

Основные сведения

Свое название операционные усилители (ОУ) получили из-за того, что первоначально применялись для выполнения математических операций сложения, вычитания, умножения и деления. Первые ОУ, используемые в аналоговых вычислительных машинах на лампах, работали с напряжениями порядка ± 100 В.

Интегральные ОУ унаследовали название от своих предшественников. Они очень широко распространены в аналоговой схемотехнике. В настоящее время ОУ выполняются, как правило, в виде монолитных интегральных микросхем и по своим размерам и цене практически не отличаются от отдельно взятого транзистора. Благодаря практически идеальным характеристикам операционных усилителей реализация различных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на отдельных транзисторах.

Структурная схема. Операционный усилитель, выполненный в виде интегральной микросхемы имеет в своем составе (см. рис. 1): дифференциальный входной каскад (ДВК), промежуточные каскады усиления (ПКУ) и оконечный каскад (ОК).



Рис. 1. Структурная схема операционного усилителя

Дифференциальный каскад обеспечивает: большой коэффициент усиления по отношению к разности входных сигналов (дифференциальному сигналу), малый коэффициент усиления относительно синфазных помех, малый дрейф нуля и большое входное сопротивление. Промежуточные каскады позволяют: получить большое усиление напряжения сигнала, изменить на 180° или сохранить нулевым фазовый сдвиг усиливаемого сигнала. В качестве промежуточных каскадов используют дифференциальные или однополусные каскады. Оконечный каскад обеспечивает: малое выходное сопротивление и достаточную мощность сигнала для низкоомной нагрузки, большое входное сопротивление. Последнее необходимо для сохранения большого коэффициента усиления напряжения промежуточных каскадов. В качестве оконечного каскада обычно используют эмиттерный повторитель.

Обозначение ОУ на принципиальных схемах. Любой ОУ имеет не менее пяти выводов: два входных (инвертирующий и неинвертирующий), два вывода для подключения питания и один выходной вывод. Варианты обозначения операционных усилителей на принципиальных схемах представлены на рис. 2 (1 – инвертирующий вход, 2 – неинвертирующий вход, 3 – выход, 4 и 5 – выводы для подключения источника питания).

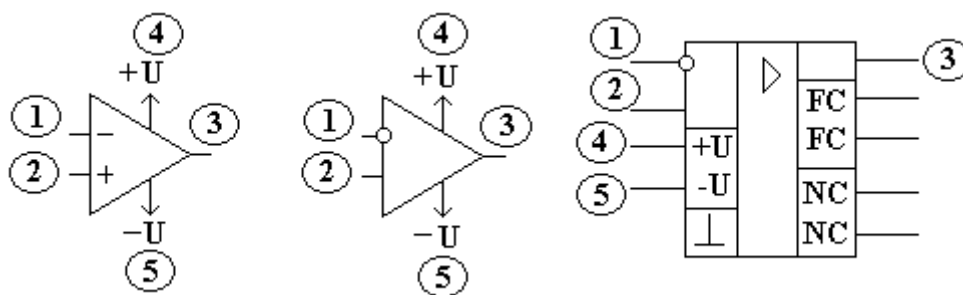


Рис. 2. Обозначение ОУ на принципиальных электрических схемах

Многие ОУ дополнительно имеют несколько выводов, не несущих функциональной нагрузки (вспомогательные), к которым подключаются цепи коррекции АЧХ (метки FC), цепи для подключения элементов балансировки по постоянному току (метки NC), а также вывод металлического корпуса (\perp) для соединения с общим проводом устройства, в которое входит ОУ.

Подключение ОУ к источнику питания. В общем случае для работы операционного усилителя требуется двухполярный (расщепленный) источник питания; типичные значения напряжений источника составляют ± 6 В; ± 12 В; ± 15 В (иногда ± 18 В). Схема подключения ОУ к двухполярному источнику питания и нагрузке представлена на рис. 3.

