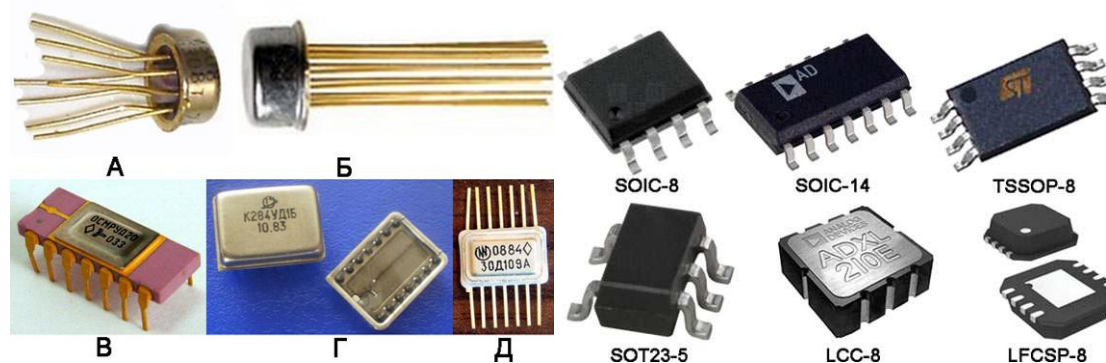


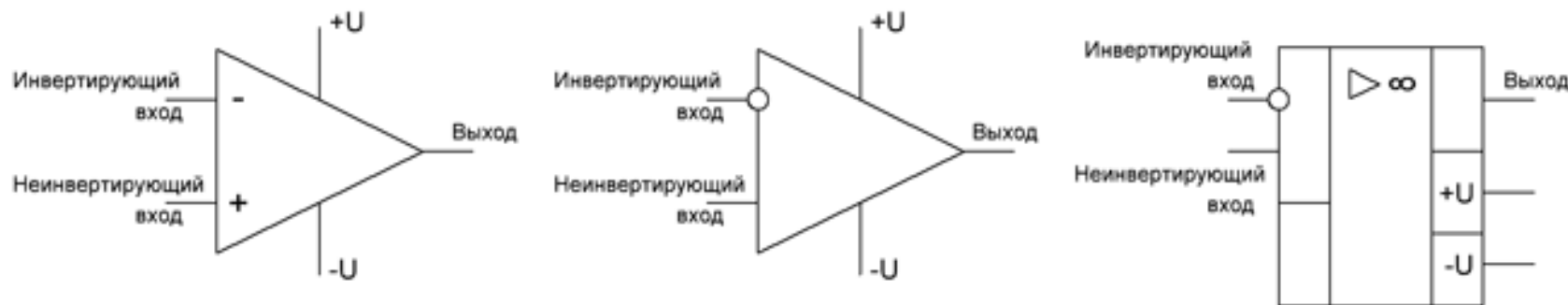
СХЕМОТЕХНИКА ОПЕРАЦИОННЫЙ УСИЛИТЕЛЬ (ОУ)

Operational amplifier (op-amp)

— это монолитные интегральные схемы, которые используются для усиления разности напряжений двух входных сигналов.



Условные обозначения ОУ

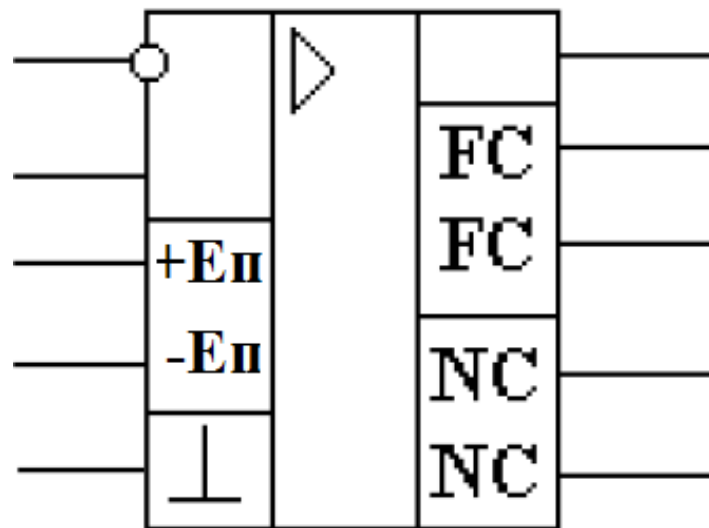


Благодаря практически идеальным характеристикам операционных усилителей реализация различных схем на их основе оказывается значительно проще, чем на отдельных транзисторах.

Большой запас по усилению, позволяющий вводить в ОУ глубокие обратные связи, обеспечивает multifunctional возможности ОУ. В результате, микросхемы ОУ стали самыми массовыми элементами аналоговой электроники.

ВЫВОДЫ ОУ

делятся на: входные, выходные и вспомогательные:



➤ *Входные выводы*

(инвертирующий и неинвертирующий).

$$U_D = U_{\text{ни}} - U_{\text{инв.}}$$

➤ *Выходной вывод.* $U_{\text{вых}} = \mu \cdot U_D$.

Входное и выходное напряжения измеряются относительно общей точки.

➤ *Выводы для подключения источника питания* (обычно расщепленные источники питания $\pm 15 \text{ В}$).

➤ *Вспомогательные выводы:*

- с метками *FC* – для подсоединения цепи, корректирующей АЧХ ОУ.
- с метками *NC* – для подключения элементов балансировки по постоянному току (установки нуля на выходе вследствие небольшой асимметрии).
- \perp –вывод металлического корпуса для соединения с общим проводом устройства, в которое входит ОУ.

Таким образом, интегральные ОУ должны иметь, как минимум, 5 выводов: 2—входных, выходной и 2 для подключения источников питания.

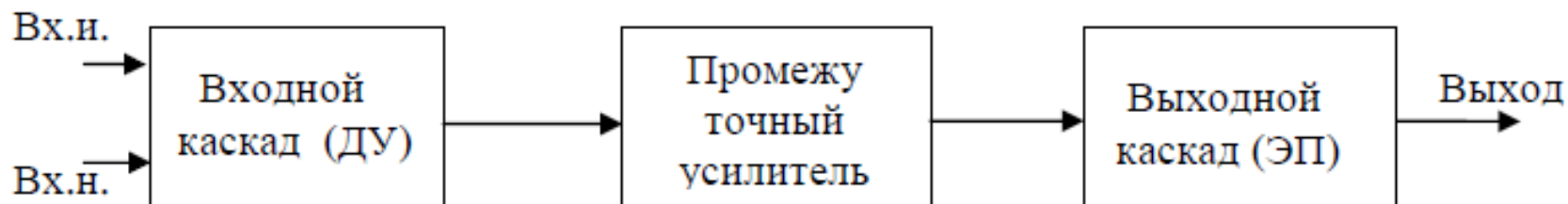
ХАРАКТЕРИСТИКИ ОУ

(для большинства практических схем)

- Коэффициент усиления по напряжению для дифференциального сигнала без обратной связи (в разомкнутой петле ОС) бесконечно велик: $\mu \rightarrow \infty$ (типичное значение $2 \cdot 10^5$).
- Входное сопротивление бесконечно велико: $R_{вх} \rightarrow \infty$ (типичное значение 2МОм).
- Выходное сопротивление очень мало: $R_{вых} \rightarrow 0$ (типичное значение 75 Ом).
- Бесконечно широкой полосой усиления.
- Бесконечно большой скоростью нарастания выходного напряжения.

ИЗ ЧЕГО СОСТОИТ ОУ?

Упрощенная блок-схема ОУ



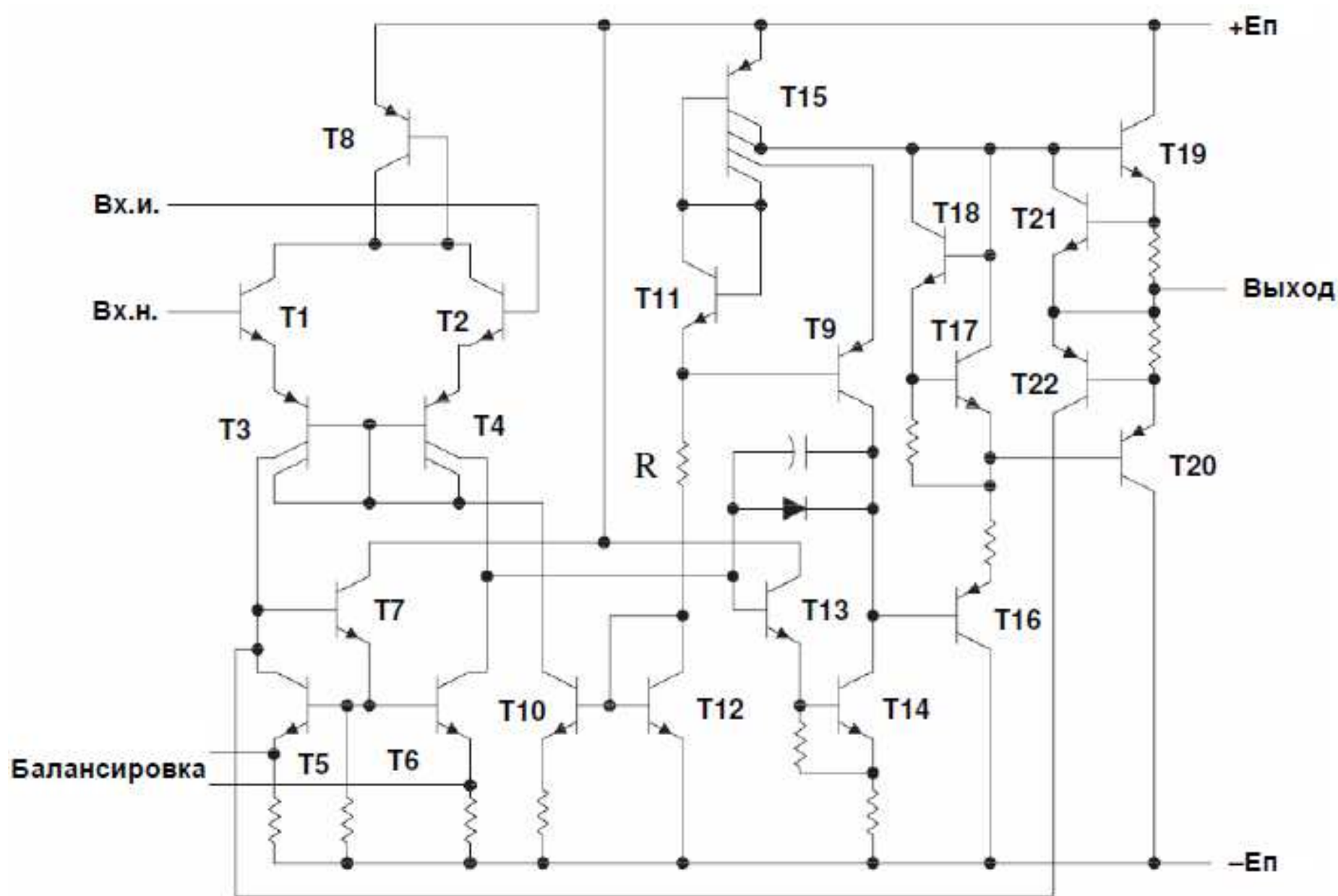
В зависимости от количества каскадов, вносящих вклад в получение нужного коэффициента по напряжению, ОУ делятся

Двухкаскадные

Трёхкаскадные

Электрическая схема ОУ μ А 741 фирмы TexasInstruments

(отечественный аналог ОУ типа 140УД7)



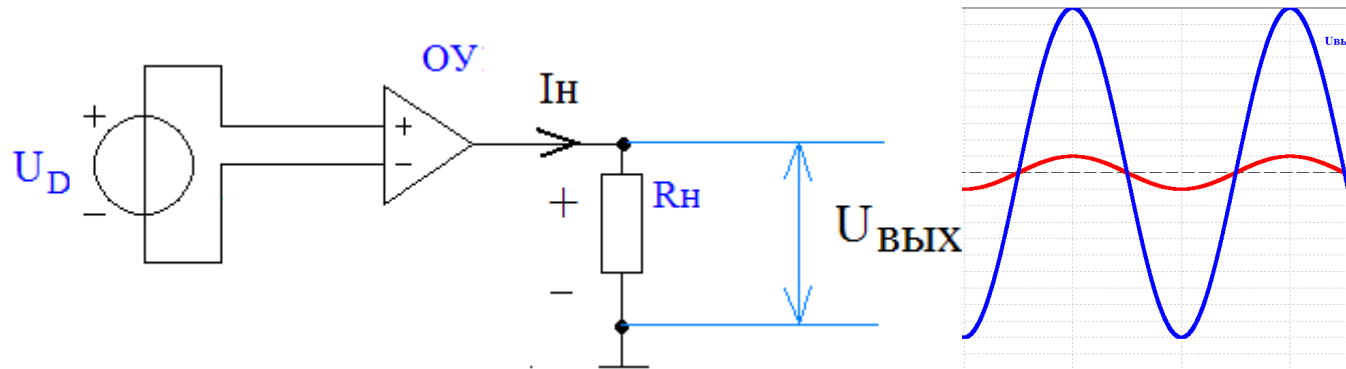
ВЫХОДНОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ОУ

Определяется разностью напряжений на входах ОУ:

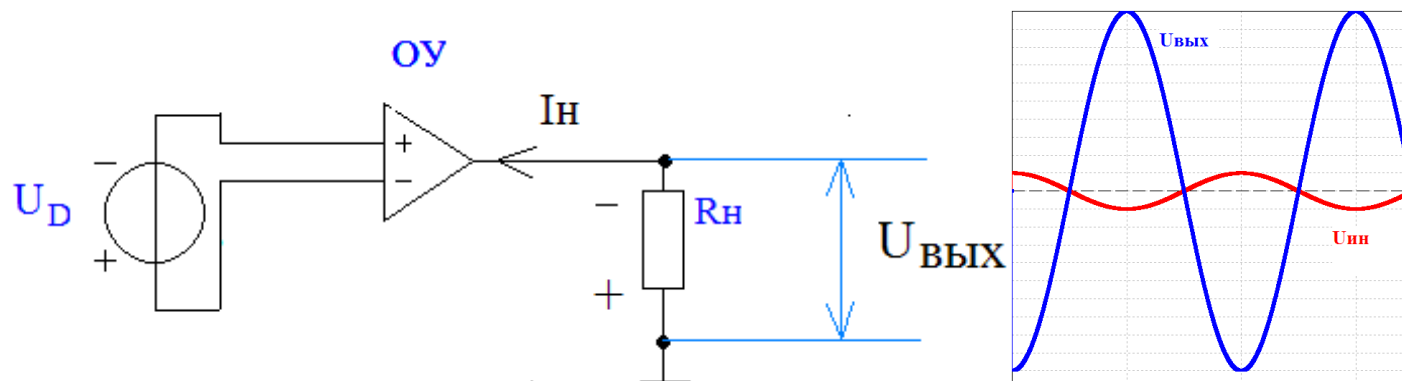
$$U_{\text{ВЫХ}} = \mu \cdot U_D, \text{ где } U_D = U_{\text{НИ}} - U_{\text{ИНВ.}}$$

Полярность выходного напряжения зависит от дифференциального сигнала:

1. Когда сигнал на неинвертирующем входе становится более положительным, чем потенциал на инвертирующем входе, выходной сигнал изменяется в положительном направлении:



2. И наоборот:

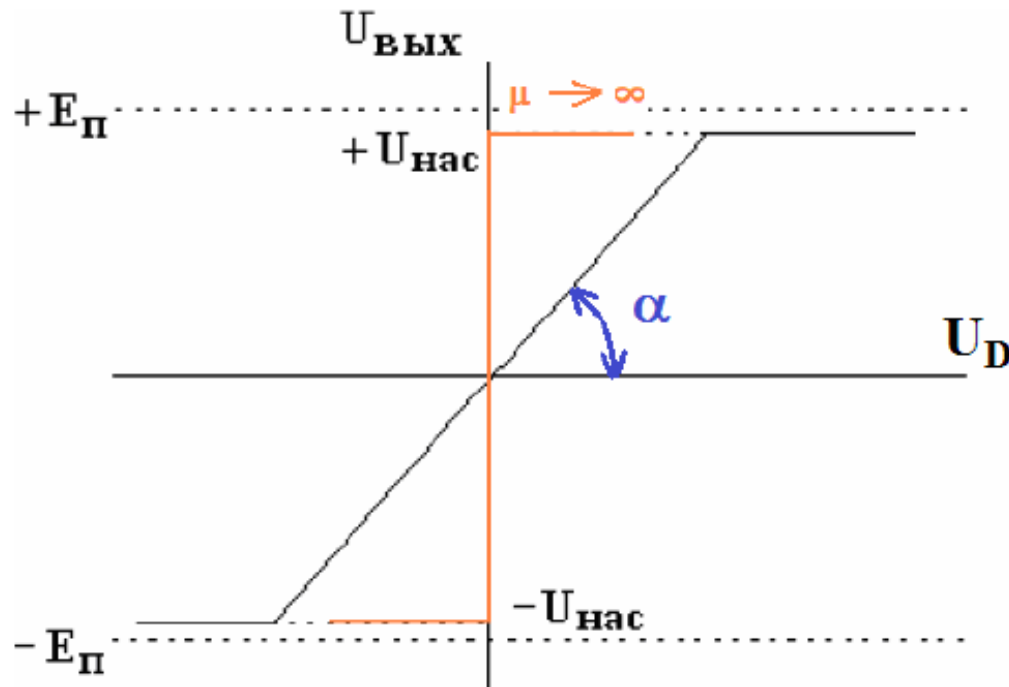


Выходное напряжение линейно зависит от U_D лишь в некотором диапазоне изменения U_D и не превышает $E_{\text{п}}$.

