

Работа 4.1. Дифференциальные усилители на биполярных транзисторах

4.1.1. Общие сведения о дифференциальных усилителях

В современной радиоэлектронике широкое применение находят дифференциальные (разностные) усилители. Дифференциальный усилитель (ДУ) представляет симметричную схему с двумя входами и двумя выходами (рис. 4.1.1). Вход, обозначенный символом «+», называют *неинвертирующим*. Вход, обозначенный символом «-», называют *инвертирующим*. Поскольку схема имеет два выхода, в качестве выходного можно использовать напряжения $U_{\text{вых}1}$, $U_{\text{вых}2}$ или их разность $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых}2} - U_{\text{вых}1}$. В последнем случае выход дифференциального усилителя называют *симметричным*.

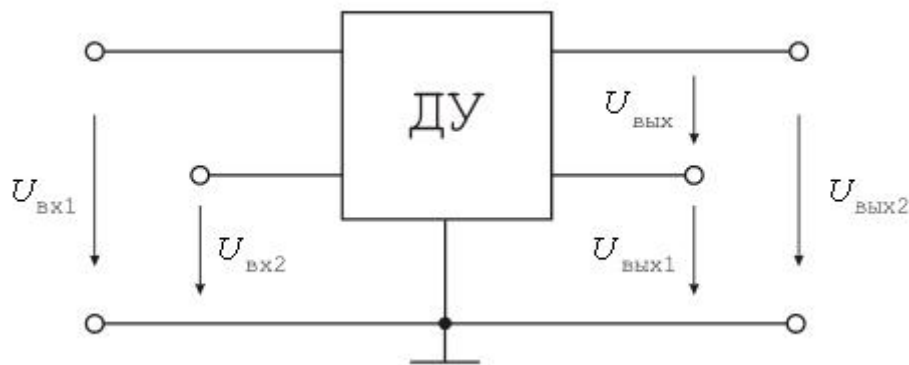


Рис. 4.1.1

Сигналы на входе дифференциального усилителя представляют в виде суммы *дифференциальной* и *синфазной* составляющих:

$$U_{\text{вх}1} = U_{\text{сф}} + U_{\text{д}}/2;$$

$$U_{\text{вх}2} = U_{\text{сф}} - U_{\text{д}}/2.$$

Из последних равенств следует, что дифференциальный сигнал равен разности входных напряжений:

$$U_{\text{д}} = U_{\text{вх}1} - U_{\text{вх}2}, \quad (4.1.1)$$

а синфазный – их полусумме:

$$U_{\text{сф}} = \frac{U_{\text{вх}1} + U_{\text{вх}2}}{2}. \quad (4.1.2)$$

В соответствии с (4.1.1) и (4.1.2) источник сигнала на входе дифференциального усилителя можно представить эквивалентной схемой, показанной на рис. 4.1.2.

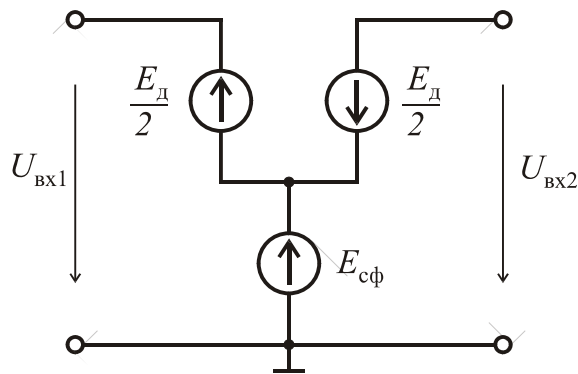


Рис. 4.1.2

Различают коэффициенты усиления дифференциального и синфазного сигналов:

$$K_{\text{д}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{д}}};$$

$$K_{\text{сф}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{u_{\text{сф}}}.$$

Важное свойство дифференциального усилителя заключается в том, что он усиливает дифференциальные и ослабляет синфазные составляющие сигнала. Одним из главных параметров дифференциального усилителя является *коэффициент ослабления синфазного сигнала*, который показывает, во сколько раз коэффициент усиления дифференциального сигнала больше коэффициента синфазного сигнала:

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{сф}}}.$$

Дифференциальные усилители находят широкое применение в аналоговых интегральных схемах: операционных усилителях, аналоговых перемножителях, компараторах и т. д. Это объясняется следующими причинами.

