

Величину резистора R_4 , который включен для снижения токового дрейфа, выбирают из условия $R_4 = R_1 \parallel R_2 \parallel R_3 \parallel R_{oc}$ (при $R_{r1} = R_{r2} = R_{r3} = 0$).

Л о г а р и ф м и р у ю щ и й усилитель (рис. 6.15) позволяет получить выходное напряжение, пропорциональное логарифму входного напряжения. Полярность входного сигнала должна обеспечивать прямое напряжение на диоде в цепи обратной связи.

Используя уравнение ВАХ диода и учитывая, что $U_{\text{диода}} = U_{\text{вых}}$, можно получить

$$U_{\text{вых}} = 2,3\varphi_T \lg \frac{U_{\text{вх}}}{I_0 R} = a \lg(bU_{\text{вх}}), \quad (6.31)$$

где $a = 2,3\varphi_T$, $b = 1/(I_0 R)$. Здесь φ_T — температурный потенциал; I_0 — тепловой ток диода.

Если места включения резистора R и диода в рассматриваемом усилителе поменять, то выходное напряжение будет пропорционально антилогарифму входного сигнала.

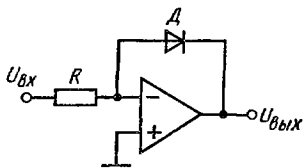


Рис. 6.15

ПРИМЕРЫ И ЗАДАЧИ

6.3. Рассчитать нормирующий усилитель на основе ОУ типа К140УД1А с коэффициентом передачи $K_U = 10$, работающий на нагрузку с сопротивлением $R_H = 5$ кОм. Входное сопротивление не менее 10 кОм, выходное сопротивление не более 100 Ом. Усилитель работает от источника сигнала с э. д. с. $E_T = 0,2$ В и внутренним сопротивлением $R_T = 1$ кОм.

Оценить относительную статическую погрешность и дрейф, приведенный ко входу усилителя, если $\Delta T = 20^\circ\text{C}$ (от 20 до 40°C) и нестабильность источников питания $\pm 10\%$.

Решение

Здесь можно использовать инвертирующее включение ОУ (см. рис. 6.8), поскольку требуемое сопротивление $R_{\text{вх}}$ невелико. Согласно выражению (6.10а), $K_U = K_{U\text{инв}} = -R_{oc}/(R_1 + R_T)$. Требуемая величина $R_{\text{вх}} = R_1 = 10$ кОм, тогда $R_{oc} = K_{U\text{инв}}(R_1 + R_T) = 10 \cdot 11 = 110$ кОм. Такая величина сопротивления R_{oc} не приведет к большой погрешности за счет разностного тока и может считаться приемлемой.

Для уменьшения токовой погрешности выбираем резистор R_2 из выражения (6.15): $R_2 = (R_1 + R_T) \parallel R_{oc} \approx 11$ кОм.

Определим выходной ток ОУ согласно формуле (6.11):

$$I_{\text{вых}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{н}}} + \frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{ос}}} = \frac{0,2 \cdot 10}{5} + \frac{0,2 \cdot 10}{110} \approx 0,42 \text{ мА},$$

что допустимо для ОУ типа К140УД1А. Параметры данного типа ОУ, необходимые для дальнейших расчетов, приведены в справочниках.

Выходное сопротивление усилителя определим из выражения (6.14):

$$R_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{вых.ОУ}} K_{U_{\text{инв}}}}{K_{U_{\text{ОУ}}}} = \frac{700 \cdot 10}{900} = 8 \text{ Ом},$$

что много меньше требуемой величины. Оценим дрейф, приведенный ко входу усилителя, с учетом выражения (6.17):

$$e_{\text{др}}^{\text{вк}} = \frac{\Delta U_{\text{вых.ош}}}{\Delta T K_U} = \frac{dU_{\text{см}}}{dT} + \frac{dI_{60 \text{ разн}}}{dT} (R_{\text{г}} + R_1) =$$

$$= 20 \text{ мкВ/}^\circ\text{С} + 30 \cdot 10^{-3} \text{ мкА/}^\circ\text{С} \cdot 11 \cdot 10^3 \approx 350 \text{ мкВ/}^\circ\text{С}.$$