ПРАВИЛА, ОПРЕДЕЛЯЮЩИЕ ПОВЕДЕНИЕ ОУ

ПРАВИЛО 1

Выход ОУ стремится к тому, чтобы разность напряжений между его входами была равна нулю (линейный режим).



Для того чтобы ОУ работал в линейном режиме, в схему необходимо ввести отрицательную обратную связь (ООС).

Наклон амплитудной характеристики определяется коэффициентом усиления:

$$\operatorname{tg} \alpha = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_{\text{Д}} = K_{\text{У}}.$$

ПРАВИЛО 2

Входы ОУ тока не потребляют.

ОУ является хорошим усилителем напряжения, когда его входное сопротивление бесконечно велико. Для идеального ОУ сопротивления по обоим входам можно считать равными бесконечности.

ПАРАМЕТРЫ УСИЛЕНИЯ ОУ

Собственный коэффициент усиления:

$$\mu = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta U_D = \Delta U_{\text{ВЫХ}} / \Delta (U_{\text{НИ}} - U_{\text{ИНВ}}).$$

Идеальный ОУ: $\mu \approx \infty$.

Коэффициент усиления с ОС:

$$K_F = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВЫХ}} / (U_D - U_{\text{ОС}}),$$

где $U_{\text{ОС}} = \beta \cdot U_{\text{ВЫХ}}$.

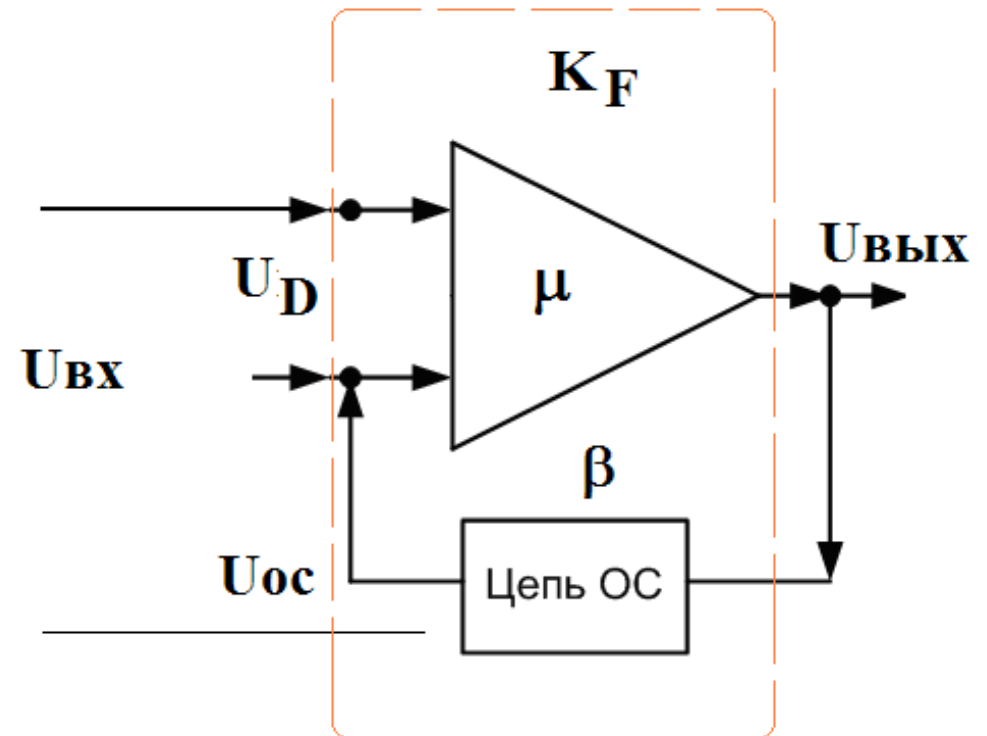
Тогда

$$K_F = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_D - U_{\text{ОС}}} = \frac{\mu}{1 - \beta \cdot \mu}.$$

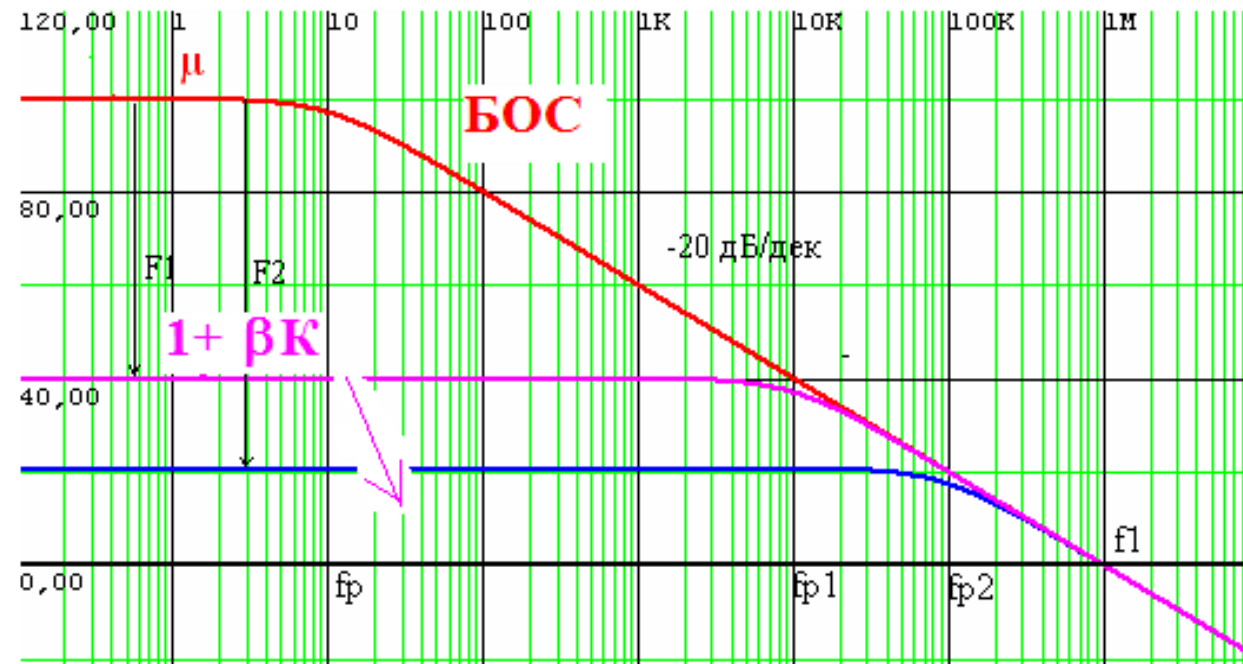
Если $\beta \cdot \mu \gg 1$, то $K_F \approx 1 / \beta$.

В случае ООС:

$$K_{F\text{ООС}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = \frac{\mu}{1 + \beta \cdot \mu}.$$



АМПЛИТУДНО-ЧАСТОТНАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ОУ БЕЗ ОС



Благодаря введению корректирующей цепи снижается усиление ОУ на высоких частотах и предотвращается паразитная генерация колебаний в схеме (с ростом частоты увеличивается фазовый сдвиг сигнала в операционном усилителе и на достаточно высокой частоте общий петлевой сдвиг фазы достигает 360°).

Считая ОУ близким по свойствам к идеальному, рассмотрим основные схемы на ОУ.

Различают четыре базовые (канонические) **схемы включения ОУ**:

- ◆ усилитель напряжения;
- ◆ усилитель тока;
- ◆ усилитель-трансформатор сопротивления;
- ◆ усилитель-трансформатор проводимости.

Тип схемы включения определяется видом обратной связи, которой охватывается ОУ. Используя эти схемы включения ОУ, удастся согласовать различные типы источников сигнала и нагрузки и получить наибольший коэффициент усиления по мощности.

Рассмотрим условия, при которых ОУ становится чувствительным к входному сигналу (току или напряжению), а выходная цепь ОУ на нагрузочном сопротивлении работает как генератор тока либо генератор напряжения.

Мощность входного сигнала P_{Γ} , напряжение сигнала U_{Γ} или ток сигнала I_{Γ} в цепи управления ОУ имеют малую, но конечную величину. Поэтому условие $P_{\Gamma} \rightarrow 0$ выполняют соответствующим выбором соотношений уровня $R_{ВХ}$ и R_{Γ} .

1. Если на вход подается сигнал в виде уровня тока I_{Γ} , то $P_{СВХ} = R \cdot I_{\Gamma}^2 \rightarrow 0$ выполняется при $R_{ВХ} \rightarrow 0$.

2. Если на вход подается сигнал в виде уровня напряжения U_{Γ} , то $P_{СВХ} = U_{\Gamma}^2 / R_{ВХ}$ при $R_{ВХ} \rightarrow \infty$.

Таким образом, при $R_{ВХ} \ll R_{Г}$ имеем очень малые потери тока на внутренней проводимости источника сигнала, при $R_{ВХ} \gg R_{Г}$ имеем очень малые потери напряжения.

В выходной цепи ОУ должен обеспечить:

- 1) постоянную величину $I_{ВЫХ}$ при любых изменениях $R_{Н}$
(напряжение $U_{ВЫХ}$ пропорционально $R_{Н}$);
- 2) постоянную величину $U_{ВЫХ}$ при любых изменениях $R_{Н}$
(ток пропорционален $R_{Н}$).

Обобщив данные, можно выделить четыре **базовых схем включения ОУ**:

- Усилитель напряжения, который управляется напряжением и с выходной нагрузки снимается напряжение (последовательная ОС по напряжению).
- Усилитель тока, который управляется током и обеспечивает заданный ток в нагрузке (параллельная ОС по току).
- Усилитель-трансформатор сопротивления, который управляется током, но с выходной нагрузки снимается напряжение (параллельная ОС по напряжению).
- Усилитель-трансформатор проводимости, который управляется напряжением, а обеспечивает заданный ток в нагрузке (последовательная ОС по току).

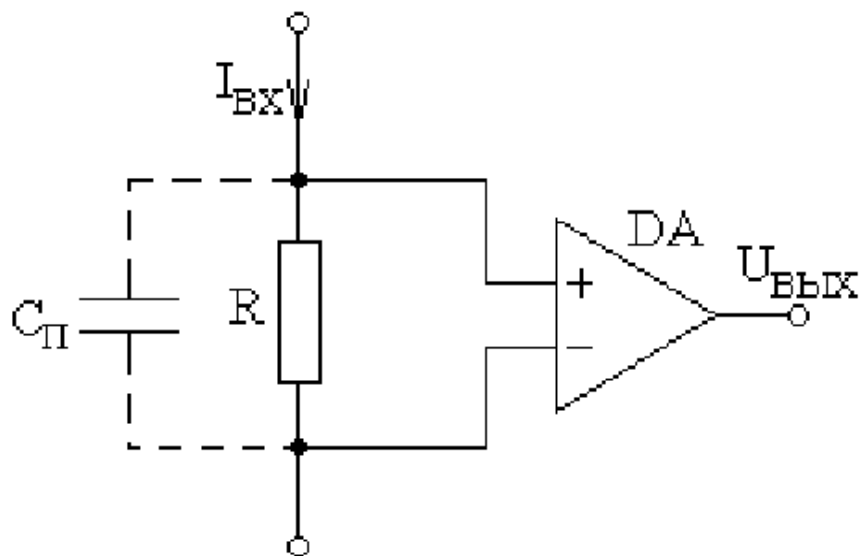
Преобразователи тока в напряжение (ПТН)

Используется для измерения малых токов. Измеряемые токи $I_{ВХ}$ составляют порядка нескольких десятков или, в крайнем случае, единицу микроампер.

Входной сигнал для усилителя напряжения:

$$U = I_{ВХ} \cdot R.$$

При измерении токов меньшей величины требуются высокоомные и малошумящие усилители с малыми токами смещения.



Простейший ПТН

Для переменного тока необходимо также учитывать влияние паразитной емкости $C_{П}$ на частоту верхнего среза: $f_c = 1/2\pi RC_{П}$

Для измерения малых токов до порядка величин в доли пикоампера используется схема ПТН для малых токов.

Весь входной ток протекает через R_{OC} и, следовательно:

$$U_{ВЫХ} = -I_{ВХ} \cdot R_{OC}.$$

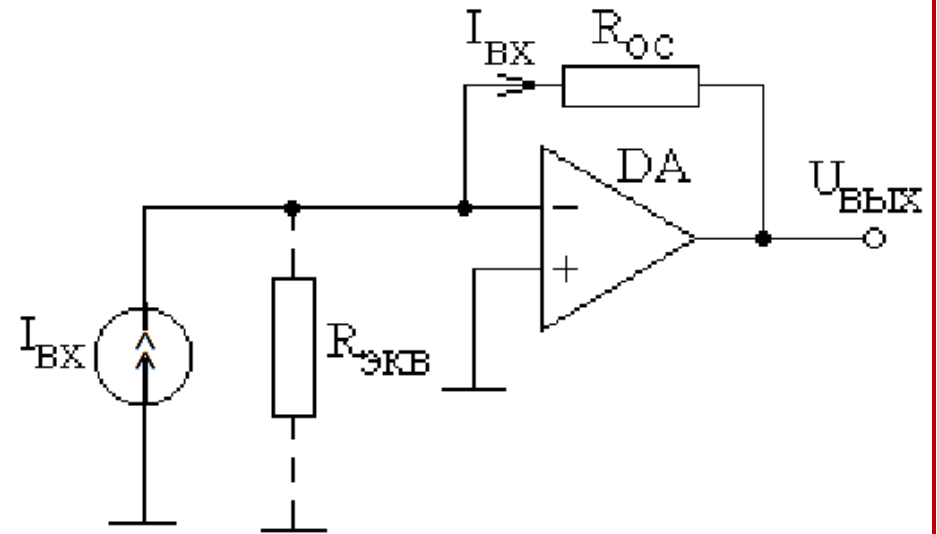
Коэффициент преобразования:

$$K_I = \frac{U_{ВЫХ}}{I_{ВХ}} = \frac{-R_{OC}}{1 + \frac{R_{ЭКВ} + R_{OC}}{K \cdot R_{ЭКВ}}} \approx -R_{OC},$$

где K – коэффициент усиления по напряжению разомкнутого ОУ,

$R_{ЭКВ}$ – эквивалентное сопротивление между входом

(–) и землей, включающее в себя сопротивление источника тока и дифференциальное входное сопротивление ОУ.



