

Типовые многотранзисторные каскады

1. Каскодное соединение

Как упоминалось для подавления эффекта Миллера при сохранении свойств схемы ОЭ используется соединение ОЭ-ОБ. Эквивалентная схема этого соединения на переменном токе приведена на рис. 1.

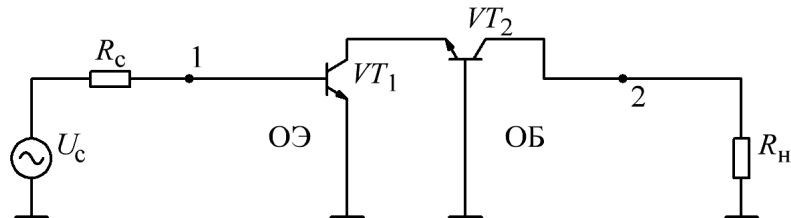


Рис. 1

Напомним, что эффект Миллера в этой схеме подавляется за счет низкоомной нагрузки каскада ОЭ, которой является вход каскада ОБ.

Полная схема каскодного соединения строится как правило с последовательным питанием транзисторов (рис. 2).

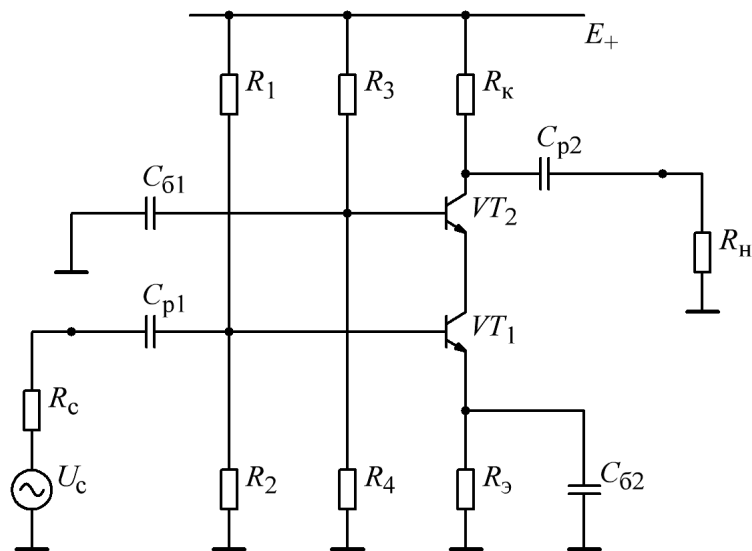


Рис. 2

В этой схеме распределение постоянных потенциалов может быть представлено в следующем виде:

$$U_{\bar{6}1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E_+,$$

$$U_{\bar{9}1} = U_{\bar{6}1} - 0,7 \text{ В},$$

$$I_{\kappa 1} = I_{\kappa 2} = \frac{U_{\bar{9}1}}{R_{\bar{9}}},$$

$$U_{\bar{6}2} = \frac{R_4}{R_3 + R_4} E_+,$$

$$U_{\bar{9}2} = U_{\kappa 1} = U_{\bar{6}2} - 0,7 \text{ В}.$$

Коэффициент передачи по напряжению на переменном токе

$$K = K_{\text{оэ}} K_{\text{об}} = -g_{21} R_{\text{вхоб}} \cdot g_{21} R_{\text{н}} \parallel R_{\text{к}} = \\ -g_{21} \frac{1}{g_{21}} \cdot g_{21} R_{\text{н}} \parallel R_{\text{к}} = -g_{21} R_{\text{н}} \parallel R_{\text{к}} = K_{\text{оэ}}.$$

Внутрикаскадная обратная связь по постоянному току образована резистором $R_{\bar{9}}$. Для организации отрицательной обратной связи на переменном токе достаточно подать сигнал с коллектора второго транзистора на базу первого (рис. 3).

