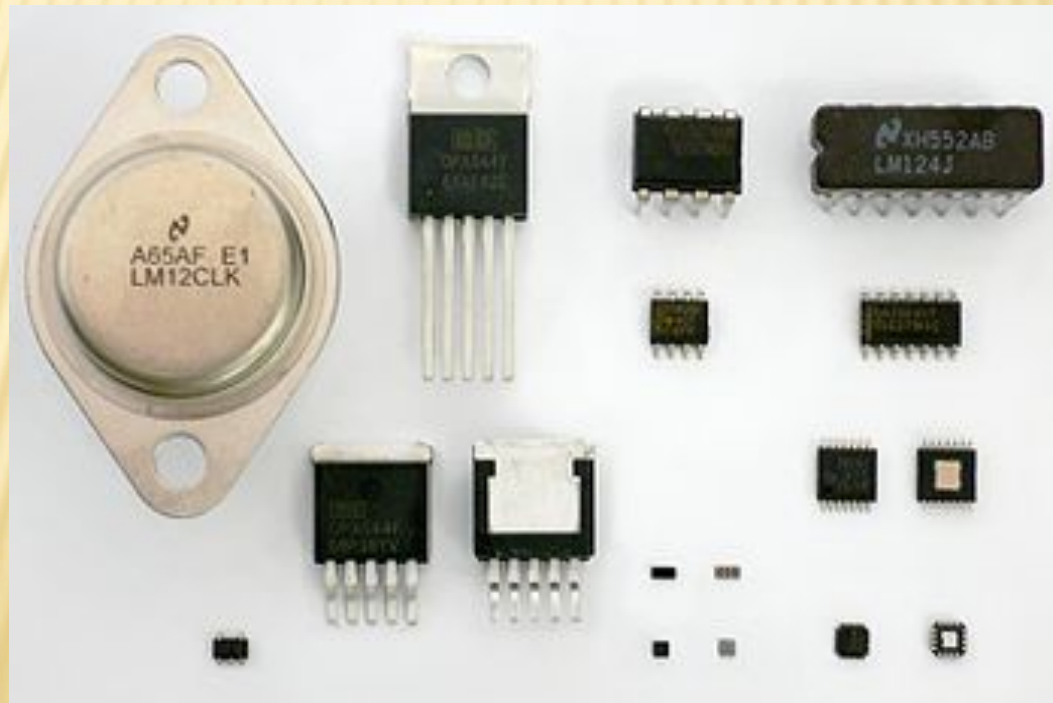


# **ОПЕРАЦИОННЫЕ УСИЛИТЕЛИ**

---

**Операционный усилитель (ОУ, OpAmp)** — 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, которая, благодаря высокому коэффициенту усиления ОУ, полностью определяет коэффициент передачи полученной схемы.

**Разные операционные усилители в различных корпусах, в том числе несколько в одном корпусе:**



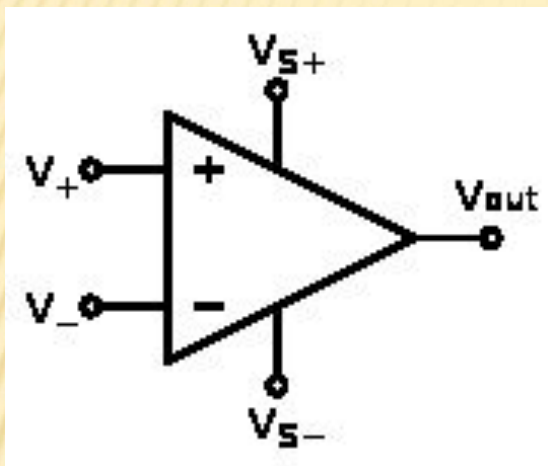
# Ламповый операционный усилитель K2-W.

ОУ 741 в корпусе TO-5



# ОБОЗНАЧЕНИЯ

## Обозначение операционного усилителя на схемах



На рисунке показано схематичное изображение операционного усилителя. Выводы имеют следующее значение:

$V_+$ : неинвертирующий вход

$V_-$ : инвертирующий вход

$V_{out}$ : выход

$V_{S+}$ : плюс источника питания (также может обозначаться как  $V_{DD}$ ,  $V_{CC}$ , или  $V_{CC+}$ )

$V_{S-}$ : минус источника питания (также может обозначаться как  $V_{SS}$ ,  $V_{EE}$ , или  $V_{CC-}$ )

## ОСНОВЫ ФУНКЦИОНИРОВАНИЯ

### Питание

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

$U_+$  (к нему подключается  $V_{S+}$ )

0

$U_-$  (к нему подключается  $V_{S-}$ )

