

использования блокировочных конденсаторов большой емкости, удобству подключения цепей ОС дифференциальные каскады (ДК) широко применяются как в современных интегральных микросхемах ОУ, так и в усилителях на дискретных элементах.

Для рассмотрения шумов ДК обратимся к эквивалентной шумовой схеме (рис. 2.49, а), на которой, кроме эквивалентных генераторов дробового шума коллекторов $i_{ш.к1}$, $i_{ш.к2}$, базы $i_{ш.б1}$, $i_{ш.б2}$ и теплового шума распределенного сопротивления базы $e_{ш.б1}$, $e_{ш.б2}$ транзисторов $V1$ и $V2$, изображен эквивалентный генератор шума эмиттерного источника тока $i_{ш.и}$.

Шумовые генераторы тока $i_{ш.к1}$ и $i_{ш.к2}$ создают на резисторах $R_{к1}$ и $R_{к2}$ шумовые некоррелированные напряжения $u_{ш1} = i_{ш.к1}R_{к1}$

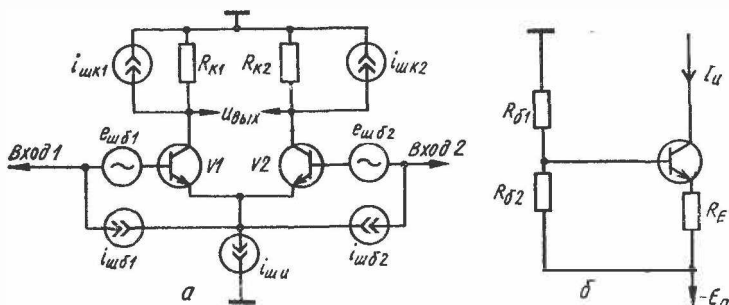


Рис. 2.49

и $u_{ш2} = i_{ш.к2}R_{к2}$. На выходе ДК эти напряжения создают шумовое напряжение

$$u_{ш.вых1} = \sqrt{u_{ш1}^2 + u_{ш2}^2} = \sqrt{i_{ш.к1}^2 R_{к1}^2 + i_{ш.к2}^2 R_{к2}^2}.$$

Шумовой ток источника $i_{ш.и}$ создает на резисторах $R_{к1}$ и $R_{к2}$ коррелированные напряжения $u_{ш1и} = (i_{ш.и}/2) R_{к1}$ и $u_{ш2и} = (i_{ш.и}/2) R_{к2}$. Общее шумовое напряжение на выходе ДК, вызванное источником $i_{ш.и}$,

$$u_{ш.вых.и} = (i_{ш.и}/2)(R_{к1} - R_{к2}).$$

Шумовое напряжение на выходе, обусловленное дробовыми шумами токов коллектора транзисторов $V1$, $V2$ и шумами эмиттерного источника тока, составят

$$\begin{aligned} u_{ш.вых2} &= \sqrt{u_{ш.вых1}^2 + u_{ш.и}^2} \\ &= \sqrt{i_{ш.к1}^2 R_{к1}^2 + i_{ш.к2}^2 R_{к2}^2 + i_{ш.и}^2 (R_{к1} - R_{к2})^2/4}. \end{aligned}$$

Приведенное ко входу ДК напряжение шумов, обусловленное этими источниками, определим, разделив полученное выражение на дифференциальный коэффициент усиления ДК $K_U = (S/2)(R_{к1} + R_{к2})$, где $S = qI_{к}/kT$ — крутизна транзисторов $V1$ и $V2$:

$$u_{ш.вх} = \frac{2\sqrt{i_{ш.к1}^2 R_{к1}^2 + i_{ш.к2}^2 R_{к2}^2 + i_{ш.и}^2 (R_{к1} - R_{к2})^2/4}}{S(R_{к1} + R_{к2})}$$

Для симметричного ДК $R_{к1} = R_{к2} = R_{к}$, $i_{ш.к1} = i_{ш.к2} = i_{ш.к}$, $u_{ш.вх}^2 = 2i_{ш.к}^2/S^2 = 4(kT)^2(f_v - f_n)/qI_k$. При этом приведенная ко входу ДК эквивалентная шумовая ЭДС $e_{шДК1} = \sqrt{e_{ш.б1}^2 + e_{ш.б2}^2 + u_{ш.вх}^2}$ или, с учетом того, что $r_{б1} = r_{б2} = r_б$,

$$e_{шДК1} = \sqrt{8kT(r_б + kT/2qI_k)(f_v - f_n)}.$$

Из сравнения полученного выражения с эквивалентной шумовой ЭДС одиночного транзистора $e_{ш}$ видно, что $e_{шДК1} = \sqrt{2}e_{ш}$. Эквивалентные шумовые токи ДК определяются дробовыми токами базы, поэтому для них справедливы соотношения, выведенные при рассмотрении собственных шумов биполярного транзистора.

С целью упрощения последующих каскадов нередко выходной сигнал ДК снимают с одного из коллекторов, т. е. используют несимметричный выход. В этом случае можно положить $R_{к2} = 0$ и выражение для квадрата напряжения шумов, приведенного ко входу и обусловленного дробовыми шумами токов коллектора транзисторов $V1, V2$ и шумами эмиттерного источника тока, примет вид

$$u_{ш.вх}^2 = 4(i_{ш.к1}^2 + i_{ш.н}^2/4)/S^2.$$

Если в качестве эмиттерного источника тока используется резистор с сопротивлением R_E , то

$$i_{ш.н}^2/4 = kT(f_v - f_n)/R_E \ll i_{ш.к1}^2 \quad \text{и} \quad u_{ш.вх}^2 = 4i_{ш.к1}^2/S^2,$$

а эквивалентная ЭДС шума ДК

$$e_{ш.ДК2} = \sqrt{8kT(r_б + kT/qI_k)(f_v - f_n)}.$$

Если в качестве эмиттерного источника тока используется активный генератор стабильного тока на транзисторе, типовая схема которого показана на рис. 2.49, б, то с учетом того, что постоянный ток этого генератора равен сумме постоянных токов коллектора транзисторов ДК $I_n = I_{к1} + I_{к2} = 2I_k$ и пренебрегая шумами базовых цепей, можно записать

$$i_{ш.н}^2 = 2qI_n(f_v - f_n) = 2q2I_k(f_v - f_n) = 2i_{ш.к1}^2.$$

При этом $u_{ш.вх}^2 = 4(i_{ш.к1}^2 + i_{ш.к1}^2/2)/S^2 = 6i_{ш.к1}^2/S^2$, а эквивалентная ЭДС шума ДК

$$e_{шДК3} = \sqrt{8kT(r_б + 3kT/2qI_k)(f_v - f_n)}.$$

В обычно используемом во входных каскадах режиме микротоков $r_б \ll kT/(2qI_k)$, поэтому для малозумящих усилителей справедливы соотношения

$$e_{шДК1} = \sqrt{2}e_{ш}, \quad e_{шДК2} = 2e_{ш}, \quad e_{шДК3} = \sqrt{6}e_{ш},$$

т. е. эквивалентная шумовая ЭДС симметричного ДК на 3 дБ, несимметричного ДК с пассивным генератором тока на 6 дБ, а несимметричного ДК с активным генератором тока на 7,8 дБ превышает при прочих равных условиях эквивалентную шумовую ЭДС каскада с ОЭ на одном транзисторе.

ТЕХНИКА ВЫСОКОКАЧЕСТВЕННОГО
ЗВУКО-
ВОСПРОИЗВЕДЕНИЯ

КИЕВ
«ТЕХНИКА»
1985