ПТН для малых токов

Входное сопротивление:

$$R_{ВХ} = \frac{R_{OC} \cdot R_{ЭКВ}}{R_{OC} + (K + 1) \cdot R_{ЭКВ}}.$$

Учитывая, что обычно $K \cdot R_{ЭКВ} \gg R_{OC}$, можно записать:

$$R_{ВХ} \approx \frac{R_{OC}}{1 + K}.$$

Выходное напряжение смещения: $U_{СМ.ВЫХ} = U_{СДВ} + I_{СМ} R_{OC},$

Минимальное значение измеряемого тока определяется $U_{СДВ}$ – входное напряжение сдвига, $I_{СМ}$ – входной ток смещения.

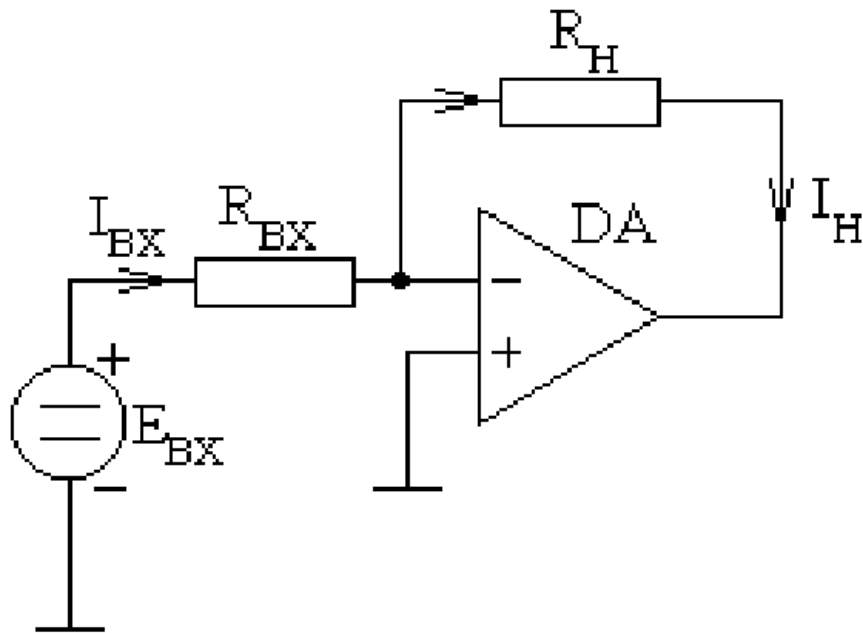
Рекомендации для проектирования ПТН с целью улучшения метрологических характеристик:

1. При входных токах менее 1 мкА желательно использовать ОУ с полевыми входными транзисторами, имеющими очень малые входные токи.
2. Необходимо обеспечивать выполнение условия $R_{ЭКВ} \gg R_{ОС}$, так как $U_{СДВ}$ усиливается схемой в $- R_{ОС}/R_{ЭКВ}$ раз.
3. Погрешность, обусловленную $I_{СМ}$, можно значительно уменьшить, заземлив вход (+) не непосредственно, а через резистор, равный $R_{ОС}$.
4. Дрейф $U_{СДВ}$ и $I_{СМ}$ вызывается изменением температуры. Поэтому целесообразно принятие мер по уменьшению нагрева ОУ в схеме ПТН.
5. В схеме ПТН лучше использовать прецизионные высокостабильные резисторы.

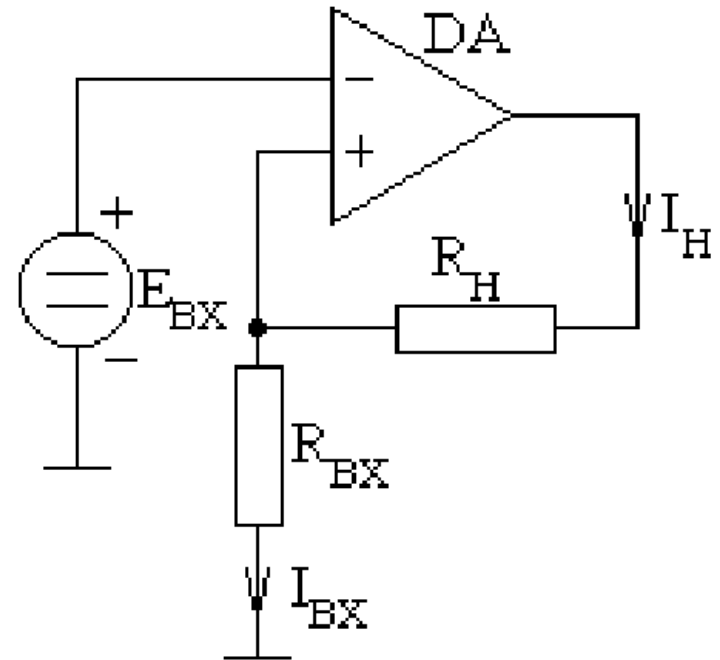
Преобразователи напряжения в ток

В ряде случаев возникает необходимость управлять током нагрузки при помощи входного напряжения. При этом изменение напряжения на нагрузке и колебания ее сопротивления не должны нарушать однозначности зависимости $I_H = f(U_{BX})$.

ПНТ с плавающей нагрузкой:



а. – с инвертирующим усилителем



б. – с неинвертирующим усилителем

Параметры	для инвертирующего преобразователя	для неинвертирующего преобразователя
Входное сопротивление	R_{BX}	$R_{BX} \cdot \text{синф}$ входное сопротивление ОУ для синфазного сигнала
Выходной ток	$I_H = -E_{BX}/R_{BX}$	$I_H = E_{BX}/R_{BX}$
Максимальный выходной ток	$I_{ВЫХМАХ} = U_{НАС}/R_H$	$I_{ВЫХМАХ} = U_{НАС}/(R_{BX} + R_H)$

где $U_{НАС}$ – выходное напряжение ОУ в режиме насыщения.

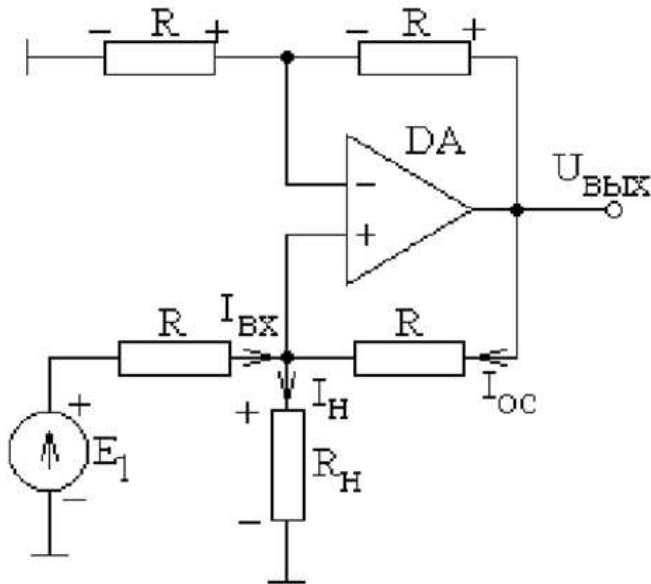
Увеличение тока нагрузки может быть достигнуто применением транзистора, благодаря способности транзистора усиливать ток. Получим выходной ток:

$$I_H = h_{21} \cdot R_{OC},$$

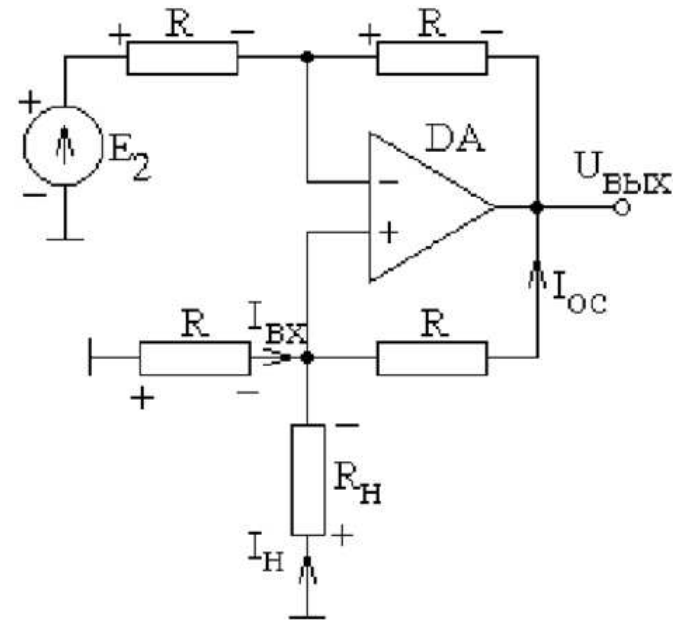
где h_{21} – коэффициент передачи тока транзистора.

ПНТ с заземленной нагрузкой и источником сигнала

а. – управляемый со стороны входа (+)



б. – управляемый со стороны входа (-)



для управления со стороны неинвертирующего входа: $U_{\text{ВЫХ}} = 2 \cdot U_{\text{Н}}$.

$$I_{\text{Н}} = I_{\text{ВХ}} + I_{\text{ОС}} = \frac{E_1 - U_{\text{Н}}}{R} + \frac{U_{\text{ВЫХ}} - U_{\text{Н}}}{R} \approx \frac{E_1}{R}$$

То есть ток нагрузки прямо пропорционален управляющему напряжению E_1 . Все четыре резистора схемы должны быть согласованы (допуск 0.5...1%).

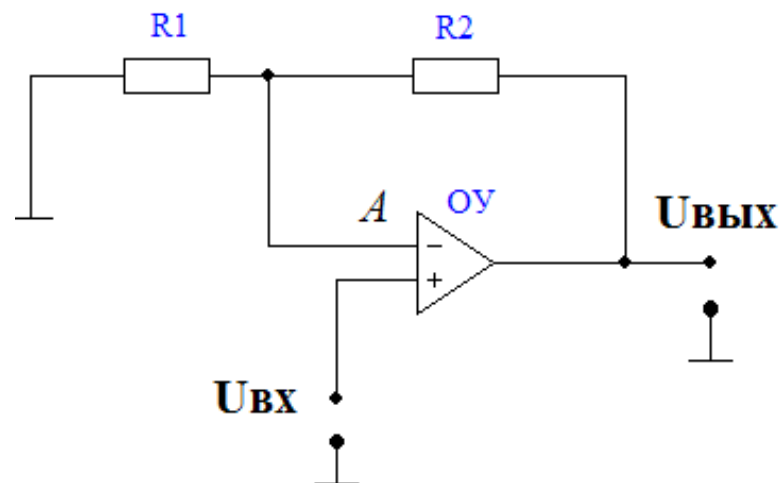
для управления со стороны инвертирующего входа: $U_{\text{ВЫХ}} = 2U_{\text{Н}} + E_2$.

$$U_{\text{Н}} = U_{\text{R}} - E_2 = \frac{E_2 + U_{\text{ВЫХ}}}{2} - E_2 = \frac{U_{\text{ВЫХ}} - E_2}{2} \cdot I_{\text{Н}} = I_{\text{ОС}} - I_{\text{ВХ}} = \frac{E_2}{R}.$$

$$\text{Ток } I_{\text{ОС}} = \frac{U_{\text{R}}}{R} = \frac{(E_2 + U_{\text{ВЫХ}})}{2R}, \text{ а ток } I_{\text{ВХ}} = \frac{U_{\text{Н}}}{R} = \frac{(U_{\text{ВЫХ}} - E_2)}{2R}.$$

НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ ОУ НАПРЯЖЕНИЯ

Полезный сигнал подается на прямой вход ОУ, а сигнал ООС – на инвертирующий. Имеет место последовательная отрицательная обратная связь по напряжению.



Цепь обратной связи: делитель напряжения R_1, R_2 .

Проанализируем схему:

$$U_A = U_{вх}.$$

Входное напряжение: $U_D = U_{ни} - U_{инв}$. Сигнал обратной связи, подаваемый на инвертирующий вход ОУ, вычитается из входного сигнала, подаваемого на неинвертирующий вход ОУ.

В соответствии с правилом 2:

$$U_A = U_{вых} \cdot R_1 / (R_1 + R_2), \text{ или}$$

коэффициент усиления по напряжению равен: $U_{вых} / U_{вх} = 1 + R_2 / R_1$, т.е. определяется только внешними цепями ООС.

Коэффициент обратной связи: $\beta = R_1 / (R_1 + R_2)$.

Входной импеданс схемы: $Z_{вх} = Z_{вхБОС} \cdot (1 + R_2 / R_1) / \mu$.

