

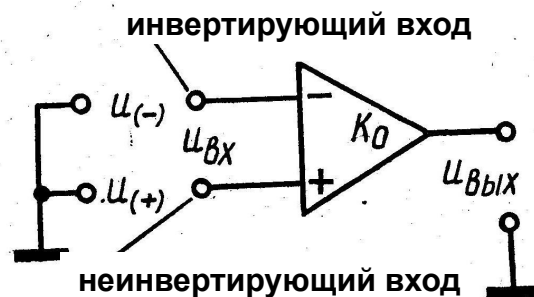
# ТЕМА 13

# ОПЕРАЦИОННЫЕ

# УСИЛИТЕЛИ

# НАЗНАЧЕНИЕ И СВОЙСТВА ОУ

- Операционный усилитель (ОУ) - высококачественный дифференциальный усилитель с большим коэффициентом усиления. Изначально предназначался для совершения операций над аналоговыми сигналами (сложение, логарифмирование и т.д.), отсюда и название.
- Основные свойства ОУ:
- дифференциальный вход. Часто используется как два асимметричных входа: инвертирующий и неинвертирующий.



- большой коэффициент усиления ( $10^4 - 10^6$  и более)
- большое входное сопротивление
- малое выходное сопротивление
- полоса усиливаемых частот от 0 до некоторой частоты  $f_B$
- большой коэффициент ослабления синфазных сигналов и помех.

# СВОЙСТВА ОУ

- малый уровень шумов;
- малый дрейф нуля;
- малые измерения характеристик и параметров в зависимости от температуры и времени;
- двуполярное питание;
- размах выходного напряжения почти до уровней напряжения питания.
- Указанные свойства проявляются в разной степени в зависимости от типа ОУ.
- Сигнал на выходе ОУ:

$$u_{\text{вых}} = u_{\text{вх}} K_0 = (u_{(+)} - u_{(-)}) K_0$$

$K_0$  - коэффициент усиления ОУ в режиме холостого хода.

Напряжение отсчитывается от общего (нулевого) уровня.

- ОУ имеет 1 асимметричный выход.
- При отсутствии выходных сигналов в случае двуполярного питания напряжение на выходе равно 0.
- ОУ создан для работы с обратными связями.

# ИДЕАЛЬНЫЙ ОУ

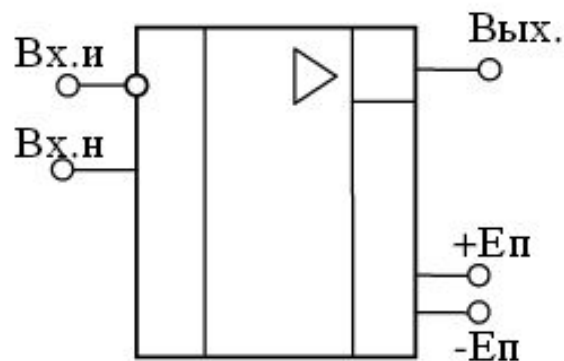
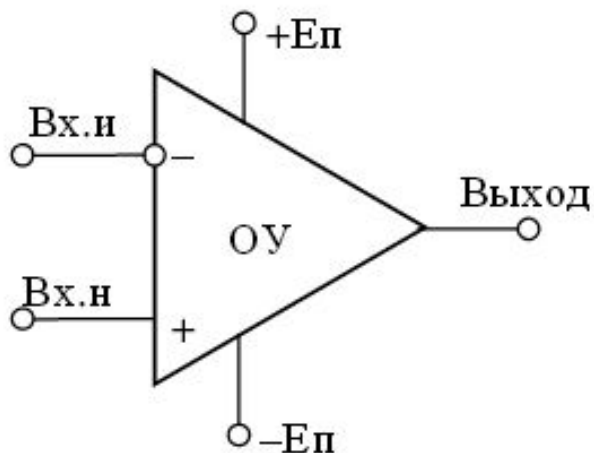
- Идеальный ОУ обладает следующими характеристиками:
- Полоса усиливаемых частот от постоянного тока до бесконечности;
- Бесконечно большое входное сопротивление;
- Бесконечно малое выходное сопротивление;
- Бесконечно большой коэффициент усиления;
- Важное свойство идеального ОУ: напряжение на дифференциальном входе при любом выходном напряжении в линейном режиме практически равно нулю, так как

$$u_{(+)} - u_{(-)} = \frac{u_{\text{ВЫХ}}}{K_0}$$

- Это означает режим «виртуального короткого замыкания» по напряжению входов ОУ;
- Для синфазного сигнала  $U_{\text{ВЫХ}} = K_0(u_{(+)} - u_{(-)}) = 0$

# СХЕМОГРАФИЧЕСКОЕ ОБОЗНАЧЕНИЕ ОУ

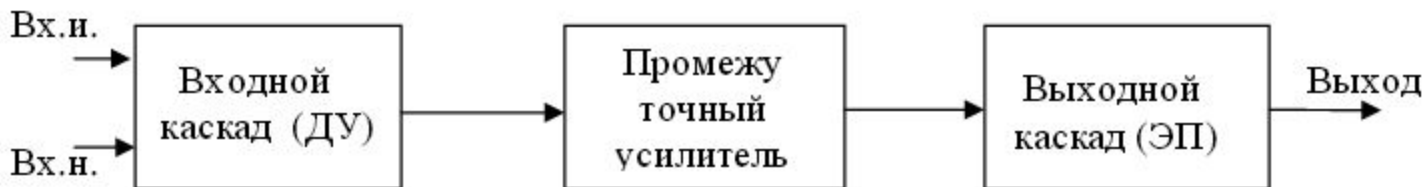
- Два варианта обозначения:



- Кроме входов, выхода, общего вывода и выводов подачи напряжений питания, ОУ может иметь дополнительные выводы для подключения:
  - цепей балансировки;
  - цепей коррекции частотной характеристики.

