

6. ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ (ОУ) И ФУНКЦИОНАЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА НА ИХ ОСНОВЕ

6.1. Операционный усилитель (ОУ) и его свойства

Интегральные операционные усилители и их применение

Термин «операционный усилитель» (ОУ) был впервые использован в теории автоматического регулирования для обозначения специализированного класса усилителей, используемых в устройствах, которые выполняют аналоговые операции: масштабирование, интегрирование, дифференцирование, суммирование и др. В интегральном исполнении, как правило, ОУ представляет собой усилитель постоянного тока.

Интегральный ОУ, охваченный обратной связью, используется при реализации различных функциональных устройств: масштабных усилителей, суммирующих и вычитающих устройств, интеграторов, дифференциаторов, частотно-избирательных устройств, логарифмических усилителей, амплитудных регуляторов, демодуляторов, генераторов и многих др.

подавляющее большинство промышленных типов ОУ относится к классу источников напряжения, управляемых напряжением (ИНУН), у которых величина входного сопротивления велика, а выходного сопротивления весьма мала. Такие ОУ называют также усилителями напряжения. Их упрощенное условное обозначение приведено на рис. 6.1.

На этом рисунке обозначено:

$U_{дс}$ – напряжение дифференциального сигнала, которое подается между инвертирующим (верхним) и неинвертирующим (нижним) входами;

$U_{сс}$ – напряжение синфазного сигнала.

Дифференциальный сигнал обычно представляется в виде двух сигналов, приложенных соответственно к инвертирующему и неинвертирующему входам ОУ относительно общей шины. При этом их амплитуды одинаковы и равны $U_{дс}/2$, а фазы противоположны по знаку.

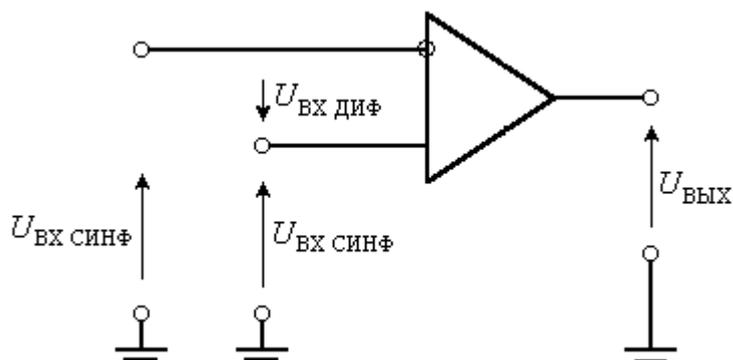


Рис. 6.1. Упрощенное условное обозначение интегрального ОУ напряжения

Введем понятие идеального ОУ напряжения. Он должен обладать следующими характеристиками:

- коэффициент усиления дифференциального сигнала на постоянном токе

$$A_0 = A_{\text{ДС}} = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ДС}} \rightarrow \infty;$$

- входное сопротивление для дифференциального сигнала $R_{\text{ВХ.ДС}} \rightarrow \infty$;

- выходное сопротивление $R_{\text{ВЫХ}} = 0$;

- нижняя граничная частота $f_{\text{Н}} = 0$;

- верхняя граничная частота $f_{\text{В}} \rightarrow \infty$;

- коэффициент подавления синфазных сигналов

$$N_{\text{СС}} = A_{\text{ДС}} / A_{\text{СС}} \rightarrow \infty;$$

- постоянный потенциал $E_{\text{ВЫХ}}$ на выходе ОУ равен нулю при входном потенциале $E_{\text{ВХ}} = 0$ (отсутствуют статические погрешности).

Назовем реально достигнутые, наилучшие значения перечисленных выше характеристик для современных ОУ напряжения: $A_0 \leq 5 \cdot 10^6$; $R_{\text{ВХ.ДС}} \leq 10^7$ Ом (при использовании на входе полевых транзисторов); $R_{\text{ВЫХ}}$ – десятки Ом; частота единичного усиления f_{T} , на которой $A(f_{\text{T}}) = 1$, $f_{\text{T}} \leq 100$ МГц; коэффициент $N_{\text{СС}} \leq 120$ дБ.

Характеристики реальных ОУ

В этом разделе будут исследованы следующие характеристики:

- амплитудные,
- частотные, в том числе скоростные.

Классическая структурная схема ОУ типа ИНУН состоит из трех каскадов, как показано на рис. 6.2. Здесь введены следующие обозначения:

- 1 – входной ДК с симметричным входом и выходом;
- 2 – согласующий ДК с несимметричным выходом;
- 3 – выходной каскад, который представляет собой комбинацию схемы сдвига (транслятора) уровня 3' и выходного эмиттерного повторителя (ЭП) 3''.

