

Работа 4.2. Дифференциальные усилители на МОП-транзисторах

4.1. 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. 4.2.1). Вход, обозначенный символом «+», называют *неинвертирующим*. Вход, обозначенный символом «-», называют *инвертирующим*. Поскольку схема имеет два выхода, в качестве выходного можно использовать напряжения $U_{\text{вых1}}$, $U_{\text{вых2}}$ или их разность $U_{\text{вых}} = U_{\text{вых2}} - U_{\text{вых1}}$. В последнем случае выход дифференциального усилителя называют *симметричным*.

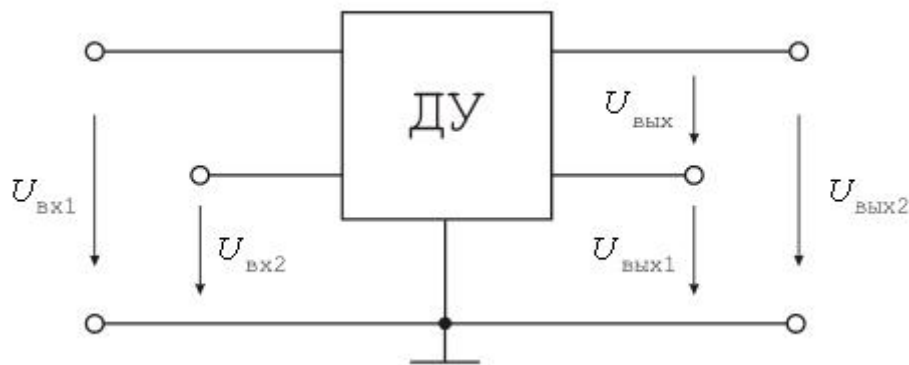


Рис. 4.2.1

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

$$U_{\text{вх1}} = U_{\text{сф}} + U_{\text{д}}/2;$$

$$U_{\text{вх2}} = U_{\text{сф}} - U_{\text{д}}/2.$$

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

$$U_{\text{д}} = U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}, \quad (4.2.1)$$

а синфазный – их полусумме:

$$U_{\text{сф}} = \frac{U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}}}{2}. \quad (4.2.2)$$

В соответствии с (4.2.1) и (4.2.2) источник сигнала на входе дифференциального усилителя можно представить эквивалентной схемой, показанной на рис. 4.2.2.

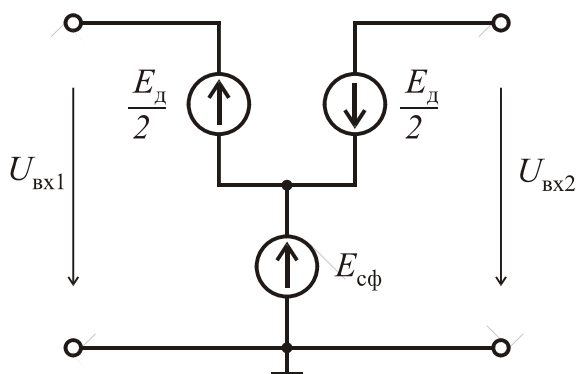


Рис. 4.2.2

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.

4.2.2. Классическая схема дифференциального усилителя на МОП-транзисторах

Схема дифференциального усилителя на МОП-транзисторах показана на рис. 4.2.3. Смещение рабочих точек обоих транзисторов создается источником тока J . Как правило, источник тока реализуется на основе токового зеркала.

