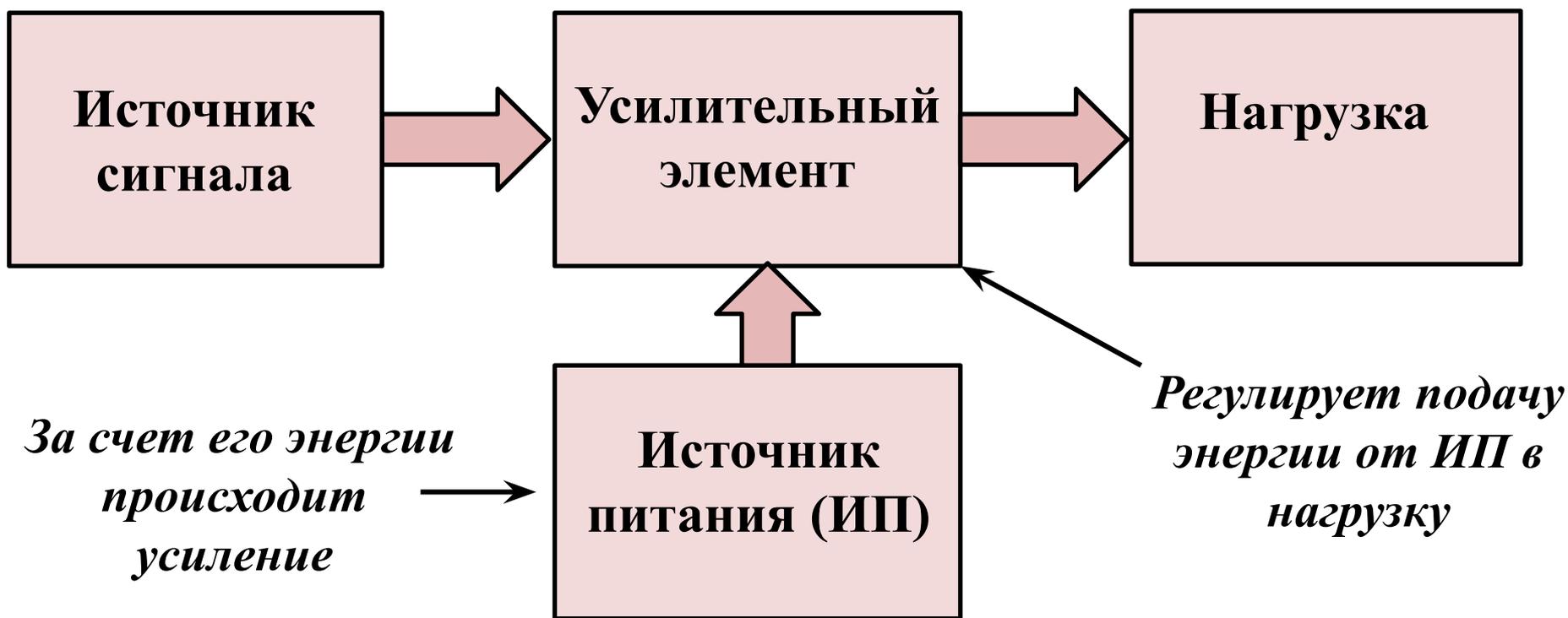


# Усилители

**Усилитель – это электронное устройство, управляющее потоком энергии, идущей от источника питания к нагрузке, при этом мощность, требуемая для управления, как правило, меньше мощности, отдаваемой в нагрузку, а формы входного (усиливаемого) и выходного (на нагрузке) сигналов совпадают.**



# Классификация усилителей

## *По частоте усиливаемого сигнала*

**Усилители низкой частоты (УНЧ)**  
(десятки Гц...сотни Гц)

**Широкополосные усилители (ШПУ)**  
(единицы Гц - десятки МГц)

**Узкополосные усилители** (усиливают в узкой полосе частот)

## *По роду усиливаемого сигнала*

**Усилители постоянного тока (УПТ)**  
(от 0 Гц и выше)

**Усилители переменного тока**  
( $f \neq 0$ )

## *По функциональному назначению*

**Усилители напряжения**

**Усилители тока**

**Усилители мощности**

# Параметры усилителя

*Коэффициент усиления по напряжению:*  $K_u = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$

*Коэффициент усиления по току:*  $K_I = \frac{I_{\text{ВЫХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$

*Коэффициент усиления по мощности:*  $K_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}$

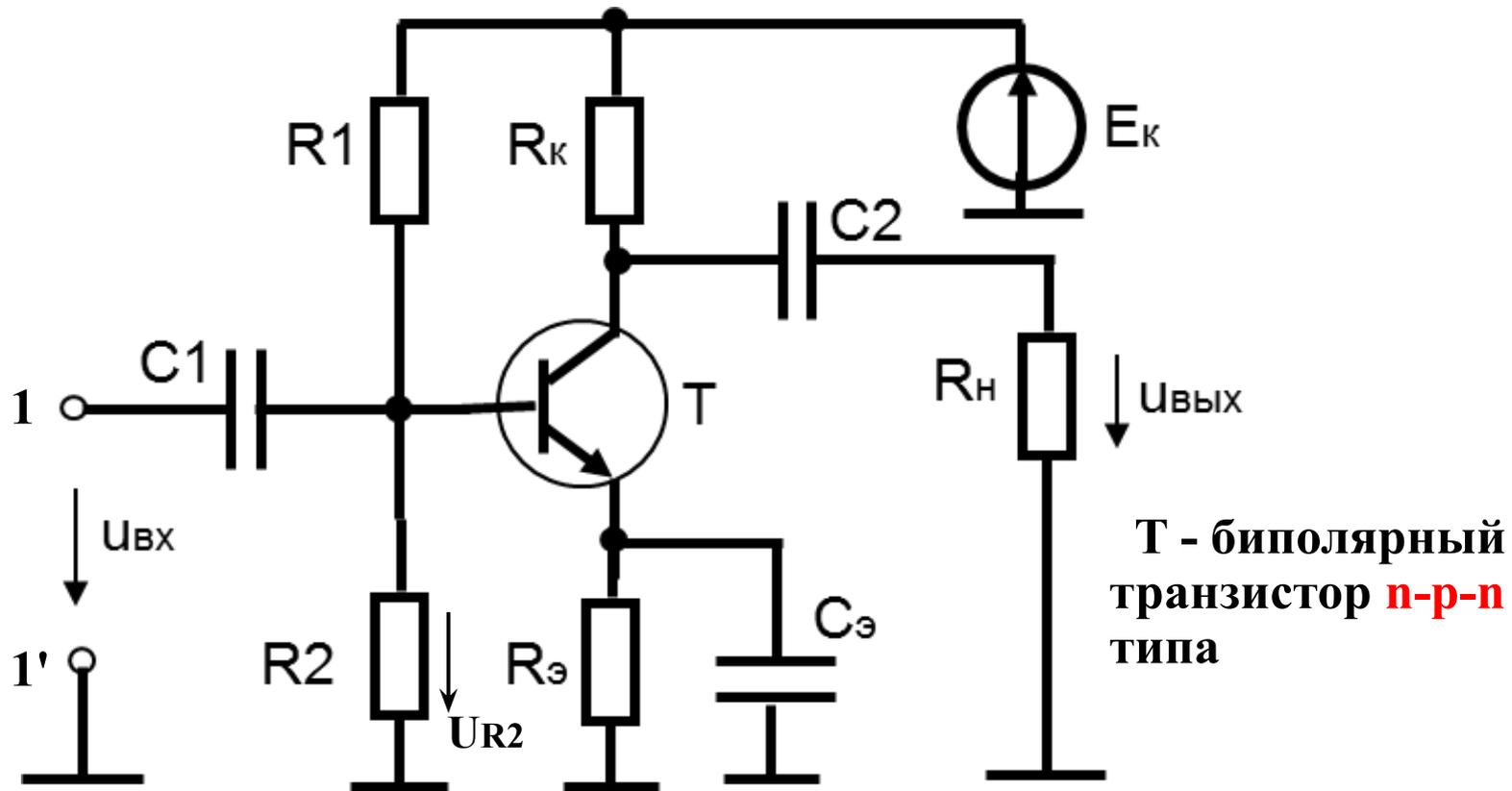
$U_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВЫХ}}, I_{\text{ВЫХ}}$  - действующие значения переменных значений входного и выходного токов и напряжений.

$P_{\text{ВХ}}$  и  $P_{\text{ВЫХ}}$  мощности сигналов на входе и выходе усилителя

*Входное сопротивление:*  $R_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{I_{\text{ВХ}}}$

*Выходное сопротивление:*  $R_{\text{ВЫХ}} = \frac{|\Delta U_{\text{ВЫХ}}| \leftarrow \text{Приращения напряжения}}{|\Delta I_{\text{ВЫХ}}| \leftarrow \text{тока на выходе}}$

# Усилитель на биполярном транзисторе



Назначение элементов:

- Т** – регулирует подачу энергии от **Ек** в нагрузку. **Ек** – источник энергии.
- Р1, Р2**, - базовый делитель – для обеспечения начального режима работы.
- Рэ, Сэ** – для обеспечения температурной стабилизации.
- С1, С2** – разделительные конденсаторы -для развязки по постоянному току.
- Рк** – сопротивление коллектора, на котором выделяется усиленный сигнал.

# Принцип работы усилителя на биполярном транзисторе

## Статический режим:

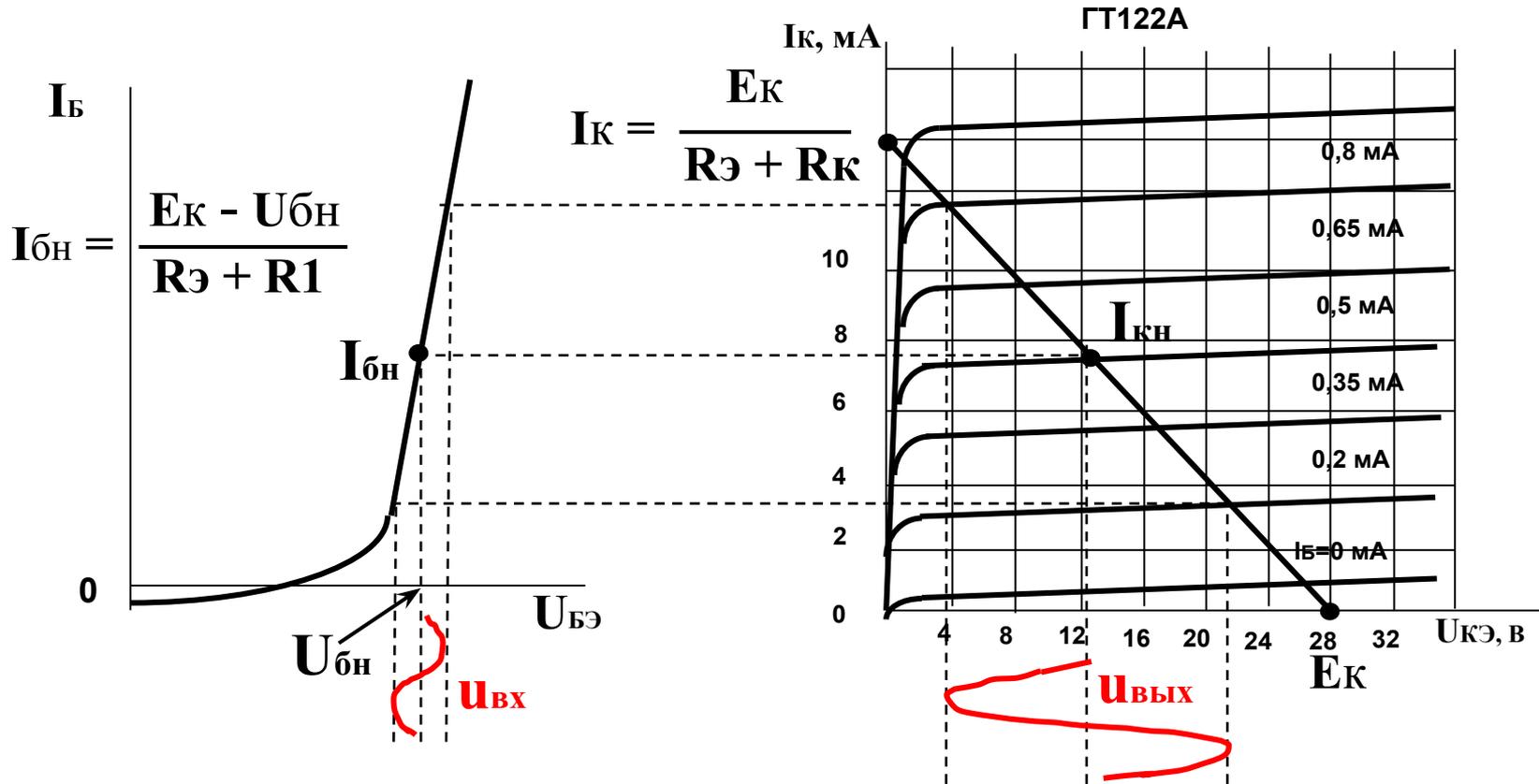
При включении источника питания протекает ток делителя ( $+E_k \rightarrow R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow \perp \rightarrow -E_k$ ). На  $R_2$  создается напряжение, которое смещает эмиттерный переход в прямом направлении.

