

Итак, пятикаскадный усилитель удовлетворяет всем требованиям задания.

3.3. Подсчитать коэффициент усиления по напряжению трехкаскадного усилителя на биполярных транзисторах в области средних частот при условии, что $R_k \gg R_{вх}$, $R_r = 5 \text{ кОм}$, $R_n = 1 \text{ кОм}$, $\beta = 10$, $r_6 = 200 \text{ Ом}$, $r_3 = 25 \text{ Ом}$.

Ответ: 183.

3.4. Определить коэффициент частотных искажений M_n на частоте 50 Гц для схемы, изображенной на рис. 3.2, если $R_r = 5 \text{ кОм}$, $R_3 = 1 \text{ МОм}$, $R_c = 5 \text{ кОм}$, $R_n = 10 \text{ кОм}$, $S = 5 \text{ мА/В}$, $C_1 = C_2 = 1 \text{ мкФ}$, $C_n = 10 \text{ мкФ}$.

Ответ: 11.5.

3.5. Определить верхнюю граничную частоту схемы на основе операционного усилителя, показанной на рис. 3.16.

Ответ: 10 кГц.

3.6. Найти полосу пропускания усилителя, изображенного на рис. 3.11, если $R_r = R_n = 1 \text{ кОм}$, $C_1 = C_2 = C_3 = C_4 = 1 \text{ мкФ}$.

Ответ: 57,809 кГц.

3.7. Во сколько раз изменится коэффициент частотных искажений M_v на частоте 1 МГц, если в схеме на рис. 3.1 транзистор ГТ108А заменить транзистором ГТ305А? Считать, что $R_r = R_n = 1 \text{ кОм}$, $R_1 = 40 \text{ кОм}$, $R_2 = 10 \text{ кОм}$, $R_k = 2 \text{ кОм}$; использовать справочные параметры транзисторов при типовых режимах по постоянному току.

Ответ: 7,35.

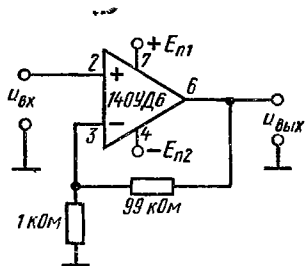


Рис. 3.16

ГЛАВА 4

ОБРАТНЫЕ СВЯЗИ В УСИЛИТЕЛЯХ

§ 4.1. ПОНЯТИЕ ОБРАТНОЙ СВЯЗИ

Обратную связь вводят для того, чтобы улучшить показатели усилителя или придать ему некоторые специфические свойства. В общем случае обратная связь в усилителе осуществляется подачей части сигнала с выхода на вход. Основная структурная схема усилителя с обратной связью показана на рис. 4.1, где S — некоторая величина, характеризующая электрические сигналы.

В наиболее общем случае K и γ — комплексные коэффициенты

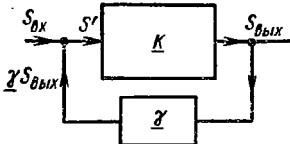


Рис. 4.1

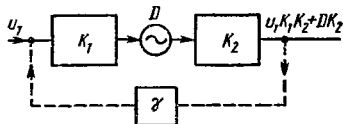


Рис. 4.2

передачи, причем обычно $|\underline{K}| \geq 1$, а $|\gamma| \leq 1$. Для этой схемы можно записать $S' = S_{\text{вх}} + \gamma S_{\text{вых}}$, но $S_{\text{вых}} = \underline{K} S'$; следовательно, $S' = S_{\text{вх}} + \gamma \underline{K} S'$, откуда $S' = \bar{S}_{\text{вх}} / (1 + \gamma \underline{K})$. Окончательно получаем $S_{\text{вых}} = \underline{K} S_{\text{вх}} (1 - \gamma \underline{K})$ и общий коэффициент усиления усилителя с обратной связью

$$K_{\text{ос}} = \frac{S_{\text{вых}}}{S_{\text{вх}}} = \frac{\underline{K}}{1 - \gamma \underline{K}}$$

Модуль знаменателя последнего выражения может быть либо больше, либо меньше единицы. Поэтому включение обратной связи либо увеличивает, либо уменьшает общий коэффициент усиления. Если общий коэффициент усиления увеличивается, то обратную связь называют положительной (ПОС), а если уменьшается — отрицательной (ООС). Следует иметь в виду, что в одной и той же схеме обратная связь на одних частотах может действовать как отрицательная, а на других — как положительная. Для ООС в области средних частот можно записать

$$K_{\text{ос}} = \frac{K}{1 + \gamma K} = \frac{K}{F}, \quad (4.1)$$

где $K_{\text{ос}} = |\underline{K}_{\text{ос}}|$, $K = |\underline{K}|$, $\gamma = |\gamma|$, $F = 1 + \gamma K$ — фактор или глубина обратной связи. Применение ООС повышает стабильность коэффициента усиления, т. е. коэффициент усиления становится менее чувствительным к изменению параметров. Предположим, что в выражении (4.1) $\gamma K \gg 1$, тогда

$$K_{\text{ос}} \approx \frac{K}{\gamma K} = \frac{1}{\gamma}, \quad (4.2)$$

т. е. коэффициент усиления усилителя с обратной связью будет определяться только коэффициентом передачи цепи обратной связи и практически не будет зависеть от K и его возможных изменений. В общем случае относительное изменение коэффициента усиления усилителя с ООС в $1 + \gamma K$ раз меньше отно-