Относительная статическая погрешность усилителя определяется из выражения

$$\delta_{\text{стат}} = \frac{\Delta K_{U_{\text{инв}}}}{K_{U_{\text{инв}}}} + \frac{\Delta U_{\text{вых.ош}}}{K_{U_{\text{инв}}} U_{\text{вк макс}}}. \quad (6.32)$$

Здесь $\Delta K_{U_{\text{инв}}}$ — изменение $K_{U_{\text{инв}}}$ с изменением температуры окружающей среды:

$$\Delta U_{\text{вых.ош}} = \Delta U_{\text{вых.ош}}^{\text{сф}} + \Delta U_{\text{вых.ош}}^{\Delta T} + \Delta U_{\text{вых.ош}}^{\Delta E_{\text{п}}},$$

где $\Delta U_{\text{вых.ош}}^{\text{сф}}$ — изменение выходного напряжения при воздействии синфазного сигнала на входе (в рассматриваемом усилителе $\Delta U_{\text{вых.ош}}^{\text{сф}} = 0$); $\Delta U_{\text{вых.ош}}^{\Delta T}$ — изменение напряжения на выходе усилителя в диапазоне температур ΔT , равное

$$\Delta U_{\text{вых.ош}}^{\Delta T} = e_{\text{др}}^{\text{вк}} \Delta T K_{U_{\text{инв}}} = 0,35 \cdot 20 \cdot 10 = 70 \text{ мВ};$$

$\Delta U_{\text{вых.ош}}^{\Delta E_{\text{п}}}$ — изменение выходного напряжения при изменении напряжения питания.

Паспортные данные для ОУ типа К140УД1 таковы: $E_{\text{п}} = \pm 6,3 \text{ В}$ и $K_{\text{ОВНП}} = 60 \text{ дБ}$ (10^3). Тогда из выражения (6.18) найдем изменение напряжения смещения $\Delta U_{\text{см}}$ за счет изменения напряжения питания на $\pm 10\%$:

$$\Delta U_{\text{см}} = \frac{\Delta E_{\text{п}}}{K_{\text{ОВНП}}} = \frac{0,1 \cdot 2 \cdot 6,3}{10^3} = 1,26 \text{ мВ}$$

и

$$\Delta U_{\text{вых.ош}}^{\Delta E_{\text{п}}} = \Delta U_{\text{см}} K_{U_{\text{инв}}} = 1,26 \cdot 10 = 12,6 \text{ мВ.}$$

Таким образом, $\Delta U_{\text{вых.ош}} = 70 + 12,6 = 82,6 \text{ мВ.}$

Первое слагаемое в формуле (6.32) определяется температурным градиентом коэффициента усиления ОУ, который составляет обычно

$$\frac{\Delta K_{U_{\text{ОУ}}}}{K_{U_{\text{ОУ}}}\Delta T} = (0,2 \div 0,4) 10^{-2} \text{ } 1/^{\circ}\text{C.}$$

Выберем $\frac{\Delta K_{U_{\text{ОУ}}}}{K_{U_{\text{ОУ}}}\Delta T} = 0,4 \cdot 10^{-2} \text{ } 1/^{\circ}\text{C.}$ При охвате ОУ обратной связью в схеме инвертирующего усилителя при $\Delta T = 20^{\circ}\text{C}$

$$\frac{\Delta K_{U_{\text{инв}}}}{K_{U_{\text{инв}}}} = \frac{\Delta K_{U_{\text{ОУ}}}\Delta T}{\Delta T K_{U_{\text{ОУ}}}F} = \frac{0,4 \cdot 10^{-2} \cdot 20}{\frac{900}{10}} = 9 \cdot 10^{-4} = 0,09\%.$$

Общая статическая погрешность

$$\delta_{\text{стат}} = 9 \cdot 10^{-4} + \frac{82,6 \cdot 10^{-3}}{10 \cdot 0,2} = 0,0423, \text{ или } 4,23\%.$$

Проведенный расчет показывает, что основной вклад в величину погрешности вносит дрейф разностного входного тока ОУ.

6.4. Неинвертирующий усилитель на основе ОУ типа 140УД6 имеет коэффициент усиления $K_{U_{\text{неинв}}} = 20$. Сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 2 \text{ кОм}$, резисторы цепи обратной связи $R_1 = 10 \text{ кОм}$, $R_{\text{ос}} = 190 \text{ кОм}$. Усилитель работает от источника сигнала с $E_{\text{г}} = 0,05 \text{ В}$, $R_{\text{г}} = 10 \text{ кОм}$.