Протекает ток базы  $I_{бн} : +E_k \rightarrow R_1 \rightarrow БЭТ \rightarrow R_э \rightarrow \perp \rightarrow -E_k$ , который вызывает ток коллектора  $I_{кн} : +E_k \rightarrow R_k \rightarrow КЭТ \rightarrow R_э \rightarrow \perp \rightarrow -E_k$ .

## Динамический режим:

При подаче на вход усилителя  $1 - 1'$  напряжения  $U_{вх}$  протекает переменный ток базы ( $1 \rightarrow C_1 \rightarrow БЭТ \rightarrow C_э \rightarrow \perp \rightarrow 1'$  и в обратном направлении). Это вызывает переменный коллекторный ток ( $КТ \rightarrow R_k \rightarrow E_k \rightarrow C_э \rightarrow ЭТ$  и в обратном направлении), который создает на  $R_k$  усиленный (по  $I$ ,  $U$  и  $P$ ) сигнал. Этот сигнал через  $C_2$  подается на сопротивление нагрузки  $U_{вых}$ .

# Режим работы усилителя на биполярном транзисторе



При расчете усилителя ток  $I_{BH}$  выбирается на середине линейного участка вольтамперной характеристики.

Усиливаемый сигнал  $U_{VEX}$  должен остаться в пределах линейного участка, чтобы формы сигнала на входе и выходе усилителя были одинаковыми.

# Усилитель на биполярном транзисторе по схеме с ОК

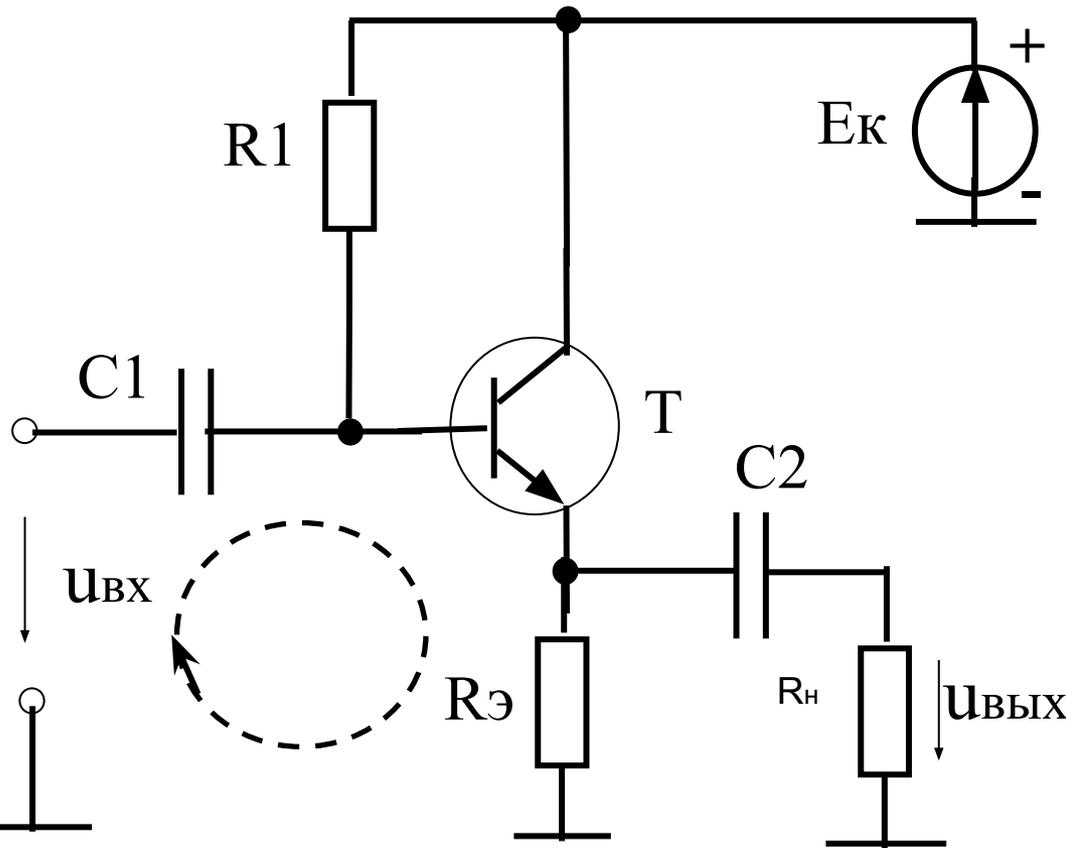
В усилителе на БПТ по схеме с ОК коллектор является общим электродом по переменному току для входной (базовой) и выходной (эмиттерной) цепей.

В схеме имеет место усиление по току, т.к.

$$i_{вх} = i_b \ll i_{вых} = i_c,$$

отсутствует усиление по напряжению, т.к.

$$U_{вх} > U_{вых}$$



Усилитель имеет большое входное сопротивление и малое выходное сопротивление.

# **Дифференциальный усилитель**

**Усилительное устройство обычно состоит из нескольких усилителей (каскадов), соединенных друг с другом.**

**Межкаскадные связи выполняются в виде непосредственных (прямых, гальванических) или с разделением по постоянному току (с помощью конденсаторов или трансформаторов).**

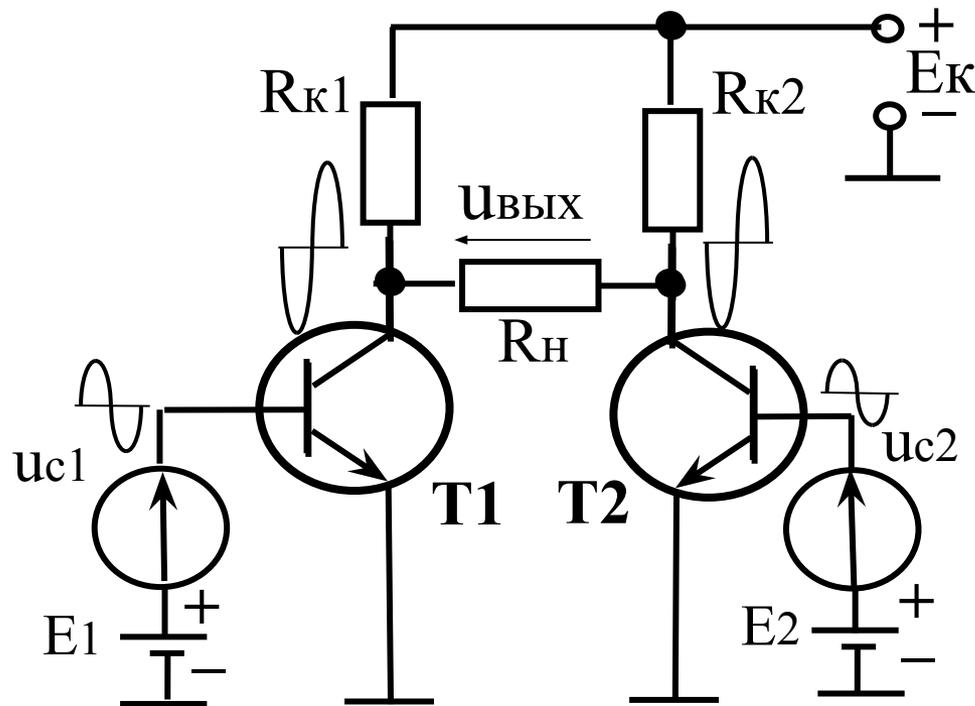
**При построении усилителей с непосредственными связями важной проблемой является дрейф, т.е. изменение постоянного напряжения (тока) при отсутствии входного сигнала из-за изменения температуры окружающей среды, напряжения питания и других дестабилизирующих факторов.**

**Дрейф зависит от коэффициента усиления и приводит к искажениям усиливаемого сигнала.**

**Одной из мер борьбы с дрейфом является использование дифференциального усилителя (ДУ).**

**Дифференциальный усилитель представляет собой два идентичных усилителя, к выходам которых подключена нагрузка.**

# Дифференциальный усилитель (усиление синфазного сигнала)



В схеме ДУ два усилителя (схема с ОЭ):  
T1, R<sub>к1</sub>, E<sub>к</sub> и T2, R<sub>к2</sub>, E<sub>к</sub>, к выходам которых подключена нагрузка R<sub>н</sub>.

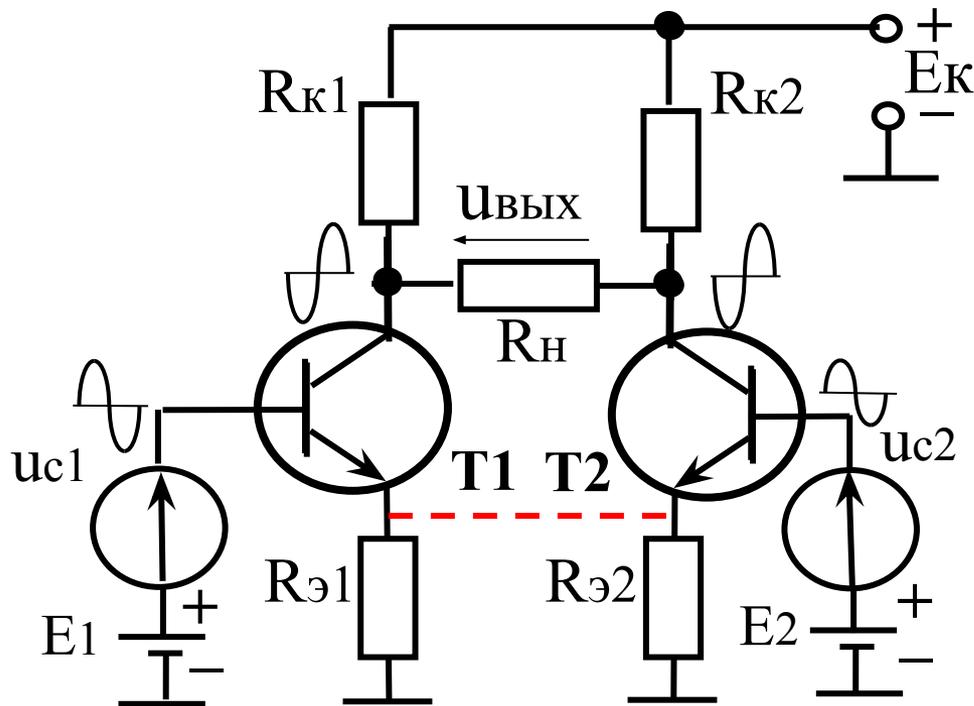
E<sub>1</sub> и E<sub>2</sub> – определяют положение рабочей точки при  $u_{с1} = u_{с2} = 0$ .

Пусть на входы действуют синхронные сигналы  $u_{с1} = u_{с2}$  (эквивалентно дрейфу нуля).

При идентичных параметрах усилительных каскадов T1, R<sub>к1</sub>, E<sub>к</sub> и T2, R<sub>к2</sub>, E<sub>к</sub> дрейф напряжения в нагрузке R<sub>н</sub> отсутствует, так как напряжения на коллекторах транзисторов T1 и T2 равны и их разность равна нулю  **$u_{ВЫХ}=0$** .

Однако незначительные отклонения параметров усилителей приводят к появлению дрейфа нуля.

# Дифференциальный усилитель (усиление синфазного сигнала)

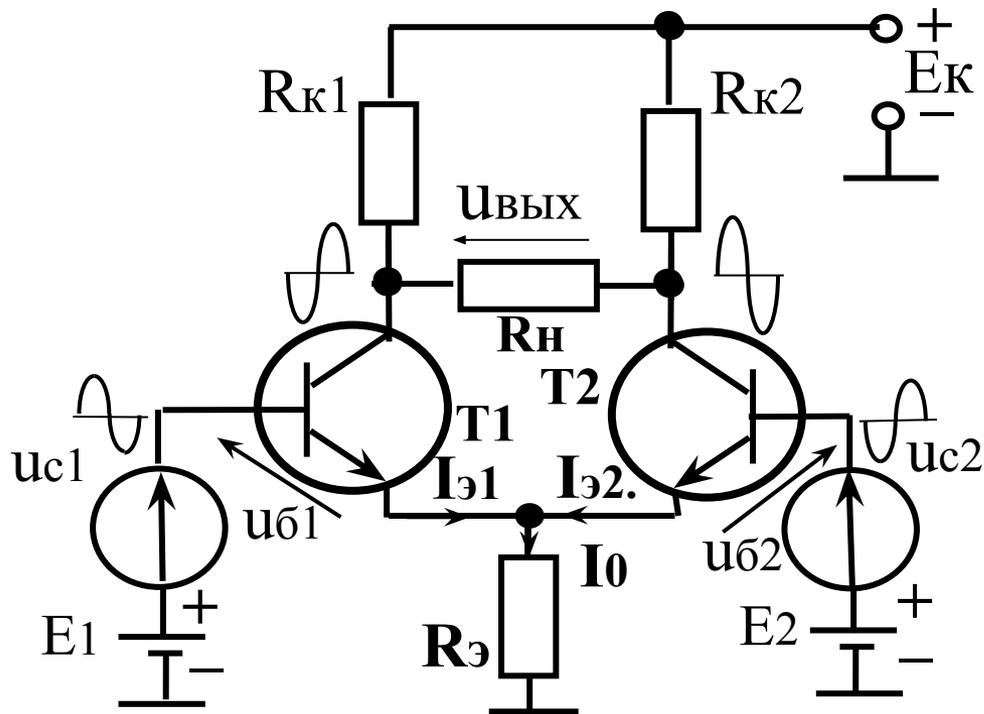


Для уменьшения влияния отклонения параметров усилителей на величину дрейфа нуля в эмиттерные цепи транзисторов включают одинаковые по величине сопротивления резисторы  $R_{э1}$  и  $R_{э2}$ .