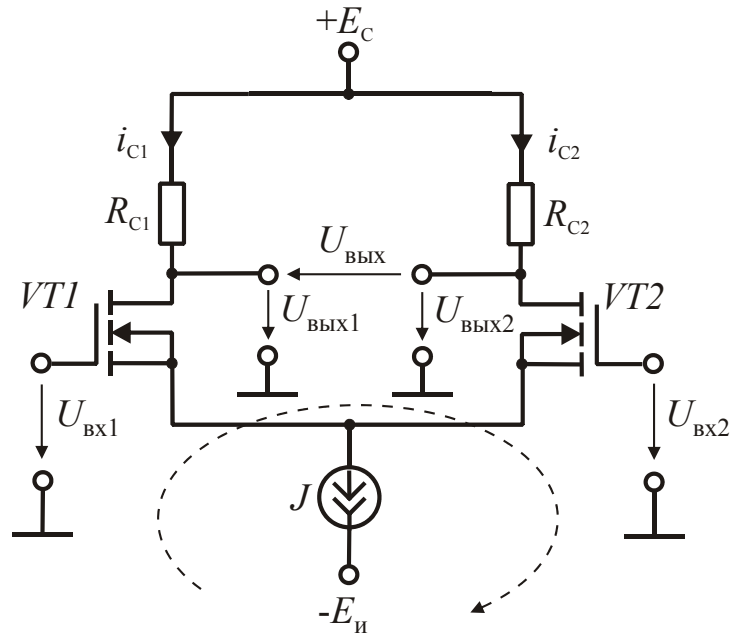


Рис. 4.2.3

Схема усилителя на рис. 4.2.3 имеет два плеча. Первое плечо образовано резистором R_{c1} и транзистором $VT1$, а второе – резистором R_{c2} и транзистором $VT2$. Будем считать, что характеристики обоих плеч идентичны: параметры обоих транзисторов одинаковы, а $R_{c1} = R_{c2} = R_c$. На практике это легко достигается в интегральных схемах, когда все элементы расположены на одном кристалле.

Если схема на рис. 4.2.3 симметрична, усиление синфазного сигнала не происходит. ДУ усиливает только дифференциальные составляющие сигнала и подавляет синфазный сигнал.

Пример 4.1. Расчет ДУ в режиме постоянного тока. В схеме дифференциального усилителя на рис. 4.2.3 $E_c = E_{и} = 1.5$ В, $J = 0.4$ мА, $R_{c1} = R_{c2} = 2.5$ кОм. Параметры транзисторов одинаковы: пороговое напряжение $U_0 = 0.5$ В, удельная проводимость $b = 4$ мА/В². Определить токи I_{c1} и I_{c2} , напряжения затвор-исток и выходные напряжения для двух случаев:

- 1) $U_{вх1} = U_{вх2} = 0$;
- 2) $U_{вх1} = U_{вх2} = 1$ В.

Решение. Случай 1. Поскольку плечи схемы симметричны и входные напряжения одинаковы, ток источника J делится пополам, т. е. $I_{c1} = I_{c2} = J/2 = 0.2$ мА. Напряжения затвор-исток также одинаковы:

$$U_{зи1} = U_{зи2} = U_0 + \sqrt{J/b} = 0.5 + \sqrt{0.4/4} \approx 0.82 \text{ В.}$$

Выходные напряжения $U_{вых1} = U_{вых2} = E_c - R_c I_c = 1.5 - 2.5 \cdot 0.2 = 1$ В.

Напряжения истоков $U_{и} = U_{вх1} - U_{зи1} = 0 - 0.82 = -0.82$ В.

Случай 2. Поскольку входные напряжения одинаковы, токи стока остаются прежними: $I_{c1} = I_{c2} = J/2 = 0.2$ мА. Не изменятся напряжения затвор-исток, а также выходные напряжения: $U_{зи1} = U_{зи2} \approx 0.82$ В; $U_{вых1} = U_{вых2} = E_c - R_c I_c = 1$ В. Изменятся только напряжения истоков: $U_{и} = U_{вх1} - U_{зи1} = 1 - 0.82 = 0.18$ В.

Приведем расчетные соотношения для определения коэффициентов усиления дифференциальной и синфазной составляющих переменного сигнала в схеме на рис. 4.2.3.

Коэффициент усиления дифференциального сигнала. Если дифференциальная составляющая сигнала мала, транзисторы можно заменить схемами замещения для режима малого сигнала. В этом случае выходные напряжения

$$u_{вых1} = -R_c g_m \frac{u_d}{2};$$

$$u_{вых2} = R_c g_m \frac{u_d}{2};$$

Здесь g_m – удельная проводимость МОП-транзистора, определяемая формулой

$$g_m = \sqrt{2bI_c}. \quad (4.2.3)$$

Если используется симметричный выход, то

$$u_{вых} = u_{вых1} - u_{вых2} = -R_c g_m u_d.$$

Итак, коэффициент усиления дифференциального сигнала

$$K_{д1} = -K_{д2} = \frac{u_{вых1}}{u_d} = -\frac{1}{2} R_c g_m. \quad (4.2.4)$$

