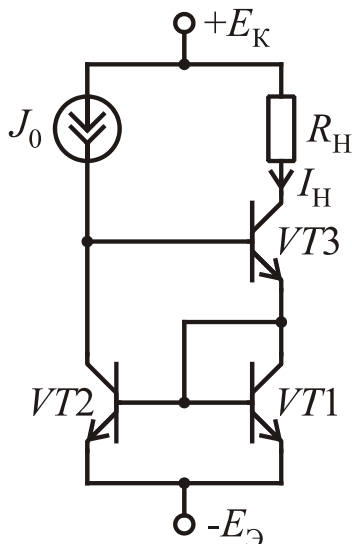


Рис. 2.3.3

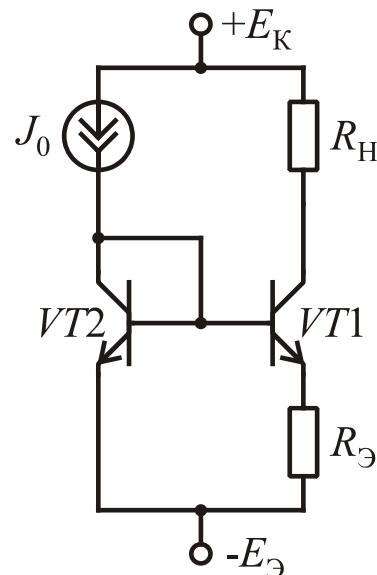


Рис. 2.3.4

Поскольку транзисторы в схеме на рис. 2.3.3 согласованы, токи коллекторов  $VT1$  и  $VT2$  равны:  $I_{K1} = I_{K2}$ . Соответственно, базовые токи  $I_{Б1} = I_{Б2} = I_{K1} / \beta$ .

Ток эмиттера транзистора VT3

$$I_{\varepsilon 3} = \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) I_{\kappa 1}.$$

Ток нагрузки

$$I_n = I_{\kappa 3} = \frac{\beta}{\beta + 1} \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) I_{\kappa 1}.$$

В соответствии с первым законом Кирхгофа ток источника

$$J_0 = I_{\kappa 2} + \frac{\beta}{\beta + 1} \left(1 + \frac{2}{\beta}\right) I_{\kappa 1} = \left(1 + \frac{1 + \frac{2}{\beta}}{1 + \beta}\right) I_{\kappa 1}.$$

Из приведенных соотношений следует, что ток нагрузки

$$I_n = I_{\kappa 3} \approx \frac{1}{1 + \frac{2}{\beta^2}} J_0.$$

Можно показать, что выходное сопротивление токового зеркала Вильсона

$$R_{\text{вых}} = \frac{\beta}{2} r_0.$$

Здесь  $r_0$  – выходное сопротивление транзистора.

Другая схема модифицированного источника тока показана на рис. 2.3.4. Ее называют токовым зеркалом Видлара.

Напряжение эмиттерного перехода транзистора VT1

$$U_{\varepsilon 1} = Vt \ln(I_n / I_{\varepsilon 0}). \quad (2.3.1)$$

Здесь  $I_{\varepsilon 0}$  - обратный ток эмиттерного перехода.

Напряжение эмиттерного перехода второго транзистора

$$U_{\varepsilon 2} = Vt \ln(J_0 / I_{\varepsilon 0}). \quad (2.3.2)$$

Из (2.3.1) и (2.3.2) следует, что напряжение на резисторе  $R_s$

$$R_s I_s = U_{\phi s1} - U_{\phi s2} = Vt \ln(J_0 / I_n) .$$

При больших значениях  $\beta$  в последнем выражении можно полагать, что  $I_s = I_n$ . Преимущество токового зеркала Видлара заключается в том, что с его помощью можно получать малые токи, используя резисторы небольшого номинала. За счет этого экономится площадь кристалла интегральной схемы. Кроме того, выходное сопротивление токового зеркала Видлара значительно больше выходного сопротивления отражателя тока, показанного на рис. 2.3.2.

#### **2.3.4. Рекомендации по выполнению предварительного расчета**

Расчет источника тока на рис. 2.3.1 рассмотрен в примере 2.3.1.

Расчет отражателя тока, показанного на рис. 2.3.2, рассмотрен в примере 2.3.2.

Исходные данные для расчета приведены в табл. 2.3.1 (раздел «Предварительный расчет»).

#### **2.3.5. Рекомендации по сборке схем**

При сборке схем источников тока можно использовать модели *n-p-n* транзисторов Q2N3904 или Q2N2222 из библиотеки EVAL.slb. Примеры схем можно найти в файлах W2\_3\_1, W2\_3\_2, W2\_3\_3 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. 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.
3. Хоровиц, П. Искусство схемотехники / П. Хоровиц, У. Хилл: пер. с англ. – 6-е изд. – М.: Мир, 2003. – 704 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.