

3.1. В предварительном усилителе, схема которого изображена на рис. 3.13, определить номиналы переходных и блокирующих конденсаторов, а также необходимый тип активных элементов для обеспечения нижней граничной частоты  $f_H = 100$  Гц и верхней граничной частоты  $f_B = 500$  кГц. Подсчитать коэффициент усиления в области средних частот.

Решение

1. Из условия задачи вытекает, что  $M_H = 1,41$  на частоте  $f = 100$  Гц. Распределим низкочастотные искажения между тремя переходными и двумя блокирующими конденсаторами следующим образом:  $M_{nc1} = M_{nc2} = M_{nc3} = 1,02$ ;  $M_{ncs1} = M_{ncs2} = 1,15$ ; при этом

$$M_H = M_{nc1} M_{nc2} M_{nc3} M_{ncs1} M_{ncs2} = 1,41.$$

На блокирующие конденсаторы выделена большая часть частотных искажений, так как цепи их заряда более низкоомны по сравнению с цепями перезаряда переходных конденсаторов.

2. Для обеспечения сравнительно высокой верхней граничной частоты выберем высокочастотный транзистор ГТ305А. Методом последовательных приближений, воспользовавшись справочными выходными характеристиками этого транзистора, определим режим по постоянному току транзисторов  $T_1$  и  $T_2$  на рис. 3.13. Для  $E_K = -10$  В получаем  $U_{кэ} = 6$  В,  $I_э = 5$  мА,  $I_B = 200$  мкА. В таком режиме транзистор ГТ305А имеет следующие параметры:  $\beta = 25$ ,  $f_T = 140$  МГц,  $C_K = 7$  пФ,  $r_6 = 70$  Ом,  $r_k = 200$  кОм.

3. Определяем номиналы переходных конденсаторов  $C_1$ ,  $C_2$  и  $C_3$ .

Для этого сначала определим величины

$$R_{вх1} = R_{вх2} \approx r_6 + r_3(1 + \beta) = r_6 + \frac{\Phi_T}{I_3}(1 + \beta) =$$

$$= 70 + \frac{25}{5}(1 + 25) = 200 \text{ Ом},$$

где  $I_3 = 5$  мА — режимный ток эмиттера транзисторов  $T_1$  и  $T_2$ ;  $\Phi_T = 25$  мВ — температурный потенциал при температуре окружающей среды  $20^\circ\text{C}$ .

Сопротивления базовых делителей можно пренебречь,

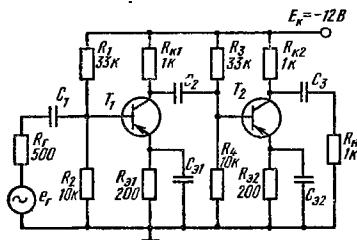


Рис. 3.13

так как

$$R_6 = R_1 \parallel R_2 = R_3 \parallel R_4 \gg R_{\text{вх1}} = R_{\text{вх2}}.$$

Согласно формуле (3.8),

$$C_1 = \frac{1}{2\pi f_H (R_{\Gamma} + R_{\text{вх1}}) \sqrt{M_{\text{нс1}}^2 - 1}} =$$
$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 (500 + 200) \sqrt{1,02^2 - 1}} \approx 11 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 11 \text{ мкФ},$$

$$C_2 = \frac{1}{2\pi f_H (R_{\text{к1}} + R_{\text{вх2}}) \sqrt{M_{\text{нс2}}^2 - 1}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 (1000 + 200) \sqrt{1,02^2 - 1}} \approx 7 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 7 \text{ мкФ},$$

$$C_3 = \frac{1}{2\pi f_H (R_{\text{к2}} + R_{\text{н}}) \sqrt{M_{\text{нс3}}^2 - 1}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 (1000 + 1000) \sqrt{1,02^2 - 1}} \approx 4 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 4 \text{ мкФ}.$$

