

Дополнительные составляющие дрейфа в ДУ возникает за счет неидентичности входных токов транзисторов T_1 и T_2 усилителя и их изменения с температурой. При одинаковых сопротивлениях во входных цепях ДУ токовая составляющая погрешности определяется разностью токов покоя баз транзисторов T_1 и T_2 . С учетом последнего э. д. с. дрейфа в ДУ, приведенная ко входу,

$$\begin{aligned} e_{др ДУ}^{вх} &= \frac{U_{см}}{T} + \left(\frac{dI_{601}}{dT} - \frac{dI_{602}}{dT} \right) (R'_3 + R_r) = \\ &= \frac{U_{см}}{T} + \frac{dI_{60разн}}{dT} (R'_3 + R_r). \end{aligned} \quad (6.9)$$

Здесь $\frac{dI_{60разн}}{dT}$ — дрейф разности входных токов транзисторов T_1 , T_2 , равный $bI_{60разн}$, где $b = -0,005 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

Очевидно, что токовая составляющая влияет тем меньше, чем меньше R_r , R'_3 и I_{60} . Поэтому входные каскады ДУ обычно работают с малыми токами.

ПРИМЕР

6.2. Рассчитать ДУ на биполярных транзисторах с ГСТ, несимметричными входом и выходом. Э. д. с. входного сигнала $E_r = 10 \text{ мВ}$, сопротивление $R_r = 0,1 \text{ кОм}$. Требуемый коэффициент усиления $K_{УД} = 20$, сопротивление $R_{вх} \geq 5 \text{ кОм}$. Выбрать значение напряжения источников питания, рассчитать элементы схемы, величину $K_{ос.сф}$, а также оценить приведенный дрейф усилителя при условии, что абсолютные значения температурных приращений напряжений и токов транзистора разнятся на 5%.

Решение

Схема ДУ с ГСТ приведена на рис. 6.5. Для обеспечения малого дрейфа ДУ выбираем транзисторы КТ312А, имеющие малый тепловой ток и достаточно высокий коэффициент β . Допустимое напряжение $U_{кэ\max} \leq 15 \text{ В}$. Следовательно, $E_{к1} = E_{к2} \leq \leq 7,5 \text{ В}$. Амплитуда выходного напряжения $U_{вых} = K_{УД} E_r = = 20 \cdot 10 = 200 \text{ мВ}$ может быть обеспечена при $E_{к1} = E_{к2} = 6,3 \text{ В}$. Меньшие значения E_k затрудняют построение ГСТ.

При использовании двух источников питания $\pm E_{к1,2}$ в схеме ДУ по рис. 6.5 потенциал эмиттеров транзисторов T_1 , T_2 в режиме покоя можно принять равным нулю. Это связано с тем, что падение напряжения в цепях баз транзисторов T_1 , T_2 от тока покоя $I_{601} R_r$ очень мало при малых входных токах и, следо-

вательно, база транзистора может считаться заземленной по постоянному току. Тогда потенциал эмиттера отличается от потенциала земли на величину $U_{бэ0,2} = 0,5 \div 0,7$ В для кремниевых транзисторов. Поэтому в первом приближении можно считать, что напряжение нижнего источника ($-E_{к2}$) приложено к ГСТ, а верхнего ($+E_{к1}$) — к транзистору T_1 (T_2) и резистору R_k .

Выбираем для транзисторов T_1 и T_2 рабочую точку с $U_{кэ0} = 3$ В, $I_{к0} = 1$ мА, $U_{бэ0} = 0,45$ В. Тогда номинал резистора R_k составляет

$$R_k = \frac{E_{к1} - U_{кэ0}}{I_{к0}} = \frac{6,3 - 3}{1} = 3,3 \text{ кОм.}$$

В выбранном режиме $h_{11з} = 2$ кОм, $\beta = 35$, тогда

$$I_{б0} = \frac{I_{к0}}{\beta} = \frac{1}{35} = 0,029 \text{ мА.}$$

Для увеличения $R_{вх}$ и выравнивания токов транзисторов T_1 и T_2 введем резисторы R'_3 , вносящие местную ООС по току транзисторов. Обычно R'_3 выбирают порядка десятков или сотен ом.

Полагаем $R'_3 = 40$ Ом, тогда $R_{вх,д} = 2 \left[h_{11з} + \frac{R'_3}{2} (\beta + 1) \right] = 2 [2 \cdot 10^3 + 20(35 + 1)] = 5,44$ кОм, т. е. $R_{вх} > 5$ кОм.

Для уменьшения токовой составляющей погрешности ДУ в базовую цепь транзистора T_2 включаем резистор $R_6 = R_T$. Проверим, обеспечивает ли ДУ требуемое значение $K_{Уд}$. Из выражения (6.2) при несимметричном выходе и $R_H = \infty$

$$K_{Уд} = \frac{1}{2} \frac{\beta R_k}{R_T + R_{вх,пл}} = \frac{1}{2} \frac{35 \cdot 3,3}{0,1 + 2,77} = 20,4,$$

что незначительно превышает требуемую величину.

Рассчитаем ГСТ, для чего вначале определим потенциал коллектора транзистора T_3 относительно общей шины:

$$U_{к3} = - \left(I_{б01} R_T + U_{бэ01} + I_{к01} \frac{R'_3}{2} \right) = \\ = - (29 \cdot 10^{-3} \cdot 0,1 + 0,45 + 20 \cdot 1 \cdot 10^{-3}) = -0,46 \text{ В.}$$

Следовательно, падение напряжения на транзисторе T_3 и резисторе R_3 составит $E_{к2} - U_{к3} = 6,3 - 0,46 = 5,84$ В.

