

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} |_{\Delta I_{\text{ВХ.СДВ.}}} = \Delta I_{\text{ВХ.СДВ.}} \cdot R_{\text{ОС}} = \pm 15 \text{ нА} \cdot 1 \text{ МОм} = \pm 15 \text{ мВ}.$$

Следовательно, искомая величина ошибки выходного напряжения равна:

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = \Delta U_{\text{ВЫХ}} |_{\Delta U_{\text{ВХ.СДВ}}} + \Delta U_{\text{ВЫХ}} |_{\Delta I_{\text{ВХ.СДВ.}}} = 150 + 15 = \pm 165 \text{ мВ}.$$

3.5. Частотная характеристика ОУ

Этот параметр характеризует ОУ как усилитель переменного тока. При этом необходимо различать, какой величины переменные напряжения будут на выходе – малой (с амплитудой ниже 0,5...1,0 В) или большой (с амплитудой свыше 1,0 В). Если на выходе присутствуют только малые сигналы переменного напряжения, то наиболее важными параметрами ОУ являются частотная характеристика и шумы. Если на выходе должны быть сигналы переменного напряжения большой амплитуды, первостепенную важность приобретает такой параметр ОУ, как максимальная скорость нарастания. Подробнее такие параметры, как скорость нарастания и шум рассматриваются в разделах 3.6 и 3.7.

Внутренняя частотная характеристика. Многие ОУ общего и специального назначения имеют внутреннюю (встроенную) коррекцию частотной характеристики, для реализации которой в структуре усилителя организуется местная частотозависимая обратная связь через конденсатор (емкостью около 30 пФ). Благодаря введению корректирующей цепи снижается усиление ОУ на высоких частотах и предотвращается паразитная генерация колебаний в схеме (с ростом частоты увеличивается фазовый сдвиг сигнала в операционном усилителе и на достаточно высокой частоте общий петлевой сдвиг фазы достигает 360°).

Амплитудно-частотная характеристика ОУ. На рис. 3.14 представлена АЧХ, типичная для ОУ с внутренней коррекцией, таких как $\mu\text{A}741$, $\mu\text{A}747$.

На низких частотах (менее 1 Гц) $K \approx 200000$ ед (106 дБ). Именно эта величина дается в справочниках или листках-спецификациях на ОУ. С ростом частоты K уменьшается. Так уже при $f=5$ Гц наблюдается падение усиления на 3 дБ (точка А). Частота 5 Гц называется *частотой среза*, или *сопрягающей частотой*. Можно заметить, что между точками С и D характеристика усиления уменьшается в 10 раз при десятикратном увеличении частоты, то есть общий спад АЧХ составляет 20 дБ на декаду (–20 дБ/дек) или –6 дБ на октаву.

Полоса единичного усиления. Точка В на рис. 3.14 обозначает полосу единичного усиления ОУ на малом сигнале (коэффициент усиления по напряжению ОУ без обратной связи равен 1).

