

# Операционный усилитель

# Операционный усилитель

Операционным усилителем (ОУ) принято называть высококачественный многокаскадный интегральный усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и одноканальным выходом, предназначенный для работы с цепями обратных связей, для усиления сигналов переменного или постоянного токов.

Название происходит от использования этого типа усилителя в аналоговых вычислительных машинах (АВМ), где он выполнял различные математические операции (сложение, вычитание, интегрирование и т.д.) над аналоговыми сигналами. Изготавливались ОУ для первых АВМ на лампах или позднее на дискретных транзисторах, но их сложная настройка, большие габариты и стоимость делало их сложными приборами для решения специфических задач.

В настоящее время ОУ выполняют роль многофункциональных узлов при реализации разнообразных устройств электроники различного назначения. Они применяются для усиления, ограничения, перемножения, частотной фильтрации, генерации, стабилизации и т.д. сигналов в устройствах непрерывного и импульсного действия.

После того, как такие усилители были изготовлены в виде интегральных схем они оказались чрезвычайно дешевыми и применяются для выполнения любых операций, где требуется усиление электрического сигнала. Это наиболее распространенная аналоговая интегральная схема.

# История создания



1940 г.

- первые промышленные ламповые ОУ на паре двойных триодов (электронных ламп)

1963-  
1968 г.г.

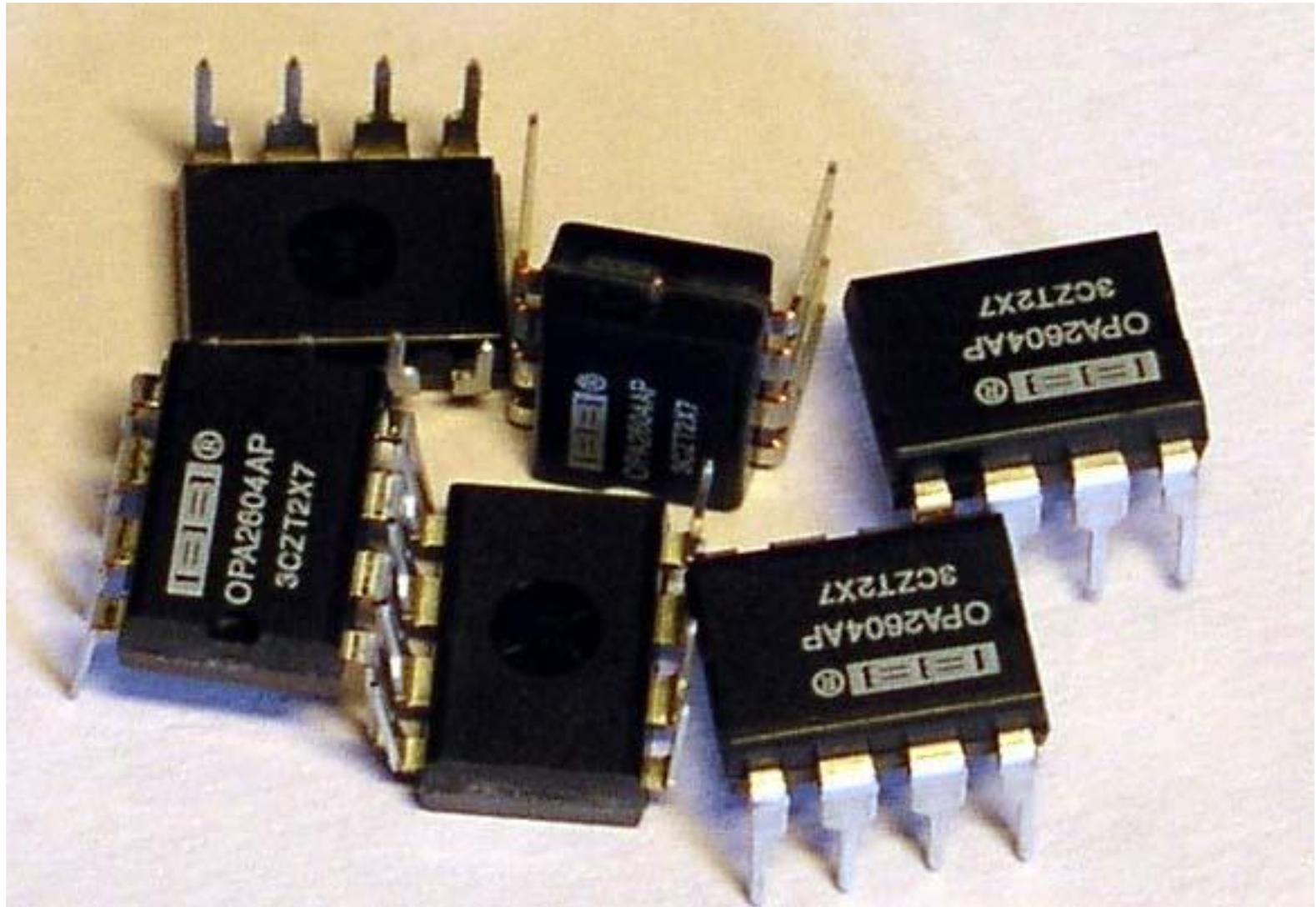
- первый интегральный ОУ только для военных целей
- первый доступный интегральный ОУ
- первый ОУ со встроенной частотной коррекцией



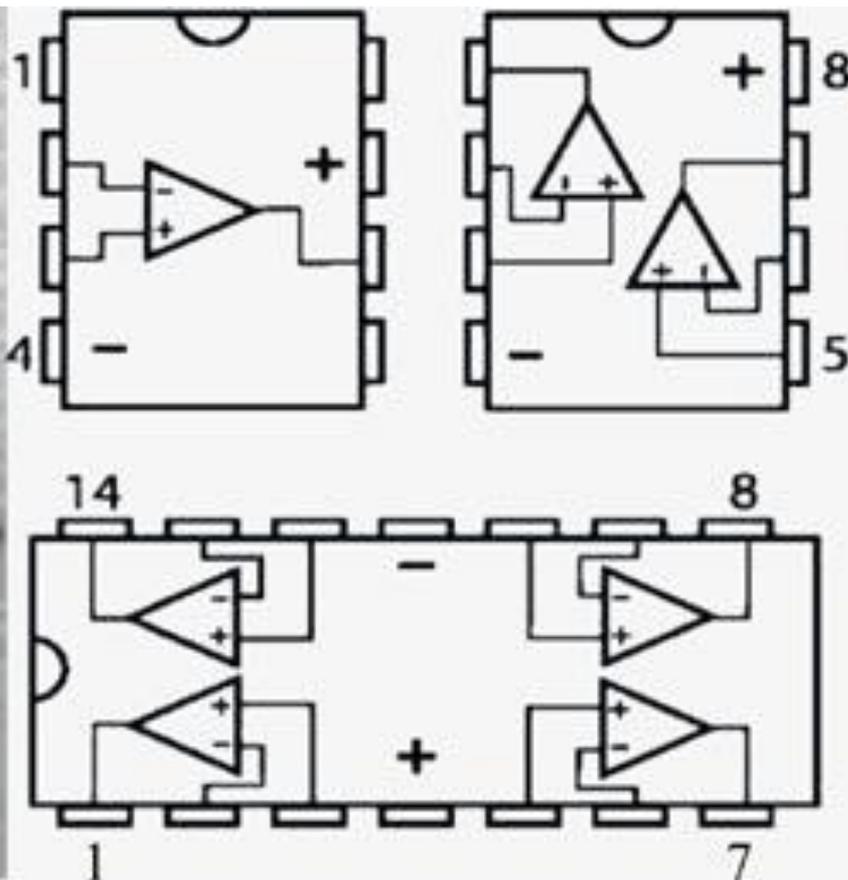
1970-  
1980г.г.

- ОУ на полевых транзисторах с p-n переходом
- ОУ на полевых транзисторах с изолированным каналом

# Операционные усилители



# Операционные усилители в стандартных корпусах с 14 и 8 выводами



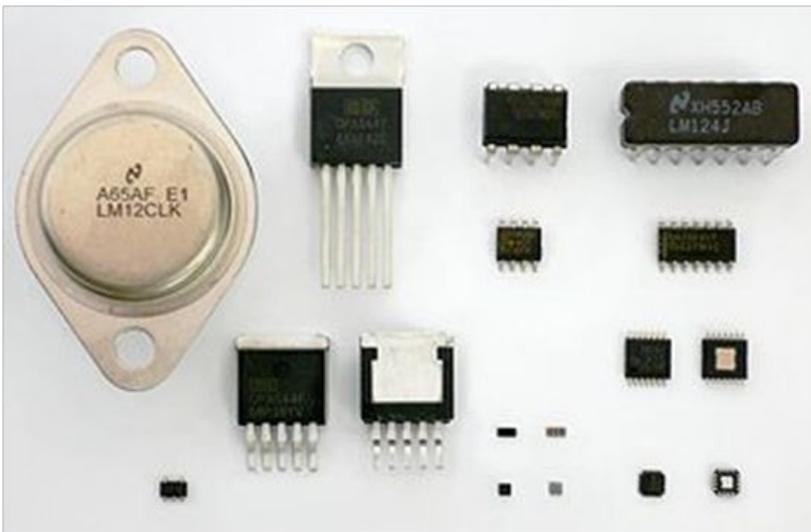


Операционные усилители **серии 140**



# Операционный усилитель

## Общие сведения.



**Операционный усилитель (ОУ)** – универсальный функциональный элемент, широко используемый в современных схемах для формирования и преобразования информационных сигналов различного назначения, чаще выполняемый в микросхемном исполнении.

Он представляет собой **усилитель постоянного тока** с дифференциальным входом и, как правило, единственным выходом, имеющий **высокий коэффициент усиления**. ОУ почти всегда используются в схемах с глубокой отрицательной обратной связью.

### Его особенности:

- дифференциальный вход;
- большой коэффициент усиления;
- большое входное сопротивление;
- малое выходное сопротивление;
- широкий частотный диапазон

# Операционные усилители

• В настоящее время в основном используются интегральные ОУ на основе полупроводниковых ИС. Интегральные ОУ, изготавливаемые в массовых количествах различными фирмами, получили широкое распространение благодаря их низкой стоимости, малым размерам и удобству применения для решения самых различных задач усиления, фильтрации, преобразования и генерирования маломощных сигналов различной формы.

## Описание структурной схемы ОУ.

• Первый каскад ОУ  $A_1$  на рис. это дифференциальный усилитель (ДУ).

• ДУ имеет большой коэффициент усиления для разностных входных сигналов ( $U_2 - U_1$  на рис.) и низкий коэффициент усиления для синфазных сигналов. Синфазным называются подаваемые одновременно на оба входа сигналы с одинаковой амплитудой и фазой. Кроме того, ДУ имеет высокое входное сопротивление.

• Входной каскад ДУ это наиболее ответственный узел ОУ, т.к. он определяет входное сопротивление, напряжение смещения, подавление синфазного сигнала и шумы всего ОУ. Входные каскады

• ДУ могут быть выполнены на биполярных транзисторах или полевых транзисторах. Для уменьшения входных токов во входных каскадах ДУ используются биполярные транзисторы со сверх большими величинами коэффициента усиления  $\beta \approx 4000 \div 10000$  - (супербета транзисторы). В этом случае ток базы будет равным  $I_B = I_K / \beta \approx 0.1 \div 1$  нА, где  $I_K$  – ток коллектора входных транзисторов (для входных каскадов работающих в режиме микротоков он составляет величины нескольких микроампер). Достоинством ДУ на биполярных транзисторах является малое напряжение смещения и малая зависимость этого напряжения и входного тока ОУ от температуры.

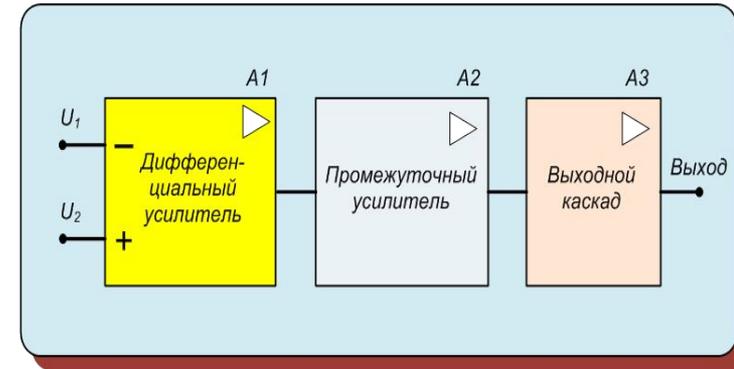


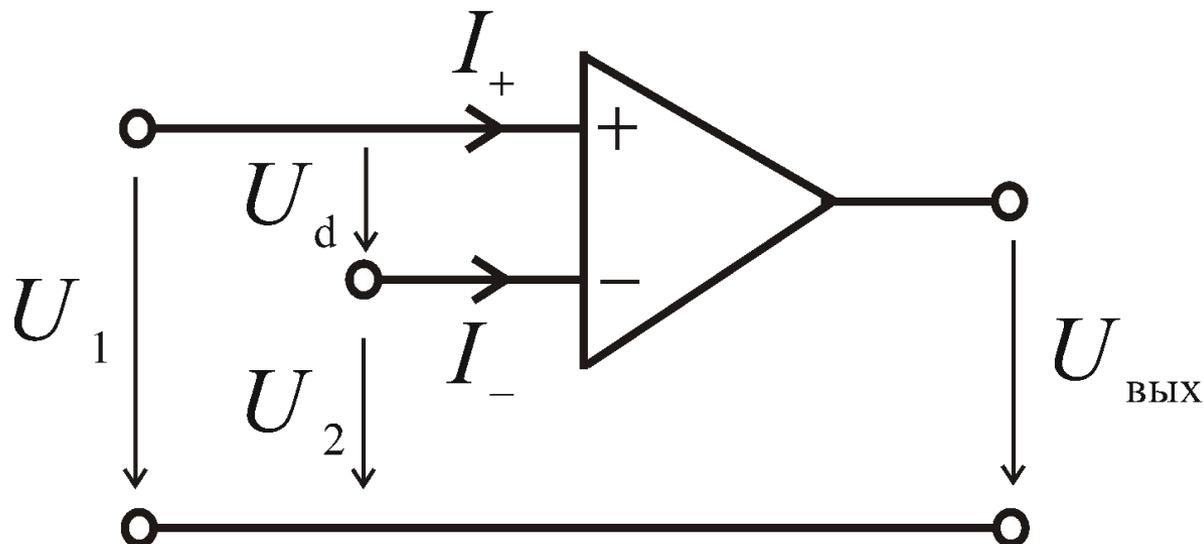
Рис.. Структурная схема ОУ

# Операционные усилители

- Входные каскады, выполненные на полевых транзисторах, имеют очень малые входные токи и очень большое входное сопротивление, но напряжение смещения у них, как правило, на порядок больше чем у каскадов биполярных транзисторах. Но для схем, где требования к напряжению смещения небольшие, а важно большое входное сопротивление, ОУ со входами на полевых транзисторах находят широкое применение.
- За входным каскадом ОУ следует один или несколько промежуточных каскадов, которые обеспечивают основное усиления сигнала по напряжению  $A_2$  (рис.8.3.). Этот каскад также обеспечивает нулевое напряжение на выходе ОУ в состоянии покоя, т.е. при отсутствии входных сигналов. Промежуточный каскад  $A_2$  также в основном определяет полосу пропускания и быстродействие ОУ.
- В современных ОУ за счёт большого усиления каскадов  $A_1$  и  $A_2$  общий коэффициент усиления достигает величин более  $10^6$ .  
Выходной каскад ОУ  $A_3$  обеспечивает низкое выходное сопротивление

# Операционные усилители

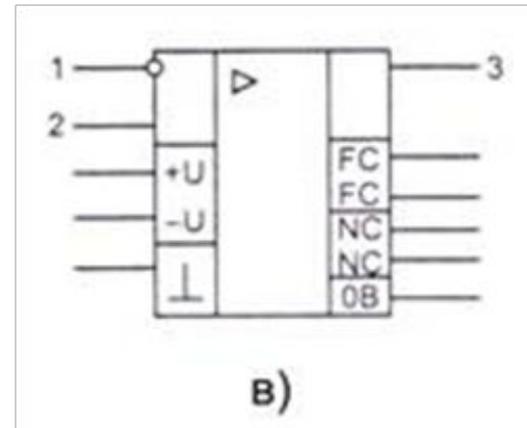
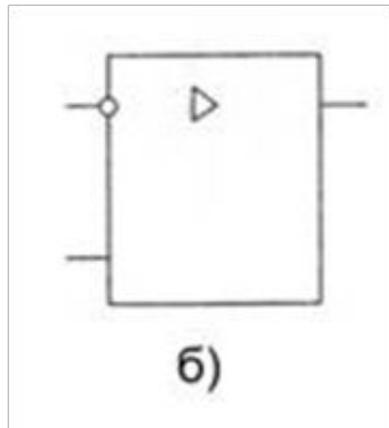
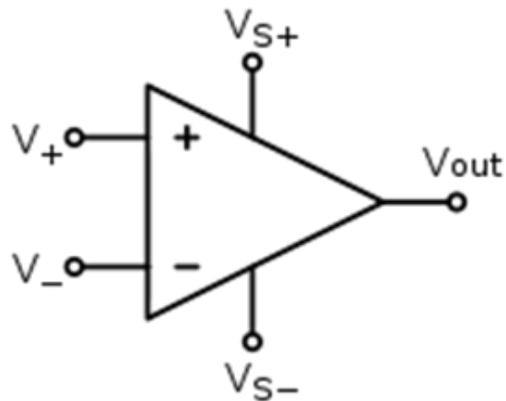
Условное обозначение ОУ



Неинвертирующий вход обозначен знаком «+»

Инвертирующий вход обозначен знаком «-».

