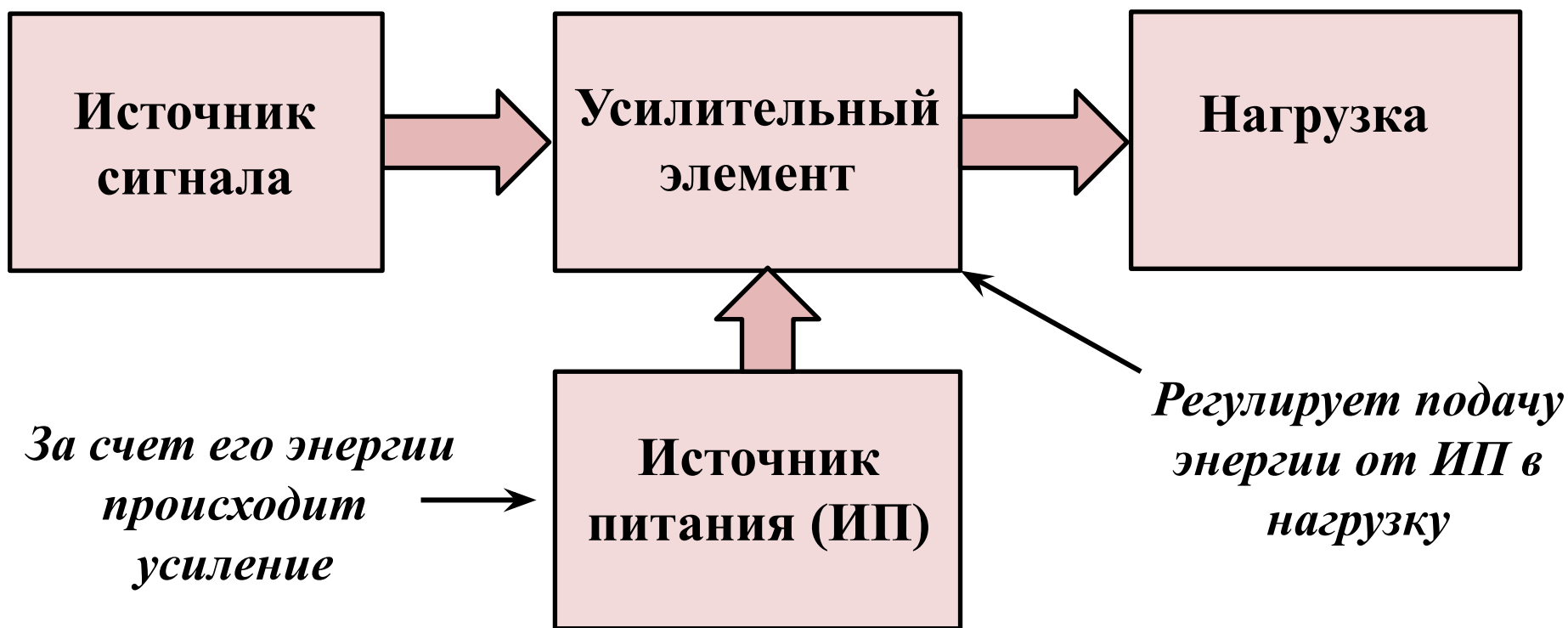


Усилители

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: $K_p = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{P_{\text{ВХ}}}$

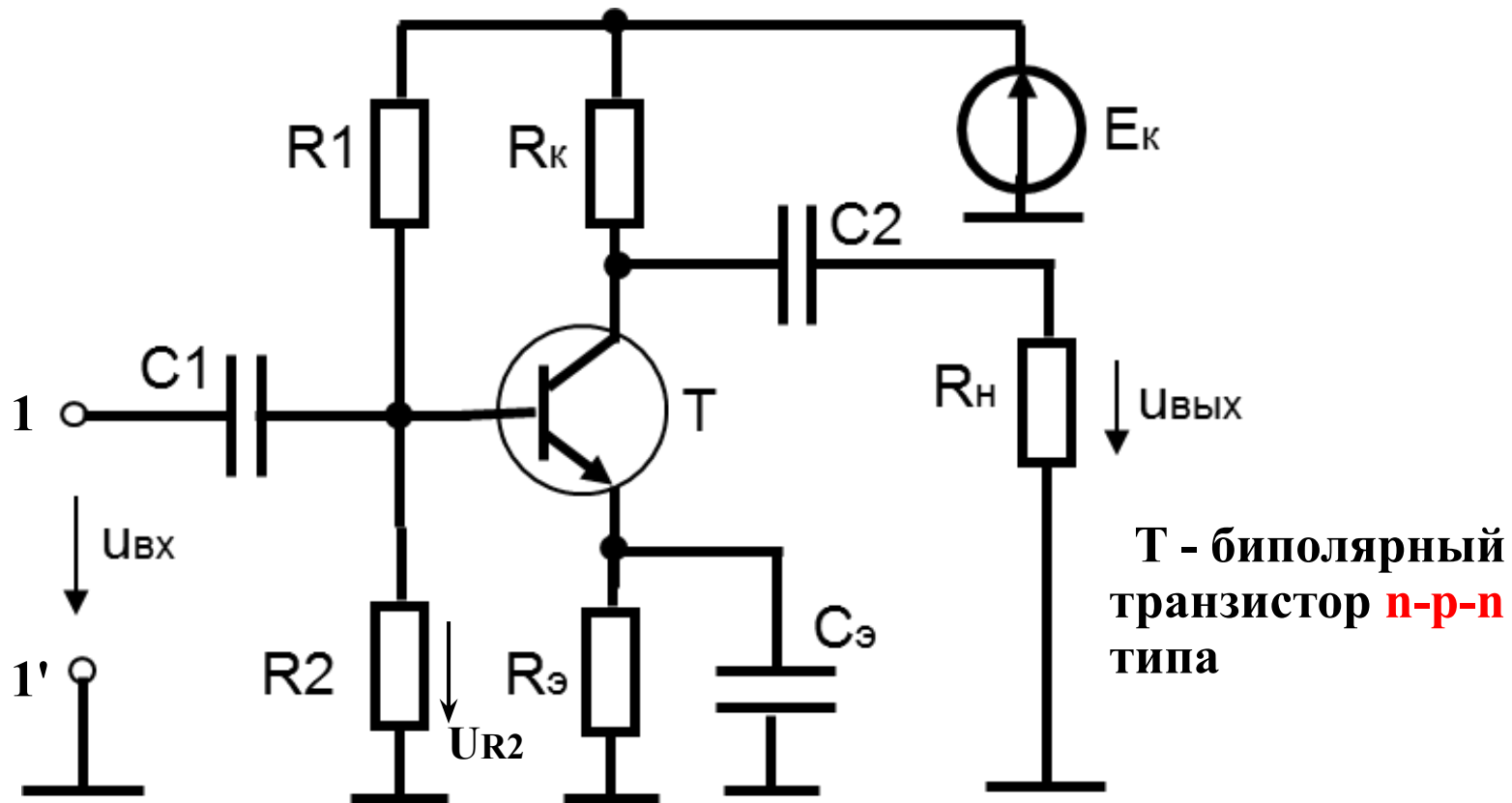
$U_{\text{ВХ}}, I_{\text{ВХ}}, U_{\text{ВЫХ}}, I_{\text{ВЫХ}}$ - действующие значения переменных значений входного и выходного токов и напряжений.

$P_{\text{ВХ}}$ 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:

- T** – регулирует подачу энергии от **Eк** в нагрузку. **Eк** – источник энергии.
- R1, R2**, - базовый делитель – для обеспечения начального режима работы.
- Rэ, Cэ** – для обеспечения температурной стабилизации.
- C1, C2** – разделительные конденсаторы -для развязки по постоянному току.
- Rк** – сопротивление коллектора, на котором выделяется усиленный сигнал.

Принцип работы усилителя на биполярном транзисторе

Статический режим:

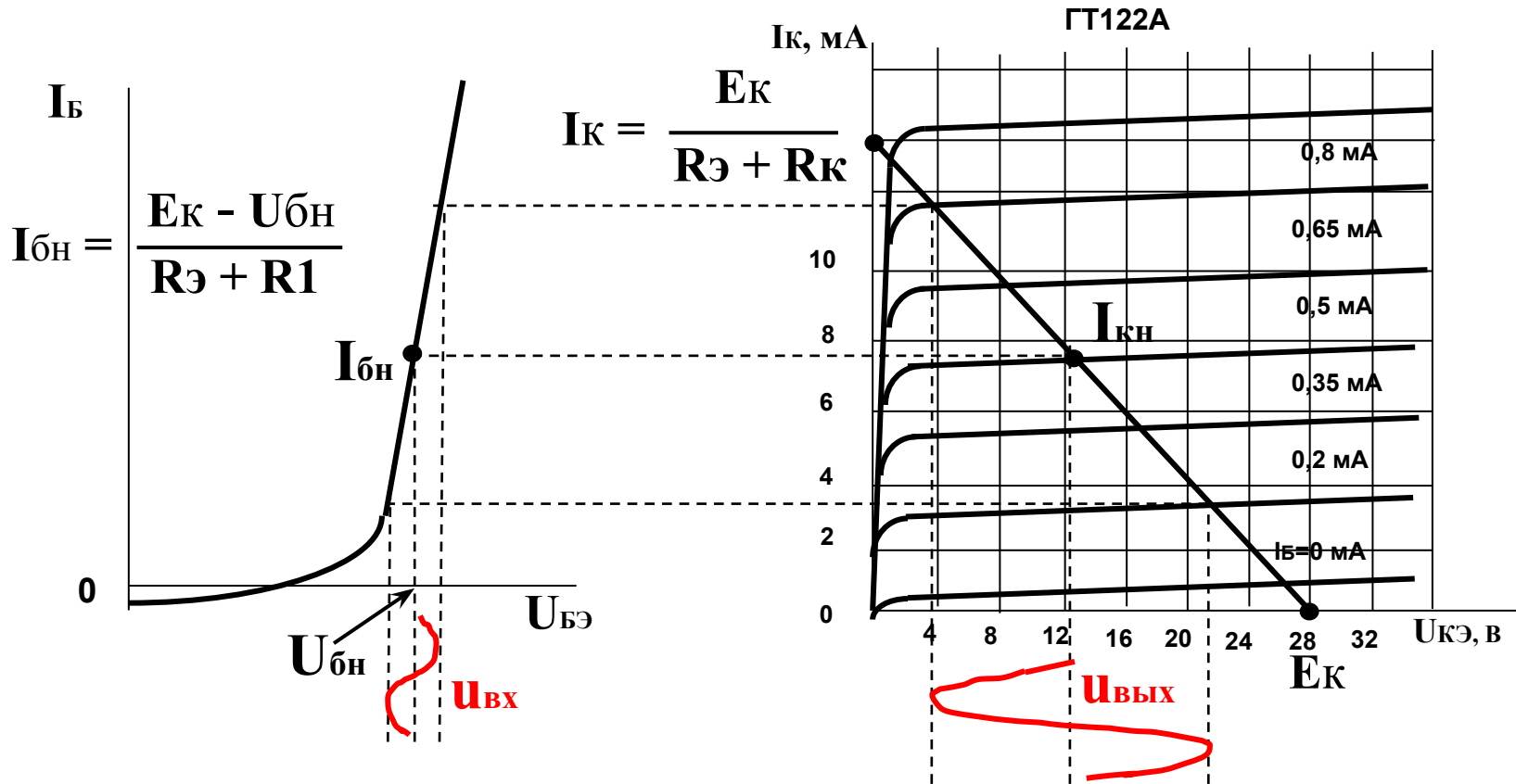
При включении источника питания протекает ток делителя ($+E_k \rightarrow R_1 \rightarrow R_2 \rightarrow \perp \rightarrow -E_k$). На R_2 создается напряжение, которое смещает эмиттерный переход в прямом направлении.

