

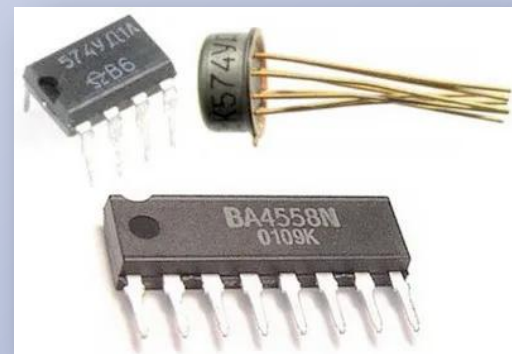
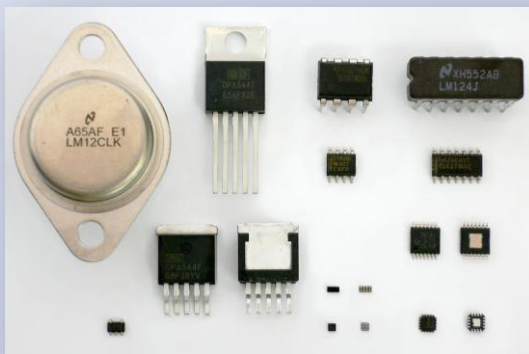
ЭЛЕКТРОНИКА

Лектор:

к.ф.-м.н. Алимгазинова Назгуль Шакаримовна

ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ

Операционный усилитель (ОУ) – высококачественный многокаскадный интегральный усилитель постоянного тока с дифференциальным входом и однотактным 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.

*В иностранной литературе имеет сокращение **OpAmp** от английского **Operational Amplifier***

История создания



1940 г.

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

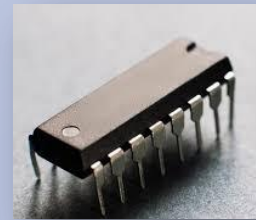
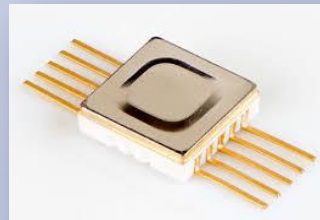
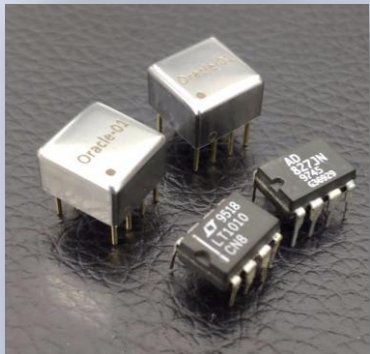


1963-
1968 г.г.

- 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 р-п переходом
- ОУ на полевых транзисторах с изолированным каналом



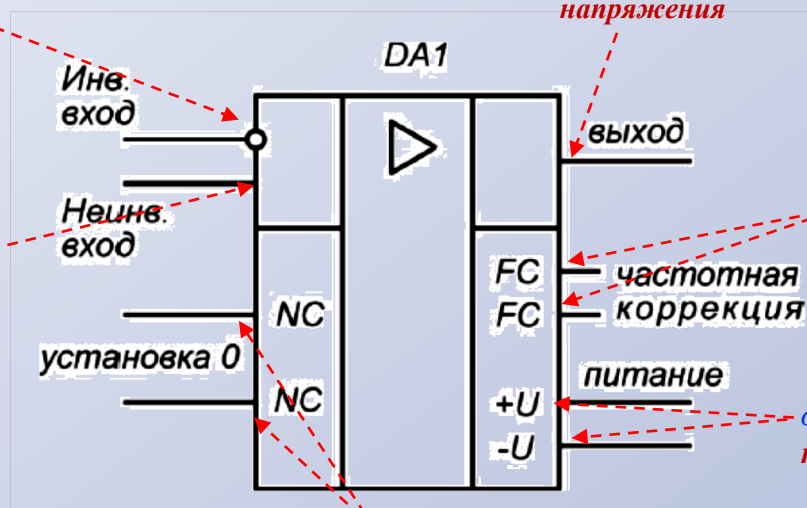
Условно-графическое обозначение ОУ

Инвертирующий вход (обозначен знаком «-» или «o»), $U_{вх-}$ — напряжение на инвертирующем входе. Сигнал на этом входе и выходе находятся в противофазе.

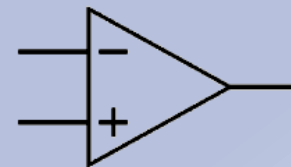
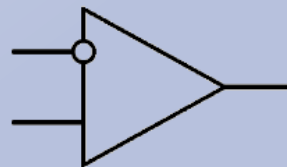
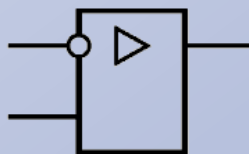
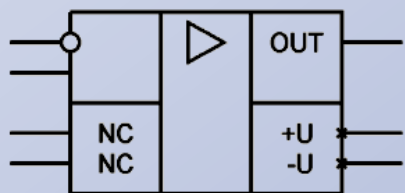
Неинвертирующий вход (обозначен знаком «+»), $U_{вх+}$ — напряжение на неинвертирующем входе. Сигнал на этом входе и выходе находятся в одной фазе.

Для получения
выходного
усиленного
напряжения

Частотная коррекция — для подключения внешних элементов (конденсатора или конденсатора и резистора) с целью предотвращения самовозбуждения (генерации) ОУ, если последний не имеет внутренних цепей коррекции;



Коррекция нуля — для подключения внешнего напряжения (через потенциометр) с целью компенсации напряжения смещения (или сдвига), т.е. установки нуля на выходе при закороченных на «землю» входах;

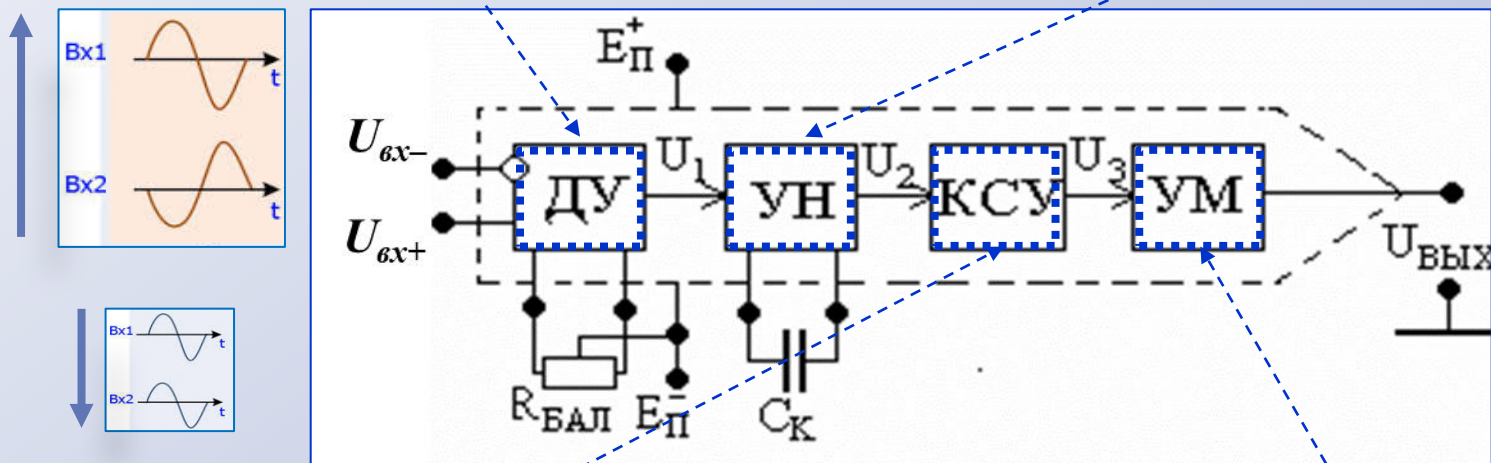


Структурная схема ОУ

ОУ - многокаскадное устройство и состоит из блоков.

ДУ – дифференциальный усилитель, предназначен для усиления дифференциальной и подавления синфазной составляющих входных сигналов.

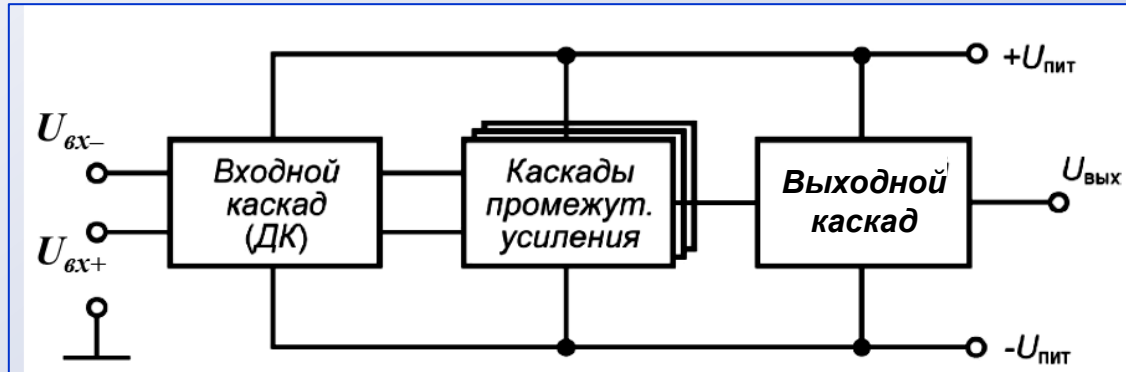
УН – усилитель напряжения, обеспечивает основное усиление сигнала по напряжению.



КСУ – каскад сдвига уровня. Обеспечивает сдвиг усиленного входного сигнала по постоянной составляющей, что необходимо для нормальной работы усилителя мощности.

УМ – усилитель мощности, он служит для увеличения нагрузочной способности ОУ, создавая на нагрузке сигнал необходимой мощности.

Функциональная схема ОУ



Входной дифференциальный каскад выполняет функции:

- 1) *придает дифференциальный вход ОУ;*
- 2) *обеспечивает большое $R_{вх}$;*
- 3) *подавление синфазного сигнала (за счет высокой степени симметрии).*

Эти каскады выполняются на биполярных транзисторах типа супер- β в микротоковом режиме, либо на полевых транзисторах. Коэффициент усиления входного каскада ОУ сравнительно небольшой и не превышает несколько десятков.