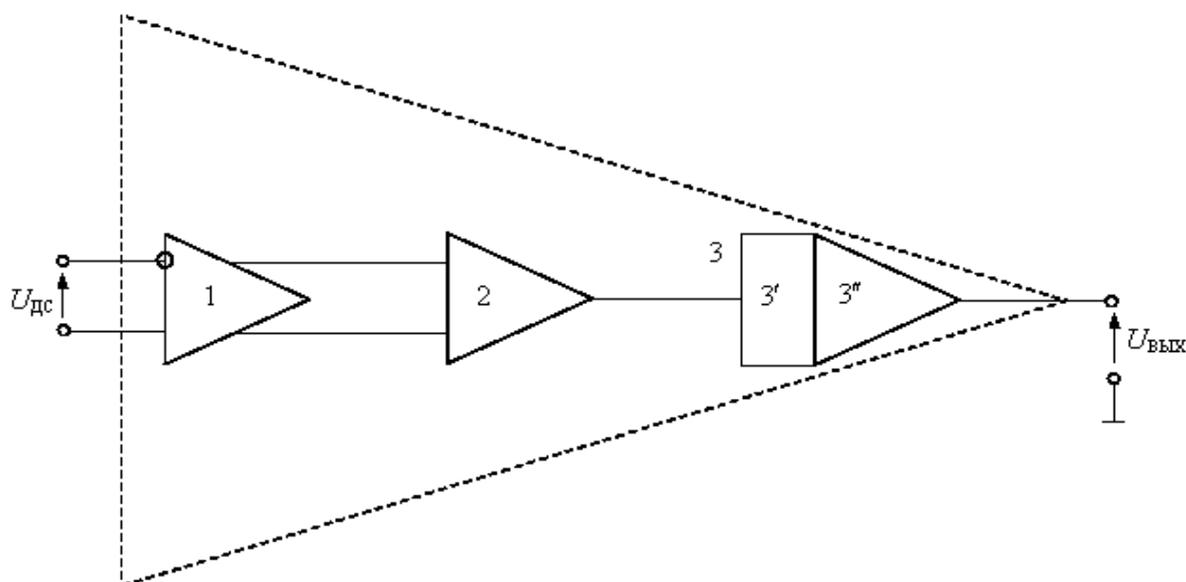


Рис. 6.2. Классическая трехкаскадная структурная схема ОУ напряжения

Сформулируем основные требования, предъявляемые к этим каскадам. К *входному* ДК: обеспечить достаточное усиление входного дифференциального сигнала $U_{дс}$, малый уровень собственных шумов, высокое значение входного сопротивления, малый дрейф по постоянному току, высокий коэффициент подавления синфазных сигналов $N_{сс}$. К *согласующему* ДК: обеспечить основной коэффициент усиления и переход от симметричного выхода входного ДК к несимметричному выходу 2-го ДК. К *выходному* каскаду: ЭП должен обеспечить малое выходное сопротивление и достаточное усиление мощности, а схема сдвига

уровня – нулевой потенциал на выходе ОУ ($E_{\text{ВЫХ}} = 0$) при отсутствии входного сигнала ($E_{\text{ВХ}} = 0$).

Трехкаскадная структура ОУ имеет трехполюсную передаточную функцию:

$$A(p) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(p)}{U_{\text{ДС}}(p)} = \frac{A_0}{(1 + p\tau_1) \cdot (1 + p\tau_2) \cdot (1 + p\tau_3)} = \frac{A_0 \cdot \omega_1 \cdot \omega_2 \cdot \omega_3}{(p + \omega_1) \cdot (p + \omega_2) \cdot (p + \omega_3)}, \quad (6.1)$$

где ω_1 , ω_2 и ω_3 – значения частот первого, второго и третьего полюсов соответственно.

Логарифмические амплитудно- и фазочастотная характеристики (ЛАЧХ и ЛФЧХ), приведены на рис. 6.3, где по оси абсцисс значения частот откладываются в логарифмическом масштабе. Начало координат по оси ординат при изображении ЛАЧХ соответствует единичному коэффициенту передачи, т.е. 0 дБ, а при изображении ЛФЧХ – нулевому значению фазового набега. Начало координат по оси абсцисс при изображении как ЛАЧХ, так и ЛФЧХ соответствует некоторой минимальной частоте $\omega_{\text{МИН}}$, величина которой является началом первой декады; при этом значение $\lg(\omega/\omega_{\text{МИН}})$ на частоте $\omega = \omega_{\text{МИН}}$ равно нулю.