# Обозначения операционного усилителя на схемах.



**Выводы** имеют следующее значение:

**$U+$** : неинвертирующий вход

**$U-$** : инвертирующий вход

**$U_{out}$** : выход

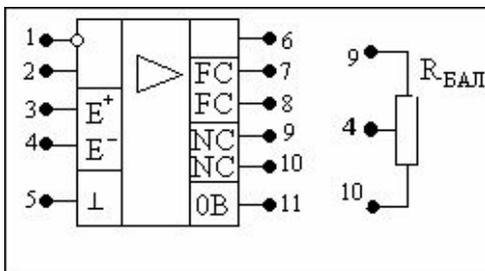
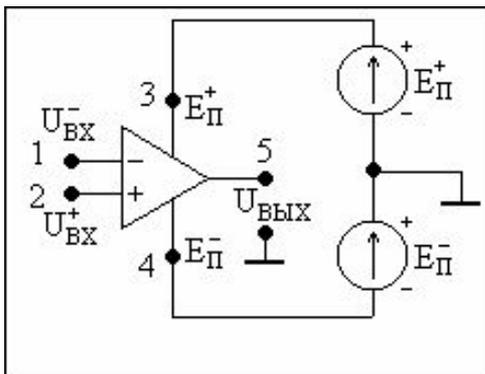
**$U_{S+}$** : плюс источника питания (также  $VDD$ ,  $VCC$ , или  $VCC +$ )

**$U_{S-}$** : минус источника питания (также  $VSS$ ,  $VEE$ , или  $VCC -$ )

Часто **выводы питания не рисуют** на схеме, чтобы её не загромождать

Напряжение  $U_{диф}$  между инвертирующим и неинвертирующим входами называют **дифференциальным напряжением**.  $U_{диф} = U_{вх2} - U_{вх1}$ .  
 **$U_{вых} = k \cdot U_{диф}$** , где  **$k$**  – коэффициент усиления **ОУ**.

# Условное обозначение и схема включения ОУ по постоянному току



В учебной и научной литературе ОУ обозначают треугольником с пятью, как минимум, выводами.

Выводы ОУ имеют следующие названия:

1 – инвертирующий вход (обозначен знаком «-» или «o»),  $U^-_{ВХ}$  – напряжение на инвертирующем входе. Сигнал на этом входе и выходе находятся в противофазе.

2 – неинвертирующий вход (обозначен знаком «+»),  $U^+_{ВХ}$  – напряжение на неинвертирующем входе. Сигнал на этом входе и выходе находятся в одной фазе.

$$E^+_П, E^-_П$$

Выводы 3, 4, обозначенные  $E^+_П, E^-_П$ , предназначены для подключения питающего напряжения. Обычно ОУ требует двухполярного напряжения питания.

5 – выход, к нему подключается сопротивление нагрузки. Основное уравнение ОУ, которое показывает связь между входными и выходными напряжениями записывается так  $U_{ВЫХ} = K_{ОУ}(U^+_{ВХ} - U^-_{ВХ})$ ,

где  $K_{ОУ}$  – коэффициент усиления ОУ.

В технической литературе ОУ обозначается в виде прямого угла. При этом назначение выводов следующее:

1, 2 – входы ОУ.

3, 4 – для подключения питающего напряжения.

5 – вывод соединен с корпусом ОУ, его обозначается как заземление.

6 – выход ОУ.

7, 8 – выводы для подключения элементов частотной коррекции. Обычно ОУ имеет большой коэффициент усиления и работает в схемах с отрицательной обратной связью, а поэтому возможно его самовозбуждение. Для устранения самовозбуждения между выводами 7, 8 подключают корректирующий конденсатор  $S_k$ , который так корректирует ЧХ коэффициента усиления, что при введении отрицательной обратной связи схема на ОУ не возбудится, т.е. не превратится в генератор. Конкретные значения емкости  $S_k$  указывают в справочниках для ОУ. Многие ОУ не имеют внешнего конденсатора, он встроен в схему ОУ, такие ОУ называют с внутренней коррекцией.

9, 10 – предназначены для подключения элементов балансировки ОУ. ОУ считается сбалансированным, если  $U_{ВЫХ} = 0$ , когда  $U^+_{ВХ} = U^-_{ВХ} = 0$ , однако это не всегда выполняется из-за технологического разброса параметров элементов схемы ОУ. Для устранения разбаланса, между выводами 9, 10, 4, включают переменный резистор  $R_{БАЛ}$  с помощью которого и достигается условие балансировки. 11 – общая точка схемы ОУ.

# Назначение выводов ОУ

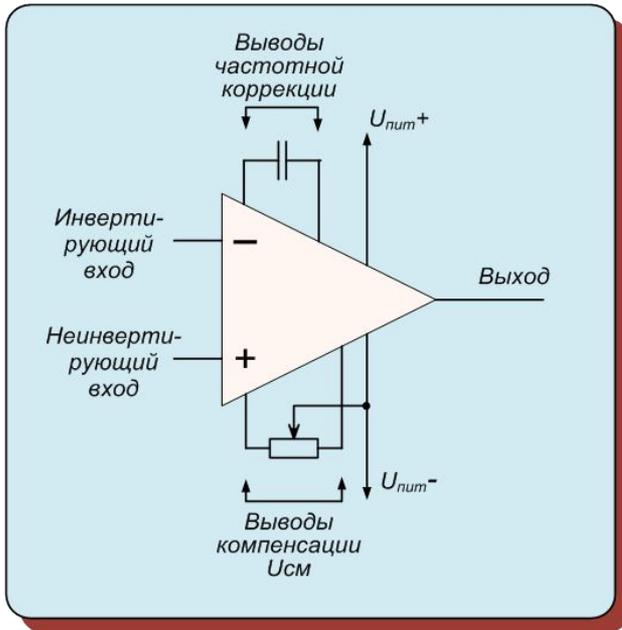


Рис. Основные выводы ОУ.

Инвертирующий вход служит для подачи входного сигнала, при этом на выходе ОУ будет усиленный сигнал, сдвинутый по фазе на  $180^\circ$ , т.е. сигнал инвертирован.

Выводы частотной коррекции предназначены для подключения корректирующих  $RC$  цепей, с помощью которых подавляется генерация ОУ. Некоторые типы ОУ имеют внутреннюю частотную коррекцию, поэтому выводы для подключения внешних корректирующих цепей у них отсутствуют. Выводы компенсации напряжения смещения предназначены для подключения балансирующих элементов, с помощью которых устанавливают нулевое выходное напряжение (при отсутствии сигнала на входе ОУ). Схемы подключения элементов балансировки для разных типов ОУ могут отличаться от показанных на рис. В некоторых типах ОУ для уменьшения стоимости выводы компенсации отсутствуют.

Через вывод  $U_{пит+}$  на ОУ подаётся положительное питание, а через вывод  $U_{пит-}$  подаётся отрицательное питание. Для большинства ОУ напряжение питания составляет  $3 \div 15$  В.

# Классификация ОУ

## ***По областям применения:***

- индустриальный стандарт
- прецизионные ОУ (в измерительных схемах)
- с малым входным током (электрометрические) ОУ
- микромощные и мощные (сильноточные)
- низковольтные и высоковольтные
- быстродействующие

## ***По входным сигналам:***

- Обычный двухвходовый ОУ, с тремя входами, одновходовый, с дифференциальным выходом.

## **Важнейшие правила, которые определяют поведение операционного усилителя с обратной связью:**

1. Выход операционного усилителя стремится к тому, чтобы разность напряжений между его входами была равна нулю.
2. Входы операционного усилителя ток не потребляют.

# Классификация ОУ

- 1. Универсальные ОУ** – самый распространённый тип операционных усилителей. Для этого класса ОУ характерно применение внутренней частотной коррекции и малая стоимость. Универсальные ОУ могут быть выполнены одиночными, по 2 или по 4 в одном корпусе ИС. Параметры современных универсальных ОУ вполне удовлетворительны для решения большинства схемотехнических задач.
  - 2. Микромощные ОУ.** Для аппаратуры с питанием от батарей гальванических элементов или аккумуляторов необходимо использовать электронную технику с малым потреблением энергии. Для этих целей разработаны микромощные ОУ с малым потребляемым током, а некоторые из них могут работать при низких питающих напряжениях. Кроме того, у некоторых ОУ этого класса предусмотрена возможность регулировки потребляемого тока, что можно использовать в схемах, в которых есть режим ожидания с малым расходом энергии источника питания.
  - 3. Прецизионные ОУ.** Для усиления сигналов малого уровня постоянного или низкочастотного переменного напряжения и там, где необходимо иметь очень стабильный коэффициент усиления (например, в измерительной аппаратуре) разработаны прецизионные ОУ. Они характеризуются очень малыми (до единиц и десятков микровольт) напряжением смещения, большим коэффициентом усиления и малым дрейфом основных параметров. Такие усилители используются для усиления сигналов от термодатчиков, тензодатчиков и в других измерительных приборах. Стоимость прецизионных ОУ, как правило, выше, чем универсальных ОУ, но и параметры их намного лучше.
  - 4. Быстродействующие ОУ.** Для скоростных ОУ характерна широкая полоса рабочих частот. В современных ОУ частота единичного усиления  $f_{гр}$  достигает величин более 1 ГГц. Эти ОУ имеют высокую скорость нарастания достигающую 6000 В/мкс.
  - 5. Мощные ОУ** Для управления электромеханическими устройствами, осветительными приборами и в генераторах сигналов используются ОУ с мощными выходными каскадами, выдающими ток до единиц ампер. Такие ОУ, как правило, рассеивают большую мощность и изготавливаются в корпусах, которые можно крепить на радиатор охлаждения. Такие ОУ имеют небольшой частотный диапазон (10...200 кГц) и другие параметры сравнимые с универсальными ОУ. В мощных ОУ используется защита от короткого замыкания и защита от перегрева.
  - 6. Специальные ОУ.** Для решения различных задач были разработаны специализированные ОУ:
    - Буферы** – имеющие фиксированный единичный коэффициент передачи, большое входное и малое выходное сопротивление, высокую скорость нарастания. Они применяются в основном для согласования высокоомного выходного сопротивления источника сигнала с малым входным сопротивлением нагрузки.
    - Малощумящие ОУ** – имеющие нормированные шумовые характеристики, используются в схемах, работающих с сигналами малых уровней (датчики, микрофоны и т.д.)
    - ОУ с малыми искажениями** – применяются для аудиоаппаратуры, в анализаторах спектра, в генераторах сигналов с малыми нелинейными искажениями.
- Номенклатура современных ОУ более широкая, чем представленная выше, и многие фирмы успешно разрабатывают новые операционные усилители.**

# Классификация ОУ по назначению

**1). ОУ общего или широкого применения.** Применяются наиболее часто, имеют средние значения своих параметров среди ОУ.

**2). Быстродействующие ОУ.** Их применяют для усиления импульсных и широкополосных сигналов. Для них характерно высокое значение скорости нарастания выходного напряжения

$$v > 100 \frac{V}{\mu\text{сек}}$$

**3). Прецизионные ОУ.** Это точно выполняющие преобразования над аналоговыми сигналами. Для них характерно следующее:

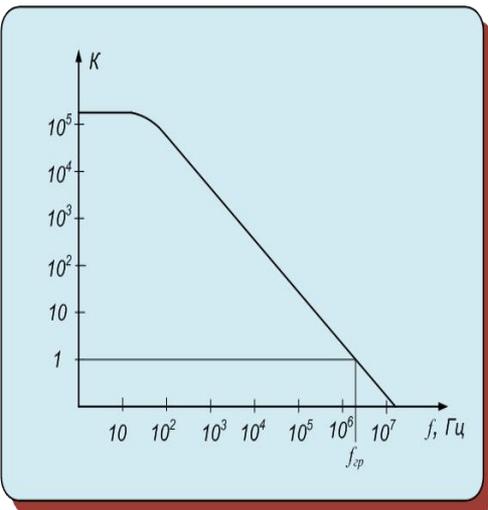
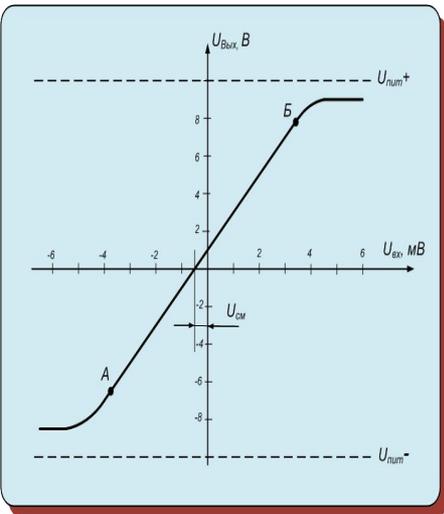
1.  $K_{OY}^0 > 10^7$  ; 2. малый дрейф выходного напряжения.

**4). Микромощные ОУ.** Они имеют малую потребляемую мощность и малое питающее напряжение.

Используются в автономных устройствах, т.е. где существует ограничение по питанию (радиоприемники, слуховые аппараты и т. д.).

**5). Программируемые ОУ.** Они имеют добавочный вывод напряжение, на котором позволяет  $P_{ном}$  управлять коэффициентом усиления, частотой единичного усиления или потребляемой мощностью.

# Основные параметры ОУ



## К основным параметрам ОУ относятся :

**1. Коэффициент усиления  $K$**  это коэффициент усиления ОУ без обратных связей. Для современных ОУ коэффициент усиления  $K \approx 10^3 \div 10^6$ . На рис.8.5 представлена передаточная характеристика ОУ – зависимость  $U_{вых}$  от  $U_{вх}$ . Как правило, используется линейный участок этой характеристики (отрезок АБ рис.8.5.). Угол наклона этого участка пропорционален коэффициенту усиления ОУ. Сверху и снизу передаточная характеристика ограничена напряжением питания ОУ.

•Рис.1. Передаточная характеристика ОУ

**2. Напряжение смещения  $U_{см}$ .** Это напряжение, которое надо подать на вход ОУ, чтобы скомпенсировать напряжение, возникающее внутри самого ОУ из-за разброса параметров усилительных каскадов (главным образом ДУ) и получить на выходе нулевое напряжение.

**3. Частота единичного усиления  $f_{гр}$**  – значение частоты сигнала, при которой коэффициент усиления становится равным единице (рис.8.6.)

Рис.2. Амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) ОУ без обратных связей.

**4. Скорость нарастания** – отношение изменения  $U_{вых}$  от 10% до 90% от своего номинального значения ко времени, за которое произошло это изменение.

**5. Входные токи  $I_{вх}$**  токи, протекающие через входные контакты ОУ – зависят от типа транзисторов входных каскадов ДУ.

**6. Разность входных токов  $\Delta I_{вх}$ ,** протекающих через входы ОУ.

**7. Температурный дрейф  $\Delta U_{см}$ .**

**8. Температурный дрейф  $\Delta I_{вх}$ .**

**9. Коэффициент ослабления синфазного сигнала.**

## Предельные параметры ОУ:

**1. Максимальное выходное напряжение  $U_{вых.макс}$**  максимальное напряжение на выходе ОУ при котором искажения не превышают заданного значения. В некоторых современных ОУ оно может быть почти равным напряжению питания ОУ.

**2. Максимальное входное дифференциальное напряжение и максимальное синфазное напряжение** это напряжение, подаваемое на входы ОУ превышение, которого приведёт к выходу параметров за установленные границы или к разрушению прибора.