1. ДУ эффективно подавляет синфазные составляющие сигнала, которые, как правило, являются помехами.
2. ДУ не требуют включения развязывающих конденсаторов.
3. Работа дифференциальных усилителей основана на идентичности параметров элементов, входящих в его состав. Это легко обеспечивается в

интегральных схемах, где элементы расположены на одном кристалле на расстоянии нескольких микрон друг от друга.

Дифференциальные усилители входят в состав большого числа аналоговых интегральных схем.

4.1.2. Дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах

Схема дифференциального усилителя на биполярных транзисторах показана на рис. 4.1.3. Первое плечо усилителя образовано резисторами $R_{к1}$, $R_{э1}$ и транзистором $VT1$, а второе – резисторами $R_{к2}$, $R_{э2}$ и транзистором $VT2$. Источник тока реализуют с помощью схемы с общим эмиттером либо на основе токового зеркала.

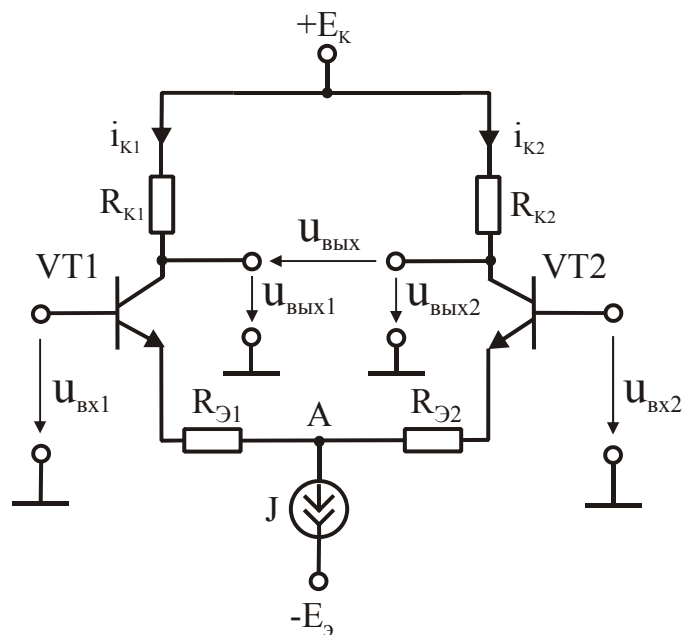


Рис. 4.1.3

Если плечи схемы симметричны и входные напряжения одинаковы, ток источника делится поровну между транзисторами $VT1$ и $VT2$:

$$I_{к1} = I_{к2} = \alpha J / 2$$

При равенстве входных напряжений

$$U_{вых1} = U_{вых2} = E_{к} - \frac{1}{2} \alpha R_{к} J .$$

Напряжение симметричного выхода

$$U_{вых} = U_{вых2} - U_{вых1} = 0 .$$

Предположим, что на входах дифференциального усилителя действует синфазный сигнал $U_{\text{сф}}$. При действии такого сигнала токи коллекторов не изменятся, поэтому выходные напряжения останутся прежними. Таким образом, в случае симметрии плеч синфазный сигнал не изменяет режим работы дифференциального усилителя.

Предположим теперь, что на входе действует дифференциальный сигнал, т. е. напряжение $U_{\text{вх}}$ увеличилось на величину ΔU , а напряжение $U_{\text{вх}2}$ уменьшилось на такую же величину. При этом ток $I_{\text{к}1}$ увеличится, а ток $I_{\text{к}2}$ уменьшится на величину ΔI . Изменятся и выходные напряжения:

$$U_{\text{вых}1} = E_{\text{к}} - R_{\text{к}1}(J/2 + \Delta I);$$

$$U_{\text{вых}2} = E_{\text{к}} - R_{\text{к}2}(J/2 - \Delta I).$$

Таким образом, схема на рис. 4.1.3 усиливает только дифференциальный сигнал. Анализ показывает, что небольшие изменения дифференциального напряжения приводят к значительным изменениям токов $I_{\text{к}1}$ и $I_{\text{к}2}$. Следовательно, изменятся и выходные напряжения.

Пример 4.1.1. Рассчитать токи и напряжения в схеме дифференциального усилителя на рис. 4.1.3. для двух случаев:

$$1) U_{\text{вх}1} = U_{\text{вх}2} = 1 \text{ В};$$

$$2) U_{\text{вх}1} = 1 \text{ В}, U_{\text{вх}2} = 0;$$

Характеристики транзисторов идентичны. Коэффициент $\alpha \approx 1$. Напряжение эмиттерного перехода открытого транзистора равно 0.7 В. Сопротивления резисторов в схеме $R_{\text{к}1} = R_{\text{к}2} = 1 \text{ кОм}$, $R_{\text{э}1} = R_{\text{э}2} = 100 \text{ Ом}$. Ток источника $J = 2 \text{ мА}$.

