

Способы включения транзистора в схему усилительного каскада

Как указывалось в разделе 6 усилительный каскад может быть представлен 4-полюсником, ко входным зажимам которого подключен источник сигнала, а к выходным – нагрузка (рис. 1)

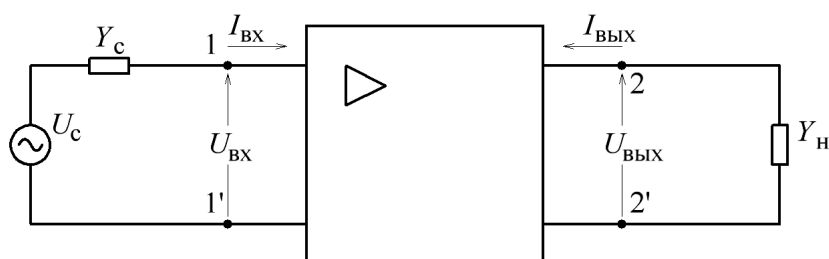


Рис. 1

Однако транзистор – 3-электродный прибор, и при включении в качестве 4-полюсника один из электродов должен быть общим для входной и выходной цепей.

В разделе о малосигнальных параметрах биполярного транзистора рассматривалось такое включение транзистора, когда входным током является ток базы, а входным напряжением – напряжение база-эмиттер, выходным током является ток коллектора, а выходным напряжением – напряжение коллектор-эмиттер. Общим для входной и выходной цепей в данном случае является эмиттер. Эквивалентная схема включения транзистора на переменном токе для этого случая приведена на рис. 2.

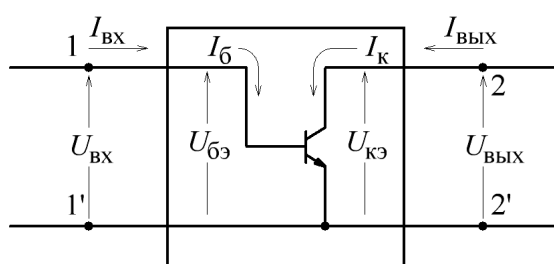


Рис. 2

Как видно, в данном случае вывод эмиттера является общим для входного и выходного контуров. Однако это не единственный способ включения транзистора в тракт усиления сигнала (рис. 3).

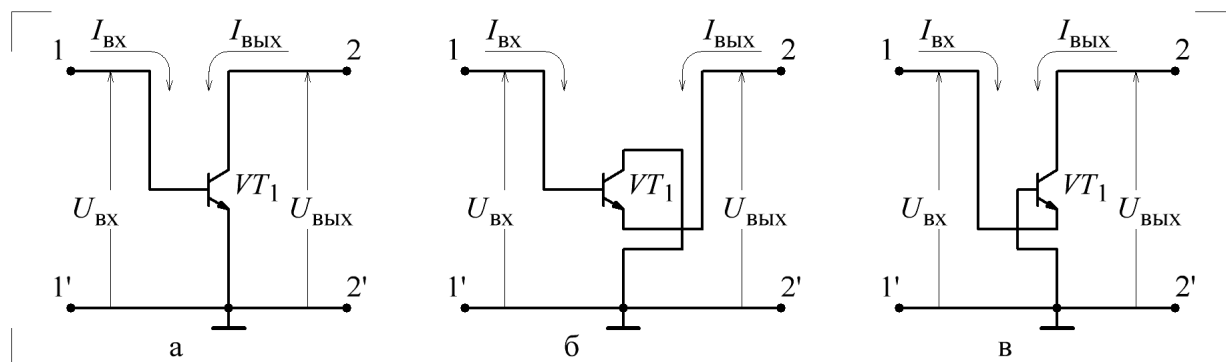


Рис. 3

Во всех приведенных схемах один из электродов усилительных приборов является общим для входных 1-1' и выходных 2-2' зажимов, поэтому схемы на рис. 3а – 3в называют, соответственно, схемами с общим эмиттером (ОЭ), с общим коллектором (ОК) и с общей базой (ОБ).

Напомним, что эквивалентная схема на переменном токе отражает прохождение только переменного сигнала. При этом предполагается, что с помощью специальных схемотехнических мер обеспечен режим работы транзистора на постоянном токе, а влияние этих мер на прохождение переменного сигнала исключено и на эквивалентной схеме они не отображаются.