Если используется симметричный выход, то коэффициент усиления окажется в два раза выше:

$$K_{\text{д}} = R_{\text{с}} g_m.$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала

Выходные напряжения, обусловленные синфазной составляющей сигнала,

$$u_{\text{вых1}} = u_{\text{вых2}} = -R_{\text{с}} g_m u_{\text{зи}} \approx \frac{R_{\text{с1}}}{2R_{\text{J}}} u_{\text{сф}}. \quad (4.2.5)$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала

$$K_{\text{сф}} = \frac{R_{\text{с1}}}{2R_{\text{J}}}. \quad (4.2.6)$$

Поскольку внутреннее сопротивление источника тока значительно больше сопротивления резистора в цепи стока, коэффициент усиления синфазного сигнала очень мал.

Если напряжение снимается с симметричного выхода, то

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вых2}} - u_{\text{вых1}} = 0.$$

Таким образом, если используется симметричный выход, коэффициент усиления синфазного сигнала $K_{\text{сф}} = 0$.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала

$$K_{\text{осс}} = \frac{K_{\text{д}}}{K_{\text{сф}}} = \frac{1}{2} R_{\text{J}} g_m. \quad (4.2.7)$$

В случае симметричного выхода $K_{\text{осс}} = \infty$.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала находится в прямой зависимости от сопротивления источника тока. Для увеличения $K_{\text{осс}}$ его сопротивление должно быть как можно больше.

В реальных устройствах невозможно добиться полной симметрии плеч дифференциального усилителя. Поэтому степень подавления синфазного сигнала не столь велика. Коэффициент ослабления синфазного сигнала высококачественных усилителей составляет 10^4 – 10^5 . Обычно $K_{\text{осс}}$ выражают в децибелах. Коэффициент ослабления синфазной составляющей современных дифференциальных усилителей составляет 80–100 дБ.

Пример 4.2. Расчет параметров ДУ. Рассчитать параметры дифференциального усилителя, показанного на рис. 4.2.3. Сопротивление резисторов в цепи стоков $R_{\text{с}} = 5$ кОм. Удельная проводимость транзисторов $b = 20$ мА/В². Ток источника $J = 0.8$ мА, внутреннее сопротивление $R_{\text{J}} = 25$ кОм.

Решение. Поскольку плечи схемы идентичны, ток источника делится пополам, и ток стока $I_c = 0.4$ мА. Передаточная проводимость

$$g_m = \sqrt{2bI_c} = \sqrt{2 \cdot 20 \cdot 0.4} = 4 \text{ мА/В}.$$

Коэффициенты усиления дифференциальной составляющей сигнала

$$K_{д1} = -K_{д2} = -\frac{1}{2}R_c g_m = -\frac{1}{2}5 \cdot 4 = 10.$$

Коэффициент усиления синфазной составляющей

$$K_{сф} = \frac{R_c}{2R_J} = \frac{5}{2 \cdot 25} = 0.1.$$

Коэффициент ослабления синфазной составляющей

$$K_{осс} = \frac{K_{д}}{K_{сф}} = \frac{10}{0.1} = 100.$$

Рассмотренный пример показывает, что для увеличения $K_{осс}$ следует использовать источники тока с большим внутренним сопротивлением.

4.2.3. Простейший дифференциальный усилитель на МОП-транзисторах

Схема простейшего дифференциального усилителя на МОП-транзисторах показана на рис. 4.2.4.

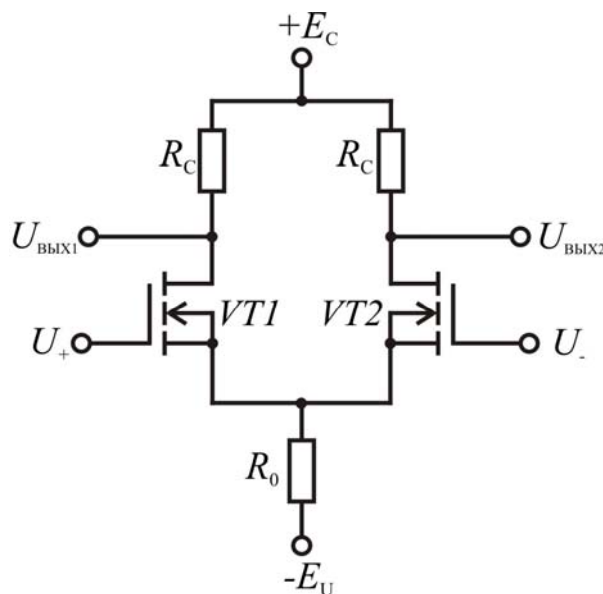


Рис. 4.2.4

Вместо источника тока, обеспечивающего смещение рабочих точек транзисторов, в схеме на рис. 4.2.4 включен резистор R_0 . Его величину можно найти из уравнений