Решение. Случай 1. Поскольку транзисторы согласованы, $I_{\text{к}1} = I_{\text{к}2} = \alpha J/2 = 1 \text{ мА}$. Выходные напряжения одинаковы:

$$U_{\text{вых}1} = U_{\text{вых}2} = E_{\text{к}} - \alpha R_{\text{к}} J/2 = 5 - 1 \cdot 1 \cdot 1 = 4 \text{ В}.$$

Напряжение узла А на рис. 4.1.3

$$U_{\text{А}} = U_{\text{вх}1} - U_{\text{бэ}} - R_{\text{э}} J/2 = 1 - 0.7 - 0.1 \cdot 1 = 0.2 \text{ В}.$$

Случай 2. Так как $U_{\text{вх}2} = 0$, разумно предположить, что VT2 находится в состоянии отсечки и ток $I_{\text{к}2} = 0$. В этом случае $I_{\text{к}1} = J = 2 \text{ мА}$. Выходные напряжения

$$U_{\text{вых}1} = E_{\text{к}} - \alpha R_{\text{к}} J = 5 - 1 \cdot 1 \cdot 2 = 3 \text{ В};$$

$$U_{\text{ВЫХ}2} = E_{\text{к}} = 5 \text{ В}.$$

Напряжение узла А

$$U_{\text{А}} = U_{\text{ВХ}1} - U_{\text{бэ}1} - R_{\text{э}}J = 1 - 0.7 - 0.1 \cdot 2 = 0.1 \text{ В}.$$

Напряжение эмиттерного перехода второго транзистора

$$U_{\text{бэ}2} = U_{\text{ВХ}2} - U_{\text{А}} = 0 - 0.1 = -0.1 \text{ В}.$$

Как мы и предполагали, VT2 находится в режиме отсечки.

Рассмотренный пример показывает, что режим работы транзисторов и выходные напряжения дифференциального усилителя определяются не абсолютной величиной напряжений $U_{\text{ВХ}1}$ и $U_{\text{ВХ}2}$, а их разностью, т. е. дифференциальной составляющей входного напряжения. Это справедливо до тех пор, пока транзисторы работают в активном режиме.

4.1.3. Основные параметры ДУ на биполярных транзисторах

Коэффициент усиления дифференциального сигнала. Предположим, что на входах усилителя действует дифференциальный сигнал малой амплитуды, и транзисторы работают в активном режиме. В этом случае коэффициенты усиления дифференциального сигнала

$$K_{\text{д1}} = -K_{\text{д2}} = \frac{u_{\text{ВЫХ}1}}{u_{\text{д}}} = -\alpha \frac{R_{\text{к}}}{2(R_{\text{э}} + r_{\text{э}})}. \quad (4.1.3)$$

Здесь $r_{\text{э}}$ – дифференциальное сопротивление эмиттерного перехода:

$$r_{\text{э}} = \frac{Vt}{I_{\text{э}}} = \frac{Vt}{J/2}.$$

При комнатной температуре $Vt = 26 \text{ мВ}$. Обычно величина $r_{\text{э}}$ составляет несколько десятков Ом.

Для симметричного выхода

$$K_{\text{д}} = \alpha \frac{R_{\text{к}}}{(R_{\text{э}} + r_{\text{э}})}.$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала. Выходные напряжения, обусловленные действием источника синфазного сигнала

$$u_{\text{вых1}} = u_{\text{вых2}} = -\alpha \frac{R_{\text{к}}}{2R_{\text{J}}} e_{\text{сф}}.$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала

$$K_{\text{сф1}} = K_{\text{сф2}} = -\frac{\alpha R_{\text{к}}}{2R_{\text{J}}}. \quad (4.1.4)$$

Чем больше внутреннее сопротивление источника тока, тем меньше коэффициент усиления синфазного сигнала.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{сф}}} \approx \frac{R_{\text{J}}}{(R_{\text{э}} + r_{\text{э}})}.$$

Для симметричного выхода напряжение синфазной составляющей $u_{\text{вых}} = 0$, поэтому $K_{\text{сф}} = 0$.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала прямо пропорционален сопротивлению источника тока.

