Операционные усилители

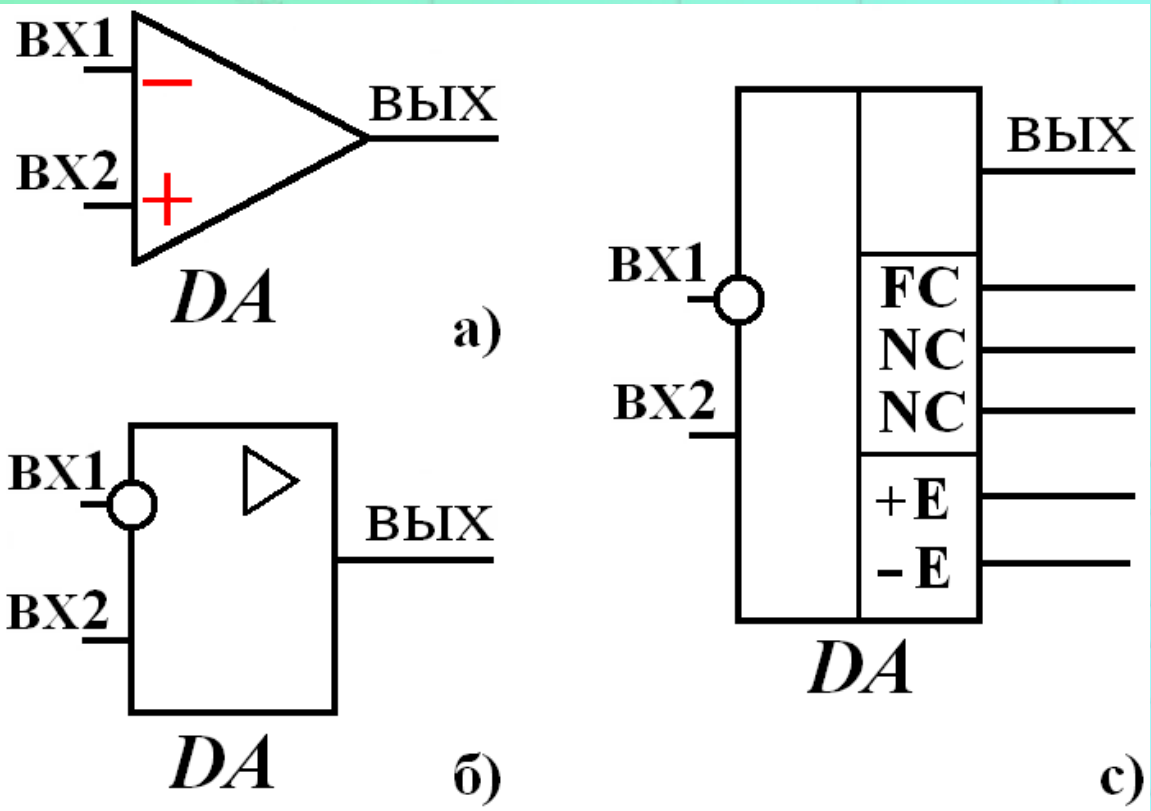
Oleg Stukach

TPU, 30 Lenin Avenue, Tomsk, 634050, Russia

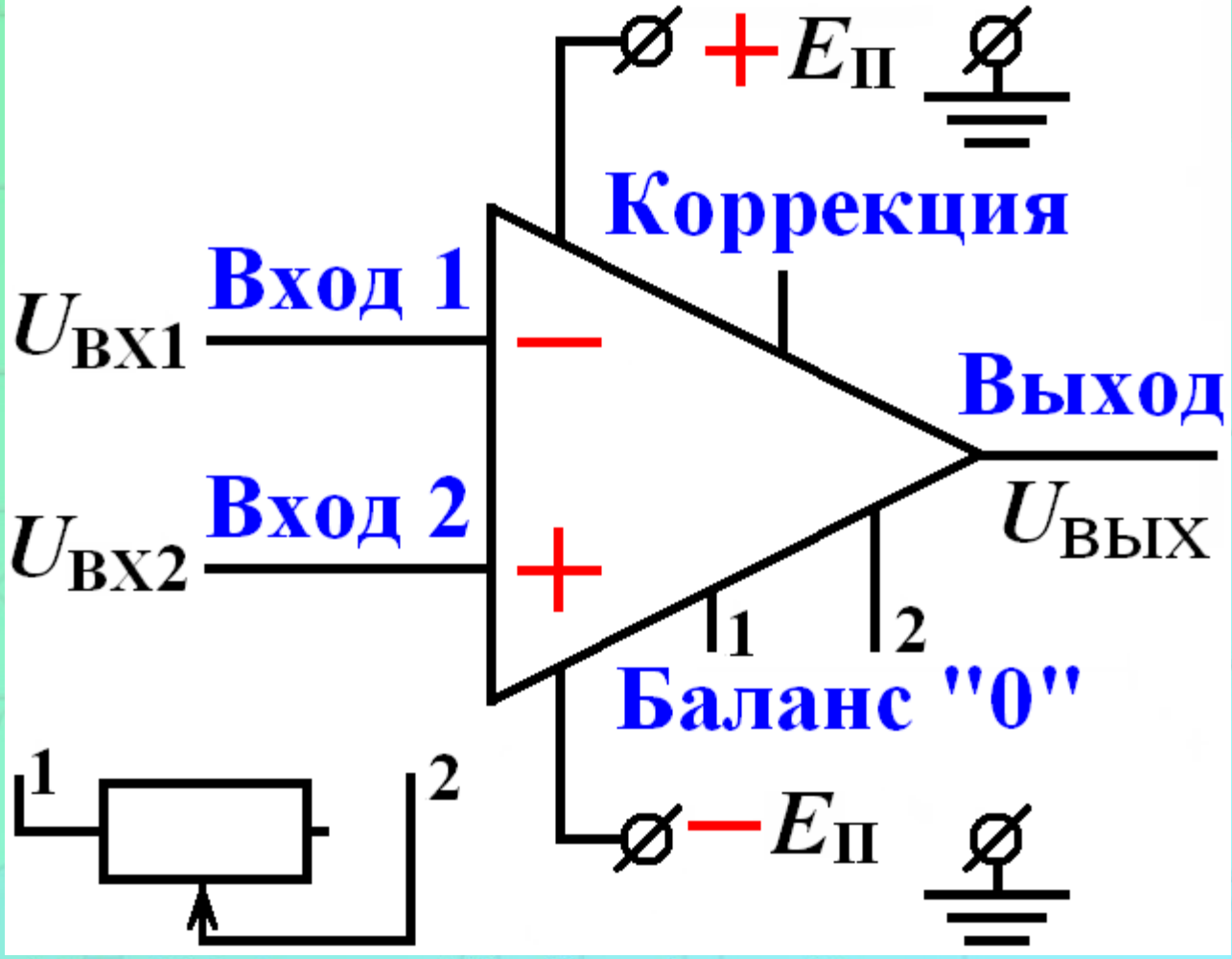
E-mail: tomsk@ieee.org

Операционные усилители (ОУ)

Такое название получили широкополосные усилители постоянного тока с большим (десятки - сотни тысяч) усилением в микросхемном исполнении

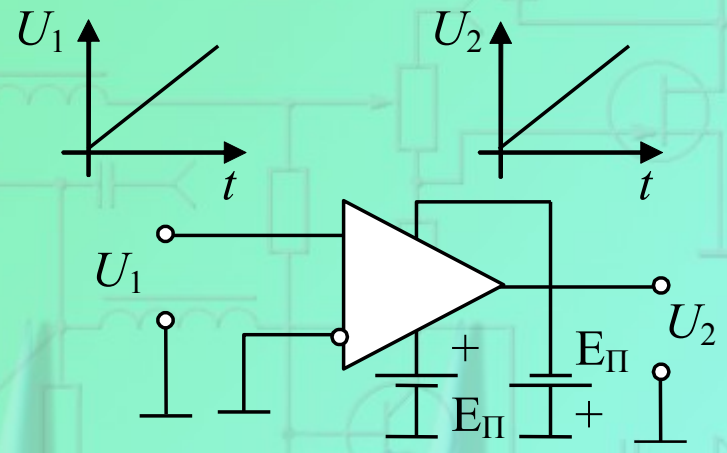


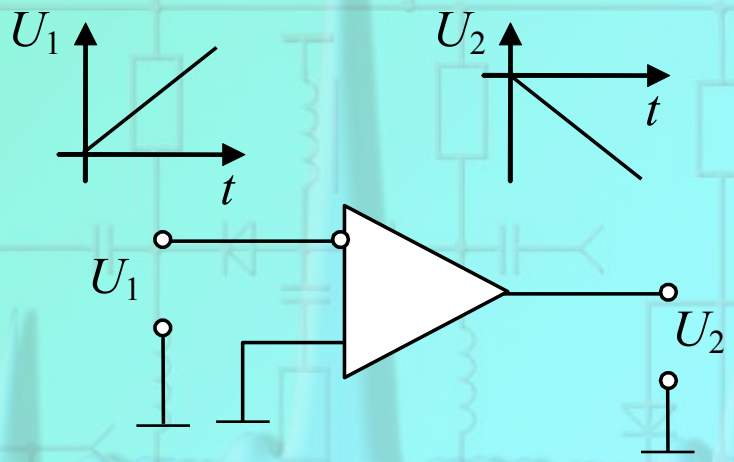
Операционный усилитель – с дифференциальным входом, его характеристики близки к идеальным



Структура ОУ

Входные сигналы ОУ могут подаваться на один из входов (относительно общего провода источника питания), на оба входа или между входами





Параметр	Идеальный ОУ	Реальный ОУ
$K_U \cdot 10^3$	∞	$10 \div 1000$
$R_{вх}$, кОм	∞	$10 \div 10^2$ (БТ) $10^3 \div 10^4$ (ПТ)
$R_{вых}$, Ом	0	$1 \div 1000$
f_1, МГц	∞	$0{,}1 \div 100$
$K_{СФ}$	0	$0{,}1 \div 1$

1-й вход	инвертирующий
2-й вход	не инвертирующий

Операционные усилители (ОУ)

K_U - коэффициент усиления ОУ:

$$K_U = U_{вых} / (U_{вх2} - U_{вх1}),$$

$R_{вх}$ - входное сопротивление,

$R_{вых}$ - выходное сопротивление,

f_1 - частота единичного усиления (усиление снижается до единицы),

$K_{ос\ сф}$ - коэффициент ослабления синфазного сигнала:

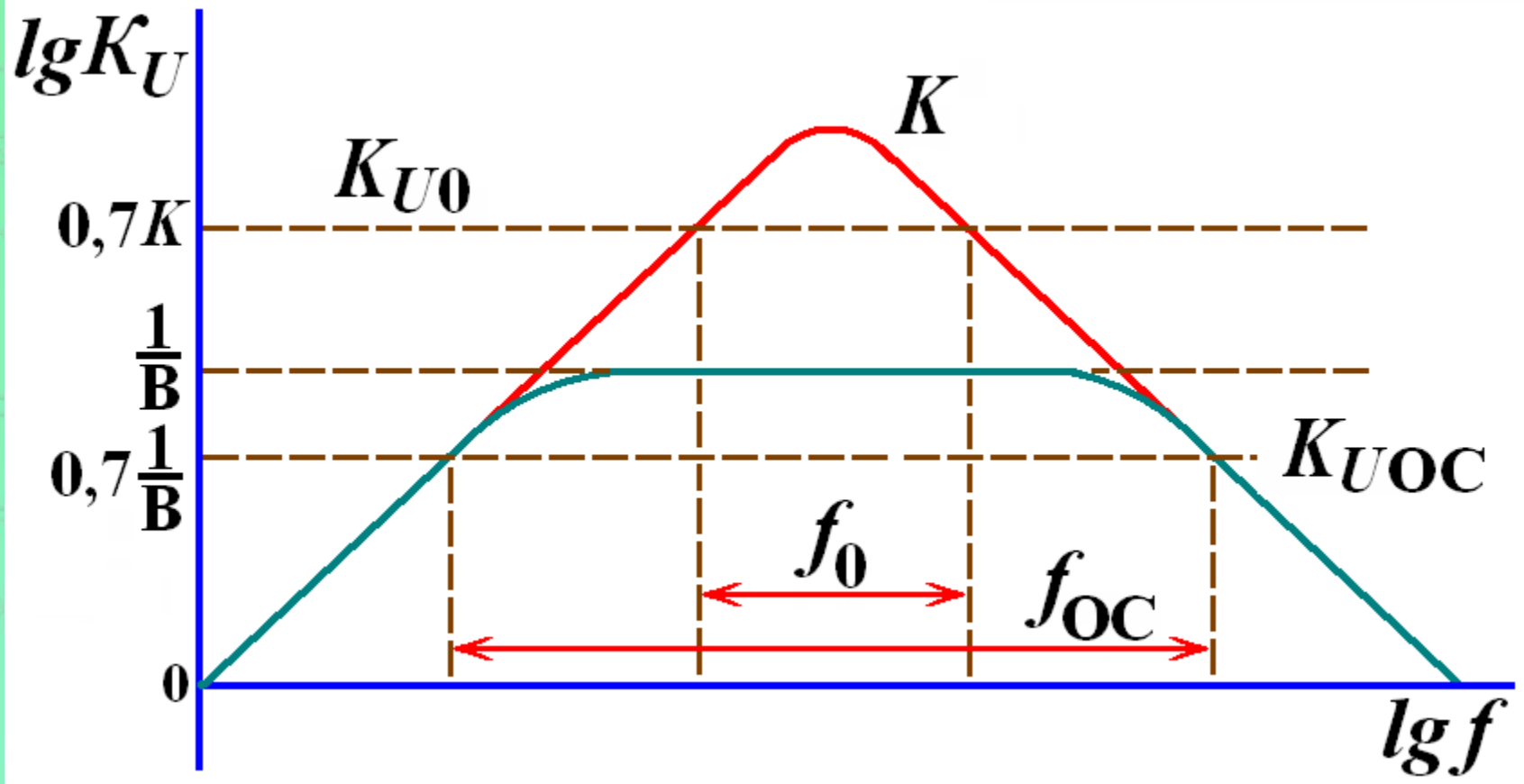
$$K_{ос\ сф} = K_U / K_{сф}.$$

На основе ОУ создаются:

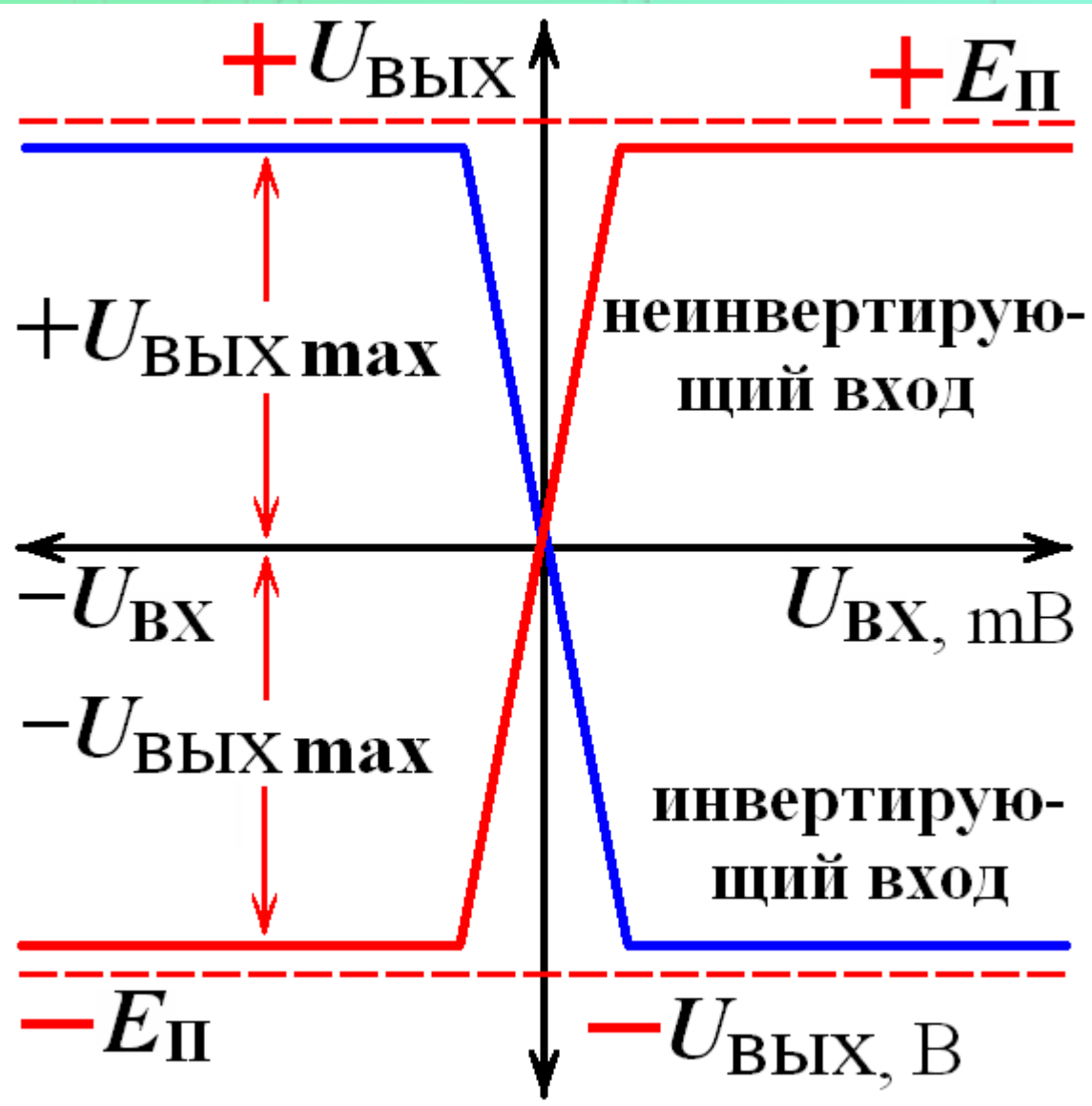
интеграторы, дифференциаторы, сумматоры, схемы умножения, деления, логарифмирования, функциональные преобразователи, источники постоянного тока и стабильного напряжения, компараторы, генераторы, активные фильтры и др.