# СТРУКТУРНАЯ СХЕМА ОУ

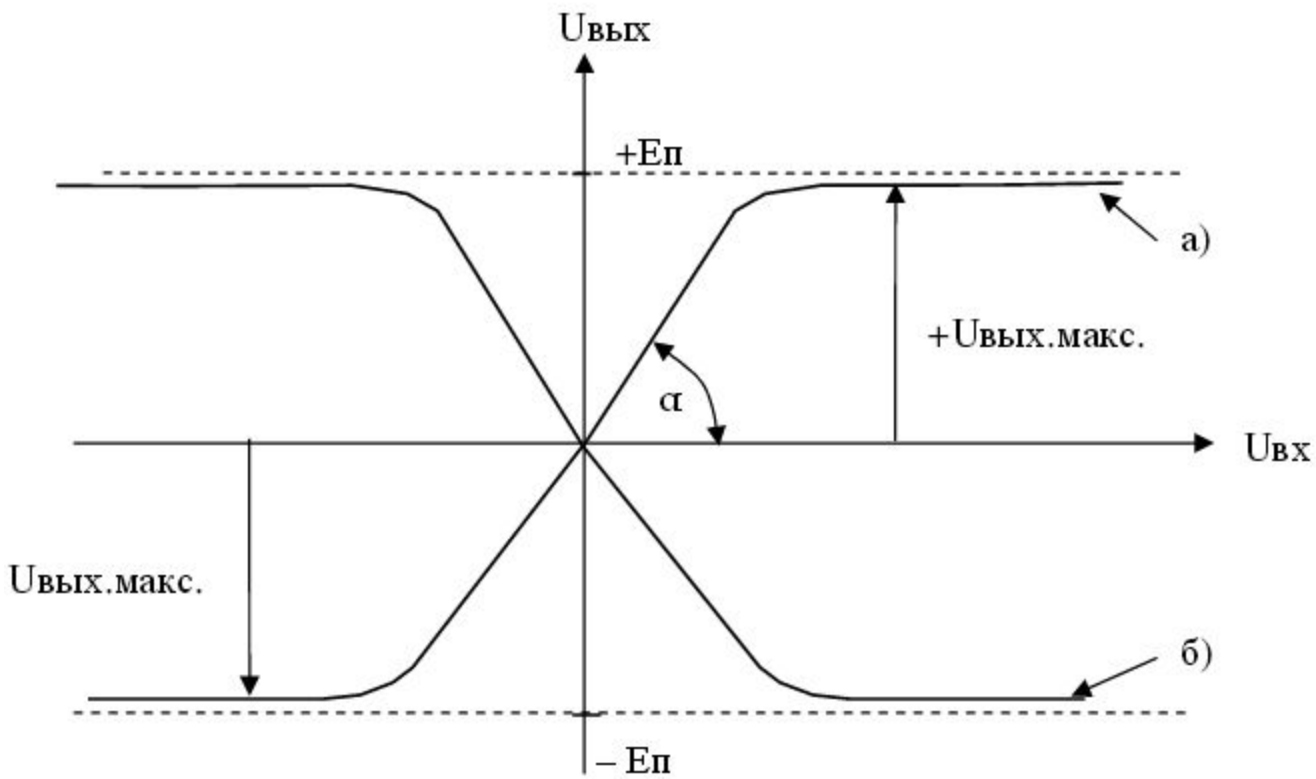
- Чаще всего ОУ строятся по трехкаскадной схеме.
- Она включает:
  - входной дифференциальный каскад;
  - каскад усиления напряжения (промежуточный). Он обеспечивает основное усиление по напряжению и переход к несимметричному выходу;
  - выходной каскад, или усилитель мощности (на основе эмиттерных повторителей). Обеспечивает усиление по току и низкое выходное сопротивление.



- Возможно также построение ОУ по двухкаскадной схеме.

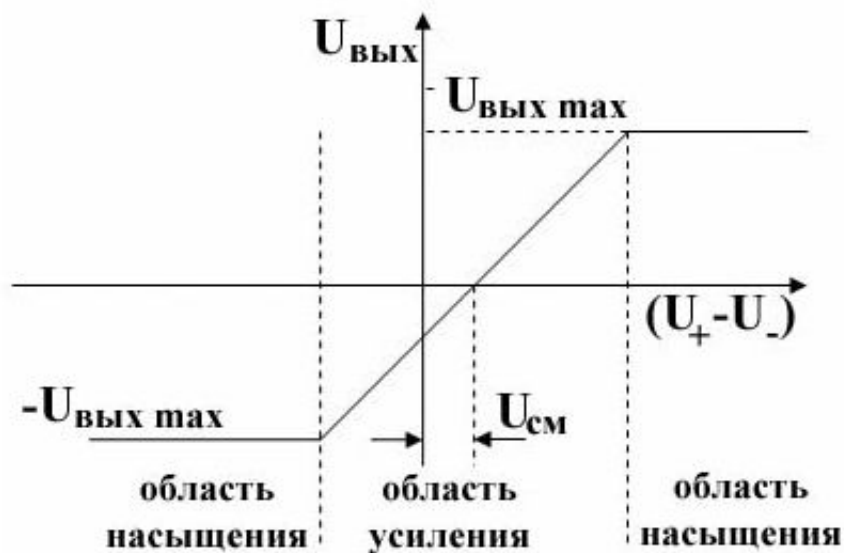
# АМПЛИТУДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОУ

- Амплитудная (передаточная) характеристика ОУ - функция  $F=U_{\text{ВЫХ}}(U_{\text{ВХ}})$ .
- Ее вид для инвертирующего и неинвертирующего входов:



# АМПЛИТУДНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОУ

- Амплитудная характеристика имеет 2 вида областей: область усиления (где она линейна) и области насыщения. Из-за высокого коэффициента усиления у ОУ без ООС область усиления мала: При  $K=100000$  и выходном напряжении 10 В - порядка 100 мВ