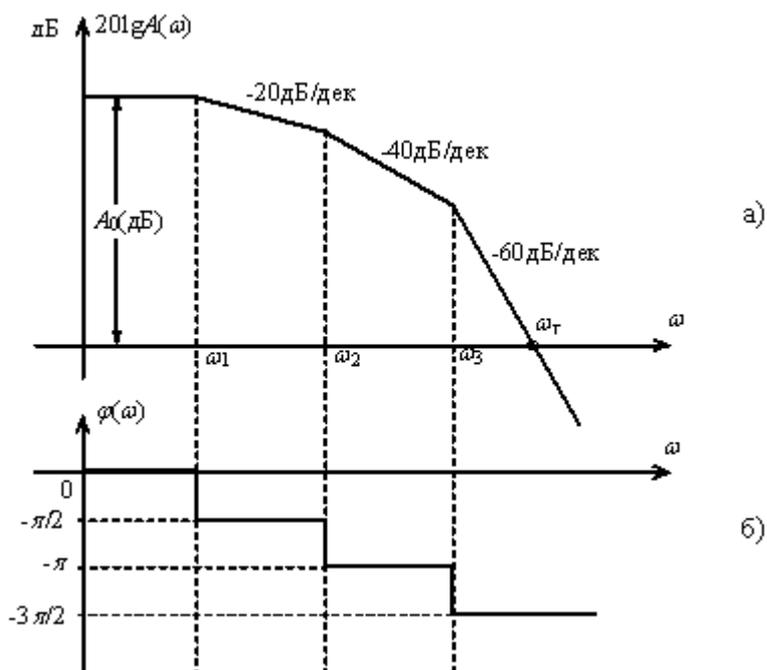


Рис. 6.3. Логарифмические ЧХ для ОУ напряжения с трехполюсной передаточной функцией: а) ЛАЧХ, б) ЛФЧХ

Типичные представители ОУ напряжения с трехполосной передаточной функцией: 140УД1 (зарубежный аналог $\mu A702$) и 153УД1 (зарубежный аналог $\mu A709$).

ОУ с трехполосной передаточной функцией могут переходить в режим возбуждения. Чтобы этого не случилось, проводят частотную коррекцию в схеме ОУ, так, чтобы в диапазоне частот от нуля до частоты единичного усиления f_T наклон ЛАЧХ не превышал 20 дБ/дек, а фаза не превышала 90° . При выполнении такой коррекции можно считать, что в диапазоне частот от нуля до частоты единичного усиления f_T ОУ имеет однополосную передаточную функцию.

Однополосная передаточная функция:

$$A(p) = \frac{A_0 \omega_1}{p + \omega_1}. \quad (6.2)$$

Такой передаточной функции соответствуют ЛАЧХ и ЛФЧХ, которые изображены на рис. 6.4.

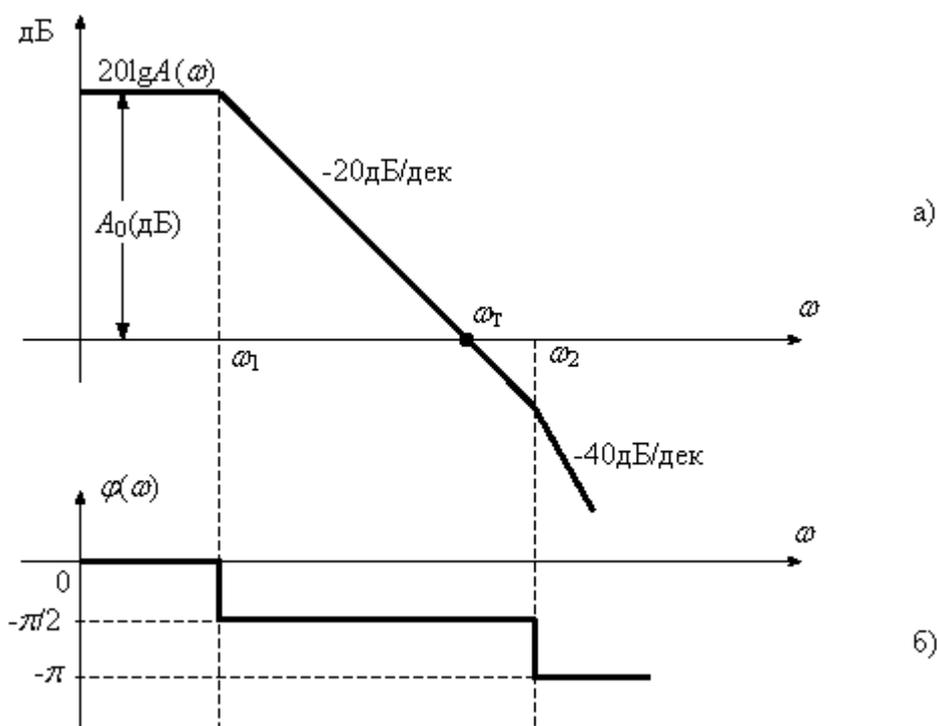


Рис. 6.4. Логарифмические ЧХ для ОУ напряжения с однополосной передаточной функцией: а) ЛАЧХ, б) ЛФЧХ

Типичный представитель ОУ напряжения с однополосной передаточной функцией – 140УД7 (зарубежный аналог $\mu A741$).

Следует отметить, что последний тип называют ОУ с внутренней (или встроенной) коррекцией, при этом в качестве элемента такой коррекции используется полупроводниковый конденсатор на основе обратно-смещенного $p-n$ перехода, обладающего емкостью примерно 30 пФ и размещенного непосредственно в кристалле ИМС.