Полученные ранее малосигнальные параметры транзистора относятся к схеме ОЭ. Транзисторы, включенные по схемам ОБ и ОК, имеют другие малосигнальные параметры. Выразим их через параметры транзистора в схеме ОЭ.

Воспользуемся методом неопределенной Y -матрицы. Поскольку транзистор имеет 3 электрода, то вектор токов через электроды можно связать с вектором напряжений на электродах относительно точки нулевого потенциала (рис. 4) с помощью матрицы размером 3 на 3.

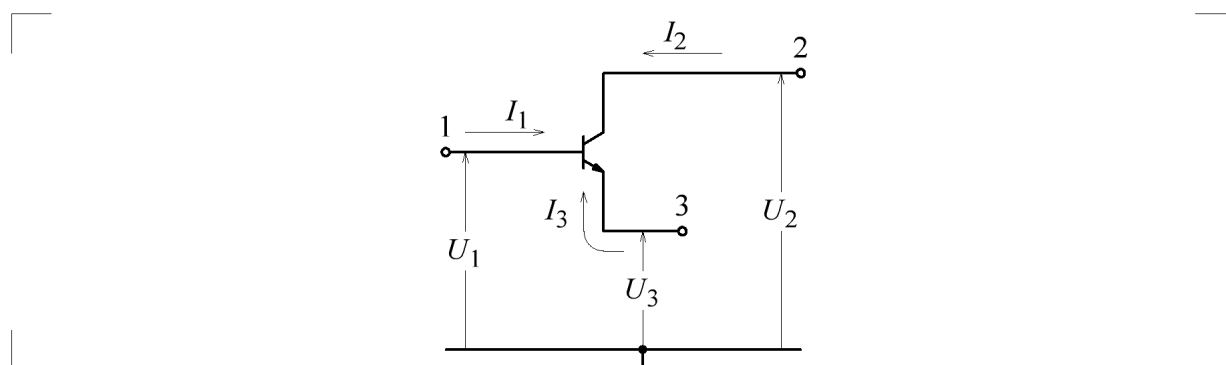


Рис. 4

Если напряжение считать аргументом, а ток – функцией, то элементы матрицы имеют размерность проводимостей:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & y_{13} \\ y_{21} & y_{22} & y_{32} \\ y_{31} & y_{23} & y_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} .$$

В силу законов Кирхгоффа из 9 элементов матрицы независимыми являются только 4. Действительно сумма токов через электроды транзистора

$$I_1 + I_2 + I_3 = (y_{11} + y_{12} + y_{13})U_1 + (y_{21} + y_{22} + y_{23})U_2 + (y_{31} + y_{32} + y_{33})U_3 = 0 .$$

В частном случае при $U_1 = U_2 = U_3$ это соотношение также должно выполняться. Это возможно тогда и только тогда, когда

$$\sum_i y_{ij} = 0 \quad \text{и} \quad \sum_j y_{ij} = 0, \quad i, j = 1, 2, 3,$$

то есть когда суммы строк и столбцов равны 0.

Схема ОЭ. Входным током является ток базы, а выходным – ток коллектора, входным напряжением – напряжение на базе, а выходным напряжением – напряжение на коллекторе. В соответствии с рис. 4 для схемы ОЭ $I_{\text{вх}} = I_1$, $I_{\text{вых}} = I_2$, $U_{\text{вх}} = U_1$, $U_{\text{вых}} = U_2$ и

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \end{pmatrix} .$$

Выразим оставшиеся элементы Y-матрицы через 4 первые, являющиеся малосигнальными параметрами транзистора в схеме ОЭ:

$$\begin{pmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_3 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} y_{11} & y_{12} & (-y_{11} - y_{12}) \\ y_{21} & y_{22} & (-y_{21} - y_{22}) \\ (-y_{11} - y_{21}) & (-y_{12} - y_{22}) & (y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} U_1 \\ U_2 \\ U_3 \end{pmatrix} .$$

