

дующие выражения:

$$S_{R2}^{f_0} = S_{R3}^{f_0} = S_{C1}^{f_0} = S_{C2}^{f_0} = -\frac{1}{2}; \quad S_{R2}^{K_0} = -S_{R1}^{K_0} = 1; \quad S_{C2}^{\alpha} =$$

$$= -S_{C1}^{\alpha} = \frac{1}{2};$$

$$S_{R1}^{\alpha} = \frac{1}{2\pi f_0 \alpha R_1 C_1}; \quad S_{R2}^{\alpha} = \frac{1}{2} - \frac{1}{2\pi f_0 \alpha R_2 C_1}; \quad S_{R3}^{\alpha} =$$

$$= \frac{1}{2} - \frac{1}{2\pi f_0 \alpha R_3 C_1}.$$

Аналогично получаются выражения чувствительностей для всех остальных рассматриваемых схем фильтров.

До сих пор при рассмотрении активных фильтров считалось, что параметры ОУ не оказывают влияния на работу фильтра. В действительности при расчете схем фильтров следует учитывать конечные значения $R_{\text{вх ОУ}}$, $R_{\text{вых ОУ}}$ и полосы пропускания ОУ. Так, номиналы резисторов в схемах фильтров должны удовлетворять очевидным неравенствам:

$$R_{\text{min}} \geq 10R_{\text{вых ОУ}}, \quad R_{\text{max}} \leq R_{\text{вх ОУ}}/10. \quad (7.47)$$

Номиналы емкостей, с одной стороны, должны быть значительно больше паразитных емкостей в схеме фильтра. С другой стороны, эти емкости не должны быть слишком большими, так как при этом увеличиваются габариты устройства и потери в конденсаторах. Для фильтров нижних частот частота единичного усиления ОУ должна удовлетворять неравенству

$$f_{\text{тОУ}} \geq f_0 K_0; \quad (7.48)$$

для фильтров верхних частот неравенство оказывается еще более жестким:

$$f_{\text{тОУ}} \geq 100f_0 K_0. \quad (7.49)$$

Для полосовых фильтров можно воспользоваться неравенством (7.48).

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

7.10. Рассчитать фильтр нижних частот с максимально плоской характеристикой по следующим данным: $f_0 = 10$ кГц, $K_0 \geq 10$, $n = -40$ дБ/дек.

1. Выбираем схему фильтра на основе ОУ с многопетлевой обратной связью (см. рис. 7.23), которая может обеспечить заданный наклон АЧХ в полосе ограничения $n = -40$ дБ/дек.

2. Выбираем ОУ по частоте единичного усиления $f_{T\text{ОУ}} \geq \geq f_0 K_0 = 100$ кГц. Для ОУ типа 140УД6 $f_T = 1$ МГц, т. е. последнее неравенство выполняется с запасом. По справочнику, $R_{\text{вх ОУ}} = 2000$ кОм, $R_{\text{вых ОУ}} = 200$ Ом, т. е. номиналы резисторов в схеме фильтра должны находиться в пределах от 2 кОм до 200 кОм [см. формулы (7.45)].

3. Задаваясь значением емкости $C_2 = 2200$ пФ, заметим, что выбранная величина существенно больше возможных паразитных емкостей в схеме. Конденсаторы КМ-6 такой емкости обладают малыми габаритами и хорошей стабильностью (группы по ТКЕ П33 и М47).