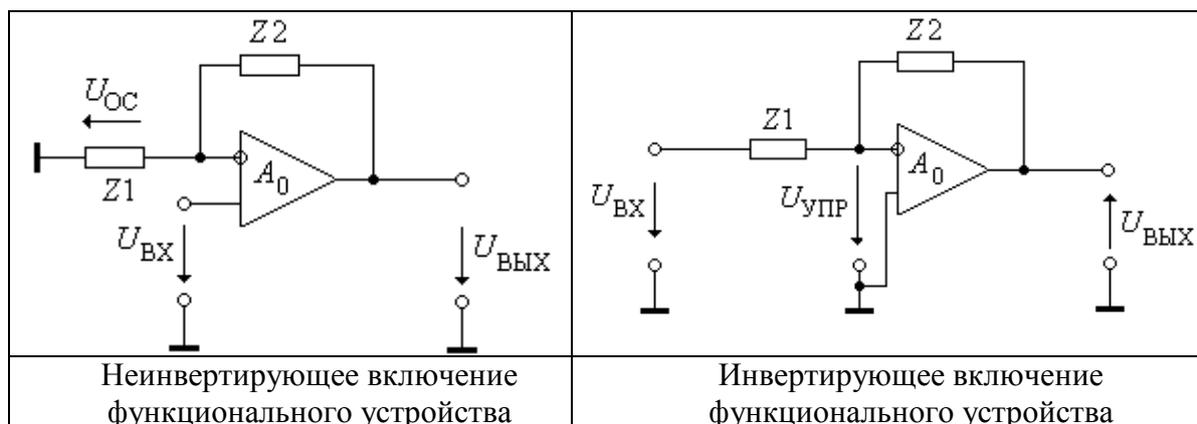
Как правило, используют ОУ с однополюсной передаточной функцией. В дальнейшем изложении будут рассматриваться именно такие ОУ.

6.2. Функциональные устройства на базе ОУ

Выражения для передаточной функции функционального устройства

Рассмотрим достаточно общий вид функционального устройства, содержащего два внешних частотно-зависимых элемента $Z1$ и $Z2$. Различают неинвертирующее и инвертирующее включения функционального устройства, как это показано в табл. 6.1.

Таблица 6.1.



Стандартный подход при выводе выражений заключается в следующем. Вначале выводят выражения, полагая ОУ идеальным. Затем учитывают свойства реального ОУ и определяют, к каким изменениям параметров функционального устройства, например, к изменениям АЧХ, приводит неидеальность реального ОУ. Функциональные устройства, как это следует из табл. 6.1, охвачены отрицательной обратной связью (ООС). Обозначим комплексный коэффициент передачи ОУ – $A(j\omega)$, комплексный коэффициент передачи цепи обратной связи – $\beta(j\omega)$.

Сигнал подается на неинвертирующий вход

Для этого случая коэффициент передачи функционального устройства запишется в виде:

$$K^*(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = \frac{A(j\omega)}{1 + A(j\omega)\beta(j\omega)}. \quad (6.3)$$

Если ОУ – идеальный, то коэффициент передачи ОУ не зависит от частоты и стремится к бесконечности: $A(j\omega) = A_0 \rightarrow \infty$. В этом случае вместо (6.3) можно записать:

$$K^*(j\omega) = 1/\beta(j\omega). \quad (6.4)$$

Коэффициент передачи цепи обратной связи определяется выражением:

$$\beta(j\omega) = \frac{U_{\text{ОС}}(j\omega)}{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)} = \frac{Z_1}{Z_1 + Z_2}. \quad (6.5)$$

Подставляя (6.5) в (6.4), получим следующее выражение для коэффициента передачи функционального устройства при подаче сигнала на неинвертирующий вход:

$$K^*_{\text{НЕ ИНВ.}}(j\omega) = 1 + \frac{Z_2}{Z_1}. \quad (6.6)$$

Сигнал подается на инвертирующий вход

Выходное напряжение связано с управляющим напряжением, действующим на инвертирующем входе, выражением:

$$U_{\text{ВЫХ}}(j\omega) = -U_{\text{УПР}}(j\omega) \frac{A(j\omega)}{1 + \beta(j\omega)A(j\omega)} \Bigg|_{A \rightarrow \infty} = \frac{-U_{\text{УПР}}(j\omega)}{\beta(j\omega)} = -U_{\text{УПР}}(j\omega) \frac{Z_1 + Z_2}{Z_1}. \quad (6.7)$$

Для идеального ОУ входное сопротивление стремится к бесконечности, а выходное – к нулю. Это приводит к тому, что связь управляющего напряжения с входным определяется формулой:

$$U_{\text{УПР}}(j\omega) = U_{\text{ВХ}} \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}. \quad (6.8)$$

Подставляя (6.8) в (6.7), запишем коэффициент передачи функционального устройства при подаче сигнала на инвертирующий вход в виде:

$$K^*_{\text{ИНВ}}(j\omega) = \frac{U_{\text{ВЫХ}}(j\omega)}{U_{\text{ВХ}}(j\omega)} = -\frac{Z_2}{Z_1}. \quad (6.9)$$

С использованием выражений (6.6) и (6.9) далее рассматриваются конкретные реализации функциональных устройств на базе идеального ОУ, а затем проводится оценка влияния параметров реального ОУ на характеристики этих устройств.

