

## Лекция 2

### Операционные усилители

#### Цель лекции:

Изучение операционного усилителя.

#### План лекции:

1. Принцип построения, характеристики и параметры ОУ.
2. Инвертирующий и неинвертирующий усилители.
3. Инвертирующий сумматор.
4. Избирательные усилители

Операционный усилитель (ОУ) относится к УПТ с большим коэффициентом усиления, имеющим дифференциальный вход и один общий выход. Условное обозначение ОУ показано на рис. 1. Один из входов усилителя  $U_{(+)}$  называется **неинвертирующим**, а второй  $U_{(-)}$  – **инвертирующим**. При подаче сигнала на неинвертирующий вход выходной сигнал совпадает по фазе с входным сигналом (сигналы синфазны). Если подать сигнал на инвертирующий вход, то выходной сигнал будет повернут на  $180^\circ$  относительно входного сигнала (сигналы противофазны).

ОУ характеризуется большим коэффициентом усиления:  $K_U \approx 10^4 - 10^6$ . Основу ОУ составляет дифференциальный каскад (ДУ), применяемый в качестве входного каскада усилителя (рис. 2). Усилитель напряжения (УН), обеспечивает основное усиление по напряжению. Выходным каскадом ОУ обычно служит эмиттерный повторитель (ЭП), имеющий низкое выходное сопротивление и обеспечивающий требуемую нагрузочную способность всей схемы.

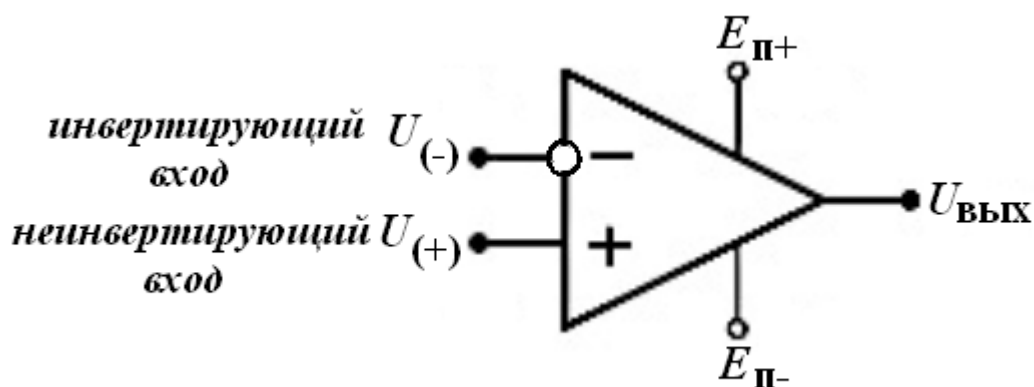


Рис. 1. Условное обозначение ОУ.

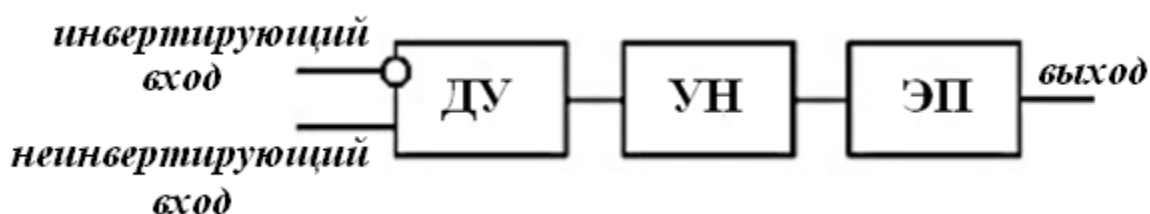


Рис. 2. Структурная схема ОУ

Передаточную характеристику ОУ  $U_{\text{ВЫХ}} = f(U_{\text{ВХ}})$  представляют в виде двух кривых, относящихся к инвертирующему и неинвертирующему входам (рис. 3). Передаточная характеристика ОУ содержит одну линейную область и две области насыщения.