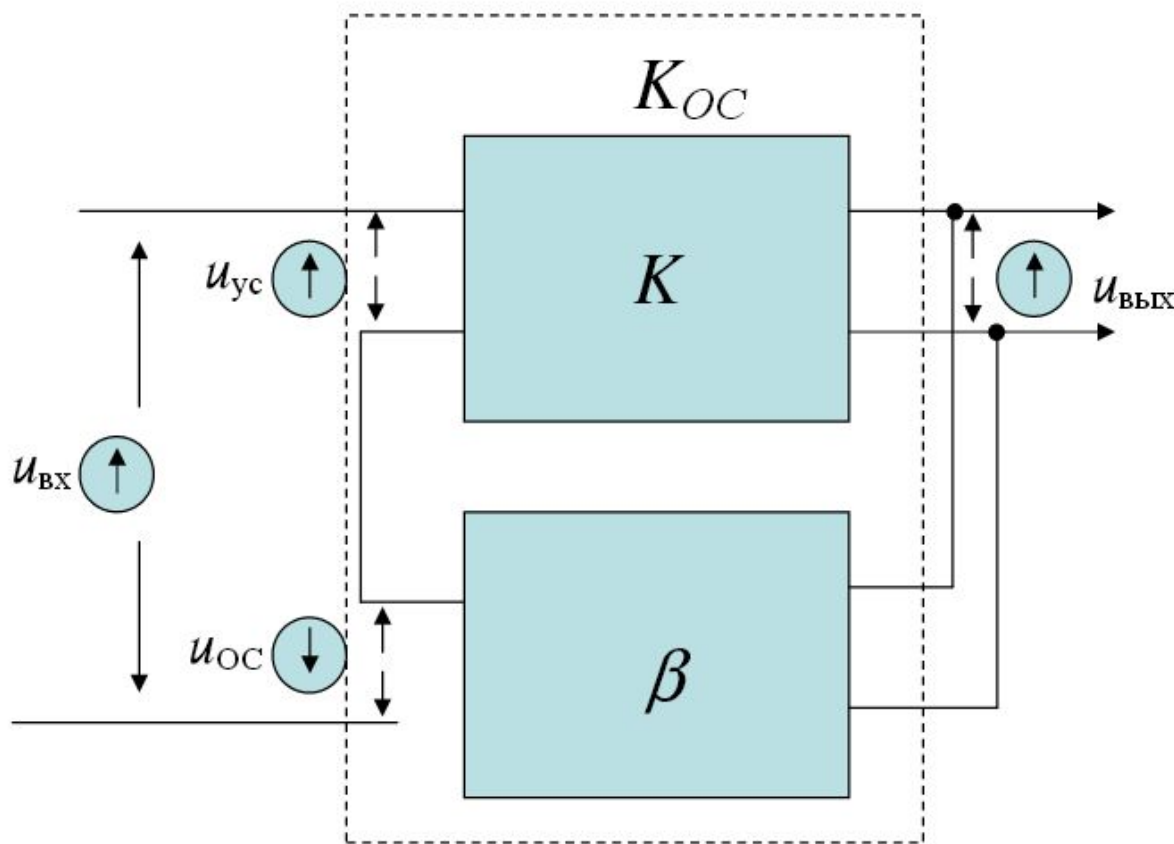


- В реальных ОУ АХ может не проходить через начало координат



## ОУ с цепью ОС

- ОС может быть положительной (сигнал с выхода подается на неинвертирующий вход) и отрицательной (сигнал с выхода на инвертирующий вход).
- Схема усилителя, охваченного ООС:



## ОУ с цепью ОС

Напряжение с выхода усилителя  $u_{\text{вых}}$  прикладывается ко входу цепи обратной связи, которая делит его в  $\beta$  раз.

Коэффициент усиления без ОС:

$$K = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{ус}}}$$

Коэффициент усиления с ОС:

$$K_{\text{ОС}} = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}}$$

$u_{\text{ус}} = u_{\text{вх}} + u_{\text{ОС}}$ ,  $u_{\text{вх}} = u_{\text{ус}} - u_{\text{ОС}}$ ,  $u_{\text{ОС}} = \beta \cdot u_{\text{вых}}$ . Тогда:

$$K_{\text{ОС}} = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{вх}}} = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{ус}} - u_{\text{ОС}}} = \frac{u_{\text{вых}}}{u_{\text{ус}} - \beta u_{\text{вых}}}, \text{ или}$$

$$K_{\text{ОС}} = \frac{K}{1 - \beta K}. \text{ Если } \beta K \gg 1, \text{ то } K_{\text{ОС}} \approx \frac{1}{\beta}.$$

## ОУ с цепью ООС

Тогда, при достаточно больших коэффициентах усиления разомкнутого усилителя  $K$ , коэффициент усиления охваченного обратной связью усилителя  $K_{oc}$  определяется только параметрами цепи обратной связи.

$$K_{и.оос} = K / ( 1 + K \cdot K_{ос} )$$

где:  $K$  – коэффициент усиления без обратной связи,

$K_{ос} = U_{ос} / U_{вых}$  – коэффициент обратной связи, равный отношению напряжения обратной связи  $U_{ос}$  к выходному напряжению  $U_{вых}$ . Величина коэффициента ООС находится в области значений  $K_{ос} = 0 \div 1$ .

Произведение  $K \cdot K_{ос} = g$  называют коэффициентом петлевого усиления, а  $( 1 + K \cdot K_{ос} )$  – глубиной обратной связи.

При отсутствии ООС ( $K_{ос} = 0$ )

$$K_{и.оос} = K \gg 1 \quad ( K = 10^3 \div 10^6 ).$$

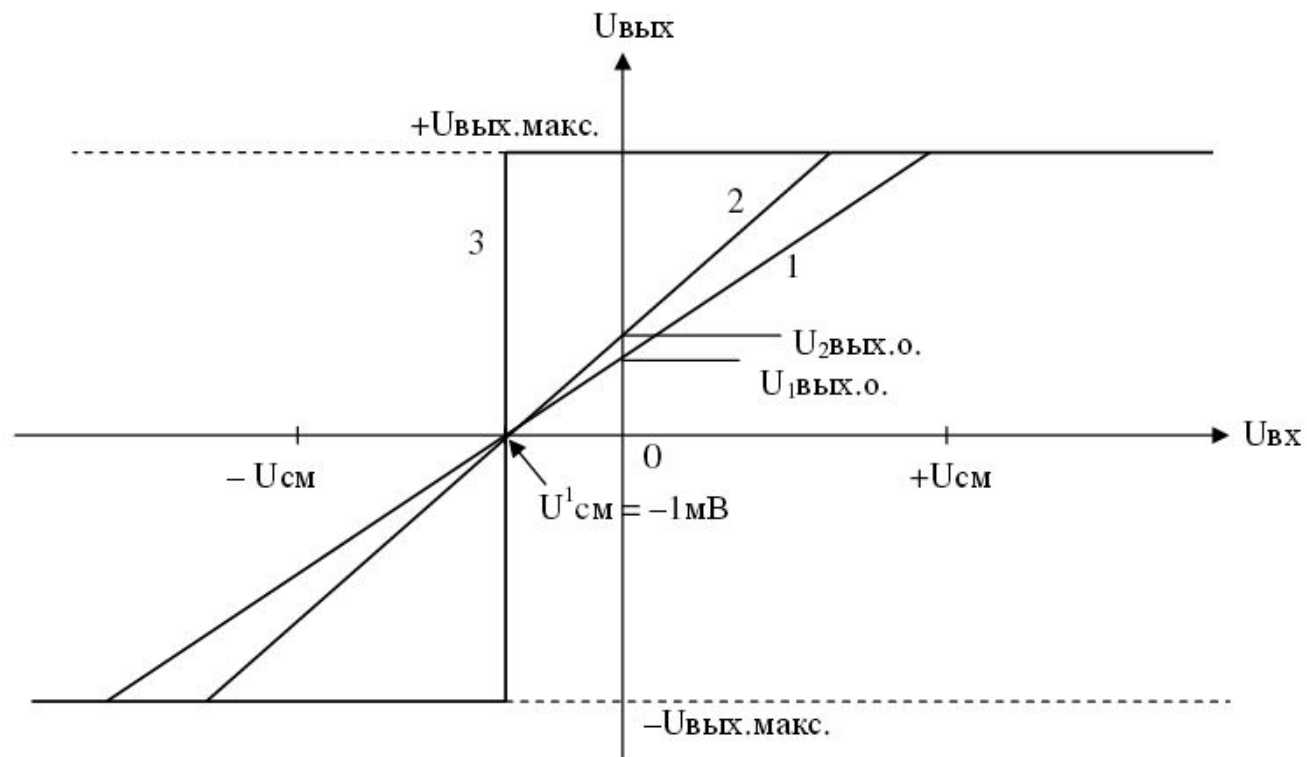
Если  $K_{ос} = 1$  ( имеет место стопроцентная ООС ), то  
 $K_{и.оос} = K / ( 1 + K ) \approx 1$ .