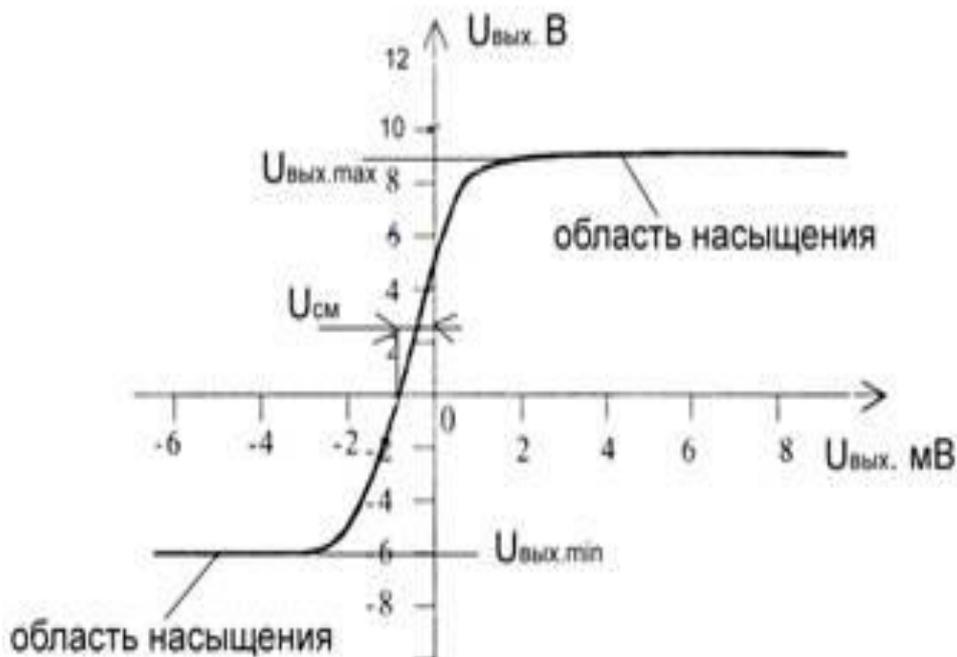
**3. Максимальный выходной ток  $I_{вых.макс}$**  - ток через выход ОУ, при котором гарантирована работоспособность ОУ.

# Передаточная характеристика ОУ

**Передаточная характеристика** – зависимость вида  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{диф}})$ ,

– зависимость выходного напряжения ОУ от входного

Значение напряжения  $U_{\text{диф}}$ , при котором выполняется условие  $U_{\text{вых}} = 0$ , называют **напряжением смещения** и обозначают через  $U_{\text{см}}$ .



Вертикальный участок передаточной характеристики называется **областью усиления**. Соответствующий этому диапазону режим работы называют **режимом усиления** (линейным, активным режимом).

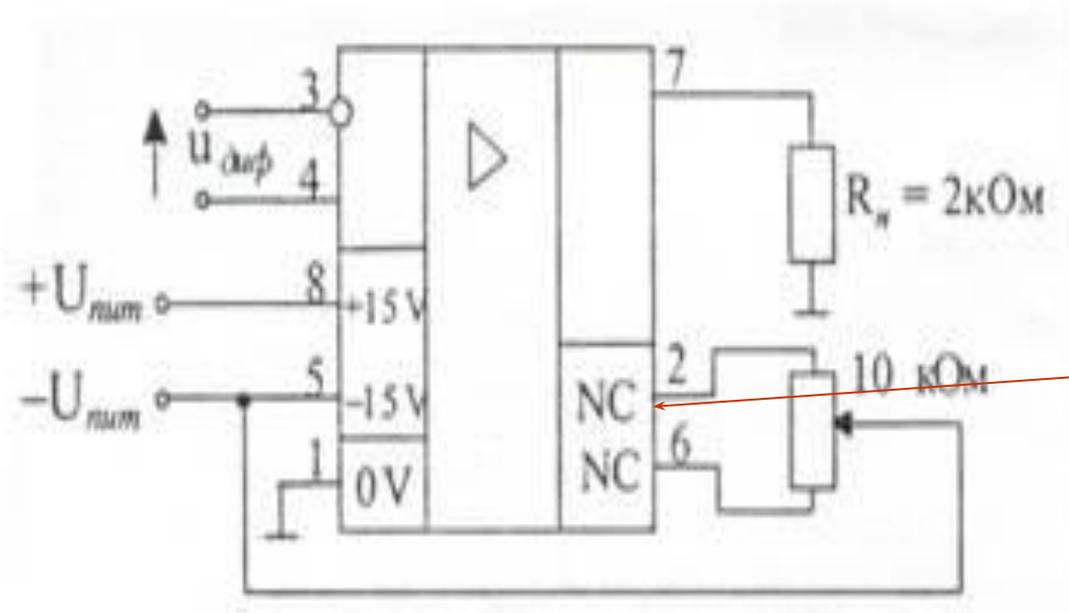
В линейном режиме  $U_{\text{вых}} = K \cdot U_{\text{диф}}$ , где  $K$  – коэффициент усиления по  $U$

В режиме насыщения  $U_{\text{вых.max}} = +U_{\text{пит.}}$   $U_{\text{вых.min}} = -U_{\text{пит.}}$

В линейном режиме при практических расчетах принимают  $U_{\text{диф}} = 0$ .

# Передаточная характеристика ОУ

**Меры по компенсации** напряжения смещения:  
балансировка, коррекция нуля, настройка нуля .



Для этого могут быть предусмотрены **выводы "NC"**, на которые нужно подавать напряжение, компенсирующее  $U_{\text{см}}$

ОУ имеет большое число параметров, которые можно разделить на следующие группы:

- 1) передаточные;
- 2) входные;
- 3) выходные;
- 4) частотные;
- 5) динамические;
- 6) дрейфовые;

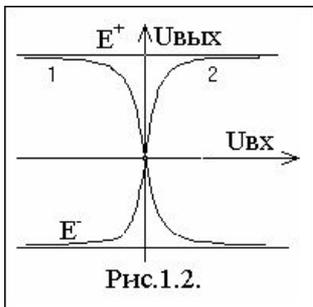


Рис.1.2.

$U_{ВХ}$

### 1. Передаточные параметры.

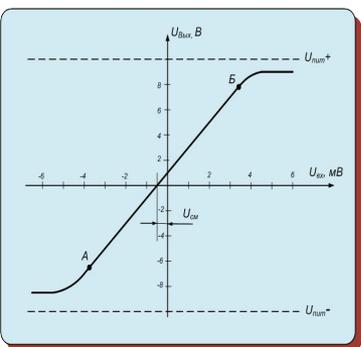
Основными среди этих характеристик являются следующие:

- 1). *Передаточная или амплитудная характеристика (АХ)* - это зависимость  $U_{ВЫХ} = F(U^+_{ВХ}, U^-_{ВХ})$ . Эту функцию двух переменных обычно упрощают и рассматривают так как показано на рис. где,
  1.  $U_{ВЫХ} = F(U^+_{ВХ})$ , при  $U^-_{ВХ} = 0$ ,
  2.  $U_{ВЫХ} = F(U^-_{ВХ})$ , при  $U^+_{ВХ} = 0$ .

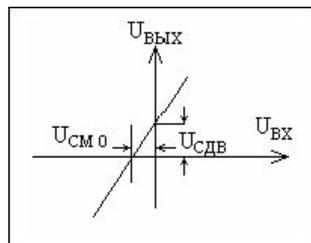
Различают два режима работы ОУ.  
 1. При малых входных сигналах наблюдается линейная зависимость между выходным и входными сигналами  $U_{ВЫХ} = K_{ОУ}(U^+_{ВХ} - U^-_{ВХ})$ ,

2. При больших входных сигналах ОУ переходит в состояние насыщения, т.е. его выходной сигнал принимает напряжение близкое к напряжению питания

$$U_{ВЫХ} = \begin{cases} E^+, U_{ВХ} > 0 \\ E^-, U_{ВХ} < 0 \end{cases}$$



$U_{ВЫХ}$



Для сбалансированного ОУ АХ проходит через ноль. Реальный ОУ обычно разбалансирован, т.е. его АХ смещена относительно нуля.

Разбаланс ОУ характеризуется параметрами:

2) Напряжение сдвига - это  $U_{сдв} = U_{ВЫХ} |_{U_{ВХ} = U^+_{ВХ} = U^-_{ВХ} = 0}$

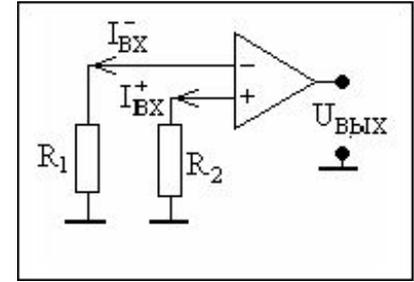
3) напряжение смещения нуля  $U_{см0}$ . Это такое входное напряжение, которое надо подать на вход, чтобы устранить разбаланс ОУ

К передаточным параметрам относят также:

4).  $K_{\text{ОУдиф}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХдиф}}}$  - коэффициент усиления дифференцирующего сигнала.

5).  $K_{\text{ОУСС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХСС}}}$  - коэффициент усиления синфазного сигнала.

6).  $K_{\text{КОСС}} = \frac{K_{\text{ОУдиф}}}{K_{\text{ОУСС}}}$  - коэффициент ослабления синфазного сигнала.



## 2. Входные параметры ОУ.

1). Величины входных токов  $I_{\text{ВХ}}^-, I_{\text{ВХ}}^+$ . Они зависят от транзисторов входного каскада

$$I_{\text{ВХ}}^-, I_{\text{ВХ}}^+ = \begin{cases} 10^{-6} \div 10^{-9} \text{ А, БипТр} - \rho \\ 10^{-9} \div 10^{-12} \text{ А, ПолТр} - \rho \end{cases}$$

Входные токи создают на резисторах  $R_1, R_2$  напряжения (рис.9),  $U_{R1}, U_{R2}$  не одинаковы, то на входе возникает дифференцирующая составляющая входного напряжения, которая будет усилена ОУ, что приведет к его разбалансу. Для устранения разбаланса ОУ за счет входных токов резисторы  $R_1, R_2$  должны выбираться одинаково.

2). Разность входных токов  $\Delta I_{\text{ВХ}} = I_{\text{ВХ}}^+ - I_{\text{ВХ}}^-$

3).  $U_{\text{maxcc}}$  - максимальное значение входного синфазного напряжения.

4). Величина входного сопротивления: различают входное дифференциальное и входное синфазное сопротивление.  $R_{\text{ВХдиф}}, R_{\text{ВХСС}}$

## 3. Выходные параметры.

1). Выходное сопротивление ОУ  $R_{\text{вых}}$ . Обычно  $R_{\text{вых}} = (10^2 - 10^3) \text{ Ом}$ . Однако, благодаря обратным связям  $R_{\text{вых}}$  оказывается значительно меньше.

2).  $U_{\text{ВЫХ max}}$  - максимальная амплитуда выходного напряжения  $U_{\text{ВЫХ max}} = (E_{\text{П}}^+ - 1,5) \text{ В}$

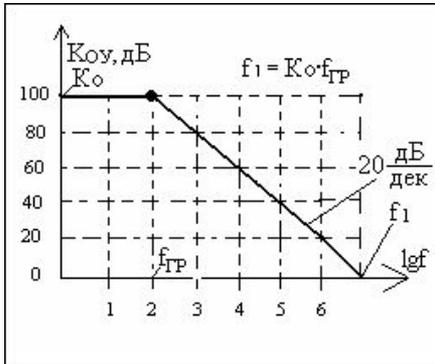
3). Максимальная величина выходного тока  $I_{\text{ВЫХ max}} \leq 10 \text{ мА}$  - для ОУ широкого применения).

4). Наличие защиты от КЗ.

## 4. Частотные параметры ОУ.

Их оценивают по графику зависимости коэффициента усиления от частоты. Эту зависимость обычно строят в логарифмическом масштабе и основные частотные параметры следующие:

1).  $f_{ГР}$  - граничная частота - это частота, на которой коэффициент усиления уменьшается в корень из двух раз, если график построен в линейном масштабе,  $(f_{ГР}) \cong 0,7K^0$



или на 3дБ, если график построен в логарифмическом масштабе  $K(f_{ГР}) = K_0 - 3дБ$ .

2).  $f_1$  - частота единичного усиления, это частота где или  $K(f_1)[дБ] = 0 дБ$ .

Частотные параметры ОУ связаны соотношением

## 5. Динамические параметры ОУ.

Они характеризуют быстрдействие переключения ОУ и количественно оцениваются следующими параметрами  $U_{ВЫХ 0,1}$

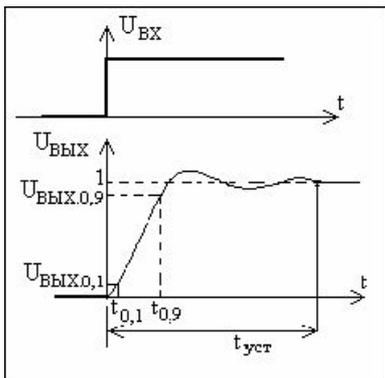
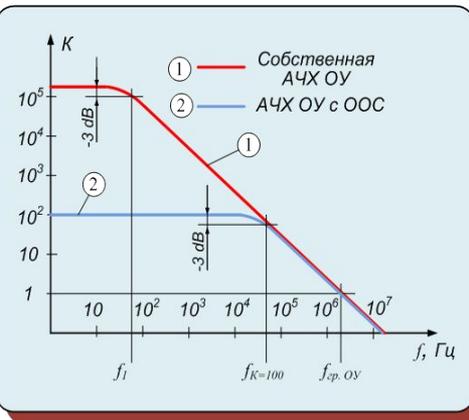
1. Скорость нарастания выходного сигнала  $t_{0,9} - t_{0,1}$

где  $t_{0,1}$  и  $t_{0,9}$  время достижения уровня  $U_{ВЫХ.0,1}$  и  $U_{ВЫХ.0,9}$  от стационарного значения принятого за единицу;

2.  $t_{уст}$  - время установления выходного напряжения своего стационарного значения с заданной точностью.

6. Дрейфовые параметры.

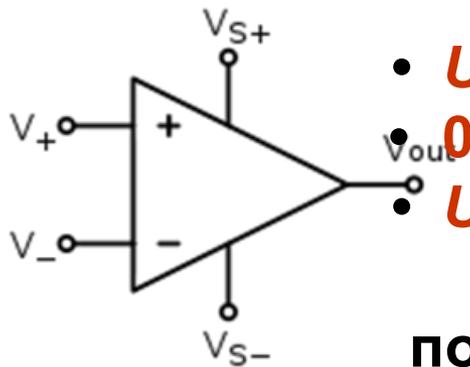
Они характеризуют зависимость перечисленных параметров от температуры окружающей среды и от изменения



# Основы функционирования

## Питание

В общем случае ОУ использует **двухполярное питание**, то есть источник питания имеет **три вывода** с потенциалами:



- **$U+$**  (к нему подключается  $V_{S+}$ )
- **$0$**
- **$U-$**  (к нему подключается  $V_{S-}$ )

Вывод источника питания с нулевым потенциалом непосредственно к ОУ обычно не подключается, но, как правило, является сигнальной землей и используется для создания обратной связи.

Напряжение питания ОУ обычно **+15 В/-15В**, но иногда может варьироваться от **+5/-5** до **+18/-18**.

# Основы функционирования

## Простейшее включение ОУ

При работе ОУ как простого дифференциального усилителя без обратной связи :  $U_{\text{ВЫХ}} = K (U_{\text{ВХ}+} - U_{\text{ВХ}-})$  где:

- $U_{\text{ВЫХ}}$  : напряжение на выходе
- $U_{\text{ВХ}+}$  : напряжение на неинвертирующем входе
- $U_{\text{ВХ}-}$  : напряжение на инвертирующем входе
- $K$ : коэффициент усиления с разомкнутой петлёй обратной связи

**Недостатки** способа включения ОУ без обратной связи:

- Коэффициент усиления с разомкнутой петлёй обратной связи  $K$  нормируется в очень широких пределах и может изменяться в тысячи раз (зависит сильнее всего от частоты сигнала и температуры).
- Коэффициент усиления очень велик (типичное значение 10 в 6 степ. на постоянном токе) и **не поддаётся регулировке**.
- Точка отсчёта входного и выходного напряжений не поддаются регулировке.

# Идеальный операционный усилитель

**Идеальный ОУ** не может реально существовать, однако позволяет существенно упростить рассмотрение работы схем на ОУ.

Идеальный ОУ описывается формулой  $U_{\text{вых}} = K (U_{\text{вх}+} - U_{\text{вх}})$

## Характеристики:

- Бесконечно большой коэффициент усиления с разомкнутой петлей обратной связи  $K$ .
- Бесконечно большое входное сопротивление входов  $V_-$  и  $V_+$ .  
Другими словами, ток, протекающий через эти входы, равен нулю.
- Нулевое выходное сопротивление выхода ОУ.
- Способность выставить на выходе любое значение напряжения.
- Бесконечно большая скорость нарастания напряжения на выходе ОУ.
- Полоса пропускания от постоянного тока до бесконечности.