Для схемы ОК входным током является ток базы, а выходным – ток эмиттера, входным напряжением – напряжение на базе, а выходным напряжением – напряжение на эмиттере. Тогда на основании предыдущего матричного уравнения

$$\begin{aligned} y_{11 \text{ ок}} &= \frac{I_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} (U_{\text{вых}} = 0) = \frac{I_1}{U_1} = y_{11} , \\ y_{12 \text{ ок}} &= \frac{I_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} (U_{\text{вх}} = 0) = \frac{I_1}{U_3} = y_{13} = -y_{11} - y_{12} , \\ y_{21 \text{ ок}} &= \frac{I_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} (U_{\text{вых}} = 0) = \frac{I_3}{U_1} = y_{31} = -y_{11} - y_{21} , \end{aligned}$$

$$y_{22\text{ок}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} (U_{\text{ВХ}} = 0) = \frac{I_3}{U_3} = y_{33} = y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22} \quad .$$

Аналогичным образом поступим для схемы ОБ. Для этой схемы входным током является ток эмиттера, а выходным – ток коллектора, входным напряжением – напряжение на эмиттере, а выходным напряжением – напряжение на коллекторе.

$$y_{11\text{об}} = \frac{I_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} (U_{\text{ВЫХ}} = 0) = \frac{I_3}{U_3} = y_{33} = y_{11} + y_{12} + y_{21} + y_{22} \quad ,$$

$$y_{12\text{об}} = \frac{I_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} (U_{\text{ВХ}} = 0) = \frac{I_3}{U_2} = y_{32} = -y_{12} - y_{22} \quad ,$$

$$y_{21\text{об}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} (U_{\text{ВЫХ}} = 0) = \frac{I_2}{U_3} = y_{23} = -y_{21} - y_{22} \quad ,$$

$$y_{22\text{об}} = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} (U_{\text{ВХ}} = 0) = \frac{I_2}{U_2} = y_{22} \quad .$$

Таким образом, найдены малосигнальные параметры транзистора в схемах ОБ и ОК, выраженные через параметры транзистора в схеме ОЭ.

В области низких частот мнимые части комплексных проводимостей становятся пренебрежимо малы, а частотной зависимость вещественных частей можно пренебречь. Тогда малосигнальные параметры выражаются вещественными, не зависящими от частоты числами g_{ij} . Кроме того, в транзисторах всегда выполняется следующее неравенство

$$g_{21} \gg g_{11} \gg g_{22} \gg g_{12} \quad ,$$

позволяющее записать приближенные соотношения для малосигнальных параметров схемы ОК

$$\begin{aligned} g_{11\text{ок}} &= g_{11} \\ g_{12\text{ок}} &= -g_{11} - g_{12} \approx -g_{11} \\ g_{21\text{ок}} &= -g_{11} - g_{21} \approx -g_{21} \\ g_{22\text{ок}} &= g_{11} + g_{12} + g_{21} + g_{22} \approx g_{21} \end{aligned}$$

и схемы ОБ

$$\begin{aligned}
g_{11об} &= g_{11} + g_{12} + g_{21} + g_{22} \approx g_{21} \\
g_{12об} &= -g_{12} - g_{22} \approx -g_{22} \\
g_{21об} &= -g_{21} - g_{22} \approx -g_{21} \\
g_{22об} &= g_{22}
\end{aligned}$$

Малосигнальные параметры каскадов, основанных на схемах ОБ и ОК находятся аналогично параметрам каскада с транзистором, включенным по схеме ОЭ, путем подстановки в общие соотношения параметров транзисторов в соответствующем включении.

Напомним для схемы ОЭ

$$\begin{aligned}
K &= \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = -\frac{g_{21}}{g_{22} + G_{\text{н}}} = -\frac{g_{21} R_{\text{н}}}{g_{22} R_{\text{н}} + 1} \approx -g_{21} R_{\text{н}} , \\
K_{\text{обр}} &= \frac{U_{\text{вх}}}{U_{\text{вых}}} = -\frac{g_{12}}{g_{11} + G_{\text{с}}} = -\frac{g_{12} R_{\text{с}}}{g_{11} R_{\text{с}} + 1} , \\
G_{\text{вх}} &= \frac{I_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} = g_{11} - \frac{g_{12} g_{21}}{g_{22} + G_{\text{н}}} \approx g_{11} , \\
G_{\text{вых}} &= \frac{I_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}} = g_{22} - \frac{g_{12} g_{21}}{g_{11} + G_{\text{с}}} \approx g_{22} .
\end{aligned}$$