При построения устройств на ОУ с ООС, обычно  $g = K \cdot K_{ос} \gg 1$ , тогда коэффициент усиления устройства

$$K_{и.оос} = 1 / K_{ос}.$$

# Напряжение смещения и АХ ОУ с ООС

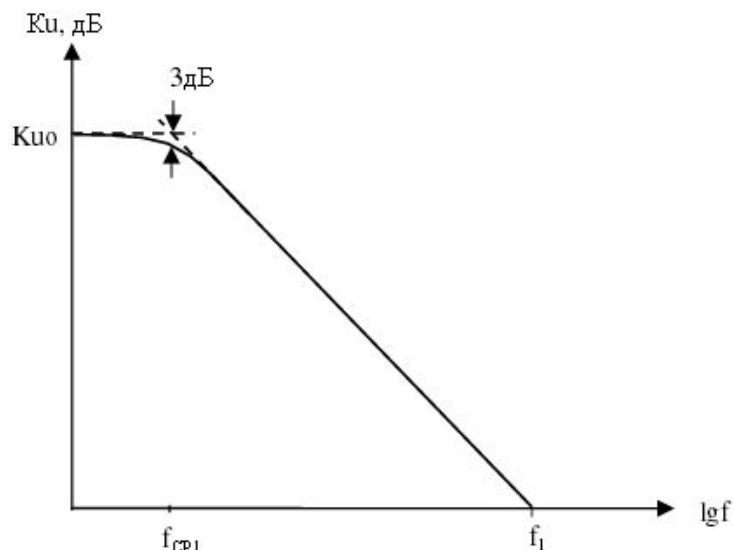
- В реальных ОУ АХ не проходит через начало координат.



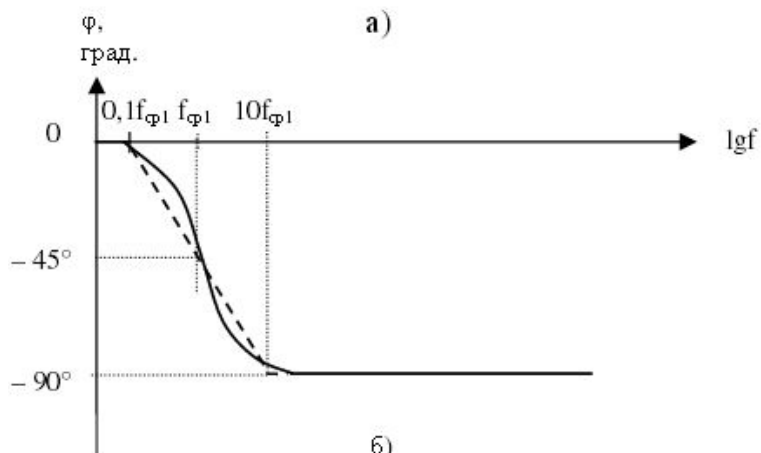
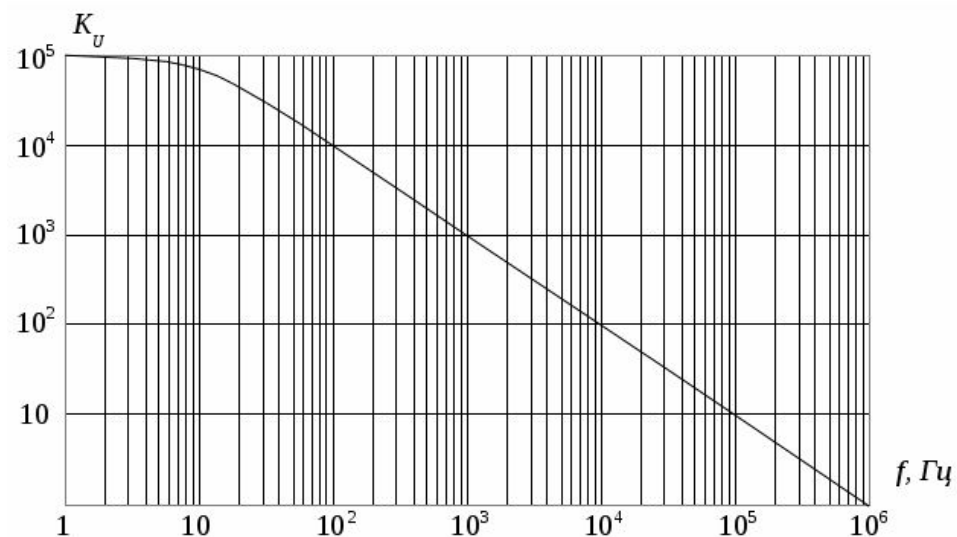
- характеристика 1 снята при коэффициенте усиления  $K_{и.оос.1}$ ,
- характеристика 2 – при  $K_{и.оос.2} > K_{и.оос.1}$ ,
- характеристика 3 – без обратной связи, при  $K \gg K_{и.оос.2}$ ,
- $U_{\text{см}}$  – справочное значение напряжения смещения ОУ указанного типа,
- $U_{\text{см}}^1$  – напряжение смещения данного экземпляра ОУ.