**Вывод:** идеальный ОУ, охваченный отрицательной обратной связью, поддерживает одинаковое напряжение на своих входах.

**ОУ не выравнивает напряжения** на своих входах, а выставляет на выходе такое напряжение, которое через обратную связь действует на входы так, что разность входных напряжений уменьшится до 0.

# Признаки идеальности ОУ

1. Входное сопротивление ОУ равно бесконечности

$$R_{вх} \rightarrow \infty$$

входной ток равен нулю  $i_{вх} = 0$

2. Выходное сопротивление ОУ равно нулю

$$R_{вых} = 0$$

3. Коэффициент усиления по напряжению

равен бесконечности

4. Напряжение смещения нуля равно нулю.

5. Синфазный сигнал не действует на ОУ

# Отличия реальных ОУ от идеального

Параметры ОУ, характеризующие его неидеальность, можно разбить на группы: **1) параметры по постоянному току:**

- Ограниченное усиление;
- Ненулевой входной ток (или ограниченное входное сопротивление);
- Ненулевое выходное сопротивление;
- Ненулевое напряжение смещения.

**2) параметры по переменному току:**

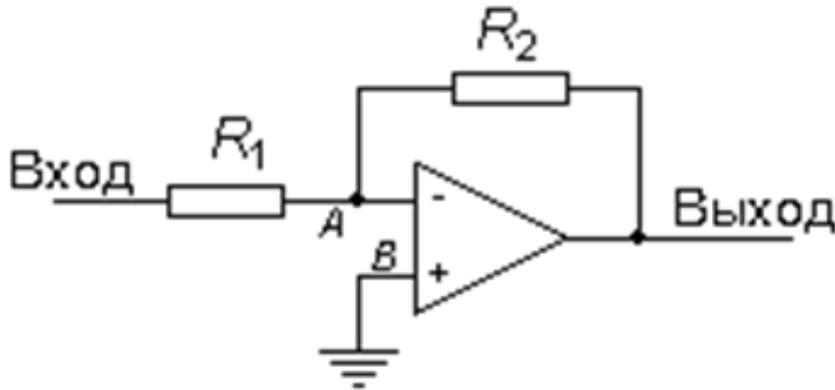
- Ограниченная полоса пропускания;
- Ненулевая входная емкость;
- Ненулевая задержка сигнала;
- Ненулевое время восстановления после *насыщения*.

**3) Нелинейные эффекты:**

- Насыщение — ограничение диапазона возможных значений выходного напряжения;
- Искажение входного П-образного сигнала при ограниченной скорости нарастания выходного сигнала ОУ;
- Ограниченная скорость нарастания.

# Основные схемы включения

## 1). Инвертирующий усилитель

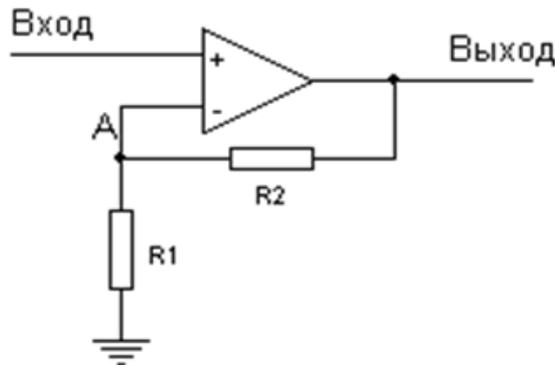


$$U_{\text{вых}}/R2 = -U_{\text{вх}}/R1$$

$$K = U_{\text{вых}}/U_{\text{вх}} = R2/R1$$

Недостаток: малое  $R_{\text{вх}}$

## 2). Неинвертирующий усилитель



$$K = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = 1/k = 1 + (R2/R1)$$

Т.е. Кус. практически зависит только от параметров обратной связи.

3). Дифференциальный усилитель: сигналы подаются на оба входа, выходное напряжение пропорционально разности входных сигналов  $U_{\text{вх}2}$  и  $U_{\text{вх}1}$

# Основные схемы включения

## 4). Повторитель

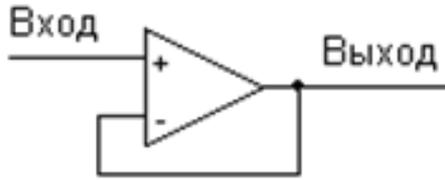


Рис. 7. Повторитель.

**Повторитель** – это неинвертирующий усилитель, в котором сопротивление резистора  $R1$  равно бесконечности, а сопротивление резистора  $R2$  - нулю (коэффициент усиления = 1).

Используется как **буферный усилитель** для исключения влияния низкоомной нагрузки на источник с высоким выходным сопротивлением  **$U_{вх} = U_{вых.}$** ,

**5). Сумматор:** **Суммирует** несколько напряжений. Для этого к инвертируемому входу подключают несколько сопротивлений. Сумма на выходе инвертирована, то есть отрицательна.

**6). Интегратор:** **Интегрирует** (инвертированный) входной сигнал по времени, между инвертируемым входом и выходом подключается конденсатор.

**7). Дифференциатор:** **Дифференцирует** (инвертированный) входной сигнал по времени. Конденсатор подключается **на входе**.

**8). Компаратор:** **Сравнивает** два напряжения и выдает на выходе одно из двух состояний в зависимости от того, какое из входных напряжений больше.

# Основные схемы включения ОУ

Как правило, ОУ используются с применением обратных связей.

• При отрицательной обратной связи (ООС) часть сигнала с выхода ОУ подаётся на его вход в противофазе с входным сигналом. При этом уменьшается усиление каскада, увеличивается полоса пропускания, уменьшается дрейф и уменьшается выходное сопротивление каскада. На рис. 1. представлены АЧХ ОУ без обратной связи (кривая 1) и каскада с ООС с коэффициентом усиления  $K = 100$  (кривая 2).

На рис. 1. видно, что полоса частот усилителя с ООС намного больше, чем для ОУ без ООС  $f_{K=100} \gg f_1$ , где  $f_{K=100}$  – частота среза (по уровню  $-3\text{dB}$ ) усилителя с ООС,  $f_1$  – частота среза ОУ без ООС. Максимальная частота для каскада усиления на ОУ при  $K = 1$  может достигать частоты единичного усиления  $f_{sp. ОУ}$ .

При положительной обратной связи (ПОС) часть сигнал с выхода подаётся на вход ОУ в фазе с входным сигналом. Это приводит к увеличению усиления каскада, ускоренному переключению ОУ и даже к генерации. Положительная обратная связь используется в компараторах и различных генераторах на основе ОУ.

## •Инвертирующий усилитель

Схема инвертирующего усилителя на основе ОУ приведена на рис.2.

В этой схеме сигнал ООС с выхода ОУ через резистор  $R_{oc}$  подаётся на инвертирующий вход ( $-$ ) ОУ. Сюда же подаётся через резистор  $R_{вх}$  входной сигнал  $U_{вх}$ . Неинвертирующий вход ( $+$ ) ОУ заземлён. Коэффициент усиления в данной схеме

$K = -R_{oc}/R_{вх}$ . Знак минус означает, что сигнал на выходе имеет сдвиг по фазе на  $180^\circ$ , т.е. сигнал инвертирован.

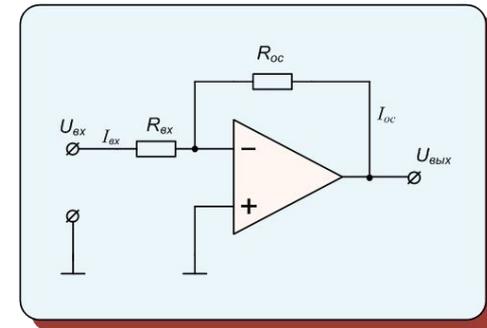
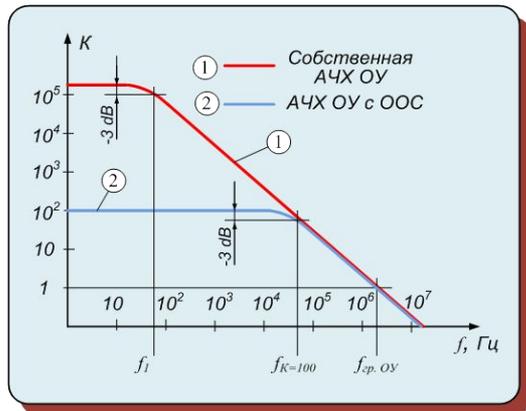


Рис.2. Схема инвертирующего усилителя на основе ОУ

•Рис.1. АЧХ ОУ без ООС (кривая 1) и с ООС при  $K = 100$  (кривая 2).

# Основные схемы включения ОУ

## Неинвертирующий усилитель

Схема неинвертирующего усилителя на основе ОУ приведена на рис.3.

В этой схеме сигнал подаётся на неинвертирующий вход ОУ, а сигнал ООС поступает через резистор  $R_{oc}$  с выхода на инвертирующий вход ОУ. Коэффициент усиления в данной схеме

$$K = 1 + R_{oc}/R_1$$

Особенностью данной схемы усилителя является большое входное сопротивление.

Если в этой схеме убрать резистор ( $R_1 = \infty$ ), а  $R_{oc}$  замкнуть ( $R_{oc} = 0$ ), то получится схема рис 4, в которой коэффициент усиления будет равный единице.

Из-за единичного коэффициенты усиления эта схема называется повторителем напряжения. Её достоинством является очень большое входное сопротивление и малое выходное сопротивление. Эта схем используется как буфер при согласовании выходного сопротивления источника сигнала с сопротивлением нагрузки.

•Приведённые схемы включения ОУ лишь малая часть, разработанных на сегодняшний день схем применения ОУ. Наряду с постоянным совершенствованием технологии изготовления ОУ и их схемотехники, происходит разработка новых схем на основе ОУ. Операционные усилители являются одним из самых распространённых элементов современной аналоговой электронной техники.

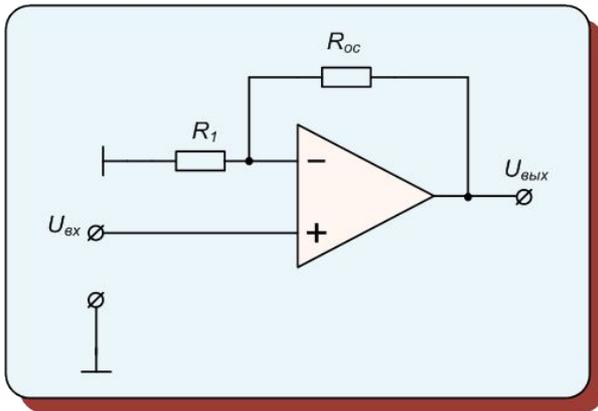


Рис.3. Неинвертирующий усилитель на основе ОУ

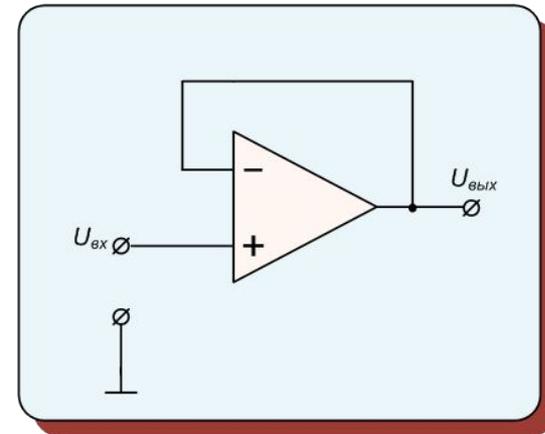
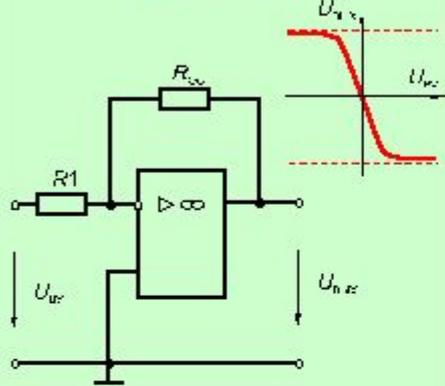


Рис.4. Повторитель напряжения

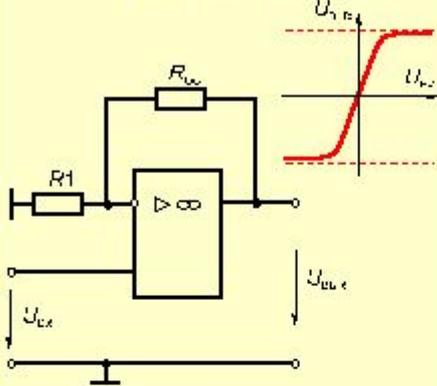
# ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ (ОУ)

## ИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ



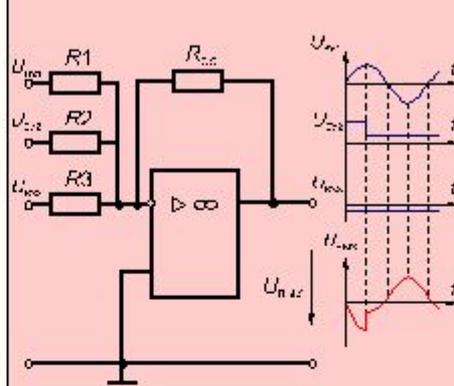
$$K_{UH} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{вых}}{R_1}$$

## НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ УСИЛИТЕЛЬ



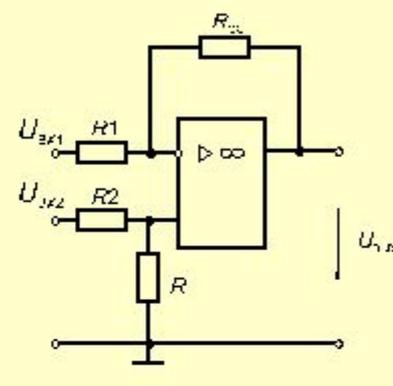
$$K_{UH} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_{вых}}{R_1}$$

## СУММАТОР



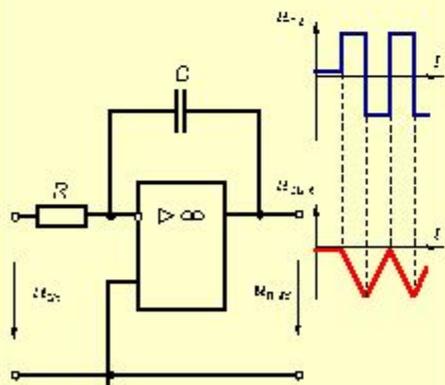
$$U_{вых} = -\left(\frac{R_{вых}}{R_1}U_{вх1} + \frac{R_{вых}}{R_2}U_{вх2} + \frac{R_{вых}}{R_3}U_{вх3}\right)$$

## ВЫЧИТАТЕЛЬ



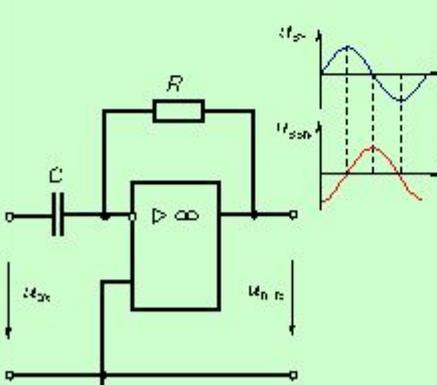
$$U_{вых} = U_{вх2} \frac{R}{R_2 + R} \left(1 + \frac{R_{вых}}{R_1}\right) - U_{вх1} \frac{R_{вых}}{R_1}$$

## ИНТЕГРАТОР



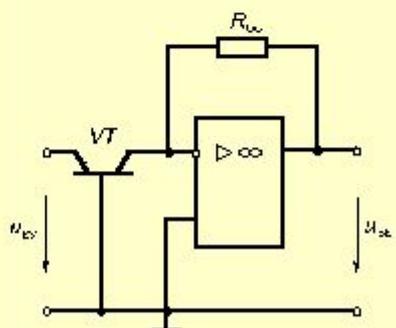
$$u_{вых} = -\frac{1}{RC} \int u_{вх} dt$$

## ДИФФЕРЕНЦИАТОР



$$u_{вых} = -RC \frac{du_{вх}}{dt}$$

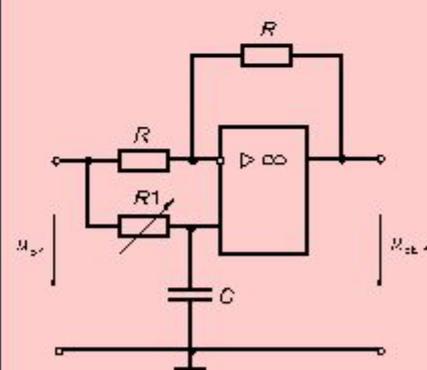
## ЭКСПОНЕНЦИАЛЬНЫЙ ГЕНЕРАТОР



$$u_{вых} = I_{ЭО} R_{ЭО} e^{-\frac{t}{25.5}}$$

$I_{ЭО}$  - обратный ток эмиттера

## ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ



$$\varphi = -2 \arctg(\omega R_1 C)$$

$$(\varphi = 0^\circ \div 180^\circ)$$

Операционный усилитель почти всегда охвачен глубокой отрицательной обратной связью