4. Определяем номиналы блокирующих конденсаторов  $C_{31}$  и  $C_{32}$ . Для этого сначала находим  $R_{\text{вых.3}}$ , вновь пренебрегая влиянием резисторов базовых делителей и считая  $\beta_e = \beta$ :

$$R_{\text{вых.31}} = r_{31} + \frac{R_{\Gamma} + r_{61}}{1 + \beta_1} = 5 + \frac{500 + 70}{1 + 25} = 27 \text{ Ом},$$

$$R_{\text{вых.32}} = r_{32} + \frac{R_{\text{к1}} + r_{62}}{1 + \beta_2} = 5 + \frac{1000 + 70}{1 + 25} = 46 \text{ Ом}.$$

Согласно формуле (3.8), имеем

$$C_{31} = \frac{1}{2\pi f_H R_{\text{вых.31}} \sqrt{M_{\text{нс31}}^2 - 1}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 27 \sqrt{1,15^2 - 1}} \approx 100 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 100 \text{ мкФ},$$

$$C_{32} = \frac{1}{2\pi f_H R_{\text{вых.32}} \sqrt{M_{\text{нс2}}^2 - 1}} =$$

$$= \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 100 \cdot 46 \sqrt{1,15^2 - 1}} \approx 62 \cdot 10^{-6} \text{ Ф} = 62 \text{ мкФ}.$$

На практике следует для  $C_1, C_2, C_3, C_{31}$  и  $C_{32}$  выбирать ближайший стандартный номинал.

5. Проверяем правильность выбора типа транзистора с точки зрения обеспечения заданной верхней граничной частоты. Имеем

$$\tau_{\beta} = \frac{1 + \beta}{2\pi f_T} = \frac{1 + 25}{2 \cdot 3,14 \cdot 140 \cdot 10^6} \approx 30 \cdot 10^{-9} \text{ с} = 30 \text{ нс.}$$

Для первого каскада

$$\begin{aligned} \tau_{e1} &= \tau_{\beta 1} + C_{к1}(1 + \beta_1)(R_{к1} \parallel R_{вх2}) = \\ &= 30 + 7(1 + 25) \cdot \frac{1 \cdot 0,2}{1 + 0,2} \approx 60 \text{ нс,} \end{aligned}$$

$$\gamma_{\beta 1} = \frac{r_{э1}}{r_{э1} + r_{\beta 1} + R_T} = \frac{5}{5 + 70 + 500} = 0,0087,$$

$$\tau_{в1} = \frac{\tau_{e1}}{1 + \gamma_{\beta 1}\beta_1} = \frac{60}{1 + 0,0087 \cdot 25} = 49 \text{ нс.}$$

Для второго каскада, аналогично,

$$\begin{aligned} \tau_{e2} &= \tau_{\beta 2} + C_{к2}(1 + \beta_2)(R_{к2} \parallel R_{н}) = \\ &= 41 + 7(1 + 25) \cdot \frac{1 \cdot 1}{1 + 1} \approx 130 \text{ нс,} \end{aligned}$$

$$\gamma_{\beta 2} = \frac{r_{э2}}{r_{э2} + r_{\beta 2} + R_{к1}} = \frac{5}{5 + 70 + 1000} = 0,00465,$$

$$\tau_{в2} = \frac{\tau_{e2}}{1 + \gamma_{\beta 2}\beta_2} = \frac{130}{1 + 0,00465 \cdot 25} = 116 \text{ нс.}$$

Итак, искажения в области высших частот определяются в основном вторым каскадом, так как  $\tau_{в2} \gg \tau_{в1}$ . Отсюда

$$f_{в} \approx \frac{1}{2\pi\tau_{в2}} = \frac{1}{2 \cdot 3,14 \cdot 116 \cdot 10^{-9}} \approx 1,3 \text{ МГц,}$$

т. е. выбранный тип транзисторов обеспечивает заданное значение  $f_{в}$ .