Устройства на основе интегральных ОУ имеют малые габариты, массу и стоимость

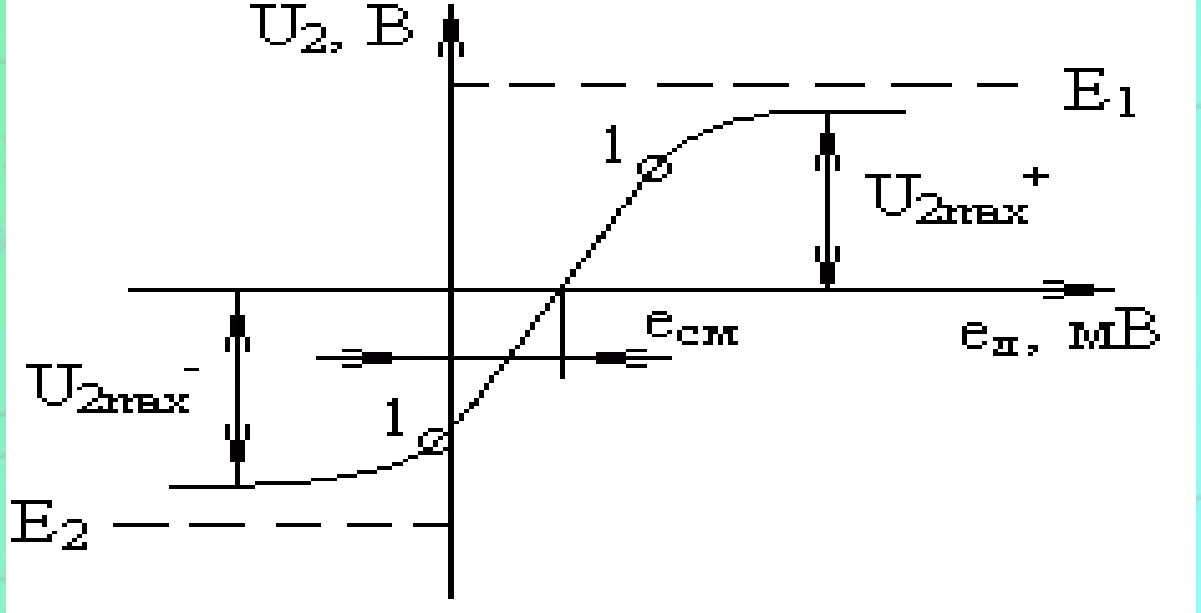
Амплитудно-частотная характеристика усилителя



Передаточная характеристика



Нелинейные свойства

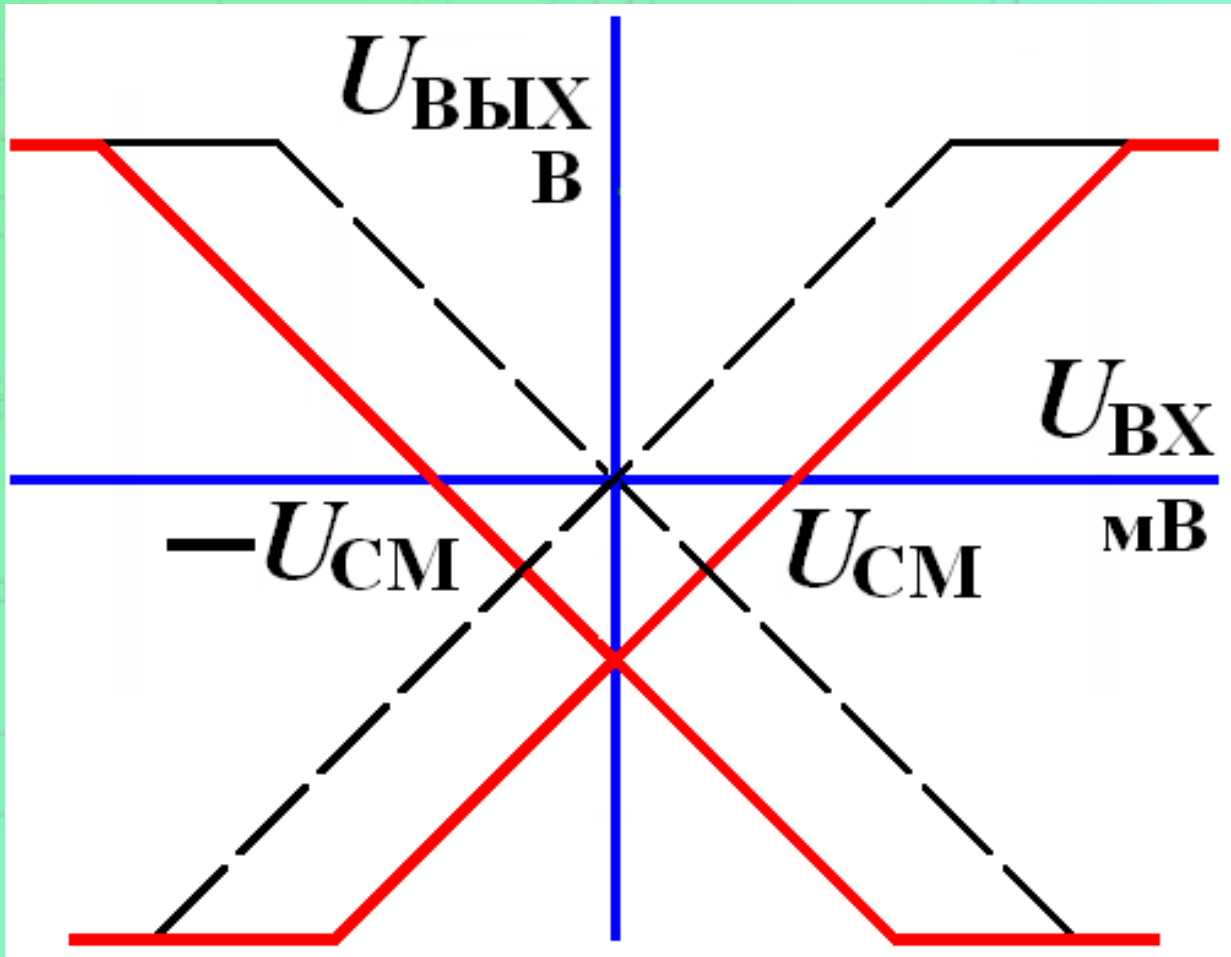


Статическая характеристика ОУ

Особенности ОУ

- смещение нулевого уровня выходного напряжения
- температурный и временной дрейф

Дрейфовые характеристики

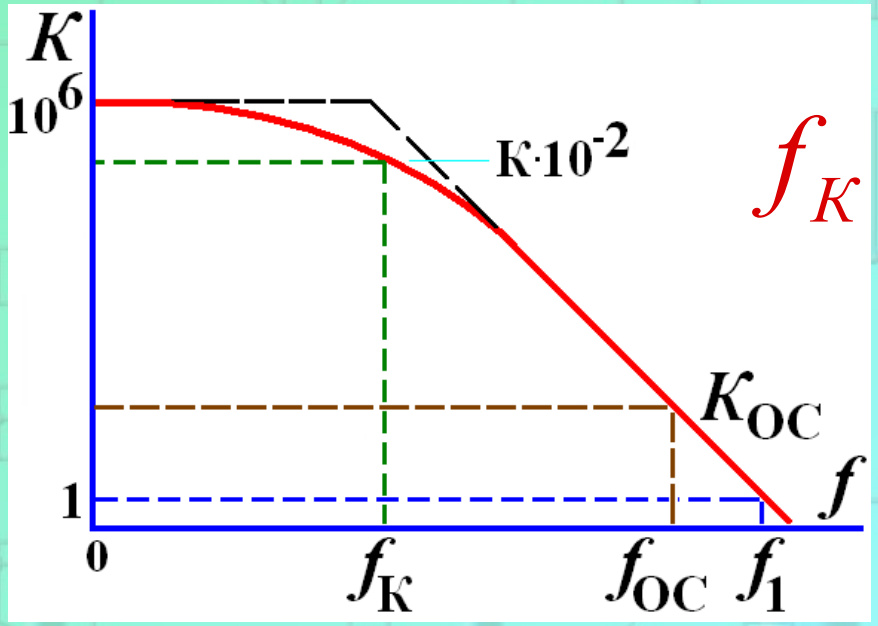


$U_{СМ} = U_{ВЫХ} / K_U$

$U_{СМ}$ – необходимо приложить на вход, чтобы на выходе получить ноль

Частотные характеристики

Инерционность линеаризованного ОУ, как и обычного усилителя, описывается с помощью АЧХ, ФЧХ при гармоническом анализе и переходной характеристики - при временном



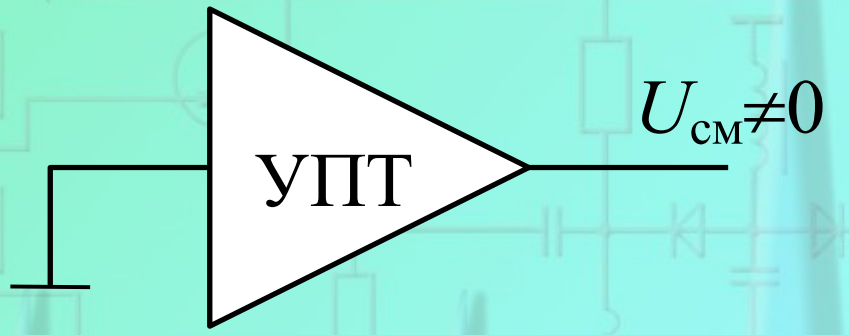
$$f_K = f_1 / K_{OC}$$

Частота единичного усиления fT является справочным параметром ОУ

K_{OC} – коэффициент усиления ОУ с отрицательной обратной связью

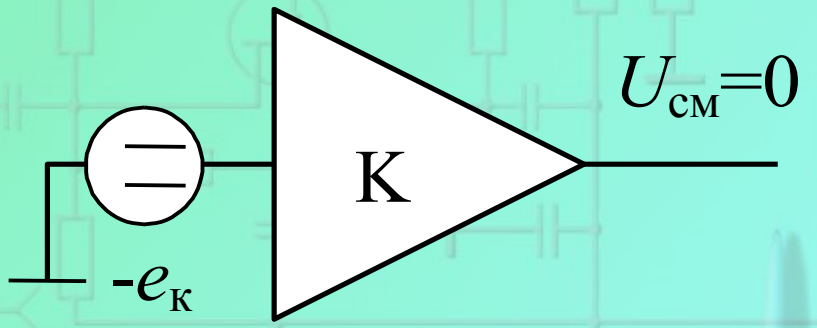
Режим покоя ОУ

При коротком замыкании входных зажимов выходное напряжение ОУ должно быть равно нулю. В реальном же случае на его выходе может остаться напряжение *U*см, не равное нулю, которое называется *смещением нуля*



Компенсация смещения

$$e_K = \frac{U_{см}}{K}$$



Однако реально смещение нуля медленно меняется (дрейфует) с изменением температуры, поэтому компенсация смещения внешним постоянным источником с изменением температуры нарушается

Идеальный (в смысле дрейфа) многокаскадный УПТ

- $e1 \to 0$, $K1 \to \infty$ $e\Sigma \to 0$
- Поскольку дрейф напряжения смещения вызывается температурной нестабильностью первого каскада, последовательно усиливаемой всеми последующими, то его уменьшают введением обратной связи

$$K_B^{\text{ос}} = \frac{K_B}{F} \qquad U_{\text{см}}^{\text{ос}} = \frac{U_{\text{см}}}{F} \qquad e_B^{\text{ос}} = \frac{U_{\text{см}}^{\text{ос}}}{K_B^{\text{ос}}} = e_B$$

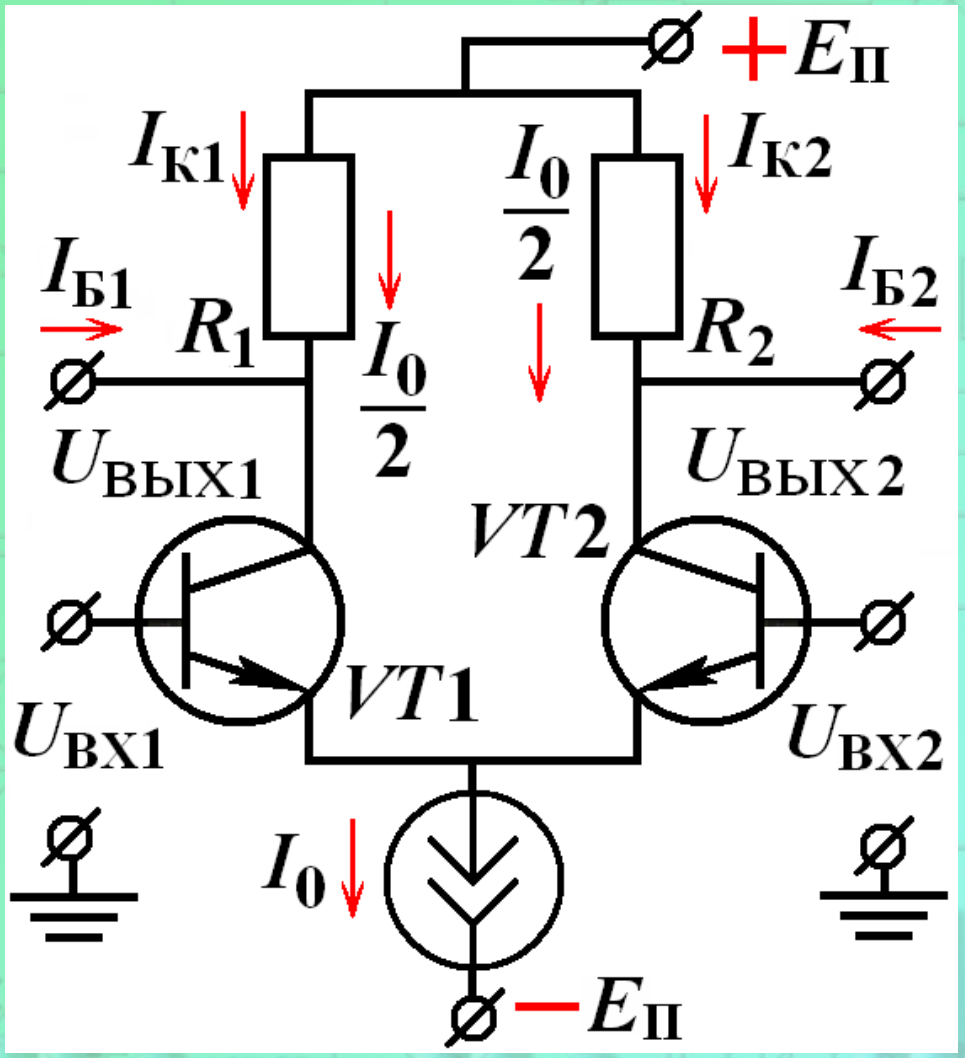
Устройство операционного усилителя

Характеристики ОУ:

- низкий коэффициент усиления одинаковых сигналов, поданных на входы одновременно (синфазные сигналы);
- высокое полное сопротивление к входным сигналам.

Входной каскад ОУ определяет величину полного входного сопротивления, минимизирует чувствительность к синфазным сигналам и напряжение сдвига

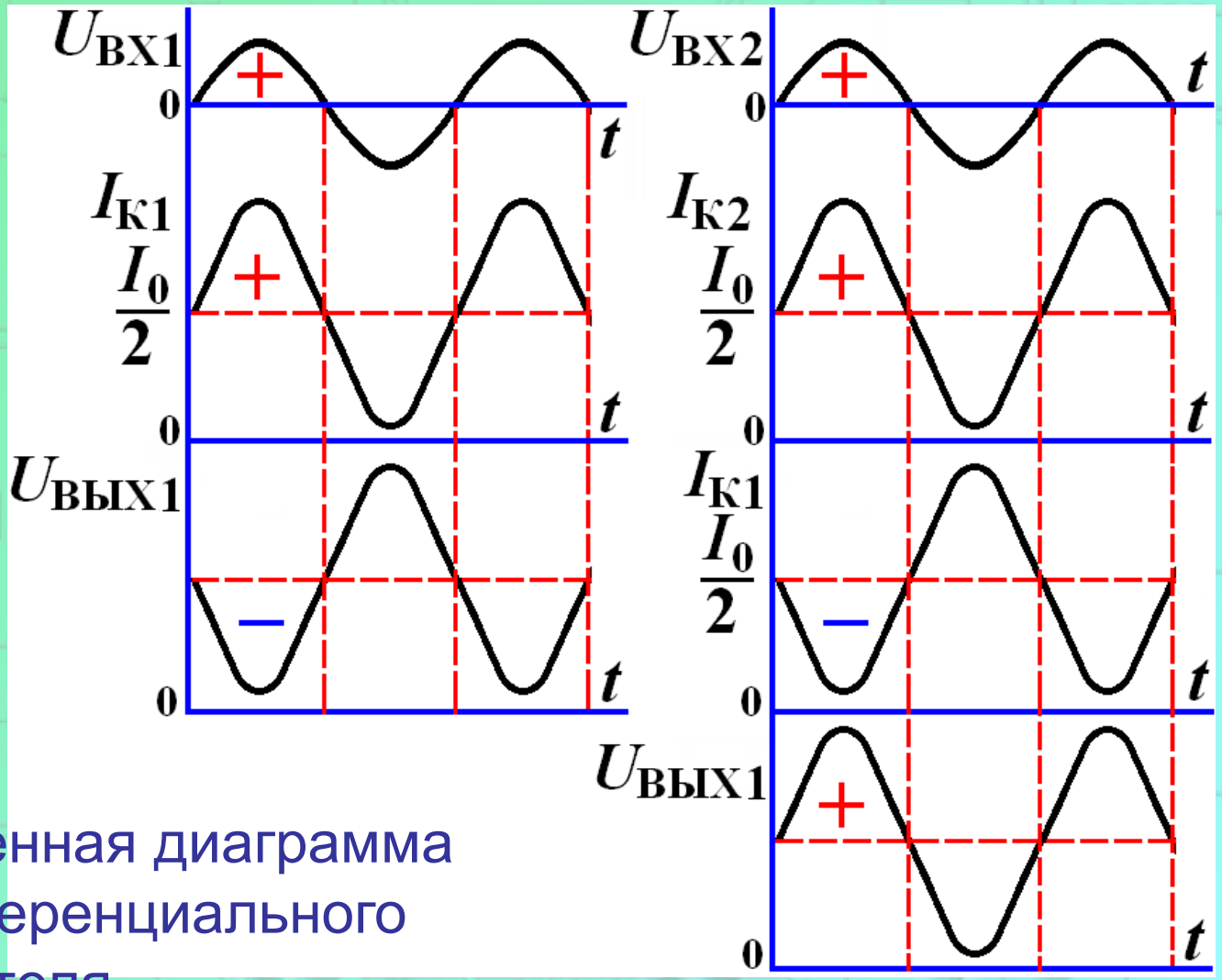
Дифференциальный усилитель



$$I_{к1} + I_{к2} = I_0;$$

$$I_0 = const$$

Дифференциальный усилитель



Временная диаграмма дифференциального усилителя

Дифференциальный усилитель

Если на вход 1 подать гармонический сигнал, а вход 2 соединить с общим проводом, то:

$$K_{U\,ДУ} = U_{ВЫХ\,1} / U_{ВХ\,1} \quad (1)$$

$$U_{ВЫХ\,1} = I_{К1} \cdot R_1 \quad (2)$$

$$I_{К1} = h_{21Э} \cdot I_{Б1} \quad (3)$$

Входное напряжение распределяется на двух эмиттерных *p-n* - переходах (VT1, VT2):

$$U_{ВХ\,1} = (I_{Б1} \cdot h_{11Э} + I_{Э2} \cdot h_{11Б}) \quad (4)$$

$$I_{Э2} = (h_{21Э} + 1) \cdot I_{Б1} \quad (5)$$

$$h_{11Б} = h_{11Э} / (h_{21Э} + 1) \quad (6)$$

Дифференциальный усилитель

Подставляя (2, 3, 4, 5, 6) в (1) получим:

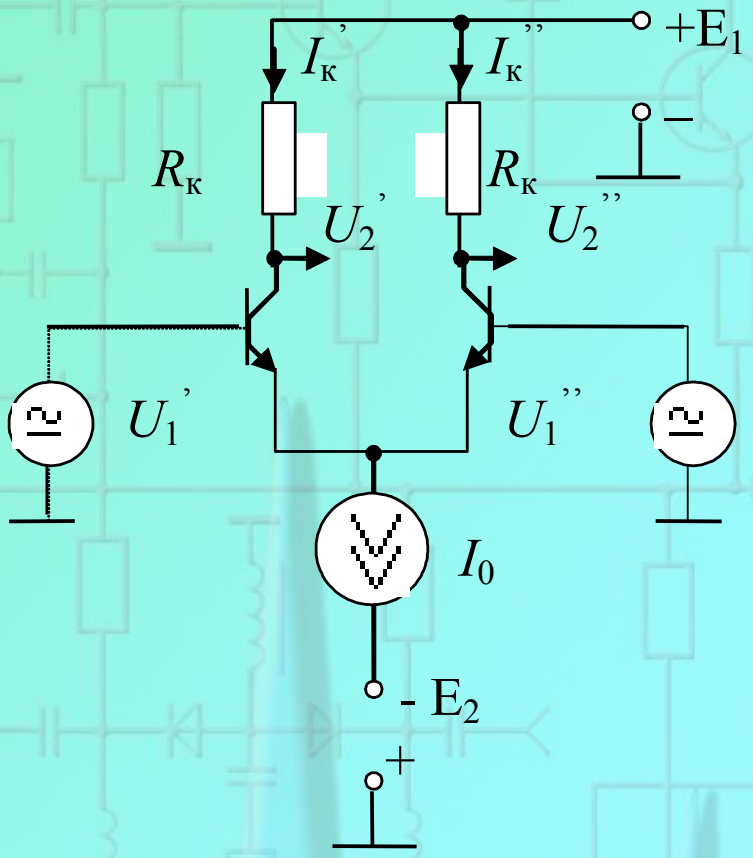
$$K_{U\,ДУ} = h_{21Э} \cdot R_1 / 2 \cdot h_{11Э}.$$

Входное сопротивление:

$$R_{ВХ} = U_{ВХ\,1} / I_{Б1} = 2 \cdot h_{11Э}$$

Дифференциальный усилитель

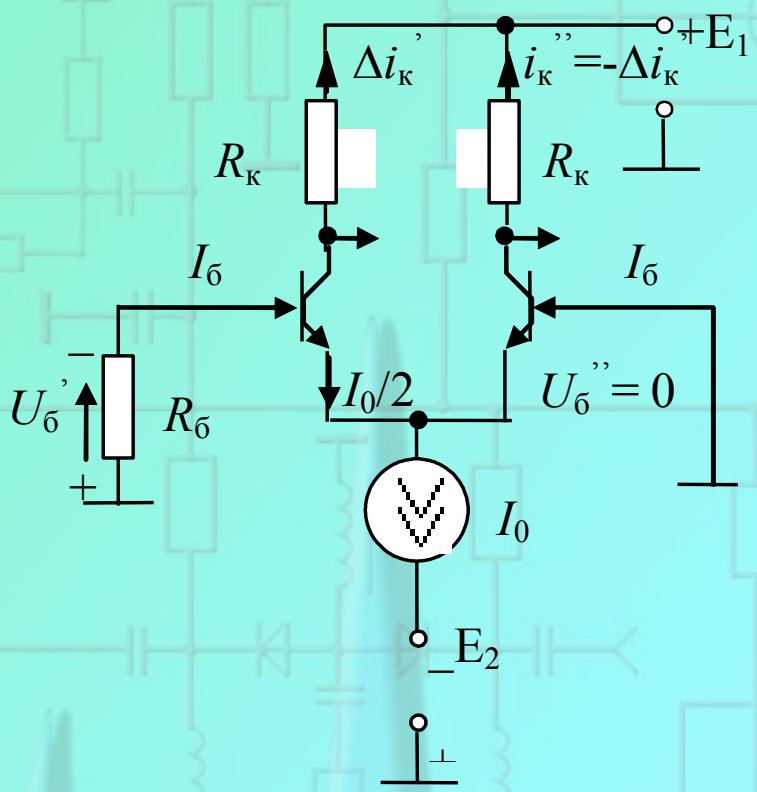
- Минимально возможный дрейф нуля ДУ обеспечивается за счет задания токов эмиттера обоих транзисторов от источника стабильного тока (ИСТ)
- *I*э’+*I* э’’ =*I*0 = const
- ⊿Iэ’= - ⊿I э’’
- ⊿Iэ’(t°)=⊿Iэ’’(t°)



Нестабильность за счёт входных токов

В случае неравенства сопротивлений постоянному току в цепях базы одного и другого транзистора на сопротивлении *R*б возникает напряжение *U*б, которое вызовет разнонаправленное изменение токов коллекторов

$\Delta i_к' = -\Delta i_к''$

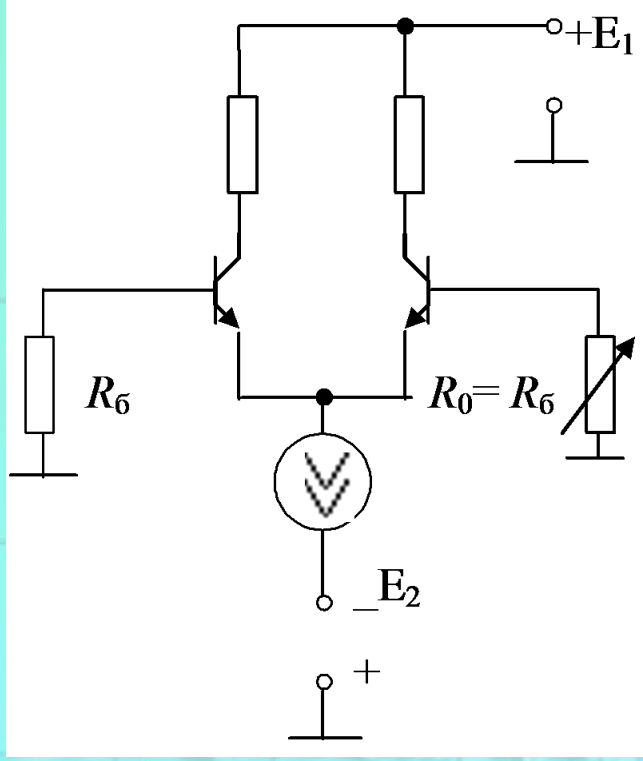


Дифференциальный усилитель

При равенстве сопротивлений в базовых цепях температурный дрейф будет определяться только температурной нестабильностью *разности базовых токов*, которая в силу идентичности транзисторов может быть сделана очень малой

$ei = iб(Rб' - Rб'')$,

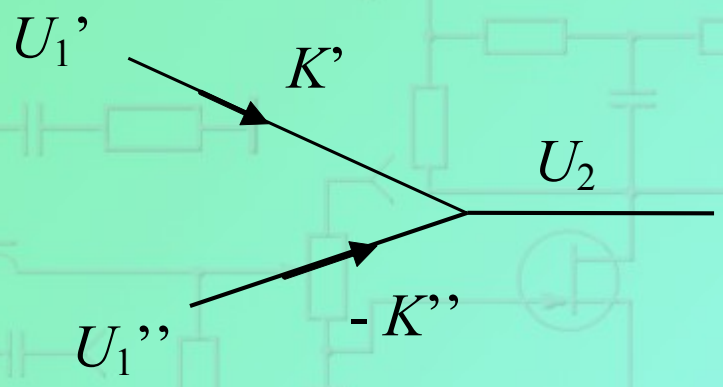
$\Delta ei(t^\circ) = \Delta\, iб'(t^\circ)Rб' - \Delta\, iб'(t^\circ)Rб''$,



ОУ на ПТ

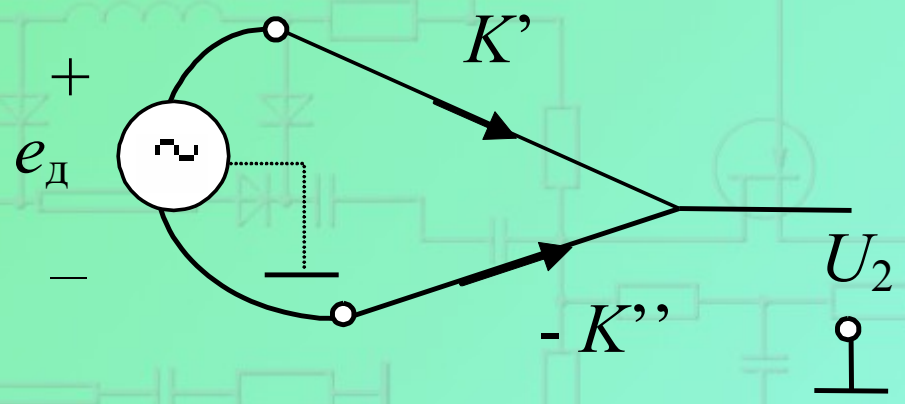
В ДУ на полевых транзисторах явление дрейфа за счет входных токов практически отсутствует, но абсолютное значение как приведенного ко входу напряжения смещения, так и его температурного дрейфа на несколько порядков выше, чем у ДУ на биполярных транзисторах

Линеаризованная модель ОУ



- *K'* - усиление по прямому входу, *K''* - по инверсному

Дифференциальный входной сигнал ОУ

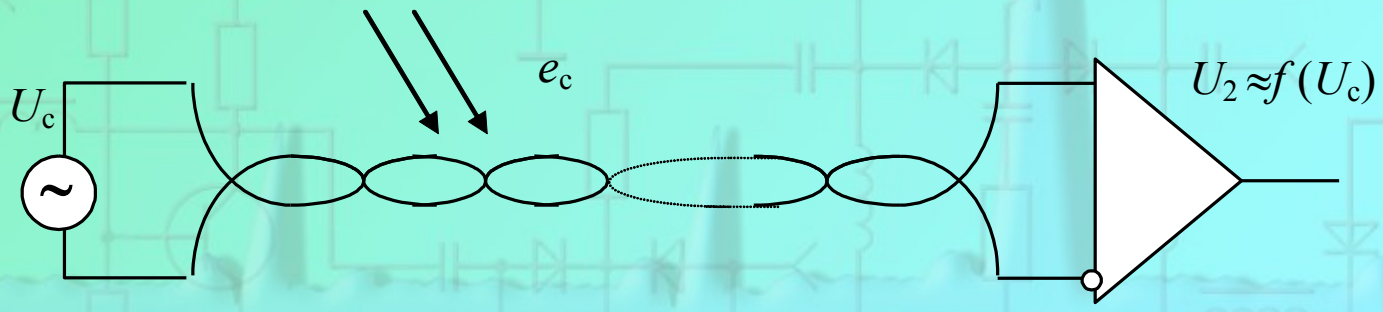


$$U_2 = e_б \frac{K' + K''}{2} = e_б K_б = e_б K$$

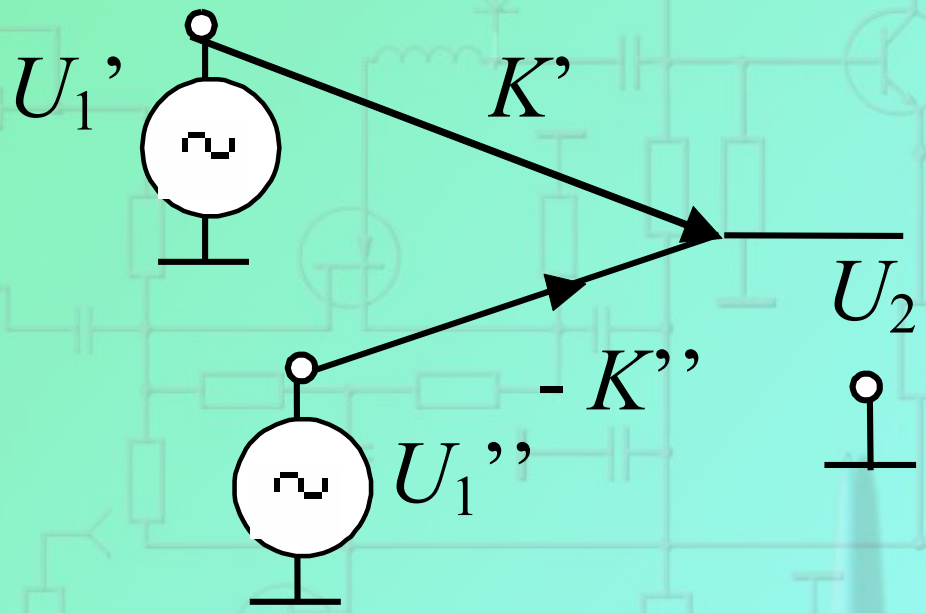
Сигнал, поданный между входами ОУ, называется *дифференциальным*, а *К*д - коэффициентом усиления дифференциального сигнала, который и приводится в справочных данных на ОУ и чаще называется просто коэффициентом усиления *К*

Коэффициента подавления синфазного сигнала

- Mc= K/Kc, Mc>>1
- Mc>>1 *означает, что ОУ обладает свойством глубокого подавления синфазного сигнала, что делает возможным усиление слабых дифференциальных сигналов на фоне больших синфазных помех*

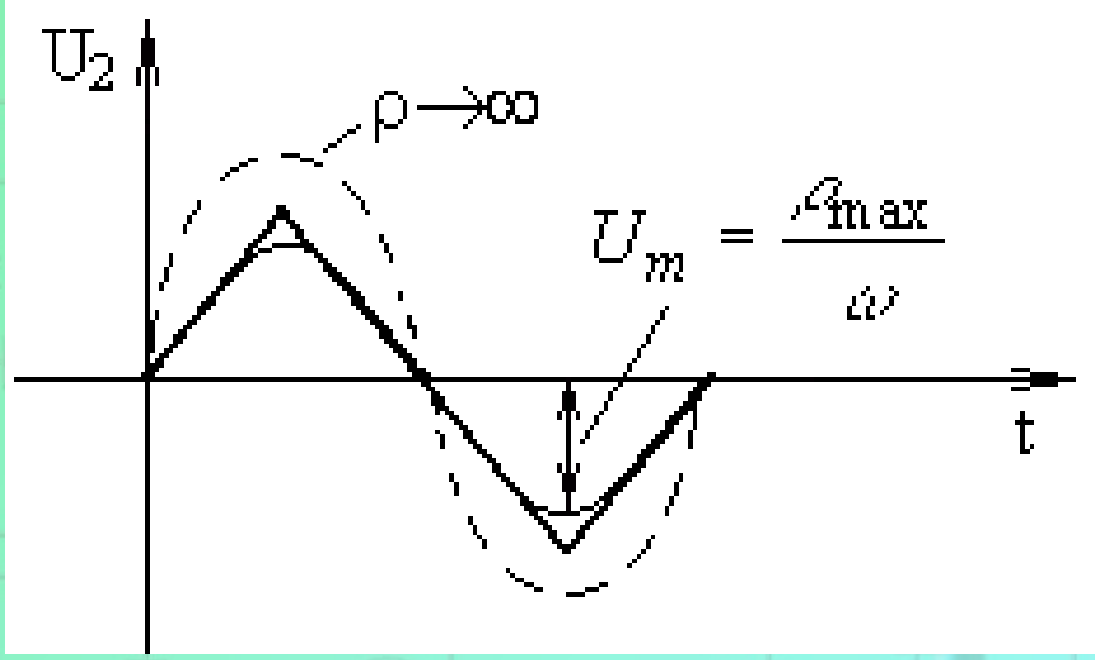


Одновременная подача двух сигналов



$$U_2 = (U_1' - U_1'')K + \left(\frac{U_1' + U_2''}{2}\right)K_c = e_\partial K + e_c K_c$$