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

Усилитель на биполярном транзисторе по схеме с ОК

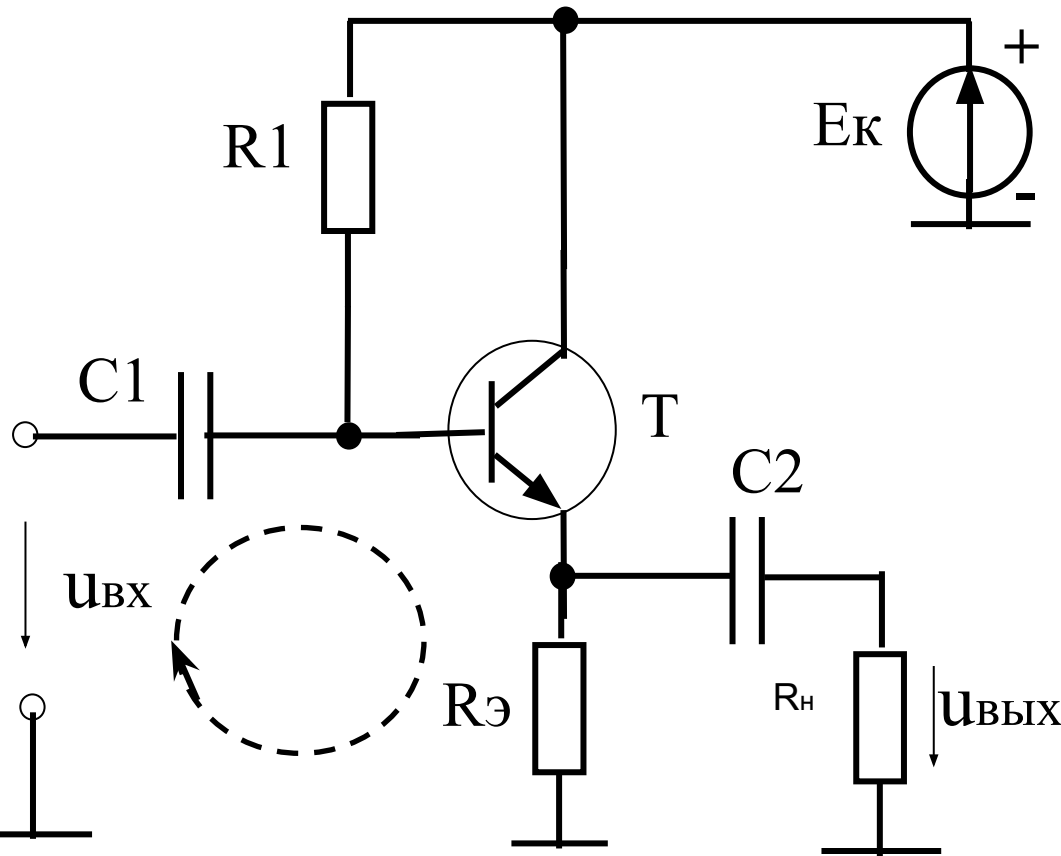
В усилителе на БПТ по схеме с ОК коллектор является общим электродом по переменному току для входной (базовой) и выходной (эмиттерной) цепей.

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).

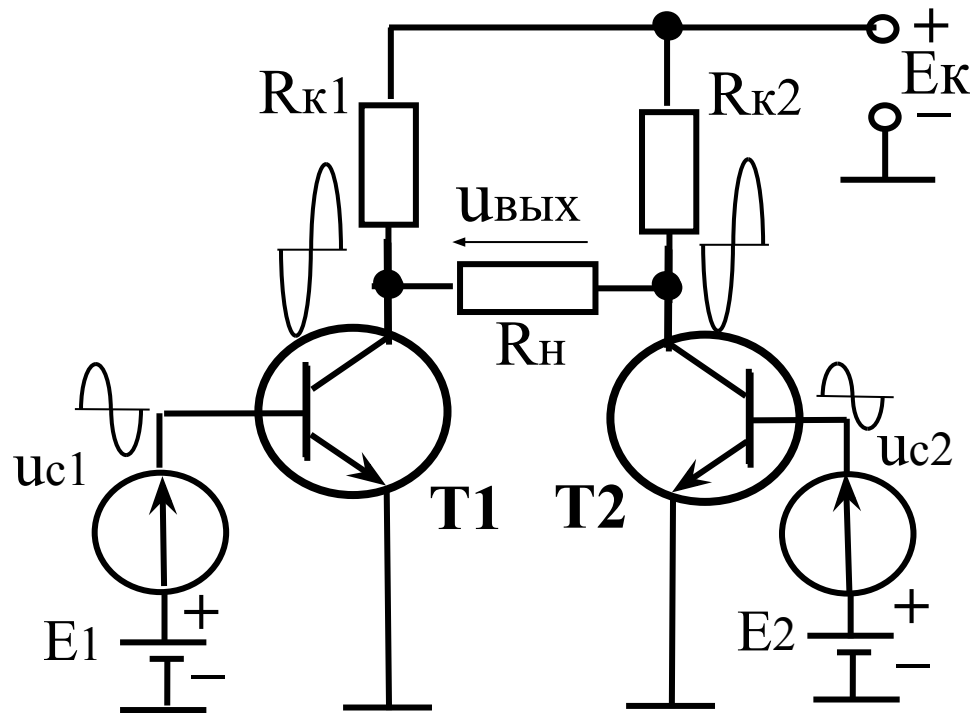
При построении усилителей с непосредственными связями важной проблемой является дрейф, т.е. изменение постоянного напряжения (тока) при отсутствии входного сигнала из-за изменения температуры окружающей среды, напряжения питания и других дестабилизирующих факторов.

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_{K1}, E_K и T2, R_{K2}, E_K, к выходам которых подключена нагрузка R_н.

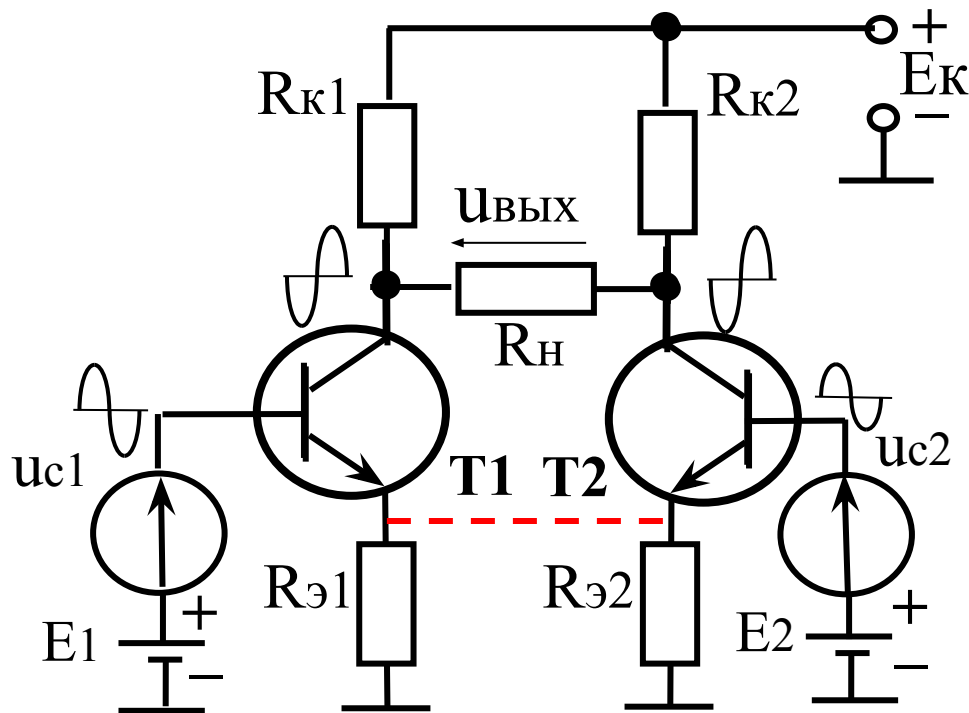
E₁ и E₂ – определяют положение рабочей точки при $u_{c1} = u_{c2} = 0$.

Пусть на входы действуют синхронные сигналы $u_{c1} = u_{c2}$ (эквивалентно дрейфу нуля).

При идентичных параметрах усилительных каскадов T1, R_{K1}, E_K и T2, R_{K2}, E_K дрейф напряжения в нагрузке R_н отсутствует, так как напряжения на коллекторах транзисторов T1 и T2 равны и их разность равна нулю **$u_{\text{ВЫХ}}=0$** .

Однако незначительные отклонения параметров усилителей приводят к появлению дрейфа нуля.

Дифференциальный усилитель (усиление синфазного сигнала)

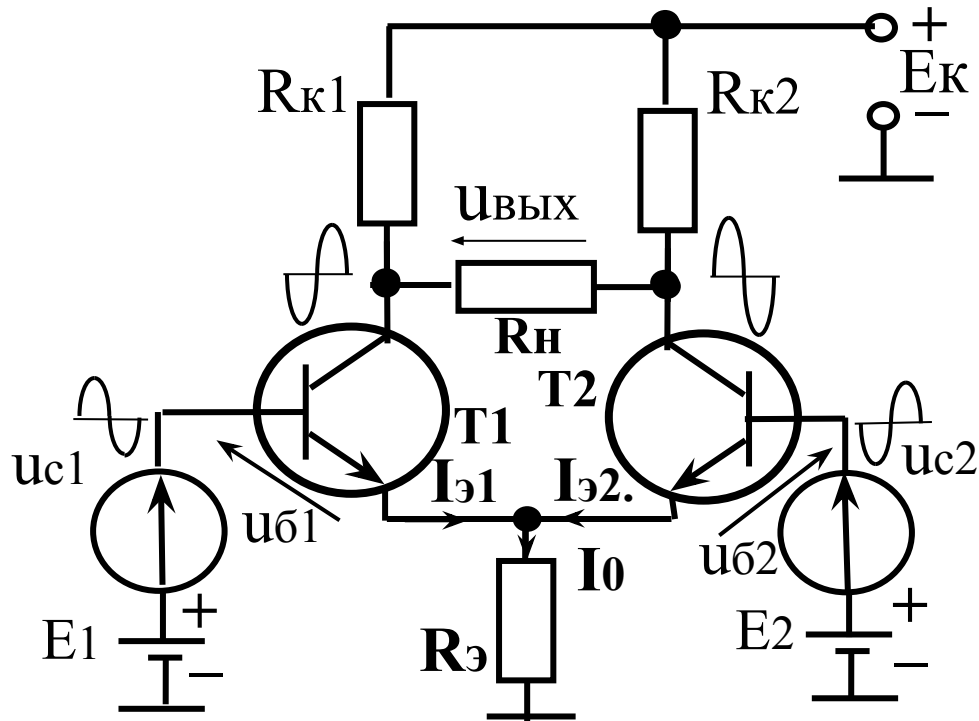


Для уменьшения влияния отклонения параметров усилителей на величину дрейфа нуля в эмиттерные цепи транзисторов включают одинаковые по величине сопротивления резисторы $R_{э1}$ и $R_{э2}$.

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

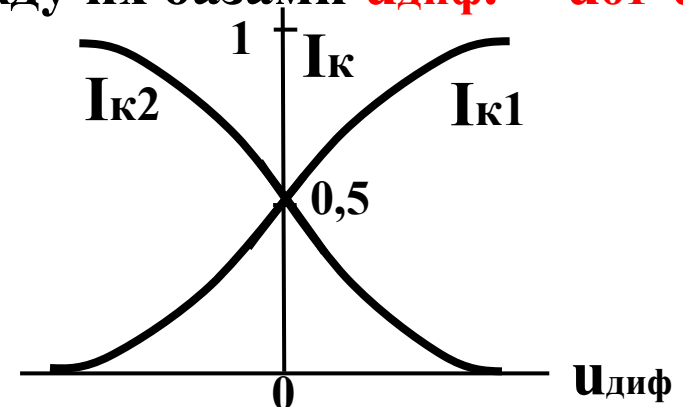
- это зависимости $I_{\text{К1}}$, $I_{\text{К2}}$ транзисторов Т1 и Т2 от разностного (дифференциального) напряжения между их базами $u_{\text{диф.}} = u_{\text{б1}} - u_{\text{б2}}$.