Оценить величину относительной статической погрешности усилителя при изменении температуры от -20 до $+60^{\circ}\text{C}$ и нестабильности источников питания $\pm 1\%$.

Ответ: $\approx 4\%$.

6.5. Инвертирующий усилитель (см. рис. 6.8) с сопротивлениями $R_1 = 10 \text{ кОм}$ и $R_{\text{ос}} = 1 \text{ МОм}$ имеет следующие параметры ОУ: $K_{U_{\text{ОУ}}} = 10^4$, $R_{\text{вх.ОУ}} = 300 \text{ кОм}$, $R_{\text{вых.ОУ}} = 700 \text{ Ом}$. Рассчитать величины $K_{U_{\text{инв}}}$, $R_{\text{вх.инв}}$ и $R_{\text{вых.инв}}$ с учетом неидеальных параметров ОУ.

Ответ: $K_{U_{\text{инв}}} = 99$, $R_{\text{вх.инв}} = 10,1 \text{ кОм}$; $R_{\text{вых.инв}} = 7 \text{ Ом}$.

6.6. Определить погрешность коэффициента усиления $\delta K_{U_{\text{неинв}}}$ неинвертирующего усилителя (см. рис. 6.9), связанную

с конечным значением коэффициента $K_{oc.cф}$, если $R_1 = 10 \text{ кОм}$; $R_{oc} = 100 \text{ кОм}$; $K_{Uoy} = 2000$ и $K_{oc.cф} = 1000$.

Ответ: 1,1 %.

6.7. Инвертирующий усилитель (см. рис. 6.8) имеет сопротивление $R_{oc} = 90 \text{ кОм}$, $R_1 = 10 \text{ кОм}$ и $R_2 = 9 \text{ кОм}$. Дрейф напряжения смещения $dU_{cm}/dT = 1 \text{ мВ/}^\circ\text{C}$ и дрейф разностного входного тока $dI_{60разн}/dT = 1 \text{ нА/}^\circ\text{C}$. Найти напряжения ошибки на выходе усилителя, если температура изменилась на 40°C .

Ответ: $U_{вых.ош} = 404 \text{ мВ}$.

6.8. Рассчитать измерительный усилитель на основе ОУ для усиления разностного сигнала с диагонали моста, в одно из плеч которого включен терморезистор (рис. 6.16). При изменении температуры на 20°C (от 20 до 40°C) возникает разбаланс моста $\Delta R_x = 5 \text{ Ом}$. Номиналы резисторов моста $R_{x20^\circ\text{C}} = R_1 = 100 \text{ Ом}$; $R_2 = R_3 = 5 \text{ кОм}$; напряжение питания моста $E_n = 10 \text{ В}$.

Требуемое значение коэффициента усиления должно регулироваться в пределах от 30 до 50. Входное сопротивление $R_{вх} \geq 50 \text{ кОм}$.

Оценить величину синфазной помехи на выходе усилителя, учитывая разброс номиналов резисторов схемы.

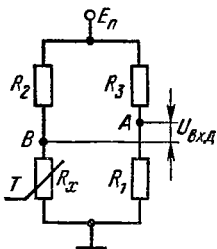


Рис. 6.16

Решение

1. Выбираем схему измерительного усилителя, приведенную на рис. 6.13, поскольку данная схема позволяет обеспечить высокие значения входного сопротивления и регулировку коэффициента усиления с помощью одного переменного резистора. Используем ОУ типа 140УД8 с полевыми транзисторами на входе, что позволит уменьшить погрешность, вызванную разностным входным током.

2. Определим величины дифференциального и синфазного выходных сигналов (рис. 6.16):

$$\Delta U_{вх} = U_{вх.д} = \varphi_A - \varphi_B = E_n \left(\frac{R_1}{R_3 + R_1} - \frac{R_1 - \Delta R_x}{R_2 + R_1 - \Delta R_x} \right) =$$

$$= 10 \left(\frac{100}{5100} - \frac{100 - 5}{5100 - 5} \right) = 0,01 \text{ В} = 10 \text{ мВ},$$

$$U_{вх.сф} = \frac{\varphi_A + \varphi_B}{2} \cong \frac{1}{2} \frac{100 + 95}{510} \cong 190 \text{ мВ}.$$