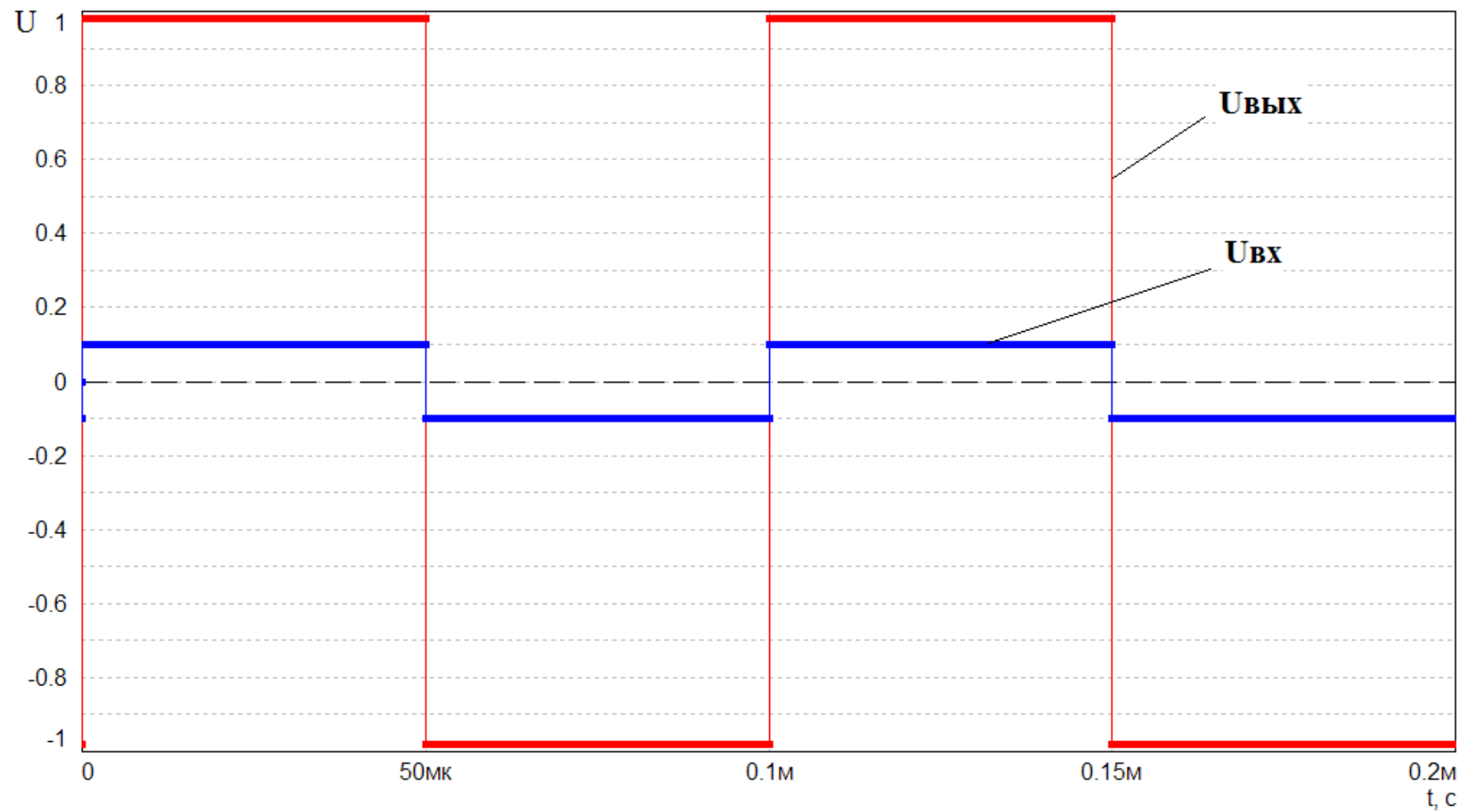
Достигает величины $10^9 - 10^{12}$ Ом.

$Z_{вхБОС}$ – входное сопротивление ОУ, не охваченного обратной связью.

Выходной импеданс схемы очень мал (доли Ом): $Z_{вых} = Z_{выхБОС} / (1 + \beta \cdot \mu)$.

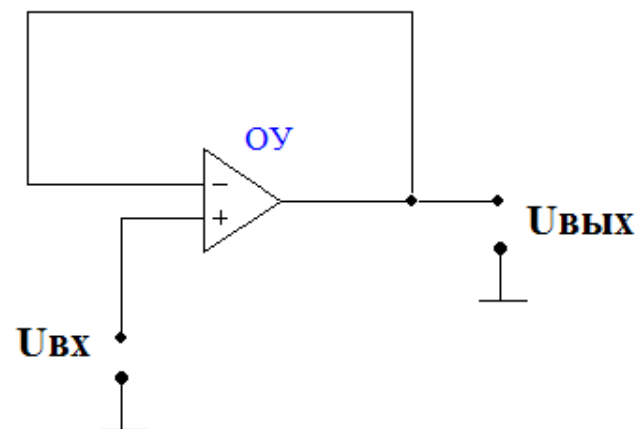
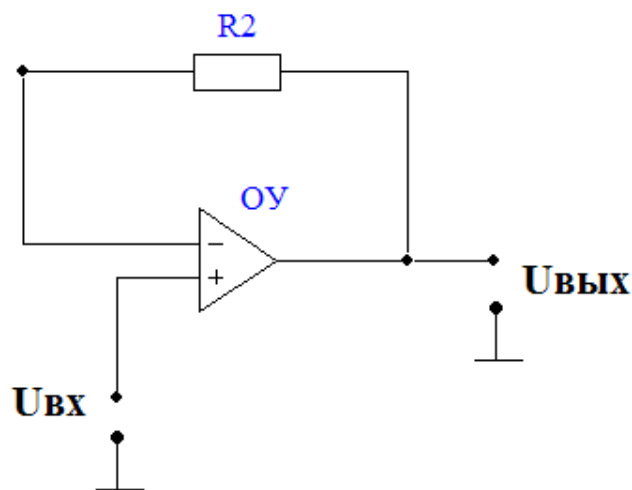
$Z_{выхБОС}$ – выходное сопротивление ОУ, не охваченного обратной связью.

ПХ НЕИНВЕРТИРУЮЩЕГО ОУ НАПРЯЖЕНИЯ



ЧАСТНЫЙ СЛУЧАЙ

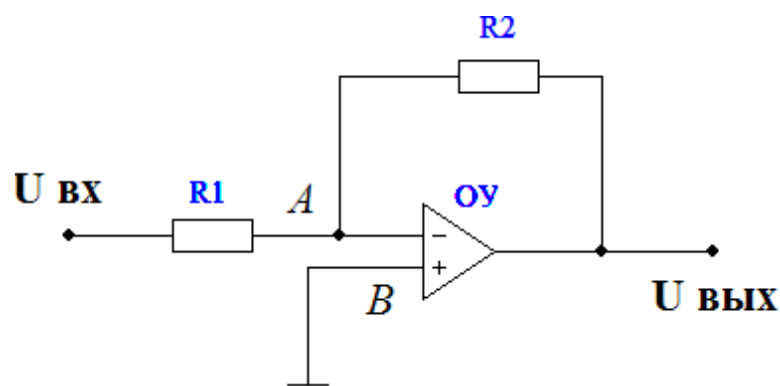
Если сопротивление резистора отсутствует ($R_1 \rightarrow \infty$), а сопротивление резистора $R_2 = 0$, неинвертирующий ОУ представляет собой повторитель напряжения с коэффициентом усиления 1.



Он характеризуется высоким быстродействием, большим входным и малым выходным сопротивлениями и удобен для «развязки» цепей с «неудобным» сочетанием импедансов (согласующий каскад).

ИНВЕРТИРУЮЩИЙ ОУ НАПРЯЖЕНИЯ

Имеет место параллельная ООС по напряжению.



Цепь обратной связи: делитель напряжения R1, R2.
В пределах линейной области ОУ обеспечивает такую величину выходного напряжения, что напряжение на его инвертирующем входе практически равно 0 (мнимое заземление, квазинуль сигнала).

Воспользовавшись ранее рассмотренными правилами, проанализируем схему:

$$U_B = U_A = 0, \text{ значит, } U_{R2} = U_{\text{ВЫХ}}, U_{R1} = U_{\text{ВХ}}.$$

Входное напряжение:

$$U_D = U_{\text{НИ}} - U_{\text{ИНВ}} - \text{отрицательная величина.}$$

В соответствии с правилом 2: $U_{\text{ВЫХ}}/R2 = -U_{\text{ВХ}}/R1$, или

коэффициент усиления по напряжению равен: $U_{\text{ВЫХ}}/U_{\text{ВХ}} = -R2/R1$.

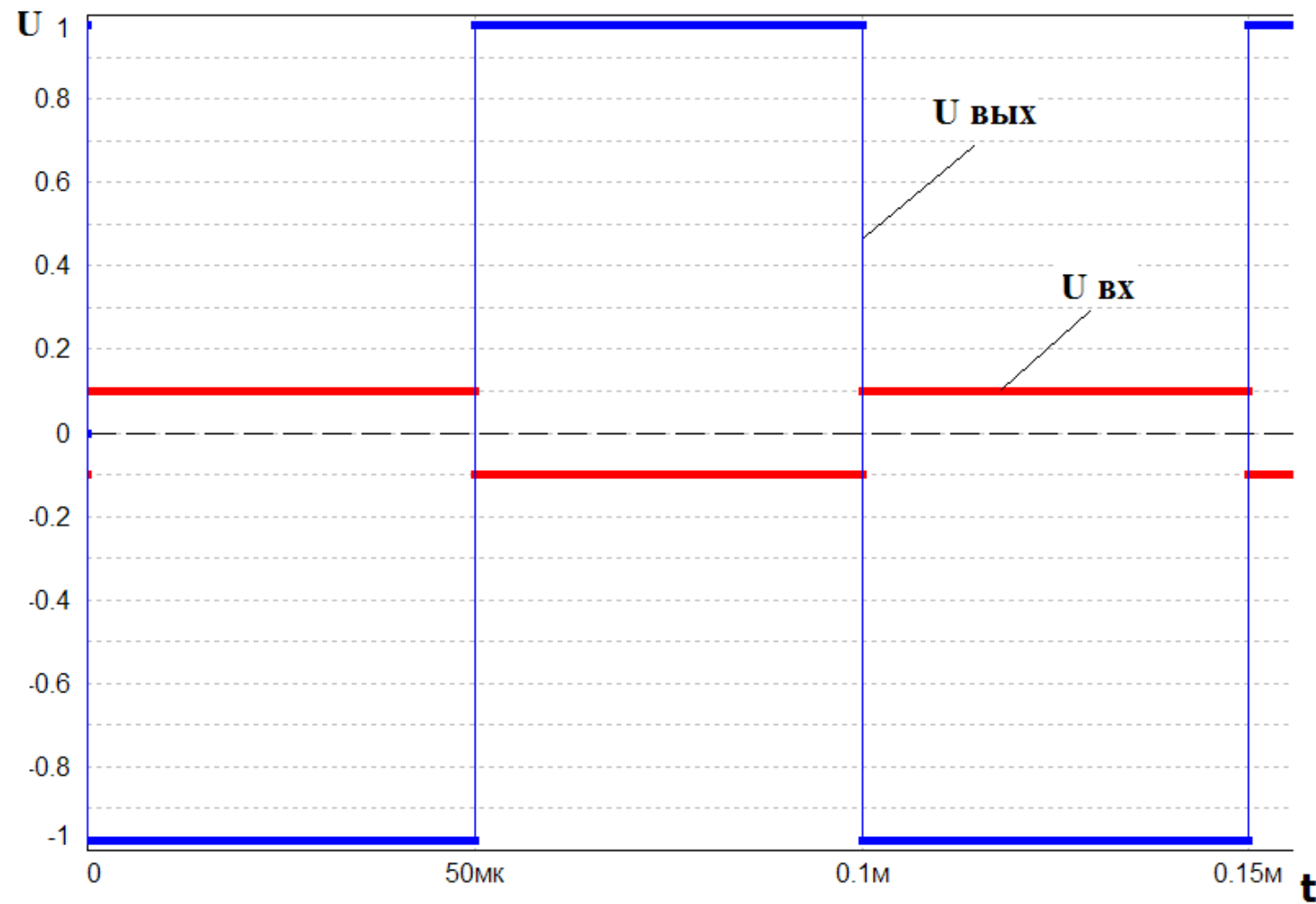
Коэффициент обратной связи: $\beta = -R1/R2$.

Входной импеданс схемы: $Z_{\text{ВХ}} = R1$, существенно меньше собственного входного сопротивления ОУ.

Выходной импеданс схемы: $Z_{\text{ВЫХ}} = Z_{\text{ВЫХБОС}} / (1 + \beta \cdot \mu)$.

$Z_{\text{ВЫХБОС}}$ – выходное сопротивление ОУ, не охваченного обратной связью.

ПХ ИНВЕРТИРУЮЩЕГО ОУ НАПРЯЖЕНИЯ



Фаза выходного напряжения противоположна фазе входного напряжения.

ИНТЕГРАТОР

Используется в схемах управления во всех тех случаях, когда надо решать дифференциальное уравнение или надо вычислить интеграл напряжения. Величина входного сигнала в общем виде описывается уравнением:

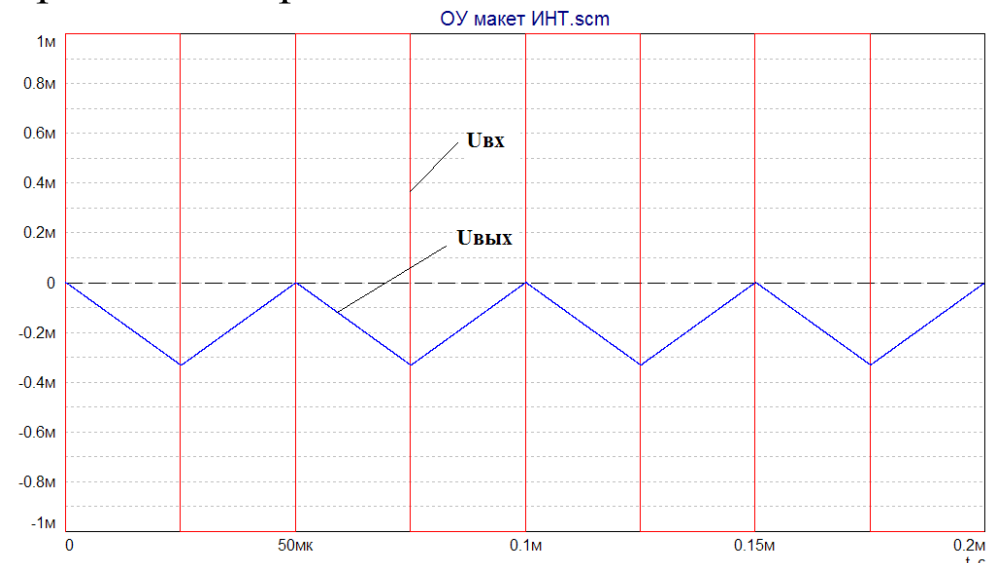
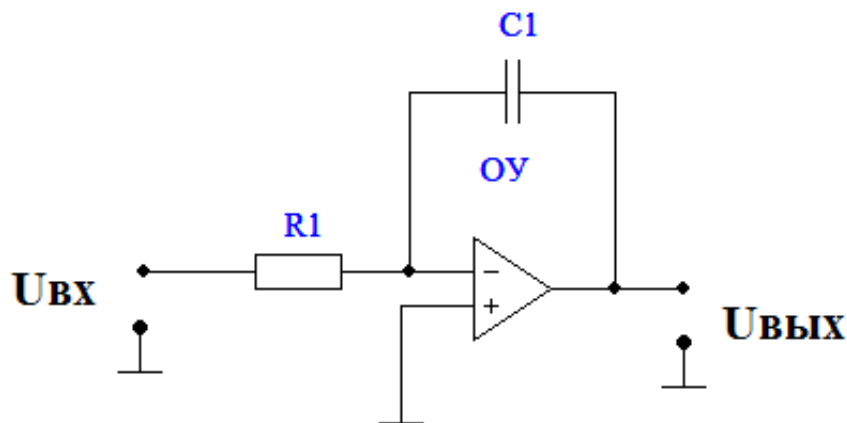
$$U_{\text{вх}}(t) = U_{\text{вх}}(0) + K \int_0^t U_{\text{вх}}(t) dt,$$

где K – коэффициент пропорциональности, $U_{\text{вых}}(0)$ – начальное значение выходного сигнала в момент времени $t = 0$. При любом сигнале на входе изменение сигнала на выходе должно начинаться от того значения, которое выходной сигнал имел к моменту прихода входного сигнала.