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

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

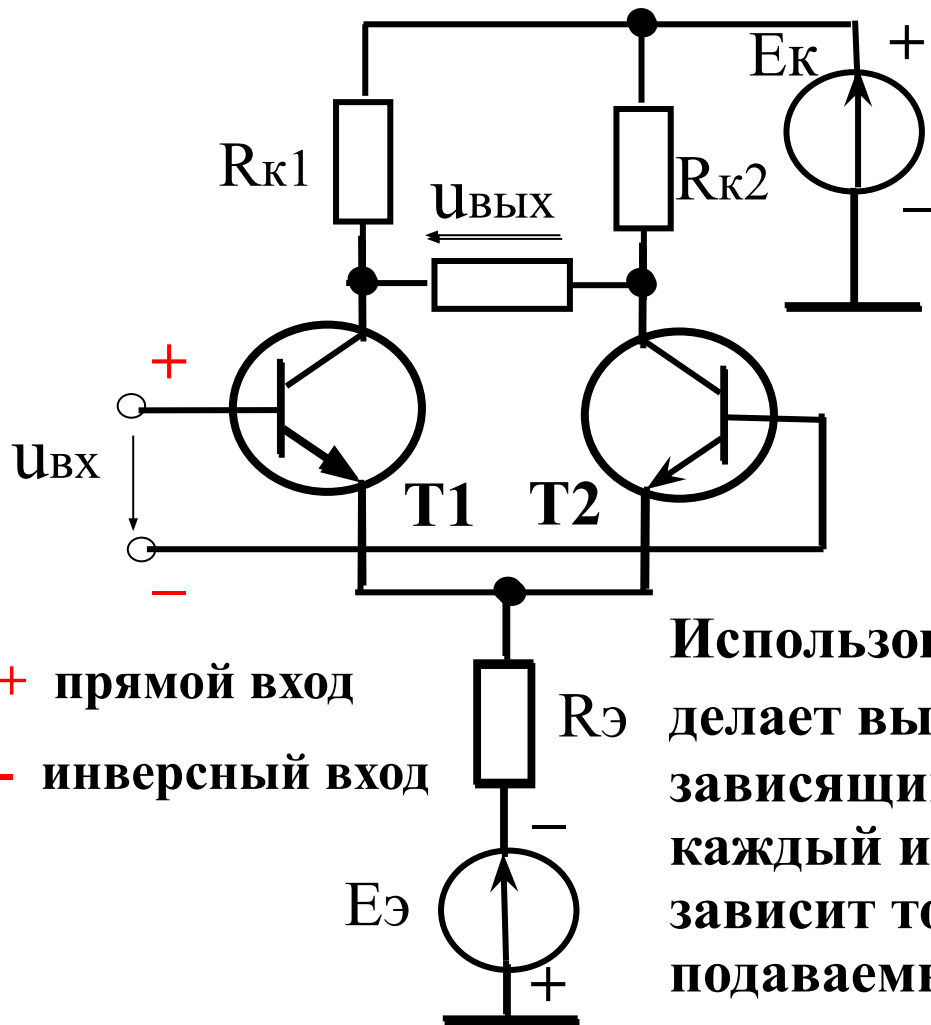
α_0 - коэффициент передачи $I_{\text{Э}}$

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



Дифференциальный усилитель

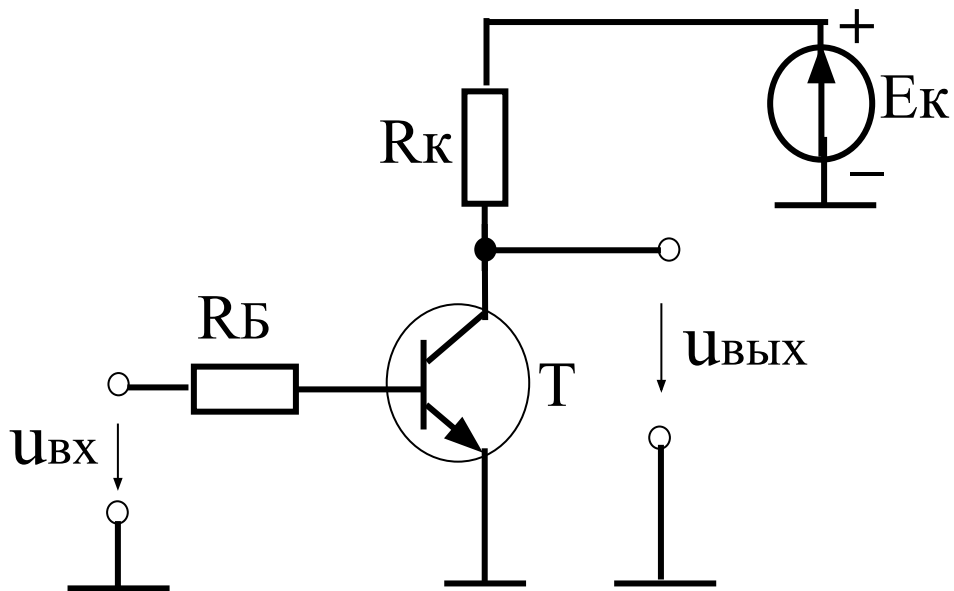
Дифференциальный усилитель построен на основе моста постоянного тока, плечи которого образованы резисторами $R_{к1}=R_{к2}$ и биполярными транзисторами одного типа, включенными по схеме с ОЭ. Параметры транзисторов отличаются на $1\div 5\%$.



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

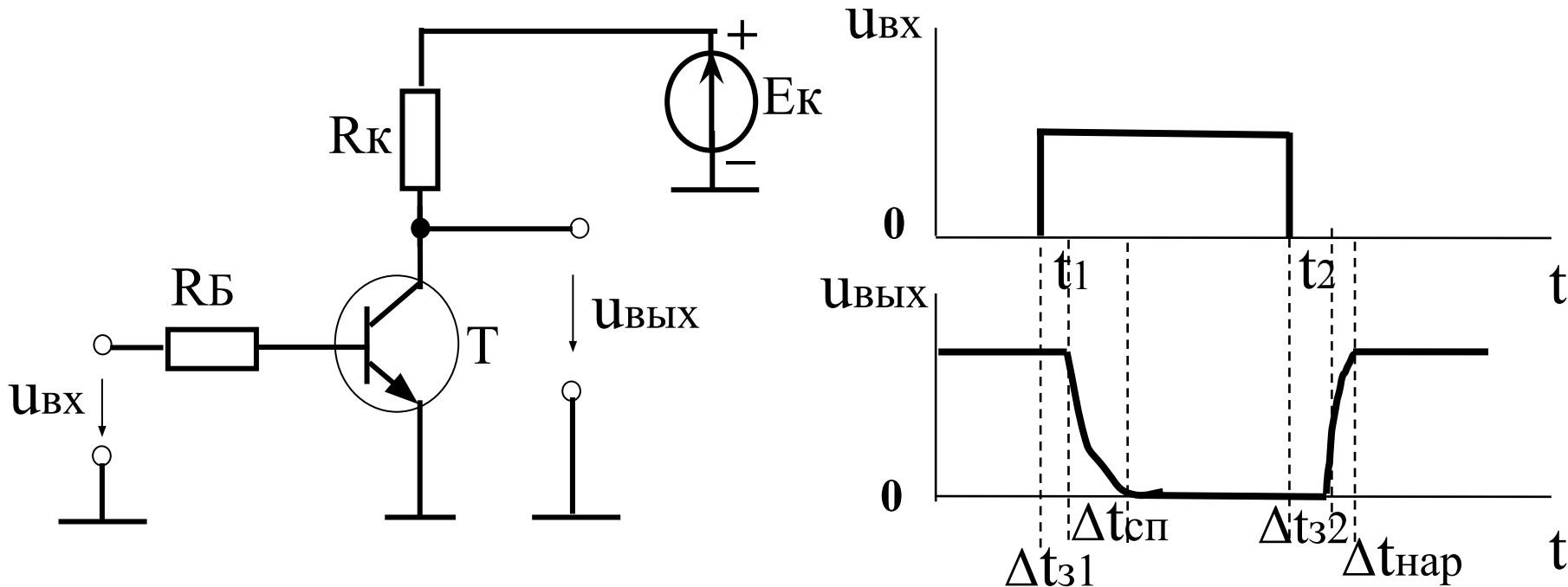


Транзисторный ключ - это усилитель, в котором транзистор работает в импульсном режиме, т.е. когда токи и напряжения характеризуются резкими изменениями.

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.

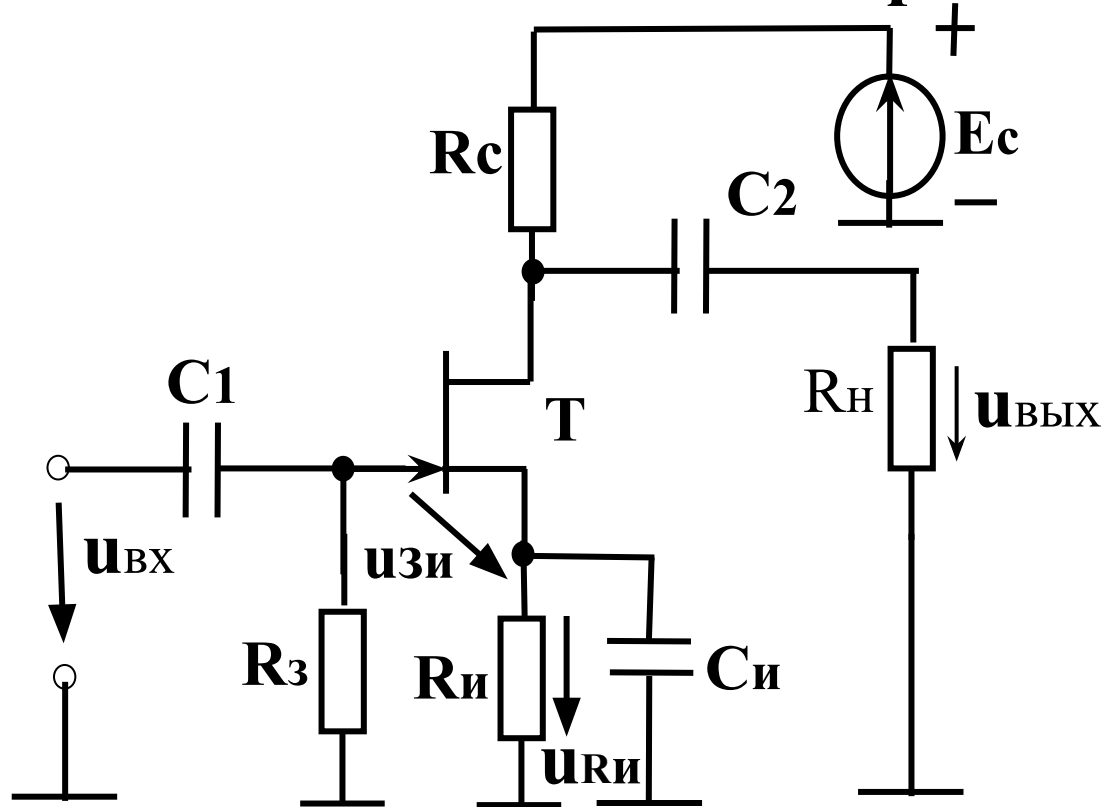
Транзисторный ключ



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 р-п 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** $T \rightarrow R_{и} \rightarrow \perp \rightarrow -E_c$.