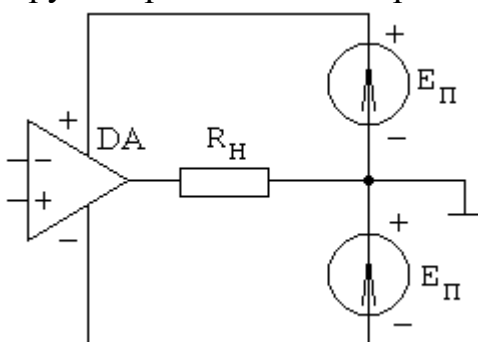


Рис. 3. Типовая схема включения ОУ

В ряде случаев для питания ОУ используется несимметричное питание, например, $+12$ и -6 В, или даже однополярное питание, например, $+30$ В и земля. Так как в представленной схеме земля не подключена к ОУ, токи возвращаются от ОУ к источнику питания через внешние (навесные) элементы схемы (в нашем случае это сопротивление нагрузки $R_Н$).

Входное и выходное напряжения. Выходное напряжение ОУ зависит от разности напряжений на его входах $E_d = U_{вх(+)} - U_{вх(-)}$, где $U_{вх(+)}$ и $U_{вх(-)}$ – напряжения на неинвертирующем и инвертирующем входах усилителя. Поэтому для ОУ справедливо:

$$U_{вых} = K \cdot E_d, \quad (1)$$

где K – коэффициент усиления ОУ без обратной связи (разомкнутого усилителя). Предположим, что $E_d > 0$ (напряжение на входе (+) положительно по отношению к напряжению на входе (–)), тогда выходное напряжение положительно (рис. 4, а).

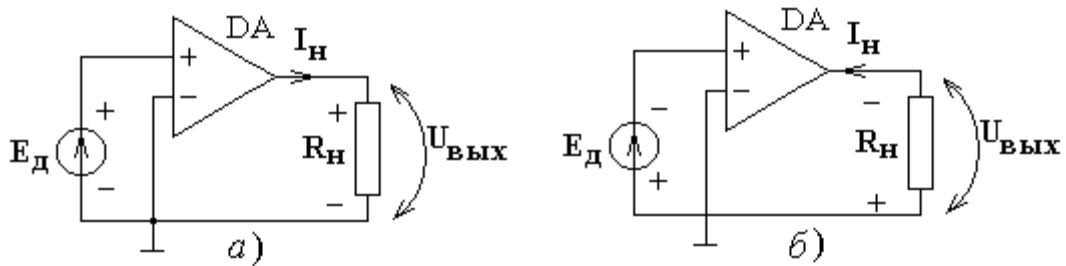


Рис. 1.4. Полярность выходного напряжения в зависимости от дифференциального сигнала: а) – при положительном дифференциальном напряжении, б) – при отрицательном дифференциальном напряжении

Если $E_d < 0$ (напряжение на входе (+) отрицательно по отношению к напряжению на входе (–)), выходное напряжение отрицательно, рис. 4, б. Общая зависимость $U_{\text{вых}} = F(E_d)$ представлена на рис. 5. Выходное напряжение линейно зависит от E_d лишь в некотором диапазоне изменения последнего (от $-E_{d \text{ max}}$ до $+E_{d \text{ max}}$) и не может превышать величины напряжения источника питания.

Два правила, справедливые для идеального ОУ. Определим значения $-E_{d \text{ max}}$ и $+E_{d \text{ max}}$. В соответствии с (1.1) имеем

$$\begin{aligned} -E_{d \text{ max}} &= \frac{-U_{\text{нас}}}{K}, \\ +E_{d \text{ max}} &= \frac{+U_{\text{нас}}}{K}. \end{aligned} \quad (1.2)$$

Величина K чрезвычайно велика; она может достигать 200000 единиц и более. Приняв $K=200000$, для ОУ, запитанного от источника $\pm 12 \text{ В}$, на основании (1.2) получим:

$$\begin{aligned} -E_{d \text{ max}} &= \frac{-12 \text{ В}}{200000} = -60 \text{ мкВ}, \\ +E_{d \text{ max}} &= \frac{+12 \text{ В}}{200000} = +60 \text{ мкВ}. \end{aligned}$$

Здесь допущено, что $+U_{\text{нас}} = +E_{\text{п}}$ и $-U_{\text{нас}} = -E_{\text{п}}$. Напряжение 60 мкВ очень мало. В типичном измерительном приборе напряжения наведенных шумов, сетевых наводок и напряжения от токов утечки могут превышать 1 мВ (1000 мкВ). В силу этого можно принять $+E_{d \text{ max}} = -E_{d \text{ max}} \approx 0$. Это позволяет сформулировать два важных правила.