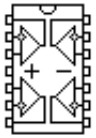
Скорость изменения выходного сигнала

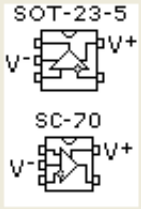


$$\rho_{max} = \frac{dU_2}{dt} \qquad \rho = \frac{dU_2}{dt} = U_m \omega \cos \omega t \qquad \rho_{max} = U_m \omega$$

Примеры ОУ

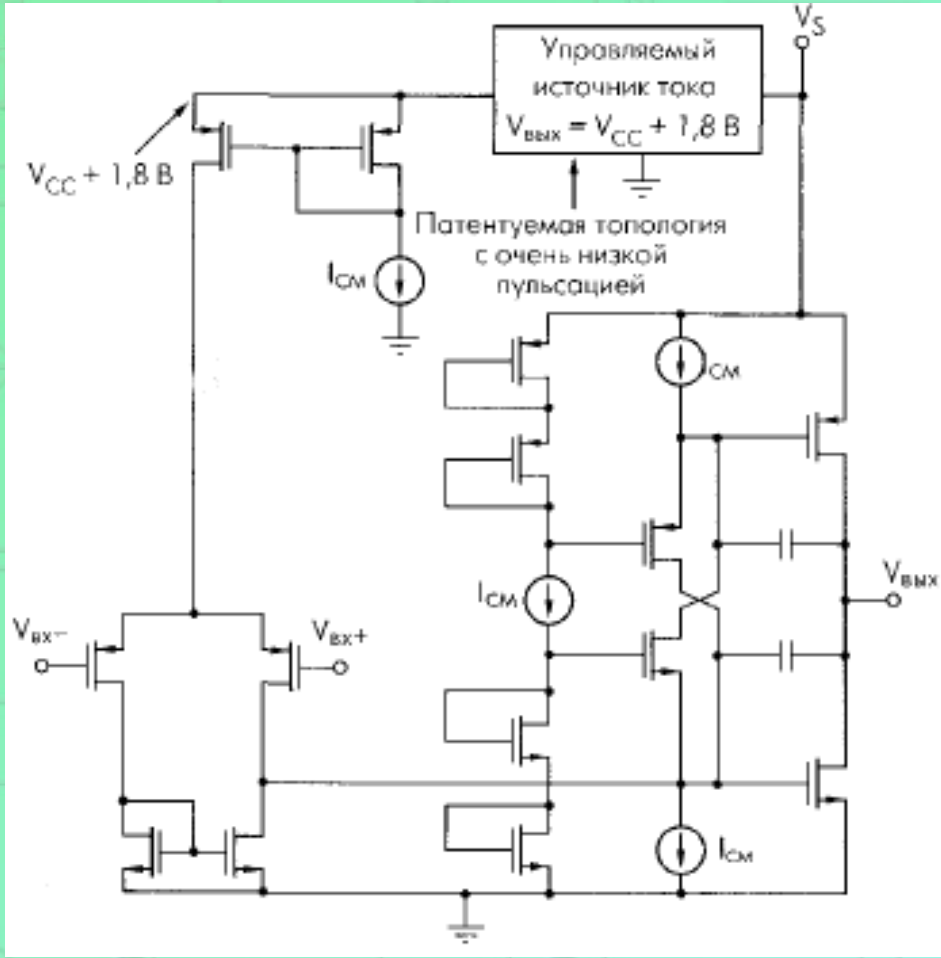
Операционные усилители: классика

Device	Pic.	IIB typ (uA)	V_{io} (mV)	GBW MHz	Supply	Comments
uA741		0.5	6	1	±3.0 ... ±18	Compensated
TL081		200 pA	6	4	±5.0 ... ±18	JFET
LM358A		0.25	6	1	±1.5 ... ±18	NE532
LM2904		0.25	10	1	±1.5 ... ±13	
MC1458		Dual uA741				MC4558
TL082		Dual TL081				
LM324		Quad LM358				
LM2902		Quad LM2904				MC3303
MC3403		Quad uA741				RC4136
TL084		Quad TL081				



• **Современные ОУ в корпусах SOT-23 и SC-70**
Такая цоколевка стала стандартом де-факто для современных одноканальных ОУ. Мы рекомендуем применять ОУ с цоколевкой, показанной на рисунке слева. Это TS951, LMC2001, LMC7101, LMC7111, LMC8101, TLV24x1, OPA340, OPA342, AD8091, ОУ серии "Gain-Amps" MAX4174/MAX4175 с фиксированным коэффициентом усиления. Все приводимые ниже ОУ имеют рекомендуемую цоколевку.

Упрощённая блок-схема ОУ OPA 363/364



Семейство высокопроизводительных КМОП-микросхем OPA363/364, работающих с однополярным источником питания на низкое напряжение: 1,8 (+0,9) - 5,5 (±2,75) В.

Низкий коэффициент ослабления синфазного сигнала (типичное значение -90 дБ). Это достигнуто благодаря модификации однокаскадного rail-to-rail входного блока ОУ с управляемым источником тока.

Максимальное значение напряжения смещения нуля равно 500 мкВ

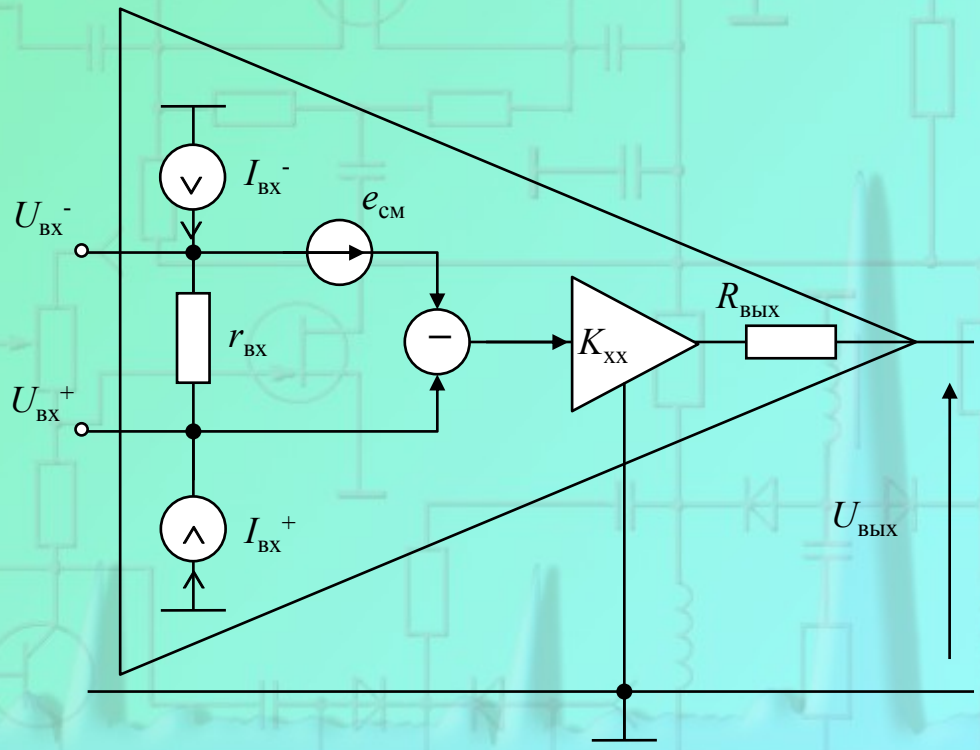
Рабочий ток -750 мкА/канал.

Предусмотрена возможность отключения выхода усилителя, при этом потребляемый ток не превышает 1 мкА/канал.

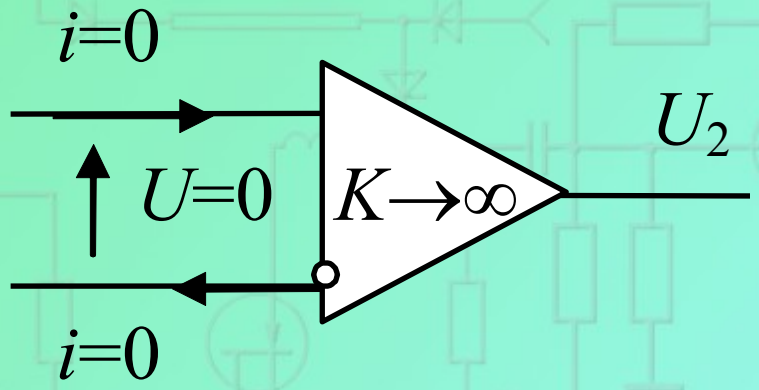
Скорость нарастания выходного сигнала 5 В/мкс.

Модели ОУ

Анализ функциональных устройств на основе ОУ можно осуществить обычными методами с использованием линейных схем замещения ОУ.



Модель идеального ОУ



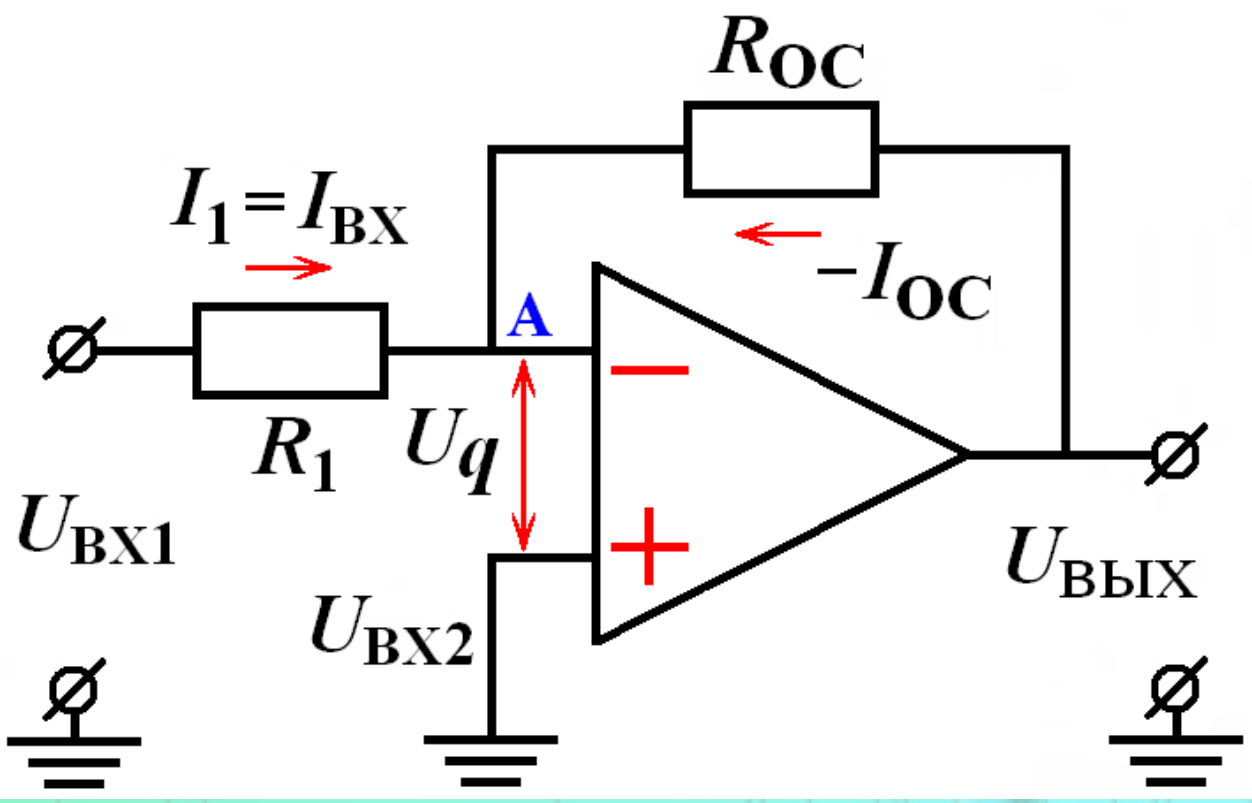
- Идеализация заключается в *принятии условия бесконечного значения усиления,* когда для получения выходного напряжения требуется выходной дифференциальный сигнал, стремящийся к нулю:

$$K \to \infty$$

- В свою очередь, нулевой входной сигнал означает равенство нулю входных токов, вызываемых сигналом.