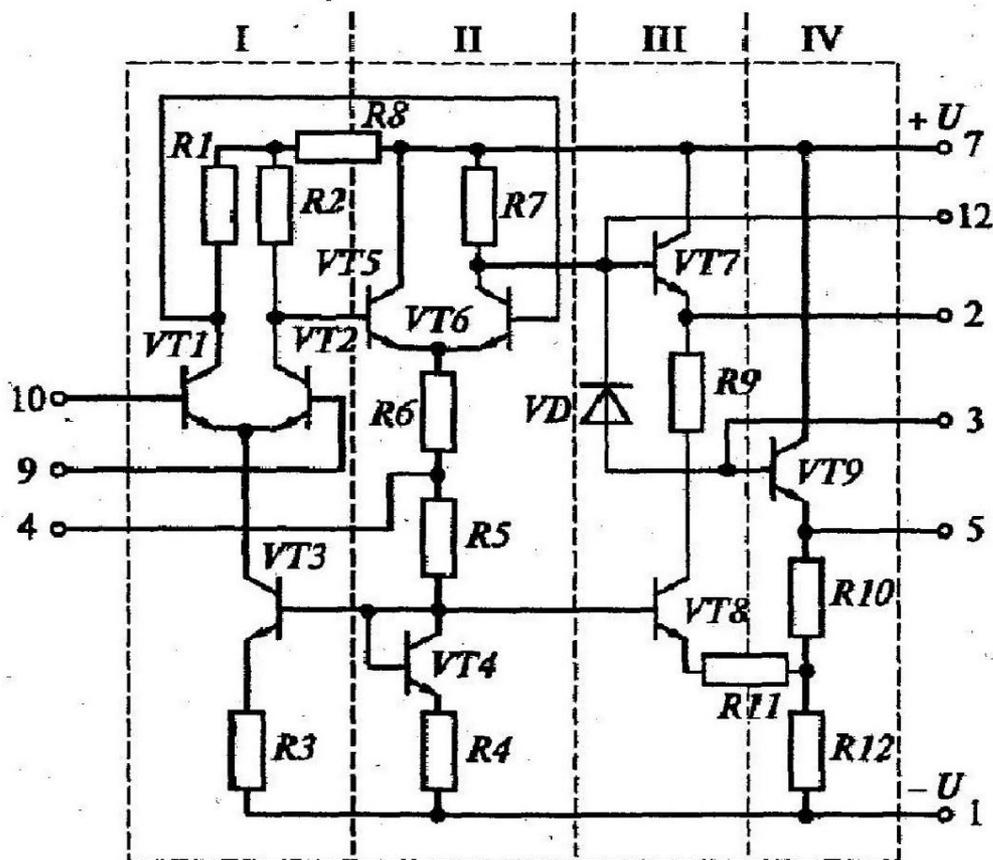
**Вывод:** коэффициент усиления ОУ с обратной связью определяется почти исключительно только обратной связью и мало зависит от параметров самого усилителя

## Обратная связь

# Обратная связь в схеме инвертирующего ОУ

1. Уменьшается  $K$  коэффициент усиления
2. Повышается его стабильность, так как он не зависит от изменения параметров транзисторов внутри самой микросхемы, то есть не реагирует на дестабилизирующие факторы ( изменение температуры , питающих напряжений , и наводок ).
3. Уменьшает входное сопротивление.
4. Уменьшает выходное сопротивление.
5. Уменьшаются нелинейные искажения, так как передаточная характеристика имеет меньше угол наклона.

# Микросхема ОУ К140УД1



I — входной дифференциальный усилитель;

II — промежуточный усилитель напряжения;

III — цепь сдвига уровня постоянного напряжения;

IV — выходной усилитель мощности

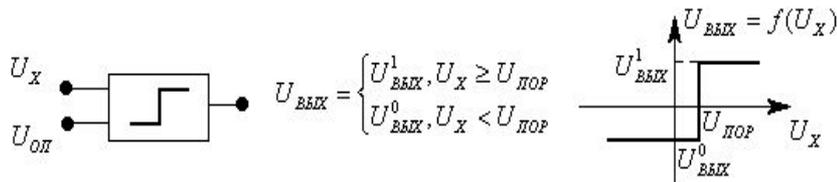
# Устройства на ОУ

Название	Схема устройства	Уравнение
Инвертирующий усилитель  Рис.1.5		$U_{\text{вых}} = -K U_{\text{вх}}, \text{ где } K > 1$ $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_{\text{oc}}}{R_1}$
Неинвертирующий усилитель		$U_{\text{вых}} = K U_{\text{вх}}, \text{ где } K > 1$ $K = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} + 1$
Усилитель разности или дифференциальный усилитель		$U_{\text{вых}} = \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} \cdot (U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}})$
Инвертирующий сумматор		$U_{\text{вх}} = \left( U_{\text{вх1}} \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} + U_{\text{вх2}} \frac{R_{\text{oc}}}{R_2} + \dots + U_{\text{вхn}} \frac{R_{\text{oc}}}{R_n} \right)$ $= - \sum_{k=1}^n \left( U_{\text{вхk}} \frac{R_{\text{oc}}}{R_k} \right)$

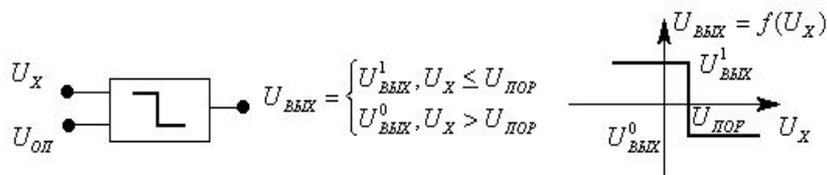
Дифференцирующий усилитель		$U_{\text{ввых}} = -R_{\text{oc}} C dU_{\text{вх}} / dt,$
Интегрирующий усилитель		$U_{\text{ввых}} = -(1/RC) \int_0^t U_{\text{вх}} dt$

# Компараторы напряжений

- Компараторы напряжений это устройства, которые предназначены для сравнения двух сигналов.
- Они имеют два входа. Один из входов предназначен для подачи исследуемого сигнала  $U_x$ , а другой для подачи опорного напряжения  $U_{оп}$ .
- В момент времени, когда исследуемый сигнал  $U_x$  сравнивается с пороговым напряжением  $U_{пор}$ , который зависит от величины опорного напряжения  $U_{пор}=F(U_{оп})$ , компаратор изменяет свое состояние.
- Состояние компаратора определяется величиной выходного напряжения, которое может принимать два значения:  $U_{вых}=U^0_{вых}$  или  $U^1_{вых}$ .
- Разновидности компараторов:
- Неинвертирующий компаратор



- Инвертирующий компаратор



В качестве компараторов обычно используют операционные усилители. Входные ( $U_{вх+}$ ,  $U_{вх-}$ ) и выходное ( $U_{вых}$ ) напряжения ОУ связаны соотношением:

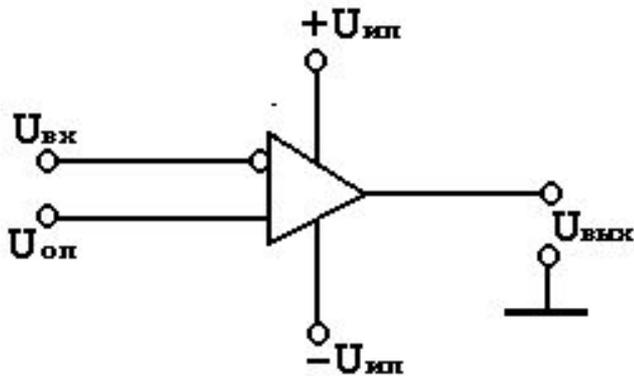
$$U_{вых} = K_{оу} (U_{вх+} - U_{вх-}), \quad (1)$$

где  $K_{оу}$  - коэффициент усиления операционного усилителя.

Компараторы напряжения. Таблица 1.2

Схема и название	Амплитудная хар-ка	Временные диаграммы
<p>Одновходовой инвертирующий компаратор</p>	<p><math>U_{пор} = -U_{оп} \frac{R_1}{R_2}</math></p>	
<p>Двух выходной инвертирующий компаратор</p>	<p><math>U_{пор} = U_{оп}</math></p>	
<p>Одновходовой неинвертирующий компаратор</p>	<p><math>U_{пор} = -U_{оп} \frac{R_1}{R_2}</math></p>	
<p>Двух выходной инвертирующий компаратор</p>	<p><math>U_{пор} = U_{оп}</math></p>	
<p>Инвертирующий компаратор с положительной ОС</p>	<p><math>U_{пн} = \frac{R_1}{R_1+R_2} E_{п+}; \quad U_{пв} = \frac{R_2}{R_1+R_2} E_{п-}</math></p>	

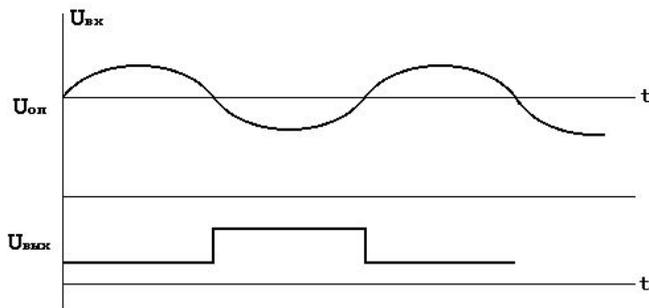
Компараторы представляют собой ОУ специального назначения предназначенные для сравнения по уровню двух входных напряжений и скачкообразного изменения выходного напряжения в случае, когда одно из сравниваемых напряжений больше другого.



Один вход компаратора соединен с источником опорного напряжения, а на другой подается входной сигнал.

Так как  $U_{вх}$  подается на инвертирующий вход, то

**выходное напряжение будет мало**, когда  $U_{вх} > U_{оп}$ , и  
**выходное напряжение будет велико**, когда  $U_{вх} < U_{оп}$ .



Если желательно, чтобы  $U_{вых}$  было велико, когда  $U_{вх} > U_{оп}$ , то следует поменять порядок присоединения входного напряжения к инвертирующему и неинвертирующему входам компаратора.

## Компаратор

# **ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ АНАЛОГОВЫХ СИГНАЛОВ НА ОУ**

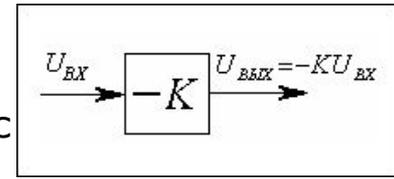
# **Анализ устройств содержащих ОУ**

В большинстве случаев ОУ используется с обратными связями, которые определяют функциональное назначение устройства и его основные параметры.

# Инвертирующий усилитель

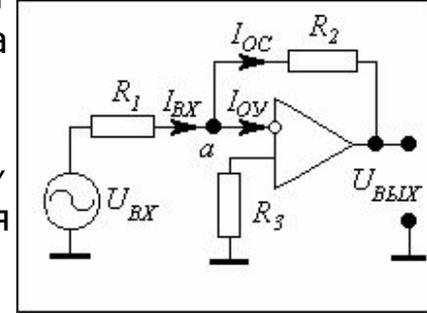
## усилитель

Его обозначение из функциональных схем приведено на рисунке. Знак "-" означает, что выходной сигнал находится в противофазе с входным. При этом  $K > 1$ .



Принципиальная схема инвертирующего усилителя на ОУ рис.9.

В ней  $R_1, R_2$  – резисторы образуют цепь параллельно-параллельной отрицательной обратной связи.  $R_3$  – служит для устранения разбаланса ОУ за счет входных токов и выбирается из условия  $R_3 = R_1 // R_2$



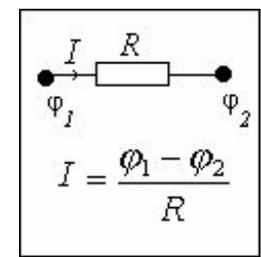
Установим связь между выходным и входным напряжениями.

Для узла «а» по 1-му закону Кирхгофа запишем соотношение:  $I_{BX} = I_{OC} + I_{OY}$   
Учтем, что для идеального ОУ  $I_{OY} = 0$  и распишем токи  $I_{BX}$  и  $I_{OC}$  используя закон Ома (рис), т.е.:

$$\frac{U_{BX} - U_{BX}^-}{R_1} = \frac{U_{BX}^- - U_{ВЫХ}}{R_2}$$

Учитывая, что входы ОУ виртуально замкнуты  $U_{BX}^- = U_{ВЫХ}^+ = I_{OY} R_3 = 0$

Получим  $U_{ВЫХ} = -\frac{R_2}{R_1} U_{BX}$ ; отсюда  $K = -\frac{R_2}{R_1}$



Реальный усилитель можно считать идеальным если:  $K_{OY} \gg |K|$ , где  $K$ - коэффициент усиления, который должен иметь усилитель.

2.  $I_{OY} \ll (I_{BX}, I_{OC})$   $I_{OC}$  – ток обратной связи

3. К выходу усилителя подключается сопротивление нагрузки  $R_H > 1 \text{ кОм}$

Порядок расчета усилителя на заданный коэффициент усиления  $K$ :

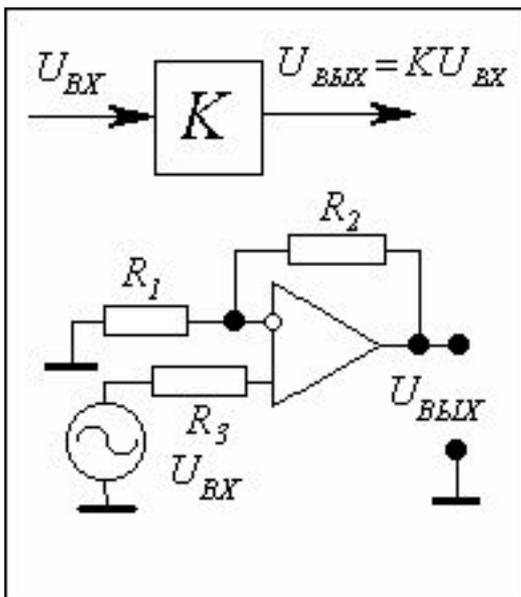
1. По справочнику выбирается ОУ и определяем его  $I_{OY}$  и  $R_{ВХОУ}$ . 2. Выбираем  $R_2$  из условия  $R_2 < \frac{R_{ВХОУ}}{(10-100)}$

3. Рассчитываем  $R_1 = R_2 / K$ .

Если  $R_1 \geq 1 \text{ кОм}$ , то выбранный ОУ удовлетворяет требованиям, а если  $R_1 \leq 1 \text{ кОм}$ , то выбираем другой ОУ с большим  $R_{ВХ}$  и все расчеты проводим заново.

4. Рассчитываем  $R_3$  из соотношения:  $R_3 = R_1 // R_2$

# Неинвертирующий усилитель.



Усилитель выполняющий преобразование  $U_{\text{вых}} = K \cdot U_{\text{вх}}$ , где  $K > 1$  называется неинвертирующим.

Его условное обозначение и принципиальная схема приведены на рис. .

Резисторы  $R_1, R_2$  образуют последовательно-параллельную отрицательную обратную связь.

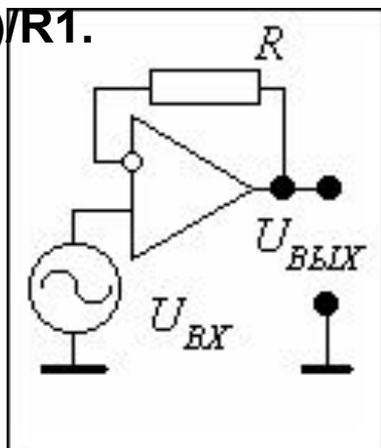
Установим связь между входным и выходным напряжениями. Поскольку входы идеального ОУ виртуально замкнуты, то, запишем  $U^+_{\text{вх}} = U^-_{\text{вх}}$ . где  $U^-_{\text{вх}} = R_1 U_{\text{вых}} / (R_1 + R_2)$ , а  $U^+_{\text{вх}} = U_{\text{вх}}$ . Подставим записанное в исходное уравнение и, разрешим это уравнение относительно  $U_{\text{вых}}$ , получим

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} (R_1 + R_2) / R_1.$$

Отсюда  $K = (R_1 + R_2) / R_1 = 1 + R_2 / R_1$ .

