

Дифференциальный усилительный каскад

Дифференциальный усилитель – это усилитель с двумя входами и одним выходом, выходное напряжение которого при отсутствии нагрузки при работе от входных источников ЭДС определяется формулой

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}+} K_{+} + U_{\text{ВХ}-} K_{-} \quad (\text{рис. 1}).$$

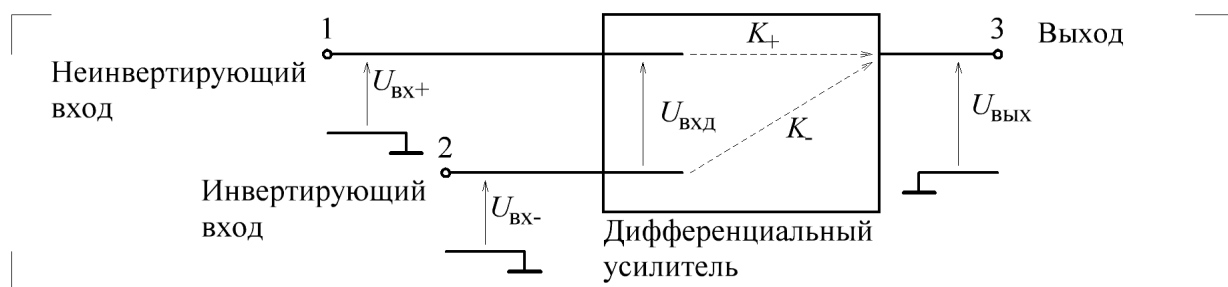


Рис. 1

В идеальном случае коэффициенты передачи по отношению к обоим входам вещественны, равны по модулю и противоположны по знаку $|K_{+}| = |K_{-}| = K_{\text{д}}$, где $K_{\text{д}}$ называется дифференциальным коэффициентом усиления. В этом случае $U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{д}} (U_{\text{ВХ}+} - U_{\text{ВХ}-})$, т. е. усиливается разность входных сигналов. Сигнал с одного из входов сохраняет знак. Этот вход называется неинвертирующим. Сигнал с другого входа изменяет знак на противоположный. Этот вход называется инвертирующим.

K_{+} – коэффициент передачи по отношению к неинвертирующему входу.

K_{-} – коэффициент передачи по отношению к инвертирующему входу.

Входной сигнал на двух входах можно считать состоящим из дифференци-

альной $U_{\text{ВХД}} = U_{\text{ВХ}+} - U_{\text{ВХ}-}$ и синфазной $U_{\text{ВХС}} = \frac{U_{\text{ВХ}+} + U_{\text{ВХ}-}}{2}$ составля-

ющих. Идеальный дифференциальный усилитель реагирует только на дифференциальную составляющую сигнала. Отличие дифференциального усилителя от идеального обусловлено тем, что $|K_{+}| \neq |K_{-}|$. В этом случае дифференци-

альный коэффициент усиления равен $K_{\text{д}} = \frac{|K_{+}| + |K_{-}|}{2}$, а коэффициент усиления

синфазного сигнала равен $K_{\text{с}} = |K_{+}| - |K_{-}|$, выходной сигнал определяется

соотношением $U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{д}} U_{\text{д}} + K_{\text{с}} U_{\text{с}}$, а отличие дифференциального усили-

теля от идеального характеризуется коэффициентом ослабления синфазного

сигнала $K_{OCC} = |K_D|/|K_C|$, часто выражаемым в децибелах $K_{OCC}_{дБ} = 20 \lg(K_{OCC})$.

Эквивалентная схема реального дифференциального усилителя приведена на рис. 2.