$$R_0 = \frac{E_u - U_{зи}}{2I_c};$$

$$U_{зи} = U_0 + \sqrt{2I_c/b}.$$

Коэффициенты усиления дифференциального и синфазного сигналов определяются выражениями (4.2.4) и (4.2.6). В формуле (4.2.6) $R_i = R_0$

4.2.4. Дифференциальный усилитель с отражателем тока

Существенный недостаток дифференциального усилителя на рис. 4.2.4 заключается в том, что резистор R_0 определяет одновременно режим транзисторов по постоянному току и коэффициент ослабления синфазного сигнала. Поэтому получить большую величину $K_{осц}$ в таком усилителе невозможно.

Значительно большее ослабление синфазного сигнала можно получить, включив вместо резистора R_0 отражатель тока на транзисторах $VT3$ и $VT4$ (рис. 4.2.5).

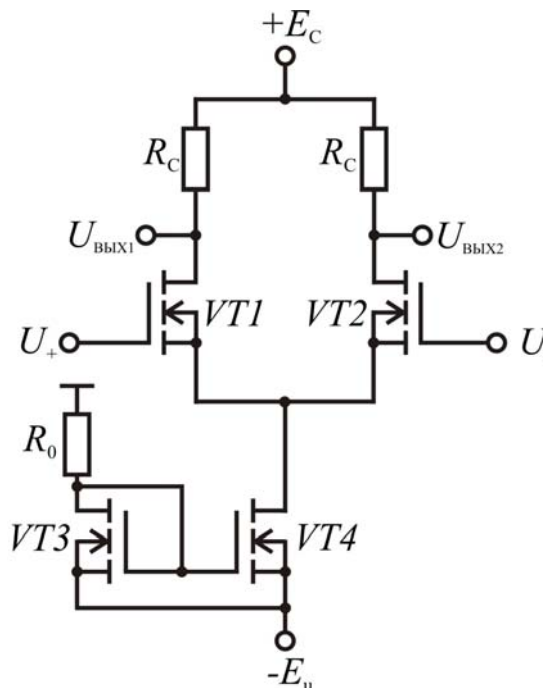


Рис. 4.2.5

Выходное сопротивление отражателя тока определяется сопротивлением канала транзистора $VT4$, находящегося в режиме насыщения. Выходной ток регулируется резистором R_0 . Его величину можно найти из уравнений

$$U_{зи} = U_0 + \sqrt{2I_c/b}$$

$$R_0 = \frac{E_u - U_{зи}}{I_c};$$

Постоянные составляющие токов и напряжений находятся так же, как и в схеме на рис. 4.2.4.

4.2.5. Дифференциальный усилитель с динамической нагрузкой

Включение отражателя тока в схеме на рис. 4.2.5 позволяет значительно увеличить коэффициент ослабления синфазного сигнала. Однако коэффициент усиления дифференциального сигнала остается прежним. Как следует из (4.2.4), его величина зависит от сопротивления R_c и удельной проводимости МОП-транзистора g_m . Увеличивать сопротивления резисторов нежелательно, т.к. резисторы большого номинала занимают на кристалле интегральной схемы слишком большую площадь.

Эффективный способ увеличения коэффициента усиления дифференциальной составляющей – включение в цепи стоков транзисторов $VT1$ и $VT2$ отражателя тока на p -канальных транзисторах $VT5$ и $VT6$ (рис. 4.2.6). Такую схему называют усилителем с динамической (активной) нагрузкой.