6. Находим коэффициент усиления в области средних частот:

$$\begin{aligned} K_U &= K_{U1}K_{U2} = \frac{\beta_1 (R_{к1} \parallel R_{вх2})}{R_T + R_{вх1}} \frac{\beta_2 (R_{к2} \parallel R_{н})}{R_{вх2}} = \\ &= \frac{25 \cdot \frac{1 \cdot 0,2}{1 + 0,2}}{0,5 + 0,2} \cdot \frac{25 \cdot \frac{1 \cdot 1}{1 + 1}}{0,2} = 370. \end{aligned}$$

3.2. Рассчитать широкополосный усилитель на основе каскадного соединения однотипных усилительных микросхем К224УС1 по следующим данным:  $R_H = 1$  кОм,  $K_U = 10$ ,  $f_B \geq 40$  МГц,  $f_H \leq 500$  кГц. Предполагается, что усилитель работает от низкоомного источника сигнала.

### Решение

1. Из справочных данных микросхемы К224УС1, принципиальная схема которой и типовое включение показаны на рис. 3.14 и 3.15, имеем  $E_{п1} = 5,4 \div 12,0$  В,  $E_{п2} = 3$  В,  $S = 25$  мА/В,  $R_{вх} \geq 150$  Ом,  $f_H = 0,15$  МГц,  $f_B = 110$  МГц.

2. Подсчитаем коэффициент усиления  $K_U = SR_H$ , который

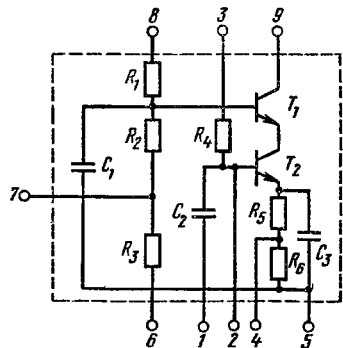


Рис. 3.14

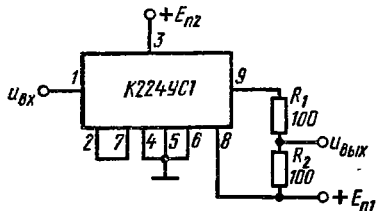


Рис. 3.15

может обеспечить одна микросхема в области средних частот. Роль параметра  $R_H$  при работе на такую же микросхему будет играть величина  $R_H = R_2 \parallel R_{вх} = 100 \parallel 150 = 60$  Ом. Тогда  $K_U = 25 \cdot 0,06 = 1,5$ . Для обеспечения коэффициента усиления  $K_U = 10$  требуется включить последовательно пять таких микросхем. Последняя микросхема работает на большую нагрузку  $R_{н5} = R_2 \parallel R_H = 100 \parallel 1000 = 90$  Ом, тогда  $K_{У5} = SR_{н5} = 25 \cdot 0,09 = 2,25$ . Общий коэффициент усиления

$$K_U = (K_{У1})^4 K_{У5} = 11,4.$$

3. Определим верхнюю граничную частоту усилителя по формуле (3.12):

$$f_B \approx f_{B1} / \sqrt{N} = 110 / \sqrt{5} = 45 \text{ МГц.}$$

4. Найдем нижнюю граничную частоту усилителя. Нижняя граничная частота каждой микросхемы определяется переходными и блокирующими емкостями внутри микросхемы (см. рис. 3.14). Для всего усилителя имеем  $f_H \approx f_{H1} \sqrt{N} = 0,15 \cdot \sqrt{5} = 335$  кГц.

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.

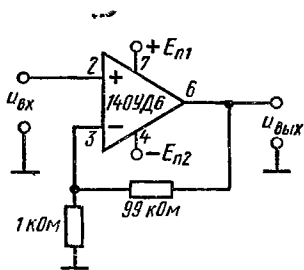


Рис. 3.16

## 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  $\gamma$  — комплексные коэффициенты