# АЧХ и ФЧХ ОУ

- АЧХ и ФЧХ ОУ удобно строить в логарифмическом по оси  $f$  масштабе (ЛАЧХ и ЛФЧХ).
- Типичный вид ЛАЧХ (а) и ЛФЧХ (б) ОУ:



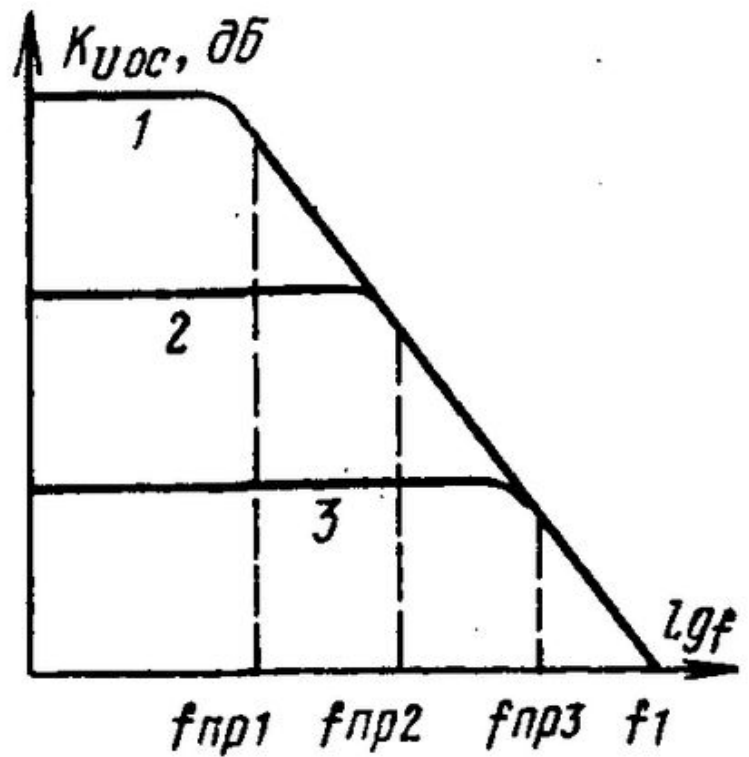
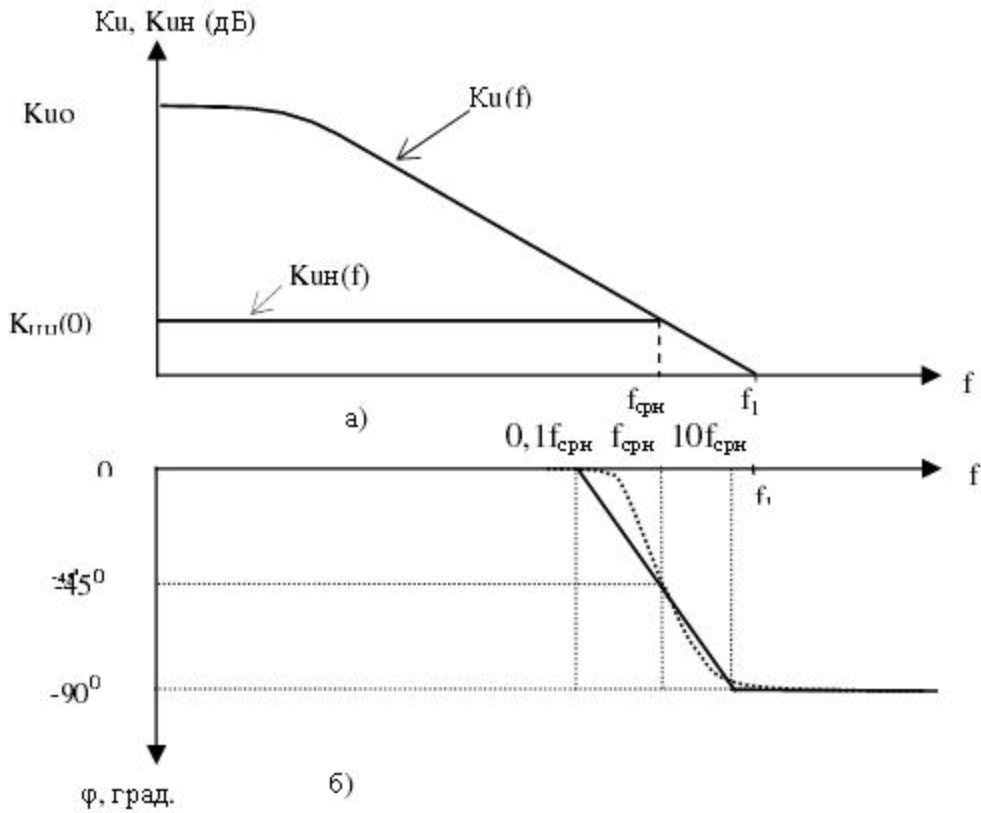
а)



б)

# АЧХ и ФЧХ ОУ с ООС

- Результат введения ООС - влияние на ЛАЧХ иЛФЧХ:



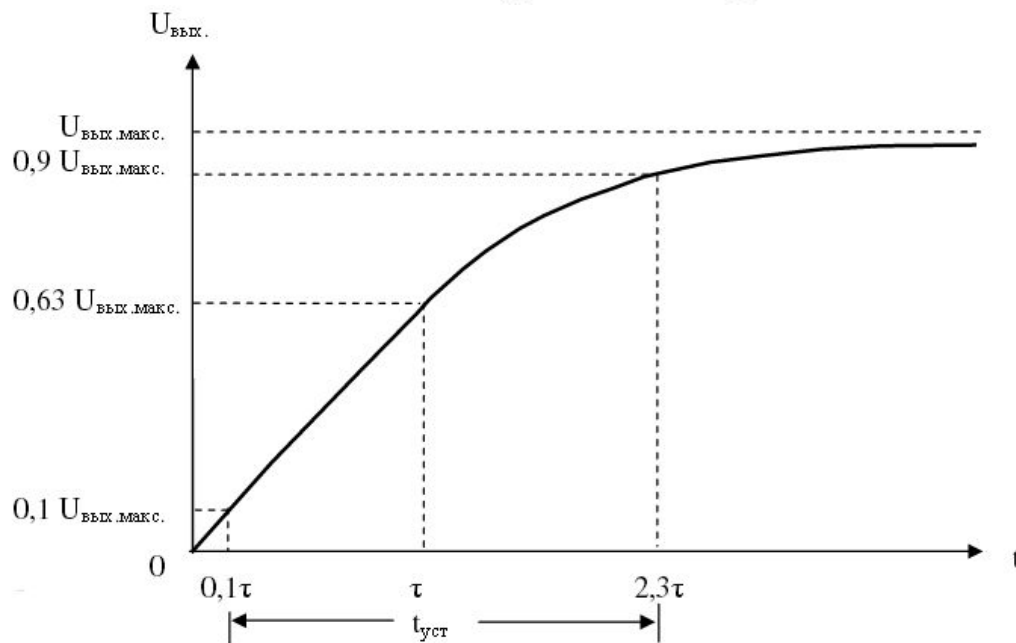
# Скорость нарастания и время установления напряжения