В этом случае коэффициент передачи (усиления) синфазных сигналов уменьшается в  $R_{к}/(R_{к} + R_{э})$ , уменьшается значения синфазных сигналов на коллекторах транзисторов, а следовательно, и их разность, т.е. величина дрейфа. Так как напряжения на эмиттерах транзисторов одинаковые, то эмиттеры можно соединить и вместо двух резисторов ( $R_{э1}$  и  $R_{э2}$ ) использовать один  $R_{э}$ .

Для повышения степени подавления синхронного сигнала (помехи) требуется  $R_{э}/R_{к} \gg 1$ .

# Дифференциальный усилитель (усиление разностного сигнала)



При подаче на входы усилителей противофазных сигналов напряжения на коллекторах транзисторов изменяются в противофазе, напряжение на нагрузке будет равно их разности:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{К1}} - U_{\text{К2}},$$

т.е. имеет место усиление разностного сигнала.

## Передаточные (проходные) характеристики ДУ

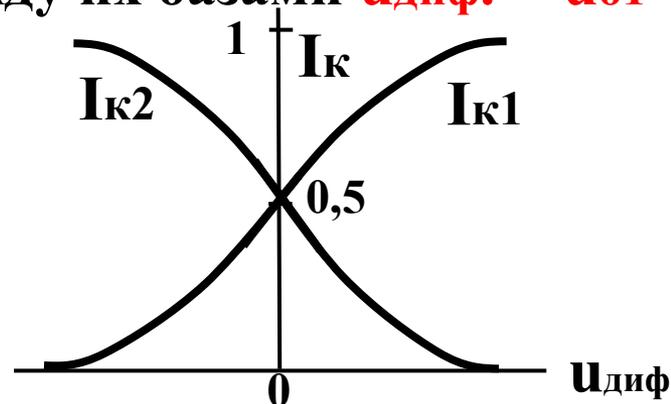
- это зависимости  $I_{\text{К1}}$ ,  $I_{\text{К2}}$  транзисторов Т1 и Т2 от разностного (дифференциального) напряжения между их базами  $u_{\text{диф.}} = u_{\text{б1}} - u_{\text{б2}}$ .

$$I_{\text{К1}} = 0,5\alpha_0 I_0 [1 + \text{th}(u_{\text{диф.}}/2\varphi_T)]$$

$$I_{\text{К2}} = 0,5\alpha_0 I_0 [1 - \text{th}(u_{\text{диф.}}/2\varphi_T)]$$

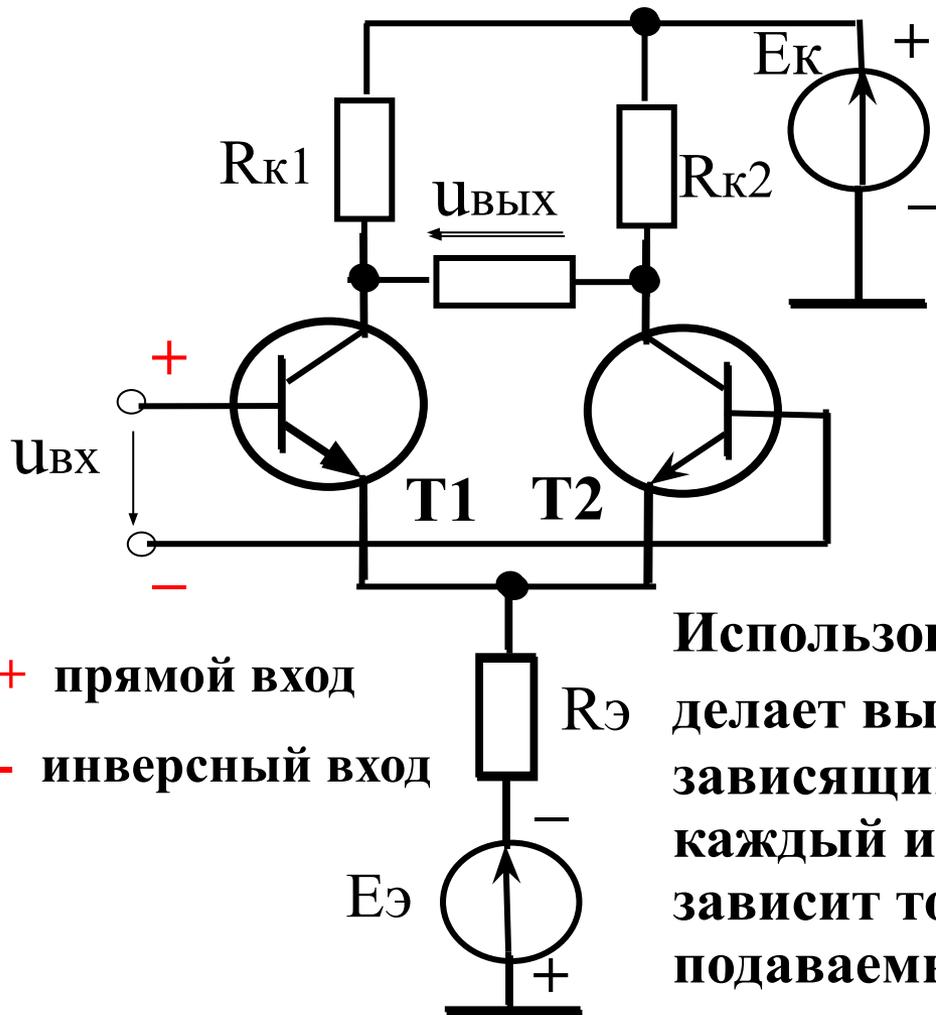
$\alpha_0$  - коэффициент передачи  $I_{\text{Э}}$

$$I_0 = I_{\text{Э1}} + I_{\text{Э2}}; \varphi_T = 25 \text{ мВ при } T = 300^\circ \text{ К}$$



# Дифференциальный усилитель

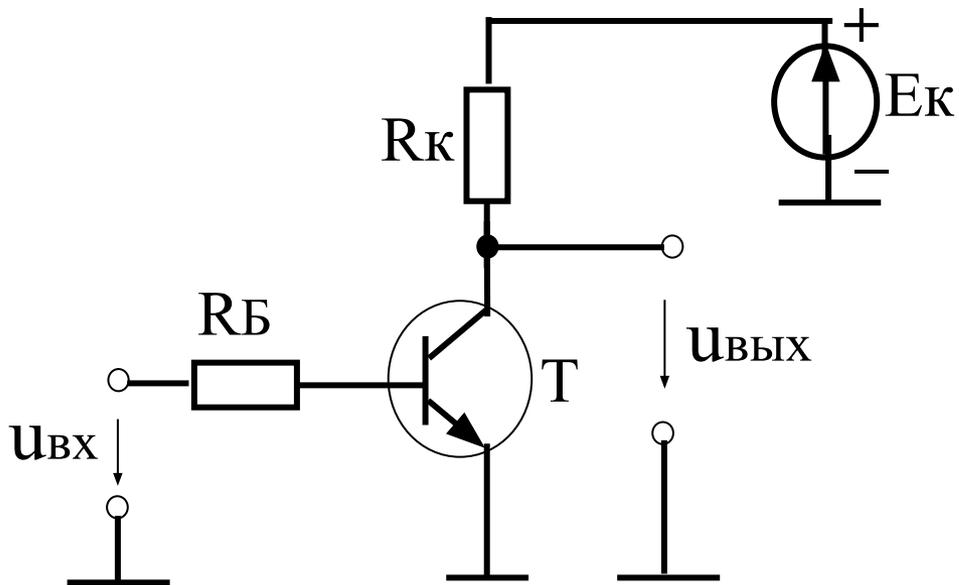
Дифференциальный усилитель построен на основе моста постоянного тока, плечи которого образованы резисторами  $R_{к1}=R_{к2}$  и биполярными транзисторами одного типа, включенными по схеме с ОЭ. Параметры транзисторов отличаются на  $1\div 5\%$ .



Использование двух одинаковых половин делает выходное напряжение (**Uвых**) слабо зависящим от напряжения подаваемого на каждый из входов. Выходное напряжение зависит только от разности напряжений, подаваемых на прямой и инверсный входы.

В представленной схеме ДУ использовано двухполярное питание.

# Транзисторный ключ

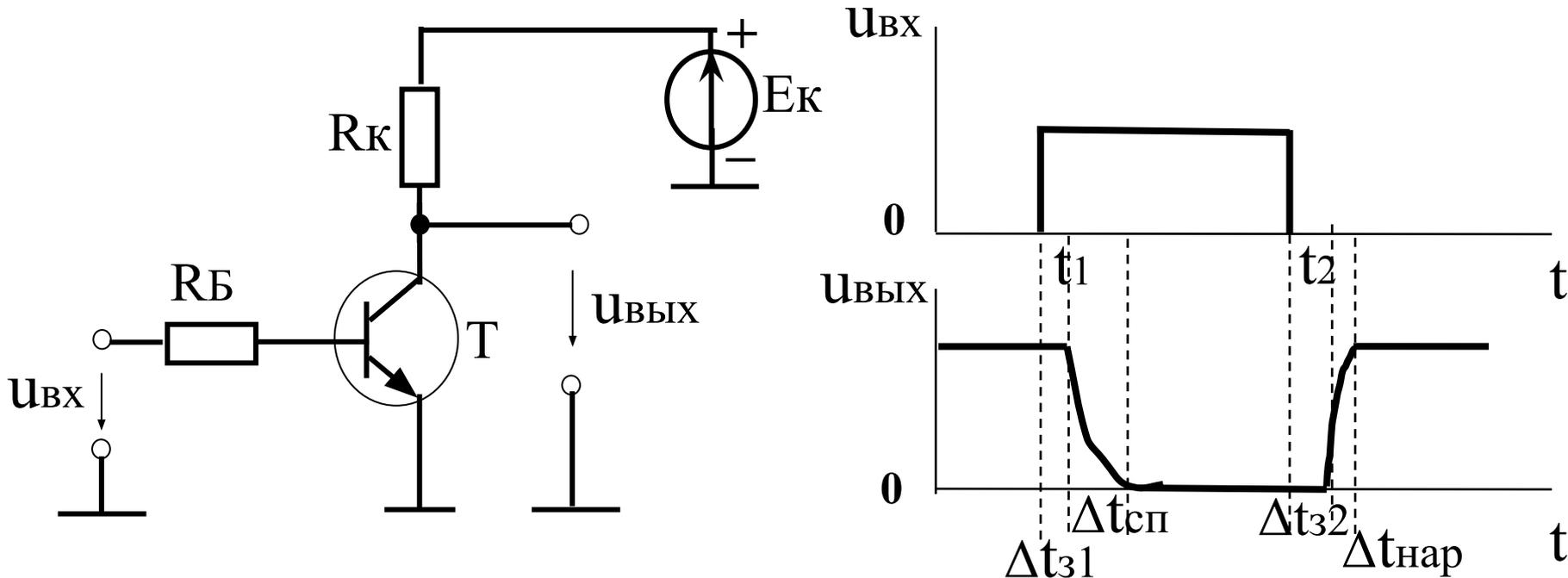


Транзисторный ключ - это усилитель, в котором транзистор работает в импульсном режиме, т.е. когда токи и напряжения характеризуются резкими изменениями.

Транзистор в этом режиме основную часть времени находится в открытом (насыщении) или закрытом ((отсечки) состоянии).

Это позволяет значительно повысить коэффициент полезного действия в устройствах силовой электроники, поскольку в открытом состоянии транзистор находится в **режиме насыщения** и напряжение на транзисторе мало, а в закрытом состоянии (**режим отсеки**) ток через транзистор мал, следовательно мощность, идущая на его нагрев мала.