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

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

Напряжение на нагрузке равно нулю

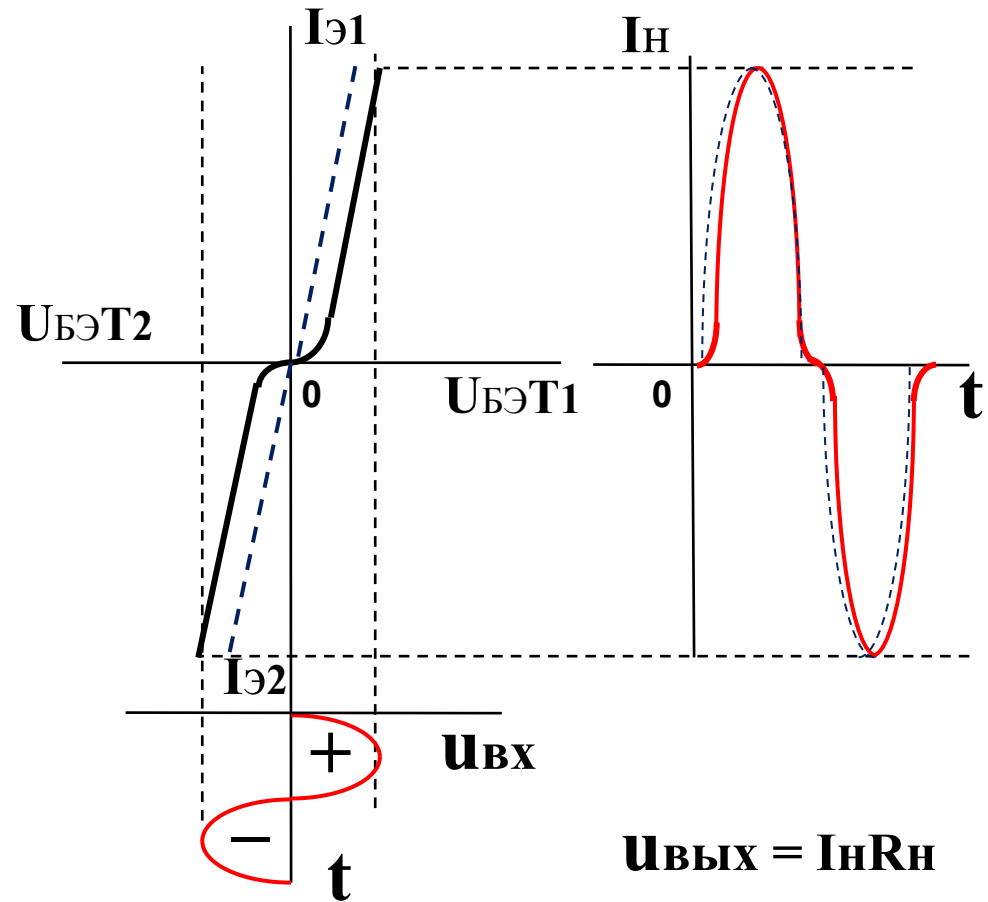
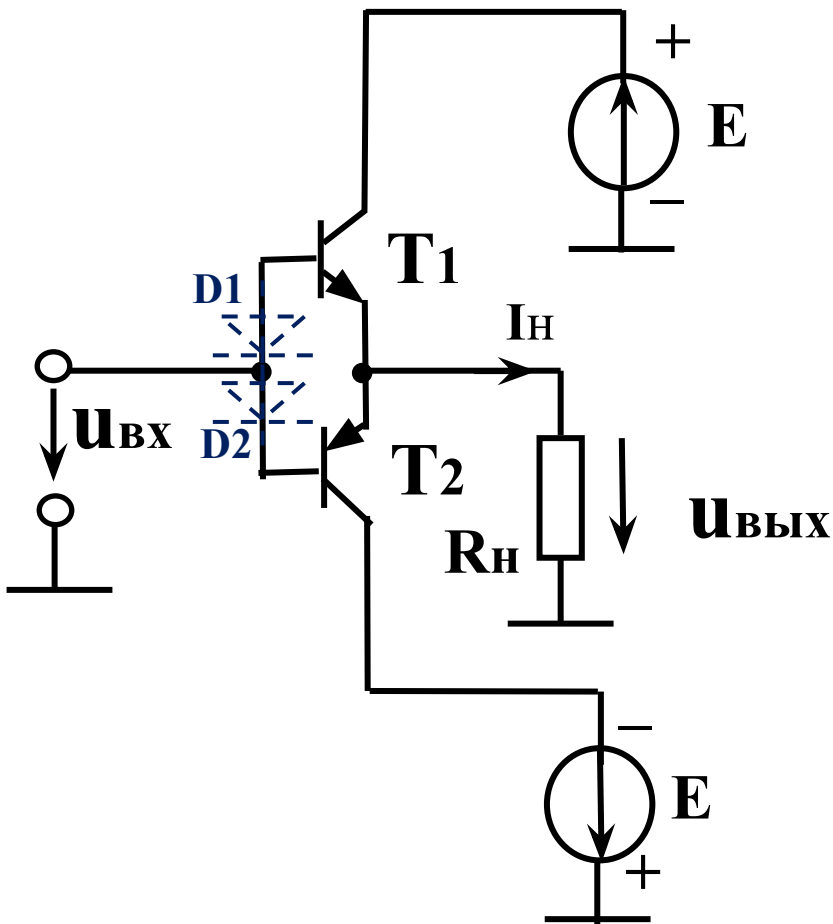
Динамический режим:

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

$U_{вх}$ изменяется ширина канала **С-И** T , что ведет к изменению его сопротивления, а, следовательно, и величины тока стока.

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

Усилители мощности (УМ)



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

Искажения **U_{ВЫХ}** устраняются включением диодов **D1** и **D2**.

Операционный усилитель (ОУ)

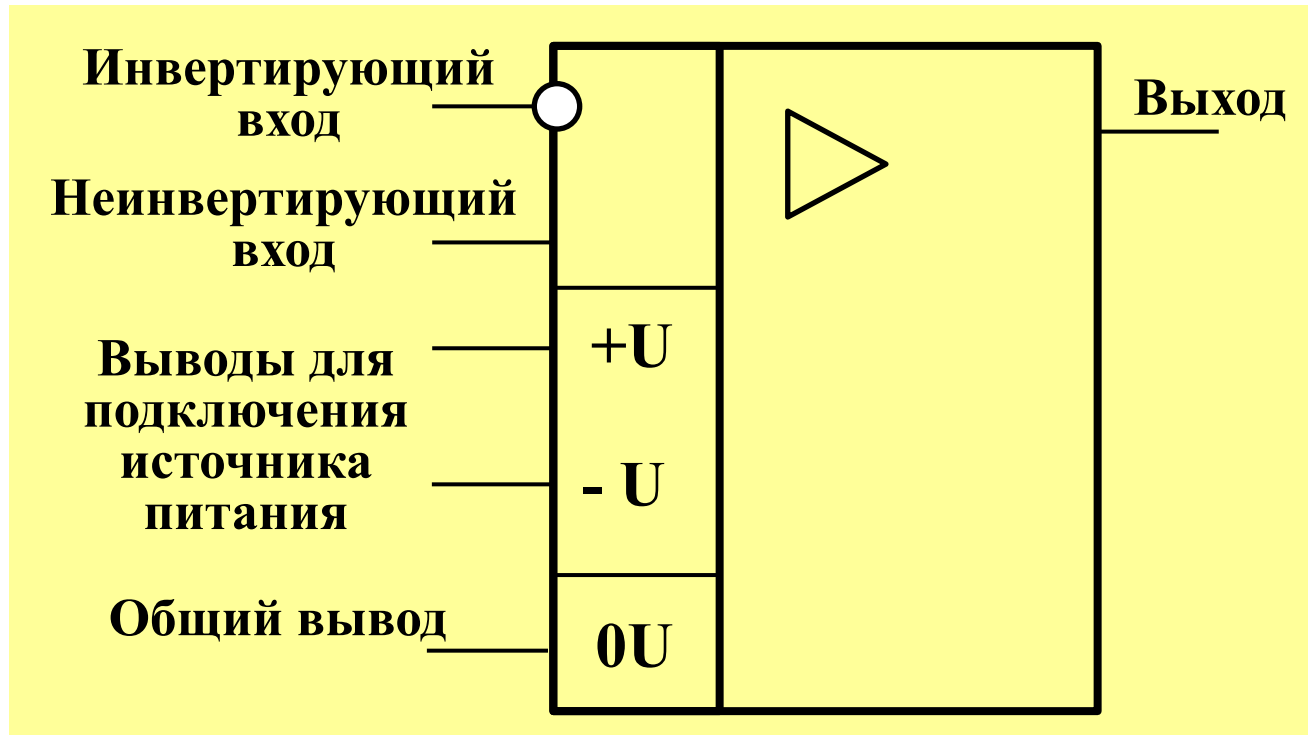
ОУ – это высококачественный усилитель для усиления как постоянных, так и переменных сигналов.

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

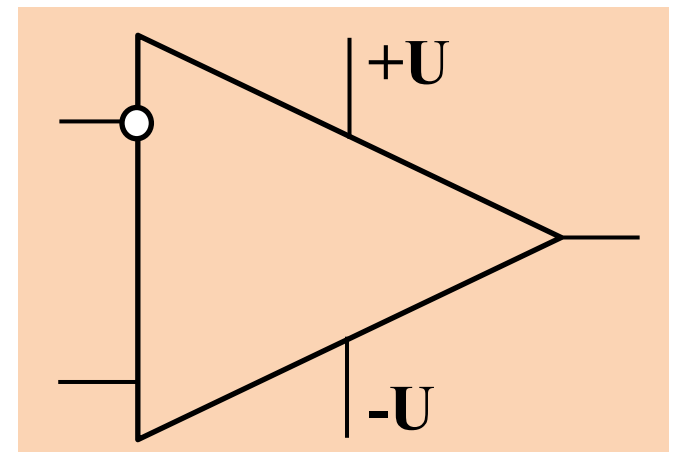
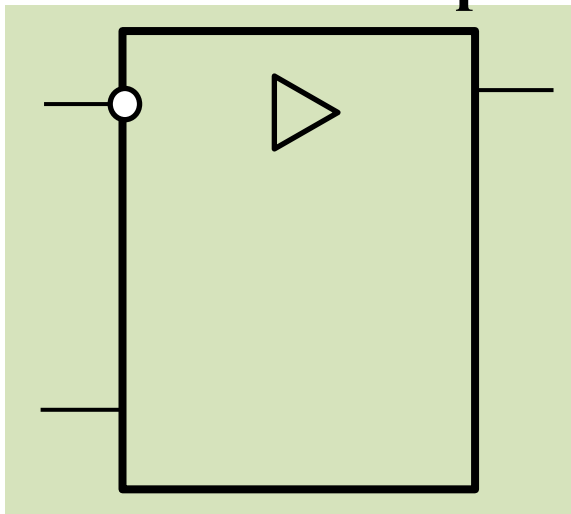
В настоящее время **ОУ** выполняются в виде полупроводниковых интегральных схем, содержат большое число (десятки) элементов (транзисторов, диодов и т.д.), но по размерам и стоимости приближаются к отдельным транзисторам.

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

Условные обозначение операционного усилителя



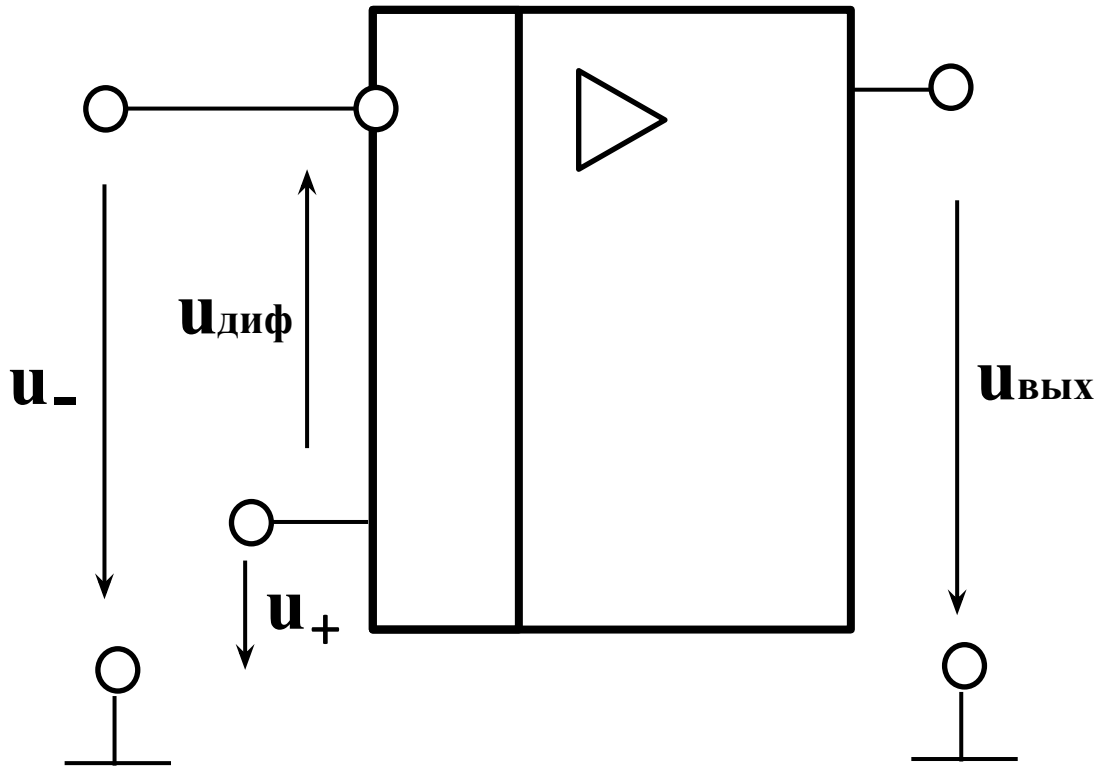
Упрощенные обозначения ОУ



Параметры операционного усилителя

Параметр	Идеальный ОУ	Реальный ОУ
$K_{Uoy} \cdot 10^3$	∞	10 ÷ 1000
R_{BX} кОм	∞	10 ÷ 10² (БПТ) 10³ ÷ 10⁴ (ПТ)
$R_{ВЫХ}$, Ом	0	1 ÷ 1000
f_1 , МГц	∞	0,1 ÷ 100
K_{CF}	0	0,1 ÷ 1