6.3. Влияние неидеальности параметров реальных ОУ на характеристики функциональных устройств

Масштабный усилитель

В масштабном усилителе устанавливают: $Z_1 = R_1$, $Z_2 = R_2$.

1. Неинвертирующий масштабный усилитель.

При использовании идеального ОУ коэффициент передачи масштабного усилителя, обозначим его K_M , не зависит от частоты и выражается в виде:

$$K_{\text{М.НЕ ИНВ.}} = 1 + R_2/R_1. \quad (6.10)$$

Фаза комплексного коэффициента передачи равна нулю для всех частот. Входное сопротивление масштабного неинвертирующего усилителя равно входному сопротивлению ОУ, следовательно, при использовании идеального ОУ оно стремится к бесконечности. Выходное сопротивление масштабного усилителя при использовании идеального ОУ равно нулю.

2. Инвертирующий масштабный усилитель.

При использовании идеального ОУ коэффициент передачи запишется в виде:

$$K_{\text{М.ИНВ}} = -(R_2/R_1). \quad (6.11)$$

При использовании идеального ОУ K_M от частоты не зависит, фаза комплексного коэффициента передачи равна 180° для всех частот, так как при прохождении масштабного усилителя сигнал инвертируется.

Входное сопротивление инвертирующего масштабного усилителя приближенно равно сопротивлению R_1 . Выходное сопротивление при использовании идеального ОУ равно нулю.

Влияние частотных свойств реального ОУ на АЧХ и ФЧХ масштабного усилителя

Будем полагать, что передаточная функция ОУ однополюсная, а, следовательно, его АЧХ имеет вид, приведенный на рис. 6.5. При построении АЧХ по обеим осям использован логарифмический масштаб.

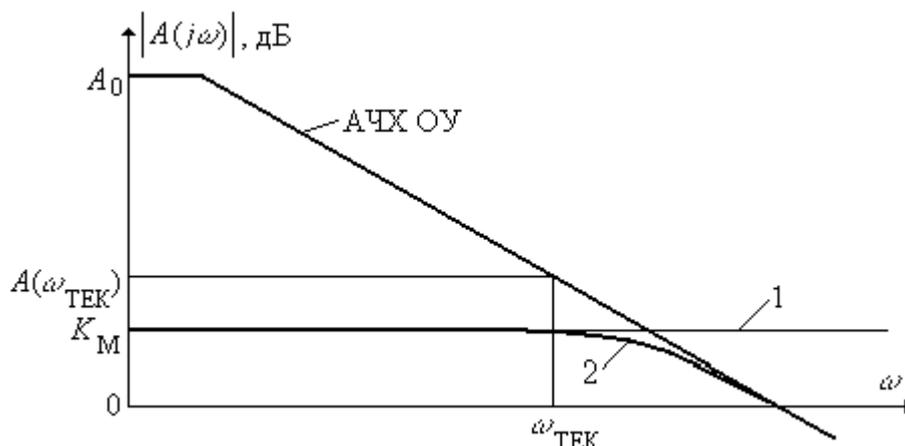


Рис. 6.5. Амплитудно-частотные характеристики реального ОУ и масштабного усилителя

При использовании идеального ОУ АЧХ масштабного усилителя имеет вид горизонтальной прямой с ординатой K_M . Эта АЧХ отмечена на рис. 6.5 цифрой 1. АЧХ реального масштабного усилителя, отмеченная цифрой 2, на низких частотах совпадает с АЧХ идеального масштабного усилителя, однако, при повышении частоты все больше и больше отклоняется от этой АЧХ и, в конце концов, сливается с АЧХ реального ОУ. Отклонение АЧХ реального масштабного усилителя от идеальной АЧХ вызвано уменьшением коэффициента усиления реального ОУ при повышении частоты. Значение этого отклонения отнесем к коэффициенту усиления идеального масштабного усилителя и назовем получившуюся величину погрешностью воспроизведения АЧХ:

$$\delta\%(f) = \left| \frac{K_{M.РЕАЛ.}(f) - K_{M.ИДЕАЛ.}(f)}{K_{M.ИДЕАЛ.}(f)} \right| \cdot 100\% . \quad (6.12)$$

где $K_{M.ИДЕАЛ.}$ — коэффициент передачи масштабного усилителя при использовании идеального ОУ, $K_{M.РЕАЛ.}$ — коэффициент передачи при использовании реального ОУ. $K_{M.ИДЕАЛ.} = 1/\beta$. Выражение для $K_{M.РЕАЛ.}$ можно получить из формулы (6.3)

(раздел 6.1), заменяя $\beta(j\omega)$ на β , так как в масштабном усилителе β является действительной величиной.