Интегратор построен на основе инвертирующего усилителя, в котором резистор ООС R_2 заменён конденсатором C . Тогда выходной сигнал определяется как

$$U_{\text{вых}}(t) = - (U_{\text{вх}}(t)/RC) \cdot t + U_{\text{вх}}(0).$$

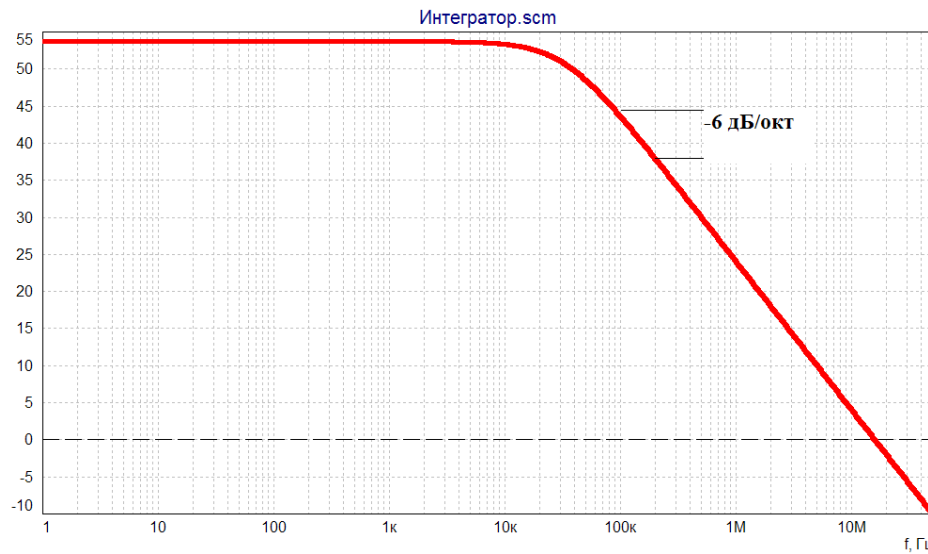
То есть выходной сигнал линейно возрастает со временем. Поэтому данная схема оказывается пригодной для формирования пилообразного напряжения.



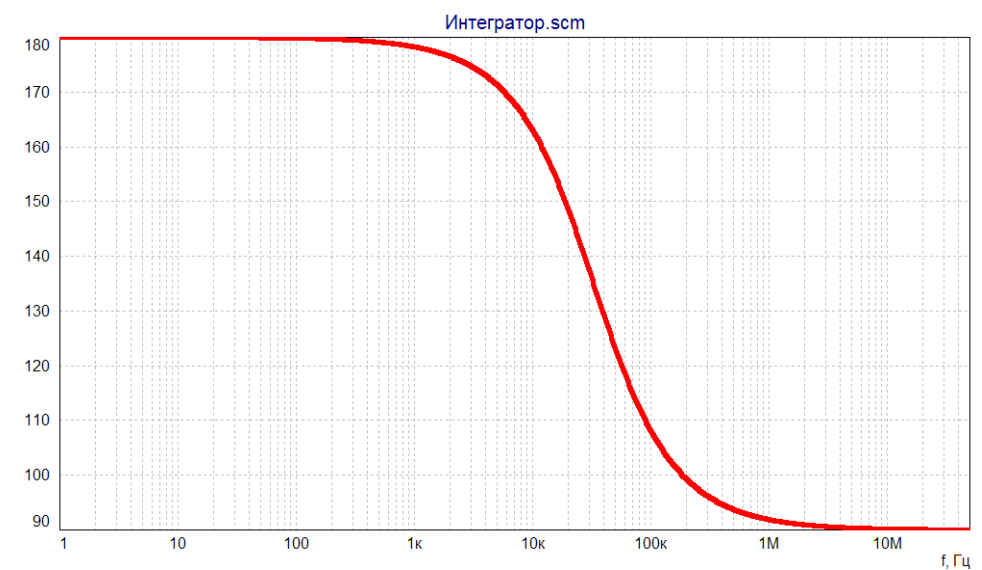
АЧХ и ФЧХ ИНТЕГРАТОРА

Амплитуда выходного сигнала обратно пропорциональна частоте. Поэтому наклон АЧХ интегратора составляет – 6 дБ на октаву. Это является простым критерием определения работы схемы как интегратора.

АЧХ



ФЧХ

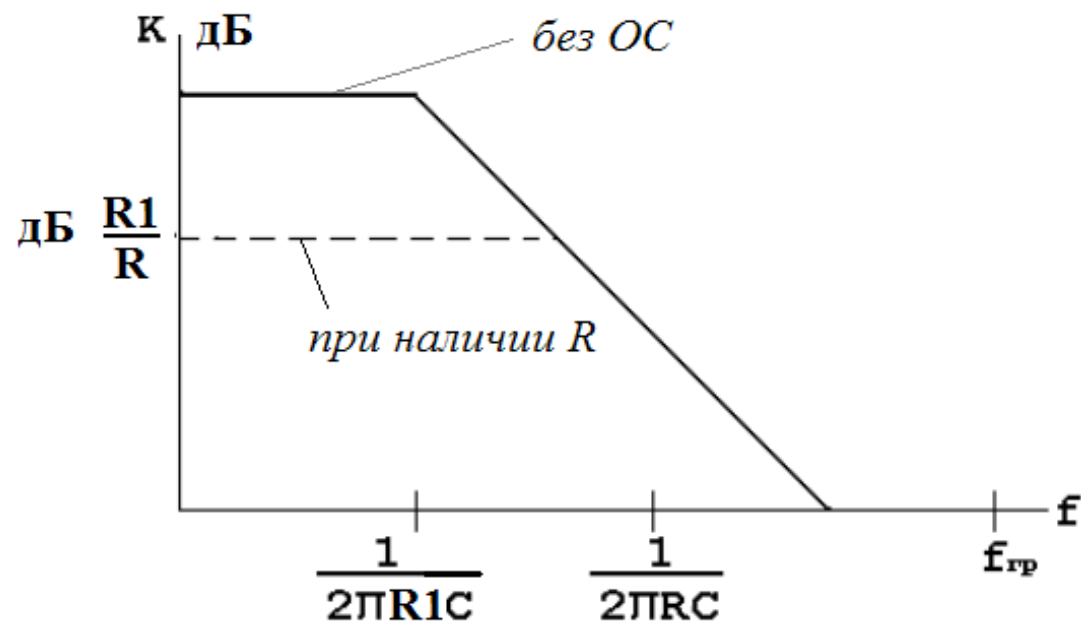
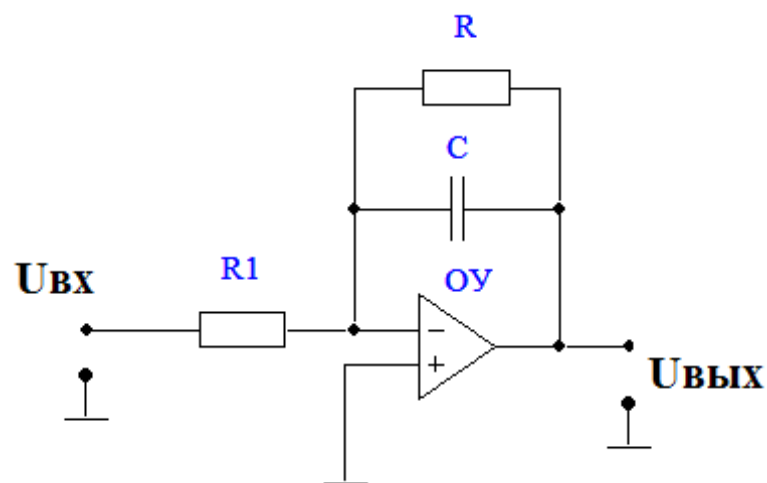


ООС в исследуемой схеме вызывает фазовый сдвиг, значит, коэффициент обратной связи будет комплексной величиной: $\beta = j\omega RC / (1 + j\omega RC)$.

Для ВЧ $\beta \rightarrow 1$, фазовый сдвиг сигнала будет нулевым.

РЕАЛЬНЫЙ ИНТЕГРАТОР

Реальный ОУ имеет некоторое напряжение сдвига и нуждается в некотором токе смещения. Напряжение сдвига интегрируется как ступенчатая функция, что дает дополнительный линейно-нарастающий (или падающий) выходной сигнал. Чтобы уменьшить напряжение сдвига конденсатор в цепи ООС шунтируют резистором R.



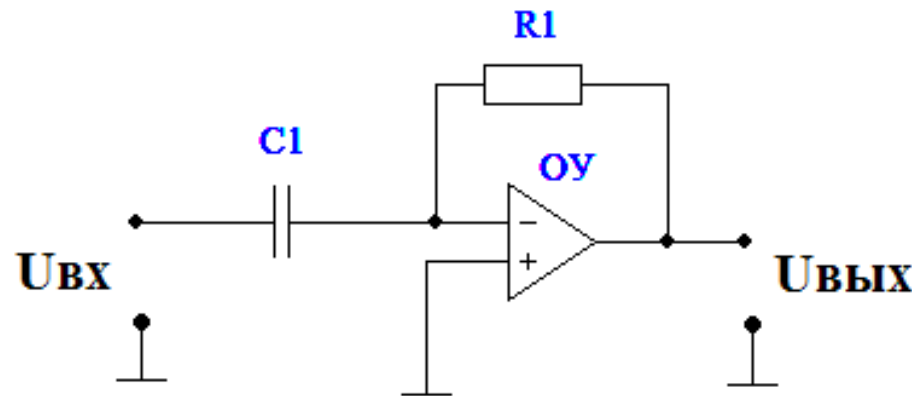
Такое решение приводит к улучшению стабильности на НЧ и увеличению граничной частоте: $f_H = (2\pi RC)^{-1}$.

Частотная характеристика стабилизированного по сдвигу интегратора (R // C включено) представляет собой частотную характеристику фильтра НЧ со спадом 6 дБ/окт и коэффициентом усиления, большим единицы.

ДИФФЕРЕНЦИАТОР

Дифференциатор используется тогда, когда надо получить выходной сигнал, пропорциональный скорости изменения входного.

Поменяв местами сопротивление и конденсатор в интеграторе, получим дифференциатор.



При дифференцировании усилитель должен пропускать только переменную составляющую входного напряжения и коэффициент усиления дифференцирующей схемы должен возрасти при увеличении скорости изменения входного сигнала.

Входное напряжение равно напряжению на конденсаторе. Предполагая, что ОУ идеальный, получим ток через сопротивление ОС: $I_{R1} = I_{C1}$. Выходное напряжение определяется как $U_{вых} = R1 \cdot I_{R1} = -R \cdot I_{C1}$, поэтому на выходе будет создаваться напряжение, пропорциональное скорости изменения входного:

$$U_{вых} = -RC \cdot (dU_{вх}/dt).$$

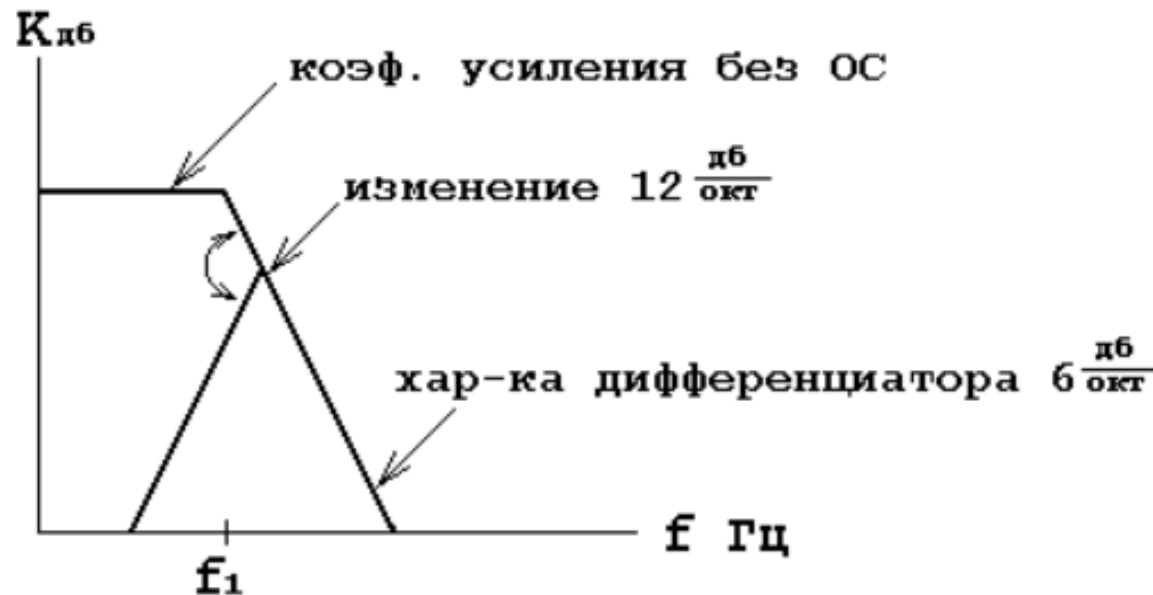
АЧХ ДИФФЕРЕНЦИАТОРА

АЧХ дифференциатора представляет собой прямую с наклоном +6дБ/окт.

Схема имеет тенденции к потере устойчивости в той области частот, где частотная характеристика дифференциатора пересекается с имеющей спад 6 дБ/окт характеристикой скорректированного усилителя.

Частотная характеристика разомкнутого контура ОС имеет в некоторой части своего частотного диапазона спад 12 дБ/окт, при этих условиях возможно самовозбуждение.

Коэффициент усиления: $K_{OC} = U_{вых} / U_{вх} = -R/Z_C = -j\omega RC$.

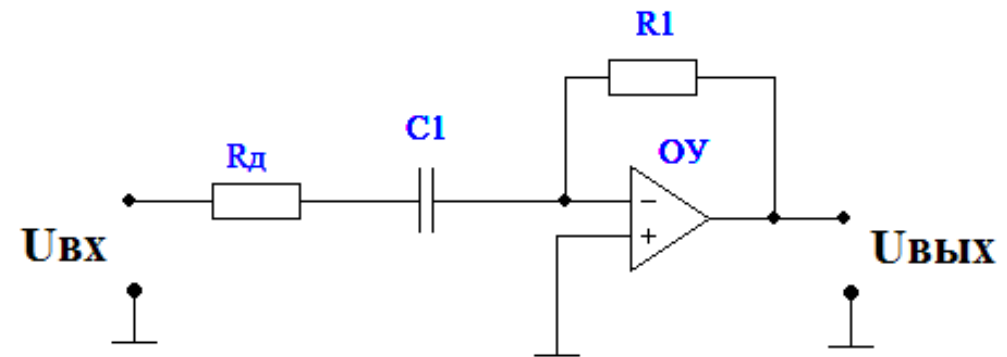


Для исключения возбуждения необходимо исключить встречу асимптот с суммарным взаимным наклоном $40\text{дБ/дек} = 12\text{дБ/окт}$.

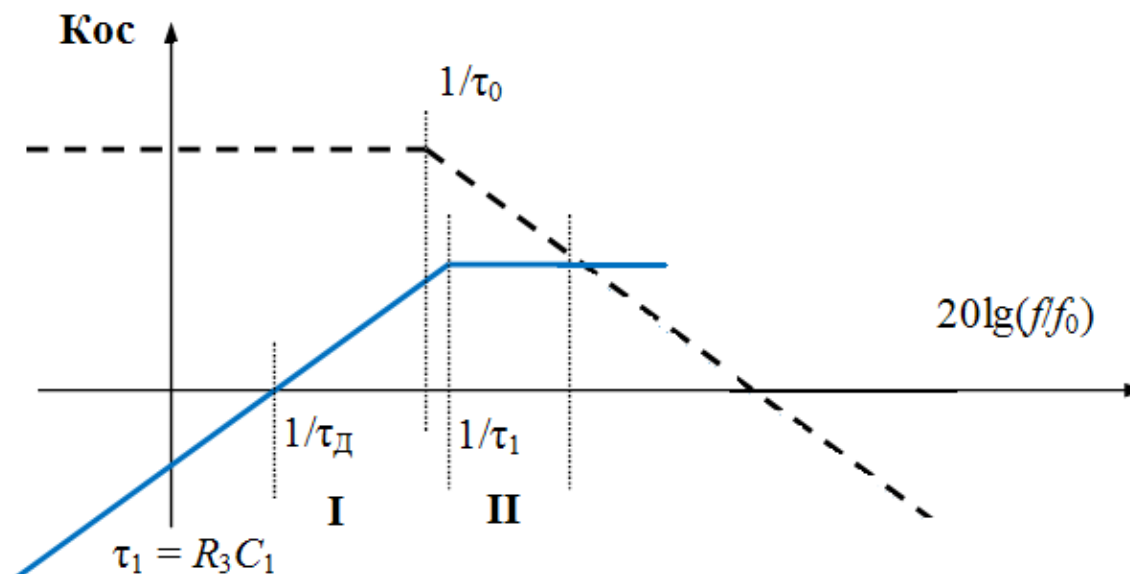
Для стабилизации работы схемы дифференциатора необходимо ввести в АЧХ промежуточный участок с нулевым наклоном— с помощью дополнительного резистора R_d , включенного последовательно с конденсатором.