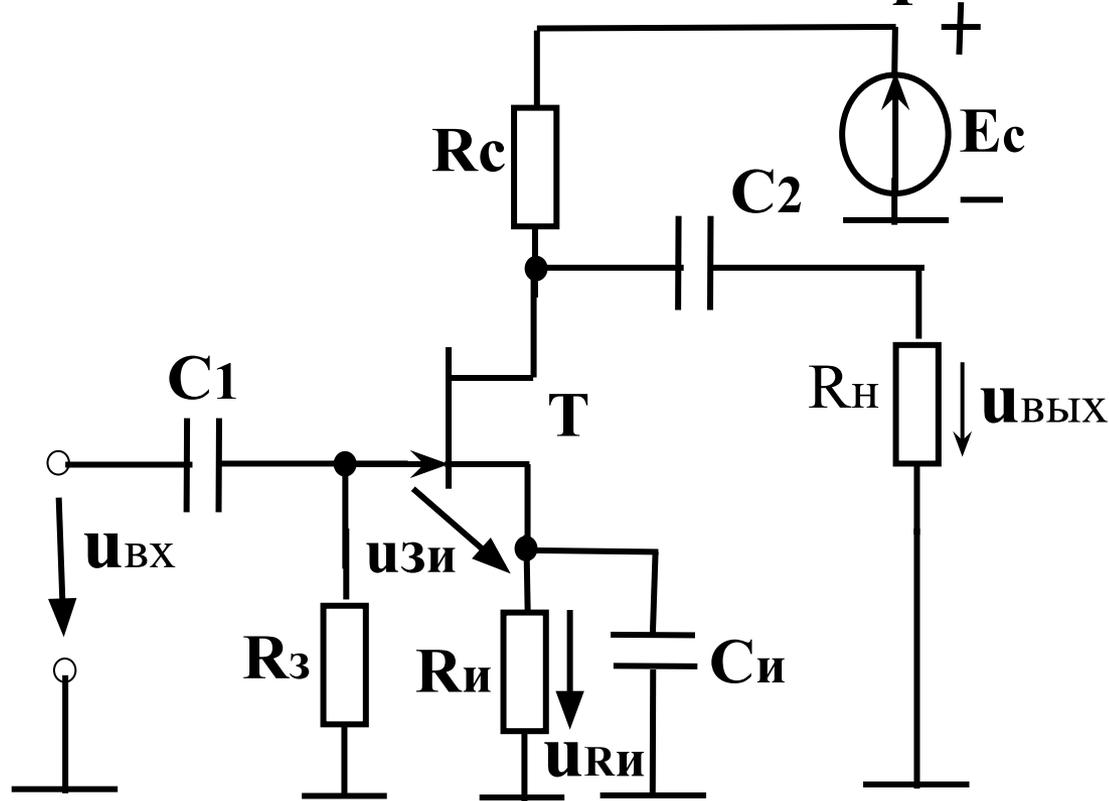
# Транзисторный ключ



Из-за инерционности транзистора включение и выключение ключа не происходит мгновенно: имеет место задержка включения ( $\Delta t_{з1}$ ), определяемая временем перезаряда емкостей транзистора, время, в течение которого в базу вводится граничный заряд ( $\Delta t_{сп}$ ), время задержки выключения ( $\Delta t_{з2}$ ), в течение которого из базы выводится избыточный заряд, время нарастания напряжения ( $\Delta t_{нар}$ ), определяемое длительностью вывода из базы граничного заряда и перезарядкой емкостей транзистора.

Для сокращения указанных временных задержек принимаются специальные меры, позволяющие, например, ускорить процесс ввода в базу граничного заряда или не допустить глубокого насыщения транзистора.

# Усилитель на полевом транзисторе



**T** - полевой транзистор с управляющим p-n переходом

Назначение элементов:

- T** – регулирует подачу энергии от **Eс** в нагрузку. **Eс** – источник энергии.
- RИ** – для создания запирающего напряжения на затворе при протекании начального тока истока  $I_{ин}$ . **CИ** – создает цепь переменному току истока.
- C1, C2** – разделительные конденсаторы -для развязки по постоянному току.
- Rс** – сопротивление коллектора, на котором выделяется усиленный сигнал.
- Rз** – для подачи запирающего напряжения на затвор **T**

# Принцип работы усилителя на полевом транзисторе

## *Статический режим:*

При включении источника питания протекает ток:  $+E_c \rightarrow$

$R_c \rightarrow$  **И-С** Т  $\rightarrow R_{и} \rightarrow \perp \rightarrow -E_c$  .

На  $R_{и}$  создается напряжение  $U_{R_{и}}$ , которое через  $R_3$  подается на затвор Т, смещая переход **З-И** Т в обратном направлении.

Устанавливается определенная ширина канала **С-И** Т.

Напряжение на нагрузке равно нулю

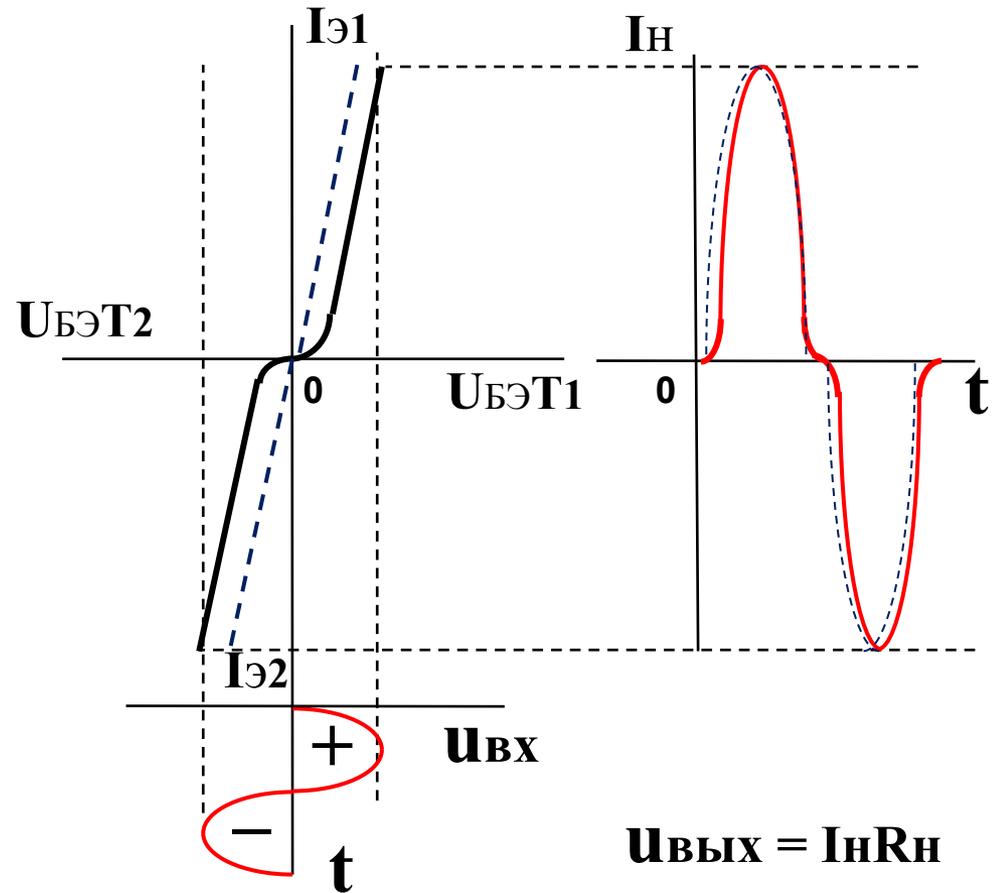
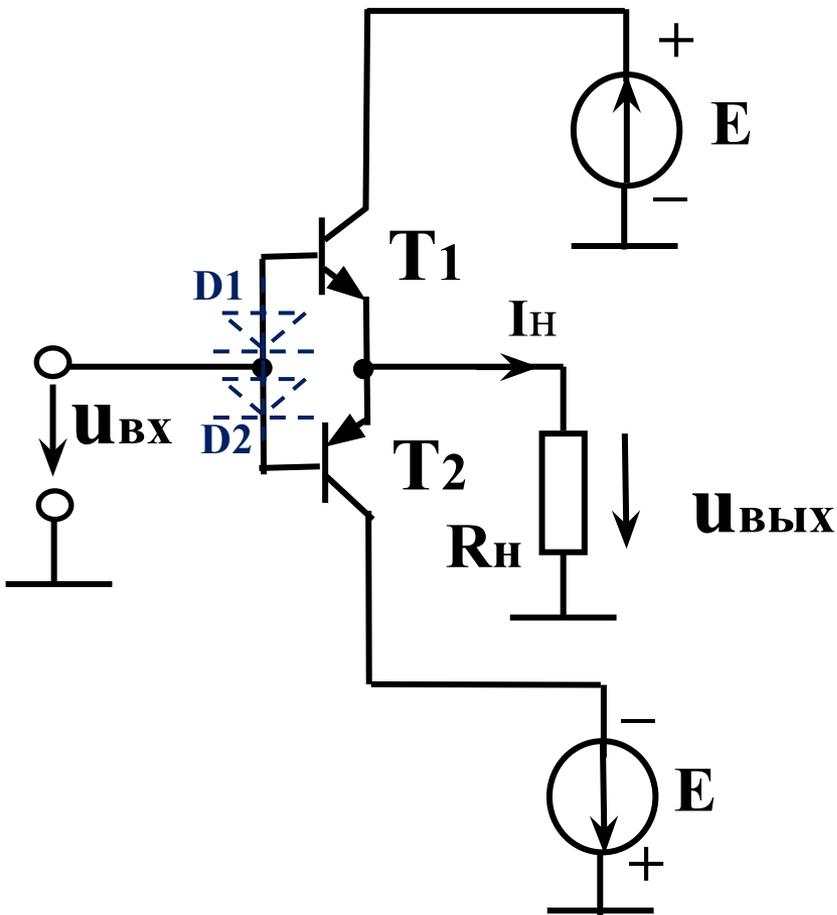
## *Динамический режим:*

При подаче на вход усилителя  $1 - 1'$  переменного напряжения

**U<sub>вх</sub>** изменяется ширина канала **С-И** Т, что ведет к изменению его сопротивления, а, следовательно, и величины тока стока.

Переменный ток стока протекает по цепи: **С** Т  $\rightarrow R_c \rightarrow E_c \rightarrow \perp$   
 $\rightarrow C_{и} \rightarrow$  **И** Т и в обратном направлении, создавая на сопротивлении  $R_c$  напряжение, которое через  $C_2$  передается в нагрузку  $R_n$ . При этом **U<sub>вых</sub>**  $\gg$  **U<sub>вх</sub>**, т.е. происходит усиление **U<sub>вх</sub>**.

# Усилители мощности (УМ)



**T1** и **T2** – (биполярные транзисторы с разным типом проводимости - комплементарная пара) регулируют подачу энергии от источников питания **E** в нагрузку **R<sub>н</sub>**. В положительный полупериод входного напряжения **T1** в режиме **усиления**, **T2** – в режиме **отсечки**. В отрицательный полупериод транзисторы меняются ролями.

Искажения **u<sub>ВЫХ</sub>** устраняются включением диодов **D1** и **D2**.

## Операционный усилитель (ОУ)

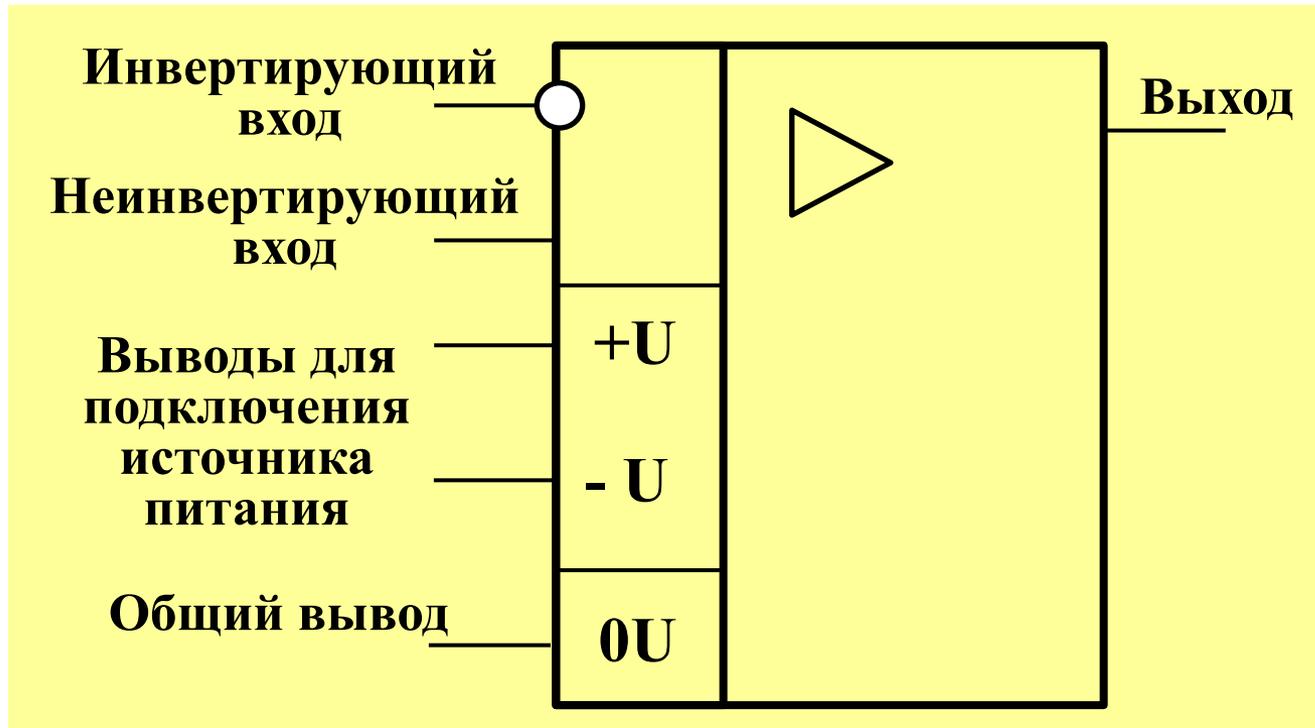
**ОУ** – это высококачественный усилитель для усиления как постоянных, так и переменных сигналов.

Свое название **ОУ** получили от первоначальной области их преимущественного применения для выполнения математических операций (сложения, вычитания и т.п.) в аналоговых вычислительных машинах.