- ОУ - довольно медленное устройство. Причина - наличие в его схеме интегрирующих звеньев, а также корректирующей емкости.
- Скорость изменения напряжения на выходе:

$$v_{\text{вых. макс.}}^{\text{ОУ}} = \frac{d(U_{\text{вых}})}{dt} = \pm \frac{I_{\text{вых.л.}}}{C_{\kappa}}$$

- Реакция ОУ на единичный скачок (переходная характеристика) определяется временем установления:

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вых. макс.}} \cdot \left[ 1 - \exp\left(-\frac{t}{\tau}\right) \right]$$





# Типовые включения ОУ

- Схемы типовых включений ОУ

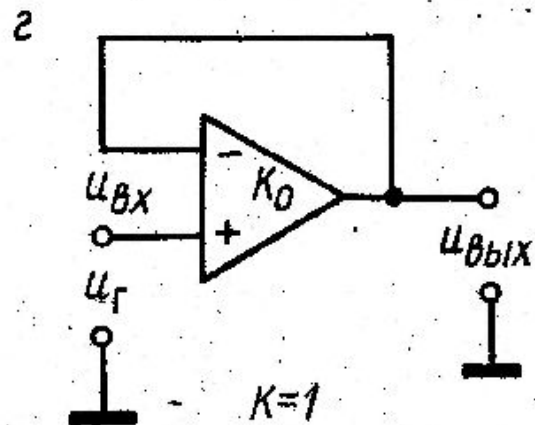
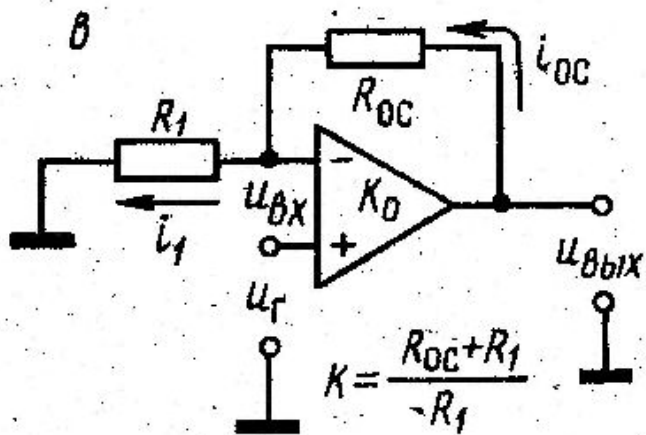
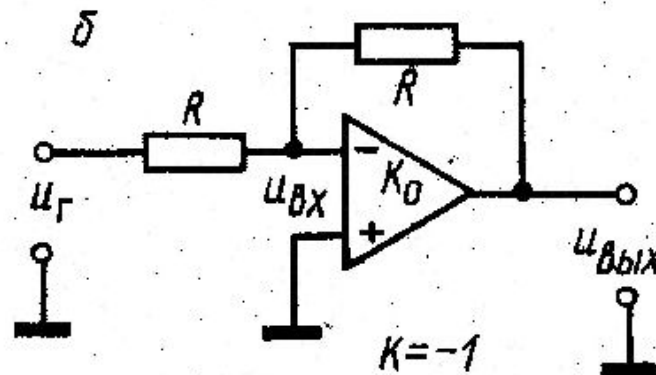
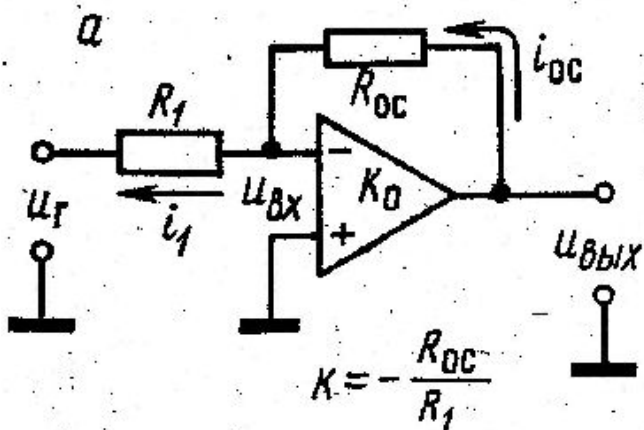


Рис. 5.18. Инвертирующее (а, б) и неинвертирующее (в, г) включения операционных усилителей



# Типовые включения ОУ

- Схемы типовых включений ОУ

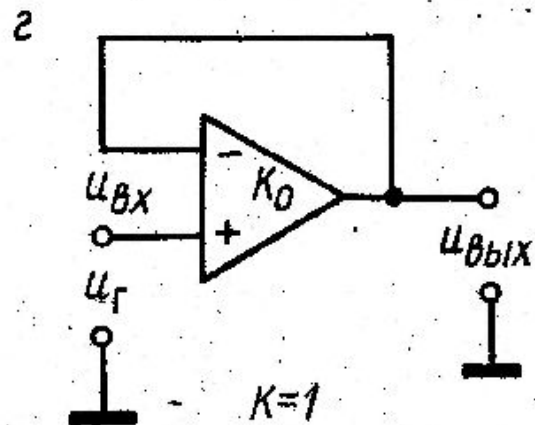
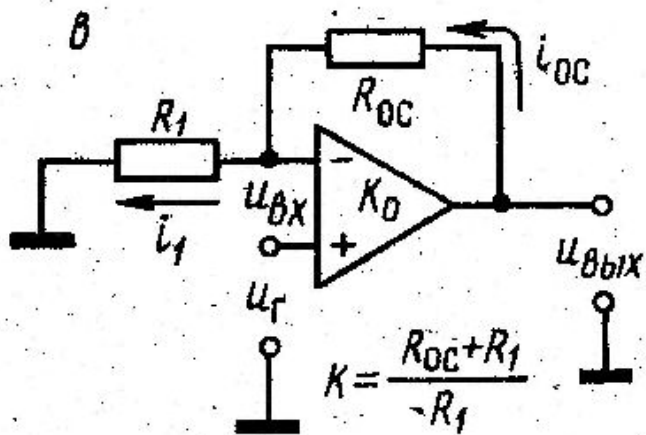
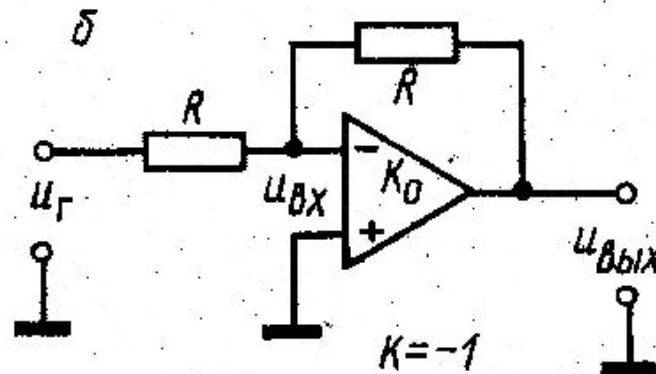
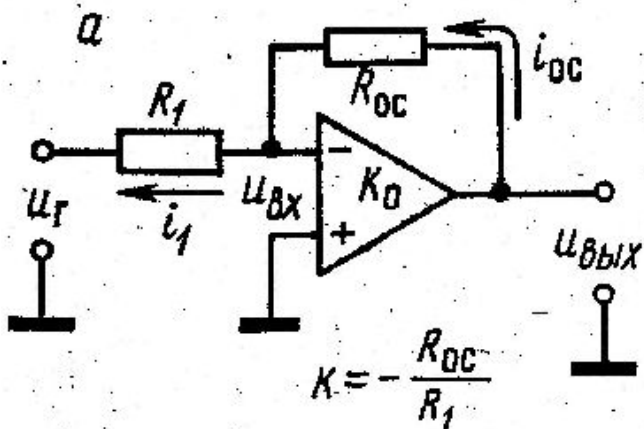


