

1. операционный усилитель (ОУ) – полупроводниковый прибор, предназначенный для усиления напряжения и обеспечивающий выполнение различных операций по преобразованию аналоговых электрических сигналов: усиление, сложение, вычитание, интегрирование, дифференцирование и т. д. Возможность выполнения этих операций ОУ определяется наличием цепей положительной и/или отрицательной обратной связи, в состав которых могут входить сопротивления, емкости, индуктивности, диоды, стабилитроны, транзисторы и некоторые другие электронные элементы. Типовой ОУ представляет собой дифференциальный усилитель с очень высоким коэффициентом усиления. На рис. 6.1 показано условное обозначение ОУ на принципиальных схемах.

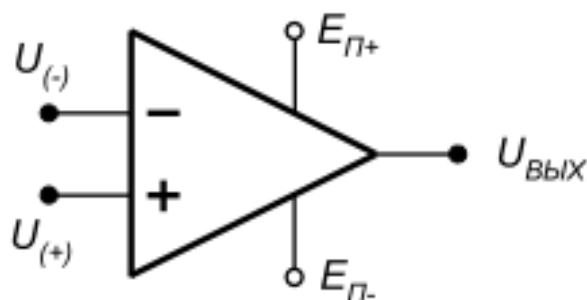


Рис. 6.1. Условное обозначение ОУ:
 (-) – инвертирующий вход ОУ; (+) – инвертирующий вход ОУ; $U_{(-)}$ – напряжение на инвертирующем входе, $U_{(+)}$ – напряжение на неинвертирующем входе;
 $U_{(вых)}$ – выходное напряжение ОУ; $E_{п+}$ – положительное напряжение питания;
 $E_{п-}$ – отрицательное напряжение питания

$$U_{вых} = -A (U_{-} - U_{+}) = -A (\Delta U), \quad (6.1)$$

где A – коэффициент передачи усилителя, не охваченного обратной связью; U_{-} – напряжение на инвертирующем входе; U_{+} – напряжение на неинвертирующем входе.

2. Инвертирующий усилитель

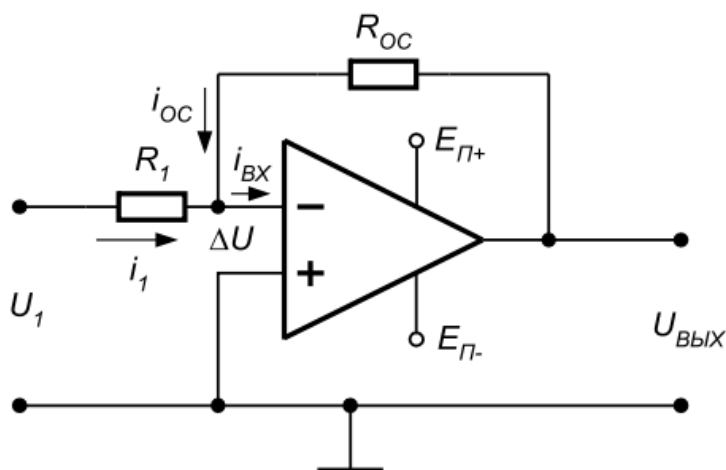


Рис. 6.2. Принципиальная схема инвертирующего усилителя на ОУ

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(R_{\text{OC}} / R_1) U_1 = -K \cdot U_1, \quad (6.7)$$

где K – коэффициент передачи усилителя, охваченного обратной связью; $K = R_{\text{OC}} / R_1$.

U_1 – входное напряжение.

Знак минус в выражении (6.7) означает, что выходной сигнал имеет полярность, противоположную входному сигналу, то есть инвертирован относительно него, поэтому такой усилитель называют инвертирующим усилителем. Следует обратить внимание, что коэффициент передачи ОУ, охваченного обратной связью, можно регулировать посредством выбора сопротивлений двух резисторов, R_1 и R_{OC} .

