

Глава 5. Дифференциальные усилители

5.1 Дифференциальные усилители

Дифференциальный усилитель – это симметричный усилитель с двумя входами и двумя выходами, использующийся для усиления разности напряжений двух входных сигналов. В идеальном случае выходное напряжение такого усилителя пропорционально только разности напряжений, приложенных к двум его входам, и не зависит от их абсолютной величины.

На рис. 5.1 приведена принципиальная схема дифференциального усилителя.

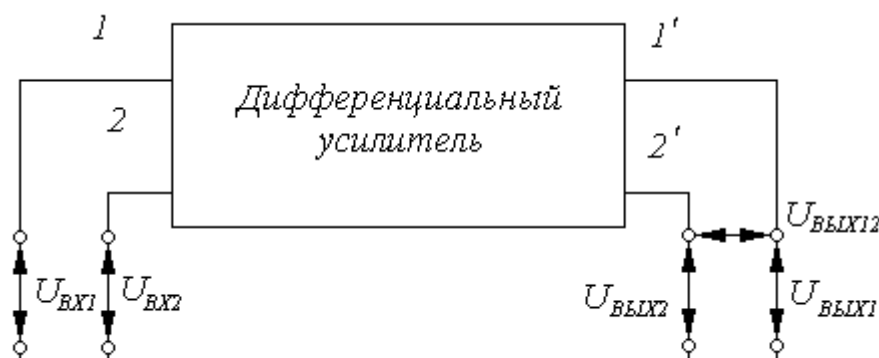


Рис. 5.1

У идеального дифференциального усилителя коэффициент передачи разностного сигнала равен отношению разности напряжений на выходе к разности напряжений на входе

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ12}}{U_{ВХ1} - U_{ВХ2}}. \quad (5.1)$$

где $U_{ВЫХ12} = U_{ВЫХ1} - U_{ВЫХ2}$ – напряжение на зажимах симметричного выхода; $U_{ВХ1}$ и $U_{ВХ2}$ – соответственно напряжения на первом и втором входах усилителя.

Если выходное напряжение снимается с одного из несимметричных выходов, то при снятии напряжения с первого выхода коэффициент усиления разностного сигнала:

$$K_{U1} = \frac{\Delta U_{ВЫХ1}}{U_{ВХ1} - U_{ВХ2}}, \quad (5.2)$$

где $\Delta U_{ВЫХ1}$ – приращение напряжения на первом выходе, обусловленное разности входных напряжений $U_{ВХ1} - U_{ВХ2}$.

Аналогично при снятии напряжения со второго выхода коэффициент усиления разностного сигнала:

$$K_{U2} = \frac{\Delta U_{ВЫХ2}}{U_{ВХ1} - U_{ВХ2}}, \quad (5.3)$$

где $\Delta U_{\text{ВЫХ}2}$ – приращение напряжения на втором выходе, обязанное разности входных напряжений $U_{\text{ВХ}1} - U_{\text{ВХ}2}$.

При симметрии схемы выполняются условия:

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}2} = -\Delta U_{\text{ВЫХ}1}; \quad \Delta U_{\text{ВЫХ}2} - \Delta U_{\text{ВЫХ}1} = 2\Delta U_{\text{ВЫХ}1}, \quad (5.4)$$

откуда

$$K_{U1} = -K_{U2} = K_U / 2. \quad (5.5)$$

При симметрии схемы в соответствии с (5.1):

$$U_{\text{ВЫХ}12} = K_U (U_{\text{ВХ}1} - U_{\text{ВХ}2}). \quad (5.6)$$

Однако реальный усилитель не обладает идеальной симметрией, в результате чего напряжение на выходе зависит не только от разности, но и от суммы входных сигналов. При этом сумма входных сигналов, поделённая на два, называется *синфазным сигналом*. Выходное напряжение реального усилителя будем считать равным:

$$U_{\text{ВЫХ}12} = K_U (U_{\text{ВХ}1} - U_{\text{ВХ}2}) + K_C (U_{\text{ВХ}1} + U_{\text{ВХ}2}) / 2. \quad (5.7)$$

где K_U – коэффициент усиления разностного напряжения, равный отношению приращения на выходе к разностному напряжению на входе при суммарном напряжении $U_{\text{ВХ}1} + U_{\text{ВХ}2}$, равном нулю. Коэффициент K_C называют коэффициентом передачи синфазного сигнала:

$$K_C = \frac{U_{\text{ВЫХ}12}}{(U_{\text{ВХ}1} + U_{\text{ВХ}2}) / 2}. \quad (5.8)$$

Этот коэффициент равен отношению напряжения на выходе к синфазному входному напряжению $(U_{\text{ВХ}1} + U_{\text{ВХ}2}) / 2$ при разностном напряжении на входе, равном нулю.