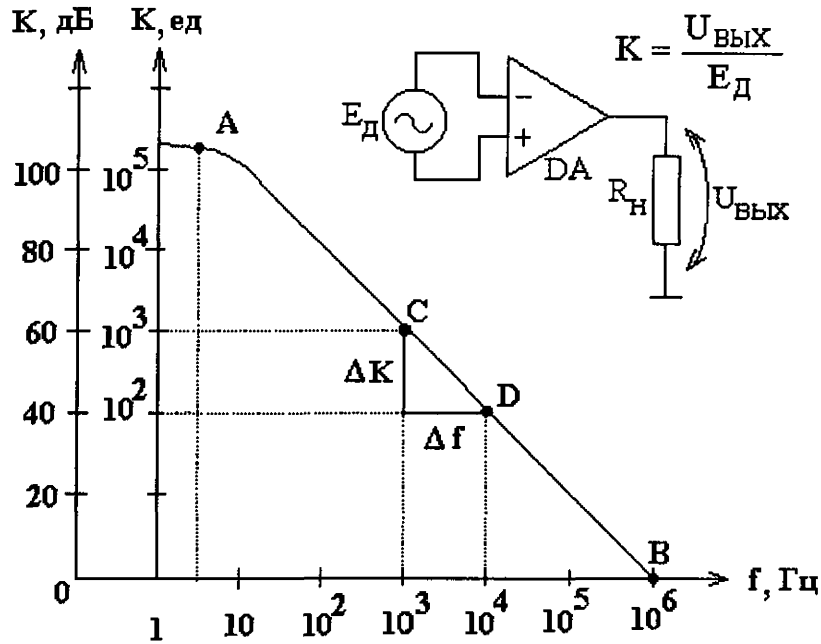


Рис. 3.14. АЧХ ОУ без обратной связи

Иногда вместо АЧХ и полосы единичного усиления в спецификациях на ОУ указывается время нарастания переходного процесса (при единичном усилении) t_H .

Полоса единичного усиления в этом случае определяется следующим образом: $B=0.35/t_H$. Например, для $\mu A741$ $t_H=0,35$ мкс и $B = \frac{0,35}{0,35 \cdot 10^{-6}} = 1$ МГц.

Зная B , можно рассчитать коэффициент усиления по напряжению разомкнутого ОУ на любой частоте: $K_f = B/f_c$, где f_c – частота входного сигнала. Например, для ОУ, имеющего полосу единичного усиления 1,5 МГц для частоты сигнала $f_c=1$ кГц, $K_f = \frac{1,5 \text{ МГц}}{1 \text{ кГц}} = 1500$.

Время нарастания. Если подать на вход ОУ, включенного по схеме повторителя напряжения, прямоугольный импульс напряжения, выходное напряжение устанавливается не мгновенно, рис. 3.15.

Это связано с задержкой распространения сигнала через все транзисторы ОУ. Время нарастания t_H определяется как время, необходимое для нарастания выходного напряжения с 10 до 90% от своего конечного значения. Для $\mu A741$ ($t_H=0,35$ мкс), включенного по схеме повторителя напряжения, $U_{вых}$ изменяется с 2 до 18 мВ за 0,35 мкс при $E_{вх}=20$ мВ.

Влияние коэффициента усиления без ОС на величину усиления с ОС. При включении ОУ с ОС, как это имеет место, например, в неинвертирующем усилителе (рис. 2.18), следует различать два коэффициента усиления:

коэффициент усиления разомкнутого ОУ (без ОС) $K = U_{\text{ВЫХ}}/E_{\text{Д}}$;

коэффициент усиления ОУ с ОС $K_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{E_{\text{ВХ}}} = 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R}$.