Если  $R_1 = \infty$  (рис.9 ), то  $K = 1$ , и такой усилитель называется повторителем напряжения. Благодаря последовательной обратной связи по входу он имеет практически

$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}} (R_1 + R_2) / R_1.$$



$$U_{\text{вых}} = U_{\text{вх}}$$

# Преобразователь ток-напряжение

Преобразователь ток-напряжение это устройство которое выполняет преобразует ток в напряжение. Его условное обозначение и принципиальная схема на ОУ приведены на рис. .:

В простейшем случае такое преобразование осуществляет резистор  $R$  по схеме приведенной на рис. :

Напряжение и ток связаны соотношением  $U=IR_H$  при этом должно выполняться соотношение  $R_i \gg R_H$ .

Если резисторы  $R_i$  и  $R_H$  становятся соизмеримыми по величине резко возрастает погрешность преобразования.

Этого недостатка лишена схема на ОУ. Благодаря обратной связи эта схема имеет почти нулевое входное сопротивление. А потому преобразование тока в напряжение происходит практически при любом сопротивлении  $R_i$

Установим связь между входным током и выходным напряжением для схемы на ОУ.

Для узла «а» по первому закону Кирхгоффа запишем соотношение для токов:

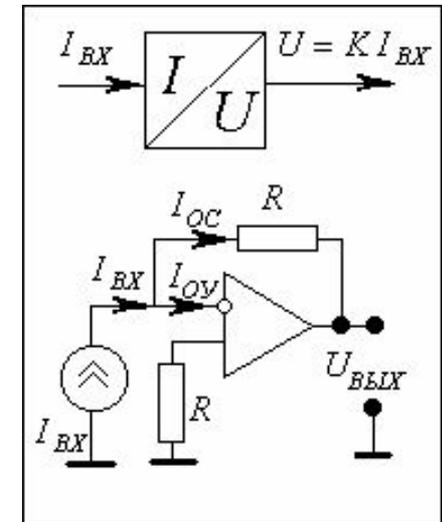
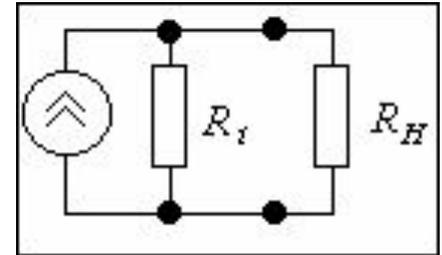
$$I_{вх} = I_{ос} + I_{оу}$$

Учитывая, что входы ОУ виртуально замкнуты ( $I_{оу} = 0$ ,  $U_{+вх} = U_{-вх} = 0$ ), запишем по закону Ома соотношение для тока

$$I_{ос} = - U_{вых} / R$$

и разрешив его относительно  $U_{вых}$ , получим

$$U_{вых} = - R \cdot I_{вх}.$$



$$U_{вых} = - R \cdot I_{вх}$$

# Инвертирующий сумматор

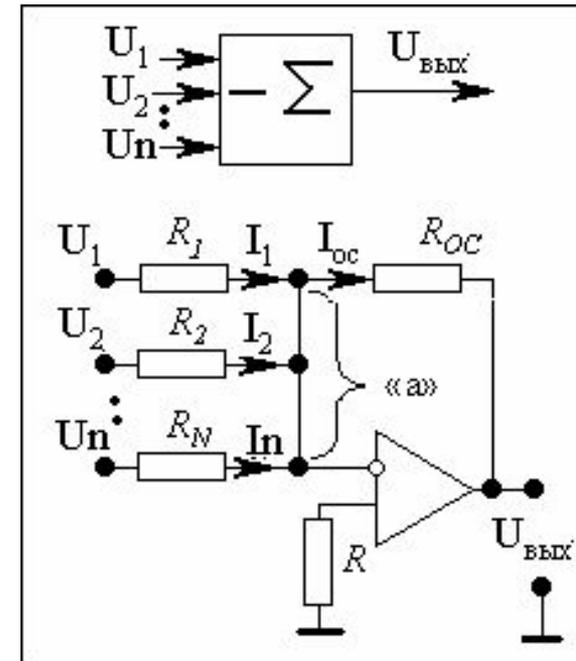
Это устройство, у которого выходное напряжение равно алгебраической сумме входных напряжений, взятой с противоположным знаком (рис.5). Его условное обозначение и принципиальная схема на ОУ приведены на рис. .:

Установим связь между выходным и входными сигналами этой схемы.

Если считать, что ОУ идеальный т.е.  $I_{оу}=0$  и  $U_{+вх}=U_{-вх}=0$ , то при подаче на его входы напряжения  $U_1, U_2, \dots, U_n$ , для узла «а» по первому закону Кирхгоффа можно записать, что  $I_{вх} = I_1 + I_2 + \dots + I_n = I_{ос}$ ,

Расписав каждый из токов по закону Ома:  $I_1 = U_1/R_1, I_2 = U_2/R_2, \dots, I_n = U_n/R_n, I_{ос} = -U_{вых}/R_{ос}$ , получим выражение связывающее входные и выходное напряжения

$$U_{вых} = -(U_1 R_{ос}/R_1 + U_2 R_{ос}/R_2 + \dots + U_n R_{ос}/R_n)$$



# Усилитель разности напряжений

Это усилитель, в котором выходное напряжение пропорционально разности входных сигналов  $U_{вх2}$  и  $U_{вх1}$  (рис.).

Его условное обозначение и принципиальная схема на ОУ приведены на рис. .:

Установим связь между выходным и входными сигналами этой схемы.

Для узла «а» по первому закону Кирхгофа можно записать, что  $I_{вх} = I_{ос} + I_{оу}$

Если считать, что ОУ идеальный т.е.

$I_{оу} = 0$  и  $U_{+вх} = U_{-вх} = U_{вх+} = U_{вх2} R_2 / (R_1 + R_2)$ ,

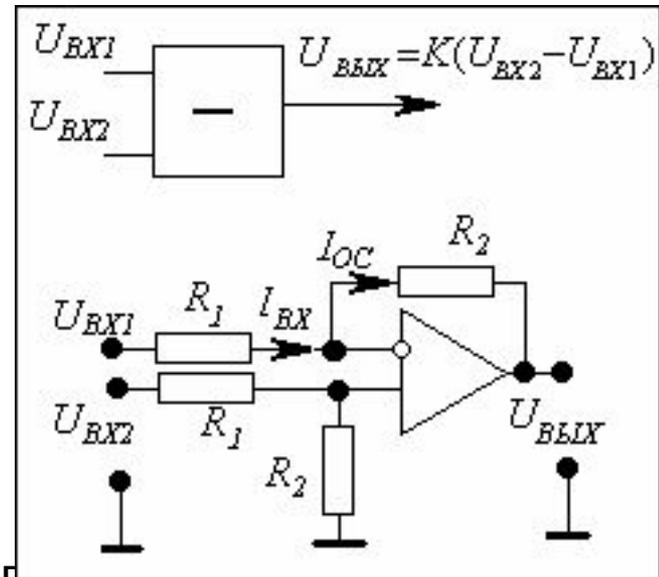
то записав токи по закону Ома ( $I_{вх} = (U_{вх1} - U_{-вх}) / R_1$ ,  
а  $I_{ос} = (U_{-вх} - U_{вых}) / R_2$ ) получим выражение связывающее выходное и входное напряжения примет вид

$$\mathbf{U_{вых} = (R_2 / R_1)(U_{вх2} - U_{вх1}).}$$

Идеальный разностный усилитель при подаче на оба входа одинаковых напряжений, т.е.  $U_{вх1} = U_{вх2}$ , имеет на выходе напряжение равное нулю. Такие входные напряжения называются синфазными  $U_{сс}$ . В общем случае синфазный сигнал представляет собой среднее значение двух входных напряжений, т.е.  $U_{сс} = (U_{вх1} + U_{вх2}) / 2$ . Если  $U_{вх1} = -U_{вх2}$ , то  $U_{сс} = 0$ .

Разность двух входных напряжений называется дифференциальным сигналом  $U_{дс} = U_{вх2} - U_{вх1}$ .

Поскольку усилитель разности усиливает только разностный (дифференциальный) сигнал, то такой усилитель часто называют дифференциальным усилителем.



$$\mathbf{U_{вых} = (R_2 / R_1)(U_{вх2} - U_{вх1})}$$

# Дифференцирующий усилитель

Дифференцирующий усилитель, это устройство, в котором входное и выходное напряжение связано соотношением (7)  $U_{\text{вых}} = K(dU_{\text{вх}}/dt)$ . (7)

Простейшие дифференцирующие цепи (например RC-цепь) выполняют эту операцию со значительными погрешностями, причем с повышением точности дифференцирования существенно уменьшается уровень выходного сигнала.

Схема дифференцирующего усилителя на ОУ приведена на рис.7.

Установим связь между выходным и входным напряжениями. Для узла «а» по первому закону Кирхгофа можно записать

$$I_{\text{вх}} = I_{\text{ос}} + I_{\text{оу}}$$

Если считать, что ОУ идеальный, т.е.  $I_{\text{оу}} = 0$  и  $U_{+} = U_{-} = U_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} = 0$ , то записав токи по закону Ома ( $I_{\text{вх}} = I_{\text{с}} = C d(U_{\text{вх}} - U_{\text{вх}})/dt$ ,

а  $I_{\text{ос}} = (U_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})/R_2$ ) получим выражение связывающее выходное и входное напряжения

$$U_{\text{вых}} = -RC \cdot \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} \quad (8)$$

где  $R_{\text{ос}} C = \tau$  - постоянная времени дифференцирующего усилителя.

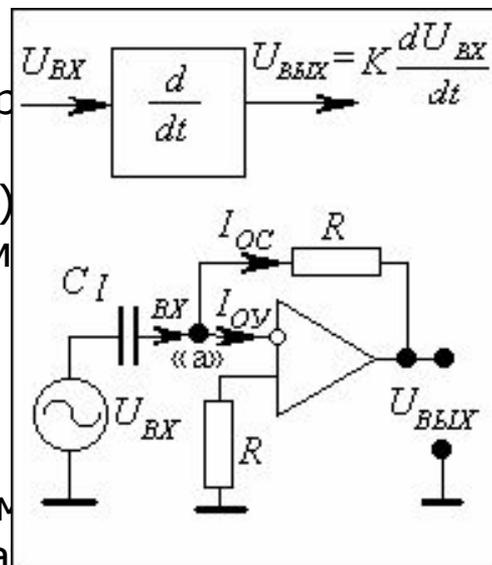
Коэффициент передачи дифференцирующего усилителя определяется выражением

$$K(j\omega) = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = j\omega\tau = K(\omega)e^{j\phi}$$

(9)

где  $K(\omega) = \omega\tau$  - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);

$\phi(\omega) = \pi/2$  - фазово-частотная характеристика (ФЧХ) коэффициента



# Интегрирующий усилитель

Это устройство, в котором входное и выходное напряжение связано соотношением

$$U_{\text{ВЫХ}} = K \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt$$

Простейшим интегрирующим цепям (например RC - цепям) аналогичны недостатки предыдущего устройства.

Схема интегрирующего усилителя на ОУ приведена на рис.8. Установим связь между выходным и входным напряжениями этой схемы. Для узла «а» по первому закону Кирхгофа можно записать, что  $I_{\text{вх}} = I_{\text{ос}} + I_{\text{оу}}$

Если считать, что ОУ идеальный, т.е.  $I_{\text{оу}}=0$  и  $U^+_{\text{вх}}=U^-_{\text{вх}} = 0$ , то, записав токи по закону Ома ( $I_{\text{вх}}=(U_{\text{вх}} - U^-_{\text{вх}})/R_2$ , а  $I_{\text{ос}} = I_{\text{с}} = C d(U^-_{\text{вх}} - U_{\text{вых}})/dt$ ) получим выражение связывающее выходное и входное напряжения

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\left(\frac{1}{RC}\right) \int_0^t U_{\text{ВХ}} dt$$

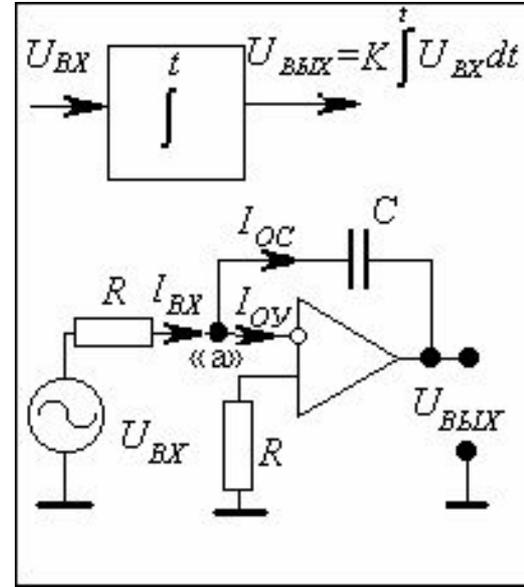
где  $RC = \tau$  - постоянная времени интегрирующего усилителя.

Коэффициент передачи интегрирующего усилителя определяется выражением

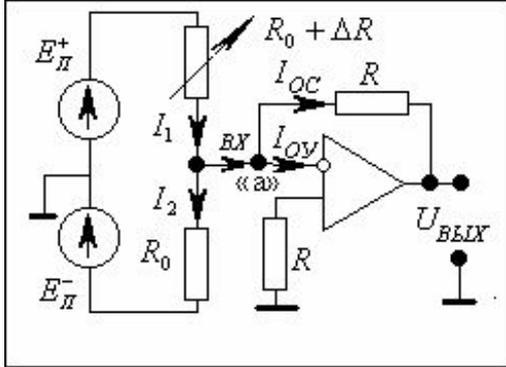
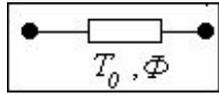
$$K(j\omega) = U_{\text{м.вых}}/U_{\text{м.вх}} = (j\omega\tau)^{-1} = K(\omega) e^{j\phi(\omega)},$$

Где  $K(\omega) = (\omega\tau)^{-1}$  - амплитудно-частотная характеристика (АЧХ);

$\phi(\omega) = -\pi/2$  - фазово-частотная характеристика (ФЧХ) коэффициента передачи интегрирующего усилителя.



# Усилитель сигнала резистивного датчика



Резистивным датчиком называют измерительный преобразователь, сопротивление, которого зависит от измеряемой физической величины. Сопротивление измерительного преобразователя состоит из двух составляющих  $R_0$  – номинальное сопротивление резистивного датчика, когда измеряемая величина  $H=0$ ;  $R = R_0 + \Delta R$   
 $\Delta R = SH$ , где  $S$  – чувствительность датчика к измеряемой величине.

Для преобразования сопротивления резистивного датчика в напряжение применяют полумостовая схема преобразования (рис.). Установим связь

Для узла «а» по первому закону Кирхгофа можно записать, что

$$U_{\text{ВЫХ}} = f(\Delta R)$$

$$I_1 + I_2 = I_{\text{ОС}} + I_{\text{ОУ}}$$

Если считать, что ОУ идеальным, т.е.  $I_{\text{ОУ}}=0$  и  $U_{\text{ВХ}}=U_{\text{ВХ}}=0$ , то, записав токи по закону Ома

( $I_1 = (E_{\text{П}}^+ - U_{\text{ВХ}}) / (R_0 + \Delta R)$ ,  $I_2 = (E_{\text{П}}^- - U_{\text{ВХ}}) / R_0$ , а  $I_{\text{ОС}} = (U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}}) / R$ ) получим

$$\frac{E_{\text{П}}^+ - U_{\text{ВХ}}}{R_0 + \Delta R} - \frac{E_{\text{П}}^- + U_{\text{ВХ}}}{R_0} = \frac{U_{\text{ВХ}} - U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ОС}}}$$

Считая  $|E_{\text{П}}^+| = |E_{\text{П}}^-| = E_{\text{П}}$ , получаем

$$\frac{E_{\text{П}}}{R_0 + \Delta R} + \frac{E_{\text{П}}}{R_0} = -\frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{ОС}}}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -ER_{\text{ОС}} \left[ \frac{1}{R_0 + \Delta R} - \frac{1}{R_0} \right] = -ER_{\text{ОС}} \left[ \frac{R_0 - R_0 - \Delta R}{R_0(R_0 + \Delta R)} \right] = ER_{\text{ОС}} \frac{\Delta R}{R_0^2} = ER_{\text{ОС}} \frac{SH}{R_0^2}$$

# Нелинейные функциональные устройства на ОУ. Логарифматор

**Логарифмирующий усилитель.** Логарифмирующие усилители предназначены для получения выходного напряжения, пропорционального логарифму входного напряжения. Они используются в компандерах и эспандерах сигналов (в устройствах сжатия и расширения динамического диапазона входных сигналов при магнитной записи), в системах шумопонижения, устройствах перемножения напряжений и т. д.