Неинвертирующий усилитель

Неинвертирующий усилитель можно получить путем заземления входного сопротивления R_1 в схеме инвертирующего усилителя. При этом входной сигнал должен подаваться на неинвертирующий вход (рис. 6.3).

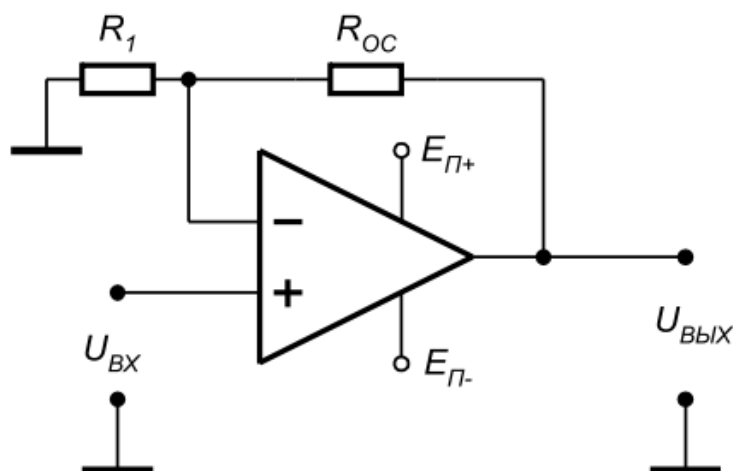


Рис. 6.3. Принципиальная схема неинвертирующего усилителя на ОУ



$$U_{ВЫХ} = (1 + R_{OC}/R_1)U_{ВХ} \quad (6.9)$$

Этим уравнением определяется назначение усилителя – усиливать, не изменяя знака входного сигнала. Коэффициент усиления с контуром обратной связи равен $K = (1 + R_{OC}/R_1)$. Можно показать, что входной импеданс такой схемы $Z_{ВХ}$

Повторитель напряжения

Особым является случай, когда $R_{OC} = 0$, а резистор R_1 во входной цепи отсутствует (рис. 6.4). При этом $U_{ВЫХ} = U_{ВХ}$, $Z_{ВХ} = Z^* \cdot A$, $Z_{ВЫХ} = Z_{ВЫХ}^*/A$, где $Z_{ВЫХ}^*$ – выходной импеданс реального ОУ. Такая схема называется повторителем напряжения, так как коэффициент усиления по напряжению для нее равен 1. Эта схема используется для преобразования импеданса и может иметь большой коэффициент усиления по мощности.

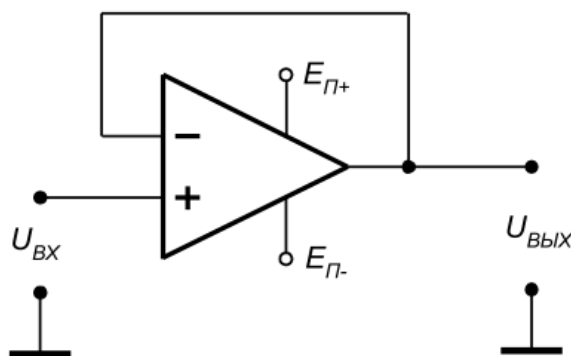


Рис. 6.4. Принципиальная схема повторителя напряжения на ОУ

Дифференциальный усилитель

Дифференциальная схема на основе ОУ (рис. 6.5) обеспечивает усиление сигналов на каждом из дифференциальных входов в R_{OC}/R_1 раз. В результате выходное напряжение оказывается равным разности напряжений между двумя входными сигналами, умноженной на коэффициент передачи:

$$U_{ВЫХ} = (R_{OC}/R_1)(U_2 - U_1). \quad (6.11)$$

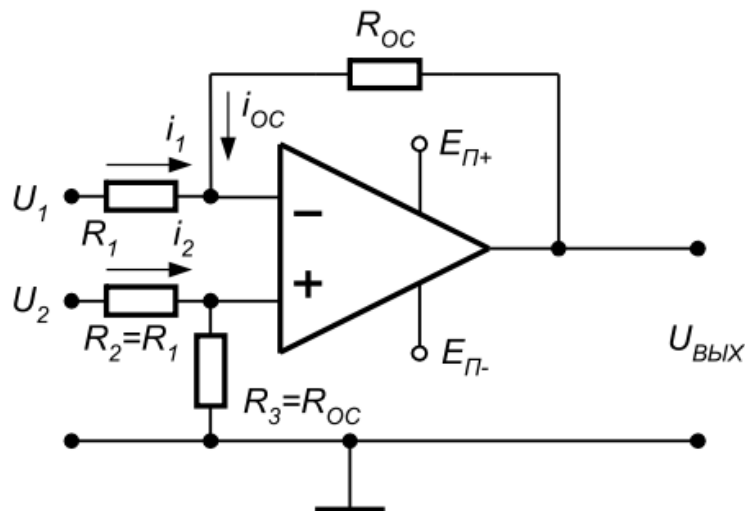


Рис. 6.5. Принципиальная схема дифференциального усилителя на ОУ

Суммирующая схема

Суммирующая схема на основе ОУ – это модификация инвертирующей схемы для двух или более входных сигналов. Каждое входное напряжение U_i подается на инвертирующий вход через соответствующий резистор R_i (рис. 6.6).

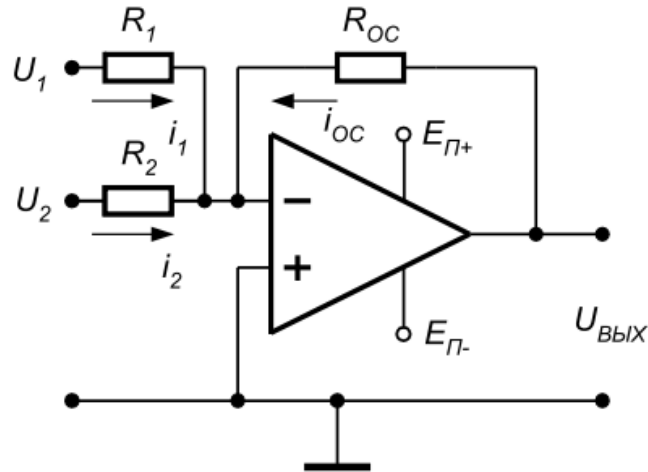


Рис. 6.6. Принципиальная схема сумматора на ОУ

Подставляя полученные выражения в (6.16), получим:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{OC}}(U_1/R_1) - R_{\text{OC}}(U_2/R_2). \quad (6.20)$$

Если $R_1 = R_2 = R$, то уравнение для схемы сумматора имеет вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -R_{\text{OC}}/R(U_1 + U_2). \quad (6.21)$$

Интегрирующая схема

Схема интегратора на основе ОУ получается путем замены в инвертирующей схеме резистора обратной связи на конденсатор (рис. 6.7).

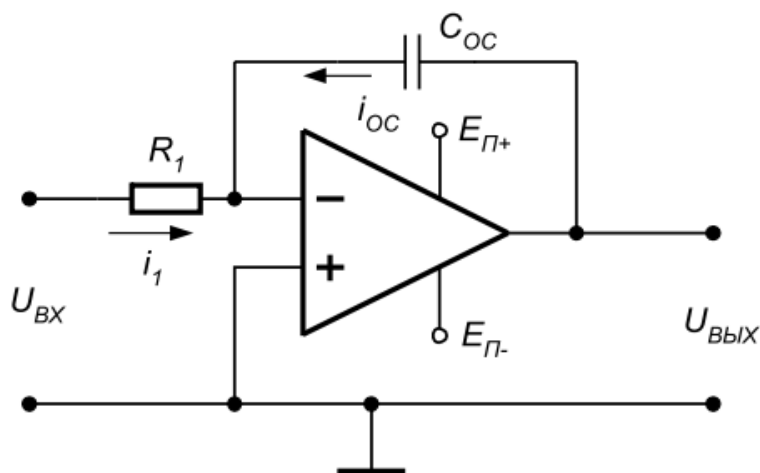


Рис. 6.7. Принципиальная схема интегратора на ОУ

или в интегральной форме:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{R_1 \cdot C_{\text{ОС}}} \int_0^{T_{\text{И}}} U_{\text{ВХ}} dt, \quad (6.26)$$