Подставляя в (6.12) выражения для $K_{M.ИДЕАЛ.}$ и $K_{M.РЕАЛ.}$, получим:

$$\delta\% = \left| \frac{\frac{A(j\omega)}{1+\beta A(j\omega)} - \frac{1}{\beta}}{1/\beta} \right| \cdot 100\% = \left| \frac{-1}{1+\beta A(j\omega)} \right| \cdot 100\% .$$

Допустимое значение погрешности воспроизведения существенно меньше единицы и обычно не превышает 20%. Для получения малых значений погрешности необходимо выполнение неравенства: $\beta A(j\omega) \gg 1$. При выполнении этого неравенства для погрешности воспроизведения можно записать:

$$\delta \approx \left| \frac{1}{\beta A(j\omega)} \right| = \left| \frac{1/\beta}{A(j\omega)} \right| = \left| \frac{K_{M.ИДЕАЛ.}}{A(j\omega)} \right| = \frac{K_{M.ИДЕАЛ.}}{A(\omega)}, \quad (6.13)$$

где $A(\omega)$ – значение АЧХ реального ОУ на частоте ω .

Пусть необходимо определить погрешность воспроизведения АЧХ масштабного усилителя на текущей частоте $\omega_{ТЕК.}$ В соответствии с рис. 6.5 определяем на этой частоте значение АЧХ операционного усилителя $A(\omega_{ТЕК.})$ и значение АЧХ масштабного усилителя K_M . Значение δ определится в виде:

$$\delta\% = [K_M/A(\omega_{ТЕК.})] \cdot 100\%$$

Выражение (6.13) можно использовать для определения погрешности воспроизведения АЧХ не только масштабного усилителя, но и других функциональных устройств на базе ОУ. При этом вместо значения K_M надо подставлять значения АЧХ устройства на частоте ω .

Влияние динамических (скоростных) свойств реального ОУ на качество выходного синусоидального напряжения

ОУ можно считать линейным устройством только в ограниченном диапазоне амплитуд. При выходе за пределы диапазона, где ОУ является линейным устройством, форма выходного напряжения начинает отличаться от формы входного напряжения. Одной из причин такого отклонения может быть

нелинейность амплитудной характеристики ОУ. Другой причиной может являться ограниченность выходного тока одного из каскадов ОУ, что вызывает ограничение скорости нарастания выходного напряжения. Скорость нарастания выходного напряжения является параметром ОУ. Обозначим этот параметр как ρ . Его размерность – В/мкс или, что то же самое, В · МГц. Нелинейные искажения, обусловленные конечной скоростью нарастания, отсутствуют, если скорость нарастания усиленного, т.е. *выходного* сигнала имеет значение не больше, чем ρ .

Выведем выражение для скорости нарастания выходного сигнала. Наиболее универсальным является синусоидальный сигнал:

$$u_{\text{ВЫХ}}(t) = U_{\text{ВЫХ}} \sin \omega t$$

Скорость его изменения максимальна при значениях фазы $\omega t = 2k\pi$, $k = 0, 1, \dots$ или при значениях времени $t = 0, T, 2T, \dots$. Выражение для максимальной скорости имеет вид:

$$\left(\frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} \right)_{\text{max}} = \omega U_{\text{ВЫХ}} \cos \omega t \Big|_{t=0} = \omega U_{\text{ВЫХ}} = 2\pi f U_{\text{ВЫХ}} \quad (6.14)$$

С использованием выражения (6.14) запишем выражение, по которому можно рассчитать значение максимальной амплитуды выходного напряжения $U_{\text{ВЫХ.МАКС}}$ усиливаемого синусоидального сигнала, частота которого равна f , если известно значение параметра ρ :

$$U_{\text{ВЫХ.МАКС}} = \frac{\rho}{2\pi f}. \quad (6.15)$$

На рис. 6.6 построена зависимость максимальной неискаженной амплитуды выходного напряжения ОУ от частоты усиливаемого синусоидального сигнала.