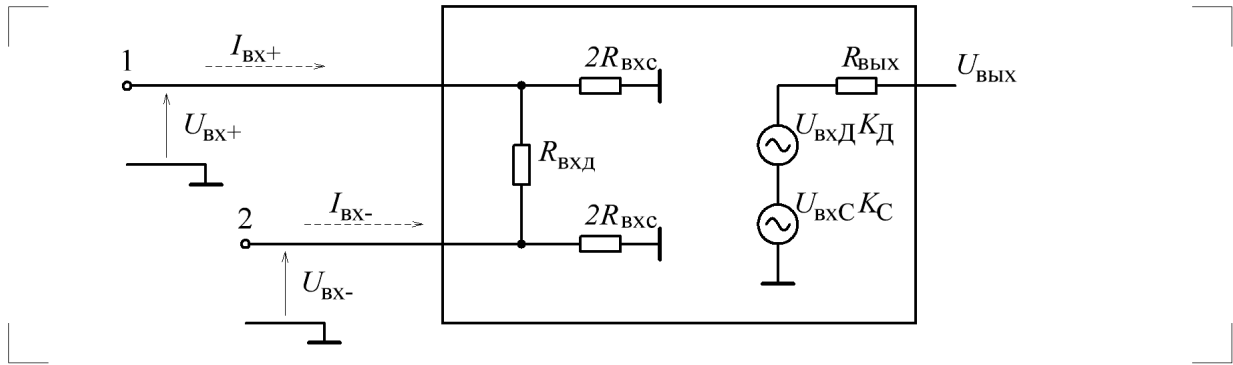


Рис. 2

Здесь

$$I_{ВХ-} = I_{ВХС} - I_{ВХД},$$

$$I_{ВХ+} = I_{ВХС} + I_{ВХД},$$

$$I_{ВХД} = U_{ВХД} / R_{ВХД},$$

$$I_{ВХС} = U_{ВХС} / R_{ВХС}.$$

В последнем соотношении учтено, что при $U_{ВХД} = 0$ $R_{ВХС} = 2R_{ВХС} \parallel R_{ВХС}$.

На биполярных транзисторах дифференциальный усилительный каскад строится по схеме с эмиттерно-связанными транзисторами (рис. 3а).

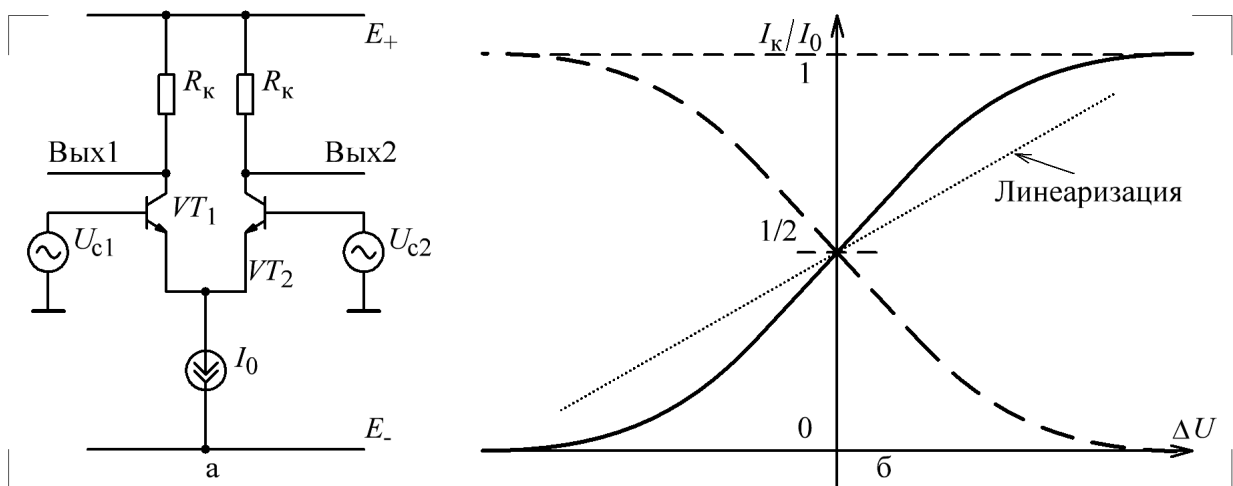


Рис. 3

Выходом можно считать коллектор любого транзистора. Передаточная характеристика по отношению к обоим входам данной схемы приведена на рис. 3б и выражается соотношением

$$\frac{I_{\text{к}}}{I_0} = \left(e^{\frac{\pm \Delta U}{m U_T}} + 1 \right)^{-1}.$$

При подаче синфазных напряжений на оба входа коллекторные напряжения остаются неизменными до тех пор, пока транзисторы находятся в активном режиме работы.