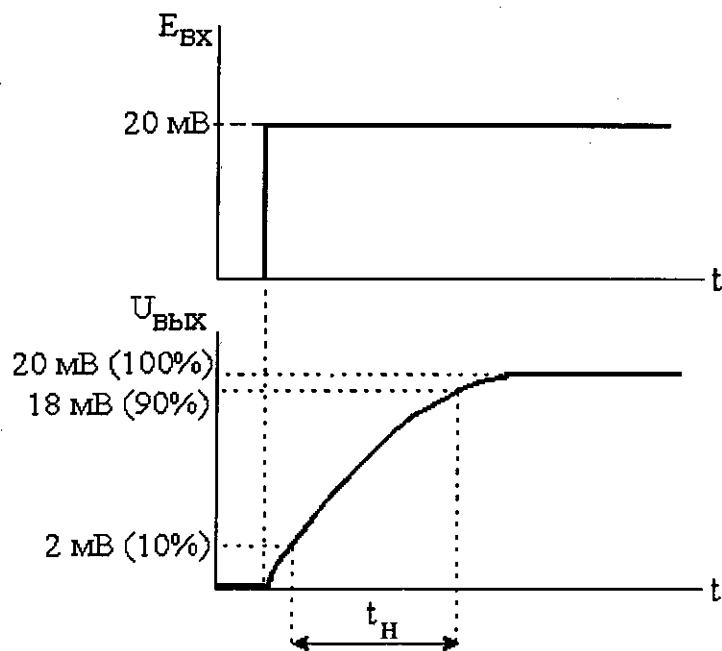


Рис. 3.15. Нарастание выходного напряжения в повторителе напряжения

Если в схеме (рис. 2.18), $R_{\text{ОС}}=1 \text{ МОм}$, $R=10 \text{ кОм}$ ($K_{\text{ОС}}=101$) $E_{\text{ВХ}}=1 \text{ мВ}$, выходное напряжение должно быть равным 101 мВ. Такой вывод основан на предположении, что разность напряжений между входами ОУ $E_{\text{Д}}$ приблизительно равно нулю. Однако, если K имеет не очень большую величину, $E_{\text{Д}}$ будет значимо отличаться от нуля. В случае, если величина $E_{\text{Д}}$ составляет более 1 % от величины $E_{\text{ВХ}}$, напряжение $U_{\text{ВЫХ}}$ будет определяться не только значением выражения $(1+R_{\text{ОС}}/R)$, но также и величиной K , табл. 3.2.

Таблица 3.2

Влияние коэффициента усиления разомкнутого ОУ на коэффициент усиления ОУ с ОС

K	$E_{\text{Д}}$, В	$K_{\text{ОС}}$		Ошибка, %
		фактический	идеальный	
10000	0,0099	99,9	101	1
1000	0,091	91,8	101	10

Как следует из таблицы 3.2, при значениях отношения $K/K_{\text{ОС}}$, равным единицам или десяткам, реальный коэффициент усиления схемы будет отличаться от расчетного приблизительно на 10%. Если отношение $K/K_{\text{ОС}}$

равно сотням единиц, отклонение реального коэффициента усиления от расчетного $\approx 1\%$.

Диапазон частот для прецизионной схемы с ОУ. Отклонение расчетного значения коэффициента усиления от реального (ошибка) в 1% считается в большинстве случаев приемлемым для прецизионных применений. Определить диапазон частот, в котором погрешность K_{OC} не превышает 1% , можно графически (рис. 3.16) следующим образом:

1. На АЧХ ОУ определяют частоту единичного усиления (точка В, линия 1).
2. Умножают значение полосы пропускания В на 0,01, то есть на 1% и отмечают на оси частот точку $f_1 = B/100$.
3. Из точки f_1 проводят линию, параллельную АЧХ ОУ без ОС (линия 2).
4. На оси ординат отмечают идеальное значение коэффициента усиления K_{OC} и проводят из этой точки прямую до пересечения с линией 2.
5. Определяют прецизионный диапазон частот (максимальную частоту при погрешности в 1%).

Для случая, представленного на рис. 3.16, прецизионный диапазон частот усилителя с $K_{OC} = 100$ составляет 100 Гц.