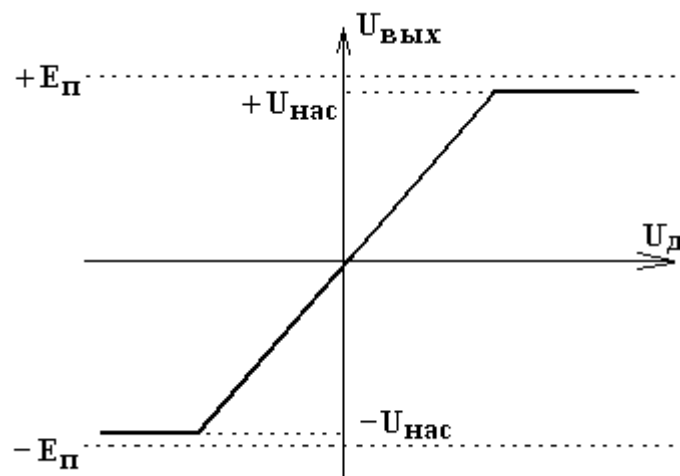


Рис. 5. Выходная характеристика ОУ

Правило 1. Если ОУ находится в линейном режиме (выходное напряжение $-U_{\text{нас}} < U_{\text{вых}} < +U_{\text{нас}}$), разность напряжений между его входами равна нулю, т.е. $U_{\text{вх}}(+)=U_{\text{вх}}(-)$.

Чтобы ОУ работал в линейном режиме, в схему необходимо ввести отрицательную обратную связь (ООС). Образно можно сказать, что операционный усилитель, охваченный ООС, сделает все от него зависящее, чтобы устранить разность напряжений между своими входами.

Правило 2. Входы ОУ тока не потребляют.

ОУ является хорошим усилителем напряжения с большим входным сопротивлением. Для идеального ОУ сопротивления по обоим входам можно считать равными бесконечности. Отсюда следует второе важное правило.

Идеальный и реальный ОУ. Для идеального ОУ справедливо:

- Коэффициент усиления дифференциального сигнала K бесконечно велик и не зависит от частоты сигнала.
- Коэффициент усиления синфазного сигнала (напряжения общего для обоих входов) $K_{\text{синф}}$ равен нулю.
- Сопротивление по обоим входам бесконечно велико.
- Отсутствует сдвиг нуля выходного напряжения.
- Скорость изменения выходного напряжения бесконечно велика.
- Дрейф (изменение во времени выходного напряжения) отсутствует.

Параметры реального ОУ несколько хуже. Однако в большинстве случаев для анализа схем на операционных усилителях можно использовать оба правила, справедливые для идеального ОУ. Этот подход и будет использоваться в дальнейшем. Знание реальных значений параметров конкретного ОУ позволяет оценить погрешность схемы преобразования сигнала и решить вопрос о целесообразности использования данного ОУ в конкретной схеме.

Параметры и характеристики ОУ можно условно подразделить на входные, выходные и характеристики передачи.

К входным параметрам относятся: напряжение сдвига (напряжение сдвига нуля); токи смещения (входные токи); ток сдвига (разность входных токов); входные сопротивления; коэффициент ослабления синфазного сигнала (синфазного напряжения); диапазон синфазных входных напряжений; температурный дрейф напряжения смещения нуля; температурные дрейфы токов смещения и тока сдвига; напряжение шумов, приведенное ко входу; коэффициент влияния нестабильности источника питания на напряжение сдвига.

Напряжение сдвига $U_{сдв}$ – это потенциал на выходе усилителя при нулевом входном сигнале, который поделен на коэффициент усиления усилителя.

Токи смещения $I_{см}$ – обусловлены необходимостью обеспечить нормальный режим работы входного дифференциального каскада на биполярных транзисторах. В случае использования полевых транзисторов это токи всевозможных утечек. Другими словами, $I_{см}$ – это токи, потребляемые входами ОУ.

Ток сдвига $I_{сдв}$ – это разность токов, потребляемых входами ОУ.