Ток стока транзистора $VT1$ является управляющим для $VT5$. Если транзисторы $VT5$ и $VT6$ имеют одинаковые параметры, их токи равны:

$$I_{c5} = I_{c6}.$$

Выходные характеристики МОП-транзисторов на участке, соответствующем режиму насыщения, имеют небольшой наклон. Поэтому для переменных составляющих токов каналы транзисторов $VT5$ и $VT6$ эквивалентны резисторам, имеющим большое сопротивление. Это позволяет увеличить коэффициент усиления дифференциальной составляющей и одновременно сэкономить площадь кристалла, т.к. отражатель тока занимает меньше места, чем высокоомные резисторы.

Следует помнить, что выходное сопротивление такого усилителя велико, поэтому и нагрузка должна иметь большое сопротивление, иначе усиление будет существенно ослаблено.

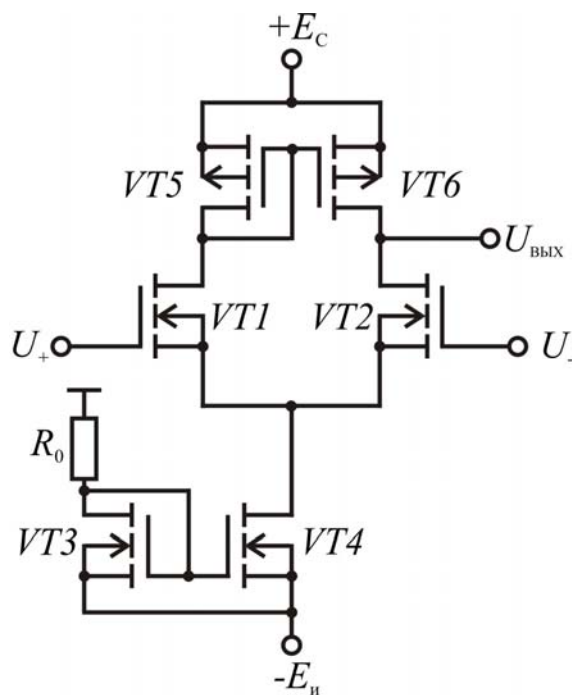


Рис. 4.2.6

Включение отражателя тока в цепи стоков транзисторов, образующих дифференциальную пару, обеспечивает еще одно преимущество. Поскольку проводимости каналов транзисторов различны, переменные составляющие токов $VT2$ и $VT6$ направлены встречно, поэтому выходной ток усилителя с активной нагрузкой в два раза больше, чем выходной ток схемы на рис. 4.2.5:

$$i_{\text{ВЫХ}} = i_2 + i_6 = 2i.$$

Таким образом, использование активной нагрузки позволяет исключить потерю усиления при несимметричном выходе.

Другой вариант дифференциального усилителя с динамической нагрузкой показан на рис. 4.2.7. Здесь транзисторы имеют другой тип проводимости: дифференциальная пара реализована на p -канальных транзисторах $VT1$ и $VT2$, а нагрузка – на n -канальных транзисторах $VT5$ и $VT6$.

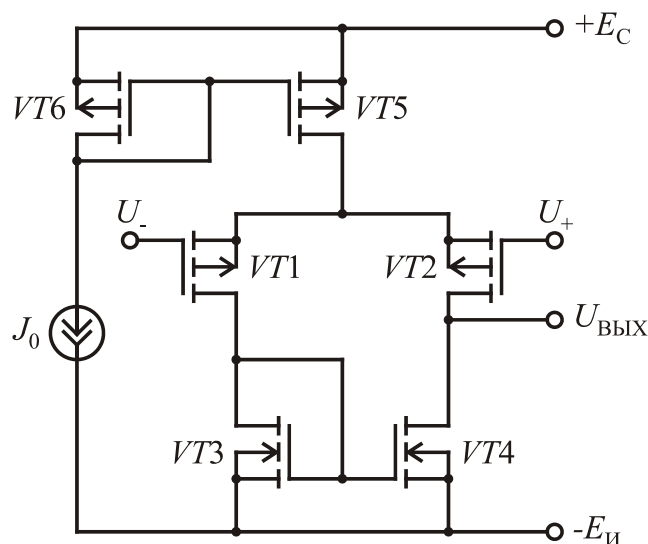


Рис. 4.2.7

В схеме на рис. 4.2.7 режим транзисторов по постоянному току задается источником тока J_0 .

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.