Входные сопротивления дифференциальных усилителей на биполярных транзисторах. Определим входное сопротивление дифференциального усилителя на рис. 4.1.3 для дифференциальной и синфазной составляющих сигнала.

Входной ток, обусловленный дифференциальной составляющей сигнала

$$i_{\text{б1}} = \frac{i_{\text{э1}}}{\beta + 1} \approx \frac{e_{\text{д}}}{2(R_{\text{э}} + r_{\text{э}})(\beta + 1)}.$$

Входное сопротивление для дифференциальной составляющей

$$R_{\text{вх диф}} = \frac{e_{\text{д}}}{i_{\text{б1}}} = 2(R_{\text{э}} + r_{\text{э}})(\beta + 1). \quad (4.1.5)$$

Входной ток, обусловленный синфазной составляющей сигнала,

$$i_{\text{б}} = \frac{i_{\text{э}}}{\beta + 1} \approx \frac{e_{\text{сф}}}{2R_{\text{J}}(\beta + 1)}.$$

Входное сопротивление для синфазной составляющей

$$R_{\text{вхсф}} = 2R_J(\beta + 1). \quad (4.1.6)$$

Полученные соотношения показывают, что входные сопротивления дифференциальных усилителей на биполярных транзисторах зависят от параметров транзисторов, внутреннего сопротивления источника тока и сопротивлений в цепях эмиттеров. Для увеличения входного сопротивления ДУ необходимо использовать биполярные транзисторы с большими значениями коэффициента β . Источники тока с большим внутренним сопротивлением реализуют на основе отражателей тока.

Пример 4.1.2. Рассчитать параметры дифференциального усилителя на рис. 4.1.3, если $R_K = 10 \text{ кОм}$, $R_S = 200 \text{ Ом}$, $J = 1 \text{ мА}$, $E_K = E_S = 15 \text{ В}$. Коэффициент усиления тока базы $\beta = 100$. Внутреннее сопротивление источника тока $R_J = 200 \text{ кОм}$. Сопротивлением эмиттерных переходов пренебречь.

Решение. Коэффициент усиления дифференциального сигнала

$$K_{\text{д1}} = -K_{\text{д2}} = -\frac{1}{2} \alpha \frac{R_K}{R_S} = -\frac{1}{2} 0.99 \frac{10}{0.2} = -24.75.$$

В случае симметричного выхода

$$K_{\text{д}} = 2K_{\text{д1}} = 49.5.$$

1. Коэффициент усиления синфазного сигнала

$$K_{\text{сф1}} = K_{\text{сф2}} = -\frac{\alpha R_K}{2R_J} = -\frac{0.99 \cdot 10}{2 \cdot 200} = -0.025.$$

2. Коэффициент ослабления синфазного сигнала

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{сф}}} \approx 1000 \text{ (60 дБ)}.$$

3. Входное сопротивление для дифференциального сигнала

$$R_{\text{вхдиф}} = 2R_S(\beta + 1) = 2 \cdot 0.2(100 + 1) \approx 40 \text{ кОм}.$$

4. Входное сопротивление для синфазного сигнала

$$R_{\text{вхсф}} = 2R_J(\beta + 1) = 2 \cdot 200(100 + 1) \approx 40 \text{ МОм}.$$

Дифференциальные усилители находят широкое применение в электронике и измерительной технике, для усиления слабых сигналов. ДУ являются важными функциональными узлами аналоговых интегральных схем. Это объясняется тем, что в интегральных схемах, где элементы расположены друг от друга на расстоянии нескольких микрон, легко обеспечить требуемую идентичность параметров.

4.1.3. Простейший дифференциальный усилитель на биполярных транзисторах

Схема простейшего дифференциального усилителя на биполярных транзисторах показана на рис. 4.1.4. Источник тока, обеспечивающий смещение рабочих точек транзисторов, заменен резистором R_0 и источником $-E_3$. Величину R_0 можно найти из уравнения