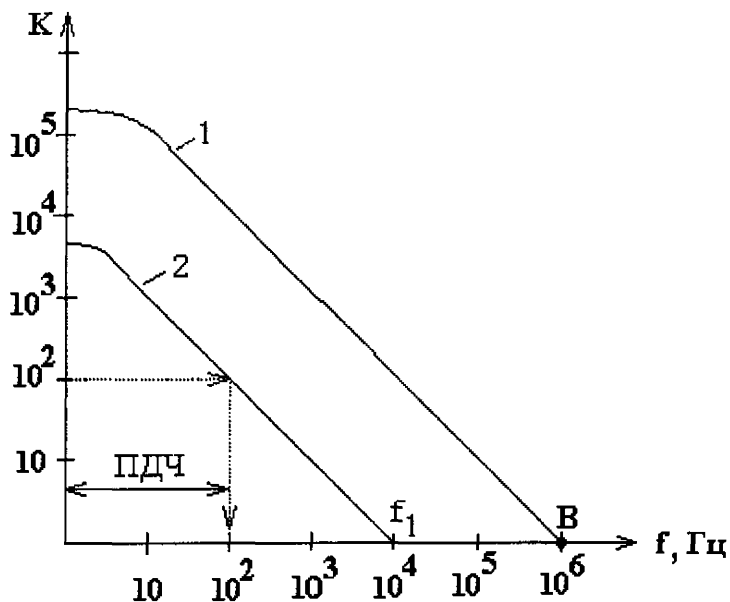


Рис. 3.16. Определение прецизионного диапазона частот (ПДЧ) схемы с ОУ

Аналогичным образом можно определить диапазон частот для усиления с другой точностью, например, в 10% .

Полоса пропускания на малом сигнале. Диапазон рабочих частот усилителя определяется предельными значениями частот нижней f_n и верхней f_v , на которых коэффициент усиления по напряжению уменьшается на 3 дБ по сравнению с его значением на средних частотах, рис. 3.17.

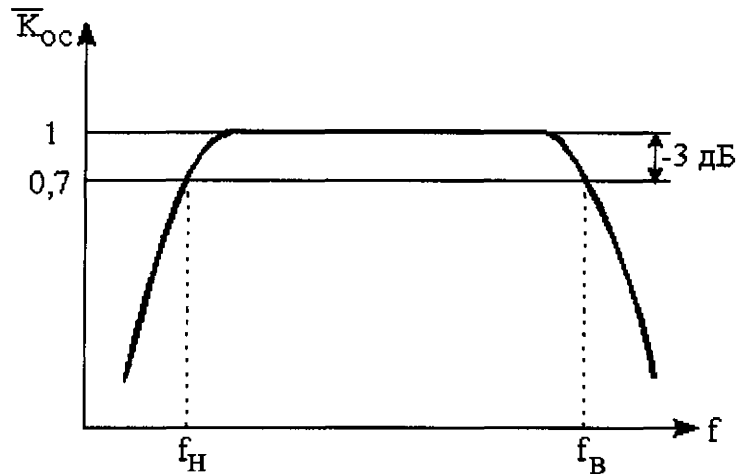


Рис. 3.17. Нормированная АЧХ усилителя

У ОУ, являющихся усилителями постоянного тока, $f_H=0$ и полоса пропускания (ПП) на малом сигнале приблизительно равна f_B . Для рассмотренного выше $\mu A741$ ПП равна приблизительно 5 Гц.

Полоса пропускания на малом сигнале усилителя, охваченного обратной связью, определяется как полосой единичного усиления B , так и коэффициентом усиления с ОС K_{oc} .

Определить полосу пропускания можно также графически, рис. 3.18.

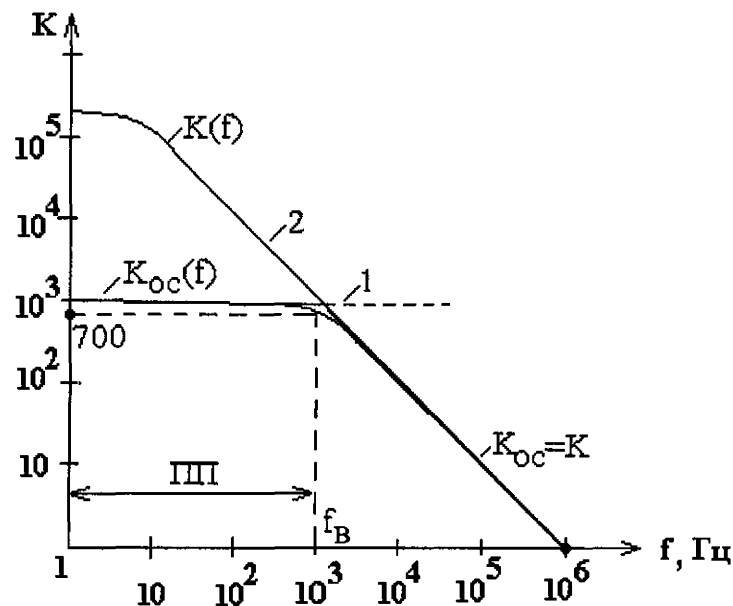


Рис. 3.18. Графическое определение полосы пропускания на малом сигнале

Предположим, что требуемый коэффициент усиления инвертирующего усилителя (рис. 3.19) равен 1000.