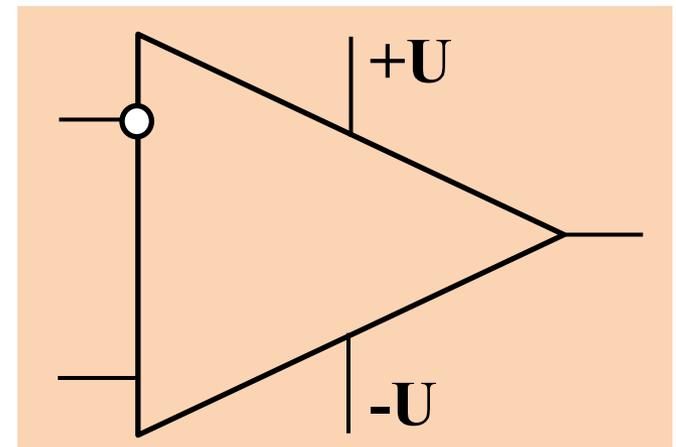
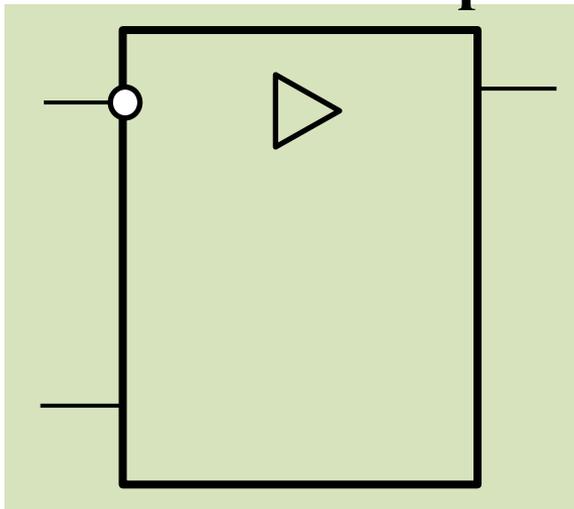
В настоящее время **ОУ** выполняются в виде полупроводниковых интегральных схем, содержат большое число (десятки) элементов ( транзисторов, диодов и т.д.), но по размерам и стоимости приближаются к отдельным транзисторам.

**ОУ** удобно использовать для решения самых разнообразных задач (генерирования, преобразования маломощных сигналов), что определило их широкое применение на практике

# Условные обозначение операционного усилителя



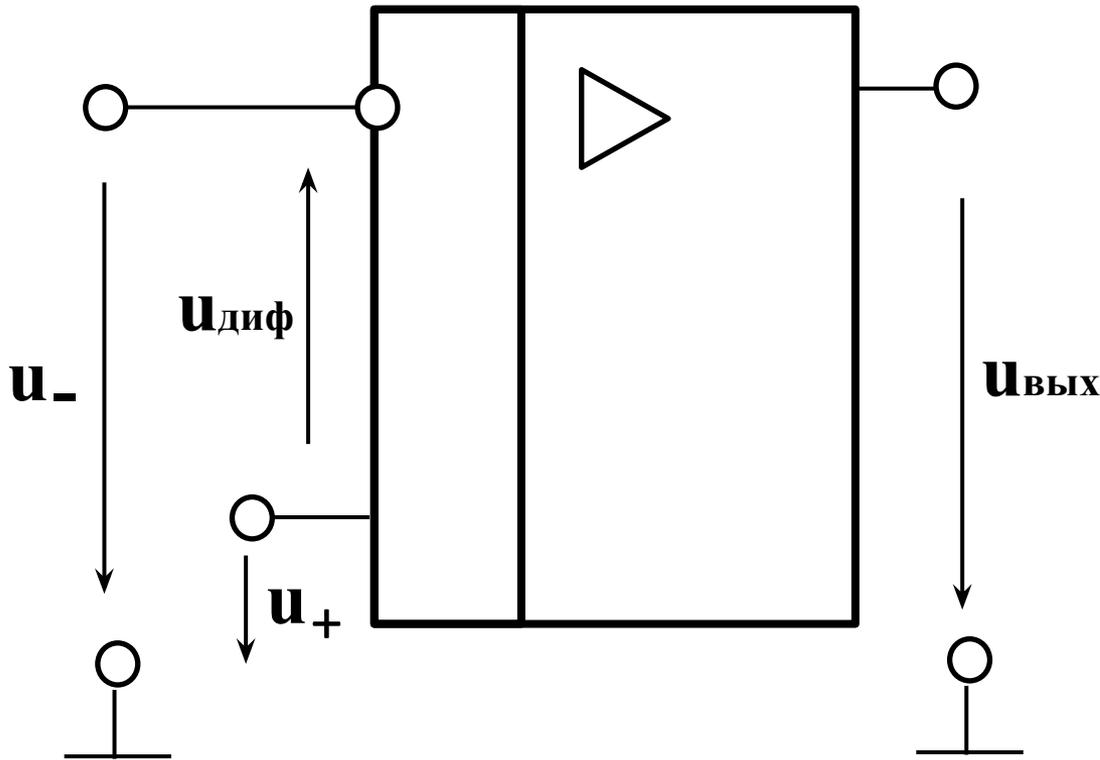
## Упрощенные обозначения ОУ



# Параметры операционного усилителя

Параметр	Идеальный ОУ	Реальный ОУ
$K_{U_{Oy}} \cdot 10^3$	$\infty$	10 ÷ 1000
$R_{BX}$ кОм	$\infty$	10 ÷ 10 <sup>2</sup> (БПТ) 10 <sup>3</sup> ÷ 10 <sup>4</sup> (ПТ)
$R_{ВЫХ}$ , Ом	0	1 ÷ 1000
$f_1$ , МГц	$\infty$	0,1 ÷ 100
$K_{CF}$	0	0,1 ÷ 1

# Напряжения на входах и выходе ОУ

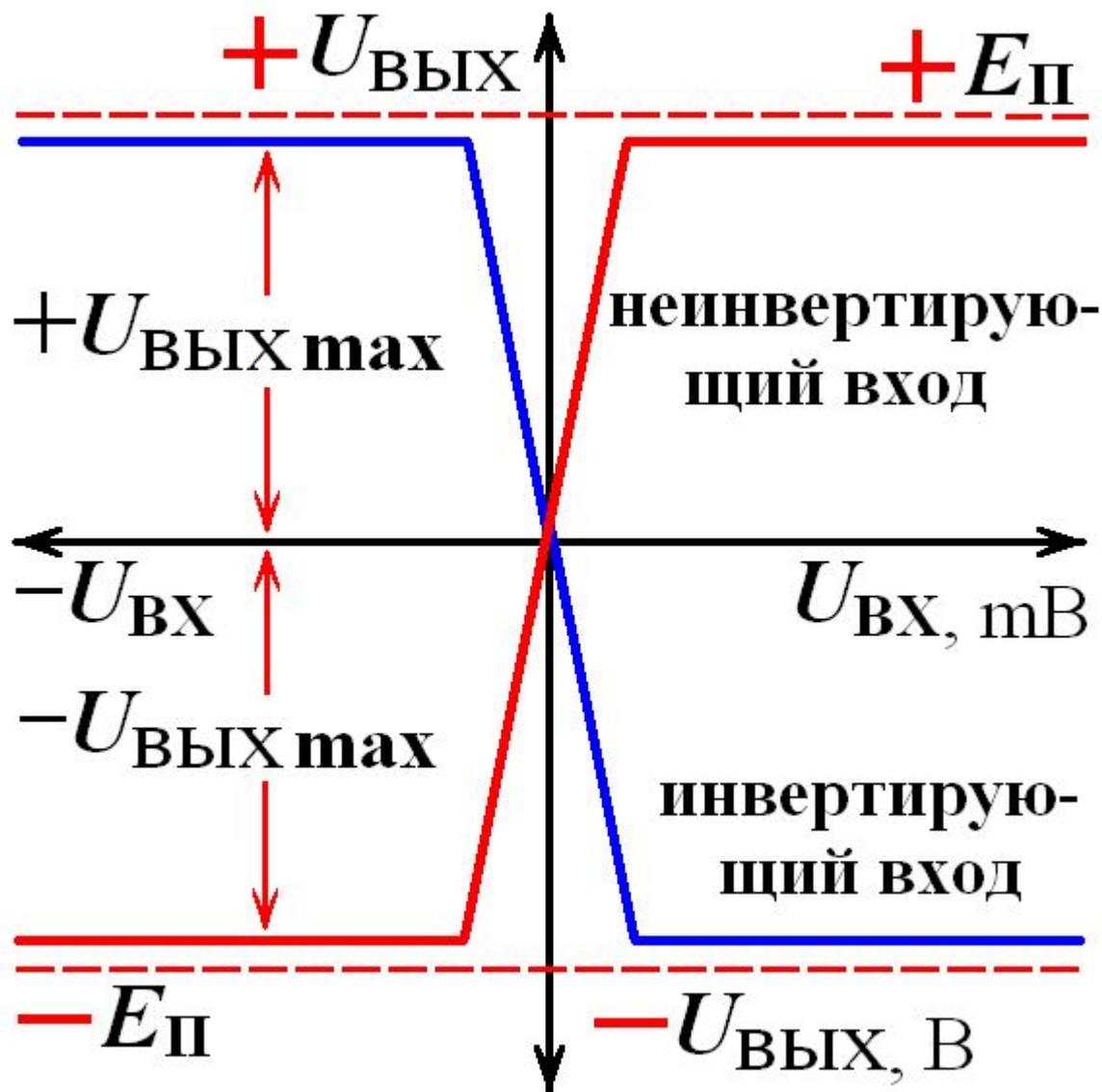


Дифференциальное напряжение

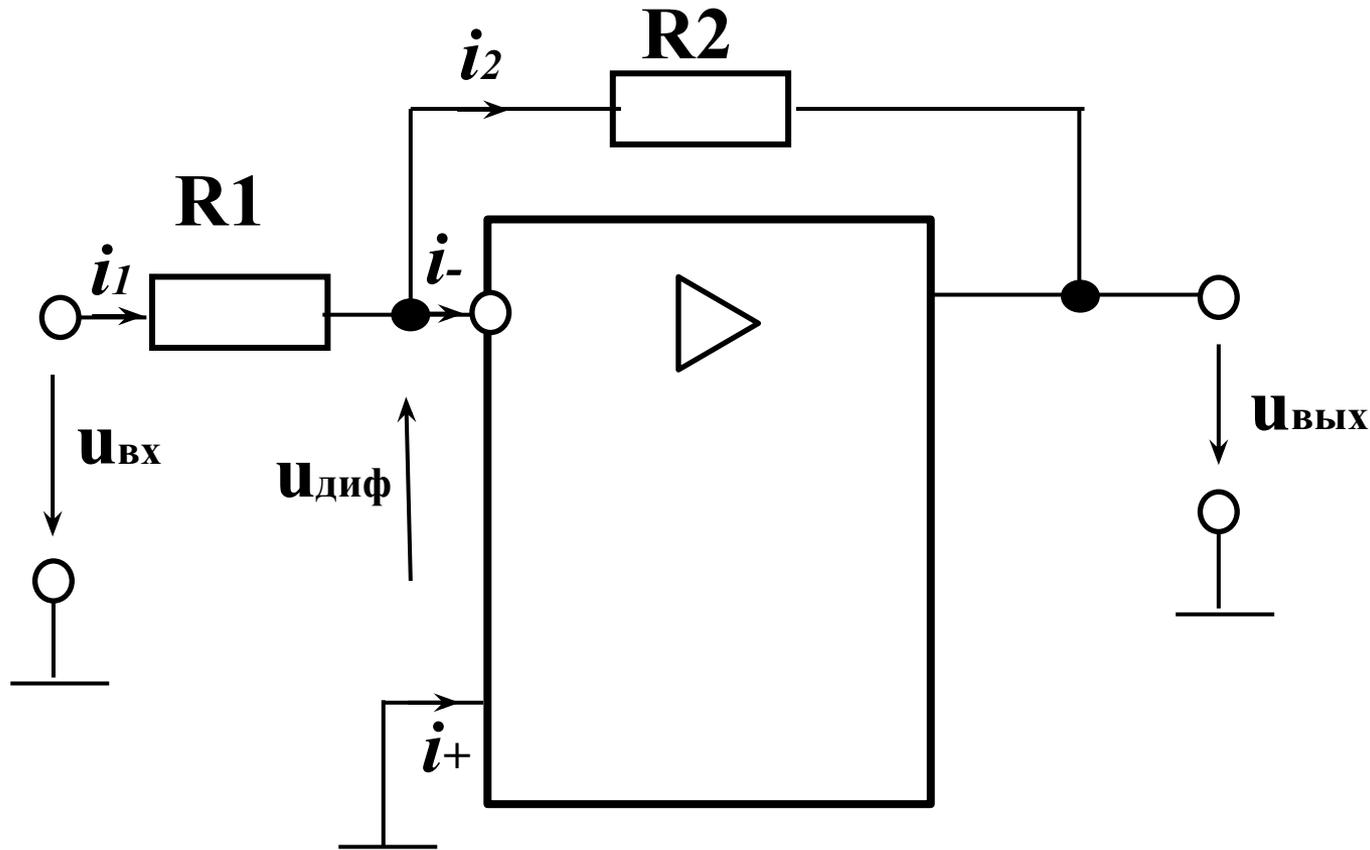
$$u_{\text{диф}} = u_+ - u_-$$

**ОУ** проектируются так, чтобы  **$u_{\text{вых}}$**  как можно больше изменялось при изменении  **$u_{\text{диф}}$**  и как можно меньше изменялось при одинаковом изменении  **$u_-$**  и  **$-u_+$**  т.е. синфазном изменении напряжений на входах **ОУ**