где $T_{\text{И}}$ – время интегрирования.

Таким образом, значение напряжения на выходе интегратора пропорционально интегралу от входного напряжения, а масштабный коэффициент равен $1/R_1 C_{\text{ОС}}$ и имеет размерность сек^{-1} .

Если входное напряжение постоянно, то выражение (6.26) принимает вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 \cdot C_{\text{ОС}}} t. \quad (6.27)$$

Уравнение (6.27) описывает линию с наклоном $-(U_{\text{ВХ}}/RC)$. При $U_{\text{ВХ}} = -1$ В, $C = 1$ мкФ, $R = 1$ МОм наклон равен 1 В/с. Выходное напряжение будет нарастать линейно с указанной скоростью до тех пор, пока ОУ не перейдет в режим насыщения.

Дифференцирующая схема

Дифференцирующая схема на основе ОУ напоминает интегратор, у которого изменены места подключения резистора и конденсатора (рис. 6.8). Для идеального ОУ легко получить передаточную функцию дифференцирующего устройства.

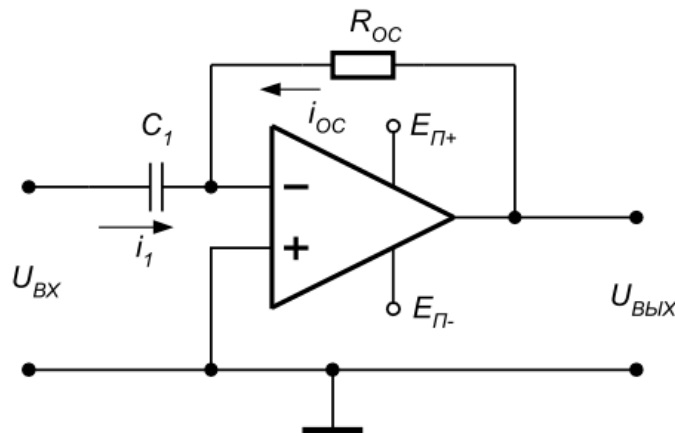


Рис. 6.8. Принципиальная схема дифференцирующего устройства на ОУ

Если на вход схемы подано напряжение $U_{\text{ВХ}}$, оно практически полностью приложено к конденсатору, так как схема ОУ устроена таким образом, что потенциалы прямого и инвертирующего входов дифференциального усилителя совпадают. В результате через конденсатор протекает ток, равный:

$$i_1 = C_1 \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}. \quad (6.28)$$

Так как входное сопротивление ОУ достаточно велико и входной ток ОУ можно считать равным нулю, весь ток конденсатора протекает через резистор $R_{\text{ОС}}$:

$$i_{\text{ОС}} = -i_1 = -C_1 \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}. \quad (6.29)$$

Выходной сигнал определяется падением напряжения на сопротивлении обратной связи R_{oc} :

$$U_{вых} = i_{oc} \cdot R_{oc} = -R_{oc} \cdot C_1 \cdot \frac{dU_{вх}}{dt}. \quad (6.30)$$

Таким образом, выходное напряжение пропорционально скорости изменения входного сигнала.

3. Поскольку ОУ используются как преобразователи сигналов, к их характеристикам предъявляются определенные требования. В основном эти требования сводятся к тому, чтобы характеристики наилучшим образом соответствовали характеристикам идеального ОУ.