Каскады промежуточного усиления обеспечивают:

- 1) *необходимый коэффициент усиления;*
- 2) *переход от симметричного выхода к несимметричному.*

Дополнительные функции каскадов промежуточного усиления:

- балансировка ОУ, т.е. установка на его выходе нулевого напряжения при закороченных входных зажимах;
- частотная коррекция, т.е. введение дополнительной частотно-зависимой отрицательной обратной связи для снятия самовозбуждения схемы (конденсатор $C < 30$ пФ).

Выходной каскад ОУ обеспечивает:

- 1) *требуемое (низкое) выходное сопротивление $R_{вых}$;*
- 2) *требуемую мощность в нагрузке.*

Типовая схема – усилитель мощности на комплементарной паре относительно мощных транзисторов.

Функциональная и принципиальная схемы ОУ

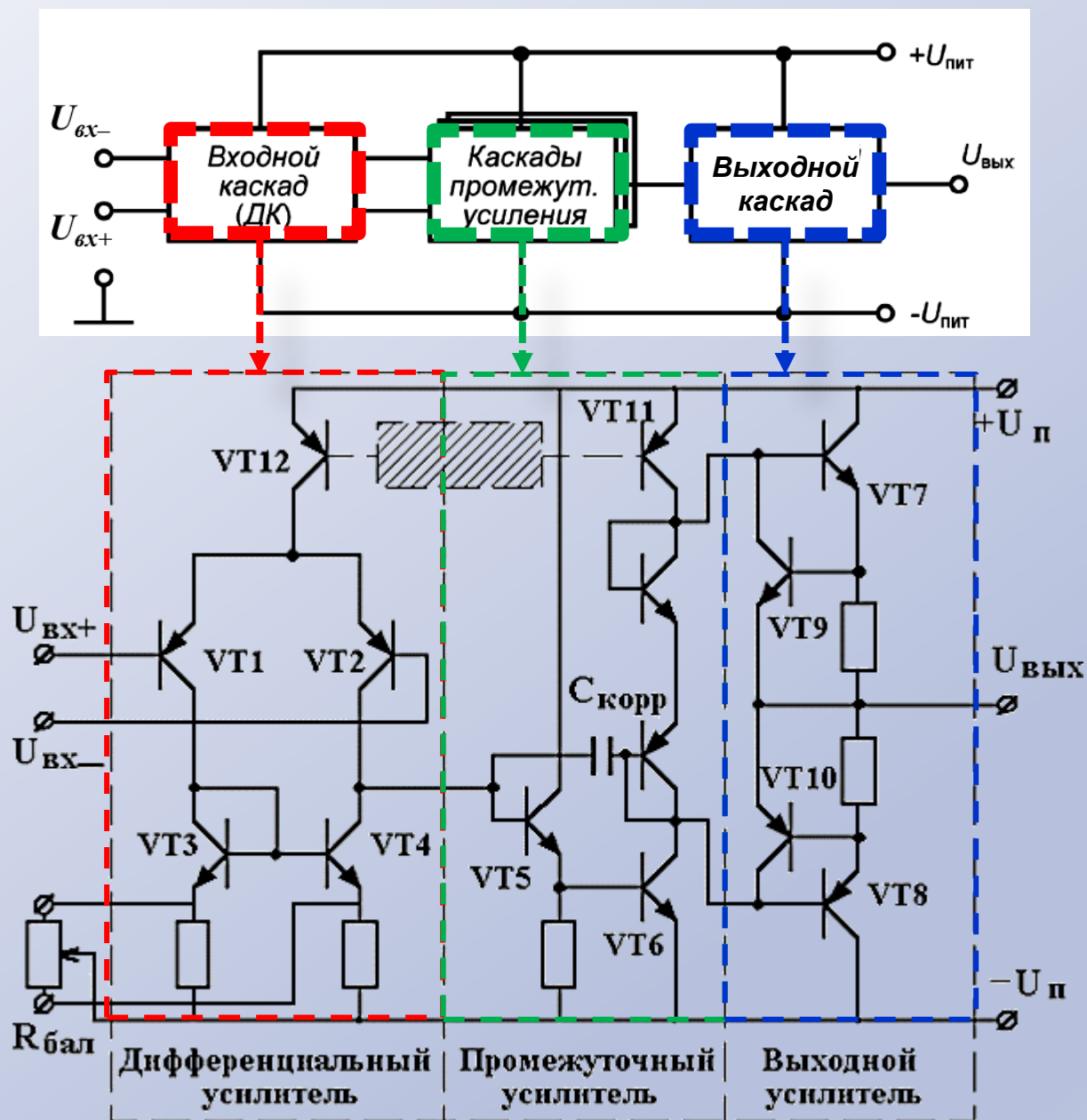
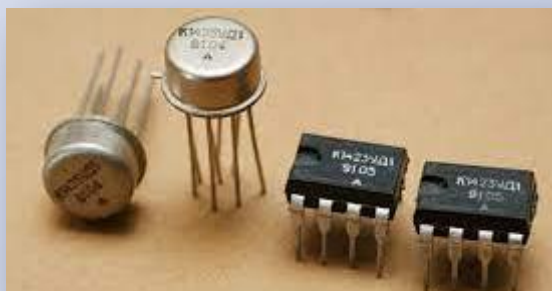
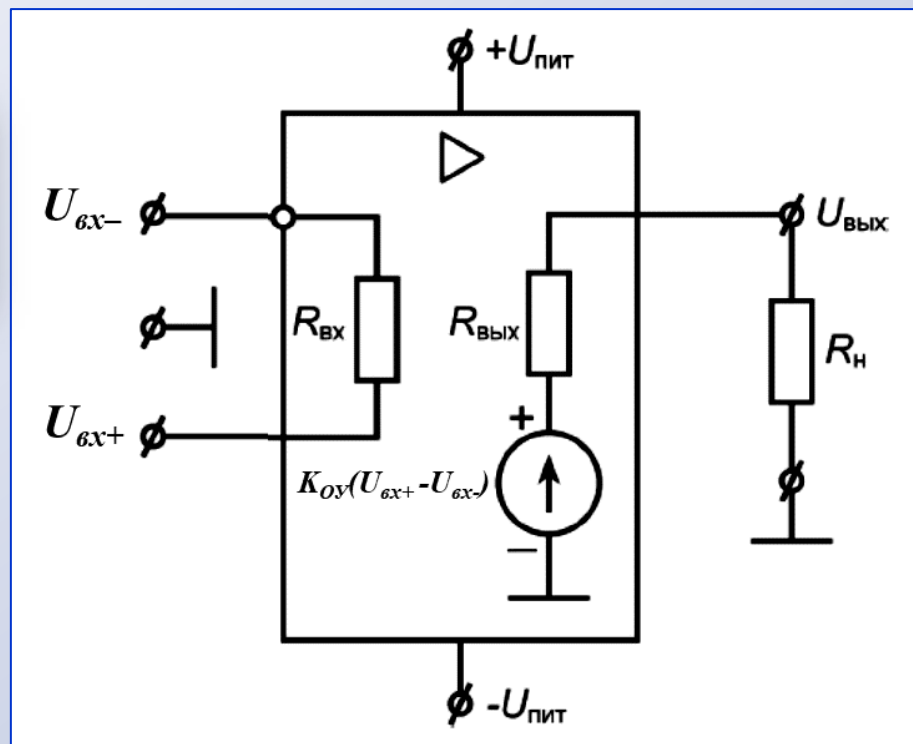
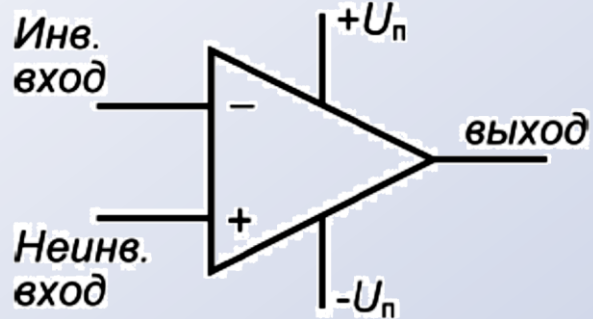


Схема замещения ОУ



Основные параметры и характеристики ОУ



ОУ

1) Передаточные

2) Входные

3) Выходные

4) Частотные

5) Динамические

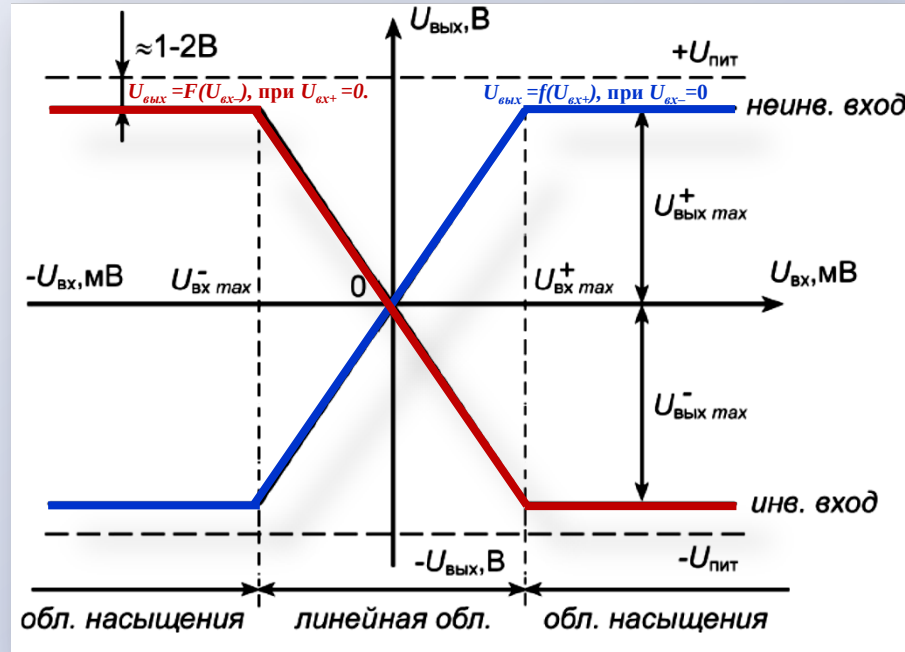
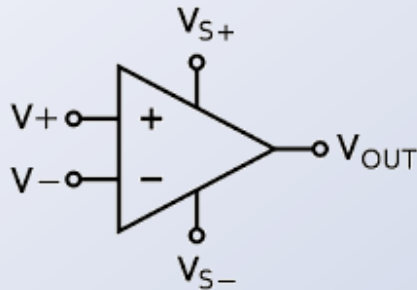
6) Дрейфовые