# Передаточная характеристика ОУ



# Инвертирующий усилитель на ОУ

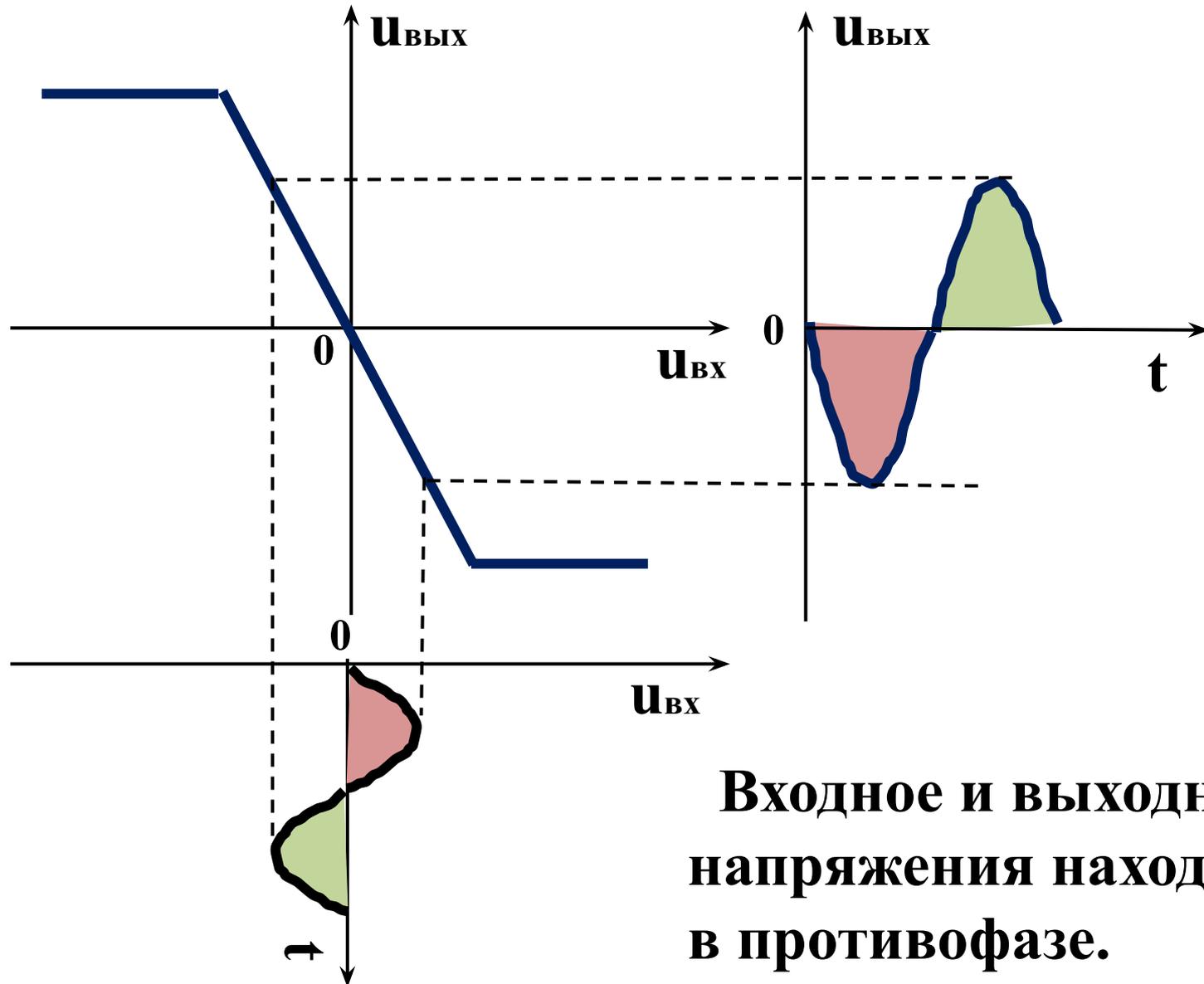


$i_- = 0$  ( $R_{вх.оу} = \infty$ ), по закону Кирхгофа  $i_1 = i_2$ .

$U_{диф} = 0$  ( $K_{U_{оу}} = \infty$ ),  $i_1 = U_{вх} / R_1$ ,  $i_2 = - U_{вых} / R_2$

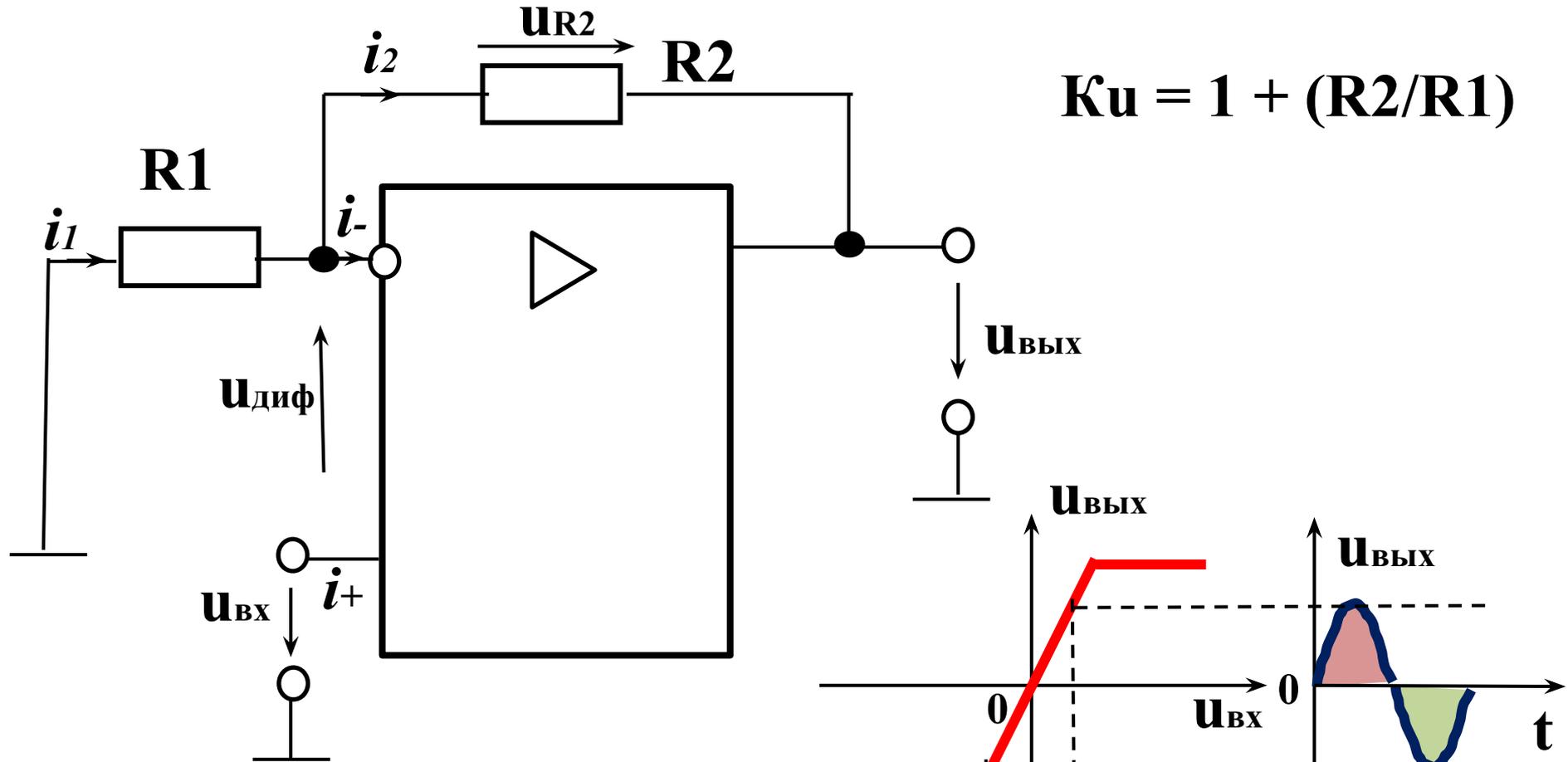
$U_{вых} = - U_{вх} (R_2 / R_1)$ ,  $K_u = - R_2 / R_1$

# Инвертирующий усилитель на ОУ

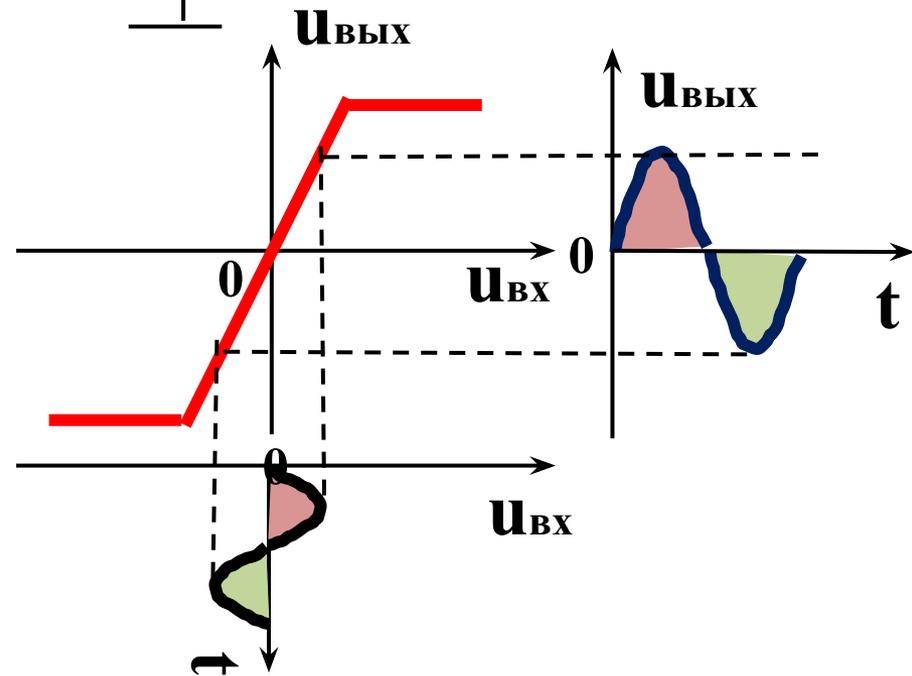


**Входное и выходное  
напряжения находятся  
в противофазе.**

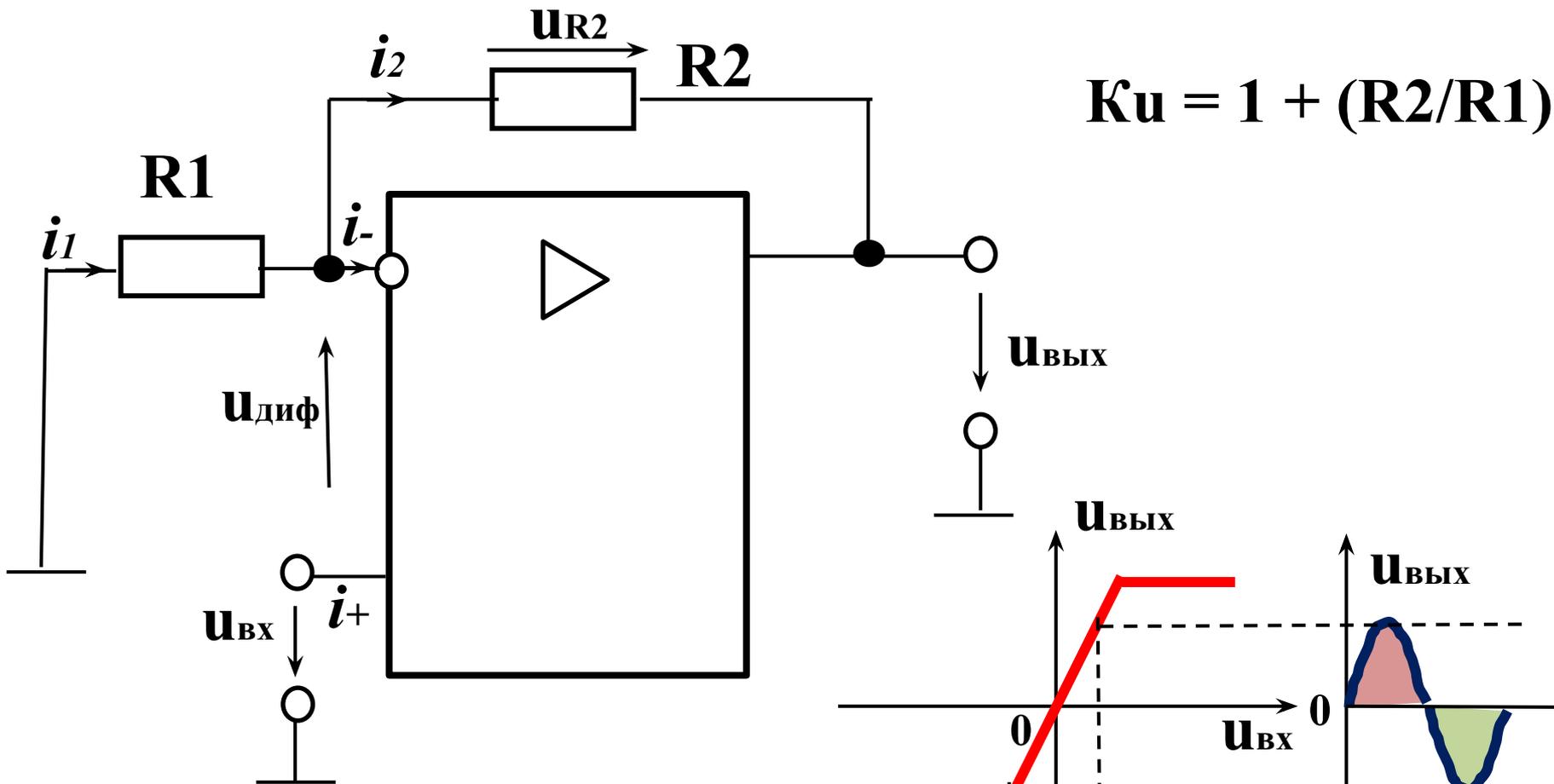
# Неинвертирующий усилитель на ОУ



Входное и выходное напряжения находятся в фазе.