Горизонтальные участки кривых соответствуют режиму полностью открытого (насыщенного) либо закрытого транзистора выходного каскада. При изменении напряжения входного сигнала на этих участках выходное напряжение усилителя остается постоянным и определяется максимальными выходными напряжениями  $U_{\text{ВЫХ.max}}^+$ ,  $U_{\text{ВЫХ.max}}^-$ .

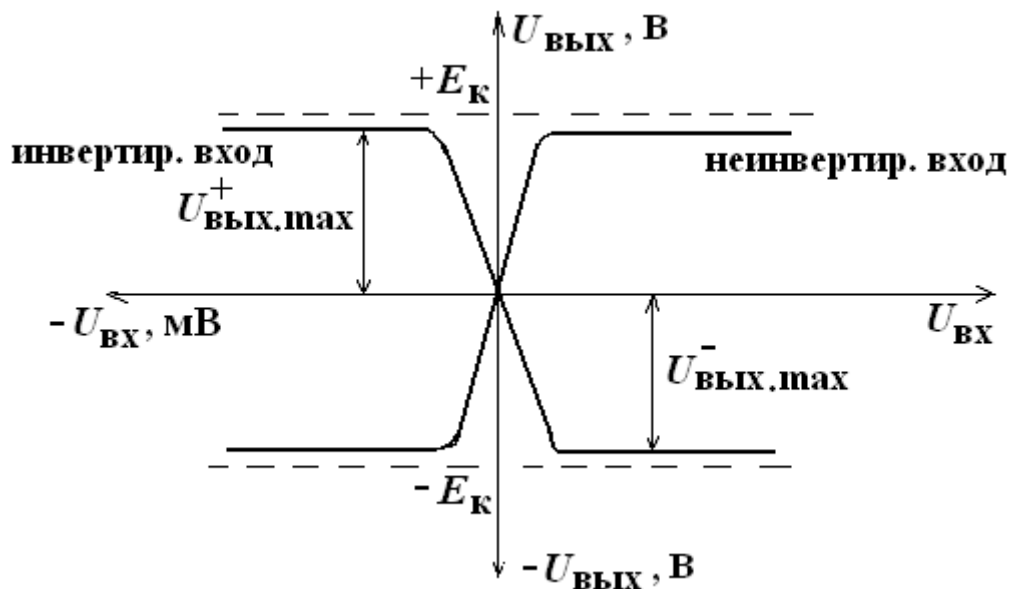


Рис. 3. Передаточные характеристики ОУ

**Идеальный операционный усилитель** имеет бесконечно большое входное сопротивление, вследствие чего  $I_{вх} \rightarrow 0$ ; нулевое выходное сопротивление, обладает бесконечно большим и частотно независимым коэффициентом усиления  $K_d \rightarrow \infty$ , коэффициент передачи синфазного сигнала (поданного одновременно на два входа) близок к нулю  $K_{сф} \rightarrow 0$  и выполняется условие баланса: при  $U_{вх} = 0$  и  $U_{вых} = 0$ .

### Основные схемы включения ОУ

Обычно ОУ используется для усиления сигналов только в сочетании с отрицательной обратной связью.

**Инвертирующий усилитель** представляет собой ОУ, охваченный цепью параллельной ООС по напряжению (рис. 4), которая осуществляется резистором обратной связи  $R_{ОС}$ . Коэффициент усиления усилителя с ОС задается делителем напряжения  $R_{ОС}$  и  $R_1$ .