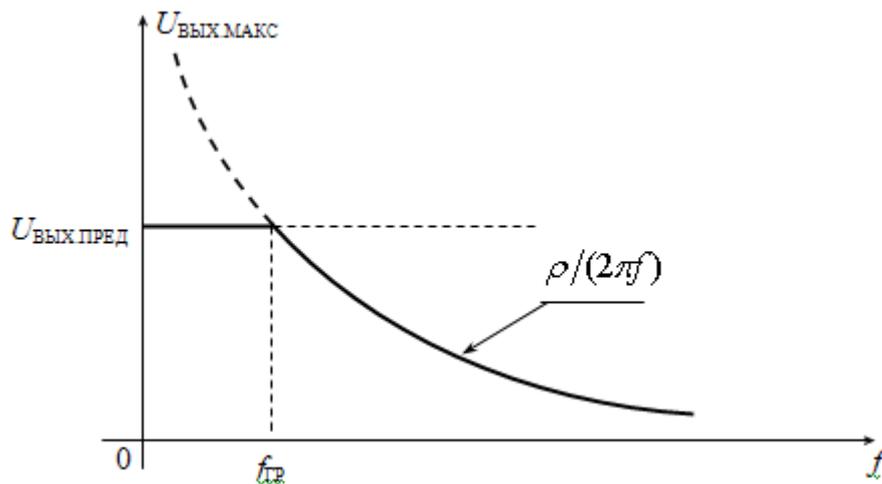


Рис. 6.6. Зависимость максимальной амплитуды неискаженного выходного напряжения ОУ от частоты входного гармонического колебания

Выходное напряжение не может быть больше предельного значения $U_{\text{ВЫХ.ПРЕД}}$, указанного в паспорте ОУ. Такое значение достигается при усилении постоянного напряжения и напряжения сравнительно низких частот. С повышением частоты входного сигнала начинает влиять конечная скорость нарастания выходного напряжения, которая определяется параметром ρ (паспортное значение), при этом максимальная амплитуда неискаженного выходного напряжения определяется выражением (6.15). Частота $f_{\text{ГР}}$ называется граничной частотой полосы пропускания полной мощности и составляет по величине в среднем несколько десятков килогерц.

Статическая макромодель ОУ.

Она содержит источники статических погрешностей (см. рис. 6.7) и используется для расчета дрейфа нуля $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ на выходе ОУ и функциональных устройств, выполненных на их основе.

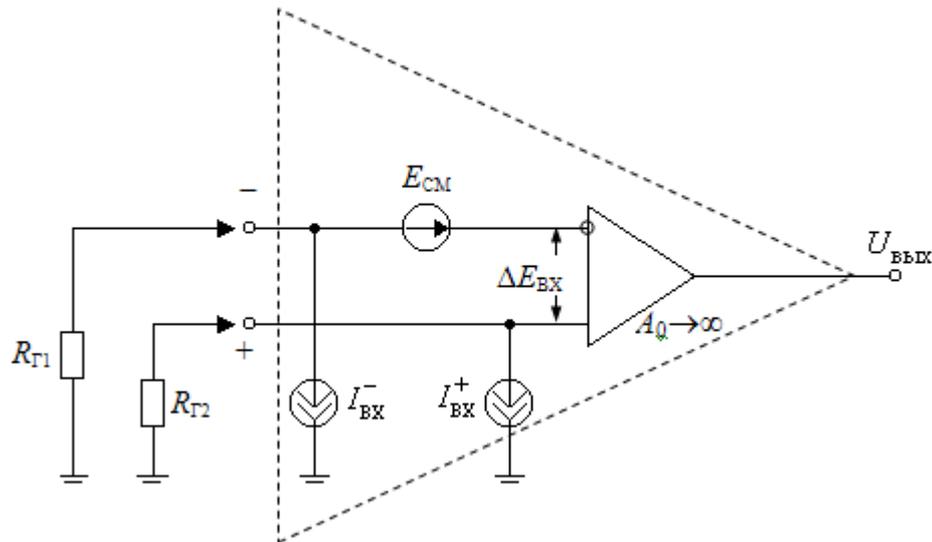


Рис. 6.7. Статическая макро модель ОУ напряжения

На этом рисунке обозначено: $R_{Г1}$ – сопротивление постоянному току между инвертирующим входом и общей шиной; $R_{Г2}$ – сопротивление постоянному току между неинвертирующим входом и общей шиной. Здесь ОУ предполагается идеальным устройством, $E_{СМ}$ – напряжение смещения нуля (приводится в справочных данных), $I_{ВХ}^{+}$ – входной ток по неинвертирующему входу, $I_{ВХ}^{-}$ – входной ток по инвертирующему входу. В справочных данных на ОУ приводятся средние значения входного тока смещения $I_{СМ} = (I_{ВХ}^{+} + I_{ВХ}^{-})/2$ и разностного входного тока $I_P = I_{ВХ}^{+} - I_{ВХ}^{-}$. Для расчета $\Delta U_{ВЫХ}$ с использованием значений $I_{СМ}$ и I_P находят $I_{ВХ}^{+}$ и $I_{ВХ}^{-}$ по выражениям:

$$\left. \begin{aligned} I_{ВХ}^{+} &= I_{СМ} + I_P / 2 \\ I_{ВХ}^{-} &= I_{СМ} - I_P / 2 \end{aligned} \right\} \quad (6.16)$$

Заметим, что напряжение смещения нуля $E_{СМ}$ соответствует смещению по оси абсцисс амплитудной характеристики реального ОУ, снятой на постоянном токе, по сравнению с амплитудной характеристикой для идеального устройства (см. рис. 6.8).