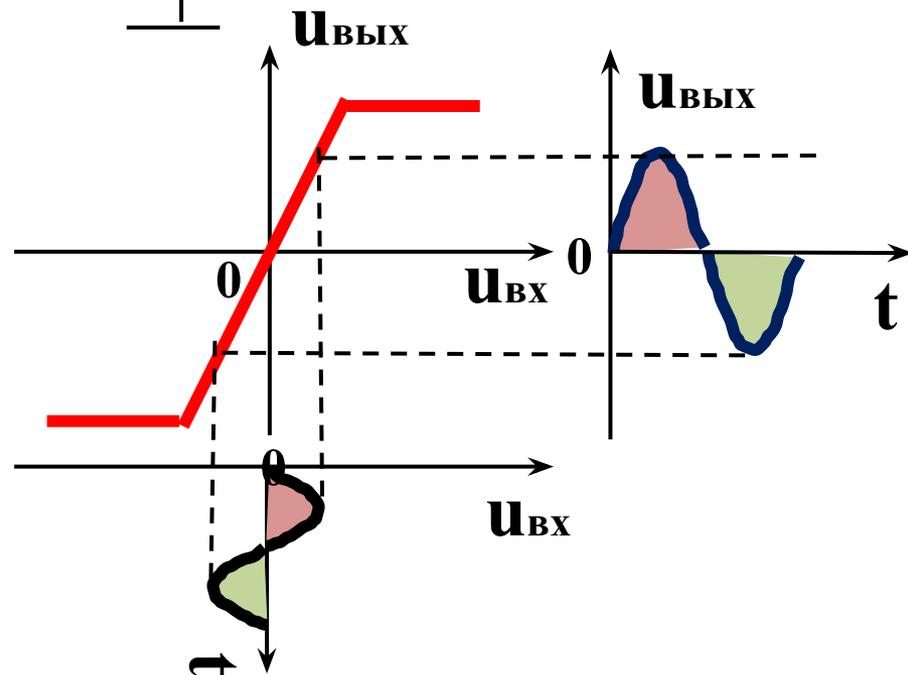


# Инвертирующий усилитель на ОУ



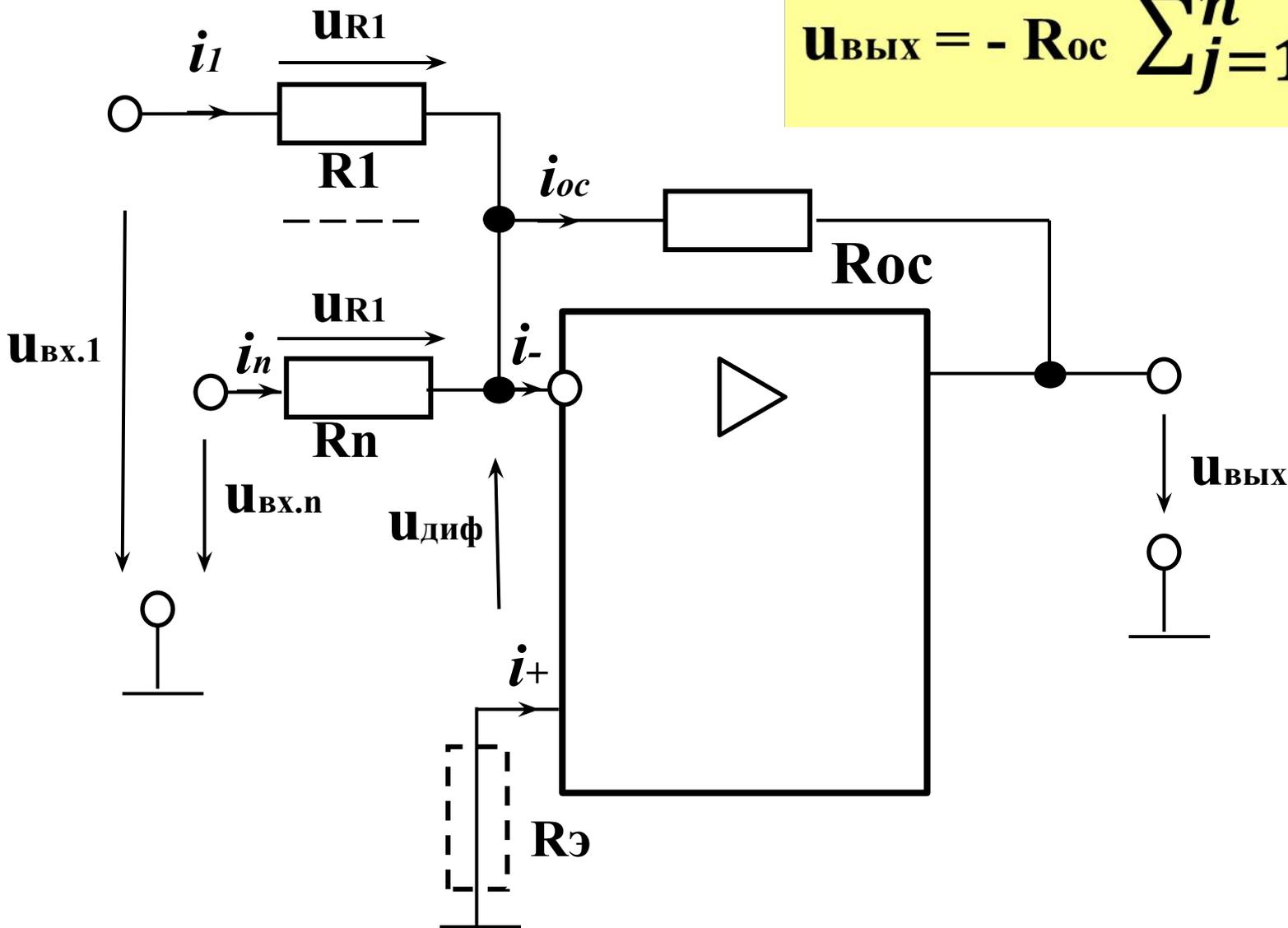
$$K_u = 1 + (R2/R1)$$

Входное и выходное напряжения находятся в фазе

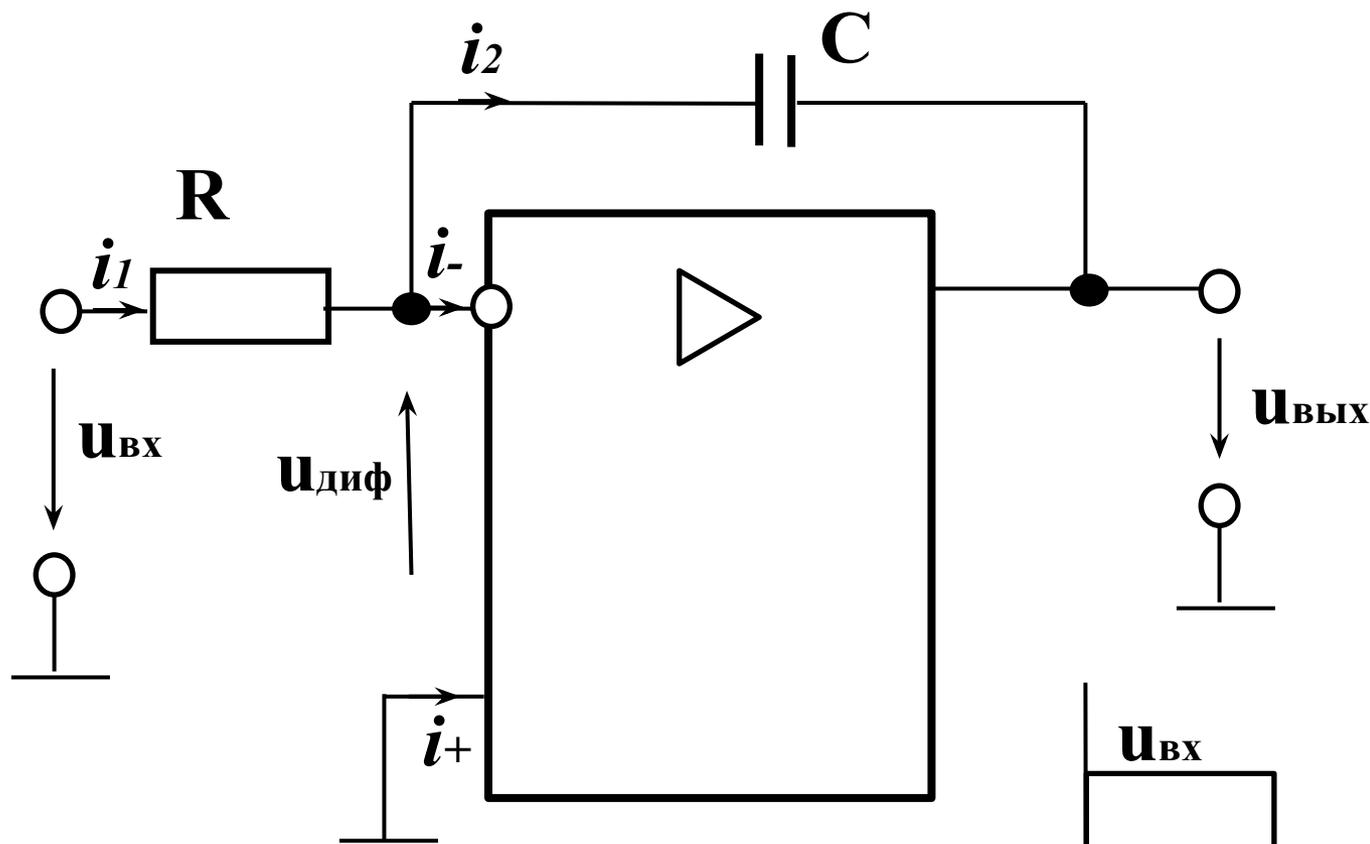


# Инвертирующий сумматор напряжений на ОУ

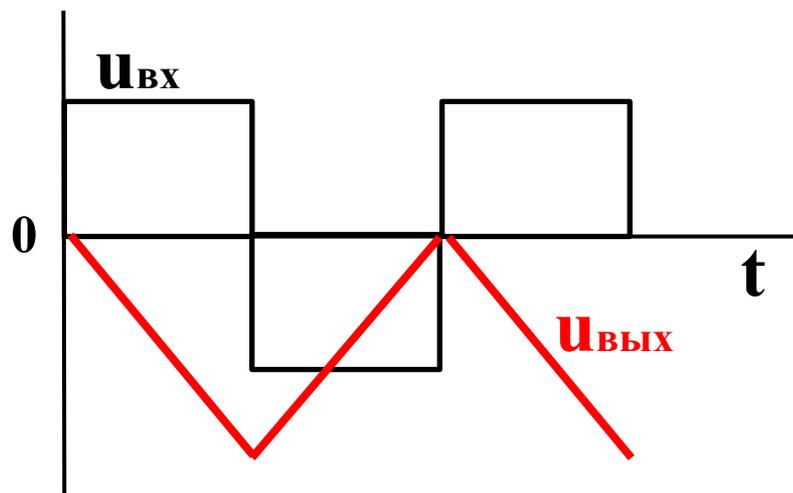
$$U_{\text{ВЫХ}} = - R_{\text{ос}} \sum_{j=1}^n \frac{u_{\text{ВХ}j}}{R_j}$$