Для линеаризации передаточных характеристик используются варианты внутрикаскадной обратной связи (рис. 4).

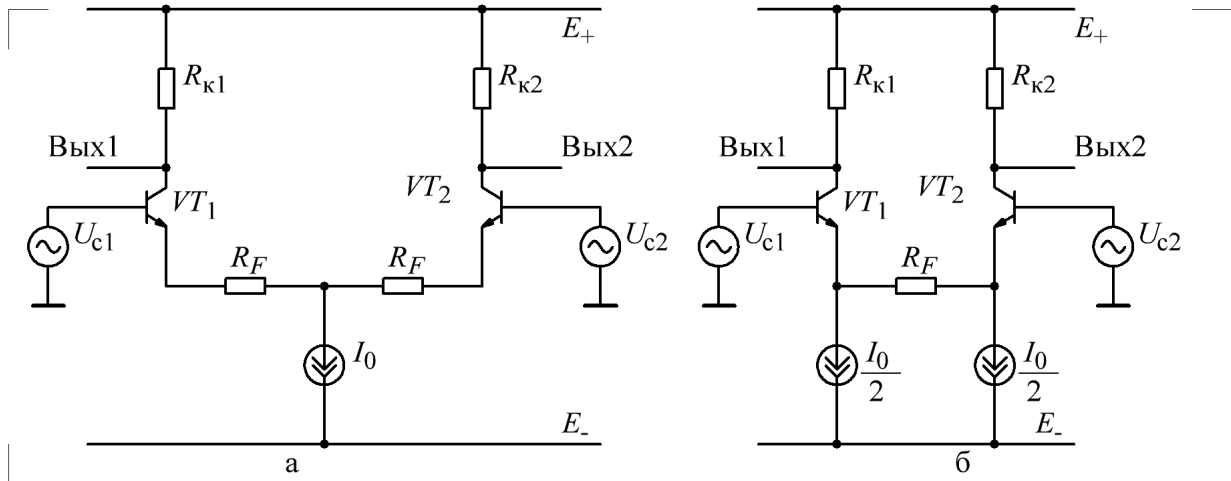


Рис. 4

Рассмотрим работу этой схемы в малосигнальном приближении.

$$K_1 = \frac{U_{\text{ВЫХ1}}}{U_{\text{с1}}} = K_{\text{оэ}F} = \frac{-g_{21} R_{\text{к}}}{1 + g_{21} R_{F1}}.$$

В качестве 2-полюсника в цепи общего электрода выступает

$$R_{F1} = 2 R_F + R_{\text{вхоб}} = 2 R_F + \frac{1}{g_{21}} = \frac{1 + 2 R_F g_{21}}{g_{21}}.$$

С учетом этого

$$K_1 = \frac{-g_{21} R_{\text{к}}}{1 + g_{21} \frac{1 + 2 R_F g_{21}}{g_{21}}} = \frac{-g_{21} R_{\text{к}}}{2(1 + g_{21} R_F)}.$$

Коэффициент передачи на выход 1 со второго входа

$$\begin{aligned} K_2 &= \frac{U_{\text{ВЫХ1}}}{U_{\text{с2}}} = K_{\text{ок}} K_{\text{вхоб}} K_{\text{об}} = \\ &= \frac{g_{21} R_{\text{нок}}}{1 + g_{21} R_{\text{нок}}} \cdot \frac{R_{\text{вхоб}}}{R_{\text{вхоб}} + 2 R_F} \cdot g_{21} R_{\text{к1}} \end{aligned}$$