Параметры схемы определим с помощью уравнения токов для узла А. Если принять, что сопротивление входа бесконечно велико ( $R_{вх} \rightarrow 0$ ), то

входной ток ОУ будет стремиться к нулю ( $I_{OY} \rightarrow 0$ ), а ток  $I_{BX}$  будет определяться только током ОС:  $I_{BX} = I_{OC}$ . Отсюда

$$\frac{U_{BX} - U_0}{R_1} = \frac{U_{ВЫХ} - U_0}{R_{OC}}. \quad (1)$$

При коэффициенте усиления ОУ  $K_{U_{OY}} \rightarrow \infty$  напряжение на входе будет

$U_0 = \frac{U_{ВЫХ}}{K_{U_{OY}}} \rightarrow 0$ , тогда выражение (3.7) преобразуется к виду:

$$\frac{U_{BX}}{R_1} = -\frac{U_{ВЫХ}}{R_{OC}}. \quad (2)$$

Таким образом, что коэффициент усиления схемы инвертирующего усилителя с отрицательной обратной связью можно рассчитать по формуле:

$$K_{U(OC)} = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{BX}} = -\frac{R_{OC}}{R_1}. \quad (3)$$

Знак «минус» указывает на инверсию выходного сигнала.

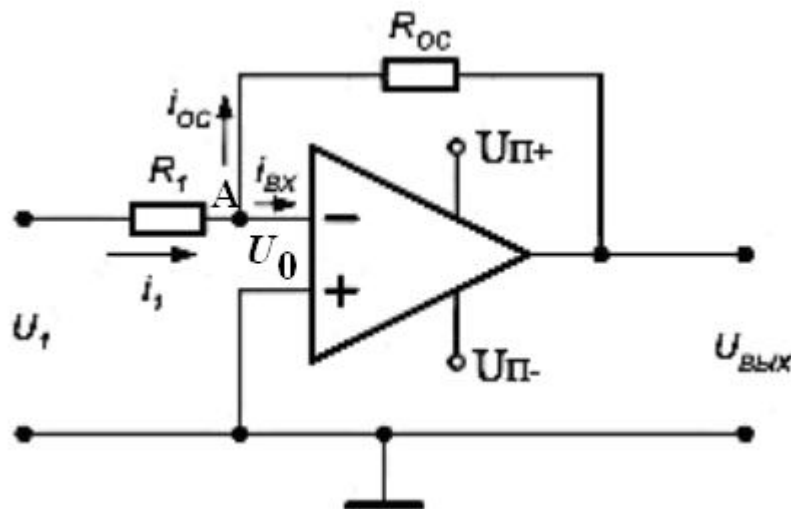


Рис. 4. Схема инвертирующего усилителя на ОУ

Коэффициент усиления идеального инвертирующего ОУ **не зависит от величины коэффициента усиления самого ОУ, а определяется только параметрами пассивной части схемы**, т.е. величинами резисторов в цепи ОС.

**Неинвертирующий усилитель** представляет собой ОУ, охваченный цепью последовательной ООС по напряжению (рис. 5). ООС включена между выходом и инвертирующим входом.

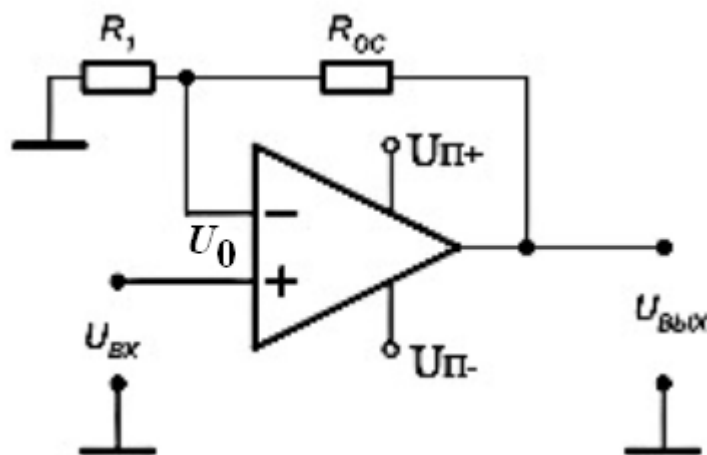


Рис. 5. Схема неинвертирующего усилителя

При этом инвертирующий вход заземляется через резистор  $R_1$ , а входной сигнал подается на неинвертирующий вход ОУ. Коэффициент обратной связи в этой схеме равен:

$$\beta = \frac{R_1}{R_1 + R_{OC}}. \quad (4)$$

Поскольку для линейной части характеристики напряжение между входами достаточно мало ( $U_0 \rightarrow 0$ ), входное напряжение связано с