1. Передаточные параметры

1.1 Передаточная или амплитудная характеристика (АХ)

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}+}, U_{\text{вх}-})$$



Режимы работы ОУ

1. При малых входных сигналах

наблюдается линейная зависимость между выходным и входными сигналами

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{ОУ}}(U_{\text{вх}+} - U_{\text{вх}-})$$

2. При больших входных сигналах

ОУ переходит в состояние насыщения, т.е. его выходной сигнал принимает напряжение близкое к напряжению питания

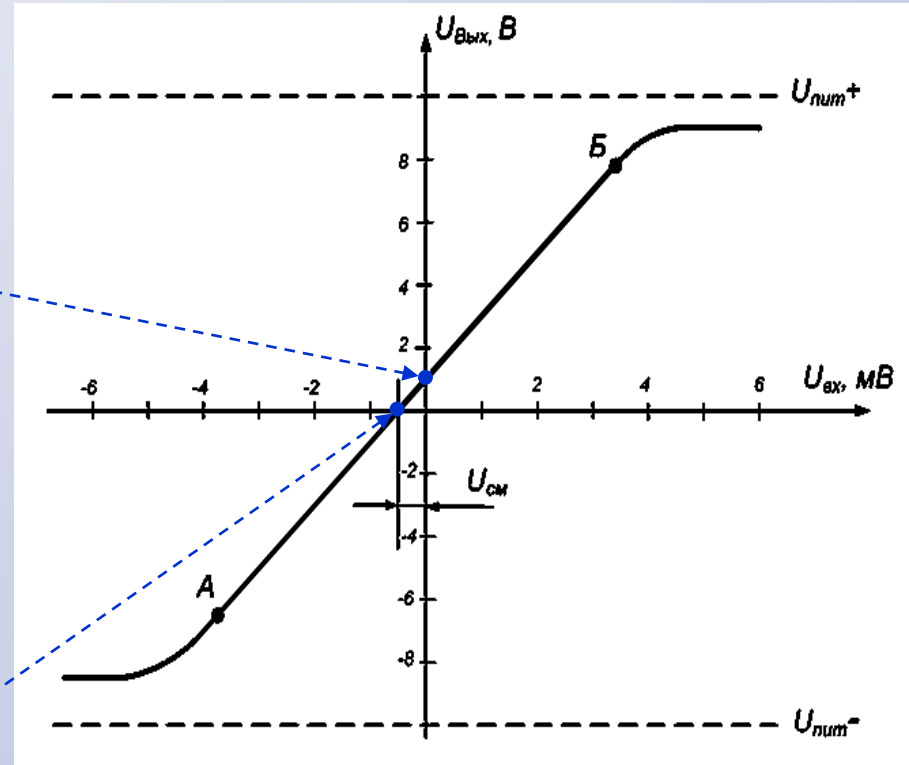
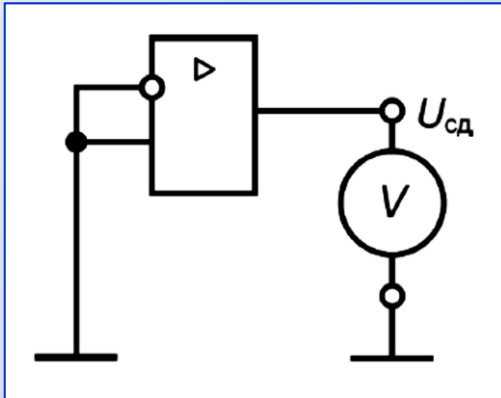
$$U_{\text{ВЫХ}} = \begin{cases} E_{\text{П}}^+, U_{\text{ВХ}} > 0 \\ E_{\text{П}}^-, U_{\text{ВХ}} < 0 \end{cases}$$

1. Передаточные параметры ОУ

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

1.2 Напряжение сдвига

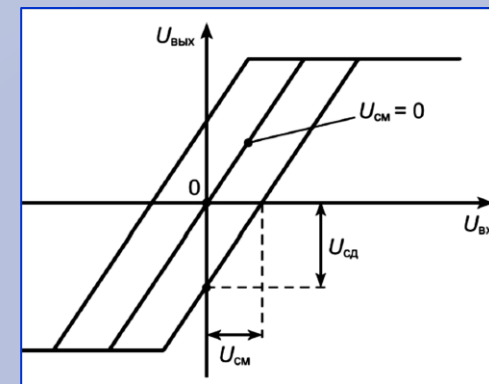
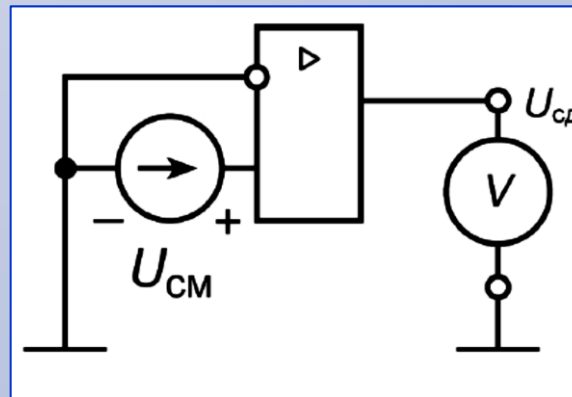
$$U_{сдв} = U_{вых} \Big|_{U_{вх+} = U_{вх-} = 0}$$



1.3 Напряжение смещения нуля

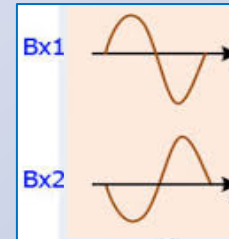
$$U_{см0}$$

входное напряжение, которое надо подать на вход, чтобы устранить разбаланс ОУ.



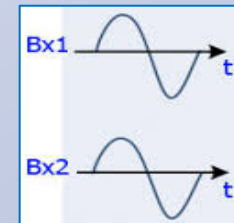
1.4 Коэффициент усиления дифференцирующего сигнала

$$K_{OYдиф} = \frac{U_{BЫX}}{U_{BXдиф}}$$



1.5 Коэффициент усиления синфазного сигнала

$$K_{OYCC} = \frac{U_{BЫX}}{U_{BXCC}}$$



1.6 Коэффициент ослабления синфазного сигнала

$$K_{KOCC} = \frac{K_{OYдиф}}{K_{OYCC}}$$

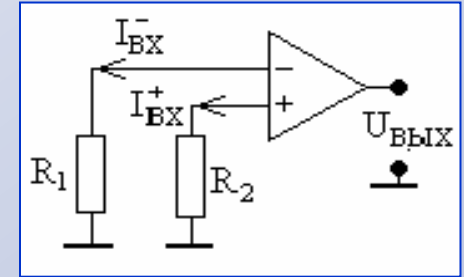
2. Входные параметры ОУ

2.1 Входные токи

$$I_{BX}^-, I_{BX}^+$$

$$I_{BX}^-, I_{BX}^+ = \begin{cases} 10^{-6} \div 10^{-9} \text{ А, Бип.Тр} - p \\ 10^{-9} \div 10^{-12} \text{ А, Пол.Тр} - p \end{cases}$$

Входные токи создают на резисторах R_1, R_2 напряжения, если R_1, R_2 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.

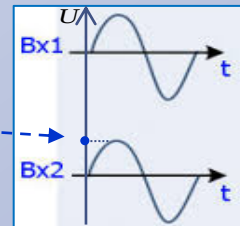


2.2 Разность входных токов

$$\Delta I_{BX} = I_{BX}^+ - I_{BX}^-$$

2.3 Максимальное значение входного синфазного напряжения

$$U_{\max CC}$$



2.4 Величина входного сопротивления

- ✓ входное дифференциальное сопротивление
- ✓ входное синфазное сопротивление

$$R_{BX\text{диф}}$$

$$R_{BXCC}$$

$$R_{BX} = \frac{\Delta U_{BX}}{\Delta I_{BX}}$$

$$R_{BX} = 10^6 - 10^{12} \text{ Ом} \quad (R_{BX \text{ тип}} = 10 \text{ МОм})$$

3. Выходные параметры ОУ

4.1 Выходное сопротивление ОУ

$$R_{\text{вых}}$$

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{\text{вых}}}{\Delta I_{\text{вых}}}$$

$$R_{\text{вых}} = (10^2 - 10^3) \text{ Ом}$$

Выходное сопротивление определяется по нагрузочной (внешней) характеристике.

4.2 Максимальная амплитуда выходного напряжения

$$U_{\text{ВЫХ max}}$$

$$U_{\text{ВЫХ max}} = (E_{\text{П}}^+ - 1,5) \text{ В}$$

4.3 Максимальная величина выходного тока

$$I_{\text{ВЫХ max}}$$

$$I_{\text{ВЫХ max}} \leq 10 \text{ мА}$$

4.4 Наличие защиты от КЗ

4. Частотные параметры ОУ

4.1 Граничная частота

f_{cp}

частота, на которой коэффициент усиления уменьшается в корень из двух раз, если график построен в линейном масштабе,

$$f_{cp} \rightarrow \frac{K(f_{cp})}{K_0} = \frac{1}{\sqrt{2}} = K(f_{cp}) \cong 0,7K_0$$