4. Находим значение вспомогательного коэффициента $K = = 2\pi f_0 C_2 = 6,28 \cdot 10 \cdot 10^3 \cdot 2200 \cdot 10^{-12} = 13,8 \cdot 10^{-5}$. Отсюда величина емкости C_1 при $\alpha = \sqrt{2}$

$$C_1 = \frac{4}{\alpha^2} (H + 1) C_2 = \frac{4}{2} (10 + 1) 2200 = 40000 \text{ пФ.}$$

5. Определяем значения резисторов схемы фильтра:

$$R_1 = \frac{\alpha}{2HK} = \frac{\sqrt{2}}{2 \cdot 10 \cdot 13,8 \cdot 10^{-5}} = \frac{10^5}{195} \approx 500 \text{ Ом,}$$

$$R_2 = \frac{\alpha}{2K} = HR_1 = 5000 \text{ Ом,}$$

$$R_3 = \frac{\alpha}{2(H+1)K} \approx 480 \text{ Ом.}$$

Сопротивления резисторов R_1 и R_3 получились меньше 2 кОм. Поэтому уменьшаем емкость C_2 примерно в четыре раза, получаем $C_2 = 510$ пФ и производим пересчет схемы. Получаем $K = 3,2 \cdot 10^{-5}$, $C_1 = 9300$ пФ, $R_1 = 2150$ Ом, $R_2 = = 21500$ Ом, $R_3 = 2000$ Ом.

6. Проверяем полученное значение частоты среза:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{C_1 C_2 R_2 R_3}} = \frac{1}{6,28 \sqrt{9300 \cdot 510 \cdot 21,5 \cdot 2}} \approx 10,9 \text{ кГц}$$

и коэффициента усиления в полосе пропускания:

$$K_0 = \frac{R_2}{R_1} = 10.$$

7. Обратим внимание на значение входного тока для ОУ типа 140УД6; по справочнику, $I_{\text{вх}} = 40$ нА. Подсчитаем величину $U_{\text{вх}} = I_{\text{вх}}(R_3 + R_1 \parallel R_2) = 40 \cdot 10^{-9} \cdot 4 \cdot 10^{-3} = 160$ мкВ. Это напряжение можно скомпенсировать, подключив между неинвертирующим входом ОУ и общей шиной резистор $R_4 \approx 4$ кОм.

7.11. Определить реальную полосу пропускания фильтра верхних частот (см. рис. 7.28), построенного на операционном усилителе типа 140УД6, если коэффициент передачи в полосе пропускания $K_0 = 20$ дБ, а частота среза $f_0 = 10$ кГц.

Ответ: 90 кГц.

7.12. Для фильтра нижних частот по схеме на рис. 7.23 определить относительную нестабильность частоты среза f_0 при изменении окружающей температуры от 20 до 80 °С. Принять ТКС резисторов 10^{-2} 1/град, ТКЕ конденсаторов 10^{-3} 1/град; считать операционный усилитель идеальным.

Ответ: -0,66.

7.13. Определить добротность полосового фильтра, изображенного на рис. 7.29, если $\bar{R} = 36$ кОм и $\bar{R} = 10$ кОм. Принять $R_1 = R_2 = R_3 = R$, $C_1 = C_2 = C$.

Ответ: 3,5.

7.14. Для фильтра, изображенного на рис. 7.24, найти коэффициент передачи в полосе пропускания и частоту среза при $R_1 = R_2 = 10$ кОм, $C_1 = 0,1$ мкФ и $C_2 = C_3 = 0,01$ мкФ.

Ответ: 10; 1,6 кГц.

7.15. Определить максимально достижимую величину частоты среза для фильтра нижних частот (см. рис. 7.23), построенного на основе операционного усилителя с $f_T = 1$ МГц и внутренней частотной коррекцией. Принять $R_1 = 1$ кОм, $R_2 = 100$ кОм.

Ответ: 10 кГц.

7.16. Определить, во сколько раз увеличится отношение сигнал/помеха после прохождения сигнала через фильтр верхних частот (см. рис. 7.28) с частотой среза $f_0 = 1$ кГц. Принять частоту сигнала 10 кГц, а частоту помехи 50 Гц.

Ответ: в 200 раз.

ГЛАВА 8 ТРАНЗИСТОРНЫЕ КЛЮЧИ

§ 8.1. КЛЮЧИ НА БИПОЛЯРНЫХ ТРАНЗИСТОРАХ

Транзисторный ключ — это схема, предназначенная для коммутации цепи нагрузки транзистора при воздействии на него внешних управляющих сигналов.