выходным напряжением соотношением  $U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВЫХ}} \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{ОС}}}$ . Отсюда коэффициент усиления неинвертирующего усилителя

$$K_{U(\text{ОС})} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 1 + \frac{R_{\text{ОС}}}{R_1}, \quad (5)$$

т.е.  $K_{U(\text{ОС})}$  определяется лишь отношением сопротивлений  $(R_1 + R_2)/R_1$  и не зависит от  $K_U$ .

Как следует из формулы 5, следует, что коэффициент усиления неинвертирующего усилителя не может быть меньше единицы, тогда как для коэффициента усиления инвертирующего усилителя такого ограничения не существует.

**Инвертирующий сумматор** предназначен для суммирования величин входных напряжений (рис. 6). Схема выполнена на базе инвертирующего усилителя с числом входных параллельных ветвей, равных количеству сигналов, предназначенных для сложения.

Принцип работы аналогового сумматора основан на суммировании токов входных сигналов, протекающих через одинаковые резисторы  $R_i$ . При  $R_{\text{ВХОС}} \gg R_i$ ,  $I_{\text{ВХОУ}} \rightarrow 0$ ,  $I_1 + I_2 + I_3 + \dots = I_{\text{ОС}}$ . Поскольку напряжение  $U_0$  между входами ОУ пренебрежимо мало, то сумма входных токов, протекающих по  $R_{\text{ОС}}$ , создает на нем напряжение, равное  $U_{\text{ВЫХ}}$ :

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(I_1 + I_2 + I_3)R_{\text{ОС}}. \quad (6)$$

Поставим вместо токов их выражения  $\frac{U_{\text{ВХ}_i}}{R_i}$  и, приняв  $R_{\text{ОС}} = R_1 = R_2 = R_3$ , получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\left(\frac{U_{\text{ВХ1}}}{R_1} + \frac{U_{\text{ВХ2}}}{R_2} + \frac{U_{\text{ВХ3}}}{R_3}\right)R_{\text{ОС}} = -(U_{\text{ВХ1}} + U_{\text{ВХ2}} + U_{\text{ВХ3}}) \quad (7)$$

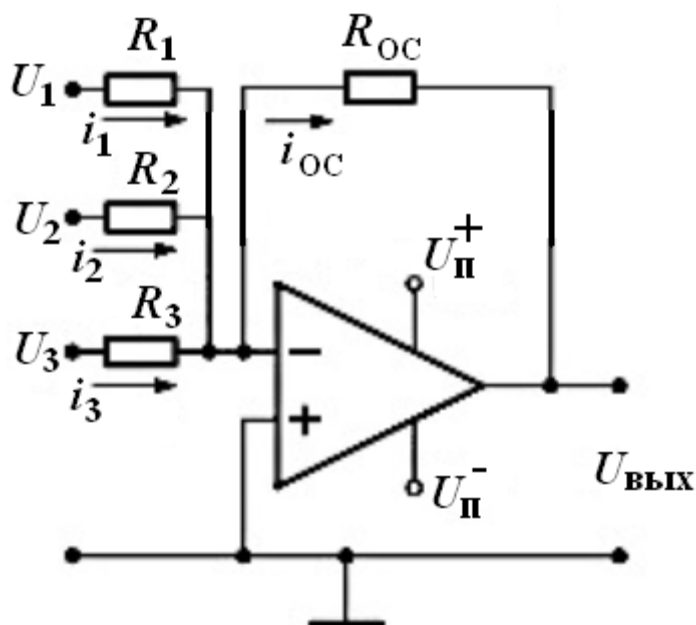


Рис. 6. Схема инвертирующего сумматора

То есть выходной сигнал схемы равен сумме входных сигналов с обратным знаком.