или на 3дБ, если график построен в логарифмическом масштабе

$$K(f_{cp}) = K_0 - 3\text{дБ.}$$

4.2 Частота единичного усиления

f_1

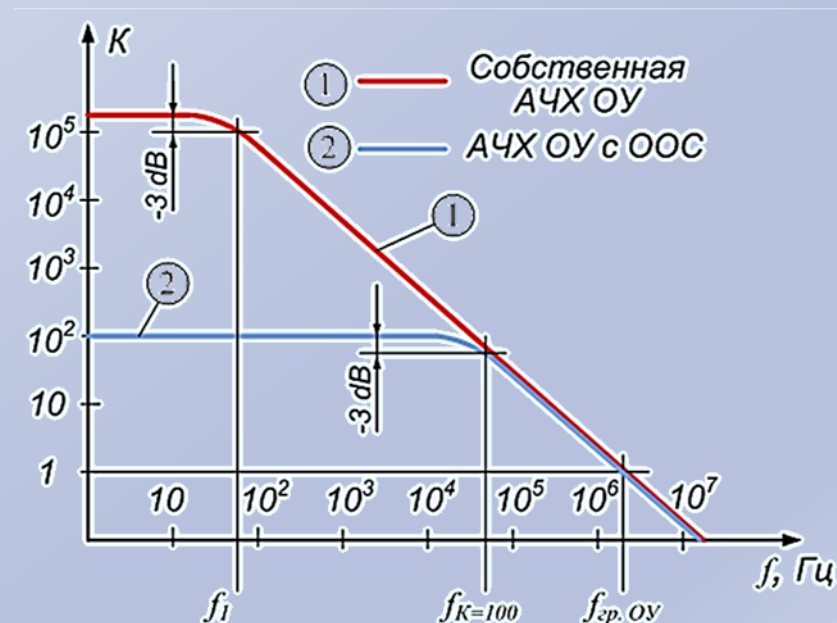
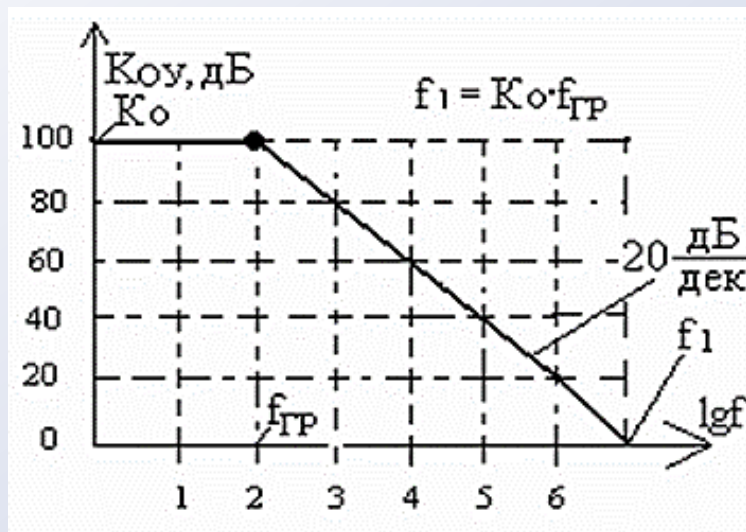
частота при которой

$$K(f_1) = 1$$

или

$$K(f_1)[\text{дБ}] = 0 \text{ дБ.}$$

$$f_1 = K_{OY} \cdot f_{cp}$$



5. Динамические параметры ОУ

Они характеризуют быстрдействие переключения ОУ

5.1 Скорость нарастания выходного сигнала

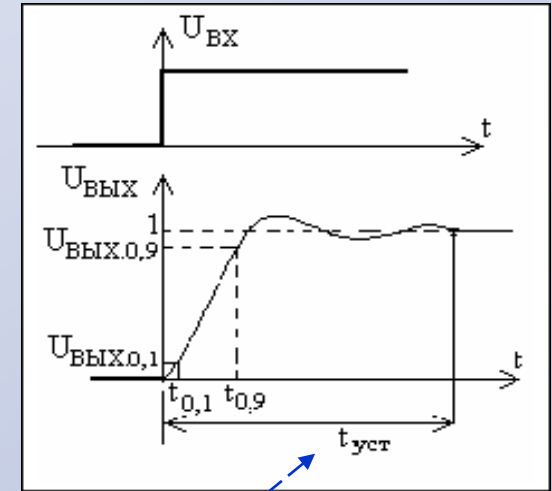
$$\nu = \frac{U_{ВЫХ\,0,9} - U_{ВЫХ\,0,1}}{t_{0,9} - t_{0,1}}$$

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

Характеризует скорость отклика на ступенчатое воздействие.

5.2 Время установления выходного напряжения своего стационарного значения с заданной точностью

- время от момента подачи на вход импульса напряжения до момента последнего вхождения в зону заданной погрешности (1%, 0,1% или 0,01%).



$t_{уст}$

6. Дрейфовые параметры ОУ

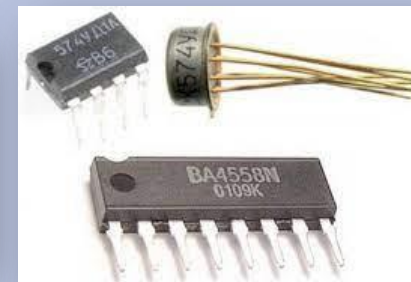
- ✓ Температурный дрейф напряжения смещения ($\Delta U_{см}$, мкВ/°C)
- ✓ Температурный дрейф разности входного тока ($\Delta \Delta I_{вх}$, нА/°C)

Они характеризуют зависимость перечисленных параметров от температуры окружающей среды и от изменения напряжения питания.

Эксплуатационные параметры ОУ



1. Напряжение питания ($\pm U_{\text{пит}}$, В)
Обычно $U_{\text{пит}} = \text{от } \pm 5\text{В до } \pm 18\text{В}$
2. Средний потребляемый ток ($I_{\text{пот}}$, мА)
3. Потребляемая мощность ($P_{\text{пот}}$, мВт)
4. Диапазон рабочих температур (от t_{min} до t_{max} , $^{\circ}\text{C}$)
5. Максимальные выходное и входное напряжения в линейном режиме
Например, при $U_{\text{пит}} = \pm 15\text{В}$ имеем $U_{\text{м вх}} = U_{\text{м вых}} = \pm 10\text{В}$
6. Напряжение насыщения ОУ ($U_{\text{нас}}$, В)
зависит от $U_{\text{пит}}$; величина меньше на 1-2В;
технология Rail-to-rail: ($V_{\text{cc}} - 40\text{mV}$)
7. Максимальный выходной ток ($I_{\text{пот}}$, мА)
Часто задается минимальным сопротивлением нагрузки $R_{\text{н}}$



Параметры ОУ

Идеальный усилитель напряжения

Входное сопротивление $R_{вх} \rightarrow \infty$

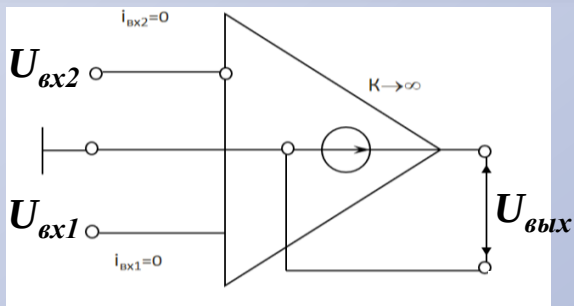
Выходное сопротивление $R_{вых} \rightarrow 0$

Собственный коэффициент усиления по напряжению $K_{ОУ} \rightarrow \infty$

Идеальная симметрия

Ширина полосы пропускания $\Delta\omega \rightarrow \infty$

Задержка выходного сигнала относительно входного, т.е. время задержки $t_{зд} \rightarrow 0$

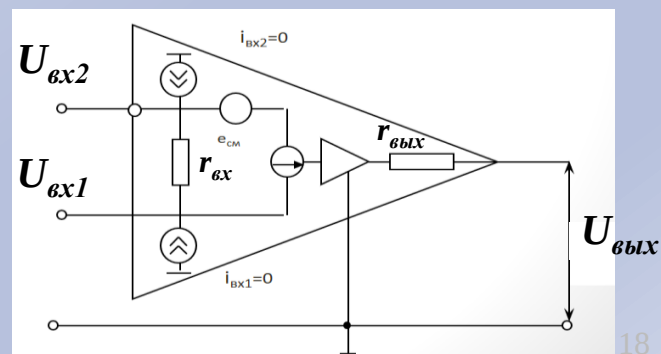


Реальный усилитель напряжения

Собственный коэффициент усиления по напряжению
 $K_{ОУ} = 10^3 - 10^5$ ($K_{ОУ \text{ тип}} = 10^5$)

Входное сопротивление
 $R_{вх} = 10^6 - 10^{10} \text{ Ом}$
($R_{вх \text{ тип}} = 10 \text{ МОм}$)

Выходное сопротивление
 $R_{вых} = 150 - 300 \text{ Ом}$
($R_{вых \text{ тип импорт}} = 75 \text{ Ом}$)



Классификация ОУ

По областям применения

Индустриальный стандарт ОУ

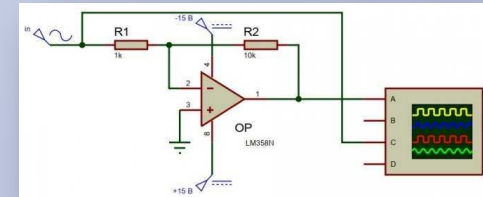
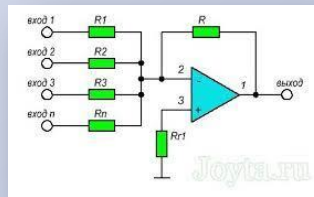
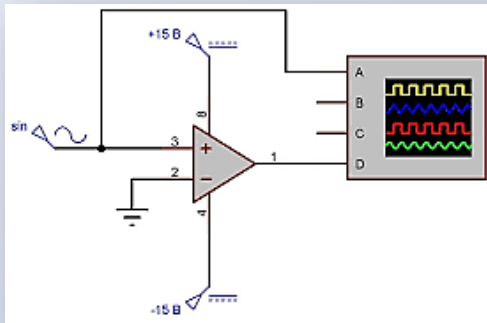
Прецизионные ОУ (в измерительных схемах)

С малым входным током (электрометрические) ОУ

Микромощные и мощные (сильноточные) ОУ

Низковольтные и высоковольтные ОУ

Быстродействующие ОУ



По входным сигналам

Обычный двухходовый ОУ

С тремя входами ОУ

По выходным сигналам

Обычный с одним выходом ОУ

С дифференциальным выходом ОУ

Классификация ОУ (описание)

1. Индустриальный стандарт (универсальные) ОУ – самый распространённый тип операционных усилителей. Для этого класса ОУ характерно применение внутренней частотной коррекции и малая стоимость. Они 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. 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.

3. 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.

4. 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.

5. Быстродействующие ОУ. Их применяют для усиления импульсных и широкополосных сигналов. 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.

