

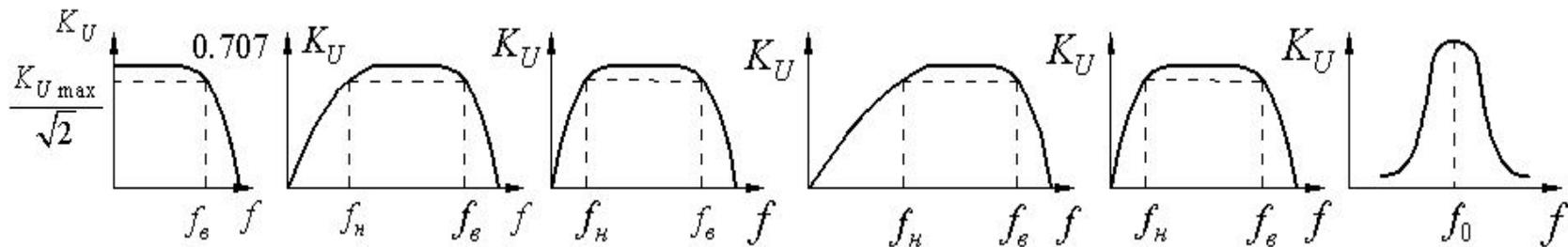
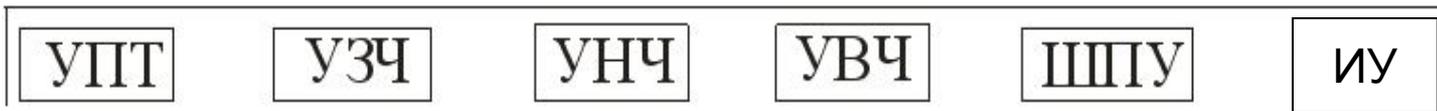
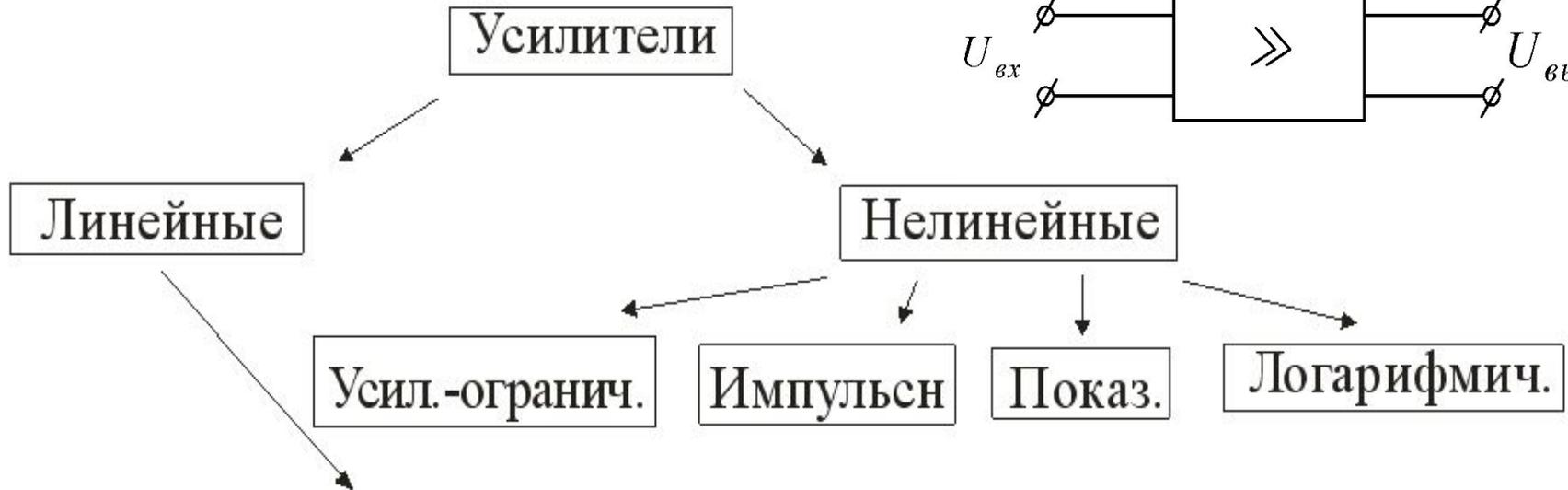
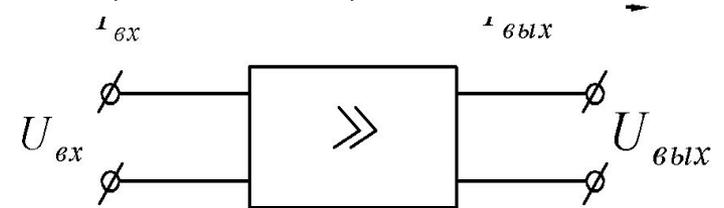
УСИЛИТЕЛИ

Усилители - устройства, предназначенные для увеличения параметров электрического сигнала (напряжения, тока, мощности) без существенного искажения его формы

Усилитель имеет входную цепь, к которой подводится усиливаемый сигнал, и выходную цепь, с которой выходной сигнал снимается и подается в нагрузку.