Качество дифференциального усилителя (его приближение к идеальному) оценивается *коэффициентом ослабления синфазного сигнала*, равным отношению коэффициентов передачи разностного и синфазного сигналов:

$$K_{\text{ос.сф}} = \frac{K_U}{K_C}. \quad (5.9)$$

У хороших дифференциальных усилителей коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{\text{ос.сф}} = 10^4 - 10^6$, что составляет 80 – 120 дБ.

Простейший дифференциальный каскад (рис. 5.2а) состоит из двух транзисторов T_1 и T_2 с отдельными, но одинаковыми нагрузками R_1 и R_2 ($R_1 = R_2 = R$). Эмиттеры обоих транзисторов подключены к общему резистору R_3 .

Изменение температуры элементов каскада изменяет токи транзисторов синфазно, поэтому, чем меньше коэффициентом ослабления синфазного сигнала, тем меньше температурный дрейф, тем точнее каскад. Повышение качества дифференциальных каскадов – это в основном уменьшение $K_{\text{ос.сф}}$. Наиболее эффективно $K_{\text{ос.сф}}$ уменьшается путём увеличения сопротивления R_3 . Однако с увеличением R_3 уменьшаются постоянные составляющие токов эмиттеров.

Усиление синфазного сигнала в дифференциальном усилителе можно значительно уменьшить, если резистор R_3 заменить источником тока (рис. 5.2б). При этом действующее значение сопротивления R_3 станет очень большим, а усиление синфазного сигнала будет ослаблено почти до нуля. Источник тока в эмиттерной цепи поддерживает полный эмиттерный ток постоянным, и он (в силу симметрии схемы) равномерно распределяется между двумя коллекторными цепями. Следовательно, сигнал на выходе схемы не изменяется.