## Простейшее включение ОУ

$$V_{\text{out}} = (V_{+} - V_{-}) \cdot G_{\text{openloop}}$$

здесь

- $V_{\text{out}}$ : напряжение на выходе
- $V_{+}$ : напряжение на неинвертирующем входе
- $V_{-}$ : напряжение на инвертирующем входе
- $G_{\text{openloop}}$ : коэффициент усиления с разомкнутой петлёй обратной связи

## Идеальный операционный усилитель

Идеальный ОУ описывается формулой (1) и обладает следующими характеристиками:

1. Бесконечно большой коэффициент усиления с разомкнутой петлей обратной связи  $G_{\text{openloop}}$ .
2. Бесконечно большое входное сопротивление входов  $V_{-}$  и  $V_{+}$ . Другими словами, ток, протекающий через эти входы, равен нулю.
3. Нулевое выходное сопротивление выхода ОУ.
4. Способность выставить на выходе любое значение напряжения.
5. Бесконечно большая скорость нарастания напряжения на выходе ОУ.
6. Полоса пропускания: от постоянного тока до бесконечности.

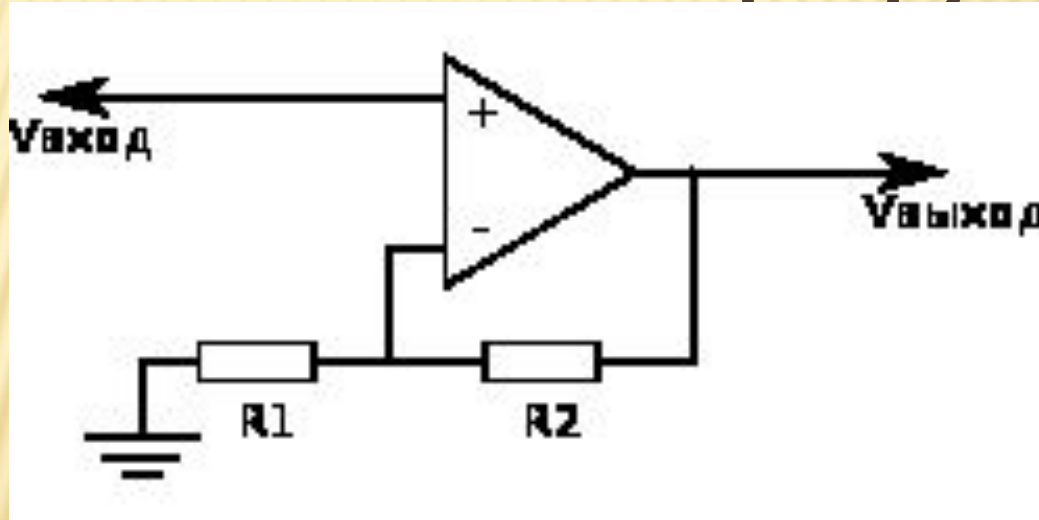
# Идеальный операционный усилитель

Идеальный ОУ, охваченный отрицательной обратной связью, поддерживает одинаковое напряжение на своих входах.

Другими словами, при указанных условиях всегда выполняется

$$V_+ - V_- = 0$$

## Простейший неинвертирующий



Обозначение операционного усилителя на схемах, неинвертирующая схема включения

# ОТЛИЧИЯ РЕАЛЬНЫХ ОУ ОТ ИДЕАЛЬНОГО

---

Параметры ОУ, характеризующие его неидеальность, можно разбить на группы:

## Параметры по постоянному току

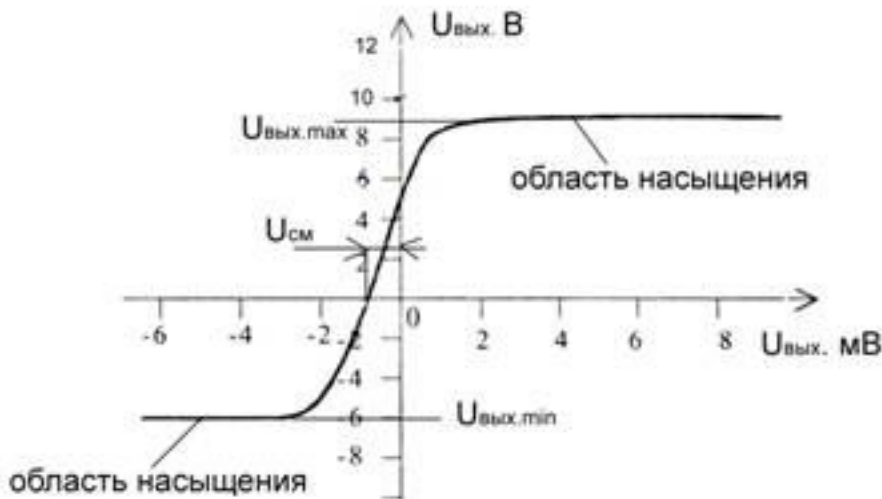
- **Ограниченное усиление:** коэффициент  $G_{openloop}$  не бесконечен (типичное значение  $10^5 \div 10^6$  на постоянном токе).
- **Ненулевой входной ток (или, что почти то же самое, ограниченное входное сопротивление):** типичные значения входного тока составляют  $10^{-9} \div 10^{-12}$  А.
- **Ненулевое выходное сопротивление.**
- **Ненулевое напряжение смещения.** Типичные значения  $U_{см}$  составляют  $10^{-3} \div 10^{-6}$  В.
- **Ненулевое усиление синфазного сигнала.** Типичные значения:  $10^4 \div 10^6$ .