Теоретически логарифмическая зависимость определяется следующим соотношением:  $y = \log_a(x)$ . При  $a = e$  имеем  $y = \ln(x)$ .

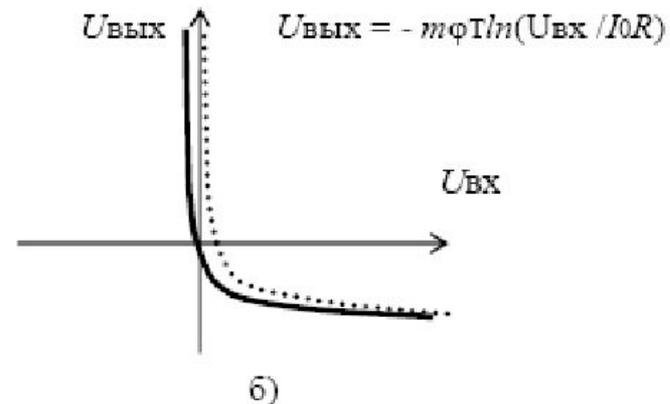
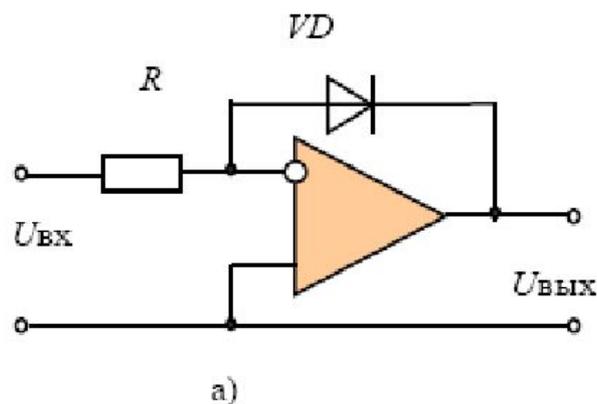
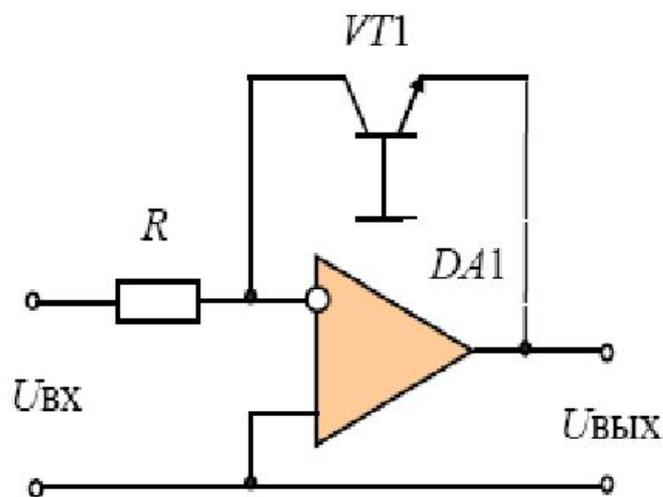


Схема логарифмирующего усилителя *а)* и его амплитудная характеристика *б)*

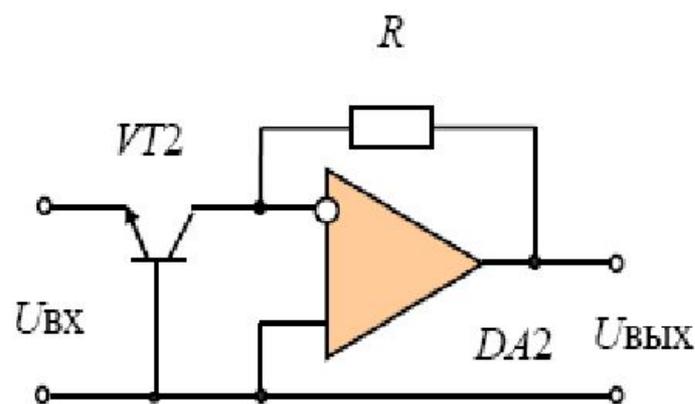
# Нелинейные функциональные устройства на ОУ. Логарифматор и потенциатор

$$U_{\text{ВЫХ}} = -m\varphi_T \ln\left(\frac{U_{\text{ВХ}}}{I_0 R}\right)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_0 R \left( e^{\frac{U_{\text{ВХ}}}{m\varphi_T}} - 1 \right)$$



Логарифматор



Антилогарифматор

С помощью ОУ можно синтезировать линейные и нелинейные электронные устройства с требуемым алгоритмом преобразования входного сигнала.

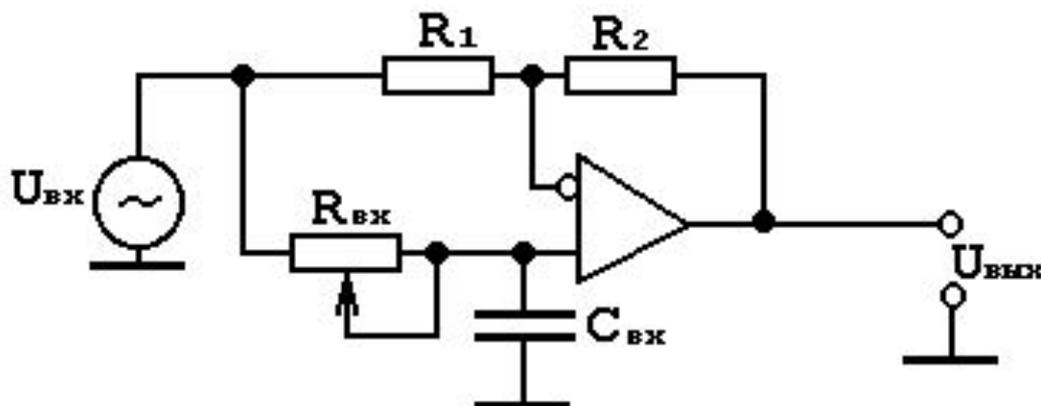
### Принятые обозначения

- $U_{ВХ Н}$  – входное напряжение на неинвертирующем входе
- $U_{ВХ И}$  – входное напряжение на инвертирующем входе.
- $U_{ВЫХ}$  – выходное напряжение ОУ.
- $K_{U0}$  – коэффициент усиления ОУ на постоянном токе без ООС.
- $K_{U00С}$  – коэффициент усиления ОУ с ООС.
- $B_{OC}$  – коэффициент обратной связи.

Если  $K_{U0} \gg 1$ , то

$$K_{U00С} = \frac{K_{U0}}{1 + B_{OC} K_{U0}} = \frac{1}{B_{OC}}$$

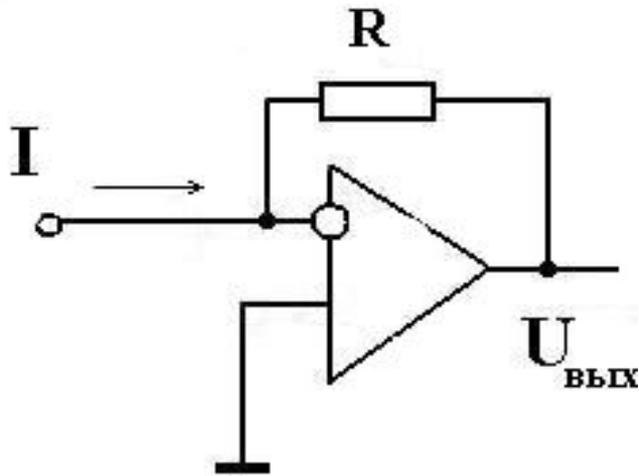
Схема, обеспечивающая идеальный фазовый сдвиг, должна передавать сигнал, не изменяя его амплитуду, но сдвигая его фазу на определенный заданный угол.



На вход фазовращателя подан синусоидальный сигнал  $U_{вх}$  частотой 1 кГц и амплитудой 1 В.

Сигнал на выходе  $U_{вых}$  имеет ту же частоту и амплитуду, что и входной сигнал, но запаздывает относительно  $U_{вх}$  на  $90^\circ$ .

## Фазовращатель



Входное напряжение в этой схеме

$$U_{ВХ} = - \frac{U_{ВЫХ}}{K_{ус}} = -I \cdot \frac{R}{K_{ус}}$$

Выходное напряжение

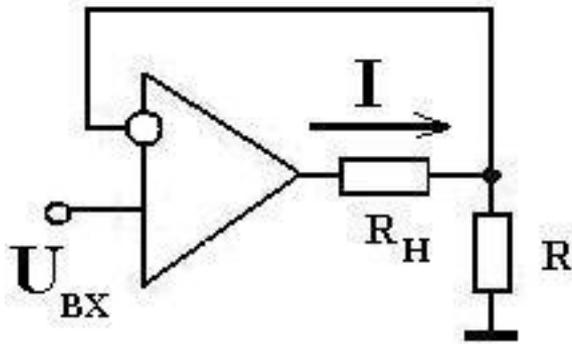
$$U_{ВЫХ} = -I \cdot R$$

- пропорционально **входному току**

Входное сопротивление  $R_{ВХ} = \frac{R}{K_{ус}}$  - очень мало и не влияет на схему, в которой проводится измерение тока.

Напряжение на выходе практически не зависит от нагрузки.

## Преобразователь ток-напряжение



Ток  $I$ , протекающий через резистор нагрузки, не зависит от сопротивления нагрузки  $R_H$ , но прямо пропорционален входному напряжению.

Таким образом схема является источником тока (гальваностатом) , управляемым напряжением.

Недостатком данной схемы является невозможность заземлить  $R_H$ .

## Преобразователь напряжение-ток

**Генератор** - устройство, преобразующее энергию источника постоянного напряжения в энергию колебаний. Генератор, или автогенератор – это самовозбуждающаяся система, в которой энергия источника питания постоянного тока преобразуется в энергию переменного сигнала нужной формы и частоты.

Существуют:

- **генераторы с внешним возбуждением**, в которых незатухающие колебания получают от внешнего источника,
- **генераторы с самовозбуждением (автогенераторы)**, для которых внешний источник не нужен.

По форме колебаний генераторы делятся на

- **гармонические** (синусоидальные) и
- **негармонические** (импульсные).
- **релаксационные** (несинусоидальные).

# Генератор

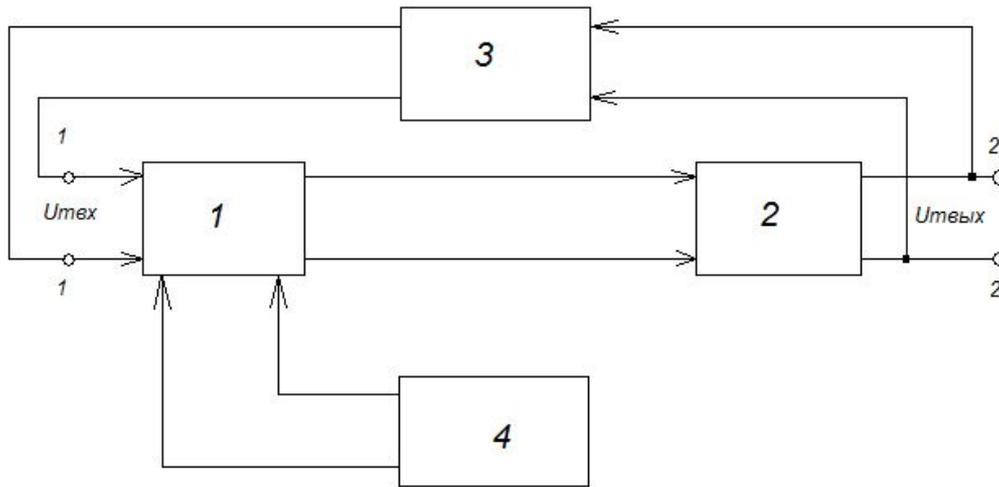


Схема содержит усилительный элемент 1 (электронную лампу или транзистор), нагрузкой которого является колебательная система 2, например, колебательный контур с сосредоточенными параметрами.

Часть напряжения с контура через цепь обратной связи 3 поступает на вход усилительного элемента. Устройство получает питание от источника напряжения 4.

Напряжение свободных колебаний, поступающих через элемент 3 на вход элемента 1, усиливается им и вновь подается на колебательную систему. Это напряжение должно быть после усиления достаточным для компенсации потерь в контуре. Кроме этого, цепь обратной связи должна вызывать такой сдвиг фазы колебаний, поступающих на вход элемента 1, при котором контур будет своевременен, т.е. в такт со свободными колебаниями в нем, получать энергию. При одновременном выполнении указанных условий данное устройство создает (генерирует) незатухающие колебания, т.е. представляет собой автогенератор.

## Структурная схема LC-автогенератора

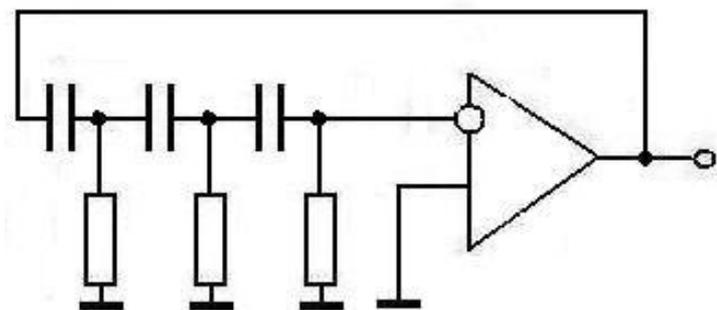


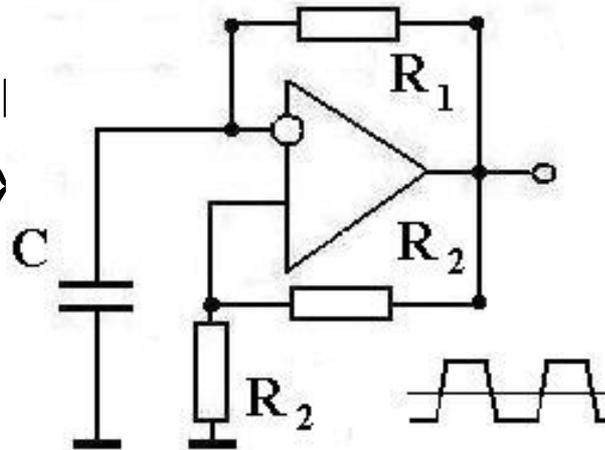
Схема генератора синусоидальных колебаний основана на ОУ, в цепь обратной связи которого включены три фазовращающие RC-цепочки

Таким образом получается положительная обратная связь, а частота генерации зависит от номиналов R и C и соответствует сдвигу фаз на  $\pi$ .

Схема будет более стабильной, если в цепи обратной связи будут так называемые T-образные мосты из резисторов и конденсаторов.

**RC-генератор синусоидальных колебаний**

Генератор  
(меандра) мож



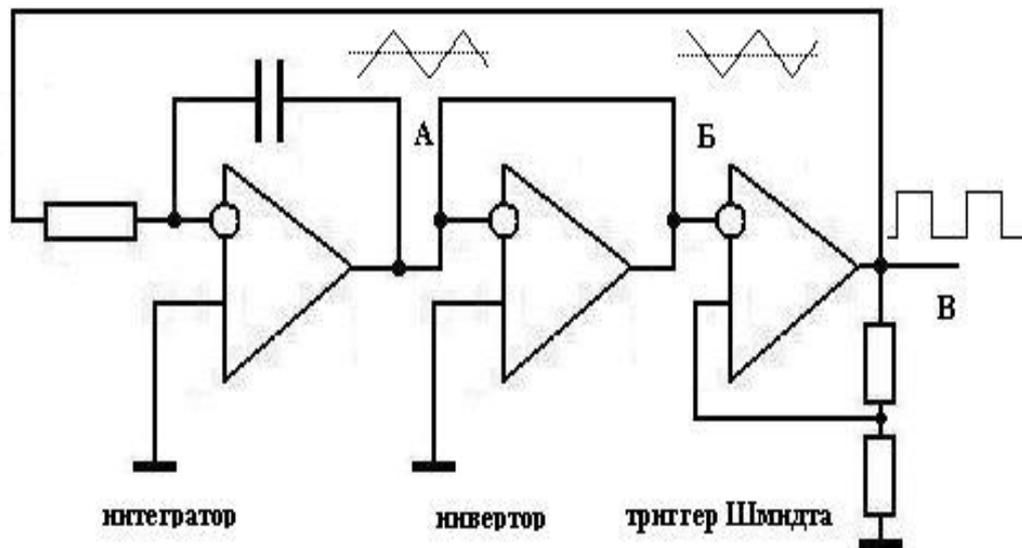
импульсов  
из одного ОУ.

Напряжение на инвертирующем входе растет по мере зарядки конденсатора через резистор  $R_1$ .

Частота генерации рассчитывается как

$$f = \frac{\ln 3}{2 \cdot R_1 \cdot C}$$

**Генератор меандра**



Схема, представленная на рисунке, состоит из интегратора, инвертора и триггера Шмидта.