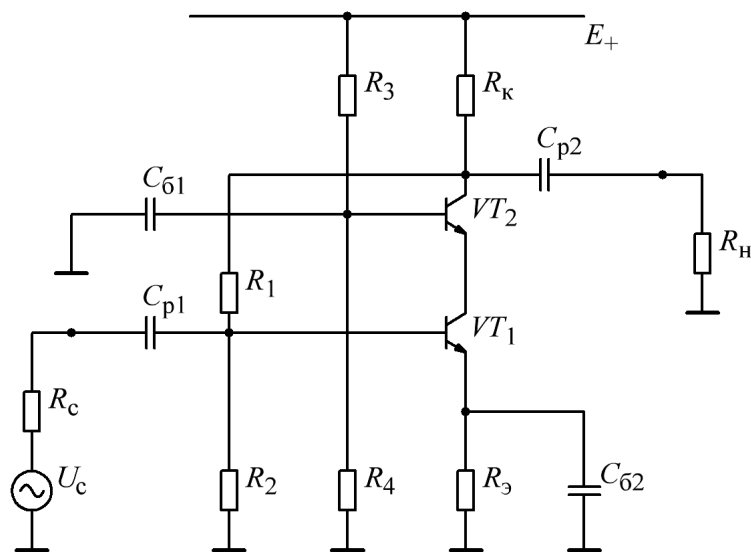


Рис. 3

Если в организации обратной связи нет необходимости, то потенциалы баз транзисторов могут обеспечиваться общим делителем (рис. 4).

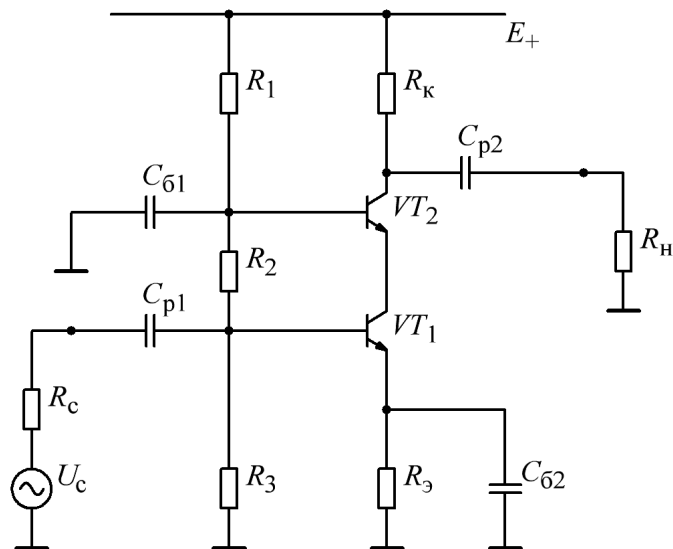


Рис. 4

В этом случае

$$U_{61} = \frac{R_3}{R_1 + R_2 + R_3} E_+,$$

$$U_{62} = \frac{R_2 + R_3}{R_1 + R_2 + R_3} E_+.$$

Эквивалентная схема входной цепи этой схемы приведена на рис. 5.

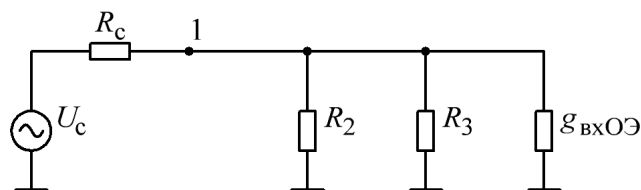


Рис. 5

Как видно резисторы делителя напряжения шунтируют входную цепь, уменьшая входное сопротивление каскада.

2. Эмиттерно-связанная пара

Эмиттерно-связанная пара – это соединение ОК-ОБ, эквивалентная схема для переменного тока которого приведена на рис. 6.

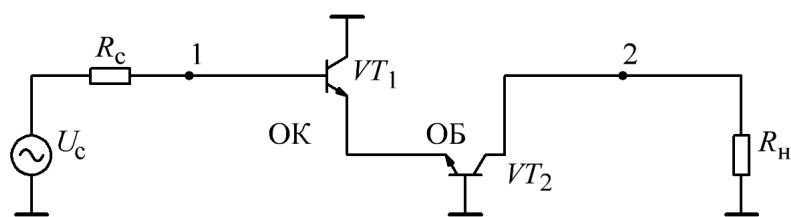


Рис. 6

Полная принципиальная схема этого соединения строится с непосредственной связью между каскадами (рис. 7а).