Введение такой коррекции практически не влияет на диапазон рабочих частот дифференциатора, так как на ВЧ из-за снижения усиления в цепи ООС она всё равно работает неудовлетворительно.

Величина $R_d C_1$ выбирается такой, что на граничной частоте $(1/\tau_0)$ $K_{OC} = 1$.



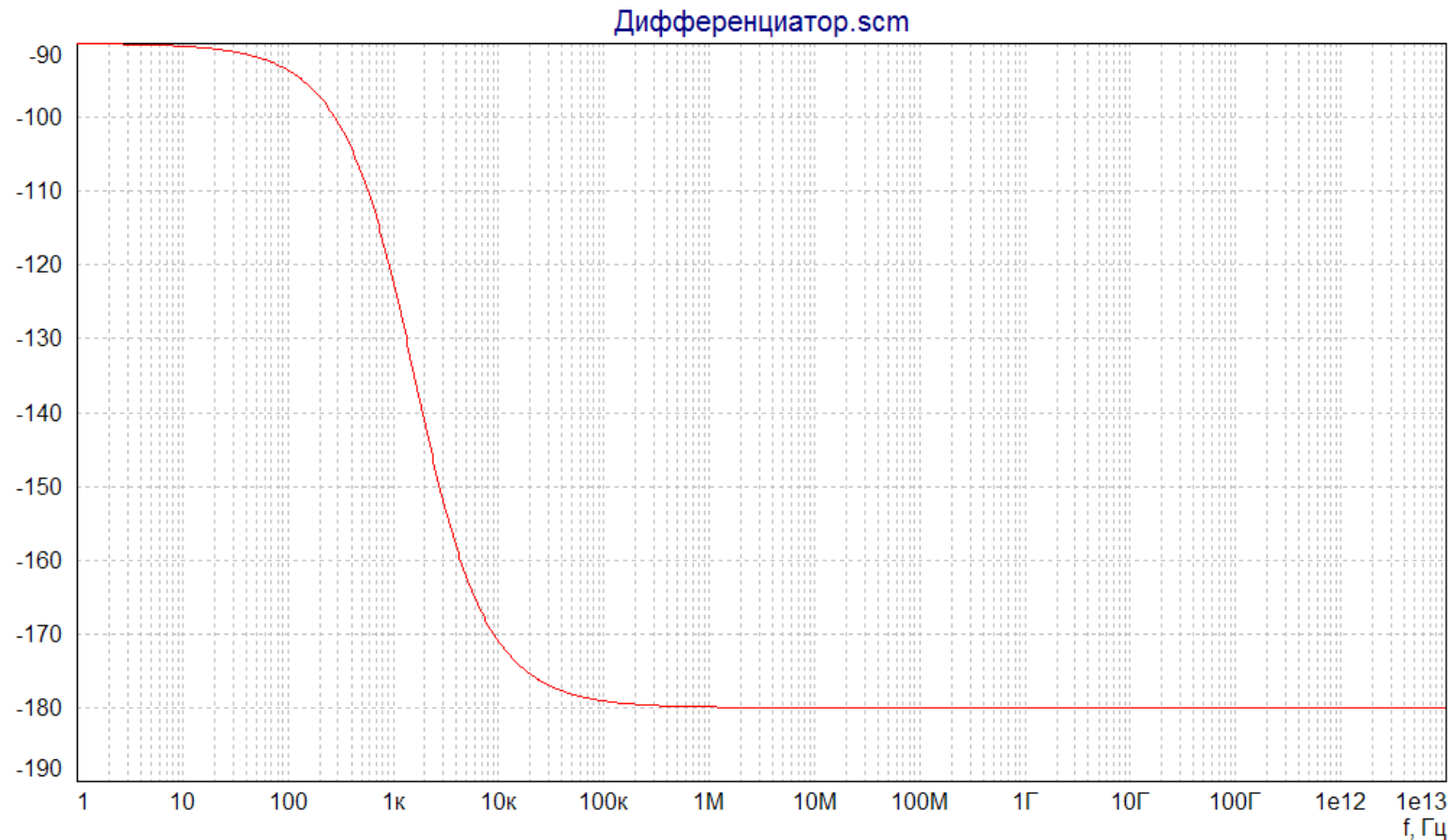
АЧХ дифференциатора:



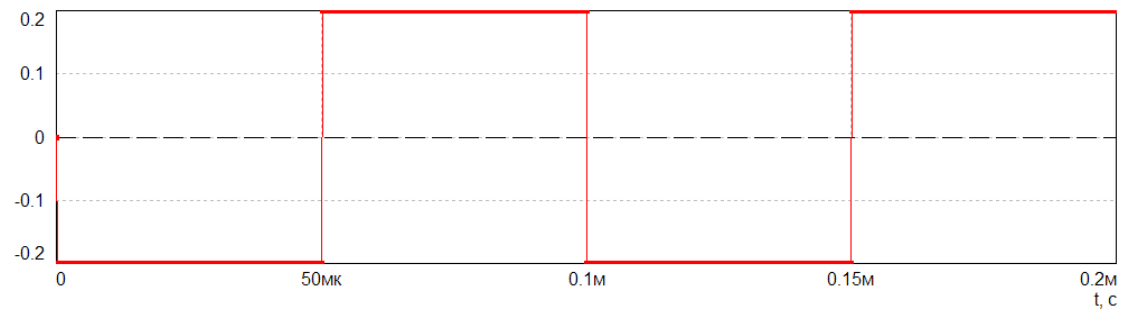
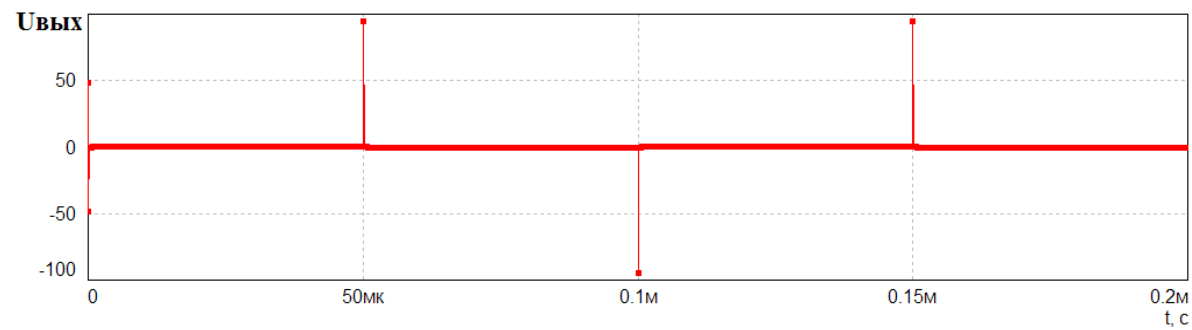
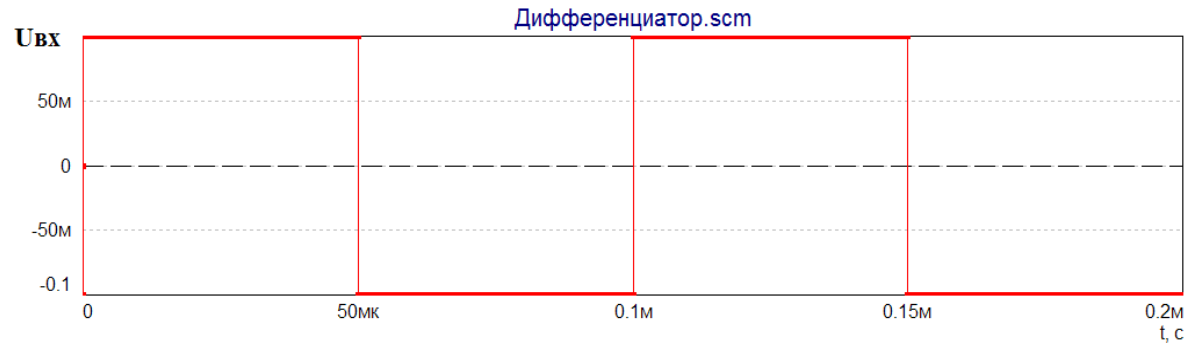
Участок I –
участок дифференцирования
Участок II –
участок пропускания $R_d C_1$ -фильтра

ФЧХ ДИФФЕРЕНЦИАТОРА

ООС при больших частотах входного сигнала вызывает фазовое опережение, составляющее около 90° . Оно суммируется с фазовым опережением ОУ, которое может составлять 90° . Переворот фазы наблюдается в районе встреч асимптот АЧХ с корректирующей, что свидетельствует о самовозбуждении схемы.



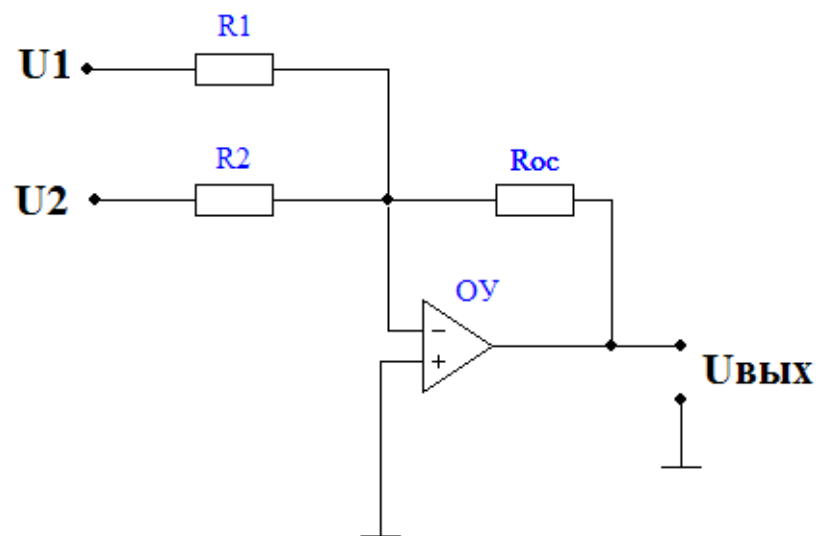
ПХ ДИФФЕРЕНЦИАТОРА



ИНВЕРТИРУЮЩИЙ СУММАТОР

Инвертирующий сумматор формирует алгебраическую сумму двух напряжений и меняет знак на обратный.

Схема алгебраического сумматора на два входа



Входные сигналы полностью развязаны, т.е. их взаимное влияние отсутствует вследствие виртуального нулевого потенциала на инвертирующем входе ОУ. Они могут быть как положительными, так и отрицательными.

Если $R_{\text{вх}}$ ОУ достаточно велико и ток смещения пренебрежительно мал по сравнению с током обратной связи (ОС), то по закону Кирхгофа:

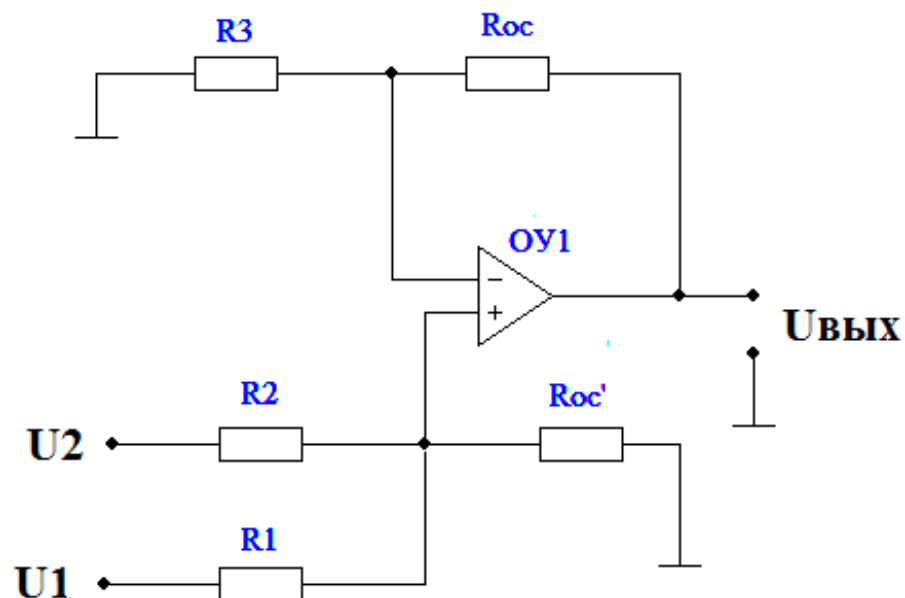
$$I_1 + I_2 = I_{\text{ос}}.$$

Если коэффициент усиления без ОС достаточно велик $\mu \rightarrow \infty$, так что $U_D = 0$, то $I_1 = U_1/R_1$, $I_2 = U_2/R_2$, $I_{\text{ос}} = U_{\text{вых}}/R_{\text{ос}}$.

Значит, выходное напряжение $U_{\text{вых}} = -(U_1 \cdot R_{\text{ос}}/R_1 + U_2 \cdot R_{\text{ос}}/R_2)$.

НЕИНВЕРТИРУЮЩИЙ СУММАТОР

Существенный недостаток схемы – отсутствие точки виртуального нуля на неинвертирующем входе. Вследствие этого изменение коэффициента передачи любой входной ветви влечет за собой изменение коэффициентов передачи остальных входных ветвей.



Выходное напряжение: $U_{ВЫХ} = U_1 + U_2$.

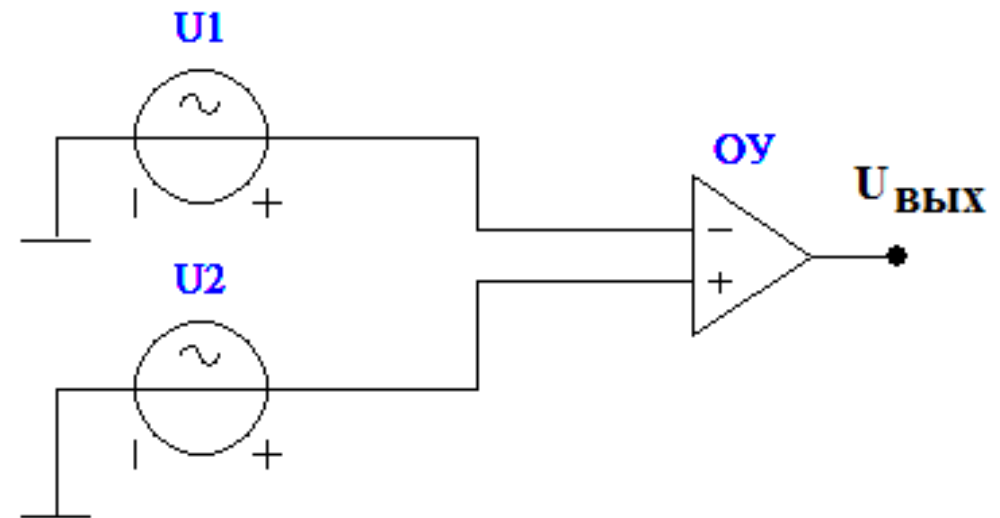
Неинвертирующий сумматор - это вариант схемы сложения-вычитания, в котором использованы только неинвертирующие входы.