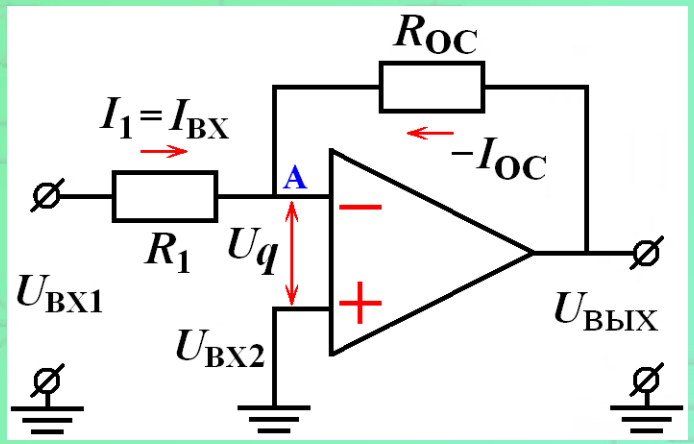
$$U = \frac{U_2}{K} \to 0$$

Инвертирующий усилитель



$$R_{BX\,OУ} \to \infty; \qquad I_{BX\,OУ} = 0.$$

Инвертирующий усилитель



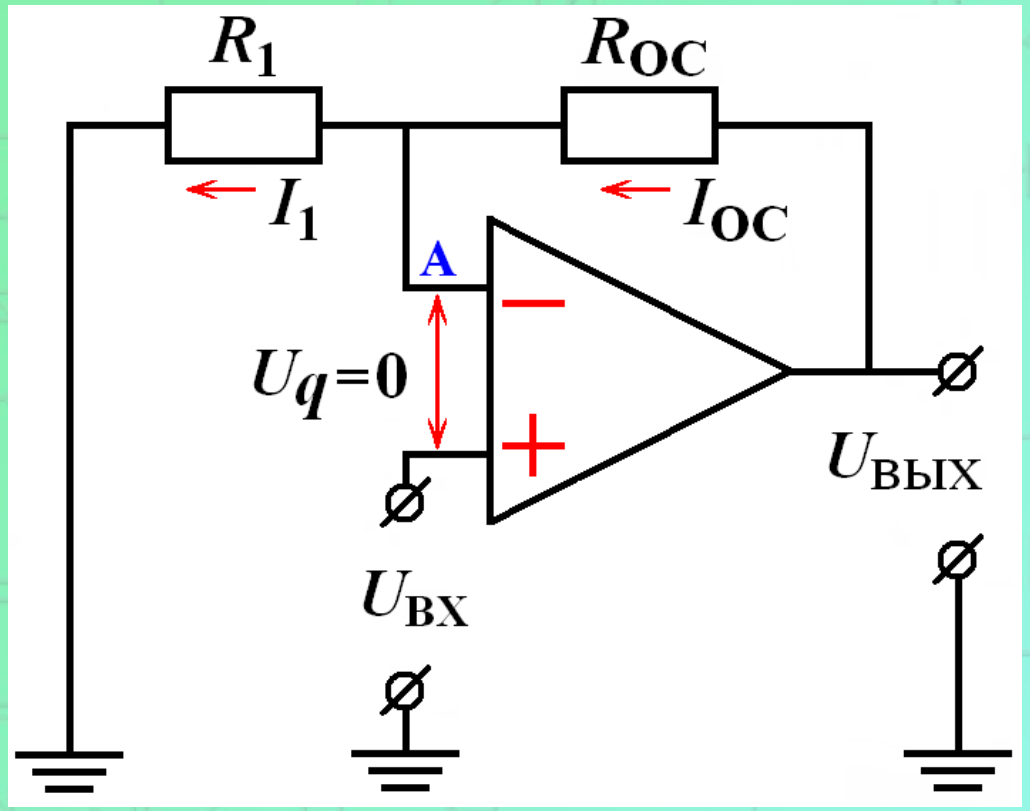
$$I_1 = (U_{вх} - U_q) / R_1;$$

$$-I_{ОС} = (U_{вых} - U_q) / R_{ос};$$

$$I_1 = -I_{OC}; \qquad U_q = 0;$$

$$U_{ВЫХ} = -\frac{R_{OC}}{R_1} \cdot U_{ВХ} = K_{UOC} \cdot U_{ВХ}.$$

Неинвертирующий усилитель



$$I_{ВХ\,ОУ} = 0;$$

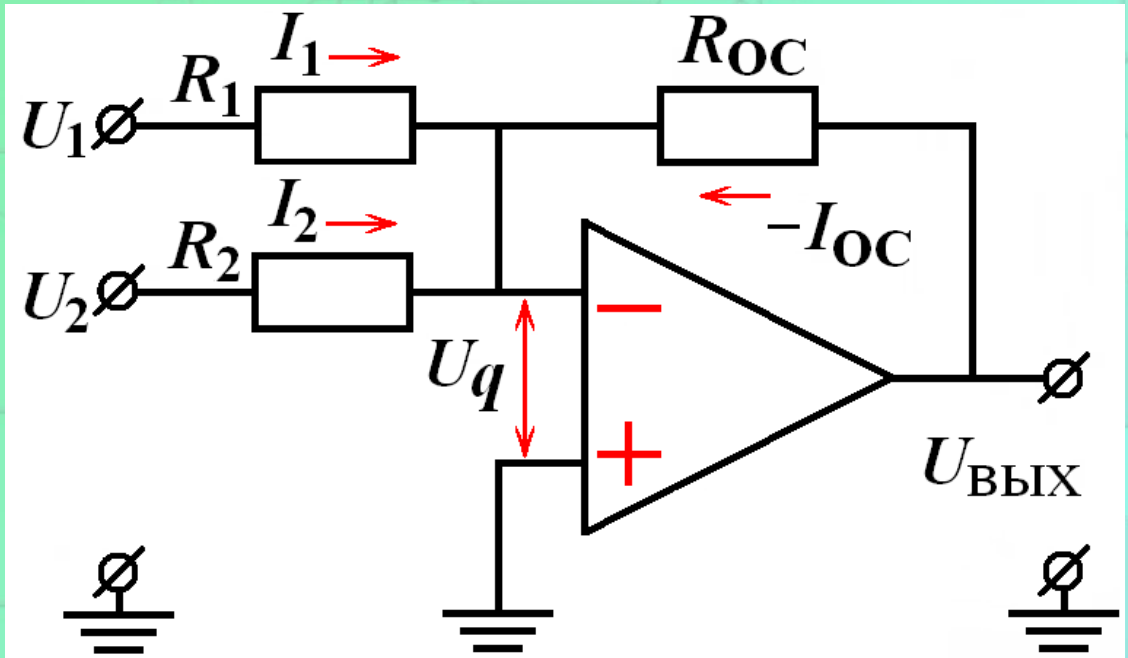
$$U_q = 0;$$

$$R_{ВХ\,ОУ} \to \infty.$$

$$U_{ВХ} = U_{ВЫХ} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{ОС}};$$

$$U_{ВЫХ} = \left(1 + \frac{R_{ОС}}{R_1}\right) U_{ВХ}.$$

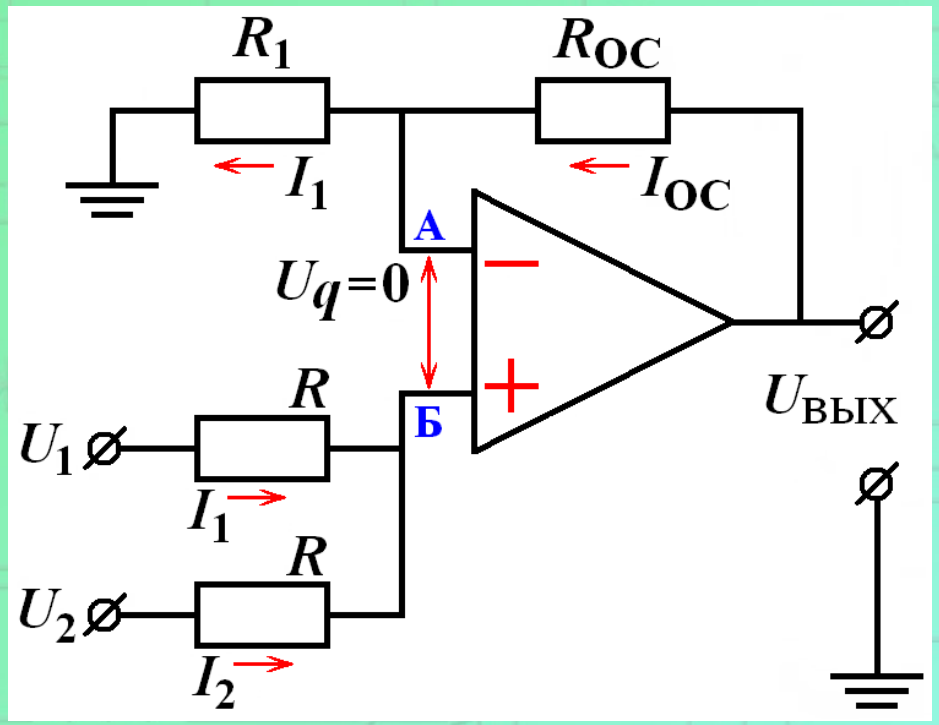
Инвертирующий сумматор



$$I_1 + I_2 = -I_{OC};$$

$$U_{ВЫХ} = -\left(\frac{R_{OC}}{R_1}U_{BX1} + \frac{R_{OC}}{R_2}U_{BX2}\right).$$

Неинвертирующий сумматор



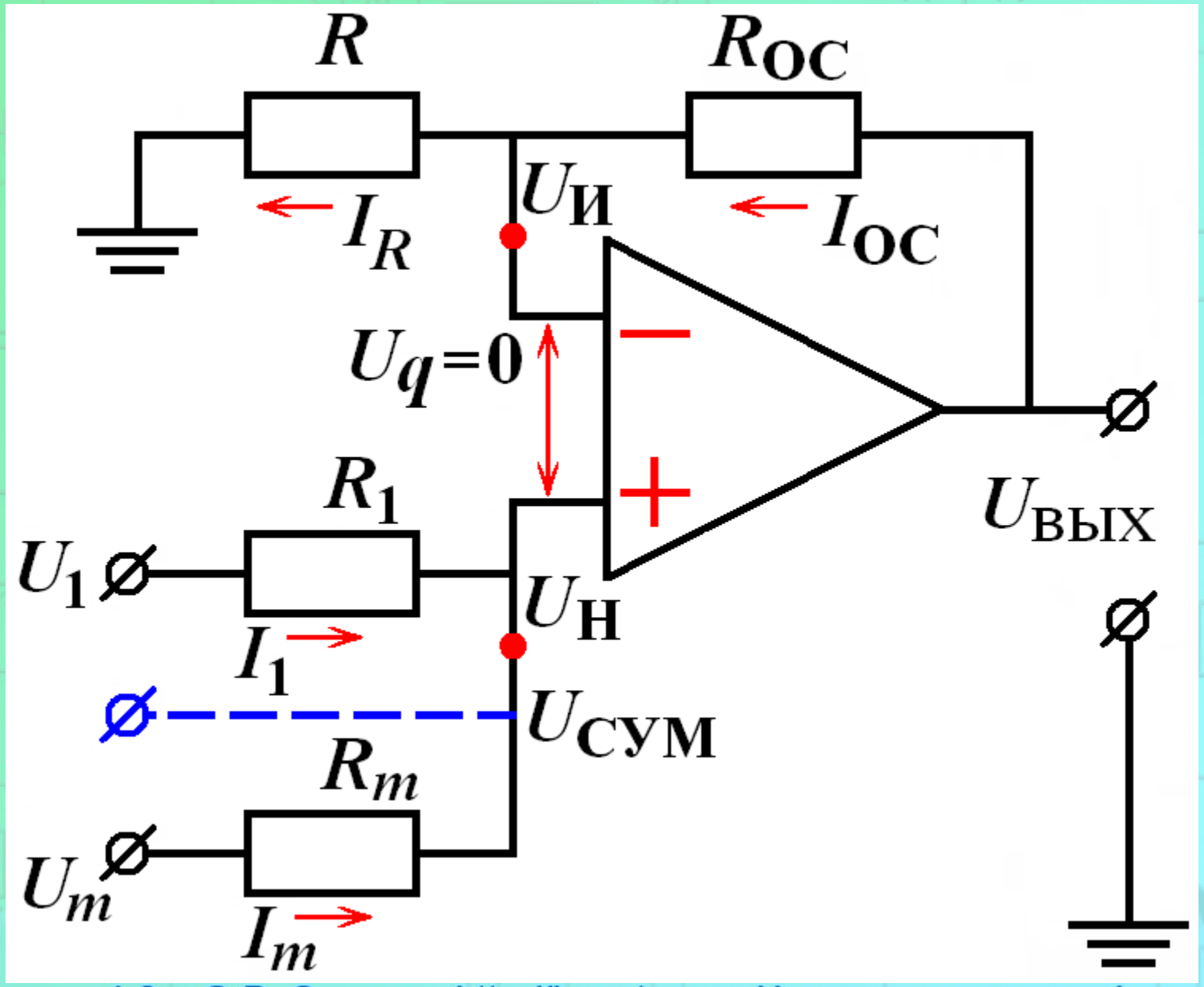
$$I_1 + I_2 = 0;$$

$$\frac{U_{BX1} - U_{СУМ}}{R} + \frac{U_{BX2} - U_{СУМ}}{R} = 0;$$

$$\frac{U_{BX1} + U_{BX2}}{n} = U_{СУМ};$$

$$U_{ВЫХ} = \frac{R_1 + R_{OC}}{R_1} \cdot \frac{U_{BX1} + U_{BX2}}{n}; \qquad n = 2$$

Неинвертирующий сумматор



Неинвертирующий сумматор

$$\sum_{j=1}^{m} I_j = 0; \qquad \sum_{j=1}^{m} \frac{U_j - U_H}{R_j} = 0; \qquad \sum_{j=1}^{m} \left(\frac{U_j}{R_j} \right) = U_H \sum_{j=1}^{m} \frac{1}{R_j};$$

$$I_{OC} = -I_R; \qquad U_H = U_И = U_{ВЫХ} \frac{R}{R + R_{OC}};$$

$$U_{ВЫХ} = \left(1 + \frac{R_{OC}}{R} \right) \cdot \frac{\sum_{j=1}^{m} \left(\frac{U_j}{R_j} \right)}{\sum_{j=1}^{m} \frac{1}{R_j}}.$$

Схема вычитания

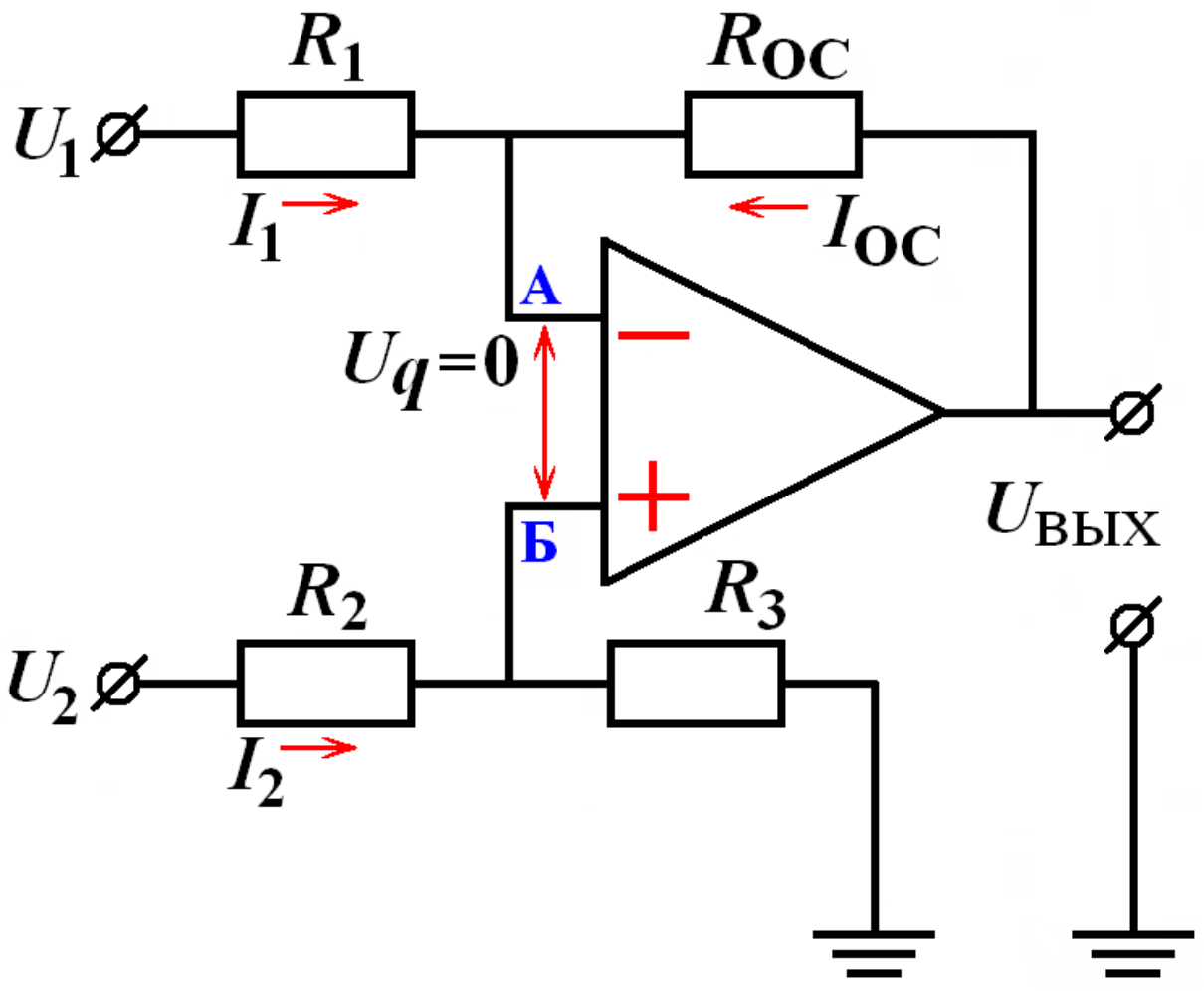


Схема вычитания

Если: $U_{BX2} = 0$ **тогда:** $U'_{ВЫХ} = -U_{BX1}\dfrac{R_{OC}}{R_1}$

Если: $U_{BX1} = 0$ **тогда:**

$$U''_{ВЫХ} = U_{BX2}\cdot\frac{R_3}{R_2 + R_3}\cdot\frac{R_{OC} + R_1}{R_1}$$

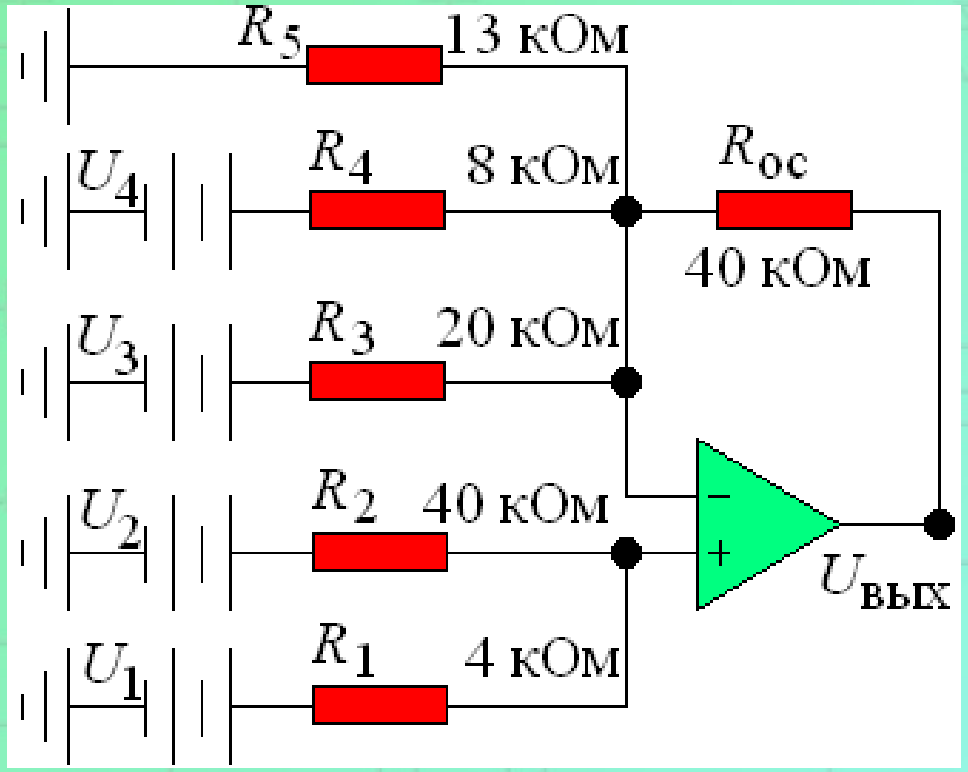
Если:

$$R_{OC} = R_3, \quad R_1 = R_2, \qquad U_{ВЫХ} = U'_{ВЫХ} + U''_{ВЫХ},$$

тогда: $$U_{ВЫХ} = \frac{R_{OC}}{R_1}\cdot\left(U_{BX2} - U_{BX1}\right)$$

Пример реализации сумматора

$$U_{ВЫХ} = 10U_1 + U_2 - 2U_3 - 5U_4;$$



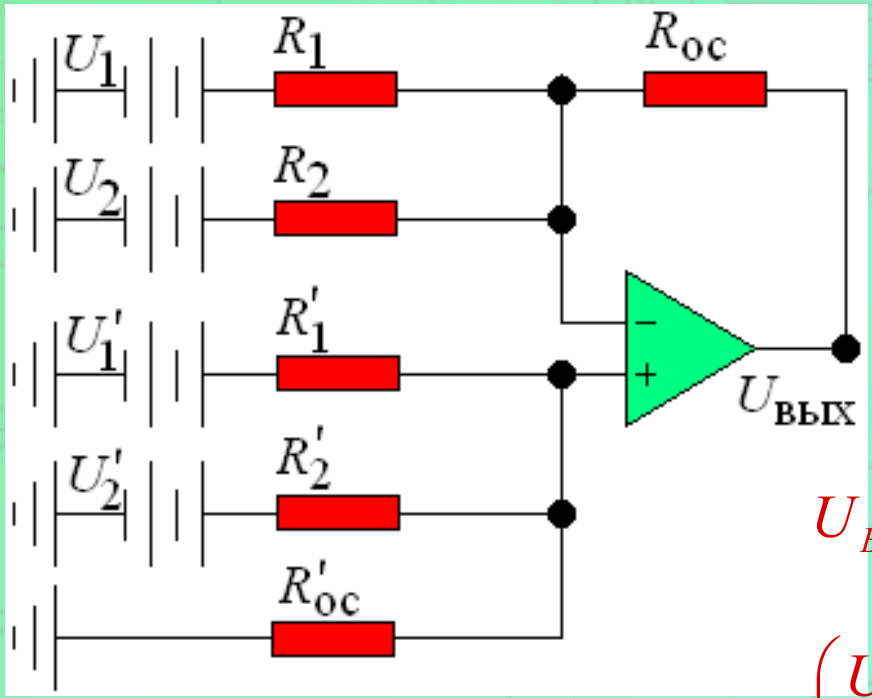
$$R_i = \frac{R_{OC}}{K_i};$$

где $\boldsymbol{R_i}$ – величина сопротивлений $\boldsymbol{R_1}$-$\boldsymbol{R_4}$; $\boldsymbol{K_i}$ – величины коэффициентов усиления $\boldsymbol{U_1}$-$\boldsymbol{U_4}$ соответственно.