6. Специальные ОУ. Для решения различных задач были разработаны специализированные ОУ:

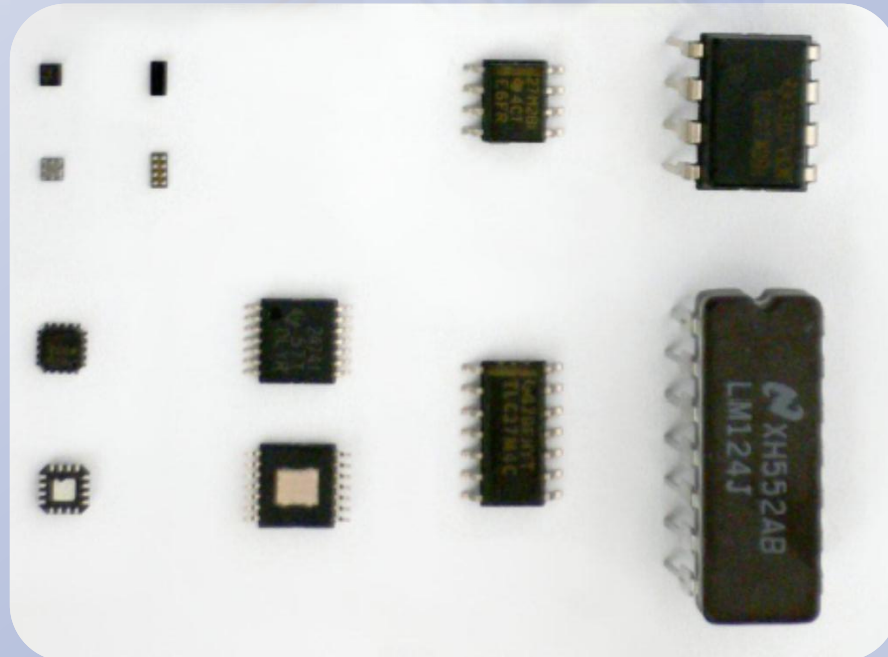
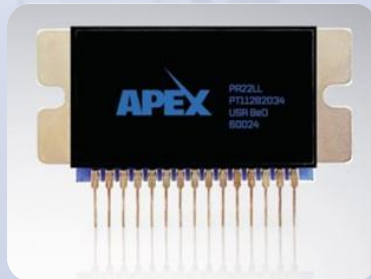
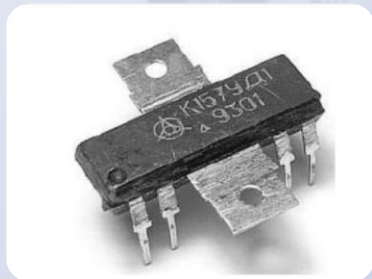
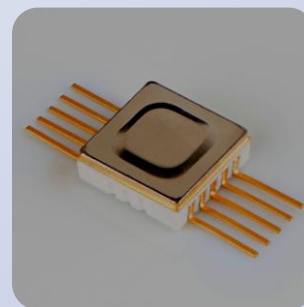
Буферы – имеющие фиксированный единичный коэффициент передачи, большое входное и малое выходное сопротивление, высокую скорость нарастания. Они применяются в основном для согласования высокоомного выходного сопротивления источника сигнала с малым входным сопротивлением нагрузки.

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.

Основные компании-производители ОУ



1. Универсальные ОУ (широкого применения)
 $U_{cm} = 5 \div 25 \text{ мВ}$; $V_U = 0,5 \div 5 \text{ В/мкс}$; $I_H = 2 \div 30 \text{ мА}$
2. Прецизионные ОУ
 $U_{cm} < 1 \text{ мВ}$; $A > 100\,000$
3. Быстродействующие ОУ
 $V_U = 20 \div 150 \text{ В/мкс}$; $t_{уст} \leq 1 \text{ мкс}$; $f_1 \geq 50 \text{ МГц}$
4. Микромощные ОУ
 $I_{пот} < 1 \text{ мА}$; $U_{пит} = (\pm 1,5 \div \pm 3) \text{ В}$
5. Мощные и высоковольтные ОУ
 $I_{вых} \geq 100 \text{ мА}$; $U_{вых} \geq 15 \text{ В}$

БАЗОВЫЕ СХЕМЫ ВКЛЮЧЕНИЯ ОУ

1. Неинвертирующий усилитель

Данный усилитель обеспечивает фазу (полярность) выходного сигнала совпадающую с фазой входного сигнала



Неинвертирующий усилитель выполняет преобразование

$$U_{\text{вых}} = K_{\text{ОУ}} \cdot U_{\text{вх}},$$

где

$$K_{\text{ОУ}} \rightarrow \infty, \text{ то } \Delta U \rightarrow 0 \longrightarrow U_{\text{вх}+} = U_{\text{вх}-}$$

$$I_2 - I_1 - I_{\text{вх ОУ}}^- = 0.$$

$$I_{\text{вх ОУ}}^- \rightarrow 0, \longrightarrow I_2 = I_1$$

$$U_{\text{вх}}^+ = U_{\text{вх}}^- = U_{\text{вх}} = U_{R1}$$

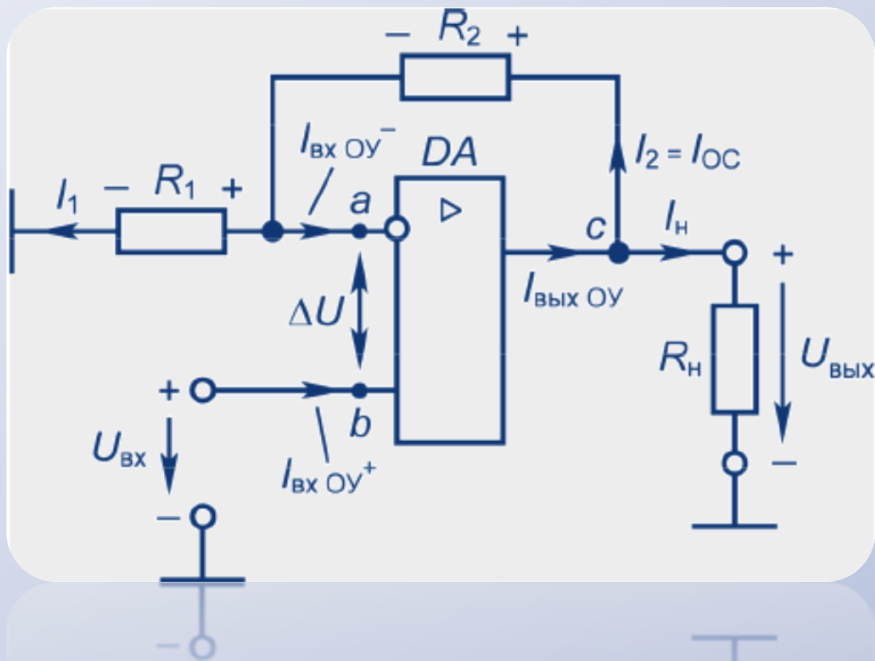
$$U_{\text{вых}} = U_{R2} + U_{R1}$$

$$U_{\text{вх}} = U_{R1} = I_1 \cdot R_1;$$

$$U_{\text{вых}} = U_{R2} + U_{R1} = I_2 \cdot (R_2 + R_1).$$

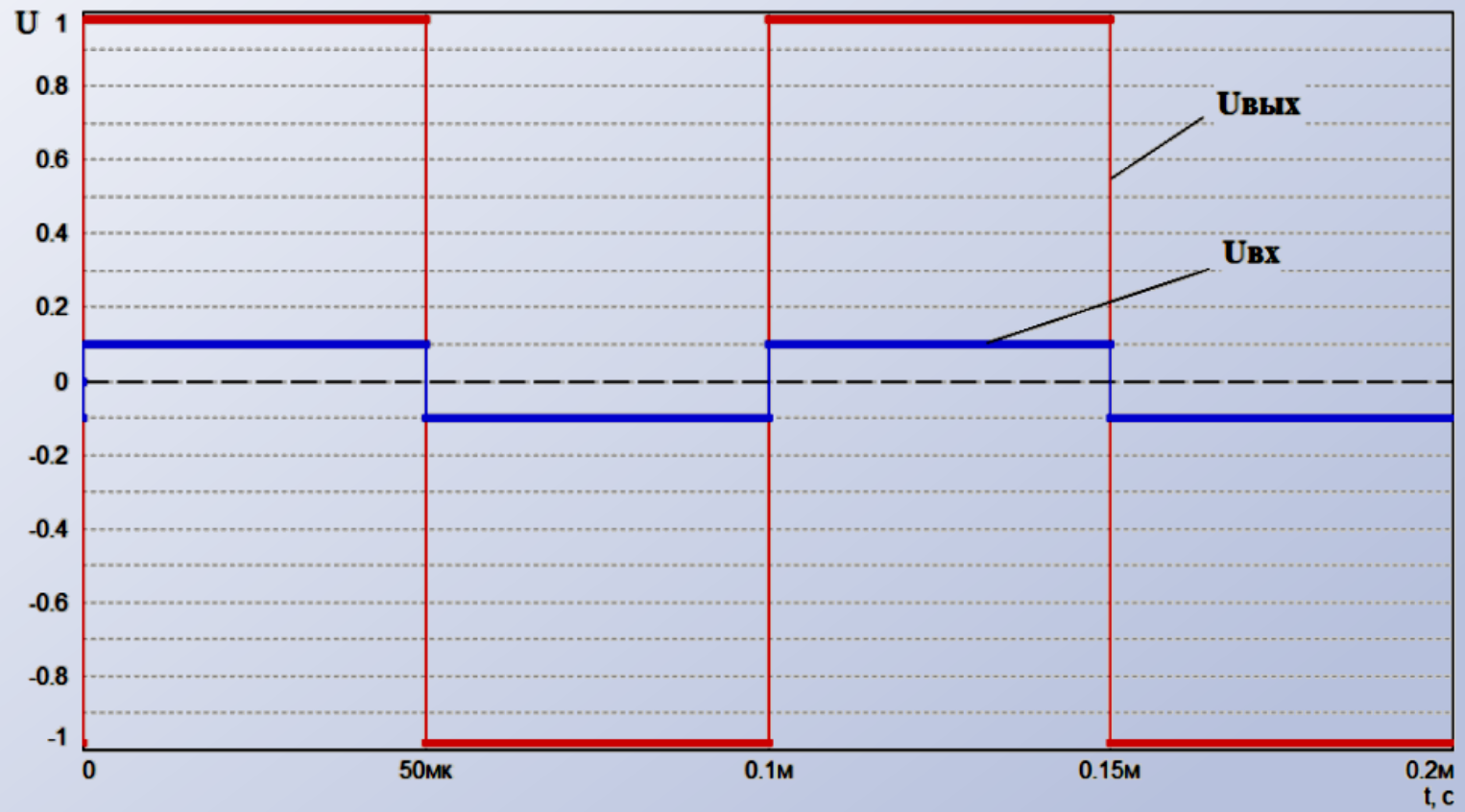
$$K_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Коэффициент усиления
неинвертирующего
усилителя