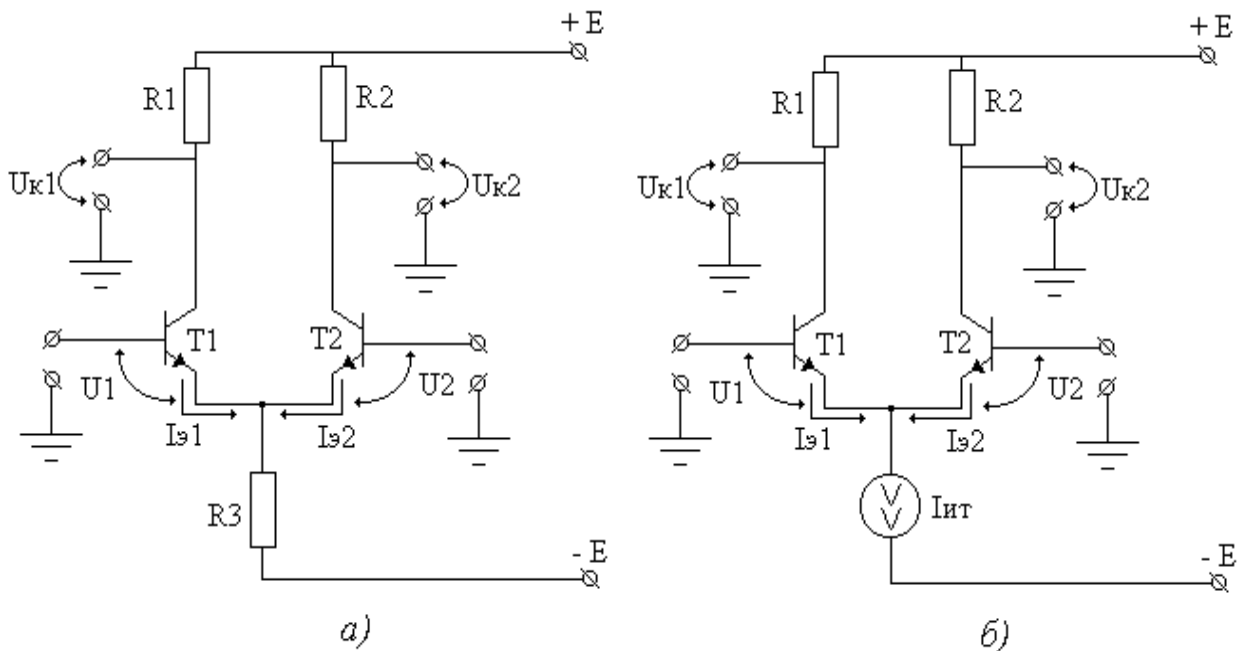


Рис. 5.2

На рис. 5.3а приведена схема одного плеча дифференциального усилителя для разностного сигнала. Из рис. 2 видно, что при разностном сигнале и симметрии схемы токи транзисторов $T1$ и $T2$ через эмиттерное сопротивление равны и противоположны по фазе. Поэтому при усилении разностного сигнала на сопротивлении $R3$ нет переменного напряжения. На этом основании в схеме на рис. 3а, справедливой при усилении разностного сигнала, эмиттерное сопротивление отсутствует. В соответствии с данной схемой коэффициент передачи разностного сигнала для одного плеча схемы:

$$K_p = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ1}}}{U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}}} \approx \frac{1}{2} h_{21Э} \frac{R_{K1}}{R_{1Э}}. \quad (5.10)$$

Множитель $1/2$ появился потому, что на входе I действует лишь половина полного разностного напряжения между двумя входами.

Общий коэффициент передачи разностного напряжения двумя плечами дифференциального усилителя:

$$K_U = 2K_{U1} \approx \frac{h_{21Э} R_{K1}}{h_{1Э}}. \quad (5.11)$$

На рис. 5.3б приведена эквивалентная схема дифференциального усилителя для синфазного сигнала. Она получена рассечением схемы на рис. 5.2 по

вертикальной оси симметрии. На основании этой схемы коэффициент передачи синфазного сигнала одним плечом схемы:

$$K_{C1} \approx \frac{R_{K1}}{2R_Э}. \quad (5.12)$$

Коэффициент передачи синфазного сигнала одним плечом дифференциального усилителя очень мал, так как всё приращение синфазного напряжения падает на эмиттерном сопротивлении.

При полной симметрии схемы результирующий коэффициент передачи синфазного сигнала $K_C = K_{C1} - K_{C2} = 0$.

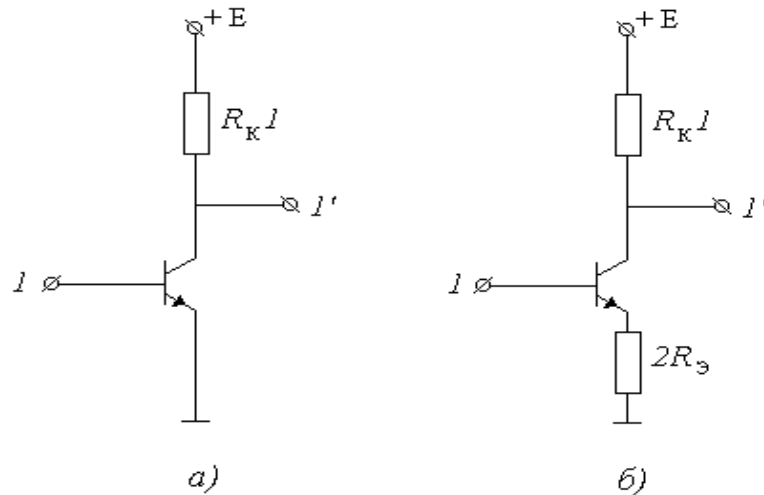


Рис. 5.3

Иногда усиливаемое напряжение подают лишь на один из входов дифференциального усилителя, а второй вход заземляют. В этом случае входное сопротивление усилителя:

$$R_{ВХ} \approx 2h_{11Э} = 2r_{БЭ}, \quad (5.13)$$

так как только половина напряжения, подаваемого на вход усилителя, является напряжением база-эмиттер, другая половина этого напряжения падает на эмиттерном сопротивлении, с которого в противофазе поступает на вход второго транзистора. При таком включении дифференциальный усилитель является *фазоинвертором*. На двух его выходах относительно земли создаются два одинаковых напряжения, имеющих противоположные фазы.