**Интегратор** – схема, выполняющая математическую операцию интегрирования. Интегратор выполняется на базе инвертирующего ОУ, в которой резистор  $R_{\text{ОС}}$  заменен на конденсатор (рис. 7).

Известно, что заряд на конденсаторе  $Q$  и ток через него  $i_C$  определяются выражениями:

$$Q = C \cdot U, \quad i_C = \frac{dQ}{dt}. \quad (8)$$

С учетом этих соотношений, для интегратора, получим:

$$i_C = C \left( \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt} \right). \quad (9)$$

Для идеального ОУ  $i_C = U_{\text{ВХ}}/R_1$  и  $i_1 = i_{\text{ОС}}$ , отсюда:

$$\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} = -C \frac{dU_{\text{ВЫХ}}}{dt}, \quad (10)$$

или в интегральной форме:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt + U_{\text{вых0}}, \quad (11)$$

где  $U_{\text{ВЫХ0}}$  – выходное напряжение при  $t = 0$ . Таким образом, значение напряжения на выходе интегратора пропорционально интегралу от входного напряжения.

Если входное напряжение постоянно, то выражение (11) принимает вид:

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1 C} t. \quad (12)$$

Уравнение (12) описывает линию с наклоном  $-(U_{\text{ВХ}}/R_1 C)$ . Выходное напряжение будет нарастать линейно до тех пор, пока ОУ не перейдет в режим насыщения.

Интеграторы широко используются при построении генераторов линейно изменяющегося напряжения.



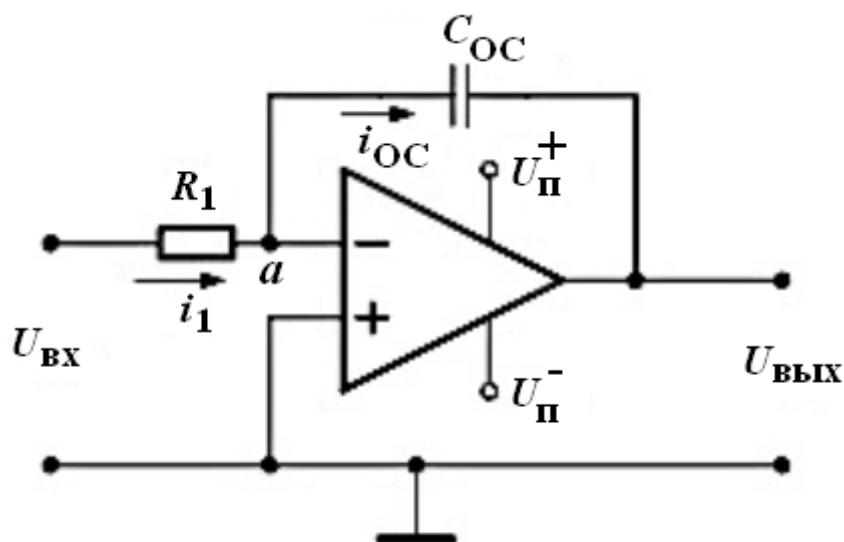


Рис. 7. Схема интегратора на ОУ

### Избирательные усилители

Избирательные усилители предназначены для усиления сигналов в узкой полосе частот. Их частотная характеристика должна обеспечивать требуемое усиление в заданной полосе частот и достаточно крутой спад усиления вне этой полосы. По принципу действия избирательные усилители делятся на: резонансные и усилители с ОС.

**Резонансный усилитель.** В резонансных усилителях в качестве нагрузки применяется параллельный колебательный  $LC$ -контур, имеющий большое сопротивление на резонансной частоте  $f_0$  и малое – для других частот.