Входные сопротивления в зависимости от характера подаваемого сигнала подразделяются на дифференциальное (для дифференциального сигнала) и синфазное (сопротивление общего вида).

Входное сопротивление для **дифференциального сигнала** $R_{вх\ диф}$ – это полное входное сопротивление со стороны любого входа, в то время как другой вход соединен с общим выводом (заземлен).

Входное сопротивление для **синфазного сигнала** $R_{вх\ синф}$ характеризует изменение среднего входного тока при приложении к входам синфазного напряжения. Оно на несколько порядков выше сопротивления для дифференциального сигнала.

Коэффициент ослабления синфазного сигнала $K_{ос\ синф}$ определяется как отношение напряжения синфазного сигнала, поданного на оба входа, к дифференциальному входному напряжению, которое обеспечивает на выходе тот же сигнал, что и в случае синфазного напряжения:

$$K_{ос\ синф} = \frac{U_{вх\ синф}}{U_{вх\ диф}} \bigg|_{U_{вых\ синф} = U_{вых\ диф}}. \quad (6)$$

С учетом (6) напряжение на выходе ОУ, появляющееся при одновременной подаче дифференциального и синфазного входных сигналов, равно

$$U_{вых} = K \left(U_{вх\ диф} + \frac{U_{вх\ синф}}{K_{ос\ синф}} \right).$$

Для каждого ОУ указывается диапазон изменения $U_{\text{вх диф}}$ и $U_{\text{вх синф}}$, превышение предельных значений которых может привести к потере работоспособности усилителя.

Температурные дрейфы напряжения смещения и входных токов характеризуют изменения соответствующих параметров с температурой и составляют мкВ/°С и нА/°С. Наиболее важно учитывать данные параметры в прецизионных устройствах, так как компенсация их влияния на выходное напряжение затруднительна. Температурные дрейфы являются основной причиной появления температурных погрешностей устройств с ОУ.

Напряжение шумов, приведенное к входу, – это действующее значение напряжения на выходе усилителя при нулевом входном сигнале и нулевом сопротивлении источника сигнала, подключенного к входу, деленное на коэффициент усиления ОУ. Обычно задается спектральная плотность напряжения шумов, которая оценивается как корень квадратный из квадрата приведенного напряжения шумов, деленного на полосу частот Δf , в которой выполнено измерение этого напряжения. Таким образом, оцениваются шумы, имеющиеся в полосе 1 Гц. Размерность их $\text{нВ}/\sqrt{\text{Гц}}$.

Коэффициент влияния нестабильности источника питания на напряжение сдвига характеризует приведение к входу изменения выходного напряжения ОУ $\Delta U_{\text{сдв}}$ при колебаниях напряжения источника питания $\Delta U_{\text{пит}}$: $K_{\text{в}} = \Delta U_{\text{сдв}} / \Delta U_{\text{пит}}$.

К группе выходных параметров относятся выходное сопротивление $R_{\text{вых}}$, напряжение и ток выхода. Максимальные выходные напряжение и ток указываются в ТУ на изготовление ОУ.

К характеристикам передачи относятся: коэффициент усиления по напряжению, частота единичного усиления, скорость нарастания выходного напряжения, время установления выходного напряжения, АЧХ.

Частота единичного усиления f_1 – это частота, на которой модуль коэффициента усиления ОУ равен единице.

Скорость нарастания выходного напряжения – это максимальная скорость изменения выходного сигнала при максимальном значении его амплитуды.

Литература

1. **Электротехника и электроника.** Учебник для вузов.- В 3-х кн. Кн. 3. Электрические измерения и основы электроники/ Г.П.Гаев, В.Г.Герасимов, О.М.Князьков и др.; Под ред. проф. В.Г.Герасимова. – М.: Энергоатомиздат, 1998. (УДК 621.3; Э45).
2. **Опадчий Ю.Ф., Глудкин О.П., Гуров А.И.** Аналоговая и цифровая электроника (Полный курс): Учебник для вузов /Под ред. О.П.Глудкина. – М.: Горячая линия – Телеком, 2000. –768с.: ил. (О-60 УДК 621.396.6)
3. **Степаненко И.П.** Основы микроэлектроники. -М.: Сов.радио. 1980. - 424с.