Значение $\boldsymbol{R_5}$ - из выражения для проводимостей:

$$\frac{1}{R_{OC}} + \frac{1}{R_3} + \frac{1}{R_4} + \frac{1}{R_5} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}.$$

Пример реализации сумматора



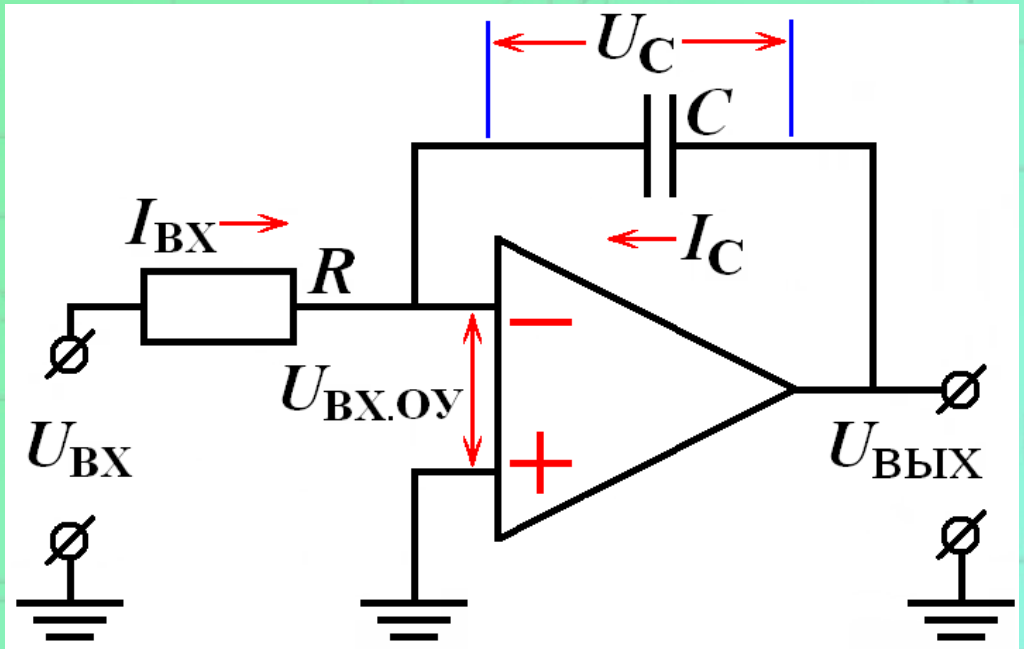
Суммы коэффициентов усиления инвертирующей и неинвертирующей части схемы должны быть одинаковы:

$$U_{ВЫХ} = -\left(\frac{U_1 R_{OC}}{R_1} + \frac{U_2 R_{OC}}{R_2} + \ldots + \frac{U_m R_{OC}}{R_m}\right) + \left(\frac{U_{m+1} R'_{OC}}{R'_1} + \frac{U_{m+2} R'_{OC}}{R'_2} + \ldots + \frac{U_{m+n} R'_{OC}}{R'_n}\right),$$

где m - число инвертирующих входов, n - число не инвертирующих входов. Следовательно:

$$\frac{R_{OC}}{R_1} + \frac{R_{OC}}{R_2} + \ldots + \frac{R_{OC}}{R_m} = \frac{R'_{OC}}{R'_1} + \frac{R'_{OC}}{R'_2} + \ldots + \frac{R'_{OC}}{R'_n}$$

Интегратор



$$i_C + i_{ВХ} = 0;$$

$$i_{ВХ} = U_{ВХ}/R;$$

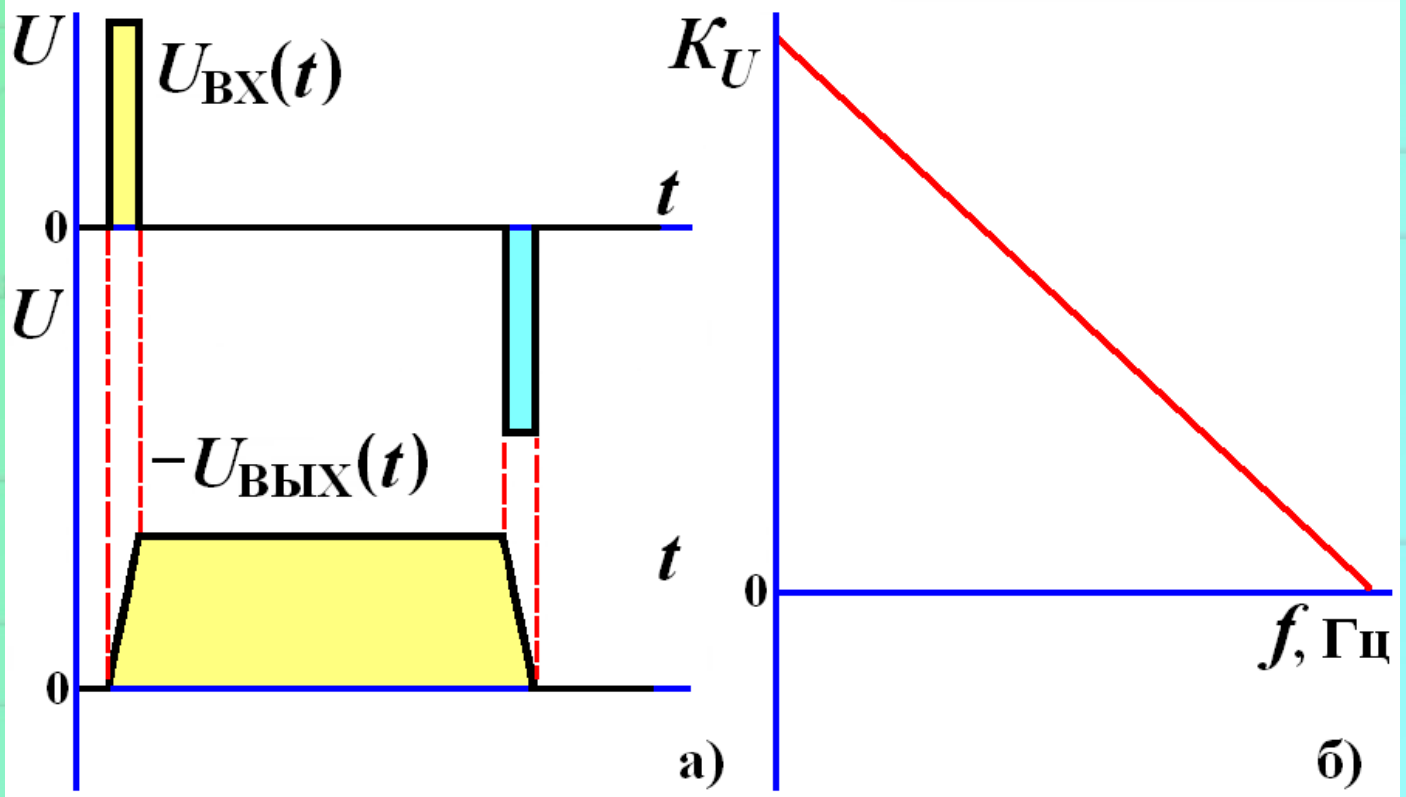
$$U_{ВЫХ} = U_C;$$

$$U_C = \frac{1}{C}\int i_C(t)dt$$

$$U_{ВЫХ} = U_{ВЫХ}(0) - \frac{1}{RC}\int_0^t U_{ВХ}(t)dt$$

$U_{ВЫХ}(0)$ – начальное напряжение на конденсаторе в момент времени $t = 0$.

Интегратор



Временная диаграмма (а), амплитудно-частотная характеристика (б) интегратора

Достоинства активной схемы интегратора

$$U_{BX} = I_{BX} R + U_{BX\ ОУ};$$

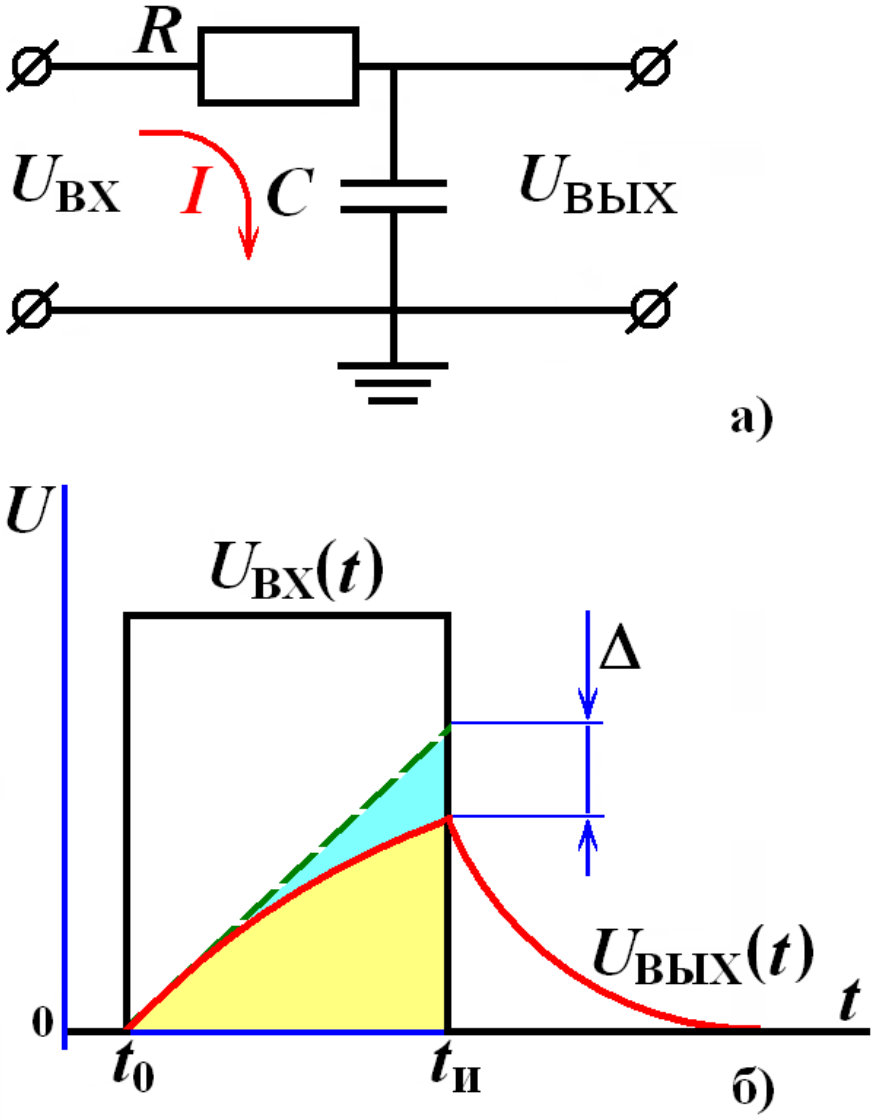
$$U_C = U_{BX\ ОУ} - U_{ВЫХ} = (1+K) \cdot U_{BX\ ОУ}$$

$$U_{ВЫХ} = -K \cdot U_{BX\ ОУ}$$

$$U_{BX\ ОУ} = \frac{U_C}{1+K}; \quad I_{BX} = I_C = C\frac{dU_C}{dt};$$

$$U_{BX} = RC\frac{dU_C}{dt} + \frac{U_C}{1+K}.$$

Пассивная *RC* цепь



$$I = \frac{U_{ВХ} - U_{ВЫХ}(t)}{R}$$

Δ - погрешность интегрирования

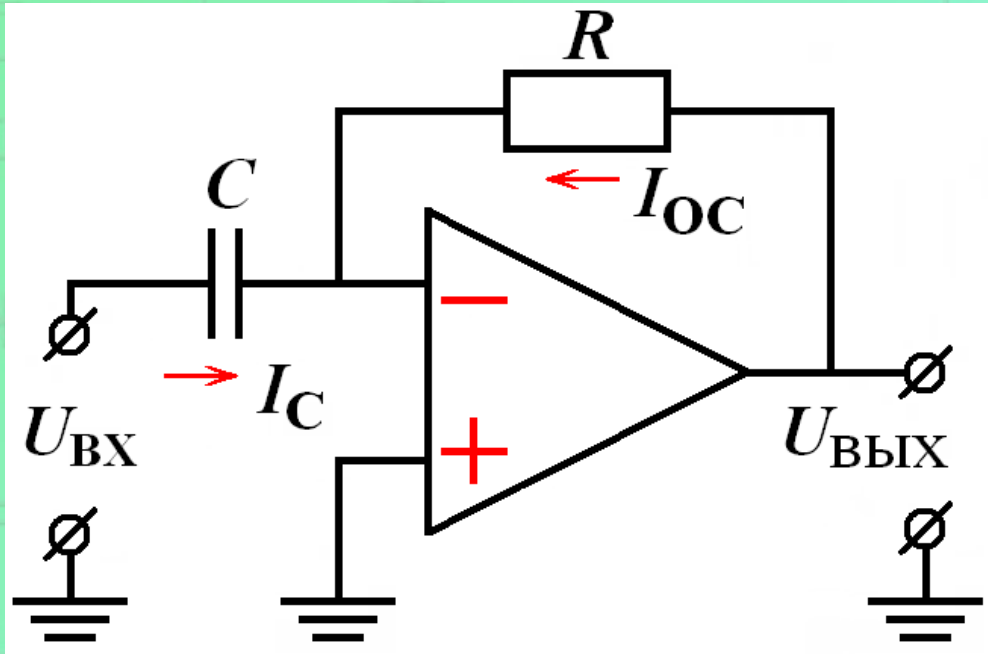
$$U_{BX}(1+K)=(1+K)RC\frac{dU_C}{dt}+U_C(t).$$

Для пассивной интегрирующей цепи:

$$U_{BX}=RC\frac{dU_C}{dt}+U_C(t).$$

Следовательно, постоянная времени в (К+1) раз больше, чем у пассивной цепи.

Дифференциатор



Напряжение на конденсаторе:

$$U_{BX} = Q / C,$$

где Q - заряд конденсатора. Если заряд конденсатора продифференцировать, то получится ток через конденсатор:

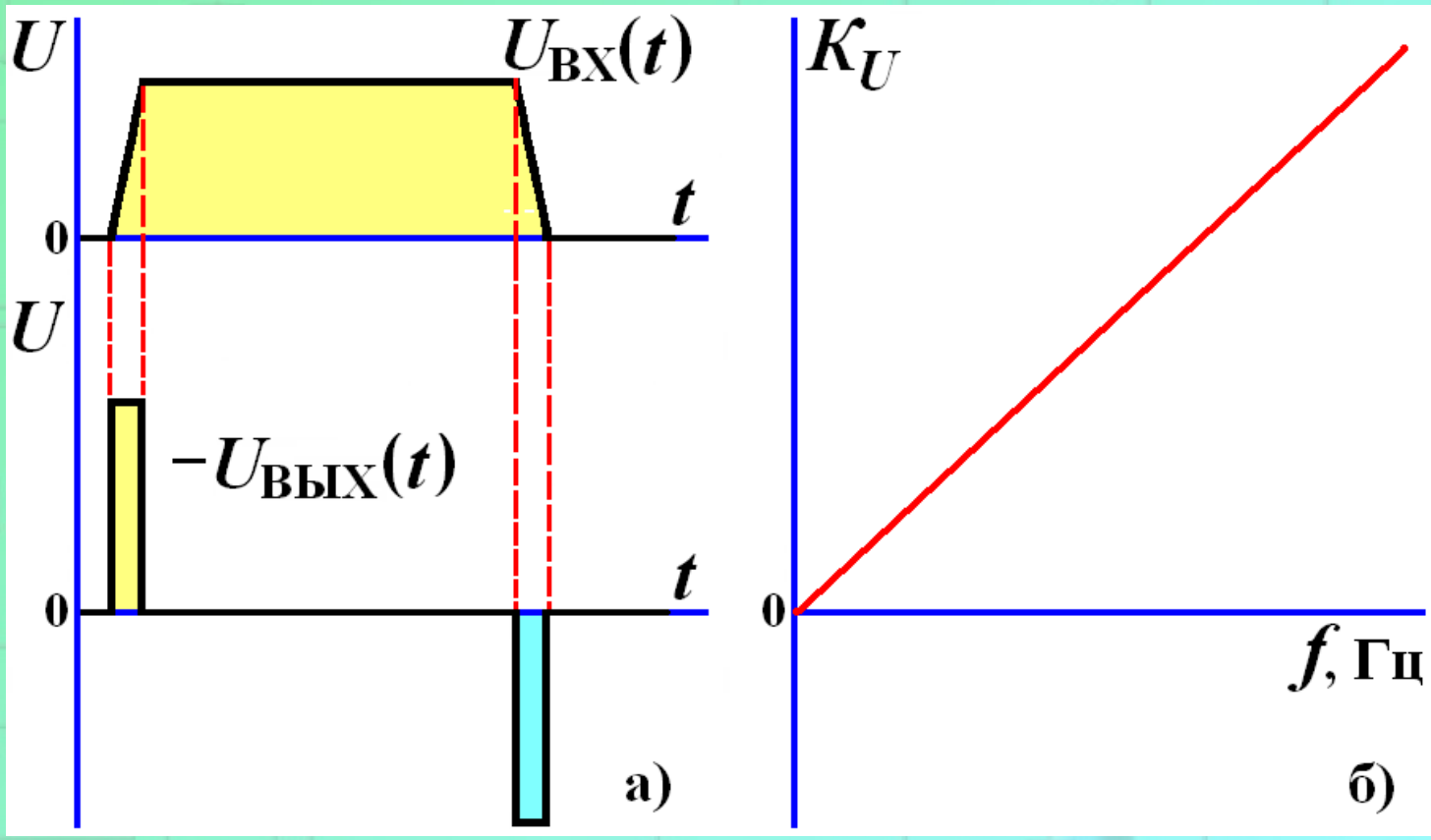
$$C\frac{dU_{BX}}{dt} = I_C;$$

он равен току цепи обратной связи:

$$i_c + i_{oc} = 0;$$

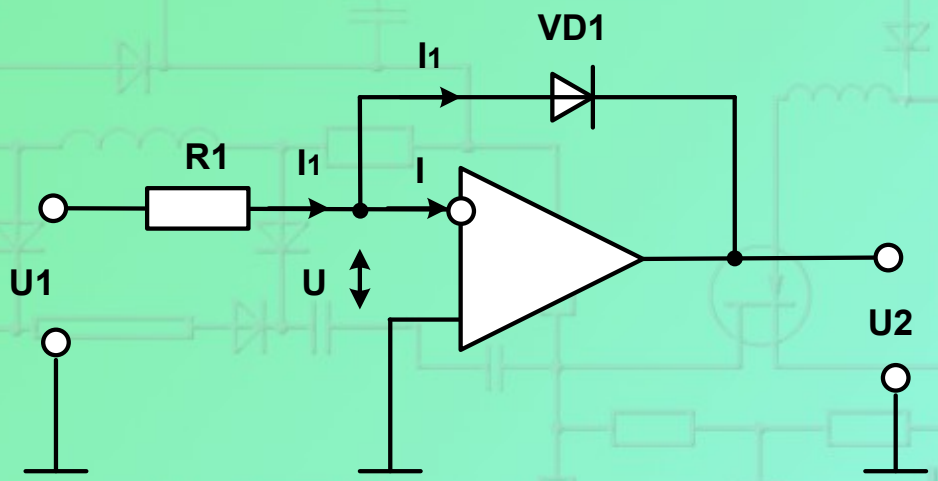
$$U_{BЫX} = -i_{OC}R = -CR\frac{dU_{BX}}{dt}.$$