Для схемы ОК получим

$$\begin{aligned}
K_{\text{ок}} &= -\frac{g_{21\text{ок}}}{g_{22\text{ок}} + G_{\text{н}}} = \frac{g_{21}}{g_{21} + G_{\text{н}}} = \frac{g_{21} R_{\text{н}}}{g_{21} R_{\text{н}} + 1} , \\
K_{\text{оброк}} &= -\frac{g_{12\text{ок}}}{g_{11\text{ок}} + G_{\text{с}}} = \frac{g_{11}}{g_{11} + G_{\text{с}}} = \frac{g_{11} R_{\text{с}}}{g_{11} R_{\text{с}} + 1} \\
G_{\text{вхок}} &= g_{11\text{ок}} - \frac{g_{12\text{ок}} g_{21\text{ок}}}{g_{22\text{ок}} + G_{\text{н}}} = g_{11} - \frac{g_{11} g_{21}}{g_{21} + G_{\text{н}}} = \frac{g_{11} G_{\text{н}}}{g_{21} + G_{\text{н}}} = \frac{g_{11}}{g_{21} R_{\text{н}} + 1} , \\
G_{\text{выхок}} &= g_{22\text{ок}} - \frac{g_{12\text{ок}} g_{21\text{ок}}}{g_{11\text{ок}} + G_{\text{с}}} = g_{21} - \frac{g_{11} g_{21}}{g_{11} + G_{\text{с}}} = \frac{g_{21} G_{\text{с}}}{g_{11} + G_{\text{с}}} = \frac{g_{21}}{g_{11} R_{\text{с}} + 1} .
\end{aligned}$$

Для схемы ОБ

$$\begin{aligned}
K_{\text{об}} &= -\frac{g_{21об}}{g_{22об} + G_{\text{н}}} = \frac{g_{21}}{g_{22} + G_{\text{н}}} = \frac{g_{21} R_{\text{н}}}{g_{22} R_{\text{н}} + 1} , \\
K_{\text{оброб}} &= -\frac{g_{12об}}{g_{11об} + G_{\text{с}}} = \frac{g_{22}}{g_{21} + G_{\text{с}}} = \frac{g_{22} R_{\text{с}}}{g_{21} R_{\text{с}} + 1} ,
\end{aligned}$$

$$G_{\text{вхоб}} = g_{11\text{об}} - \frac{g_{12\text{об}} g_{21\text{об}}}{g_{22\text{об}} + G_{\text{н}}} = g_{21} - \frac{g_{22} g_{21}}{g_{22} + G_{\text{н}}} = \frac{g_{21} G_{\text{н}}}{g_{22} + G_{\text{н}}} = \frac{g_{21}}{g_{22} R_{\text{н}} + 1} \approx g_{21} ,$$

$$G_{\text{выхоб}} = g_{22\text{об}} - \frac{g_{12\text{об}} g_{21\text{об}}}{g_{11\text{об}} + G_{\text{с}}} = g_{22} - \frac{g_{22} g_{21}}{g_{21} + G_{\text{с}}} = \frac{g_{22} G_{\text{с}}}{g_{21} + G_{\text{с}}} = \frac{g_{22}}{g_{21} R_{\text{с}} + 1} .$$

На основании этих формул можно составить таблицу параметров каскадов с транзисторами в различных включениях (таблица 1).

Таблица 1

Схема	K	$G_{\text{вх}}$	$G_{\text{вых}}$
ОЭ	$-g_{21} R_{\text{н}}$	g_{11}	g_{22}
ОК	≤ 1	$\frac{g_{11}}{g_{21} R_{\text{н}} + 1}$	$\frac{g_{21}}{g_{11} R_{\text{с}} + 1}$
ОБ	$g_{21} R_{\text{н}}$	g_{21}	$\frac{g_{22}}{g_{21} R_{\text{с}} + 1}$

Если учесть часто выполняющиеся на практике неравенства $g_{22} R_{\text{н}} \ll 1$ и $g_{21} R_{\text{н}} \gg 1$, а также ввести в рассмотрение коэффициент усиления по току K_i , то с учетом определений коэффициентов

$$\beta = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} = K_{i\text{оэ}}, \quad I_{\text{э}} = I_{\text{к}} + I_{\text{б}},$$

$$\frac{I_{\text{э}}}{I_{\text{б}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}}} + 1 = \beta + 1 = K_{i\text{ок}}, \quad \alpha = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{э}}} = \frac{I_{\text{к}}}{I_{\text{б}} + I_{\text{к}}} = \frac{\beta}{\beta + 1} = K_{i\text{об}}$$

получим таблицу 2.