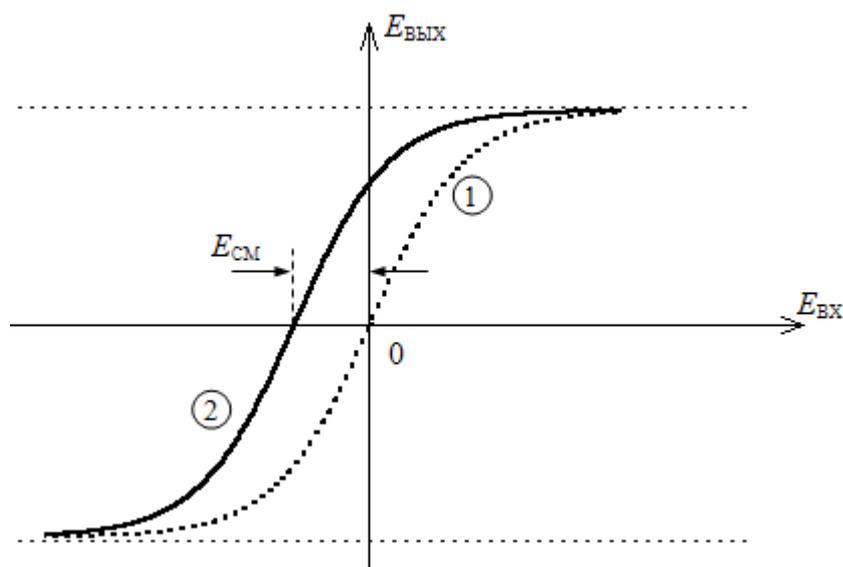


Рис. 6.8. Амплитудные характеристики ОУ на постоянном токе:

1 – идеальный ОУ напряжения; 2 – реальный ОУ напряжения

В процессе расчета $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ все источники статических погрешностей заменяют эквивалентным источником $\Delta E_{\text{ВХ}}$, приведенным ко входу

$$\begin{aligned} \Delta E_{\text{ВХ}} &= E_{\text{СМ}} + I_{\text{ВХ}}^+ \cdot R_{\Gamma 2} - I_{\text{ВХ}}^- \cdot R_{\Gamma 1} = \\ &= E_{\text{СМ}} + I_{\text{СМ}}(R_{\Gamma 2} - R_{\Gamma 1}) + I_{\text{P}}(R_{\Gamma 2} + R_{\Gamma 1})/2. \end{aligned} \quad (6.17)$$

Результирующая статическая погрешность $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ на выходе ОУ рассчитывается по соотношению

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = A_0 \cdot \Delta E_{\text{ВХ}} \quad (6.18)$$

где A_0 – коэффициент усиления ОУ на постоянном токе.

Если ОУ используется в составе функционального устройства, то вместо A_0 в (6.18) необходимо подставить величину коэффициента передачи K_0 данного функционального устройства на постоянном токе. В этом последнем случае

$$\Delta U_{\text{ВЫХ}} = K_0 \cdot \Delta E_{\text{ВХ}} \quad (6.19)$$

В заключение отметим, что при расчете максимального значения амплитуды неискаженного напряжения $E_{\text{ВЫХ. МАКС}}$ на выходе функционального устройства с использованием ОУ следует учитывать совместное действие обоих факторов, рассмотренных выше: конечную скорость нарастания выходного напряжения ОУ и его статические погрешности. При этом искомое значение $E_{\text{ВЫХ. МАКС}}$ рассчитывают по выражению:

$$E_{\text{ВЫХ МАКС}} = U_{\text{ВЫХ МАКС}} - \Delta U_{\text{ВЫХ}} \quad (6.20)$$

где $U_{\text{ВЫХ МАКС}}$ определяется в общем случае зависимостью на рис. 6.6, а $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ – соотношением (6.18) или (6.19).

Контрольные вопросы

1. Расскажите о разновидностях существующих интегральных ОУ.
2. Сформулируйте требования, предъявляемые к отдельным узлам, входящим в обобщенную структурную схему трехкаскадного ОУ напряжения.
3. Дайте характеристику ОУ с однополюсной передаточной характеристикой. Сравните такой ОУ с ОУ, передаточная характеристика которого трехполюсная.
4. Запишите общие выражения для передаточных характеристик функционального устройства при подаче сигнала на инвертирующий и неинвертирующий входы.
5. Представьте выражения для передаточных функций масштабного усилителя.
6. Объясните, к изменению каких характеристик масштабного усилителя приводит отклонение параметров реального ОУ от параметров идеального ОУ.
7. Какие параметры реального ОУ влияют на максимальный уровень выходного синусоидального сигнала, если требуется воспроизводить этот сигнал без искажений?
8. Как воспользоваться статической макромоделью интегрального ОУ для расчета погрешности по постоянному току на выходе функционального устройства?
9. Дайте определение граничной частоты полосы пропускания полной мощности.

◀ НАЗАД

ВПЕРЕД ▶