сительного изменения коэффициента усиления усилителя без обратной связи, т. е.

$$\frac{dK_{oc}}{K_{oc}} = \frac{dK/K}{1 + \gamma K}$$

Применение ООС приводит также к уменьшению нелинейных искажений в усилителе, которые оценивают коэффициентом гармоник

$$K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + U_4^2 + \dots}}{U_1},$$

где U_1 — эффективное значение первой (основной) гармоники сигнала на выходе усилителя; U_2, U_3, U_4, \dots — эффективные значения высших гармоник сигнала.

Высшие гармоники сигнала возникают из-за нелинейности входных и выходных характеристик транзисторов усилителя. Чем больше амплитуда сигнала, тем сильнее сказываются нелинейности и тем больше уровень высших гармоник. Поэтому основным источником нелинейных искажений в усилителе являются выходные каскады, где уровень сигнала максимален. На рис. 4.2 показана структурная схема усилителя, в выходном каскаде которого появляется некоторый сигнал D , характеризующий высшие гармоники сигнала. Если предположить, что $K_2 \ll K_1$, то охват такого усилителя цепью ООС с коэффициентом передачи γ приводит к уменьшению коэффициента гармоник. Это объясняется тем, что уменьшение размаха выходного сигнала путем введения в усилитель ООС приводит к ослаблению высших гармоник в значительно большей степени, чем к ослаблению основной гармоники сигнала. Для оценочных расчетов можно считать, что

$$K_{\Gamma oc} = K_{\Gamma} / (1 + \gamma K), \quad (4.3)$$

где $K = K_1 K_2$.

Отрицательная обратная связь широко используется также для улучшения амплитудно-частотных характеристик усилителей. Она позволяет расширить полосу пропускания, что обеспечивает уменьшение частотных искажений сигналов сложной формы. Частотные искажения в усилителе характеризуют коэффициентом частотных искажений $M(\omega) = K_0/K(\omega)$, где K_0 — значение коэффициента усиления в области средних частот. Коэффициент частотных искажений показывает, во сколько раз отличается усиление усилителя на данной частоте ω от его значения в области средних частот. Если охватить усилитель цепью частотно-независимой ООС, то частотные искажения уменьшаются. Коэффициент частотных искажений уси-

лителя с обратной связью можно определить по формуле

$$M_{oc}(\omega) = 1 + \frac{M_{bc}(\omega) - 1}{F},$$

где $M_{bc}(\omega)$ — коэффициент частотных искажений в усилителе без обратной связи; F — глубина обратной связи.

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

4.1. В двухкаскадном транзисторном усилителе с общим коэффициентом усиления по току, равным 3000, использованы транзисторы с коэффициентом $\beta = 100$. В схему включена ООС с параметром $\gamma = 0,01$. Определить изменение общего коэффициента усиления (%) при наличии обратной связи и без нее, если изменение напряжения питания приводит к уменьшению параметра β до 50.

Решение

1. Находим изменение коэффициента усиления при отсутствии обратной связи. Учтем, что в двухкаскадном усилителе этот коэффициент пропорционален β^2 :

$$K_1/K_2 = \beta_1^2/\beta_2^2,$$

отсюда

$$K_2 = \frac{K_1\beta_2^2}{\beta_1^2} = \frac{3000 \cdot 50^2}{100^2} = 750.$$

Изменение коэффициента усиления составляет $(3000 - 750)/3000 = 75\%$.

2. Находим изменение коэффициента усиления при наличии ООС. Согласно формуле (4.1),

$$K_{oc1} = \frac{3000}{1 + 3000/100} = 96,7, \quad K_{oc2} = \frac{750}{1 + 750/100} = 88,2.$$

Изменение коэффициента усиления при наличии ООС составляет

$$\frac{96,7 - 88,2}{96,7} = 8,8\%.$$

Таким образом, введение обратной связи привело к уменьшению изменений коэффициента усиления примерно с 75 до 8,8%, что можно считать существенным улучшением. Вместе с тем пример показывает, что увеличение стабильности достигается за счет существенного уменьшения коэффициента усиления.