Напряжения на входах и выходе ОУ

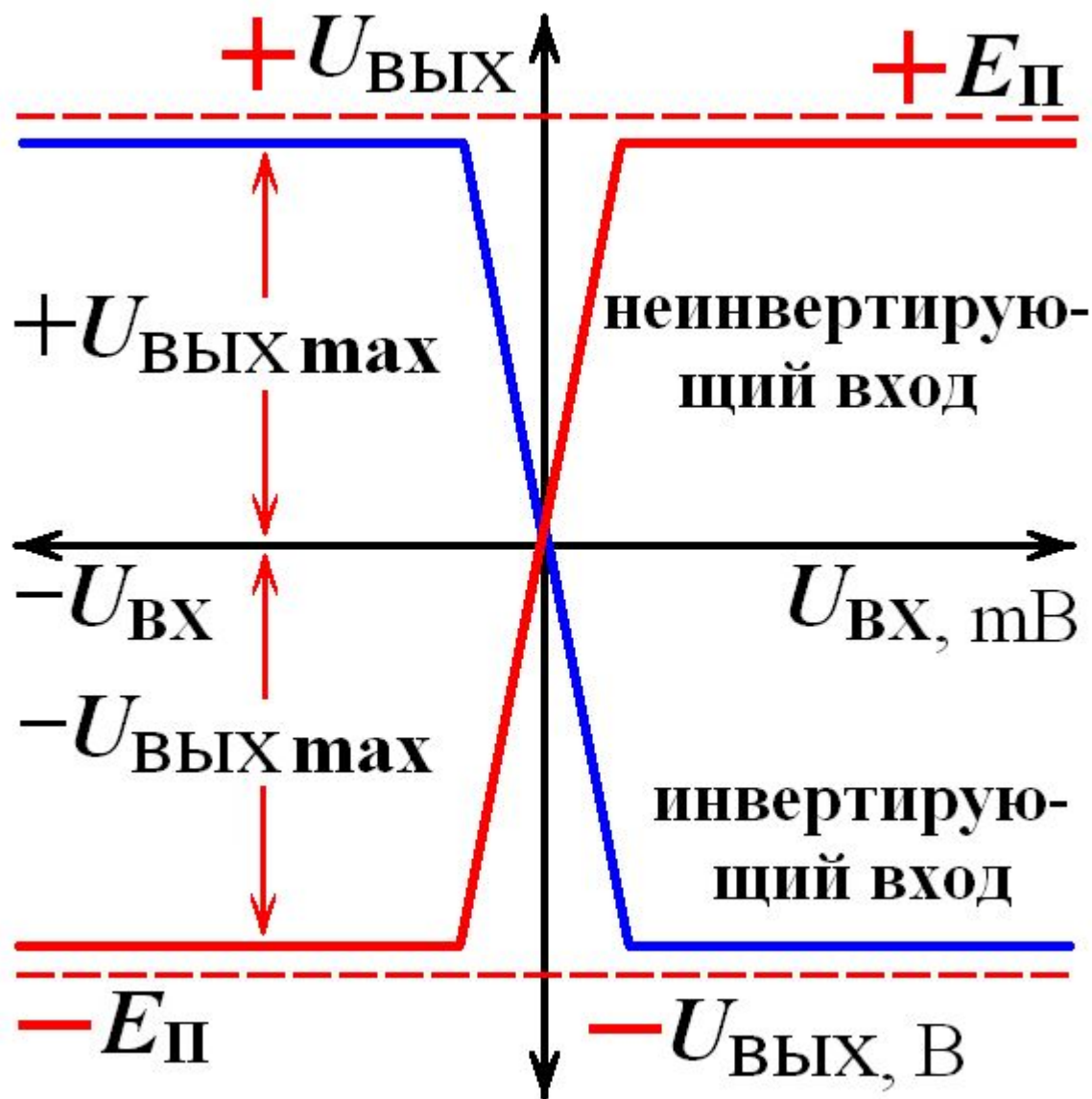


Дифференциальное напряжение

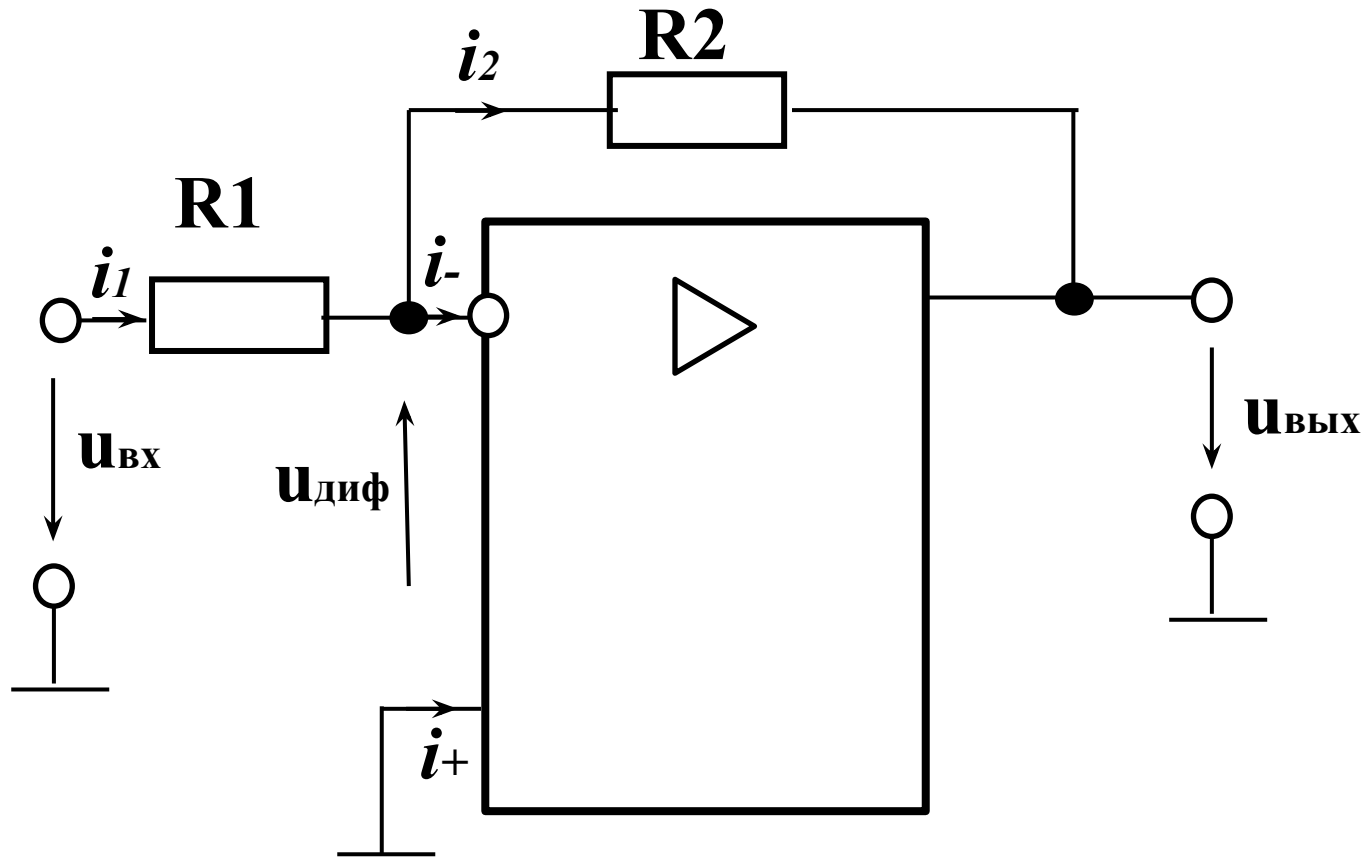
$$u_{\text{диф}} = u_+ - u_-$$

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

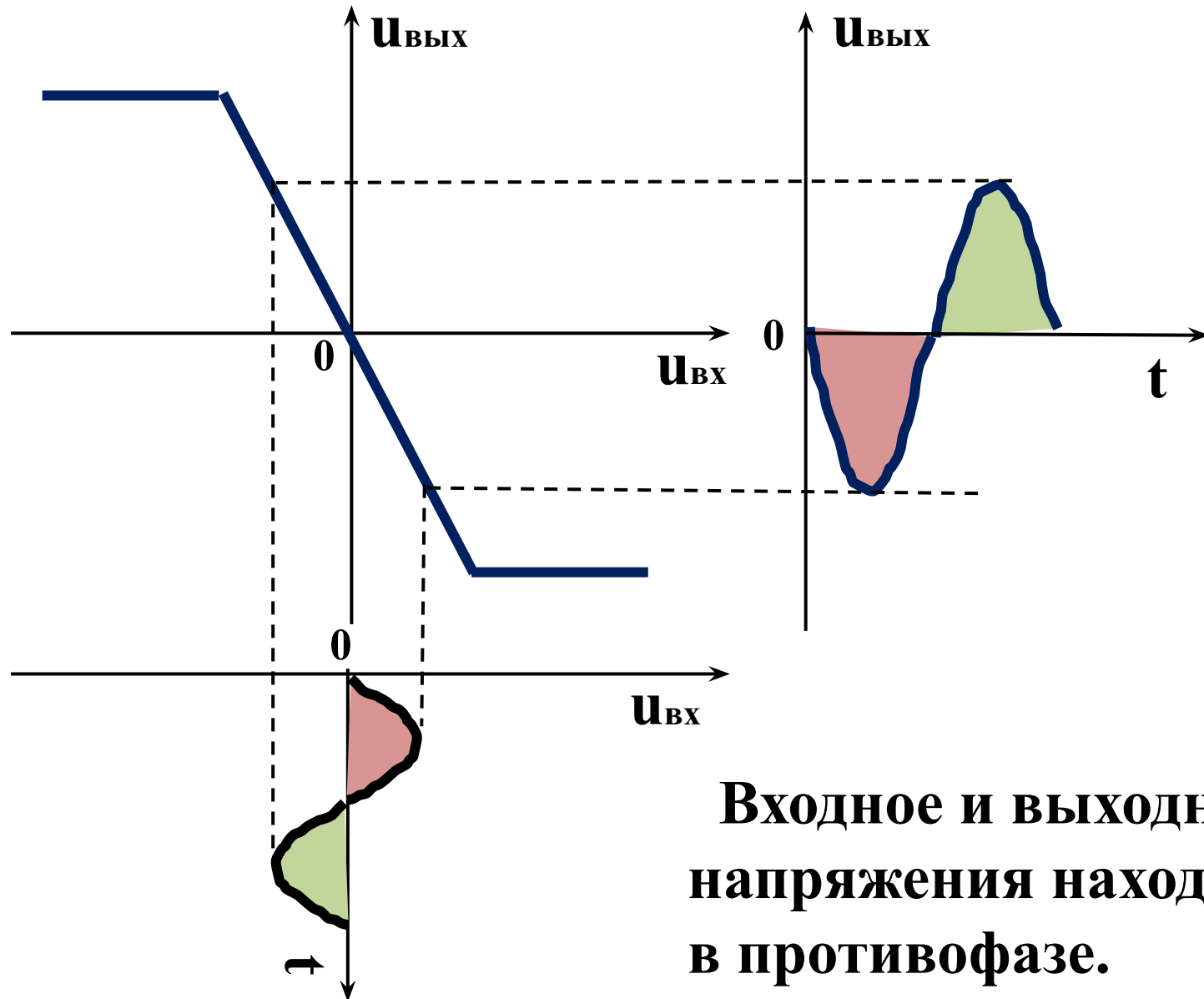


$i_- = 0$ ($R_{вх.оу} = \infty$), по закону Кирхгофа $i_1 = i_2$.