При работе ДУ для нормального функционирования транзистора T_3 в ГСТ необходимо выполнение неравенств

$$U_{кб3} > 0 \text{ и } U_{кб3} \geq U_{кэнас}.$$

Выберем потенциал базы транзистора T_3 относительно общей шины $U_{63} = -4,5$ В, что обеспечит $U_{к63} \cong 4$ В. Тогда падение напряжения U на резисторе R_4 и диоде D (см. рис. 6.5)

$$U = E_{к2} - U_{63} = 6,3 - 4,5 = 1,8 \text{ В}$$

и

$$U_{R3} = U - U_{6303} = 1,8 - 0,5 = 1,3 \text{ В.}$$

Здесь $U_{6303} = 0,5$ В при $I_{к03} = I_{к01} + I_{к02} = 2$ мА. Тогда сопротивление резистора R_3

$$R_3 = U_{R3} / I_{к03} = 1,3 / 2 = 0,65 \text{ кОм.}$$

Выберем ток делителя R_4, R_5 равным коллекторному току транзистора T_3 , т. е. $I_{дел} = 2$ мА. Тогда

$$R_5 = (E_{к2} - U) / I_{дел} = 4,5 / 2 = 2,25 \text{ кОм.}$$

Для определения номинала резистора R_4 необходимо прежде выбрать диод D . Целесообразно в качестве диода применить транзистор КТ312А в диодном включении, что обеспечит хорошую температурную компенсацию изменения U_{63} транзистора T_3 вследствие одинаковых ТКН диода и транзистора T_3 . По входной характеристике транзистора КТ312А при $I_3 = 2$ мА величина $U_d = U_{630} = 0,5$ В и поэтому

$$R_4 = \frac{U - U_{630}}{I_{дел}} = \frac{1,8 - 0,5}{2} = 0,65 \text{ кОм.}$$

Рассчитаем коэффициент усиления синфазного сигнала при несимметричном выходе ДУ [выражение (6.5)], имея в виду, что вместо резистора R_3 в схеме ДУ с ГСТ следует учитывать сопротивление $R_{вых3}$ транзистора T_3 с введенной отрицательной обратной связью по току через резистор R_3 , определяемое по формулам (6.4). При значениях сопротивлений элементов

$$r_{к3}^* = \frac{r_{к3}}{\beta} = \frac{10^6}{35} \text{ Ом, } R_3 = 650 \text{ Ом,}$$

$$r_{э3} = \frac{\varphi_T}{I_{э03}} = \frac{25}{2} = 12,5 \text{ Ом, } r_{63} = 100 \text{ Ом}$$

и

$$R_4 \parallel R_5 = 2,25 \parallel 0,65 = 0,505 \text{ кОм}$$

получим из (6.4)

$$R_{\text{вых3}} = \frac{10^6}{35} \left[1 + \frac{35(12,5 + 650)}{12,5 + 650 + 100 + 505} \right] = 550 \text{ кОм.}$$

Тогда

$$K_{U_{\text{сф. несим}}} = \frac{R_{\text{к}}}{2R_{\text{вых3}}} = \frac{3,3}{2 \cdot 550} = 3 \cdot 10^{-3}$$

и

$$K_{\text{ос. сф}} = \frac{K_{U_{\text{л}}}}{K_{U_{\text{сф. несим}}}} = \frac{20}{3 \cdot 10^{-3}} = 6,6 \cdot 10^3,$$

или

$$K_{\text{ос. сф дБ}} = 76,4 \text{ дБ.}$$

Рассчитаем приведенный дрейф ДУ, считая, что температурные приращения $U_{\text{бэ0}}$ и $I_{\text{б0}}$ транзисторов T_1 и T_2 разнятся на $\pm 5\%$.

Для наихудшего случая, когда отклонения тока и напряжения суммируются, получим из выражения (6.9)

$$\begin{aligned} e_{\text{др ДУ}}^{\text{вх}} &= \frac{U_{\text{см}}}{T} + \frac{dI_{\text{б0 разн}}}{dT} \left(\frac{R'_3}{2} + R_{\text{г}} \right) = \\ &= \frac{0,1 U_{\text{бэ0}}}{T} + b \cdot 0,1 I_{\text{б0}} \left(\frac{R'_3}{2} + R_{\text{г}} \right) = \\ &= \frac{0,1 \cdot 0,45}{300} + 0,005 \cdot 0,1 \cdot 0,029 (0,1 + 0,02) \cdot 10^3 = 0,17 \text{ мВ/}^\circ\text{С.} \end{aligned}$$

§ 6.3. УСИЛИТЕЛИ ПОСТОЯННОГО ТОКА НА ОПЕРАЦИОННЫХ УСИЛИТЕЛЯХ

Операционный усилитель (ОУ) представляет собой усилитель электрических сигналов, выполненный в виде интегральной микросхемы с непосредственными (гальваническими) связями и предназначенный для выполнения различных операций над аналоговыми величинами при работе в схемах с отрицательной обратной связью.

Такой усилитель обладает высоким коэффициентом усиления в полосе частот порядка единиц мегагерц, высоким входным и малым выходным сопротивлением. Для упрощения расчетов схем с использованием ОУ часто прибегают к идеализации его параметров, считая $K_{U_{\text{ОУ}}} = \infty$, $R_{\text{вх ОУ}} = \infty$ и $R_{\text{вых ОУ}} = 0$.

ОУ имеет, как правило, два входа и один выход. Инвертирующий вход обозначают знаком «-»; сигнал, поданный на