Таблица 2

Схема	K	$R_{\text{вх}}$	$R_{\text{вых}}$	K_i
ОЭ	$-g_{21} R_{\text{н}}$	$\frac{1}{g_{11}}$	$\frac{1}{g_{22}}$	β
ОК	≤ 1	$\beta R_{\text{н}}$	$\frac{1}{g_{21}}$	$\beta + 1$
ОБ	$g_{21} R_{\text{н}}$	$\frac{1}{g_{21}}$	$\frac{1}{g_{22}}$	$\frac{\beta}{\beta + 1} = \alpha$

В этой таблице вместо входных и выходных проводимостей представлены соответствующие сопротивления.

На основании данных таблиц можно сделать важные для практики выводы.

Наибольшее усиление по мощности обеспечивает включение транзистора по схеме ОЭ. Это включение считается основным. При нем в каскаде имеет место не только наибольшее усиление по мощности, но и, как правило, существенные усиления по току и напряжению, приближающиеся к максимально достижимым. Поэтому на использование схемы ОЭ ориентируются в первую очередь.

Основные характеристики и параметры приводятся для этого включения. В дальнейшем параметры, относящиеся к этой схеме включения, будем в формулах применять без каких-либо дополнительных индексов, тогда как параметры, относящиеся к другим схемам включения, будем снабжать соответствующими индексами. Так, например, параметр $g_{11ок}$ означает входную проводимость, соответствующую включению транзистора по схеме ОК. В ряде случаев получение наибольшего усиления не является главной задачей. В связи с этим часто в усилителях применяют и другие схемы включения, которые по ряду параметров и свойств превосходят основную схему включения.

В схеме ОК коэффициент передачи напряжения близок к единице, в результате чего выходной сигнал по величине и фазе повторяет входной ($u_{вх} = u_{вых}$). Поэтому этот каскад называют повторителем напряжения (эмиттерным повторителем). Основным достоинством этого каскада является то, что он обладает малой входной и большой выходной проводимостями. Он часто используется как согласующий и разделительный, обеспечивающий высокие значения сквозного коэффициента передачи при прохождении сигнала от высокоомного источника ЭДС к низкоомным цепям, приближая коэффициент передачи входной цепи к максимально достижимому значению, равному единице.

В схеме ОБ выходной ток практически равен входному, поэтому эту схему можно назвать повторителем тока (вытекающий выходной ток повторяет втекающий входной). Повторители тока не обладают усилением по току, имеют большую входную проводимость и пониженное (по сравнению с основной схемой) усиление по мощности. Все это ограничивает сферу применения схемы ОБ. В основном это включение применяется в высокочастотных схемах, т. е. там, где становится заметным влияние паразитных обратных связей через емкости p - n -переходов.

Сделаем численные оценки. Пусть $I_{к0} = 1$ мА, $R_H = 1$ кОм, $U_{Эрли} = 100$ В, $\beta = 100$. Тогда

$$g_{21} = I_{к0} / U_T = 0,001 / 0,026 = 0,038 \text{ См},$$

$$g_{11} = g_{21} / \beta = 0,038 / 100 = 0,00038 \text{ См},$$

$$g_{22} = I_{к0} / U_{Эрли} = 0,001 / 100 = 0,00001 \text{ См.}$$

Для этих условий численные оценки параметров приведены в таблице 3.

Таблица 3

Схема	K	$R_{вх}$	$R_{вых}$	K_i
ОЭ	-38	2,6 кОм	100 кОм	100
ОК	0,974	100 кОм	26 Ом	101
ОБ	38	26 Ом	100 кОм	0,99

Как видно наибольшим усилением по мощности обладает схема ОЭ. Оно равно 3800 раз. Схема ОК обладает высоким входным и низким выходным сопротивлениями, но не обладает усилением по напряжению. Схема ОБ обладает низким входным сопротивлением, высоким выходным и не имеет усиления по току.