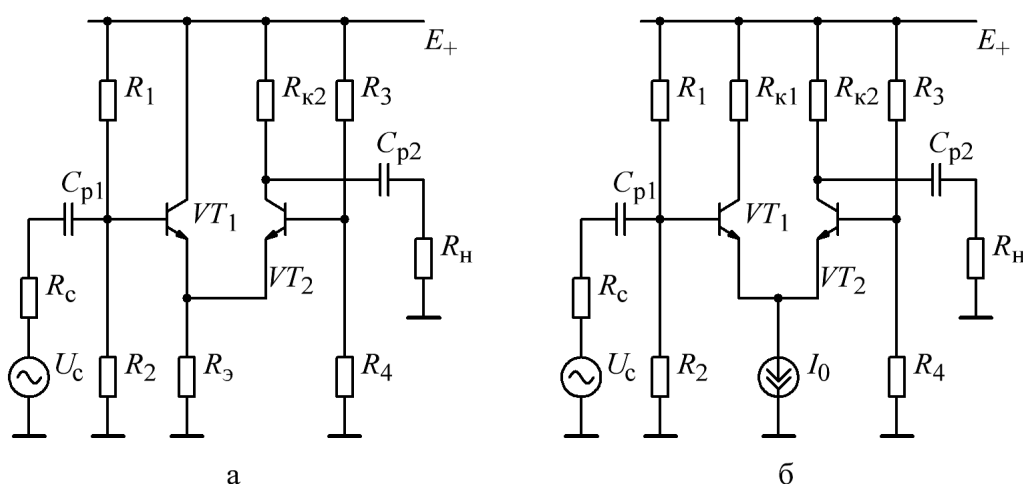


Рис. 7

При равных начальных коллекторных токах через транзисторы следует обеспечивать строгое равенство напряжения на базах транзисторов.

Вместо эмиттерного резистора зачастую используется генератор стабильного тока, определяющий суммарный ток коллекторов транзисторов, а в цепи коллектора первого транзистора устанавливается резистор (рис. 7б). В этом случае на постоянном токе схема абсолютно симметрична.

Для того, чтобы избежать влияния разброса сопротивлений резисторов на установку начальных напряжений на базах транзисторов широко используется двуполярное питание и гальваническая связь с источником сигнала (рис. 8а).

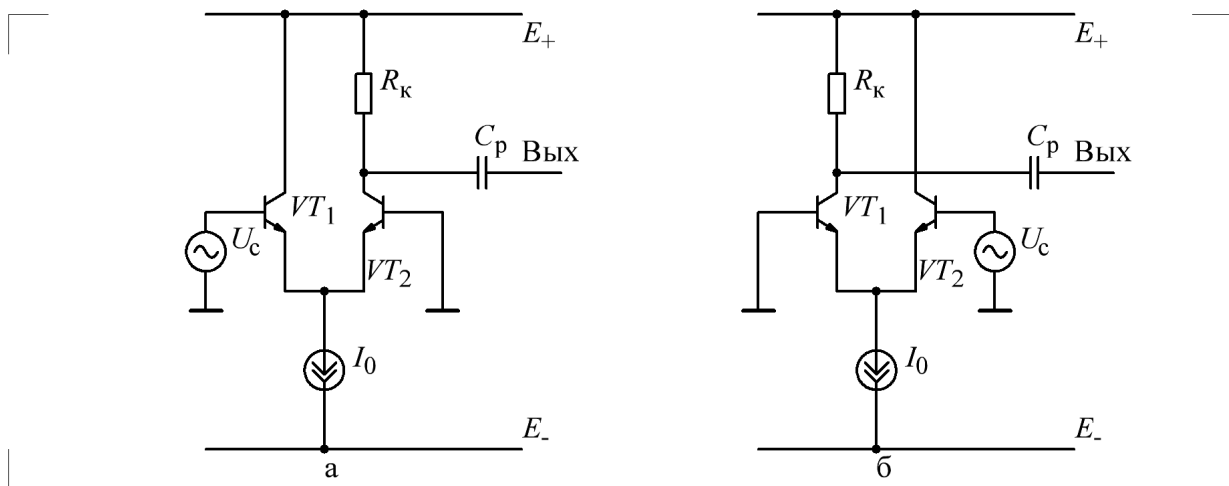


Рис. 8

В силу симметрии схемы источник сигнала может быть подключен не к первому, а ко второму транзистору, а сигнал сниматься не со второго, а с первого транзистора (рис. 8б).