Для графического определения малосигнальной полосы пропускания необходимо (рис. 3.18):

1. На оси ординат (K) отложить требуемое значение коэффициента усиления по напряжению с обратной связью $K_{oc} = 1000$.
2. Провести из этой точки прямую 1 (идеальную зависимость $K_{oc}(f) = R_{oc}/R_{вх}$) до пересечения с АЧХ разомкнутого операционного усилителя 2.
3. Частота ($f = 1000$ Гц), соответствующая точке пересечения линий 1 и 2, является малосигнальной полосой пропускания ОУ с заданным $K_{oc} = 1000$.

Из графика (рис. 3.18) видно, что коэффициент усиления с обратной связью на частоте f_B равен $K_{oc} = 0.707 \cdot 1000 \approx 700$. На частотах, превышающих f_B , K_{oc} определяется только характеристикой ОУ, а не значениями сопротивлений R_{oc} и $R_{вх}$.

Коэффициент усиления на малом сигнале и ПП связаны между собой обратно пропорциональной зависимостью. При увеличении K_{oc} , например, в 10 раз, полоса пропускания уменьшается во столько же раз.

Можно заметить, что произведение коэффициента усиления с ОС на ПП на малом сигнале всегда равно полосе единичного усиления B . Поэтому полосу единичного усиления называют также *произведением усиления на полосу пропускания*, и она служит показателем качества ОУ.

3.6. Скорость нарастания выходного напряжения

Скорость нарастания (СН) выходного напряжения зависит от многих факторов, и прежде всего от:

1. Коэффициента усиления усилителя.
2. Наличия и величины ёмкости корректирующего конденсатора.
3. Направления изменения выходного напряжения.

При единичном усилении скорость изменения выходного напряжения минимальна. Поэтому скорость нарастания указывается в спецификации на ОУ для $K_{oc} = 1$.

Внутри ОУ или вне его всегда есть, по крайней мере, один конденсатор для предотвращения автоколебаний на высоких частотах, рис. 3.20. Величина тока I , протекающего через

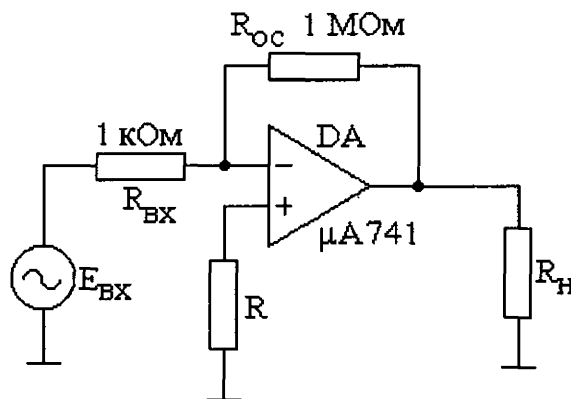


Рис. 3.19. Инвертирующий усилитель

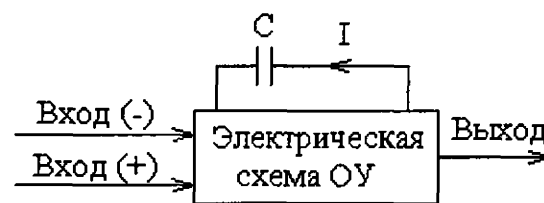


Рис. 3.20. Коррекция АЧХ ОУ