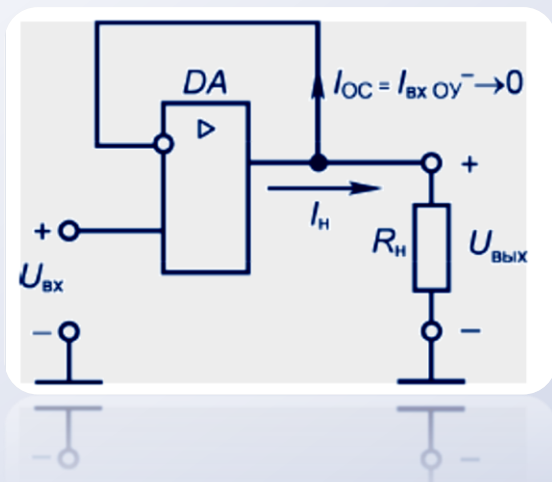
$$I_{\text{вх ОУ}} = I_{\text{ОС}} + I_{\text{н}}.$$

$$R_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх}}}{I_{\text{вх ОУ}}} = \left| I_{\text{вх ОУ}} \rightarrow 0 \right| \rightarrow \infty; \quad R_{\text{вых}} \neq R_{\text{вх ОУ}} \rightarrow 0.$$



Переходная характеристика неинвертирующего усилителя

2. Повторитель напряжения



Если $R_1 = \infty$ (или $R_2 = 0$), то $K_{OY} = 1$, и такой усилитель называется **повторителем напряжения**.

Повторитель напряжения предназначен для согласования сопротивлений, т.е. в качестве буферного каскада со свойствами:

$$R_{BX} = \infty; \quad R_{ВЫХ} = 0;$$

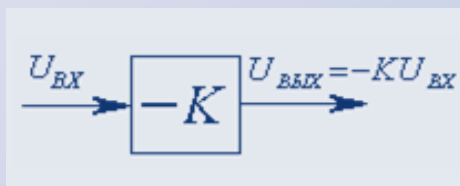
$$U_{ВЫХ} = U_{ВХ};$$

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

Коэффициент усиления повторителя напряжения

3. Инвертирующий усилитель

Данный усилитель обеспечивает фазу (полярность) выходного сигнала противоположную входному.



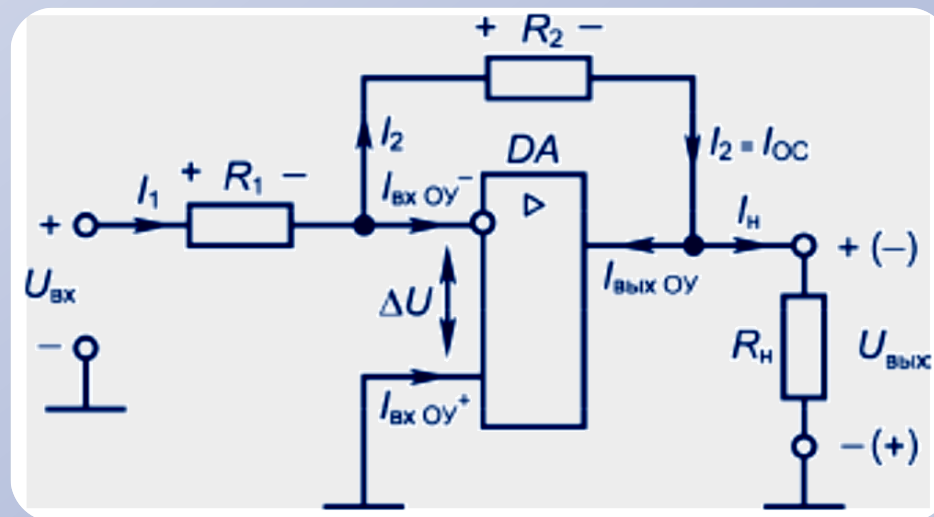
$$I_1 = I_2 + I_{\text{вх ОУ}}^-.$$

$$I_{\text{вх ОУ}}^- \rightarrow 0,$$

$$I_2 = I_1$$

$$U_{\text{вх}}^+ = U_{\text{вх}}^-$$

$$U_{R1} = U_{\text{вх}}; \quad U_{R2} = U_{\text{вых}}^-$$



$$I_1 = \frac{U_{R1}}{R_1} = \frac{U_{BX}}{R_1} \quad I_2 = I_{OC} = \frac{U_{R2}}{R_2} = -\frac{U_{ВЫХ}}{R_1}$$

$$I_1 = I_2 = I_{OC} = \frac{U_{BX}}{R_1} = -\frac{U_{ВЫХ}}{R_1}$$

$$K_U = U_{ВЫХ} / U_{BX}$$

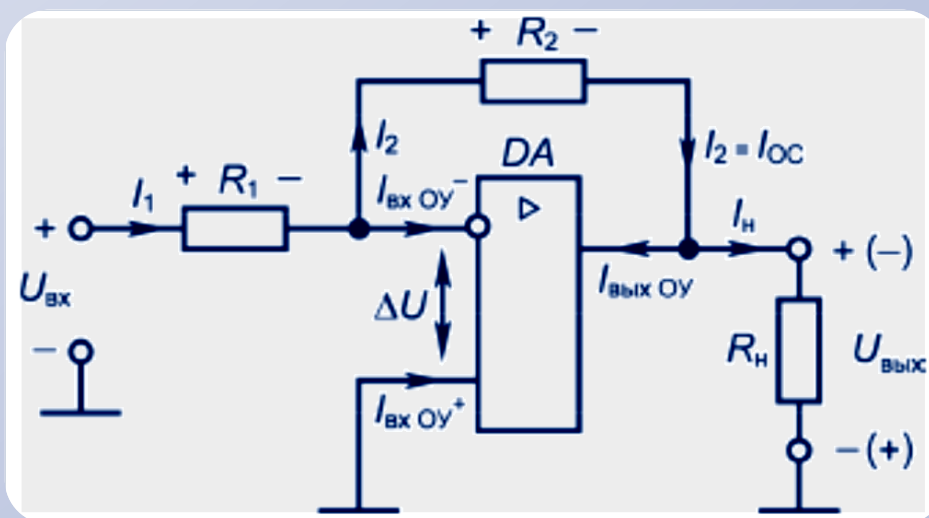
*Коэффициент усиления
инвертирующего усилителя*

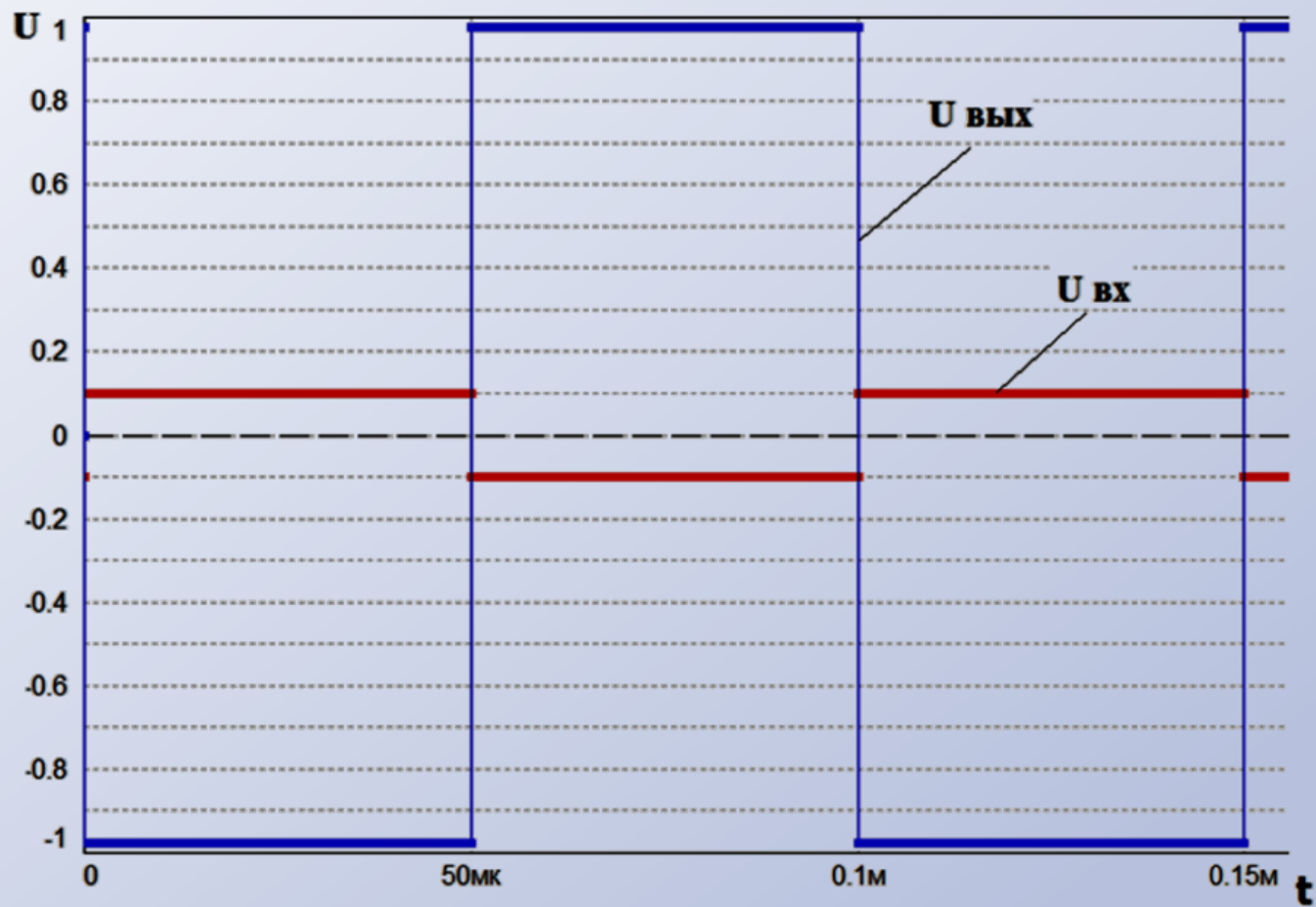
$$K_U = -\frac{R_2}{R_1}$$

$$I_{ВЫХОУ} = I_{OC} + I_H$$

$$R_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} = \frac{U_{R1}}{I_1} = R_1$$