КОМПАРАТОР

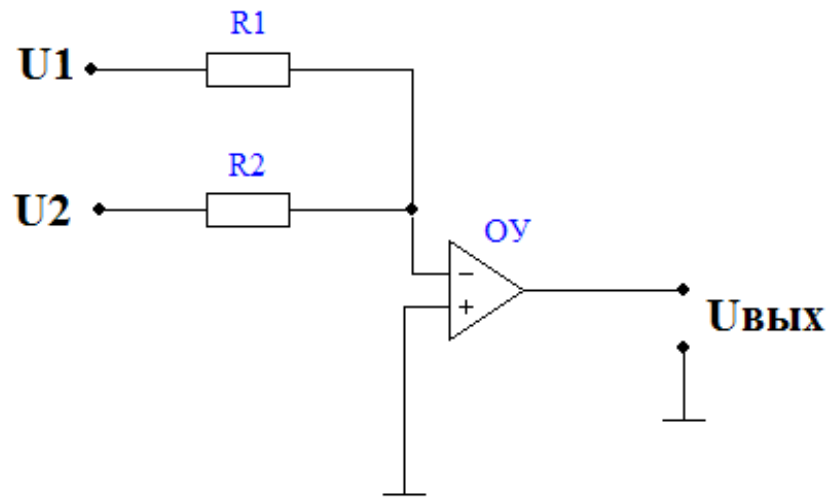
Устройство, позволяющее осуществить сравнение измеряемого входного напряжения U_{ex} (например, на инвертирующий вход) с опорным напряжением U_{on} (например, неинвертирующий вход).

В стандартных компараторах сигнал на выходе может принимать два значения, соответствующих логическому нулю или логической единице в выбранном элементном базисе (ЭСЛ, ТТЛ, КМОП). В ряде применений в качестве компаратора возможно и целесообразно применять ОУ.

При сравнении напряжений одного знака одно из них подается на инвертирующий вход ОУ, а другое на неинвертирующий.



Если нужно сравнить два напряжения противоположных знаков, то их подают через резисторы на один из входов при подключения другого к общей точке схемы.



Сигналы на входах должны быть разнополярными, чтобы токи вычитались. Поскольку неинвертирующий вход подсоединен к земле, синфазная составляющая отсутствует.

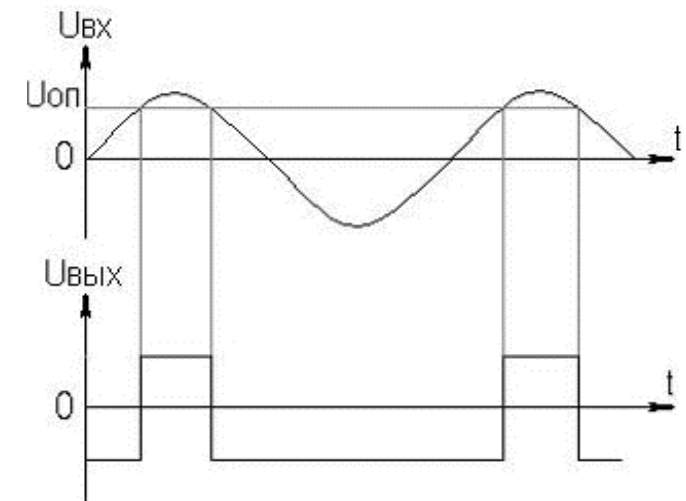
Входное сопротивление

по входу 1 – R_1 , по входу 2 – R_2 .

Алгоритм работы компаратора описывается выражениями:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХmax+}} = U^1, \text{ если } U_{\text{ВХ}} < U_{\text{оп}},$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХmax-}} = U^0 \text{ если } U_{\text{ВХ}} > U_{\text{оп}}.$$



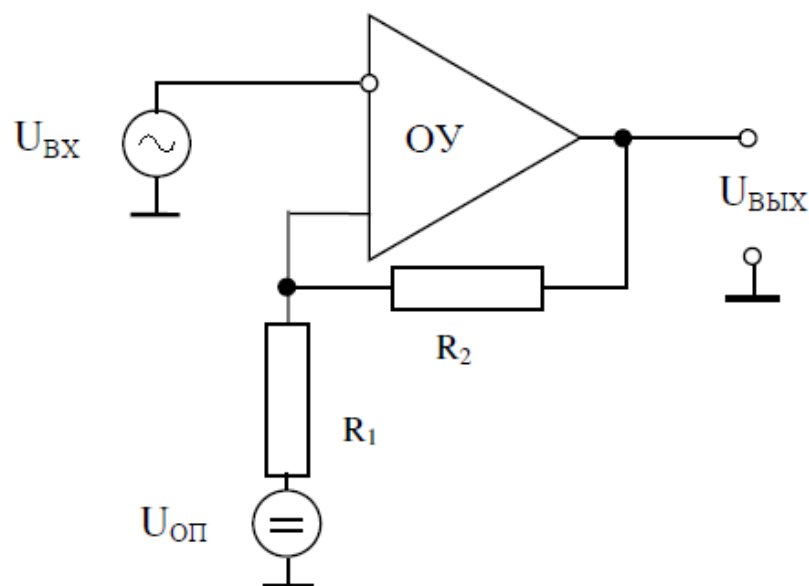
Погрешность сравнения напряжений (зона неопределенности):

$$\Delta U_{\text{ВХ}} = (U^1 - U^0) / K_{U0}.$$

Недостатки схем: низкая помехоустойчивость, широкая зона неопределенности, «дребезг».

ГИСТЕРЕЗИС С ПОЛОЖИТЕЛЬНОЙ ОБРАТНОЙ СВЯЗЬЮ

(триггер Шмита)



Ширина петли гистерезиса

(зоны неопределенности):

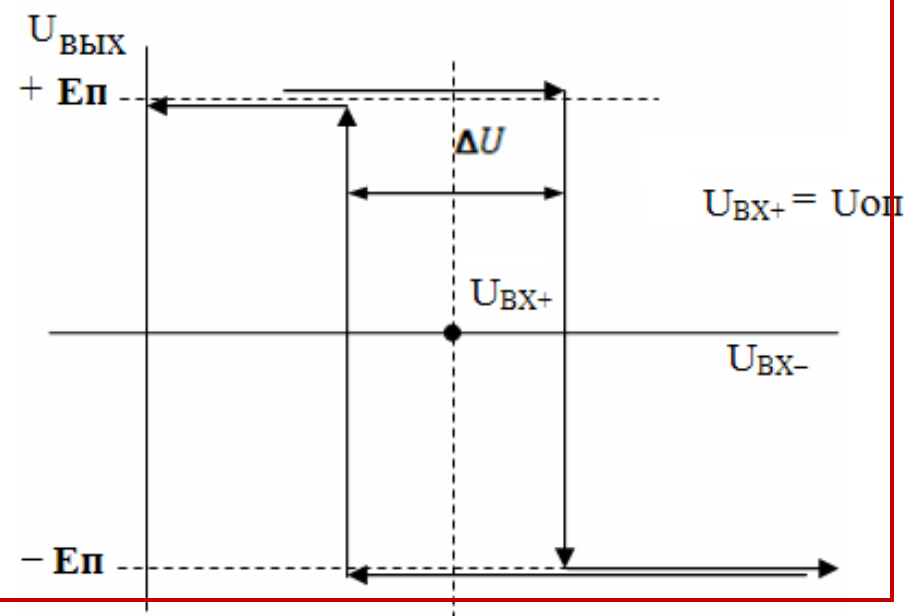
$$\Delta U_{\text{ВХ}} = 2 \cdot U_{\text{ВЫХ max}} \cdot \frac{R1}{R1 + R2}.$$

При малом входном сигнале напряжение на неинвертирующем входе равно:

$$U_{\text{ВХНИ}}^+ = U_{\text{оп}} + \frac{U_{\text{ВЫХ}}^+ - U_{\text{оп}}}{R1 + R2} \cdot R1.$$

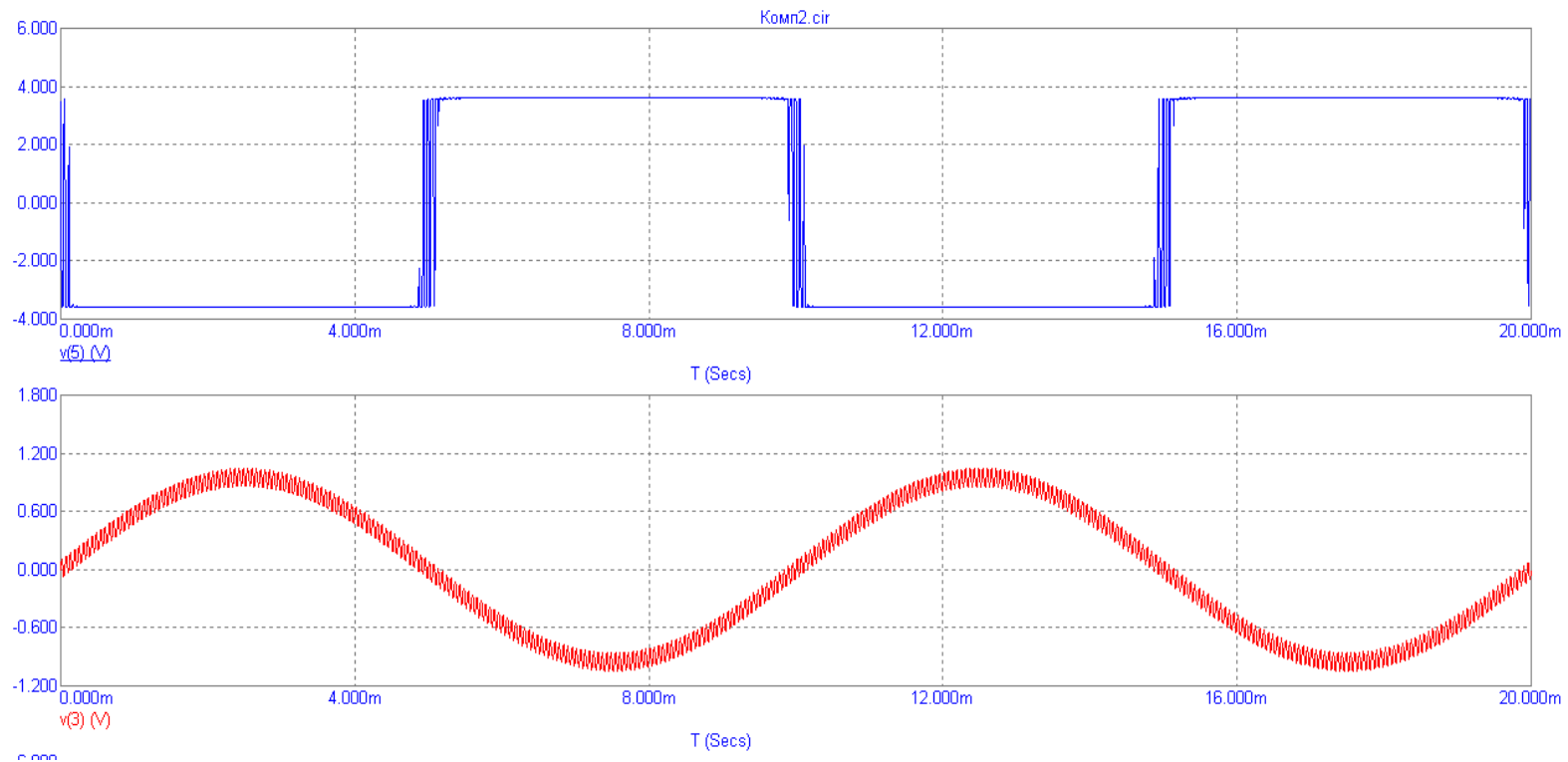
Когда эта величина будет превышена, то на выходе изменится полярность напряжения, а напряжение на НИ входе становится равным:

$$U_{\text{ВХНИ}}^- = U_{\text{оп}} + \frac{U_{\text{ВЫХ}}^- - U_{\text{оп}}}{R1 + R2} \cdot R1.$$

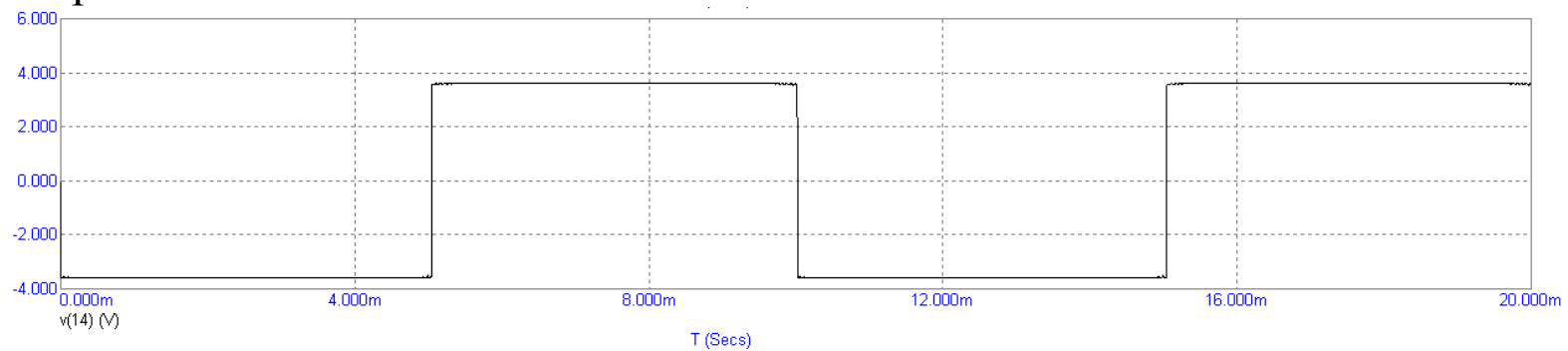


СОПОСТАВЛЕНИЕ ВЫХОДНЫХ СИГНАЛОВ КОМПАРАТОРОВ

А) Простая схема

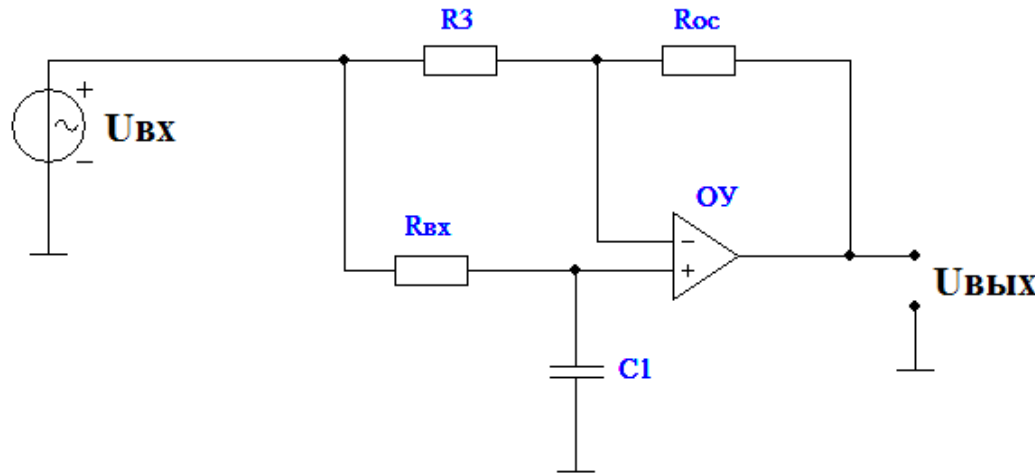


Б) С гистерезисом



ФАЗОВРАЩАТЕЛЬ НА ОУ

Схема, обеспечивающая идеальный фазовый сдвиг, должна передавать сигнал, не изменяя его амплитуду, при этом сдвигая его фазу на определенный заданный угол.