Если же сигналы подаются на базы обоих транзисторов, то приходим к схеме дифференциального усилителя, широко используемого в интегральной схемотехнике (рис. 9).

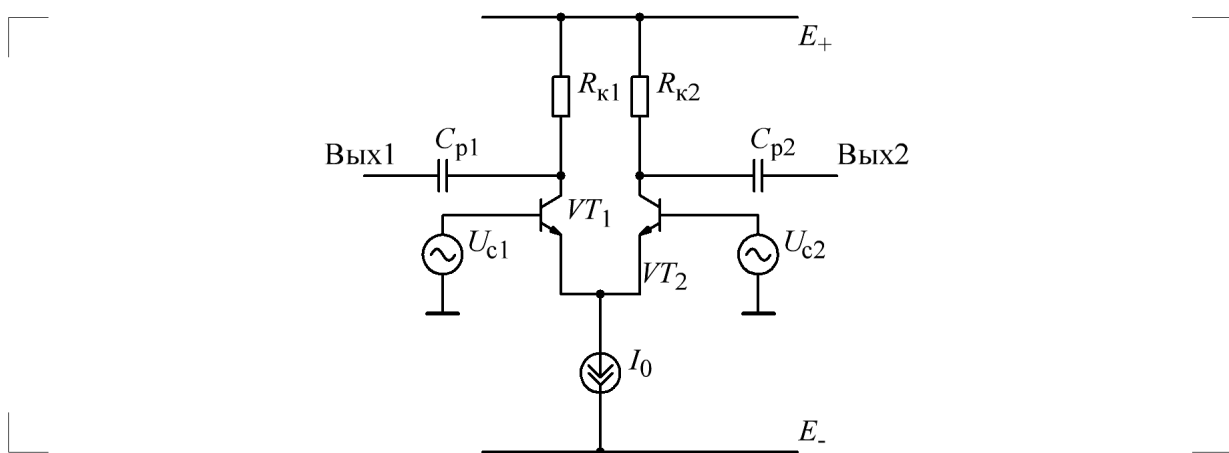


Рис. 9

В этой схеме при $U_{c1} = U_{c2}$ ток I_0 делится поровну между транзисторами и при $R_{k1} = R_{k2}$ напряжения на коллекторах равны $U_{k1} = U_{k2} = E_+ - I_0 R_k / 2$. Схема полностью сбалансирована.

При $U_{c1} \neq U_{c2}$ происходит перераспределение тока I_0 между транзисторами и появляется разность коллекторных напряжений.

На основании уравнения Эберса-Молла коллекторные токи будут равны

$$I_{к1} = I_{оэ} e^{\frac{U_{с1}}{mU_T}}, I_{к2} = I_{оэ} e^{\frac{U_{с2}}{mU_T}}.$$

Возьмем отношение токов

$$\frac{I_{к1}}{I_{к2}} = e^{\frac{U_{с1} - U_{с2}}{mU_T}}$$

и выразим ток $I_{к1}$ через $I_{к2}$

$$I_{к1} = I_{к2} \cdot e^{\frac{U_{с1} - U_{с2}}{mU_T}}$$

и наоборот

$$I_{к2} = I_{к1} \cdot e^{\frac{U_{с2} - U_{с1}}{mU_T}}.$$

Обозначим $\Delta U = U_{с1} - U_{с2}$ и выразим ток I_0 через коллекторные токи транзисторов

$$I_0 = I_{к2} \cdot e^{\frac{U_{с1} - U_{с2}}{mU_T}} + I_{к2} = I_{к2} \left(e^{\frac{U_{с1} - U_{с2}}{mU_T}} + 1 \right) = I_{к1} \left(e^{\frac{U_{с2} - U_{с1}}{mU_T}} + 1 \right).$$

Отсюда коллекторные токи можно выразить через входную разность напряжений

$$I_{к1} = \frac{I_0}{e^{\frac{-\Delta U}{mU_T}} + 1}, I_{к2} = \frac{I_0}{e^{\frac{\Delta U}{mU_T}} + 1}.$$

В результате получаем нормированный коллекторный ток

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

Качественно эта зависимость приведена на рис. 10.