3. Выберем номиналы резисторов схемы. Для уменьшения влияния входного тока ОУ₃ возьмем $R_4 = R_6 = 10 \text{ кОм}$, $R_5 =$

$= R_7 = 50 \text{ кОм}$ с погрешностью 5%. Это дает значения $m = 5$ и $\frac{\Delta m}{m} = 5\%$. Сопротивление переменного резистора aR определяется

требуемой глубиной регулирования коэффициента усиления $K_{U \text{ разн}}$. Из выражения (6.28) найдем, что при $K_U = 50$ и $m = 5$ величина $a = 0,22$; при $K_U = 30$ и $m = 5$ величина $a = 0,4$. Если резисторы $R_4 = R_5 = 10 \text{ кОм}$, то переменный резистор aR следует выбрать с номиналом 4 кОм.

4. Для подсчета $U_{\text{вых. ош}}^{\text{сф}}$ определим $K_{\text{ос. сф}}$ усилителя из выражения (6.29) при $K_U = 50$:

$$K_{\text{ос. сф}} = \left(1 + \frac{2}{a}\right)(1 + m) \frac{m}{\Delta m} = 10 \cdot 6 \frac{100}{5} = 1200.$$

Полученный результат показывает, что влияние неидентичности резисторов в схеме проявляется значительно сильнее, чем неодинаковость параметров плеч ДУ в ОУ, так как $K_{\text{ос. сф ОУ}} = 10^4$ и $K_{\text{ос. сф ОУ}} \gg K_{\text{ос. сф}}$ усилителя.

Тогда при максимальном коэффициенте усиления схемы

$$U_{\text{вых. ош}}^{\text{сф}} = U_{\text{вх. сф}} K_{U \text{ сф}} = U_{\text{вх. сф}} \frac{K_{U \text{ Д}}}{K_{\text{ос. сф}}} = 190 \cdot \frac{50}{1200} = 7,92 \text{ мВ},$$

что при полезном сигнале $U_{\text{вых. д}} = U_{\text{вх. д}} K_{U \text{ Д}} = 10 \cdot 50 = 500 \text{ мВ}$ дает относительную ошибку измерения в $7,92 \cdot 100 / 500 = 1,58\%$.

6.9. Определить, как изменится коэффициент K_U разностного усилителя, собранного по схеме рис. 6.11, если номиналы резисторов $R_{\text{ос}} = R_3$ увеличить вдвое.

Ответ: возрастает в два раза.

6.10. Рассчитать величины $R_{\text{вх. инв}}$ и $R_{\text{вх. неинв}}$ схемы разностного усилителя (см. рис. 6.11), если номиналы резисторов схемы $R_2 = R_1 = 10 \text{ кОм}$; $R_{\text{ос}} = R_3 = 100 \text{ кОм}$. Принять $R_{\text{вх. ОУ}} = \infty$ и $K_{\text{и ОУ}} = \infty$.

Ответ: $R_{\text{вх. инв}} = 10 \text{ кОм}$, $R_{\text{вх. неинв}} = 110 \text{ кОм}$.

6.11. Определить выходной ток усилителя на ОУ в схеме, изображенной на рис. 6.11, если сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 5 \text{ кОм}$; $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$ и $R_3 = R_{\text{ос}} = 50 \text{ кОм}$; $U_{\text{вх. д}} = 1 \text{ В}$. Принять $R_{\text{вых. ОУ}} = 0$, $K_{\text{и ОУ}} = \infty$.

Ответ: 1,1 мА.

6.12. Для схемы разностного усилителя (см. рис. 6.11) определить величину $U_{\text{вых}}$, если $U_{\text{вх1}} = 0,2 \text{ В}$, $U_{\text{вх2}} = -0,1 \text{ В}$, $R_{\text{ос}} = R_3 = 120 \text{ кОм}$, $R_1 = R_2 = 10 \text{ кОм}$.

Ответ: -3,6 В.

6.13. Разностный усилитель (см. рис. 6.11) усиливает сигнал, поступающий с моста (рис. 6.16). Известно, что $U_{\text{вх. д}} = U_{\text{вх2}} -$

$-U_{\text{вх1}} = 1$ мВ, $U_A = U_B = 5$ В, $R_3 = R_{\text{ос}} = 100$ кОм, $K_{\text{ос.сф}} = 2 \cdot 10^4$, $R_1 = R_2 = 5$ кОм. Определить полное напряжение на выходе ОУ, считая, что резисторы R_3 и $R_{\text{ос}}$, R_1 и R_2 одинаковы.