Триггер Шмидта, как любой триггер, может находиться в двух устойчивых состояниях с постоянным положительным или отрицательным напряжением на выходе.

Постоянное напряжение с триггера Шмидта поступает на вход интегратора, на выходе которого мы получим линейно нарастающее напряжение. Чтобы переключить триггер Шмидта, полярность управляющего сигнала нужно поменять на противоположную. Для этого служит повторитель, который является инвертирующим усилителем с единичным коэффициентом усиления.

После перехода триггера в противоположное состояние напряжение на интеграторе будет линейно убывать до тех пор, пока опять не сработает триггер. Таким образом, данную схему можно использовать и как генератор треугольных импульсов, так и как генератор прямоугольных импульсов, в зависимости с выхода интегратора, или триггера берется сигнал.

**Генератор треугольных импульсов**

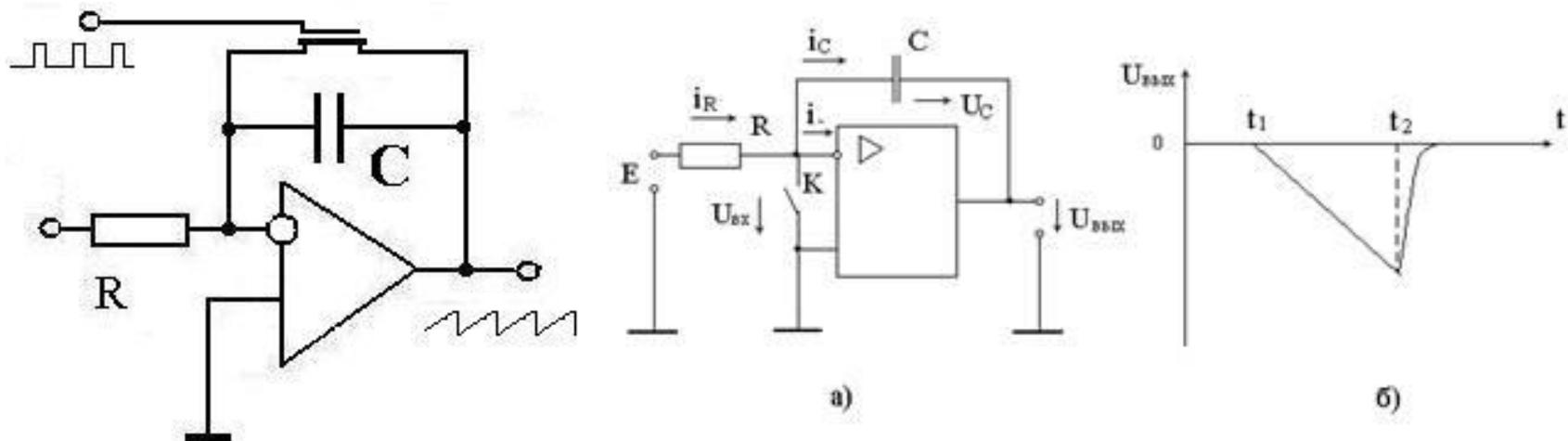


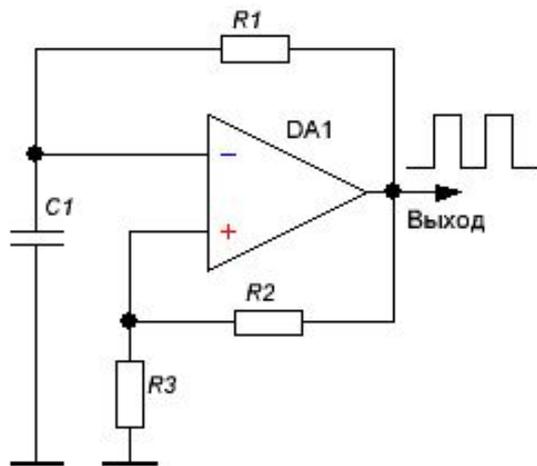
Схема генератора пилообразного напряжения создана на базе интегратора.

Постоянное напряжение на входе преобразуется в линейнонарастающее напряжение на выходе.

При замыкании электронного ключа, выполненного на основе МОП транзистора и управляемого короткими импульсами, происходит сброс выходного напряжения в нуль.

Скорость нарастания и линейность зависит от величин  $R$  и  $C$ .

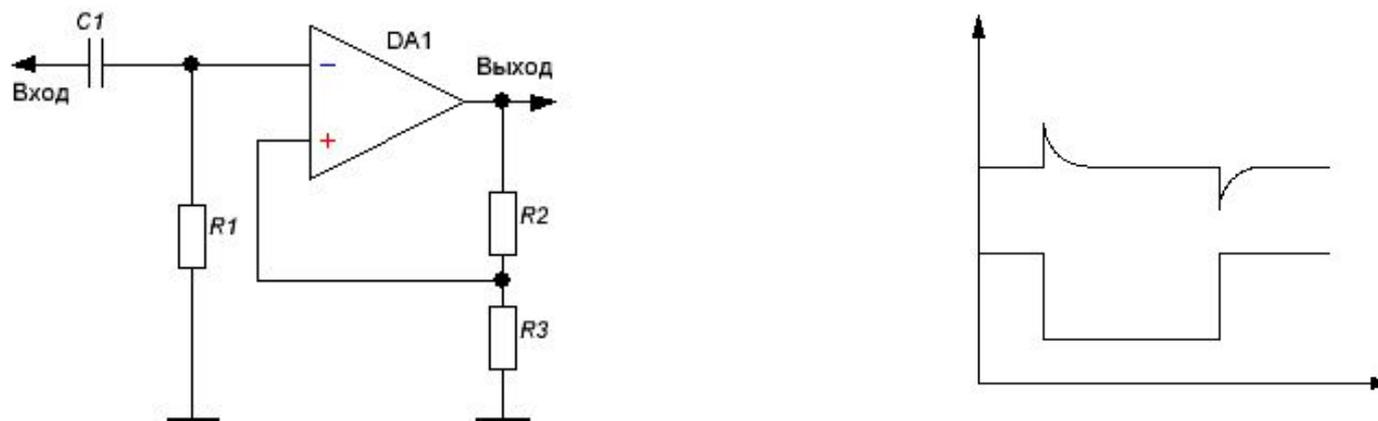
## Генератор пилообразного напряжения



Мультивибратор генерирует прямоугольные импульсы с частотой, который можно посчитать по формуле (вернее, посчитаем период, а частота, как известно обратна периоду):

$$T = 2C1R1\text{Loge}\left(1 + 2\frac{R2}{R3}\right)$$

Мультивибратор



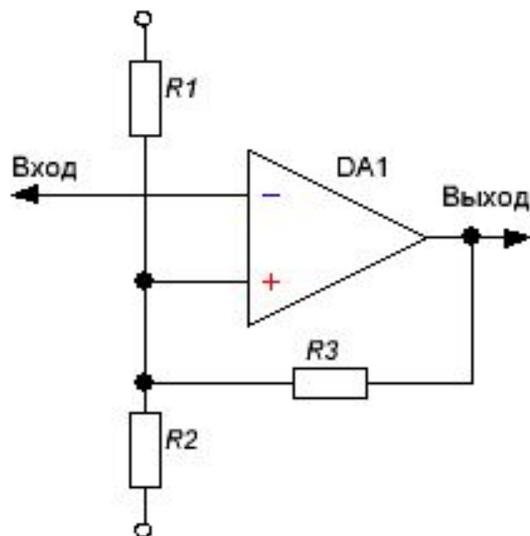
Бистабильный мультивибратор имеет два стабильных состояния, которые характеризуются разным напряжением на его выходе. Переключаются эти самые состояния входными импульсами разной полярности, примерно, как показано на рисунке.

Величина импульса, необходимая для переключения мультивибратора может быть оценена по формуле: и.

$$V = V_0 \frac{R3}{R2 + R3}$$

Где  $V_0$  - напряжение питания.

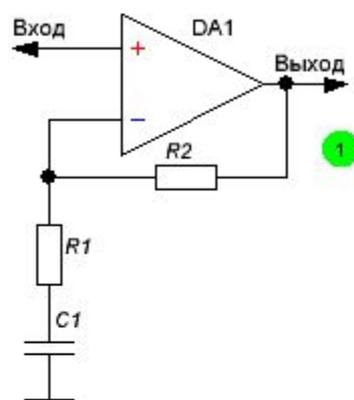
## Бистабильный мультивибратор



**Триггер Шмидта** представляет собой практически полный аналог обычного компаратора за исключением одного - положительной обратной связи через резистор  $R3$ . Эта связь формирует так называемый *гистерезис* - задержку включения и выключения компаратора.

Вернее немного повышает порог включения и немного уменьшает порог выключения. Таким образом, мы можем обеспечить более высокую помехоустойчивость схемы.

## Триггер Шмидта



Это фильтр первого порядка с ослаблением ненужного сигнала - крутизной - 6дБ на октаву. Определить частоту среза можно, рассчитывая реактивное сопротивление конденсатора, когда оно станет равным сопротивлению резистора, включенного последовательно с конденсатором.

Формула следующая:

$$E_c = 2\pi fC$$

где  $f$  - частота в Герцах,  $C$  - емкость в Фарадах,  $E_c$  - сопротивление в Омах.

## Фильтр высоких частот с неинвертирующим включением ОУ

# Анализ цепей с ОУ

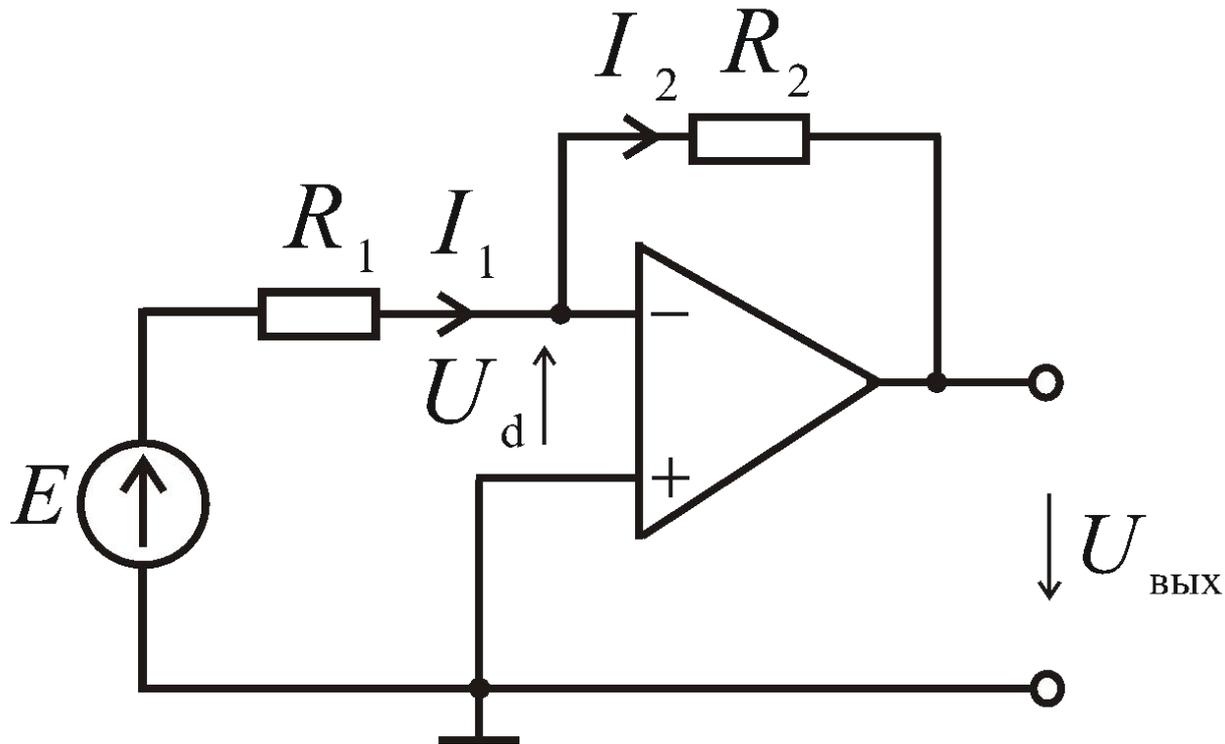
Правила анализа электронных цепей с ОУ, работающими в линейном режиме.

1. Входные токи ОУ равны нулю:  $I_+ = 0, I_- = 0$
2. Напряжение на входе ОУ равно нулю:  $U_d = 0$   
(правило виртуального короткого замыкания).

Правило виртуального короткого замыкания справедливо только в том случае, если ОУ охвачен отрицательной обратной связью и его выходное напряжение меньше напряжения насыщения.

# Анализ цепей с ОУ

Пример 1. Рассчитать выходное напряжение в схеме, изображенной на рисунке. ОУ считать идеальным.



# Анализ цепей с ОУ

Запишем уравнение по первому закону Кирхгофа для узла 1:

$$-I_1 + I_2 + I_- = 0$$

Уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, включающего источник  $E$ , резистор  $R_1$  и вход ОУ:

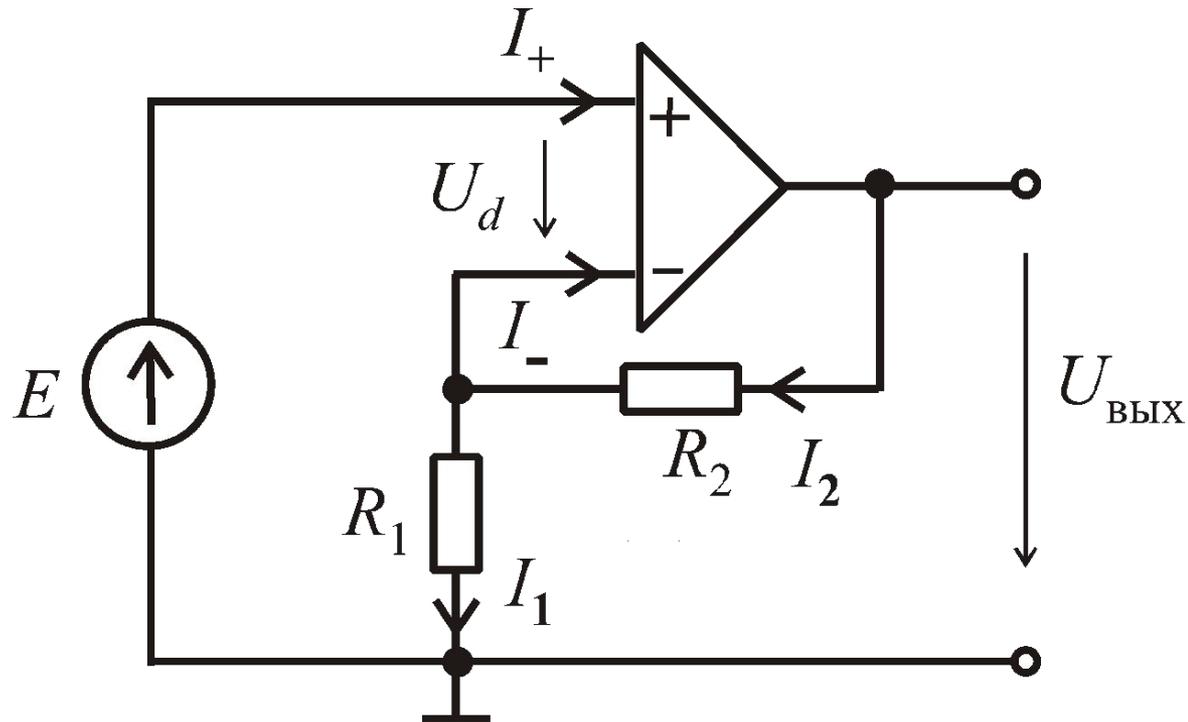
$$R_1 I_1 - U_d = E$$

Для контура, включающего вход ОУ, резистор  $R_2$  и выход схемы, имеем

$$U_d + R_2 I_2 + U_{\text{ВЫХ}} = 0$$

# Анализ цепей с ОУ

Пример 2. Неинвертирующий усилитель напряжения



Уравнение по первому закону Кирхгофа для узла, к которому подключен инвертирующий вход:

$$I_1 - I_2 + I_- = 0$$

# Анализ цепей с ОУ

Уравнение по второму закону Кирхгофа для контура, включающего источник  $E$ , резистор  $R_1$  и вход ОУ:

$$U_d + R_1 I_1 = E.$$

Для контура, включающего резисторы  $R_1$ ,  $R_2$  и выход схемы, имеем

$$-R_1 I_1 - R_2 I_2 + U_{\text{ВЫХ}} = 0.$$

Решая эту систему уравнений и учитывая, что

$$U_d = 0, \quad I_- = I_+ = 0$$

получаем

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} E.$$