Здесь $R_{\text{НОК}}$ – нагрузочное сопротивление каскада ОК, которое представляет собой $R_{\text{НОК}} = 2R_F + \frac{1}{g_{21}}$. Тогда коэффициент передачи по отношению ко второму входу

$$K_2 = \frac{g_{21} \left(2R_F + \frac{1}{g_{21}} \right)}{1 + g_{21} \left(2R_F + \frac{1}{g_{21}} \right)} \cdot \frac{1}{\frac{1}{g_{21}} + 2R_F} \cdot g_{21} R_{\text{к1}} = \frac{g_{21} R_{\text{к1}}}{2(1 + g_{21} R_F)}$$

Как видно $|K_1| = |K_2| = \frac{g_{21} R_{\text{к}}}{2(1 + g_{21} R_F)}$, т. е. коэффициенты передачи по отношению ко входу 1 и входу 2 равны по модулю и противоположны по знаку.

Несколько иная ситуация складывается, если в качестве генератора тока в цепи эмиттеров используется резистор (рис. 5а).

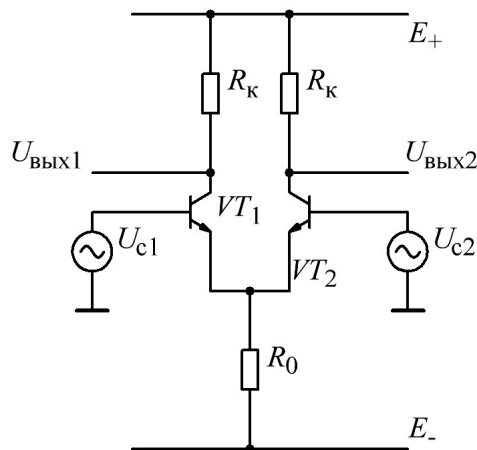


Рис. 5

Для простоты анализа линеаризующие резисторы из схемы исключим.

В этом случае

$$K_1 = \frac{U_{\text{ВЫХ1}}}{U_{\text{с1}}} = K_{\text{оэF}} = \frac{-g_{21} R_{\text{к}}}{1 + g_{21} R_{\text{F1}}}$$

где

$$R_{\text{F1}} = \frac{R_0 R_{\text{ВХОБ}}}{R_0 + R_{\text{ВХОБ}}} = \frac{R_0 \frac{1}{g_{21}}}{R_0 + \frac{1}{g_{21}}} = \frac{R_0}{1 + g_{21} R_0}$$

В результате

$$K_1 = \frac{-g_{21} R_k}{1 + g_{21} \frac{R_0}{1 + g_{21} R_0}} = \frac{-g_{21} R_k (1 + g_{21} R_0)}{1 + 2g_{21} R_0} .$$

По отношению к другому входу

$$K_2 = \frac{U_{\text{вых}1}}{U_{\text{с}2}} = K_{\text{ок}F} K_{\text{об}} = \frac{g_{21} R_{\text{нок}}}{1 + g_{21} R_{\text{нок}}} \cdot g_{21} R_{\text{к}1} ,$$

где

$$R_{\text{нок}} = R_0 \parallel R_{\text{вхоб}} = \frac{R_0}{1 + g_{21} R_0} .$$

В результате

$$K_2 = \frac{g_{21} R_0}{1 + g_{21} R_0 + g_{21} R_0} \cdot g_{21} R_{\text{к}1} = \frac{g_{21}^2 R_0 R_{\text{к}1}}{1 + 2g_{21} R_0} .$$

При условии $2g_{21} R_0 \gg 1$ $|K_1| = |K_2| = \frac{g_{21} R_k}{2}$.

Дифференциальный коэффициент усиления равен

$$K_{\text{д}} = \frac{|K_1| + |K_2|}{2} = \frac{g_{21}^2 R_0 R_k + g_{21} R_k (1 + g_{21} R_0)}{2(1 + 2g_{21} R_0)} = \frac{g_{21} R_k}{2} .$$

Коэффициент усиления синфазного сигнала

$$K_{\text{с}} = |K_2| - |K_1| = \frac{g_{21}^2 R_0 R_k - g_{21} R_k (1 + g_{21} R_0)}{1 + 2g_{21} R_0} = \frac{-g_{21} R_k}{1 + 2g_{21} R_0} .$$

При условии $2g_{21} R_0 \gg 1$ получаем $K_{\text{с}} = \frac{-R_k}{2R_0}$, а коэффициент ослаб-

ления синфазного сигнала $\text{КОСС} = \frac{|K_{\text{д}}|}{|K_{\text{с}}|} = g_{21} R_0$.