Ответ: $U_{\text{вых}} = 25$ мВ.

6.14. Ко входу разностного усилителя на ОУ (см. рис. 6.11) приложен синфазный сигнал с напряжением $U_{\text{вх.сф}} = 0,5$ В. Измеренное на выходе напряжение составляет при этом 5 мВ. Определить коэффициент ослабления синфазного сигнала, если $R_1 = R_2 = 5$ кОм; $R_{\text{ос}} = R_3 = 50$ кОм.

Ответ: 60 дБ.

6.15. Выходное напряжение ОУ ограничивается на уровне ± 10 В. Какое максимальное напряжение $U_{\text{вх}}$ можно подать на схему разностного усилителя (см. рис. 6.11), не вызывая ограничения $U_{\text{вых}}$? Считать, что $R_1 = R_2 = 5$ кОм, $R_{\text{ос}} = R_3 = 50$ кОм.

Ответ: $U_{\text{вх max}} \leq 1$ В.

6.16. Рассчитать инвертирующий сумматор с тремя входами на идеальном ОУ ($K_{U_{\text{ОУ}}} = \infty$, $R_{\text{вх.ОУ}} = \infty$, $R_{\text{вых.ОУ}} = 0$). Значения ЭДС на входах и внутренние сопротивления источников следующие: $E_{r1} = -2$ В, $E_{r2} = 3$ В, $E_{r3} = 1$ В, $R_{r1} = 0,5$ кОм, $R_{r2} = 0$, $R_{r3} = 1$ кОм. Требуемое усиление сигнала по первому входу равно 5, по второму -2 , по третьему -10 . Сопротивление нагрузки $R_{\text{н}} = 5$ кОм.

Решение

Используем схему сумматора, приведенную на рис. 6.14. Усиление схемы по первому входу $K_{U1} = R_{\text{ос}} / (R_1 + R_{r1}) = 5$.

Для уменьшения влияния токового дрейфа выберем $R_{\text{ос}} = 20$ кОм. Тогда $R_1 = 3,5$ кОм. Аналогично находим $R_2 = 10$ кОм, $R_3 = 1$ кОм. Для снижения токового дрейфа вводим резистор $R_4 = R_{\text{ос}} \parallel (R_1 + R_{r1}) \parallel R_2 \parallel (R_{r3} + R_3) = 1,3$ кОм. Ток, потребляемый от выходной цепи ОУ,

$$I_{\text{вых}} = I_{R_{\text{ос}}} + I_{\text{н}} = \frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{ос}}} + \frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{н}}},$$

где $U_{\text{вых}} = K_{U1}E_{r1} - K_{U2}E_{r2} - K_{U3}E_{r3} = 10 - 6 - 10 = -6$ В. Следовательно,

$$I_{\text{вых}} = \frac{-6}{20} + \frac{-6}{5} = -1,5 \text{ мА},$$

что допустимо для ОУ любого типа. Значения входных токов

$$I_{\text{вх1}} = \frac{E_{r1}}{R_{r1} + R_1} = \frac{-2}{4} = -0,5 \text{ мА},$$

$$I_{\text{вх}2} = \frac{E_{r2}}{R_{r2} + R_2} = \frac{3}{10} = 0,3 \text{ мА},$$

$$I_{\text{вх}3} = \frac{E_{r3}}{R_{r3} + R_3} = \frac{1}{2} = 0,5 \text{ мА}.$$

6.17. Для инвертирующего сумматора (см. рис. 6.14) рассчитать величины R_1 , R_2 и R_3 так, чтобы обеспечить следующую зависимость выходного напряжения: $U_{\text{вых}} = -(2U_{\text{вх}1} + 3U_{\text{вх}2} + 5U_{\text{вх}3})$. Сопротивление резистора $R_{\text{ос}} = 150 \text{ кОм}$.

Ответ: $R_1 = 75 \text{ кОм}$, $R_2 = 50 \text{ кОм}$, $R_3 = 30 \text{ кОм}$.

6.18. Как изменится выходное напряжение сумматора из задачи 6.16, если э. д. с. E_{r3} сделать равной нулю?

Ответ: $U_{\text{вых}} = 4 \text{ В}$.