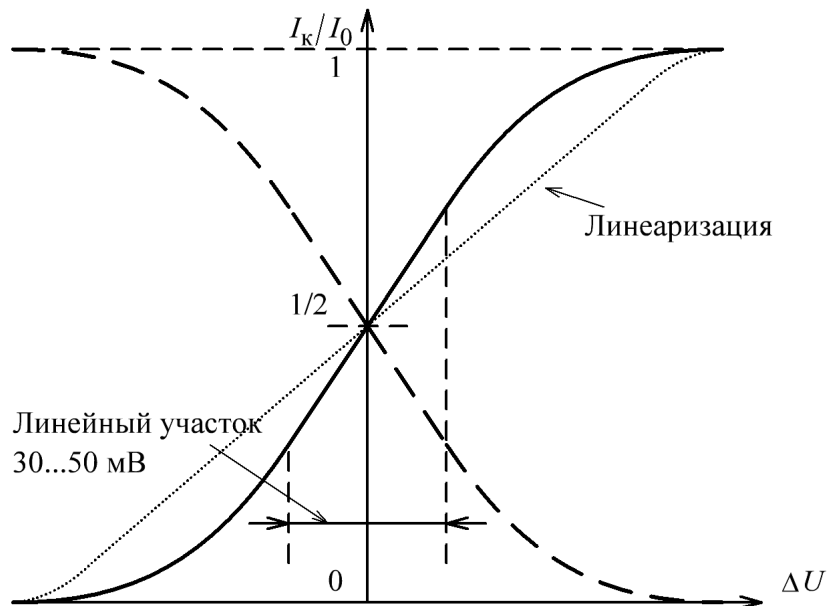


Рис. 10

Из рисунка видно, что зависимость носит резко нелинейный характер. Линейная область сохраняется только при малых входных дифференциальных напряжениях (не более 20...50 мВ).

Для линейаризации характеристик в цепях эмиттеров устанавливают резисторы внутрикаскадной обратной связи (рис. 11).

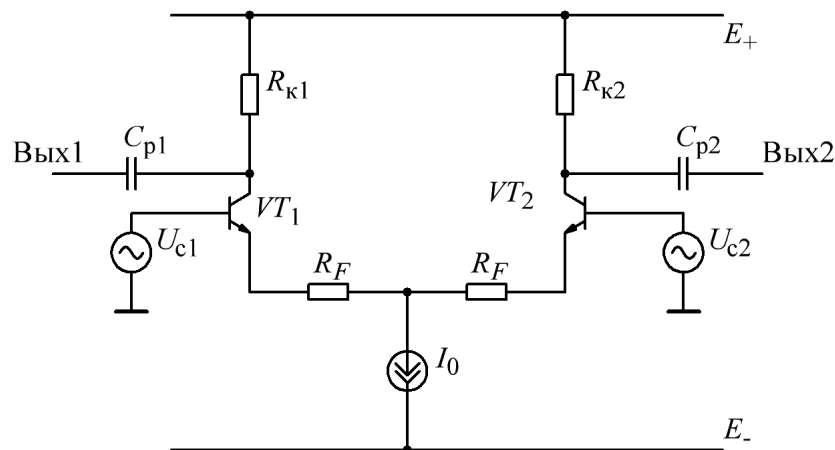


Рис. 11

В этом случае малосигнальный коэффициент усиления уменьшается, но линейная область передаточной характеристики расширяется (на рис. 10 приведена точечной линией).

В силу симметрии рассматриваемых схем выходное напряжение может сниматься не с одного из коллекторных резисторов, а с обоих. В результате разностное выходное напряжение, вызванное разностью входных напряжений равно

$$\Delta U_{\text{к}} = U_{\text{к}1} - U_{\text{к}2} = R_{\text{к}} I_0 \left(\frac{1}{e^{\frac{-\Delta U}{mU_T} + 1}} - \frac{1}{e^{\frac{\Delta U}{mU_T} + 1}} \right) .$$

При подаче синфазного напряжения на оба входа выходные коллекторные напряжения не изменятся до тех пор, пока транзисторы находятся в линейном режиме работы.