$$R_0 = \frac{E_3 - U_{\text{бэ}}}{I_0} = \frac{E_3 - 0.7}{I_0}; \quad (4.1.7)$$

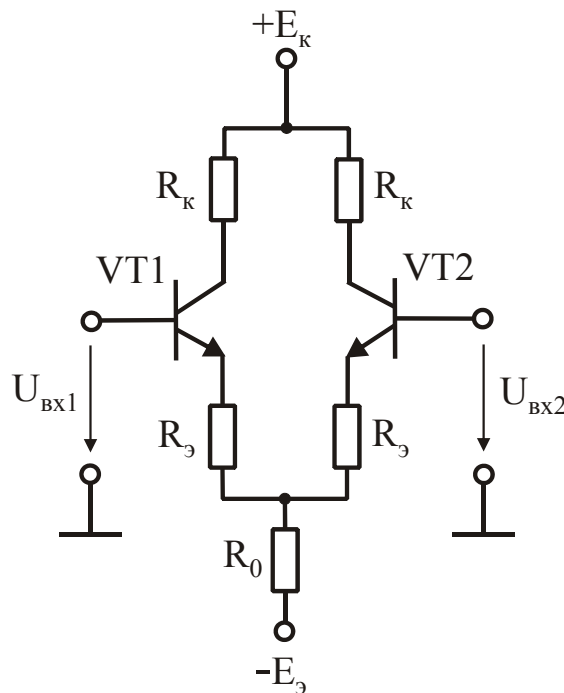


Рис. 4.1.4

Коэффициенты усиления дифференциального и синфазного сигналов определяются выражениями (4.1.3) и (4.1.4). В формуле (4.1.4) $R_1 = R_0$.

4.1.4. Дифференциальный усилитель с отражателем тока

Существенный недостаток дифференциального усилителя на рис. 4.1.4 заключается в том, что резистор R_0 определяет одновременно режим транзисторов по постоянному току и коэффициент ослабления синфазного сигнала. Поэтому получить большую величину $K_{\text{осц}}$ в таком усилителе невозможно.

Значительно большее ослабление синфазного сигнала можно получить, включив вместо резистора R_0 отражатель тока на транзисторах $VT3$ и $VT4$ (рис. 4.1.5).

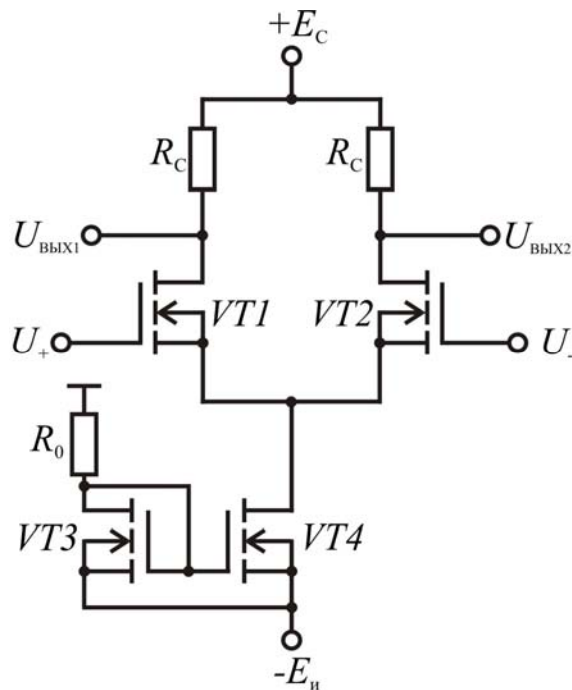


Рис. 4.1.5

Выходной ток регулируется резистором R_0 . Его величина определяется уравнением

$$R_0 = \frac{E_э - U_{\text{бэ}}}{I_0}. \quad (4.1.8)$$

Выходное сопротивление отражателя тока определяется сопротивлением запертого коллекторного перехода транзистора $VT4$. Оно составляет десятки-сотни кОм

4.1.5. Рекомендации по выполнению предварительного расчета

Расчет постоянных составляющих токов и напряжений дифференциального усилителя рассмотрен в примере 4.1.1.

Расчет параметров ДУ рассмотрен в примере 4.1.2.

Сопротивления резисторов, определяющих режим транзисторов по постоянному току, определяются с помощью соотношений (4.1.7) и (4.1.8).

4.1.6. Рекомендации по сборке схем

При сборке схем дифференциальных усилителей использовать модели *n-p-n* транзисторов Q2N3904 или Q2N2222 из библиотеки EVAL.slb. Примеры схем можно найти в файлах W4_1_1, W4_1_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. Каплан, Д. Практические основы аналоговых и цифровых схем / Д. Каплан, К Уайт: пер. с англ. – 6-е изд. – М.: Техносфера, 2006. – 176 с.
5. Довгун, В. П. Электротехника и электроника: учеб. пособие: в 2-х ч. Ч. 2 / В. П. Довгун. – Красноярск: ИПЦ КГТУ, 2006. – 252 с.