$U_{диф} = 0$ ($K_{U_{оу}} = \infty$), $i_1 = U_{вх} / R1$, $i_2 = - U_{вых} / R2$

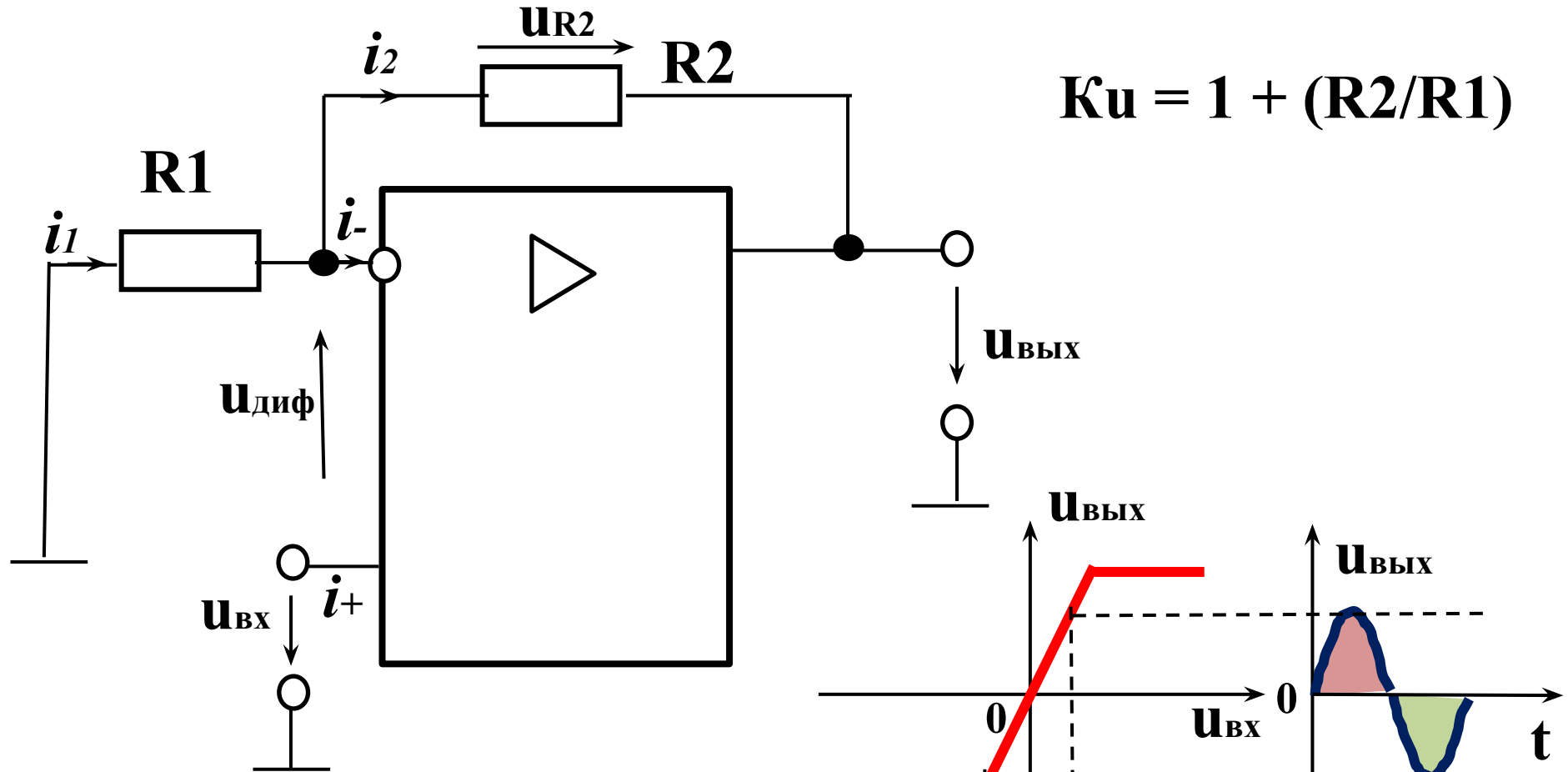
$U_{вых} = - U_{вх} (R2/R1)$, $K_u = - R2/R1$

Инвертирующий усилитель на ОУ

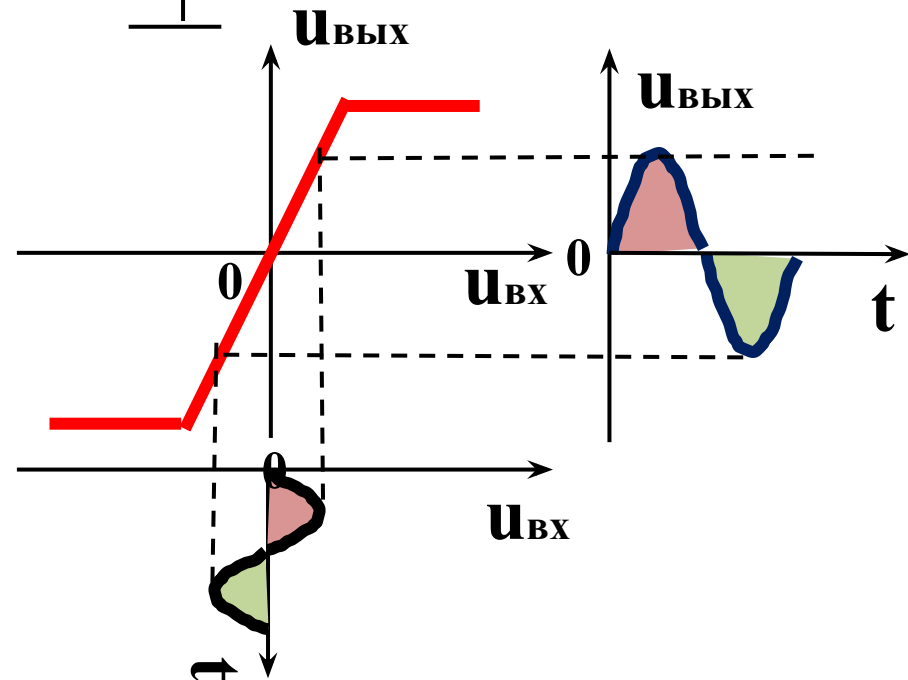


**Входное и выходное
напряжения находятся
в противофазе.**

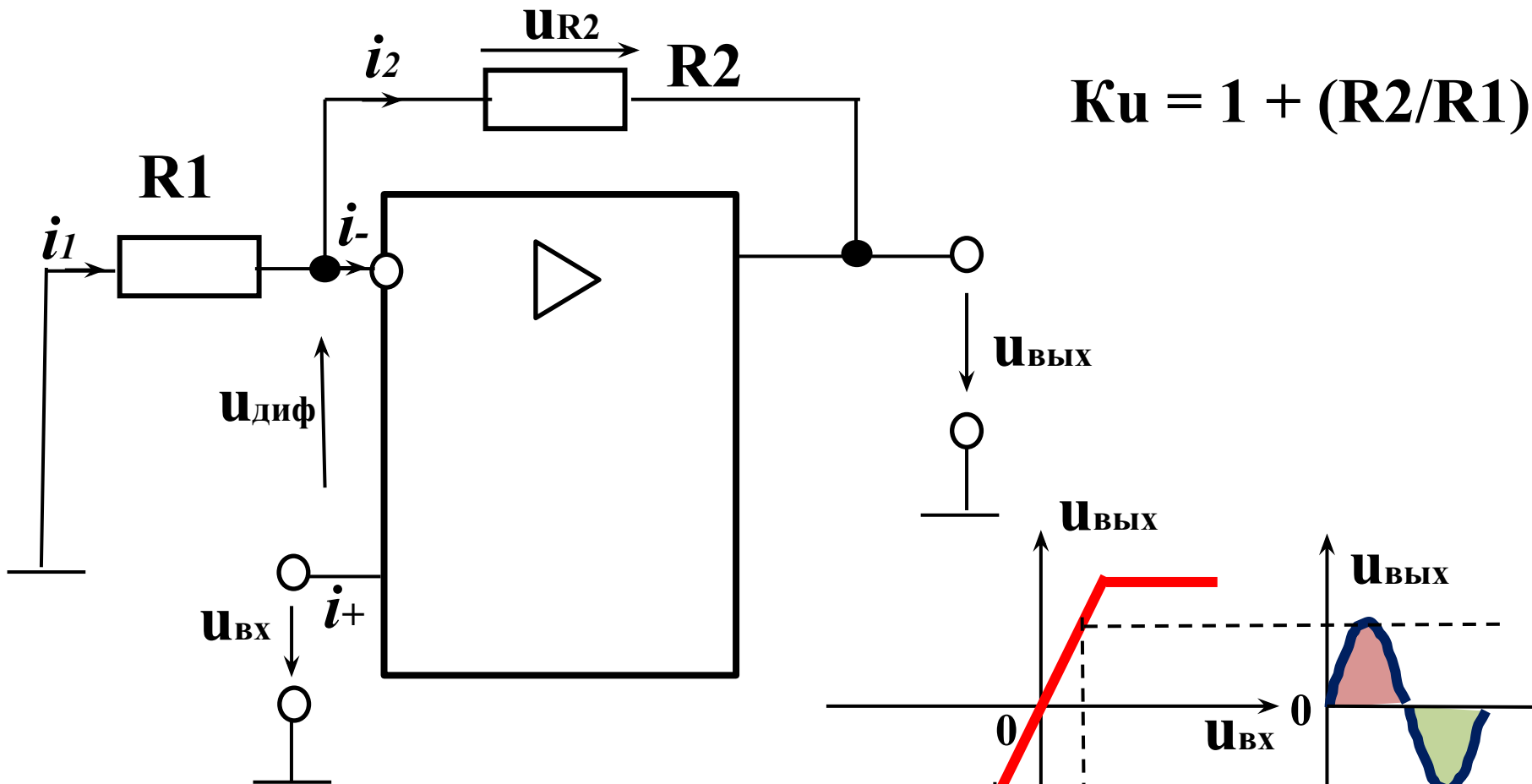
Неинвертирующий усилитель на ОУ



Входное и выходное напряжения находятся в фазе.