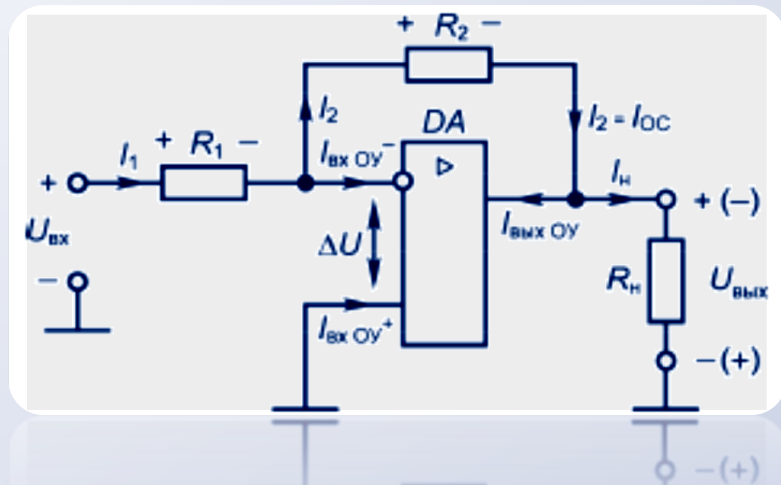
$$R_{ВЫХ} \neq R_{ВЫХОУ} \rightarrow 0$$





Переходная характеристика инвертирующего усилителя

4. Инвертор напряжения

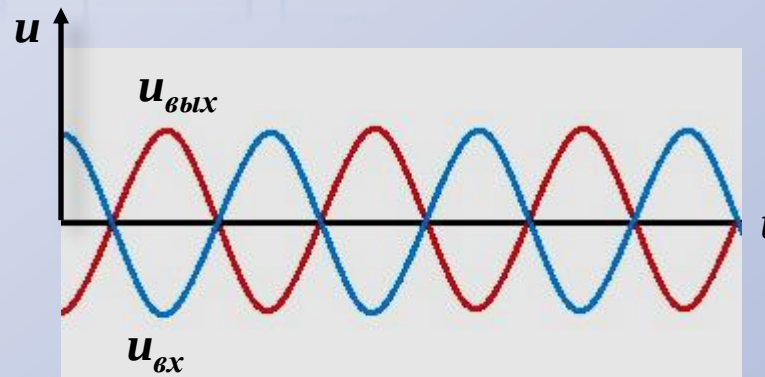


Инвертор напряжения получается из схемы инвертирующего усилителя, если

$$R_1 = R_2,$$

$$K_U = -1.$$

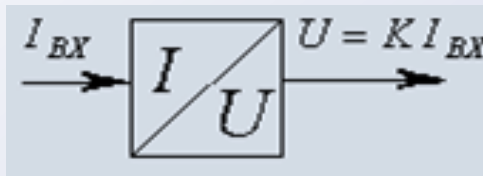
Коэффициент усиления инвертора напряжения



Входной и выходной гармонические сигналы для инвертора напряжения

5. Преобразователь тока в напряжение

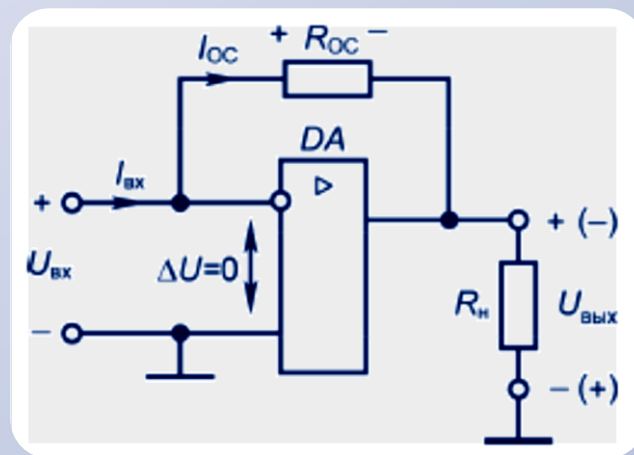
Это устройство которое выполняет преобразование тока в напряжение.



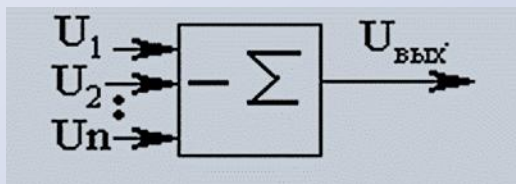
Преобразователь построен на базе инвертирующего усилителя при $R_1=0$.

$$I_{BX} = I_{OC} = -\frac{U_{ВЫХ}}{R_{OC}} \Rightarrow U_{ВЫХ} = -I_{BX} \cdot R_{OC}$$

$$R_{BX} = 0$$



6. Инвертирующий сумматор

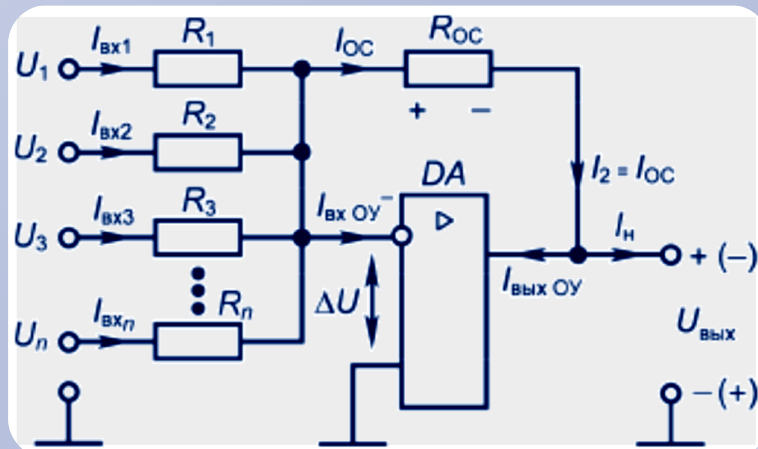


Это устройство, у которого выходное напряжение равно алгебраической сумме входных напряжений, взятой с противоположным знаком

$$I_{BX1} = \frac{U_{ВХ1}}{R_1}; \quad I_{BX2} = \frac{U_{ВХ2}}{R_2}; \quad I_{BX3} = \frac{U_{ВХ3}}{R_3}; \quad I_{ВХn} = \frac{U_{ВХn}}{R_n}.$$

$$I_{OC} = -\frac{U_{ВЫХ}}{R_{OC}}.$$

$$I_{OC} = I_{ВХ1} + I_{ВХ2} + I_{ВХ3} + \dots + I_{ВХn}.$$



$$-\frac{U_{\text{вых}}}{R_{\text{OC}}} = \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right).$$

$$U_{\text{вых}} = - \left(U_1 \frac{R_{\text{OC}}}{R_1} + U_2 \frac{R_{\text{OC}}}{R_2} + U_3 \frac{R_{\text{OC}}}{R_3} + \dots + U_n \frac{R_{\text{OC}}}{R_n} \right).$$

$$U_{\text{вых}} = -(k_1 U_1 + k_2 U_2 + k_3 U_3 + \dots + k_n U_n),$$

где $k_1 \div k_n$ – масштабные (весовые) коэффициенты.

$$I_{\text{вых ОУ}} = I_{\text{OC}} + I_{\text{н}}.$$

Достоинства:

- 1) простота;
- 2) возможность суммировать сигналы с различными коэффициентами;
- 3) теоретическая неограниченность слагаемых.

Недостатки:

- 1) сумма получается проинвертированной;
- 2) для различных сигналов входные сопротивления различны;
- 3) количество слагаемых определяется нагрузочной способностью ОУ:

7. Неинвертирующий сумматор

Неинвертирующий сумматор может быть реализован путём последовательного соединения инвертирующего сумматора и инвертора напряжения. Однако он выполняется проще на основе схемы неинвертирующего усилителя.

$$\Delta U \rightarrow 0 \longrightarrow U_{вх+} = U_{вх-}$$

$$U_{вх+} = U_{вх-} = U_{вых} \frac{R}{R + R_{oc}} = U_{вых} \cdot K_d,$$

K_d – коэффициент деления резистивного делителя, состоящего из резисторов R и R_{oc} .

$$I_{вх1} = \frac{U_1 - U_{вх+}}{R_1};$$

$$I_{вх2} = \frac{U_2 - U_{вх+}}{R_2}$$

$$I_{вхn} = \frac{U_n - U_{вх+}}{R_n}.$$

При $I_{вх} \rightarrow 0$ по неинвертирующему входу

$$I_{вх1} + I_{вх2} + \dots + I_{вхn} = 0,$$

$$\frac{U_1 - U_{вх+}}{R_1} = \frac{U_2 - U_{вх+}}{R_2} + \dots + \frac{U_n - U_{вх+}}{R_n} = 0.$$

$$R_1 = R_2 = \dots = R_n = R.$$

$$\frac{U_1 + U_2 + \dots + U_n - nU_{вх+}}{R} = 0 \Rightarrow U_{вх+} = \frac{U_1 + U_2 + \dots + U_n}{n}.$$

$$U_{вых} \cdot K_d = \frac{U_1 + U_2 + \dots + U_n}{n} \Rightarrow$$

$$U_{вых} = \frac{1}{K_d \cdot n} (U_1 + U_2 + \dots + U_n).$$

Достоинства:

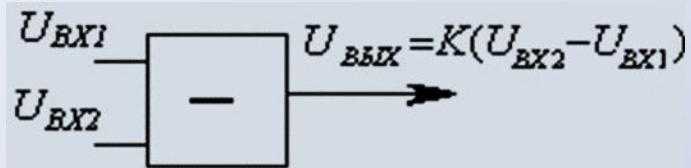
1) относительно большое входное сопротивление, но токи отдельных сигналов не нормируются;

Недостатки:

1) схема позволяет суммировать сигналы с одинаковыми весовыми коэффициентами.