Идеальный операционный усилитель обладает следующими свойствами:

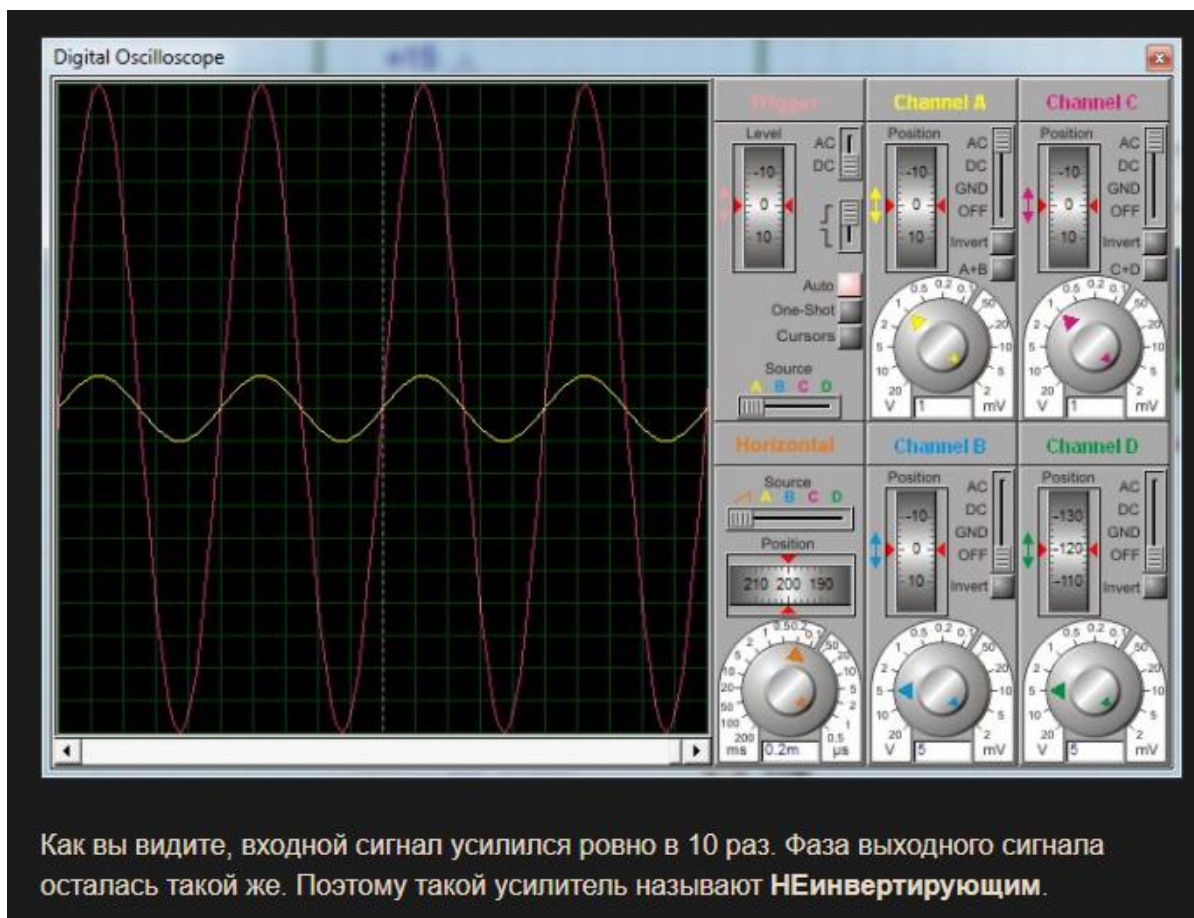
- **коэффициент передачи** ОУ без обратной связи равен бесконечности;
- **входной ток** равен нулю;
- **напряжение смещения и ток смещения** нуля на выходе ОУ равны нулю;
- **входное сопротивление** ОУ равно бесконечности;
- **выходное сопротивление** ОУ равно нулю.