Схема однокаскадного резонансного усилителя показана на рис. рис. 8. Резонансный усилитель содержит три основных элемента: усилительный элемент, источник питания и резонансную цепь (фильтр) с цепями связи УЭ с последующим каскадом. В качестве активного элемента используется биполярный транзистор. Связь с последующим усилительным каскадом или нагрузкой может осуществляться через разделительный конденсатор

(как в приведенной схеме) или трансформатор, первичная обмотка которого определяет индуктивность  $L$  колебательного контура.

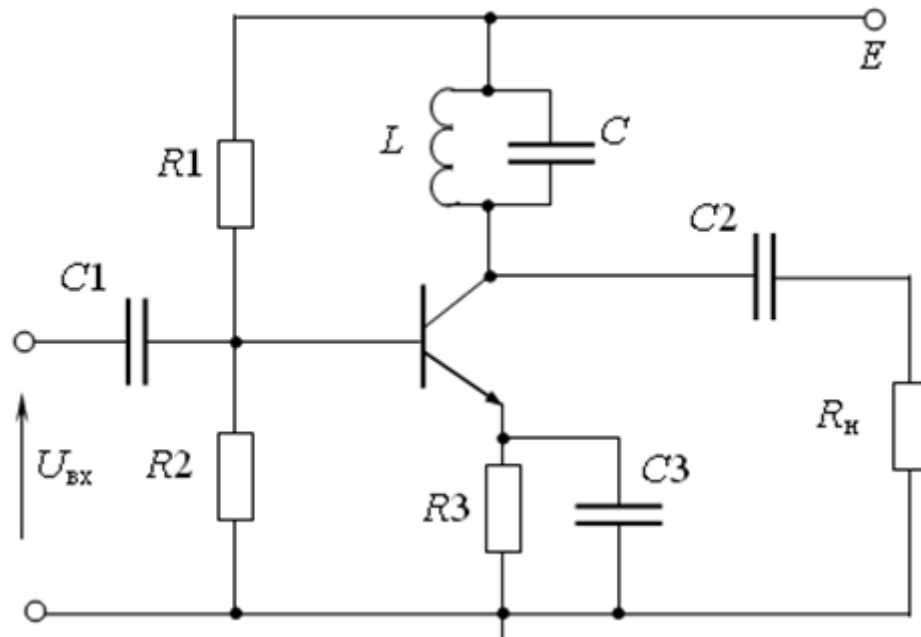


Рис. 8. Схема резонансного усилителя с параллельным  $LC$ -контуром.

АЧХ резонансного усилителя приведена на рис.3.а. (Лекция 1).

Подбором элементов  $C$  и  $L$  контур настраивается на частоту усиливаемого сигнала.

На резонансной частоте  $\omega = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$  сопротивление колебательного контура оказывается наибольшим, поэтому коэффициент усиления будет максимален. Благодаря этому усиливается лишь напряжение одной частоты, а напряжения других частот подавляются. Полоса пропускания избирательного усилителя равна  $2\Delta f = f_{\text{В}} - f_{\text{Н}}$ .

Усилитель собран на транзисторе  $VT$   $n-p-n$ -типа по схеме с ОЭ. В качестве коллекторной нагрузки используется параллельный колебательный контур, состоящий из катушки индуктивности  $L$  и конденсатора  $C$ . С помощью резисторов  $R_1$ ,  $R_2$  и  $R_3$  задаётся необходимый режим усилителя по постоянному току. Цепочка  $R_3C_3$  используется для стабилизации точки покоя

за счёт введения последовательной отрицательной обратной связи по постоянному току.  $C_{p1}$  и  $C_{p2}$  – разделительные конденсаторы. Нагрузкой усилителя служит резистор  $R_H$ . На резонансной частоте  $f_0$  сопротивление контура является чисто активным, а коэффициент усиления  $K_u$  усилителя, принимает своё максимальное значение.