8. Дифференциальный усилитель на ОУ

Усиливает разность двух входных напряжений и является сочетанием инвертирующего и неинвертирующего усилителей

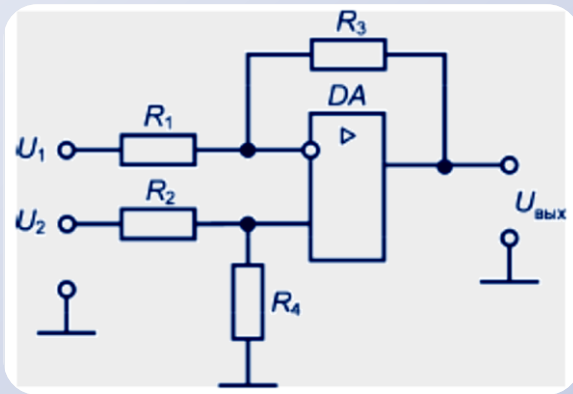


Схему также называют **вычитающий усилитель** или **усилитель с дифференциальным входом**.

$$U_{\text{ВЫХ}} = (U_2 - U_1) \cdot K_U.$$

$$K_d = \frac{R_4}{R_1 + R_4}.$$

K_d – коэффициент деления резистивного делителя



$$U_{\text{ВЫХ}} = U_2 \left(1 + \frac{R_3}{R_1} \right) \cdot K_d - U_1 \frac{R_3}{R_1}.$$

Достоинства:

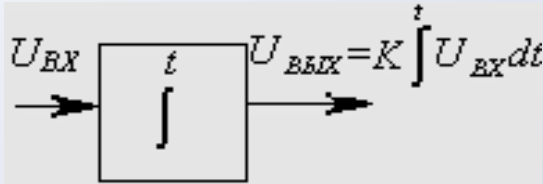
- 1) простота;
- 2) получение наперёд заданного коэффициента усиления.

Недостатки:

- 1) в процессе работы коэффициент передачи менять нельзя;
- 2) разное по входам входное сопротивление.

9. Интегратор

Интегратор – устройство (или схема), сигнал на выходе которого в любой момент времени прямо пропорционален интегралу от входного сигнала.



$$\Delta U \rightarrow 0 \longrightarrow \begin{aligned} U_{\text{вх}} &= U_R \\ U_{\text{вых}} &= U_C \end{aligned}$$

$$i_R = \frac{U_R}{R}.$$

$$I_{\text{вх}} \text{ оу} \rightarrow 0; \longrightarrow i_R = i_C$$

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \Rightarrow$$

$$u_C(t) = U_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_C(t) dt \Rightarrow$$

независимое начальное условие

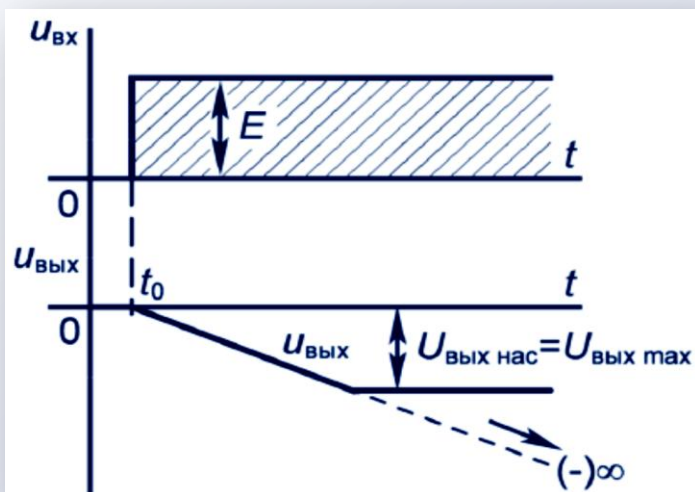
$$u_C = u_{\text{вых}} = U_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t i_R(t) dt = U_C(0) + \frac{1}{C} \int_0^t \frac{u_{\text{вх}}(t)}{R} dt = U_C(0) + \frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt$$

$$u_{\text{вых}}(t) = U_C(0) - \frac{1}{\tau} \int_0^t u_{\text{вх}}(t) dt,$$

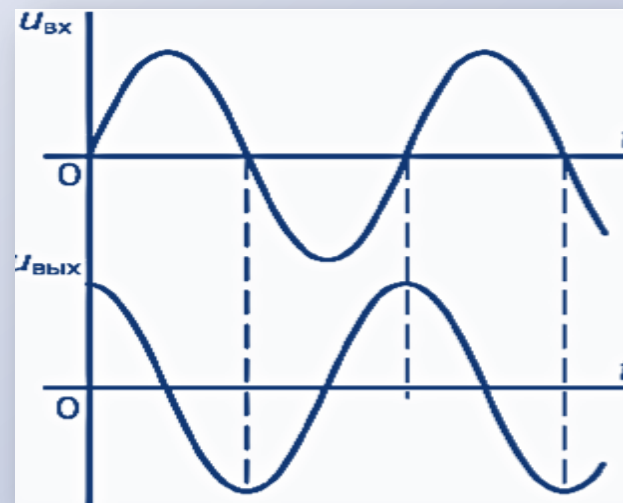
где $\tau = RC$ – постоянная времени

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{1}{\omega RC}.$$

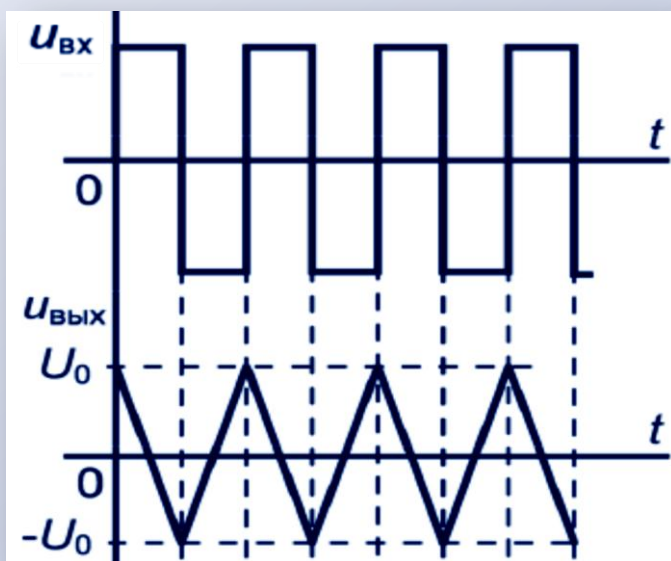
*Коэффициент передачи
интегратора*



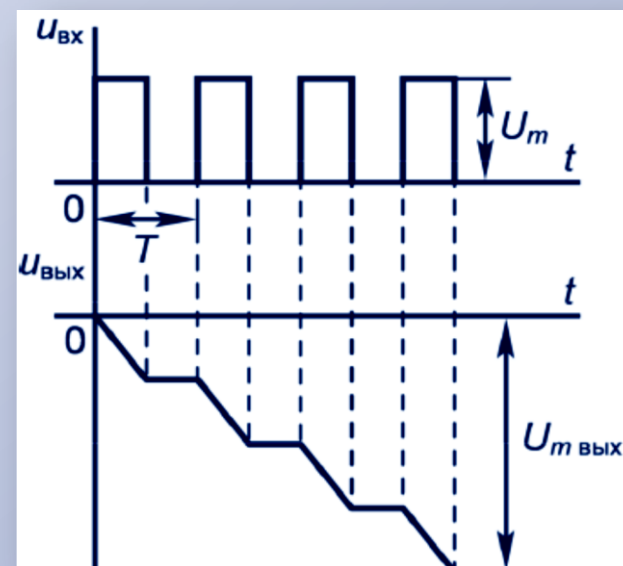
1) Интегрирование постоянного сигнала



2) Интегрирование гармонического сигнала

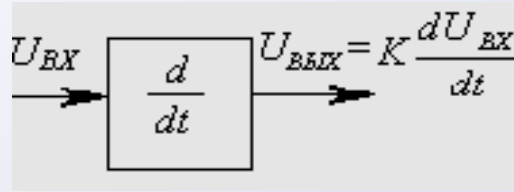


3) Интегрирование последовательности биполярных прямоугольных импульсов

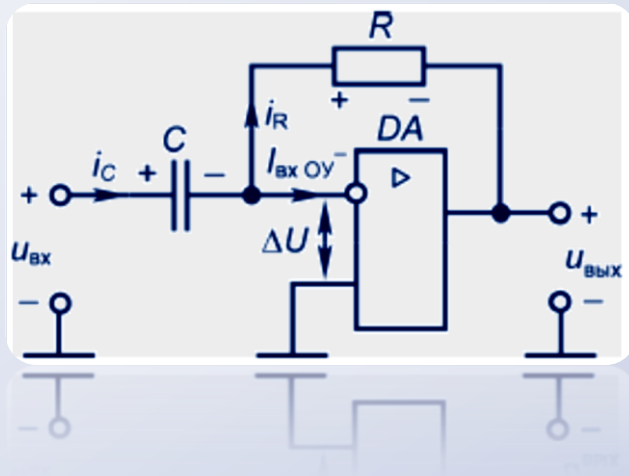


4) Интегрирование последовательности однополярных прямоугольных импульсов

10. Дифференциатор



Дифференциатор – устройство (или схема), выходное напряжение которого в любой момент времени прямо пропорционален производной от входного сигнала.



$$\Delta U \rightarrow 0 \longrightarrow U_{\text{вх}} = U_C$$

$$U_{\text{вых}} = U_R$$

$$i_R = \frac{U_R}{R} = \frac{U_{\text{вых}}}{R}$$

$$I_{\text{вх}} \text{ оу} \rightarrow 0 \longrightarrow i_R = i_C$$

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt}$$

$$i_R(t) = i_C(t) = \frac{U_{\text{вых}}}{R} = C \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}$$

$$u_{\text{вых}}(t) = RC \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt}$$

$$u_{\text{вых}}(t) = -RC \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt} = -\tau \frac{du_{\text{вх}}(t)}{dt},$$

где $\tau = RC$ – постоянная времени

$$K_u = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \omega RC.$$

*Коэффициент передачи
дифференциатора*