Из приведенных соотношений следует, что в схеме рис. 5 следует увеличивать сопротивление R_0 , в пределе используя генератор стабильного тока.

Входное сопротивление схемы для дифференциального сигнала

$$R_{\text{вхд}} = R_{\text{вх}1} = R_{\text{вх}2} = R_{\text{вх} \text{о} \text{э} F} = \frac{1 + g_{21} R_F}{g_{11}} .$$

Поскольку для данной схемы $R_F = \frac{R_0}{1 + g_{21} R_0}$, получаем

$$R_{\text{вхд}} = \frac{1}{g_{11}} \cdot \frac{1 + 2g_{21}R_0}{1 + g_{21}R_0},$$

что при $2g_{21}R_0 \gg 1$ дает $R_{\text{вхд}} = \frac{2}{g_{11}} = 2R_{\text{вхоэ}}$.

Для синфазного сигнала транзисторы оказываются включенными параллельно друг другу (соединены одноименные электроды) (рис. 6а).

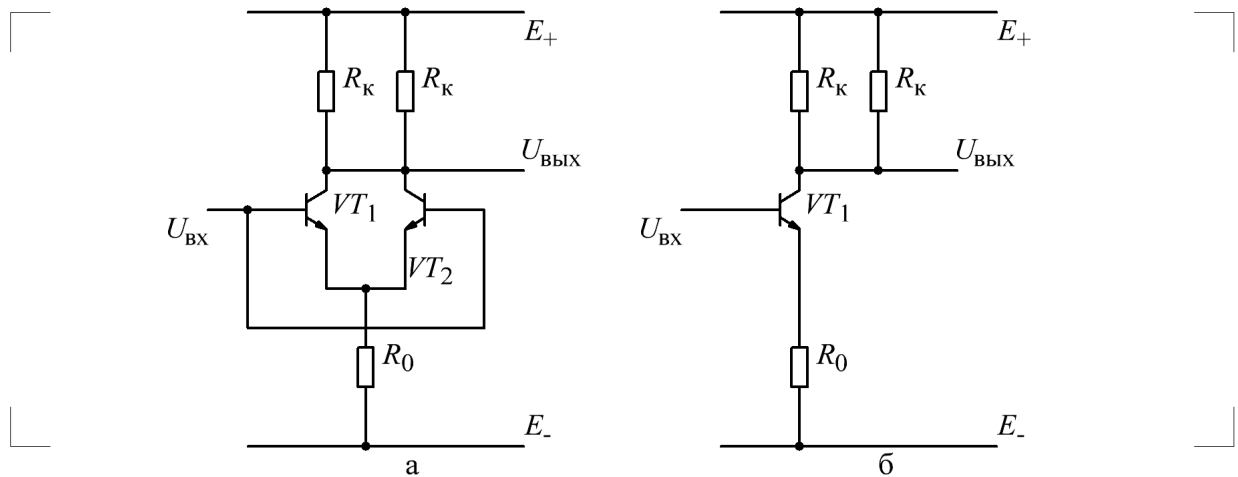


Рис. 6

Это эквивалентно включению одного транзистора (рис. 6б), все малосигнальные проводимости которого удвоены $g_{ij\text{экв}} = 2g_{ij}$. Тогда входное сопротивление для синфазного сигнала равно

$$R_{\text{вхс}} = R_{\text{вхоэ}F} = \frac{1 + 2g_{21}R_F}{2g_{11}} = \frac{1 + 2\beta g_{11}R_0}{2g_{11}} \approx \beta R_0.$$

По аналогичной методике оцениваются параметры различных модификаций схемы дифференциального усилителя.