# ОТЛИЧИЯ РЕАЛЬНЫХ ОУ ОТ ИДЕАЛЬНОГО

## Параметры по переменному току

- Ограниченная полоса пропускания.
- Ненулевая входная ёмкость.
- Ненулевая задержка сигнала.
- Ненулевое время восстановления после насыщения.

## ПЕРЕДАТОЧНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОУ



Передаточная (амплитудная) характеристика – зависимость вида  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{диф}})$ , где  $f$  – некоторая функция (зависимость выходного напряжения от входного).



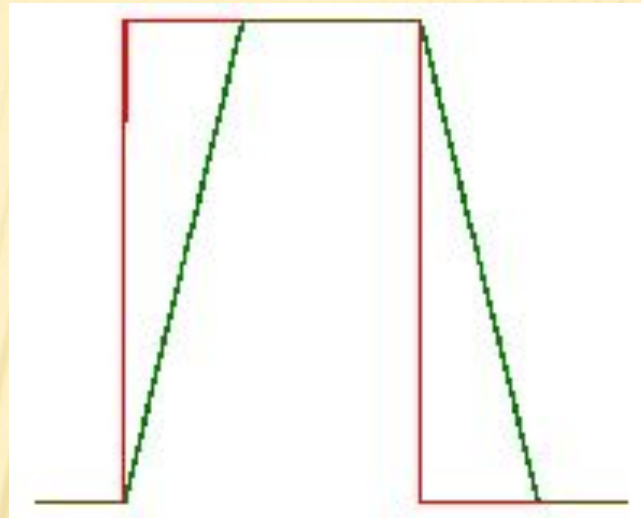
# НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ

**Насыщение** — ограничение диапазона возможных значений выходного напряжения. Обычно выходное напряжение не может выйти за пределы напряжения питания. Насыщение имеет место в случае, когда выходное напряжение «должно быть» больше максимального или меньше минимального выходного напряжения. ОУ не может выйти за пределы, и выступающие части выходного сигнала «срезаются» (то есть ограничиваются).

В моменты насыщения усилитель не действует в соответствии с формулой  $V_{out} = (V_+ - V_-) \cdot G_{openloop}$  и выдает отказ в виде ограниченных напряжений на его входах, что обычно является признаком неисправности схемы (и это легко обнаруживаемый наладчиком признак проблем). Исключение - работа ОУ в режиме компаратора.

# НЕЛИНЕЙНЫЕ ЭФФЕКТЫ

Искажение входного П-образного сигнала при ограниченной скорости нарастания выходного сигнала ОУ.



**Ограниченная скорость нарастания.** Выходное напряжение ОУ не может измениться мгновенно. Скорость изменения выходного напряжения измеряется в вольтах за микросекунду, типичные значения  $1 \div 100$  В/мкс. Параметр обусловлен временем, необходимым для перезаряда внутренних ёмкостей.

# ОГРАНИЧЕНИЯ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

---

Ограниченно выходное напряжение.  
Ограниченная выходная мощность.



Мощные ОУ, такие как К157УД1, могут иметь крепление для радиатора.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОУ

По типу элементной базы

На полевых транзисторах

На биполярных транзисторах

На электронных лампах (устарели)

# КЛАССИФИКАЦИЯ ОУ

---

## По области применения

- **Индустриальный стандарт.**
- **Прецизионные**
- **С малым входным током (электрометрические) ОУ.**
- **Микромощные и программируемые**
- **Мощные**
- **Низковольтные ОУ**
- **Высоковольтные ОУ**
- **Быстродействующие ОУ**
- **Малозумящие ОУ.**
- **Звуковые ОУ.**
- **Специализированные ОУ.**
- **Возможны также комбинации данных категорий, например, прецизионный быстродействующий ОУ.**

# КЛАССИФИКАЦИЯ ОУ

---

## Другие классификации

### По входным сигналам:

- Обычный двухвходовый ОУ;
- ОУ с тремя входами

### По выходным сигналам:

- Обычный ОУ с одним выходом;
- ОУ с дифференциальным выходом