При подаче напряжения на один или оба входа дифференциального усилителя выходное напряжение можно снимать как с двух, так и с одного выхода. Если подавать напряжение на оба входа и снимать его с одного выхода, то коэффициент ослабления синфазного сигнала:

$$K_{ОС.СФ} = \frac{K_{U1}}{K_{U2}} \approx \frac{h_{21Э} R_Э}{h_{11Э}}. \quad (5.14)$$

Хотя при симметрии схемы дифференциального усилителя обеспечивается ослабление синфазного сигнала даже при $R_Э = 0$, очень важно, чтобы это сопротивление для синфазного сигнала было максимальным, чтобы синфазный сигнал не вызывал смещения рабочих точек транзисторов в нелинейную область.

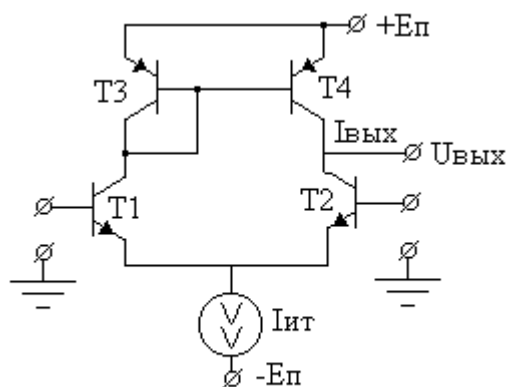


Рис. 5.4

Иногда желательно, чтобы однокаскадный дифференциальный усилитель, как и простой усилитель с заземлённым эмиттером, имел большой коэффициент усиления. Решение даёт использование токового зеркала в качестве активной нагрузки усилителя (рис. 5.4). Транзисторы T_1 и T_2 образуют дифференциальную пару с источником тока в эмиттерной цепи. Транзисторы T_3 и T_4 , образующие токовое зеркало, выступают в качестве коллекторной нагрузки. Тем самым обеспечивается высокое значение сопротивления коллекторной нагрузки, благодаря этому коэффициент усиления по напряжению достигает 5000 и выше при условии, что нагрузка на выходе усилителя отсутствует. Такой усилитель используют, как правило, только в схемах, охваченных петлёй обратной связи, или в *компараторах* – схемах, которые сравнивают входные сигналы и оценивают, какой из них больше. Нагрузка для такого усилителя обязательно должна иметь большой импеданс, иначе усиление будет осуществлено ослаблено.

5.2 Пример расчета типичного дифференциального усилителя

Схема обычного ДУ с динамической нагрузкой в виде токового зеркала и источником стабильного тока изображена на рис. 5.5. Выбор транзисторов ДУ, в первую очередь следует производить исходя из необходимости обеспечения идентичности их параметров. Рекомендуют брать специально выпускаемые для работы в ДУ транзисторные пары, а при их отсутствии транзисторы, входящие в состав микросборок.

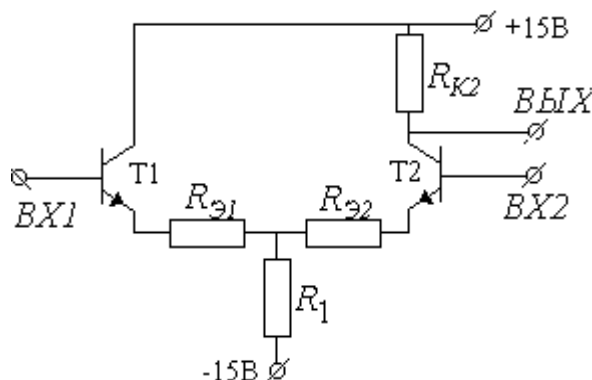


Рис. 5.5

Для расчета ДУ изначально необходимо знать несколько параметров. Допустим, напряжение питания равно $U_{\Pi} = \pm 15B$, ток коллектора $I_{K(T1,T2)} = 1mA$.

Номинал сопротивления R_{K2} выбирается из соображений получения точки транзистора $T2$ в середине нагрузочной прямой для обеспечения линейного режима и максимального динамического диапазона.