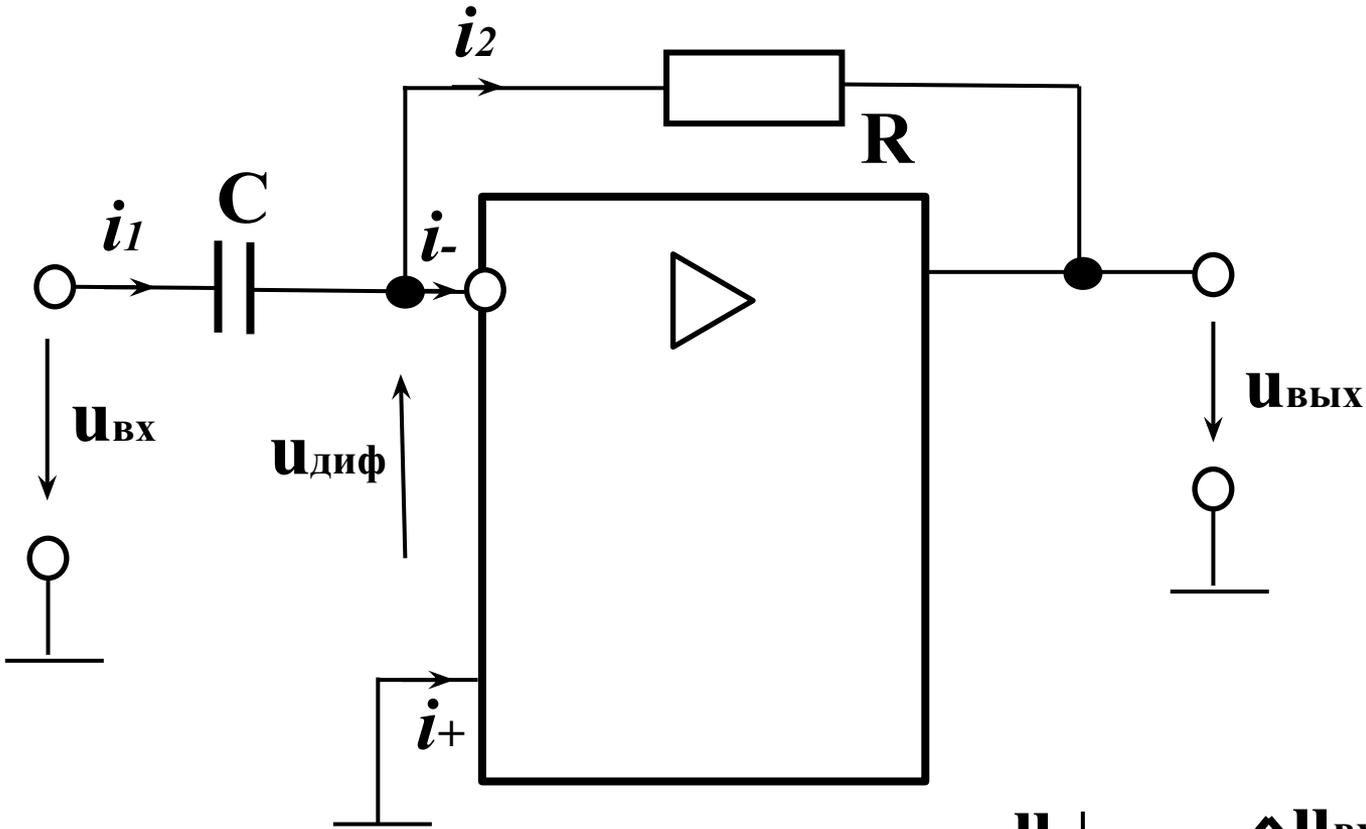
# Интегрирующий усилитель на ОУ (интегратор)



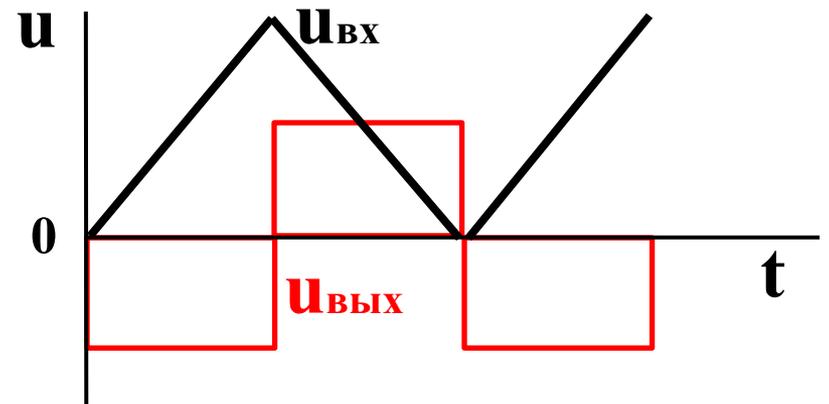
$$u_{ВЫХ} = \frac{1}{RC} \int_0^t u_{ВХ} dt$$



# Дифференцирующий усилитель на ОУ



$$u_{ВЫХ} = RC \frac{du_{ВХ}}{dt}$$

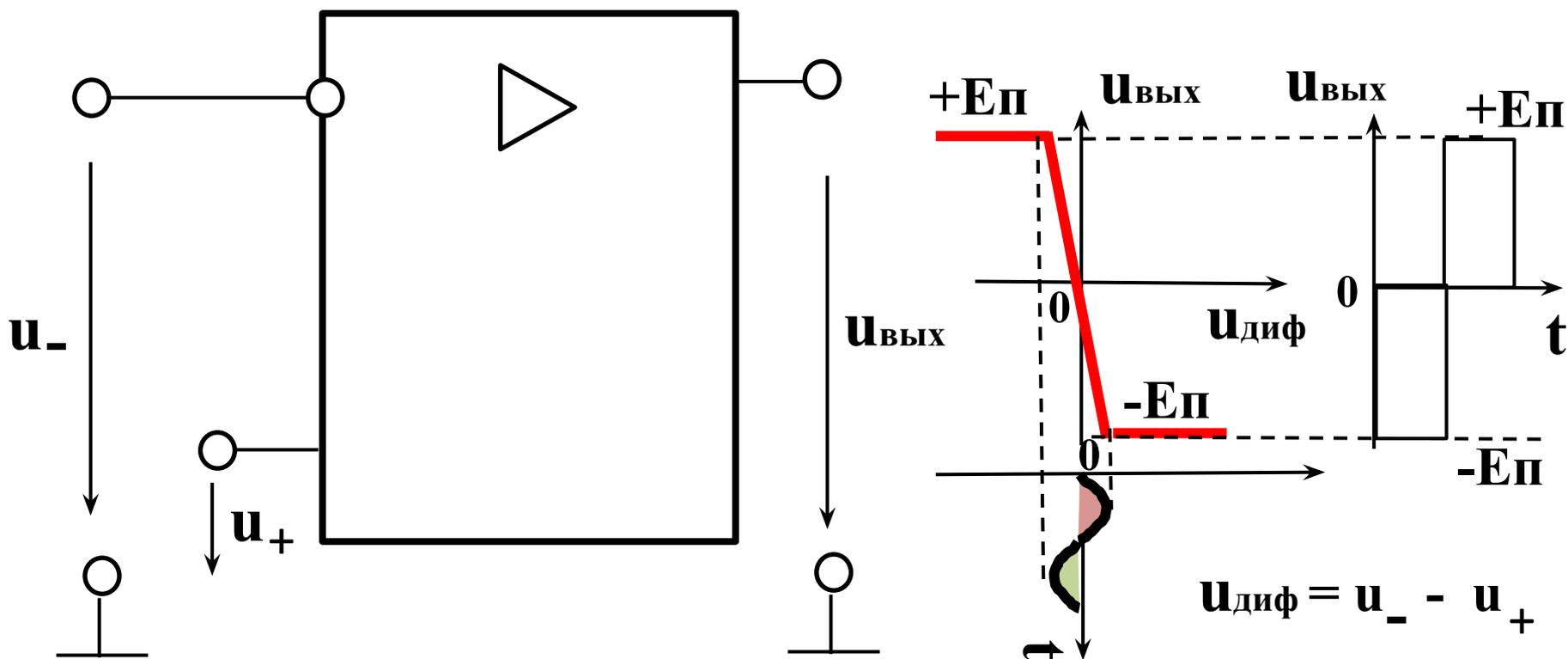


# Компаратор на ОУ

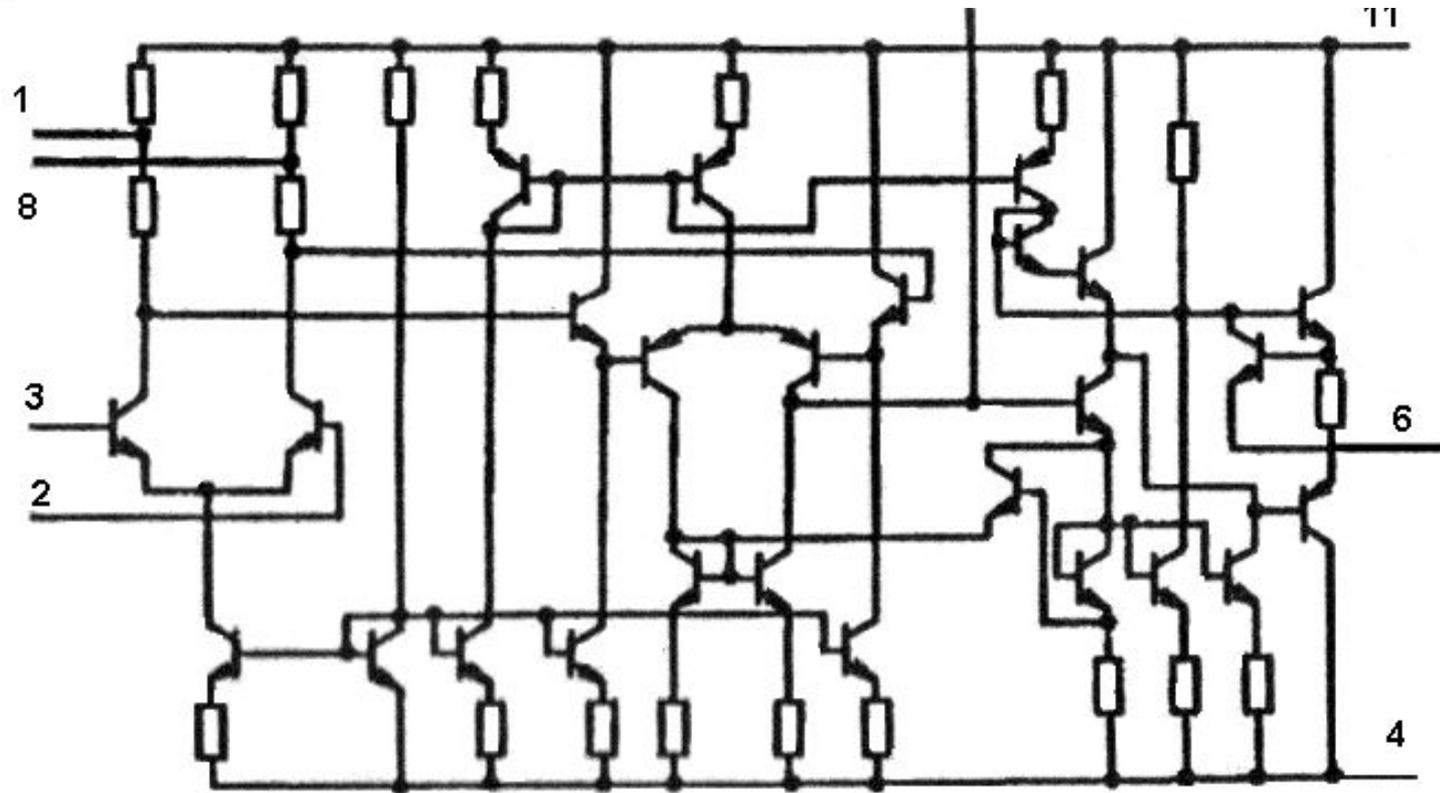
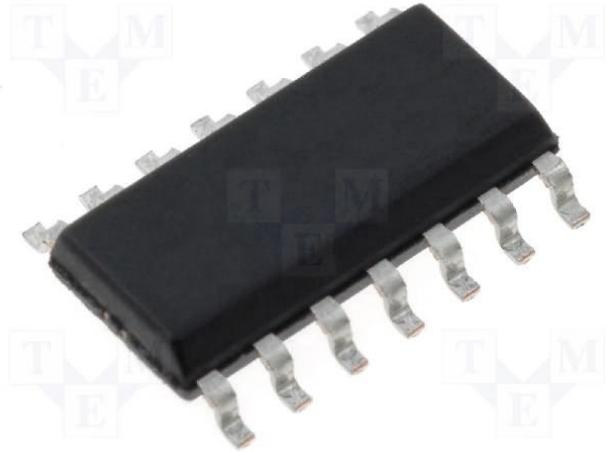
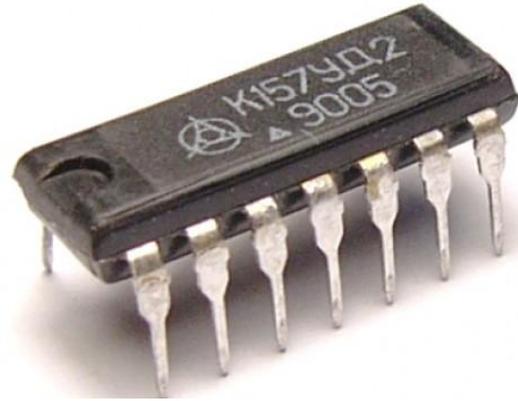
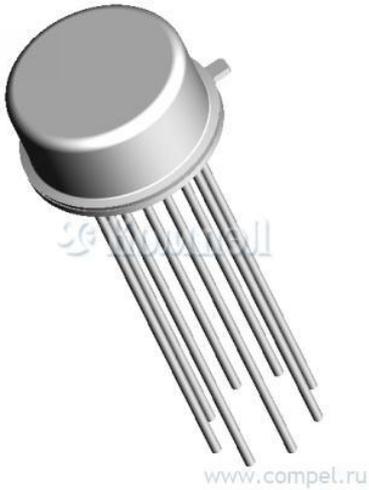
**Компаратор** (от английского слова **compare** – сравнить) – это устройство сравнения двух напряжений и в зависимости от того на каком из входов оно выше, устанавливает на выходе плюс или минус напряжения питания.

при  $u_- > u_+$   $u_{\text{вых}} < 0$ ;

при  $u_- < u_+$   $u_{\text{вых}} > 0$



# Внешний вид ОУ



Вариант  
схемы ОУ