Дифференциатор



Временная диаграмма (а), амплитудно-частотная характеристика (б) дифференциатора

Логарифмический усилитель



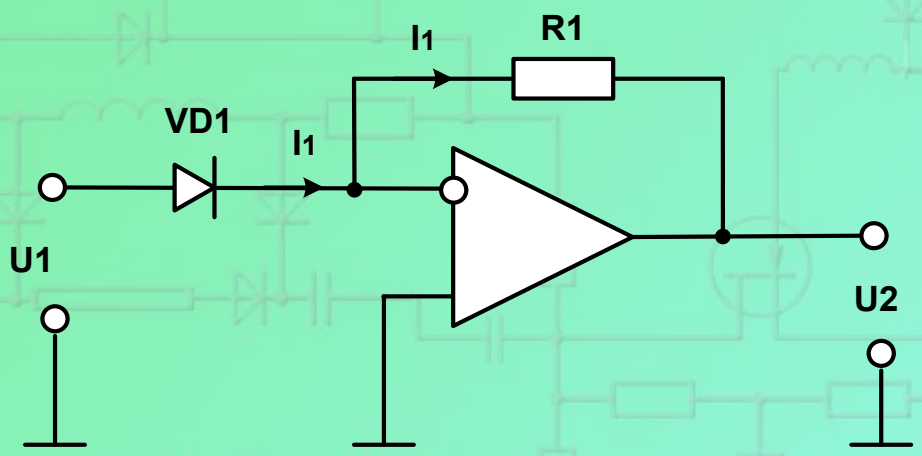
$$i_{\text{вх}} = -i_{\partial}$$

$$u_{\text{вых}} = u_{\partial}$$

$$i_{\partial} = I_s e^{u_{\text{д}}/\varphi_{\text{т}}}$$

$$u_{\text{вых}} = -\varphi_{\text{т}} \ln \frac{i_{\text{вх}}}{I_s}$$

Антилогарифмический усилитель

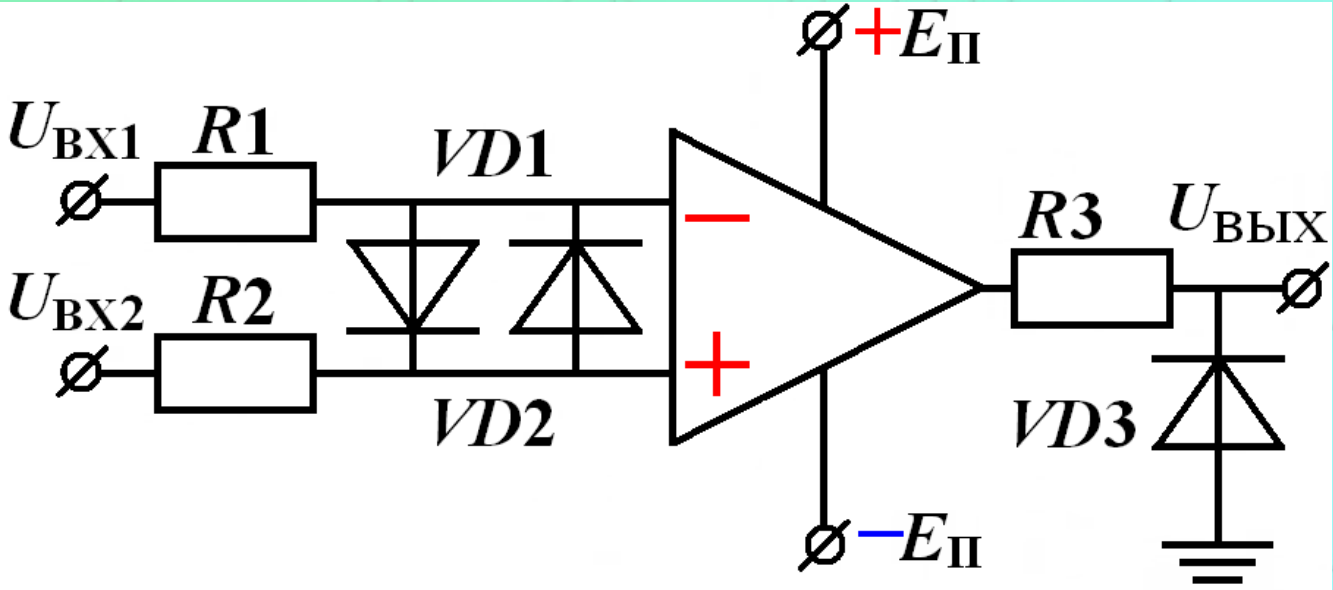


$$i_1 = i_д = I_s e^{u_1/\varphi_т}$$

$$u_{вых} = -R_1 I_1 = I_s e^{u_1/\varphi_т}$$

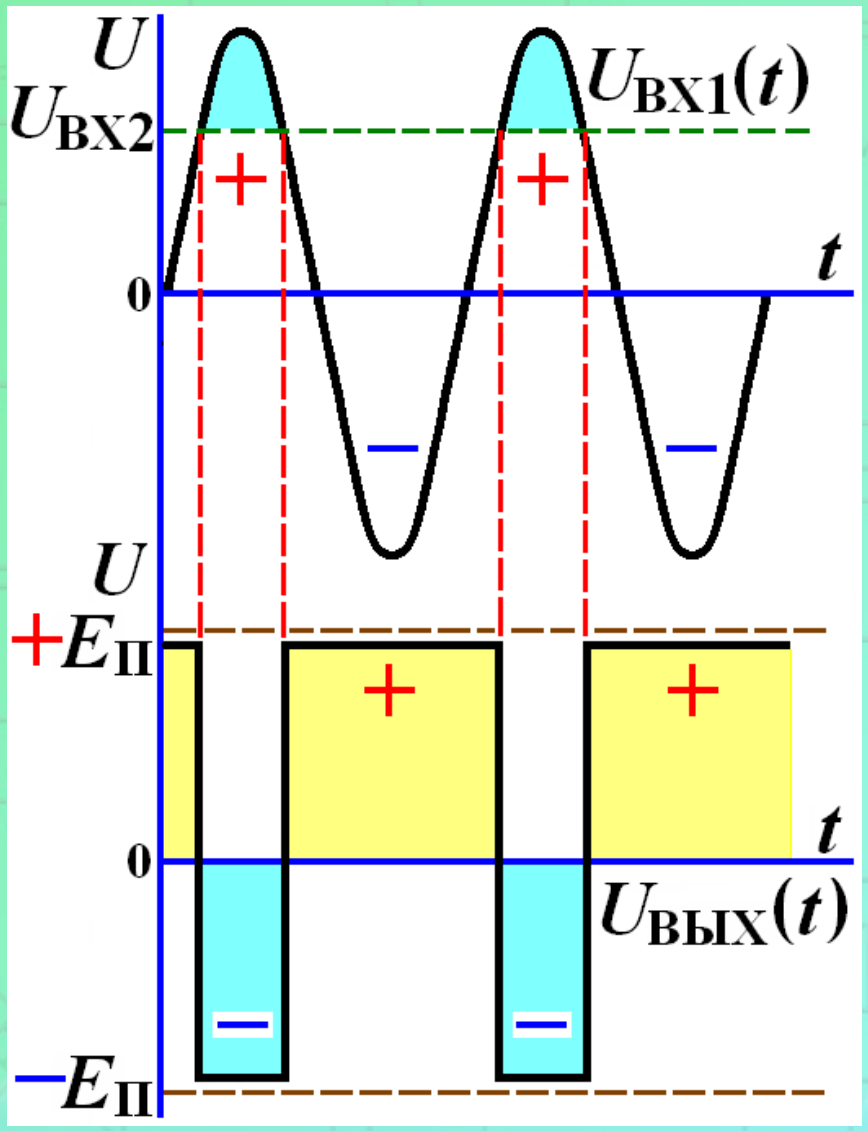
Компаратор

сравнение мгновенных значений двух напряжений и преобразование аналоговых сигналов в цифровую форму



Резисторы R_1, R_2 ограничивают величину тока диодов *VD1*, *VD2* (диоды для защиты входных цепей ОУ от высокого напряжения)

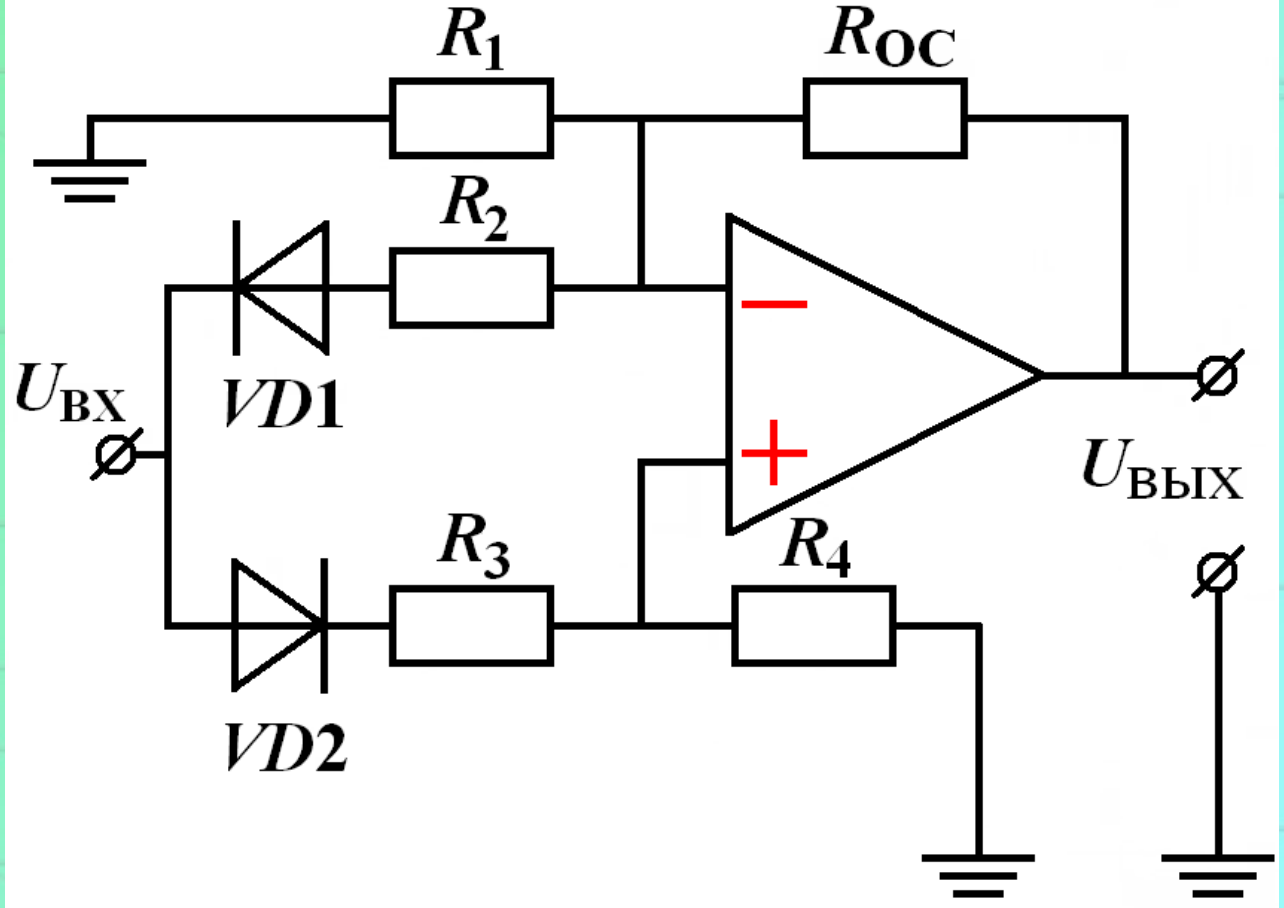
Компаратор



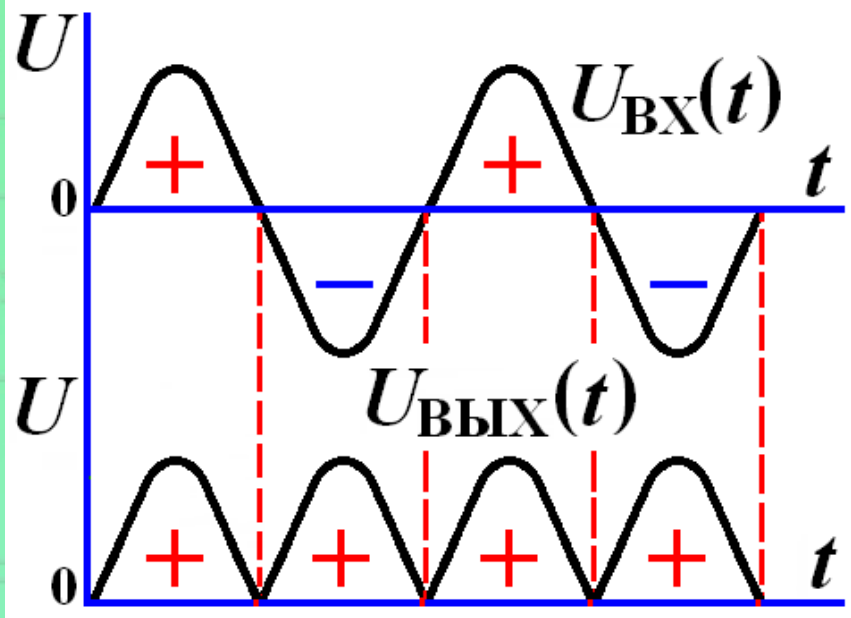
значение K_U велико и незначительная разница значений $U_{ВХ1}$ и $U_{ВХ2}$ ведет к переключению компаратора, $U_{ВЫХ} \approx U_П$

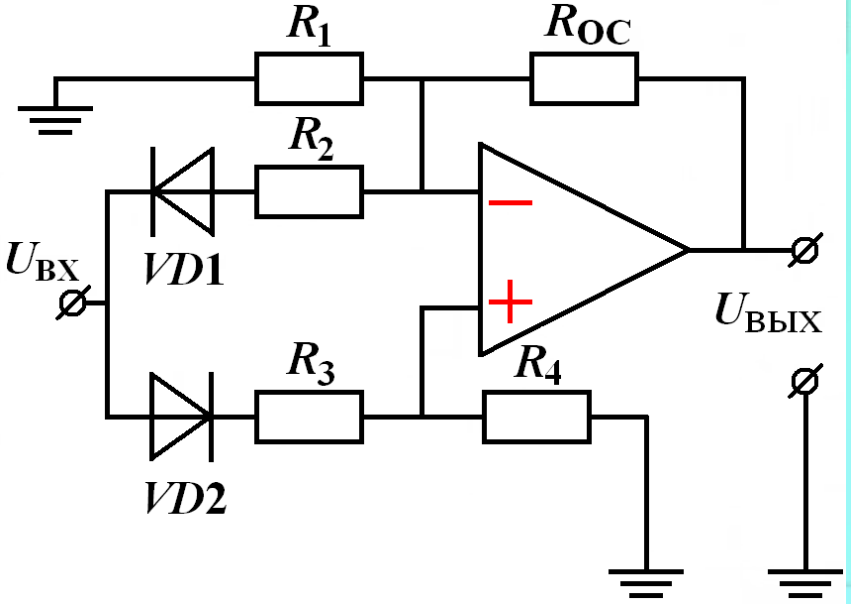
$U_{ВХ2}$ задает уровень переключения

Выпрямитель



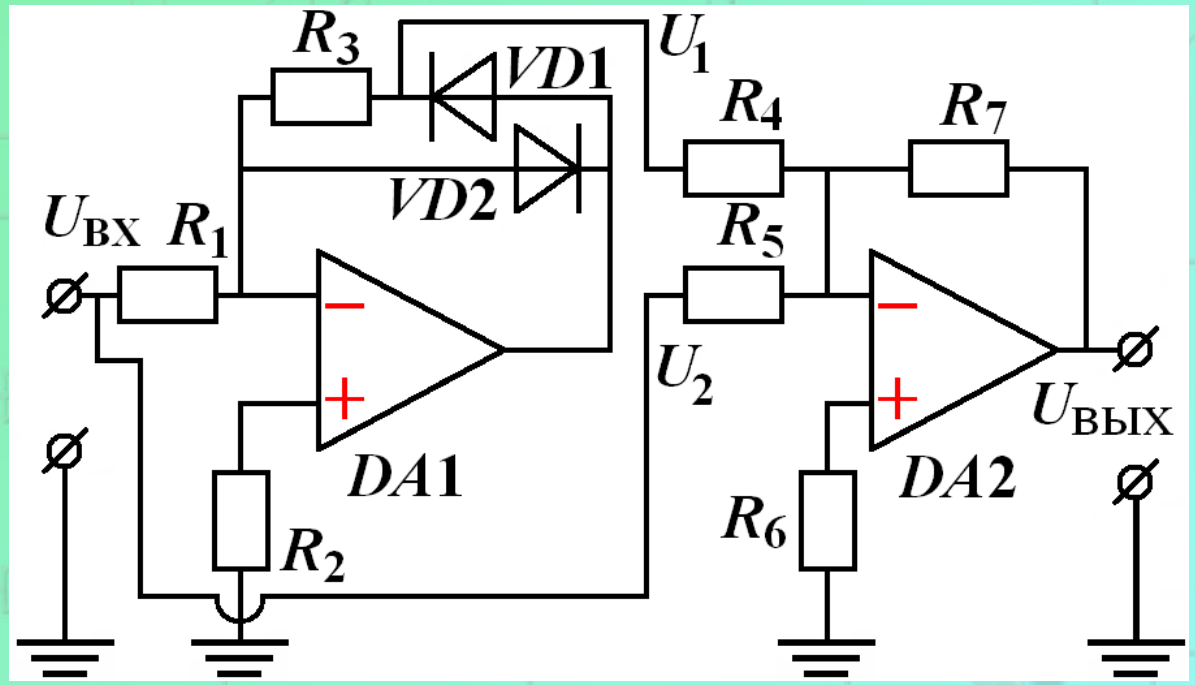
Выпрямитель





Когда диод VD_1 закрыт, отрицательную обратную связь обеспечивает верхний резистор R_1. В этом случае входное напряжение делится на резисторах R_3, R_4 и усиливается $K=1+(R_{ОС}/R_1)$. Когда закрыт диод VD_2, коэффициент усиления $K=R_{ОС}/R_2$. Следовательно, работа выпрямителя аналогична схеме вычитания.