Выходное напряжение схемы:

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВХ}} \cdot \exp(j\theta),$$

где θ – фазовый угол.

В фазовращателе резисторы $R_1 = R_2 = R$.

Фазовый угол θ зависит только от $R_{\text{ВХ}}$ и $C1$, от частоты f входного сигнала $U_{\text{ВХ}}$.

Они связаны соотношением: $\theta = -2 \cdot \arctg(2\pi \cdot f \cdot R_{\text{ВХ}} \cdot C1)$.

Отсюда следует, что фазовый угол $\theta = 90^\circ$, если $R_{\text{ВХ}} = Z_{C1} = (2\pi \cdot f \cdot C1)^{-1}$.

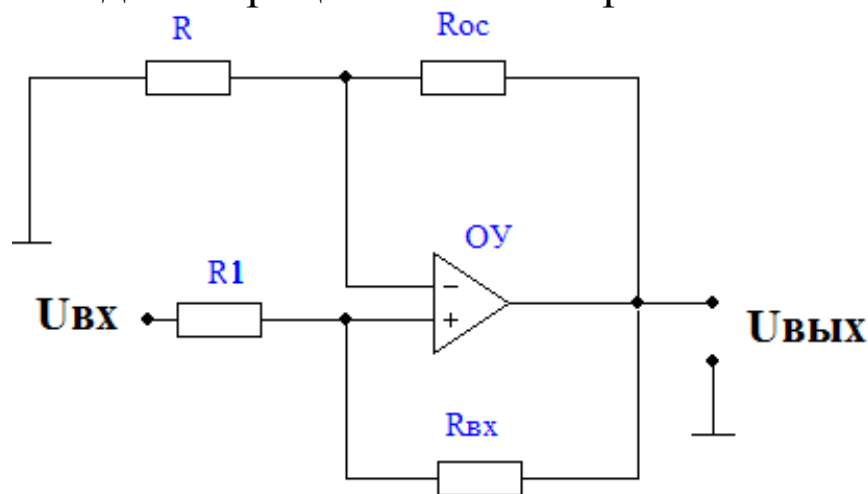
При изменении $R_{\text{ВХ}}$ от 1 до 100 кОм фазовый угол θ изменяется в диапазоне от -12° до -168° . Таким образом, фазовращатель может сдвигать угол в диапазоне до 180° .

Если $R_{\text{ВХ}}$ и $C1$ в схеме поменять местами, то фазовый угол будет положительный.

ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ОТРИЦАТЕЛЬНОГО СОПРОТИВЛЕНИЯ

Иногда возникает необходимость использования отрицательного сопротивления или источника напряжения с отрицательным сопротивлением. По определению сопротивление $R = +U/I$, где направление тока и напряжения совпадают.

Если же в двухполюснике направления протекающего тока и приложенного напряжения не совпадают, отношение U/I будет отрицательным. Говорят, что такой двухполюсник обладает отрицательным сопротивлением.



Входной ток усилителя равен:

$$I_{ВХ} = (U_{ВЫХ} - U_R)/R = -I_R.$$

Выходное напряжение определяется как:

$$U_{ВЫХ} = U_R + I_R \cdot R.$$

В схеме конвертора ОУ охвачен одновременно положительной и отрицательной обратными связями.

Напряжение ООС: $U_{инв} = U_{ВЫХ} \cdot R / (R + R_{oc})$.

Напряжение ПОС: $U_{ни} = U_{ВЫХ} \cdot R1 / (R1 + R_{вх})$.

Чтобы схема была устойчива, глубина ПОС должна быть меньше, чем ООС, то есть $R1 < R$.

УСИЛИТЕЛИ С НЕЛИНЕЙНЫМИ ОС

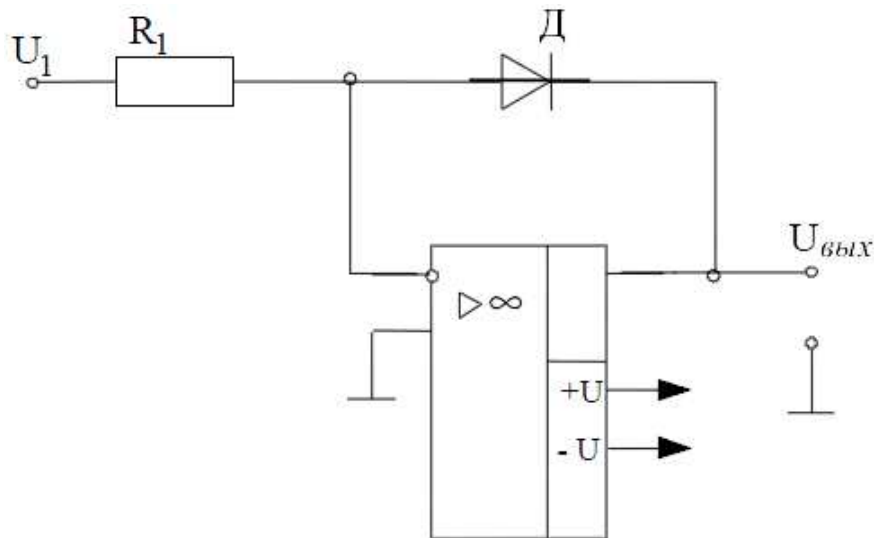
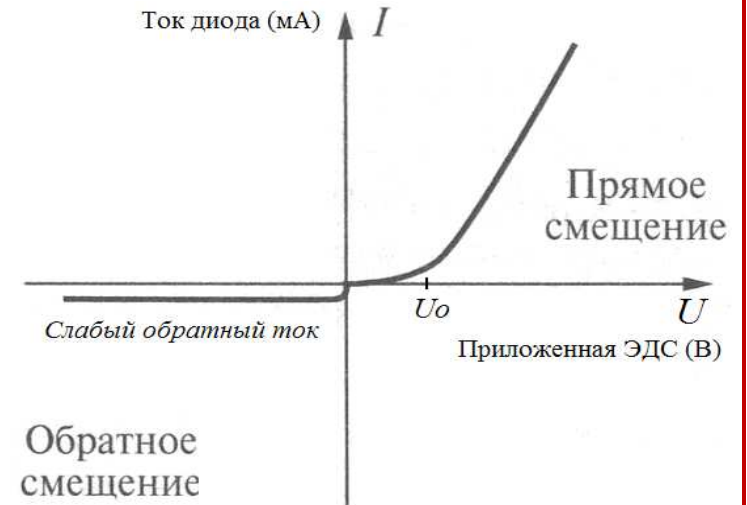
Для получения логарифмической характеристики усилителя необходимо устройство с логарифмической характеристикой включить в цепь обратной связи. Устройством, обладающим такой характеристикой, является полупроводниковый р-п- переход. Известно, что ток через полупроводниковый диод равен:

$$I_D = I_0 \left(e^{\frac{qU_D}{kT}} - 1 \right)$$

Аналогично можно записать выражение для коллекторного тока транзистора с общей базой:

$$I_K \approx I_{ЭО} e^{\frac{qU_{БЭ}}{kT}}$$

Как диод, так и транзистор можно использовать для получения логарифмической зависимости.



Чтобы показать, каким образом диод в цепи обратной связи формирует логарифмическую характеристику, решим уравнение $I_D = I_0 \left(e^{\frac{qU_D}{kT}} - 1 \right) \approx I_0 e^{\frac{qU_D}{kT}}$ относительно U_D , учитывая, что

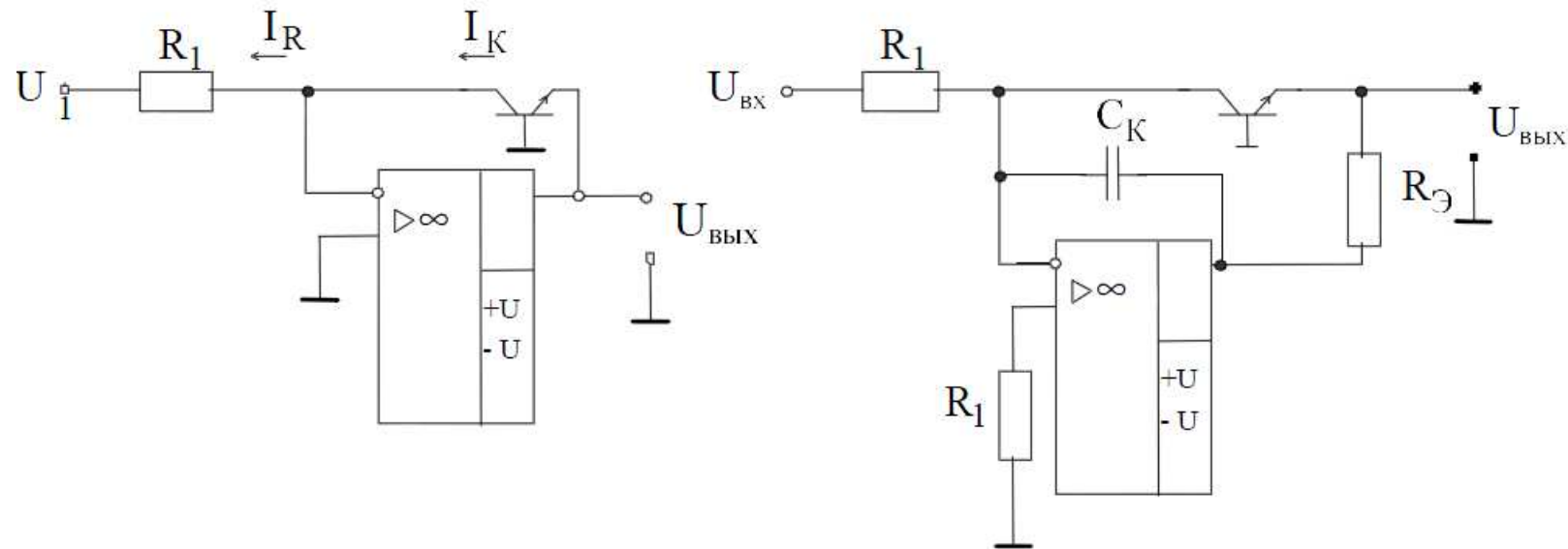
U_D равно $U_{вых}$. Из уравнения $I_D = I_0 e^{\frac{qU_D}{kT}}$ получим:

$$\ln I_D = \ln I_0 + \frac{qU_D}{kT}, \quad \ln I_D - \ln I_0 = \frac{qU_D}{kT}.$$

Следовательно $U_{вых} = U_D = \frac{kT}{q} \cdot (\ln I_D - \ln I_0)$, так что:

$$I_D = I_{R_1} = \frac{U_1}{R_1}, \quad U_{вых} = \frac{kT}{q} \cdot \left(\ln \frac{U_1}{R_1} - \ln I_0 \right).$$

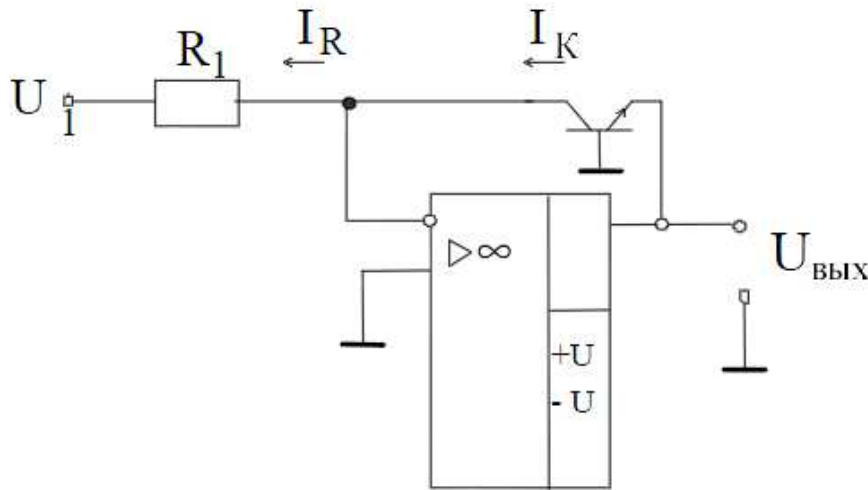
Для получения большого диапазона входного напряжения можно использовать в качестве логарифмического элемента в цепи обратной связи транзистор, включенный по схеме с общей базой.



Учитывая, что $I_K = -I_{R_1}$, то решая уравнение $I_K \approx I_{\text{ЭО}} e^{\frac{qU_{\text{БЭ}}}{kT}}$ относительно $U_{\text{БЭ}}$, получим

$$U_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{БЭ}} = \frac{kT}{q} \cdot \left(\ln \frac{U_1}{R_1} - \ln I_{\text{ЭО}} \right).$$

ПРИМЕР



Рассчитаем $U_{\text{вых}}$ при входном напряжении, равном +2В, $U_{\text{вх.max}} = 10$ В $I_{\text{ЭО}} = 40$ нА. Величина kT/q при комнатной температуре равна 26 мВ.

Решение:

Необходимо выбрать R_1 так, чтобы напряжение $U_{\text{БЭ}}$ транзистора (кривая $U_{\text{БЭ}}$ в зависимости от $I_{\text{Э}}$) оставалось на логарифмическом участке характеристики при максимальном входном напряжении, которое может быть подано. Предположим, что этому соответствуют значения токов $I_{\text{Э}} = I_{\text{К}} = 0,1$ мА. Тогда

$$I_{\text{К}} = I_{R_1} \text{ и } I_{R_1} = \frac{U_{\text{вх}}}{R_1}, \quad R_1 = \frac{U_{\text{вх.max}}}{I_{\text{Э}}}$$

Если положить, что $U_{\text{вх.max}} = 10$ В, то $R_1 = \frac{10 \text{ В}}{0,1 \text{ мА}} = 100 \text{ кОм}$.

$$U_{\text{вых}} = \frac{kT}{q} \cdot \left(\ln \frac{U_1}{R_1} - \ln I_{\text{ЭО}} \right) = 0,026 \text{ В} \cdot (\ln 2 \cdot 10^{-5} - \ln 4 \cdot 10^{-8}) = 0,026 \text{ В} \cdot \left(\ln \frac{2 \cdot 10^{-5}}{4 \cdot 10^{-8}} \right) =$$

$$= 0,026 \text{ В} \cdot \ln(5 \cdot 10^2) = 0,026 \text{ В} \cdot (\ln 5 + 2 \cdot 2,303) = 0,026 \text{ В} \cdot (1,61 + 4,606) = 0,1616 \text{ В}$$

Процедура расчета и ответ в примере не зависят от того, диод или транзистор используются для получения логарифмической характеристики. Важно только, чтобы $I_0 = I_{\text{ЭО}}$ если используется диод.