6.19. В схеме на рис. 6.17 использован идеальный ОУ ($K_{\text{УОУ}} = \infty$; $R_{\text{вхОУ}} = \infty$). Показать, что ток в резисторе $R_{\text{н}}$ для указанных номиналов резисторов определяется по формуле $I_{\text{н}} = U_{\text{вх}}/R$, а выходное напряжение $U_{\text{вых}} = 2U_{\text{н}}$.

6.20. Для схемы предыдущей задачи определить напряжение $U_{\text{н}}$, если $U_{\text{вх}} = 5 \text{ В}$, $R_{\text{н}} = 5 \text{ кОм}$ и $R = 10 \text{ кОм}$.

Ответ: $U_{\text{н}} = 2,5 \text{ В}$.

6.21. На вход ОУ типа 140УД6, включенного по схеме повторителя, подается синусоидальный входной сигнал переменной частоты с амплитудой 10 В. Определить предельную частоту входного сигнала, при которой будут отсутствовать искажения выходного напряжения.

Решение

Предельная частота, при которой обеспечивается неискаженное усиление большого сигнала, определяется скоростью нарастания выходного напряжения ОУ $V_{U_{\text{вых}}}$ и связана с амплитудой $U_{\text{твых}}$ следующим соотношением:

$$f_{\text{max}} = \frac{V_{U_{\text{вых}}}}{6,28U_{\text{твых}}}$$

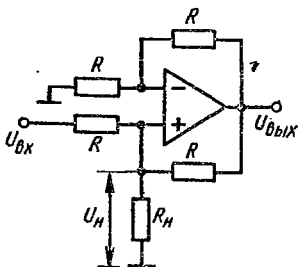


Рис. 6.17

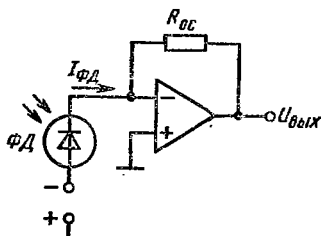


Рис. 6.18

Для ОУ типа 140УД6 $V_{U_{\text{вых}}} = 2$ В/мкс и максимальная частота

$$f_{\text{max}} = \frac{2}{6,28 \cdot 10} = 0,0314 \text{ МГц.}$$

6.22. ОУ с внутренней коррекцией (см. рис. 6.7) имеет частоту единичного усиления $f_T = 10^6$ Гц и коэффициент усиления на низких частотах $K_{U_{\text{ОУ}}} = 5 \cdot 10^4$. Определить полосу пропускания Δf усилителя, использующего данный ОУ, если его коэффициент усиления $K_U = 10$.

Ответ: $\Delta f = 10^5$ Гц.

6.23. Между входами ОУ (рис. 6.18) включен фотодиод ФД, ток которого при данной освещенности составляет 5 мА. Какой резистор следует включить в цепь обратной связи, чтобы получить на выходе напряжение $U_{\text{вых}} = 5$ В?

Ответ: $R_{\text{ос}} = 1$ кОм.

ГЛАВА 7

ИЗБИРАТЕЛЬНЫЕ УСИЛИТЕЛИ И АКТИВНЫЕ ФИЛЬТРЫ

§ 7.1. РЕЗОНАНСНЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Избирательные усилители с нагрузкой в виде резонансного LC-контура используют в диапазоне радиочастот для выделения узкополосного сигнала из сложного по спектральному составу входного колебания. На рис. 7.1 изображена схема усилителя с последовательным включением контура. Эквивалентная схема усилителя по переменному току приведена на рис. 7.2, а его амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) — на рис. 7.3. Подобный вид АЧХ определяется частотно-избирательными свойствами параллельного резонансного контура, который характеризуется следующими параметрами: 1) частотой резонанса $\omega_0 = 1/\sqrt{LC_{\text{кон}}}$; 2) волновым (характеристическим) сопротивлением $\rho = \sqrt{L/C_{\text{кон}}}$; 3) добротностью $Q = \rho/R$, где R — активное сопротивление потерь в контуре; 4) полосой пропускания $2\Delta f$, измеряемой на уровне 0,707 от резонансного значения напряжения U_m (рис. 7.3).

Полоса пропускания связана с добротностью контура соотношением $Q = f_0/(2\Delta f)$. Добротность усилителя $Q_{\text{эkv}}$ меньше добротности контура Q , что связано с шунтирующим действием нагрузки и выходного сопротивления усилителя. Вводят