Рис. 5.18. Инвертирующее (а, б) и неинвертирующее (в, г) включения операционных усилителей

# Инвертирующий усилитель

- Через сопротивление обратной связи  $R_{oc}$  протекает ток:

$$i_{oc} = \frac{u_{вых} - u_{(-)}}{R_{oc}};$$

- Через  $R_1$  протекает ток  $i_1$ :

$$i_1 = \frac{u_{(-)} - u_{г}}{R_1}.$$

- Для идеального ОУ эти токи равны, и тогда

$$\frac{u_{вых} - u_{(-)}}{R_{oc}} = \frac{u_{(-)} - u_{г}}{R_1}.$$

- Напряжение на неинвертирующем входе равно 0, с учетом свойств идеального ОУ:

$$u_{(-)} = u_{вх} = 0$$

- Тогда:

$$u_{вых} = - \frac{R_{oc}}{R_1} u_{г}.$$

# Неинвертирующий усилитель

- Через сопротивление обратной связи  $R_{oc}$  протекает по-прежнему ток:

$$i_{oc} = \frac{u_{\text{ВЫХ}} - u_{(-)}}{R_{oc}};$$

- Через  $R_1$  протекает ток  $i_1$ :

$$i_1 = \frac{u_{(-)}}{R_1}.$$

- Так как для идеального ОУ эти токи равны, то получим

$$u_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{oc} + R_1}{R_1} u_{(-)} \Big|_{u_{\text{ВХ}}=0} = \frac{R_{oc} + R_1}{R_1} u_{\Gamma}.$$

- Из этих выражений следует, что на основе ОУ можно простым способом реализовать инвертирующий или неинвертирующий усилитель напряжения с требуемым коэффициентом усиления, в том числе инвертор ( $K=-1$ ) и повторитель напряжения ( $K=1$ ).

# Дифференциальные усилители

- Коэффициенты усиления обеих схем по инвертирующему и неинвертирующему входу составляют соответственно  $-K$  и  $+K$ .

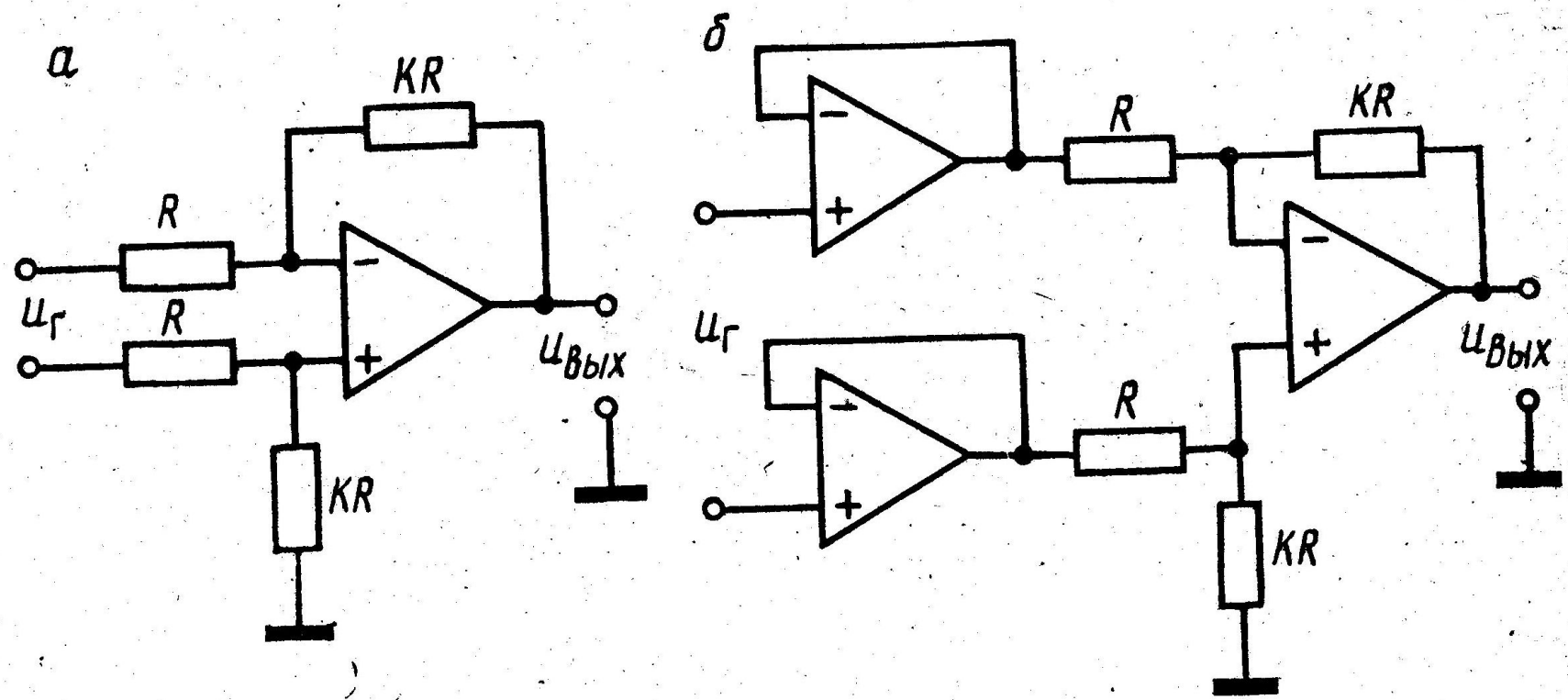
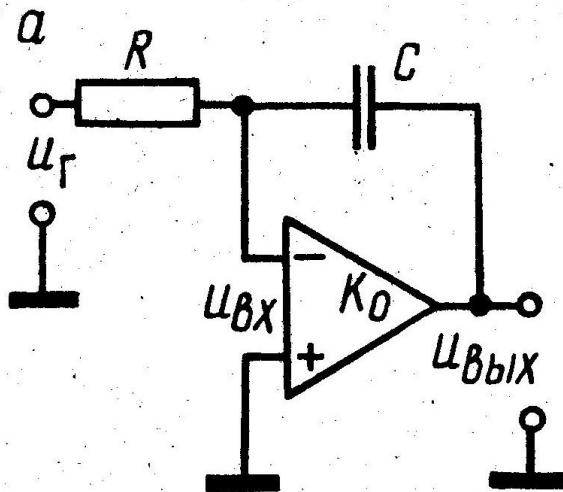