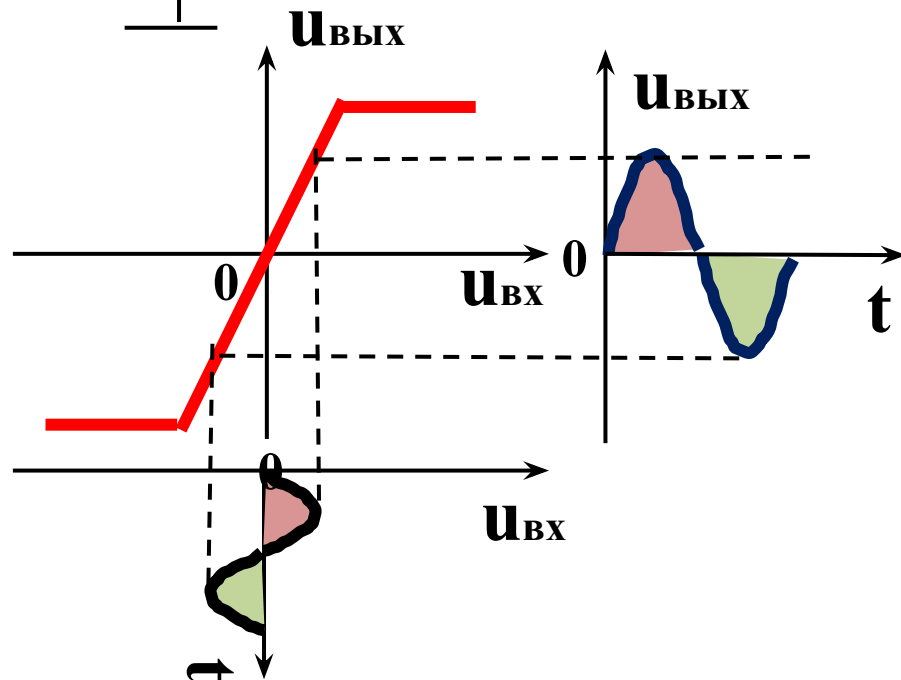


Инвертирующий усилитель на ОУ



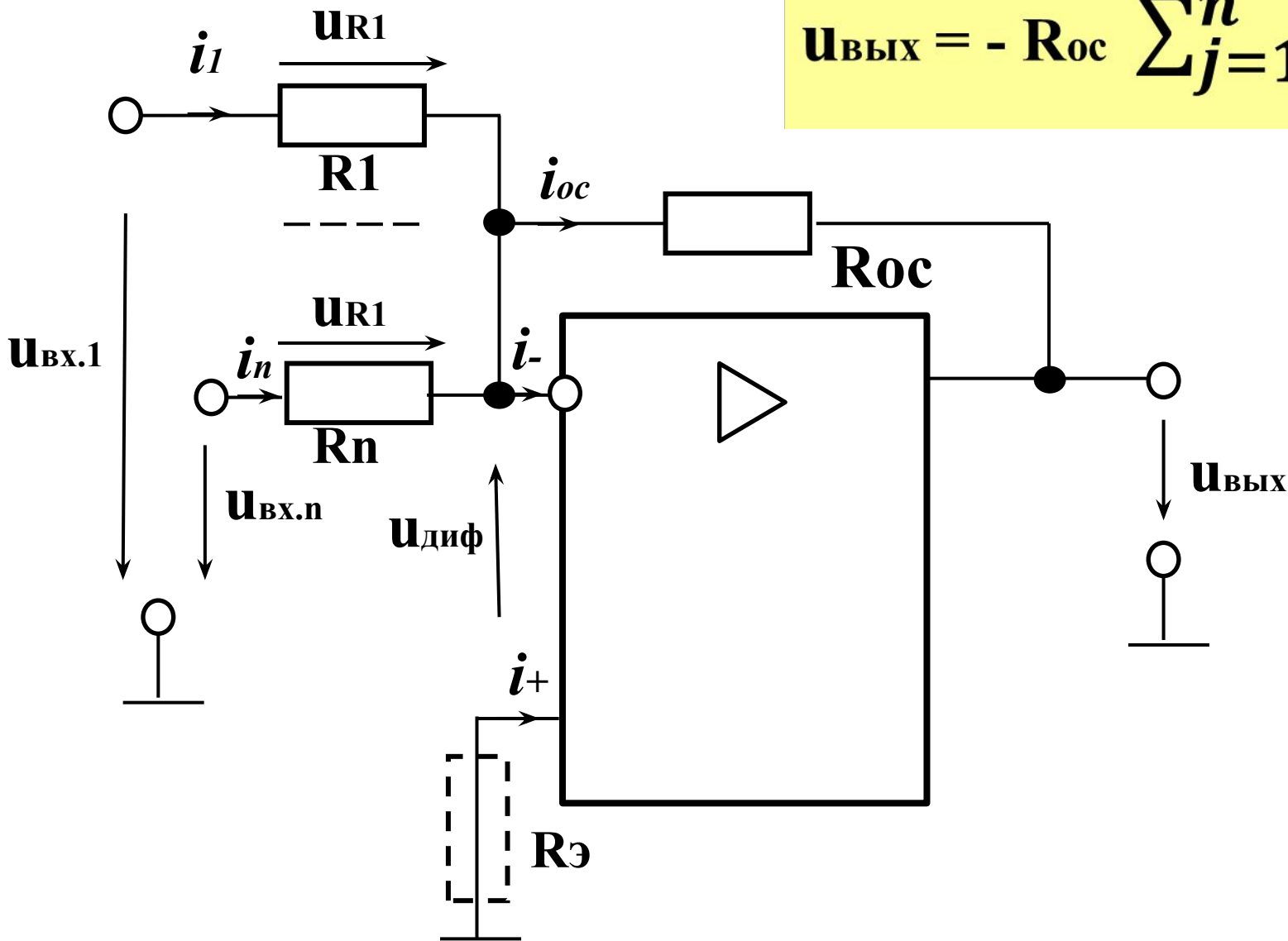
$$K_u = 1 + (R2/R1)$$

Входное и выходное
напряжения находятся в
фазе

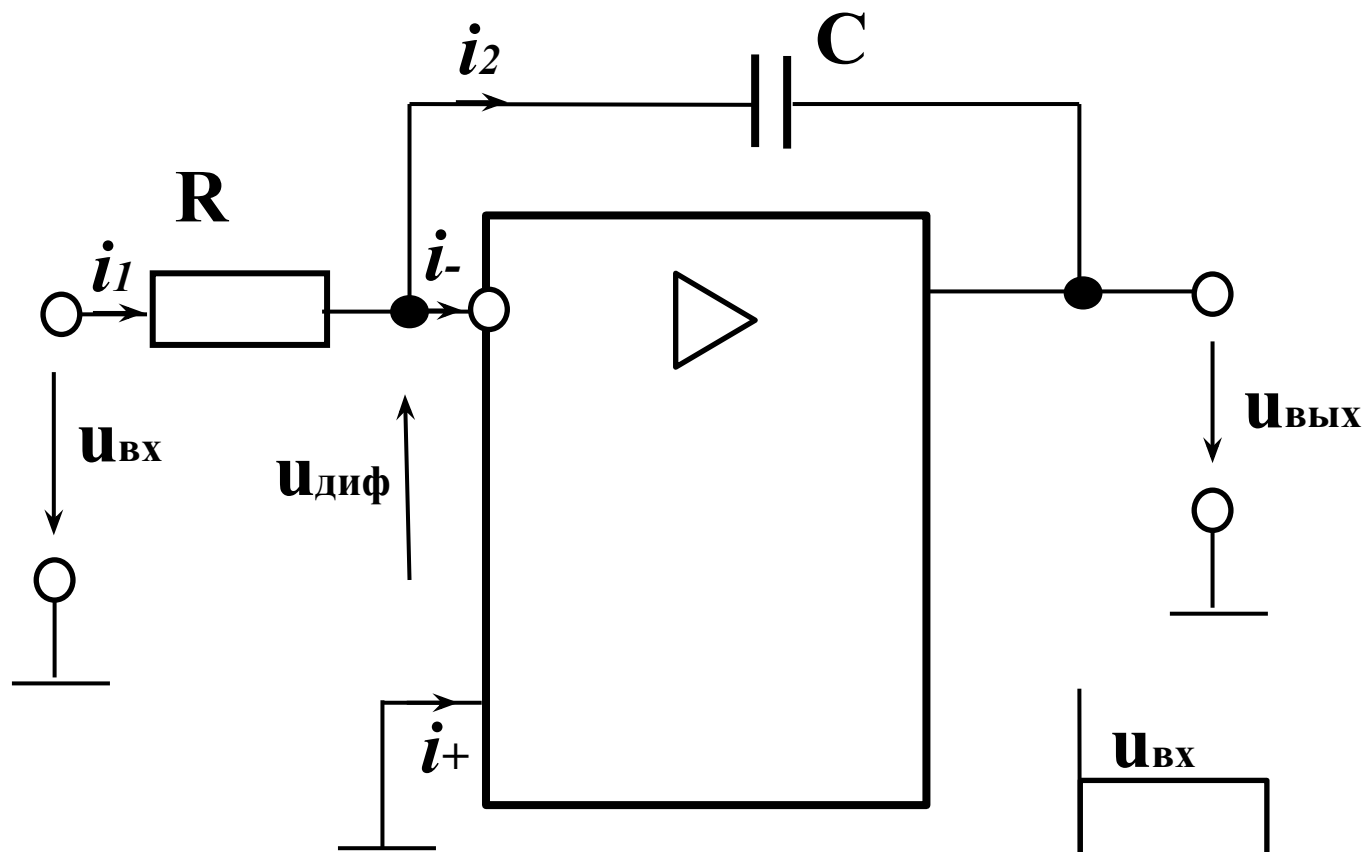


Инвертирующий сумматор напряжений на ОУ

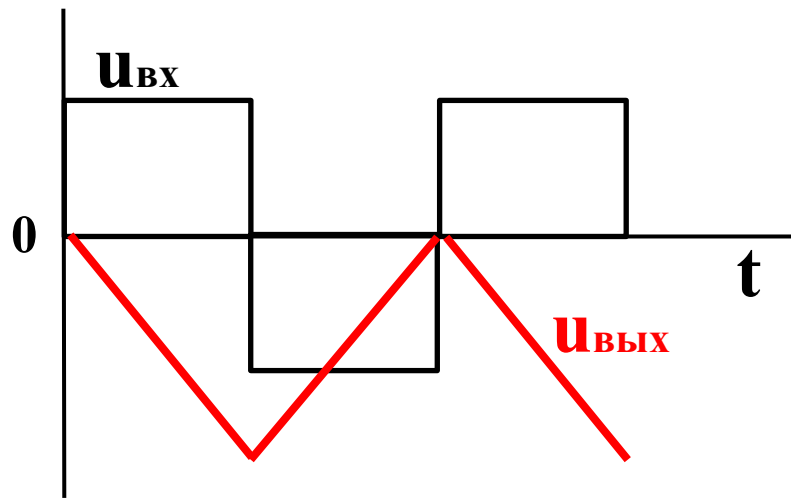
$$U_{\text{ВЫХ}} = - R_{\text{ос}} \sum_{j=1}^n \frac{u_{\text{ВХ}j}}{R_j}$$



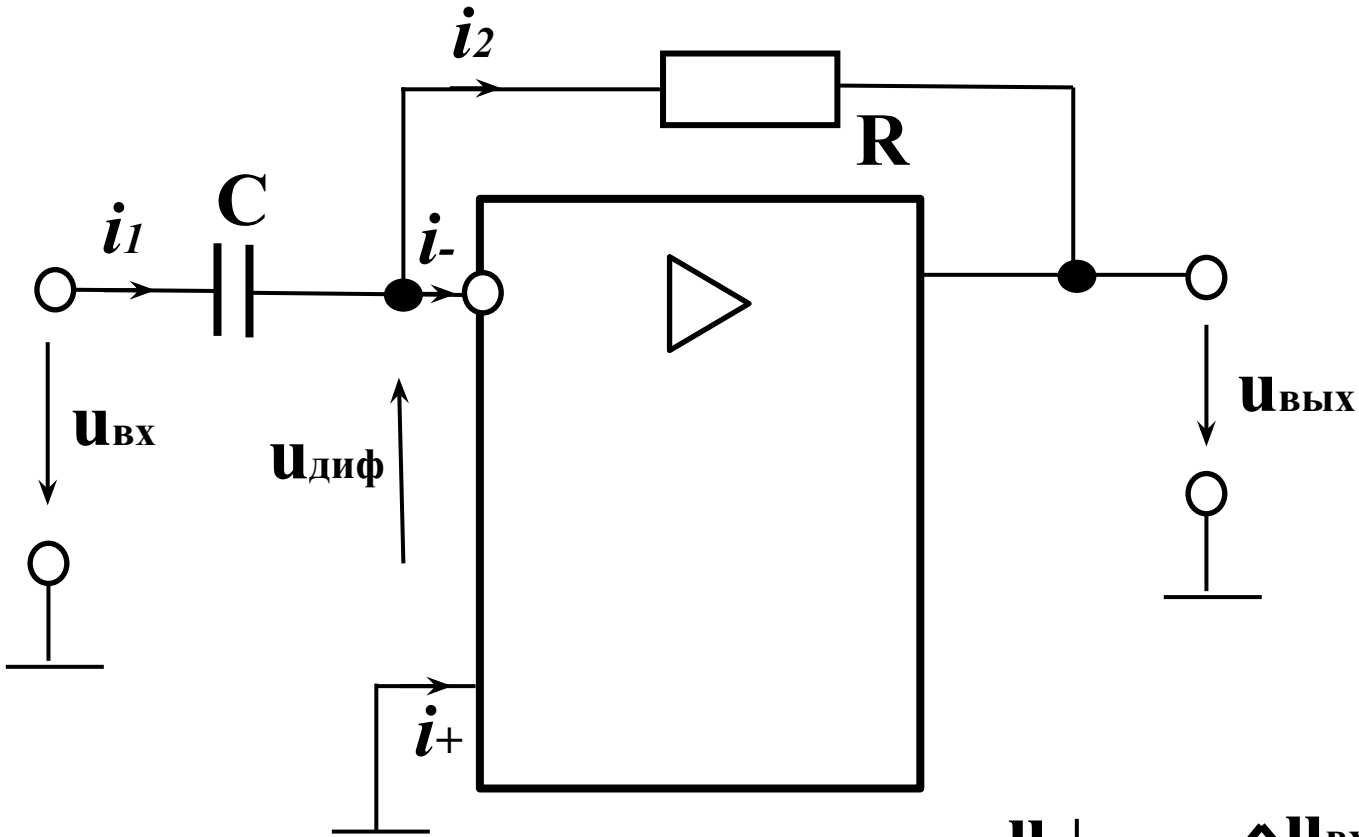
Интегрирующий усилитель на ОУ (интегратор)