Модель идеального ОУ может успешно применяться для вывода математических соотношений, описывающих работу реальных ОУ в различных режимах. Выходное напряжение ОУ определяется выражением:

$$U_{вых} = -A (U_- - U_+) = -A (\Delta U),$$

где A – коэффициент передачи усилителя, не охваченного обратной связью; U_- – напряжение на инвертирующем входе; U_+ – напряжение на неинвертирующем входе.

4.



Ну ладно, с частотой среза вроде бы разобрались. Теперь нам важен такой параметр, как ФЧХ. В нашем случае мы вроде бы как получили

НЕинвертирующий усилитель. То есть сдвиг фаз между входным и выходным сигналом должен быть равен нулю.

(Разность фаз между входным и выходным сигналом имеет связь с ограничением полосы пропускания, так что в некоторых схемах обратной связи это может привести к возникновению самовозбуждения. Например, если синусоидальный сигнал на выходе, который должен противофазно складываться с входным сигналом, будет задержан на 180° то он будет складываться синфазно с входным сигналом, т.е. образуется положительная обратная связь. В этих случаях цепь обратной связи может быть стабилизирована путём применения схемы частотной компенсации, которая увеличивает усиление или сдвиг фазы при разомкнутой петле обратной связи. Эта компенсация может быть реализована с помощью внешних компонентов. Так же эта компенсация может быть реализована внутри операционного усилителя, путём добавления доминирующего полюса, который достаточно ослабляет усиление на высоких частотах. Расположение этого полюса может быть установлено внутри производителем микросхем, или же настраиваться, используя специфические для каждого операционного усилителя методы. Обычно доминирующий полюс ещё больше снижает полосу пропускания операционного усилителя. Когда требуется высокий коэффициент усиления при замкнутой петле обратной связи, то часто частотная компенсация бывает не нужна, так как необходимое усиление с разомкнутой петлёй обратной связи достаточно мало. Следовательно, в схемах с высоким коэффициентом усиления при замкнутой петле обратной связи можно использовать операционные усилители с более широкой полосой пропускания.)

5. Постоянная составляющая выходного напряжения $U_{0ВЫХ}$ усилителя зависит от коэффициента усиления K_U схемы и напряжения смещения $U_{СМ}$ и вычисляется по формуле: $U_{0ВЫХ} = U_{СМ} \cdot K_U$.

Постоянная составляющая выходного напряжения усилителя $U_{0ВЫХ}$ определяется произведением напряжения смещения $U_{СМ}$ коэффициент усиления схемы K_U : $U_{0ВЫХ} = U_{СМ} \cdot K_U$

Коэффициент усиления схемы неинвертирующего усилителя на ОУ (рис. 3.1) вычисляется по формуле:

$$K_U = 1 + \frac{R_1}{R_2}$$

Постоянная составляющая выходного напряжения усилителя $U_{0ВЫХ}$ определяется произведением напряжения смещения $U_{СМ}$ коэффициент усиления схемы K_U :

$$U_{0ВЫХ} = U_{СМ} \cdot K_U$$

6. Скорость нарастания – это максимальная скорость изменения напряжения, которое может генерироваться выходной схемой операционного усилителя. Она измеряется как напряжение относительно времени, и типичная единица измерения, используемая в документации – это вольт в микросекунду (В/мкс).

Допустим, у вас есть операционный усилитель и подается входной сигнал, который в идеальной среде генерирует выходной сигнал с наклоном 10 В/мкс. Если скорость нарастания сигнала операционного усилителя составляет 2 В/мкс, выходной сигнал будет отражать поведение влияние этого параметра операционного усилителя, а не ожидаемый выходной сигнал. Когда операционный усилитель находится в этом состоянии с ограниченной скоростью нарастания, выходной сигнал представляет собой линейное изменение с наклоном, равным скорости нарастания.