После выбора транзисторов, определяем коэффициент усиления по току β , его можно определить по графику зависимости тока коллектора от коэффициента усиления по току. Следующим шагом рассчитывается ток базы транзисторов $T1, T2$:

$$I_B = \frac{I_K}{\beta}. \quad (5.15)$$

По входной вольт амперной характеристике (ВАХ) определяем напряжение база-эмиттерного перехода, допустим $U_{БЭ} = 0.6B$, тогда максимально возможное напряжение на коллектор-эмиттерном переходе равно:

$$U_{КЭ} = \frac{U_{\Pi}}{2} + U_{БЭ}.$$

Тогда падение напряжения на коллекторном сопротивлении будет составлять половину напряжения коллектор-эмиттерного перехода, для обеспечения линейного режима работы транзистора.

$$U_{R_{K2}} = \frac{U_{КЭ}}{2} = 7.8B \quad (5.16)$$

$$R_{K2} = \frac{U_{R_{K2}}}{I_K} = 7800(Ом). \quad (5.17)$$

Падение напряжения на сопротивлениях $R_{Э1}$ и $R_{Э2}$ составляет $0.1B$, тогда:

$$R_{Э1} = R_{Э2} = \frac{U_{(R_{Э1}, R_{Э2})}}{I_K} = 100(Ом). \quad (5.18)$$

Ток источника тока (в роли источника тока – резистор R_1) равен сумме двух коллекторных токов транзисторов T_1 и T_2 равных между собой (свойства дифференциального усилителя).

$$I_1 = I_{K(T1)} + I_{K(T2)} = 2mA, \quad \text{при} \quad I_{K(T1)} = I_{K(T2)}. \quad (5.19)$$

Тогда сопротивление R_1 определяется:

$$R_1 = \frac{\frac{U_{\Pi}}{2} - U_{БЭ} - U_{(R_{Э1}, R_{Э2})}}{I_1} = 7150(Ом). \quad (5.20)$$

Сопротивления $R_{Э1}$ и $R_{Э2}$ выполняют ту же роль, как и сопротивление $R_Э$ в схеме с ОЭ, т.е. с помощью этих сопротивлений можно задавать необходимый коэффициент усиления дифференциального каскада.

Определим коэффициент усиления по переменному напряжению:

$$K_{U(Дифф)} = \frac{R_{K2}}{2R_{(Э1, Э2)}} \approx 40(раз). \quad (5.21)$$

Необходимо произвести оценку сопротивления r_3 так как сопротивления R_{ε_1} и R_{ε_2} должны быть больше чем r_3 .

$$r_3 = \frac{1}{S} = \frac{U_T}{I_K} \approx \frac{26 \cdot 10^{-3}}{10^{-3}} = 26(\text{Ом}). \quad (5.22)$$

Определим максимально возможный коэффициент усиления по напряжению в данной схеме при уменьшении сопротивлений R_{ε_1} и R_{ε_2} , но с заданным током коллектора I_K :

$$K_{U_{\max}} = \frac{R_{K2}}{2r_3} = 150(\text{раз}). \quad (5.23)$$

Теперь определим коэффициент усиления синфазного сигнала:

$$K_{U(\text{Синф})} = \frac{R_{K2}}{(2R_1 + R_{(\varepsilon_1, \varepsilon_2)} + r_3)} \approx 0.5(\text{раз}). \quad (5.24)$$

Через коэффициент усиления синфазного сигнала определим температурную стабильность каскада (при $\Delta T = 50^\circ\text{C}$):

$$\frac{\Delta U_K}{\Delta U_{KЭ}} 100\% = \frac{K_{U(\text{Синф})} \Delta T 2.1 \text{ мВ}/^\circ\text{C}}{U_{KЭ}} = 0.7\%. \quad (5.25)$$

Входное сопротивление определяется так же как и в схеме с ОЭ только при наличии двух база-эмиттерных переходов:

$$R_{ВХ} = 2\beta(R_3 + r_3) = 25(\text{кОм}). \quad (5.26)$$

Вычислим входное сопротивление без сопротивлений R_{ε_1} и R_{ε_2} :

$$R_{ВХ} = 2\beta r_3 = 20(\text{кОм}). \quad (5.27)$$

Оценим входное сопротивление для синфазного сигнала:

$$R_{ВХ(\text{Синф})} = 2\beta(R_{(\varepsilon_1, \varepsilon_2)} + r_3 + R_1) = 1.4(\text{МОм}). \quad (5.28)$$

Выходное сопротивление каскада – это параллельное соединение сопротивлений R_{K2} и $r_{KЭ(T2)}$:

$$R_{ВЫХ} = \frac{R_{K2} r_{KЭ}}{R_{K2} + r_{KЭ}} \approx 6.7(\text{кОм}), \quad \text{где} \quad r_{KЭ} = \frac{U_Y}{I_K} = 100(\text{кОм}). \quad (5.29)$$