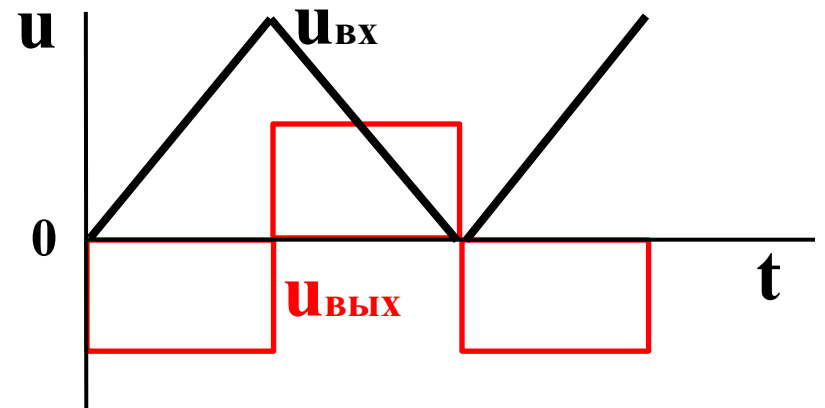
$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{RC} \int_0^t u_{\text{ВХ}} dt$$



Дифференцирующий усилитель на ОУ



$$u_{ВЫХ} = RC \frac{du_{ВХ}}{dt}$$

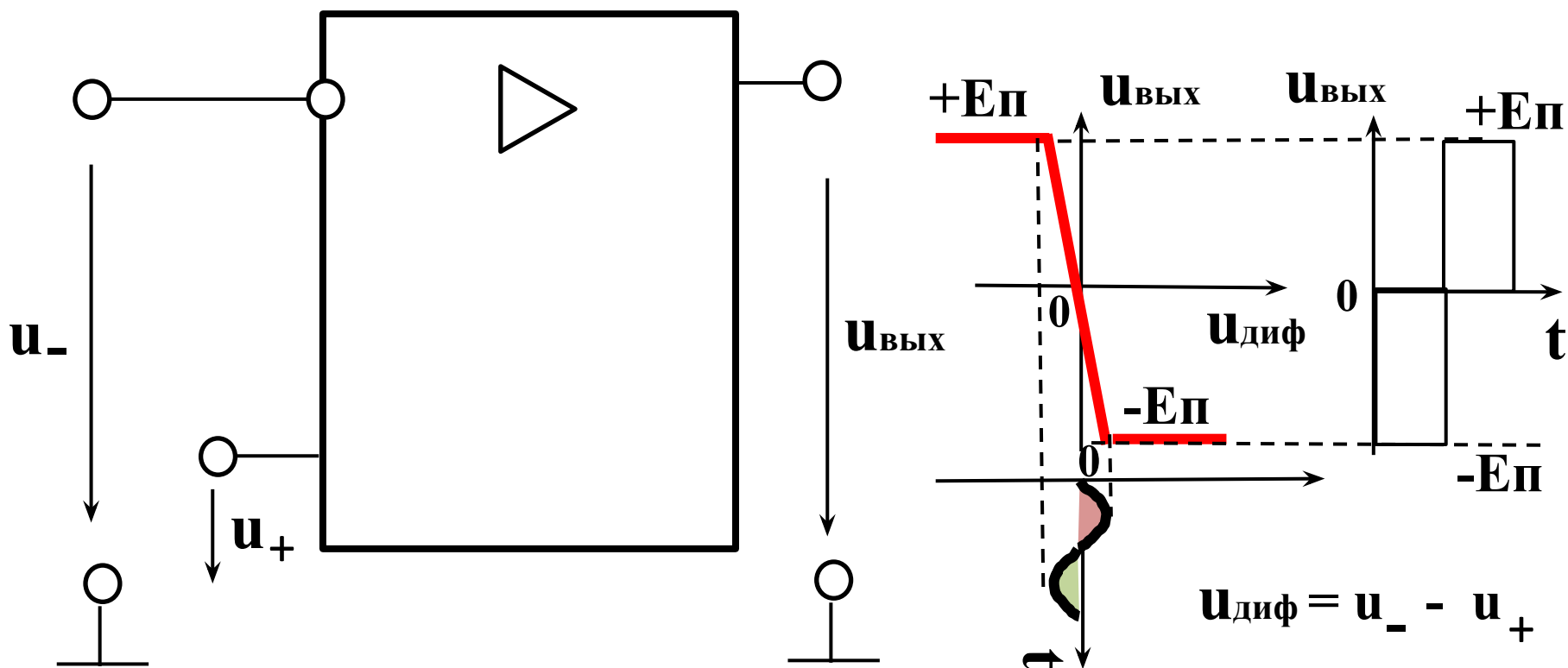


Компаратор на ОУ

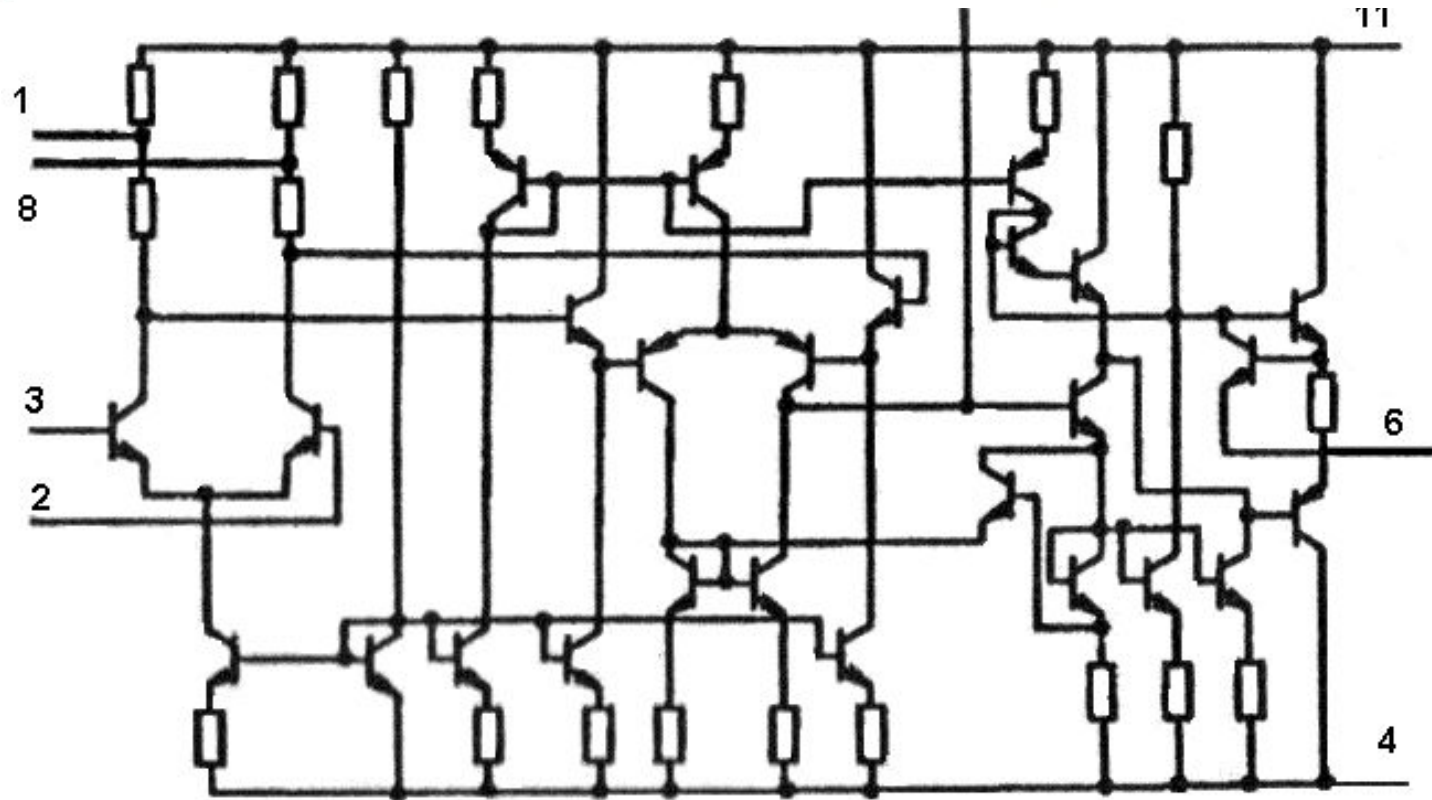
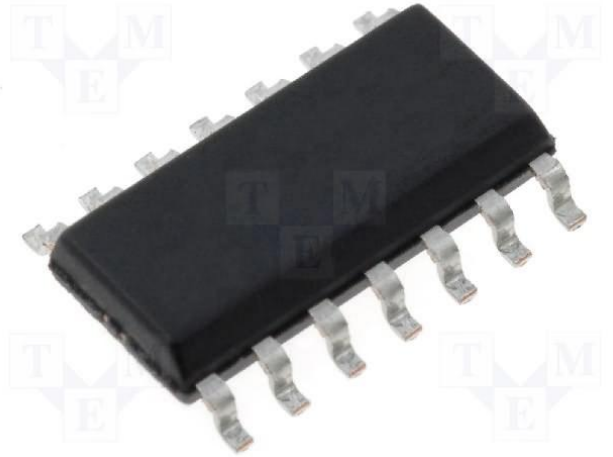
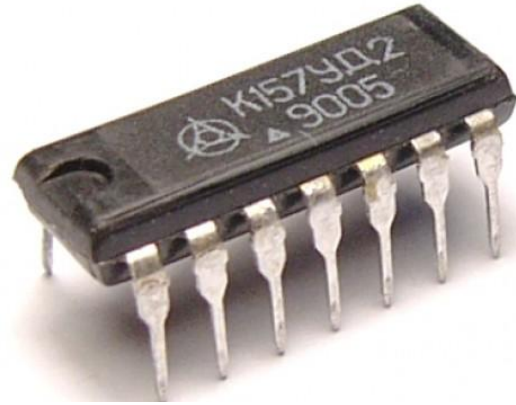
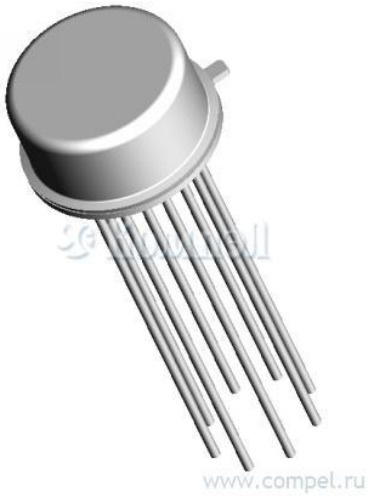
Компаратор (от английского слова **compare** – сравнить) – это устройство сравнения двух напряжений и в зависимости от того на каком из входов оно выше, устанавливает на выходе плюс или минус напряжения питания.

при $u_- > u_+$ $u_{\text{вых}} < 0$;

при $u_- < u_+$ $u_{\text{вых}} > 0$



Внешний вид ОУ



Вариант
схемы ОУ