Прецизионный выпрямитель

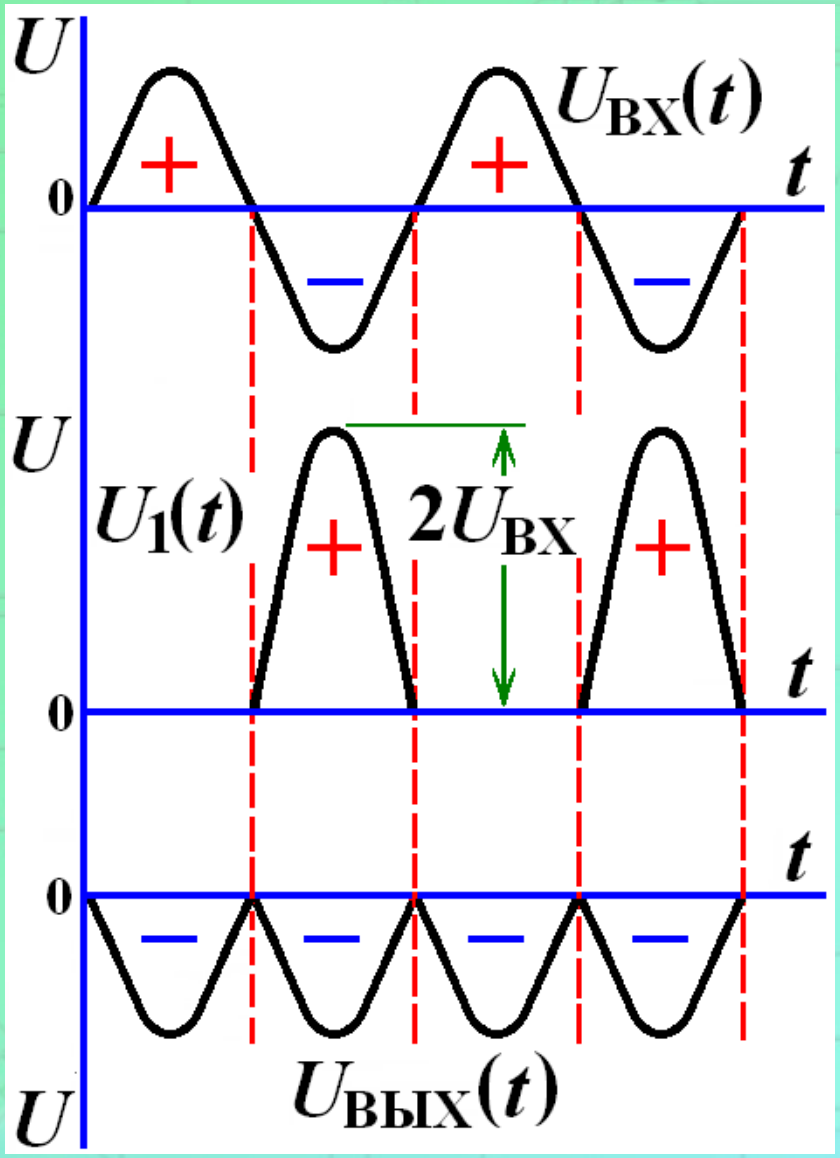


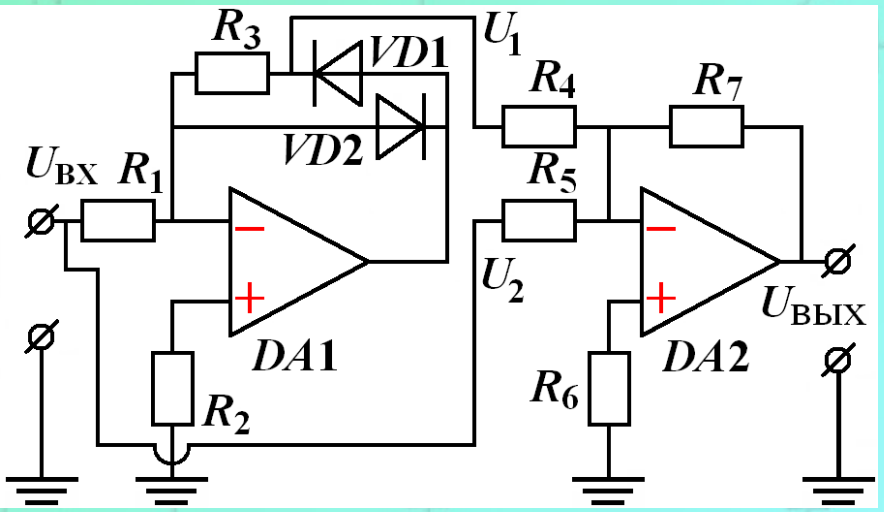
$$U_{ВЫХ} = \left(-\frac{R_3}{R_1}\right)\cdot\left(-\frac{R_7}{R_4}\right)U_{ВХ_ВЫП} + \left(-\frac{R_7}{R_5}\right)U_{ВХ} =$$

$$\left(2\cdot U_1 - U_2\right).$$

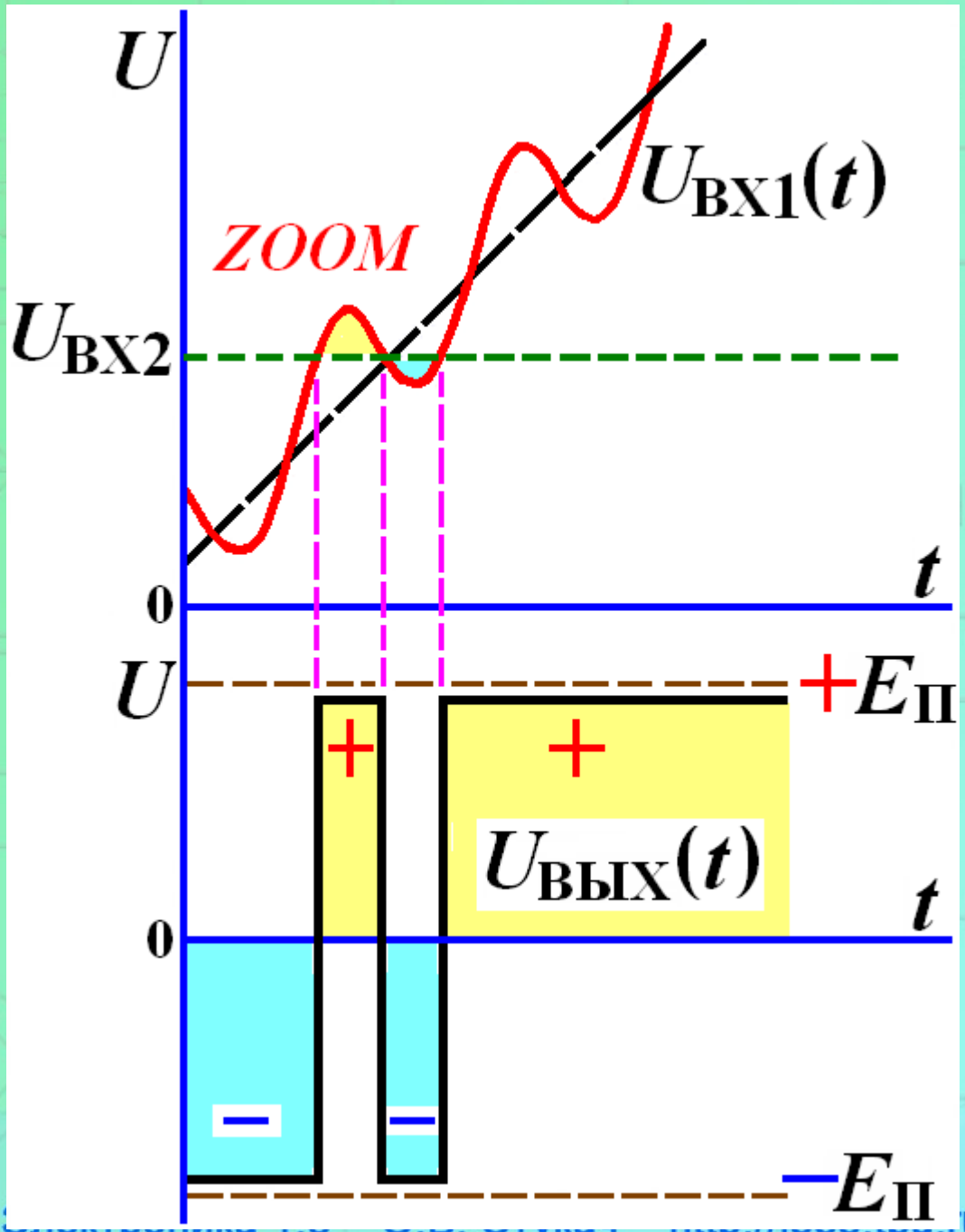
Например, $R_1=R_3$; $R_7=R_5$; $R_5=2R_4$. $K_{ОС} = -\frac{R_7}{R_5}$.

Прецизионный выпрямитель

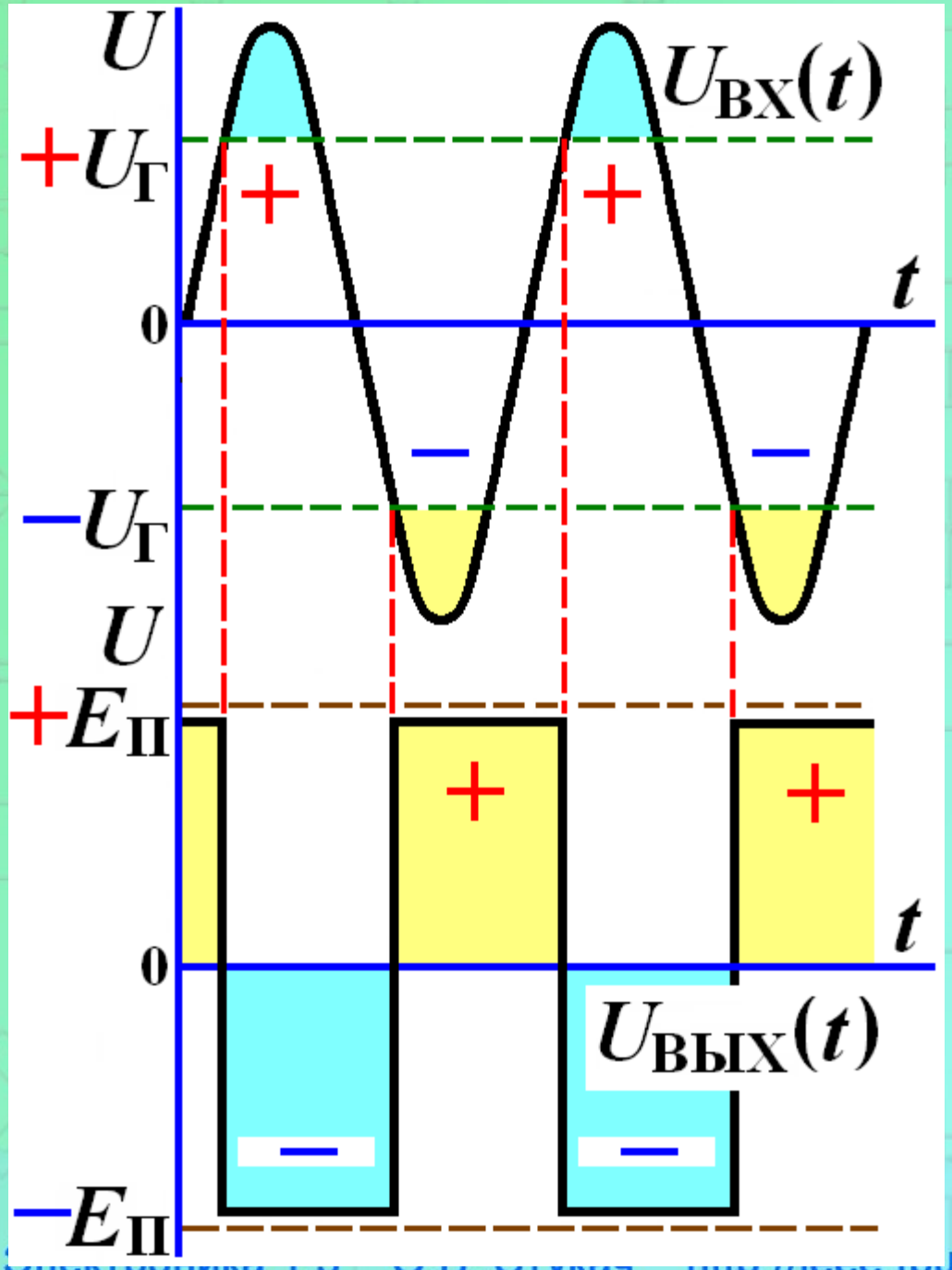


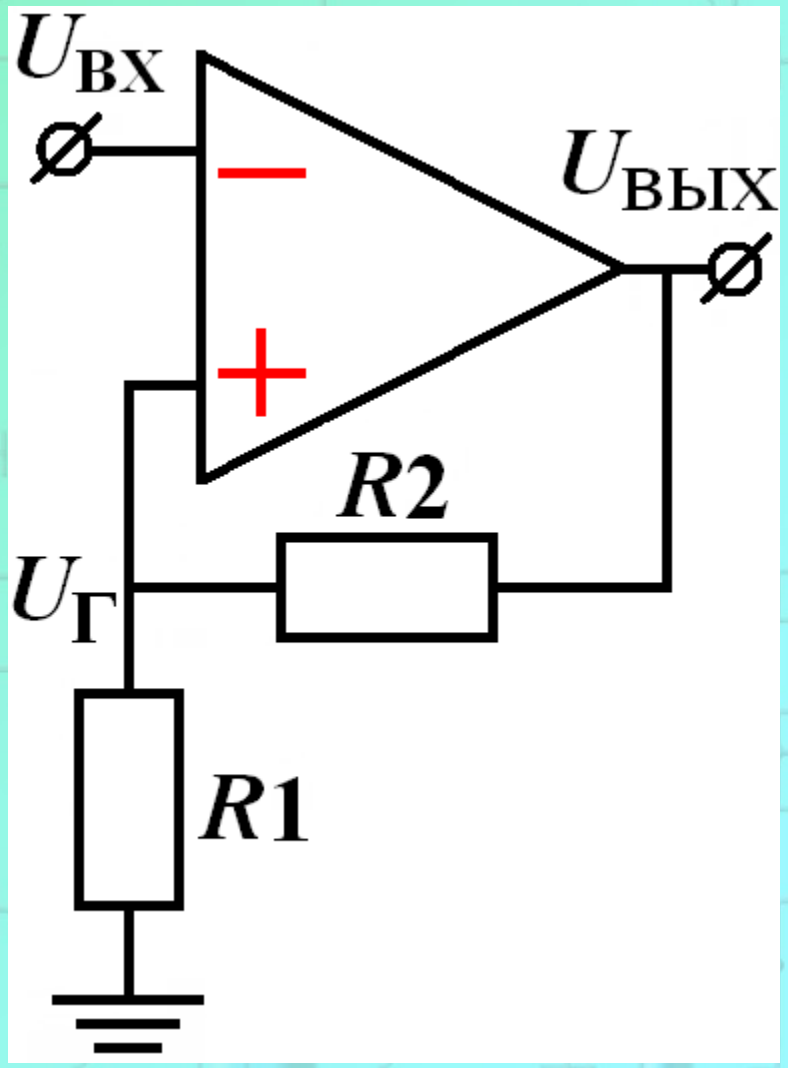


Влияние помех (многократное переключение)



Триггер Шмитта





Триггер Шмитта

Если в $U_{ВХ}$ есть напряжение помехи, компаратор несколько раз переключится, когда $U_{ВХ1}=U_{ВХ2}$. Это может явиться причиной сбоев в работе связанных с ним устройств.

$$U_{Г} = \frac{U_{ВЫХ} \cdot R1}{R1 + R2}.$$

Если амплитуда напряжения помехи меньше значения $U_{Г}$ (напряжение гистерезиса), то многократного переключения ОУ не происходит.