Рис. 5.19. Дифференциальные усилители на базе ОУ: простейший (а), с большим входным сопротивлением (б)

# Интегратор на ОУ



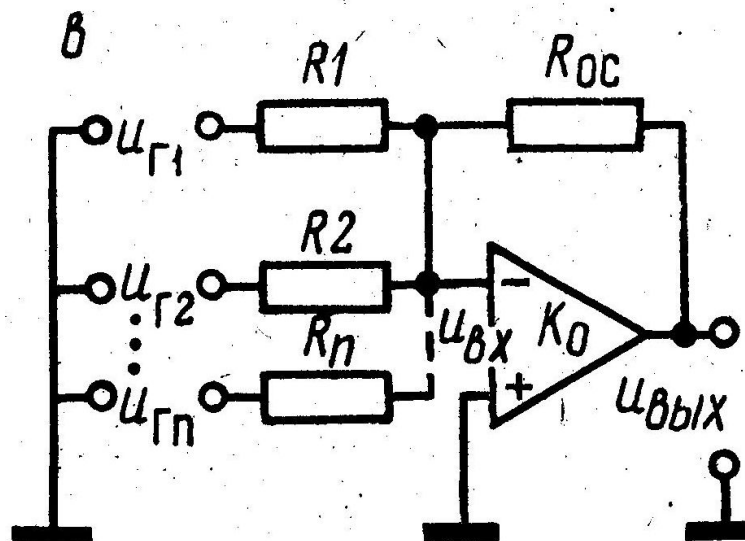
Значения токов через емкость и сопротивление можно приравнять:

$$C \frac{d(u_{\text{ВЫХ}} - u_{\text{ВХ}})}{dt} = \frac{u_{\text{ВХ}} - u_{\Gamma}}{R}.$$

Тогда с учетом свойств идеального ОУ  $u_{\text{ВХ}} \approx 0$  и поэтому

$$u_{\text{ВЫХ}} \approx - \frac{1}{RC} \int u_{\Gamma} dt.$$

# Сумматор на ОУ



В этой схеме ток через сопротивление  $R_{oc}$  равен сумме токов через резисторы  $R_1$ - $R_n$ , т.е.

$$\frac{u_{ВЫХ} - u_{ВХ}}{R_{oc}} = \frac{u_{ВХ} - u_{Г1}}{R_1} + \frac{u_{ВХ} - u_{Г2}}{R_2} + \dots + \frac{u_{ВХ} - u_{Гn}}{R_n}$$

или с

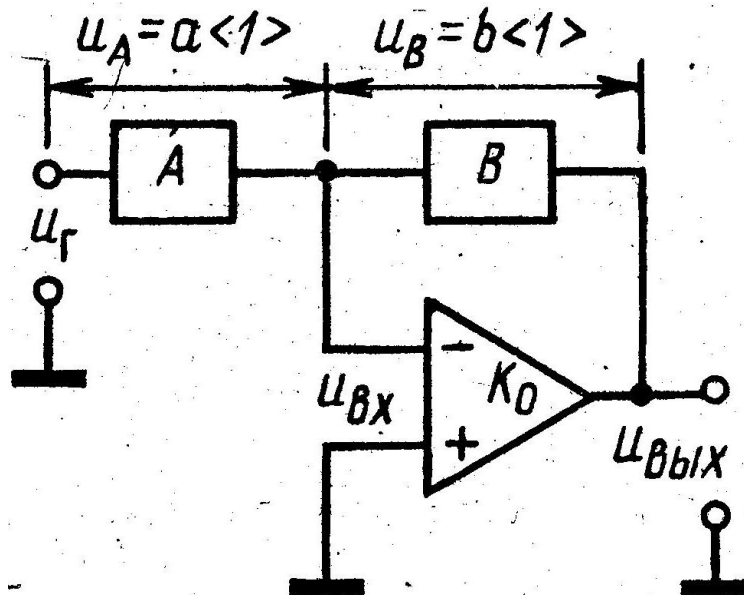
$$u_{ВЫХ} = - \left( \frac{R_{oc}}{R_1} u_{Г1} + \frac{R_{oc}}{R_2} u_{Г2} + \dots + \frac{R_{oc}}{R_n} u_{Гn} \right).$$

Величины  $R_{oc}/R^i$  называются масштабными коэффициентами. При их равенстве получается сумматор (с инверсией).



# ОУ как функциональный преобразователь

- Рассмотрим обобщенную схему:



Если  $A$  и  $B$  - элементы с различными ВАХ, то появляется возможность преобразовывать напряжения практически по любому закону.

Пусть напряжение  $u_A$  на элементе  $A$  как функция тока определяется оператором  $a \langle \rangle$ :  $u_A = a \langle i \rangle$ ; напряжение на элементе в цепи ОС  $u_B$  определяется через оператор  $b \langle \rangle$ :  $u_B = b \langle i \rangle$ ; Зависимости токов от напряжений определены обратными операторами  $a^{-1} \langle u \rangle$  и  $b^{-1} \langle u \rangle$ .