Классификация усилителей

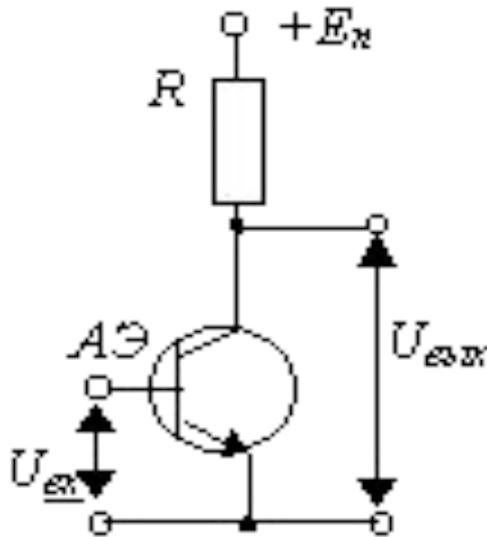
1. По типу усиливаемой величины: тока, напряжения, мощности;



Классификация усилителей

1. По типу усиливаемого сигнала: тока, напряжения, мощности;
2. По диапазону усиливаемых частот: УПТ от 0 до верхней частоты; усилитель переменного тока (низкой частоты 1Гц до 100кГц, высоких частот- 100кГц до 100мГц, широкополосовые – 100Гц до 100мГц), избирательные;
3. По виду соединительных цепей между усилительными каскадами: гальваническая, RC – цепи, трансформаторная;
4. По виду нагрузки: активная, активно-индуктивная, емкостная.
5. По типу транзистора – на биполярном, на полевом .
6. По схеме включения транзистора – ОЭ, ОБ, ОК, ОЗ, ОИ, ОС.

Параметры усилителей



Основой усилителя являются два элемента: резистор R и управляемый активный элемент (АЭ) транзистор, сопротивление которого изменяется под действием входного сигнала $U_{вх}$

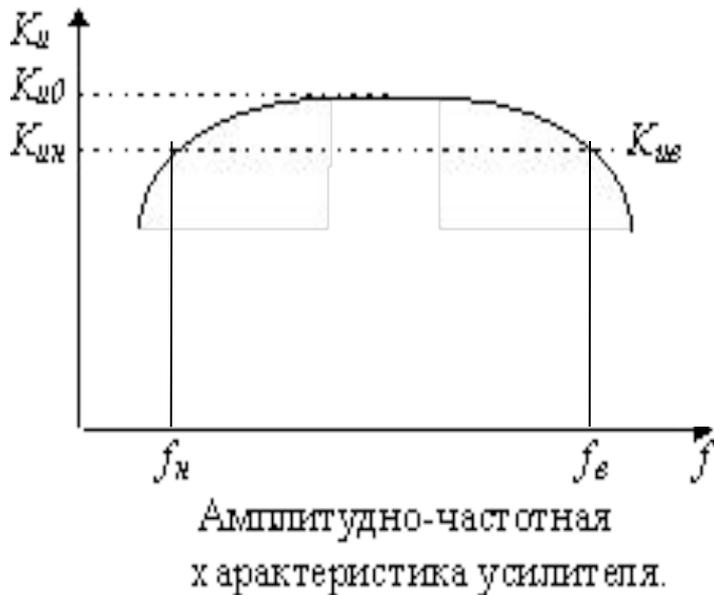
Параметры УК: Коэффициенты усиления – напряжения, тока, мощности

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} \quad K_u = K_{u1} \cdot K_{u2} \cdot K_{u3} \dots K_{un}$$

$$K_i = \frac{I_{вых}}{I_{вх}} \quad K_p = \frac{P_{вых}}{P_{вх}} = K_u \cdot K_i$$

Характеристики усилителей

Оценивает
нелинейные
искажения

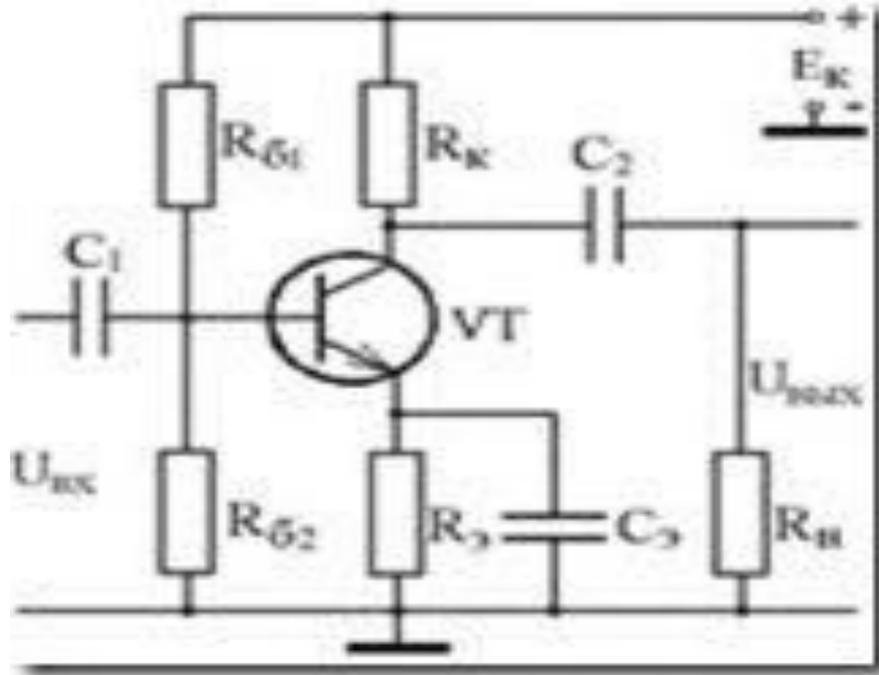


АЧХ даёт возможность рассчитать коэффициенты частотных искажений на низшей M_n и высшей M_e частотах заданного диапазона работы усилителя:

$$M_n = |K_{u0} / K_{un}|$$

$$M_e = |K_{u0} / K_{ue}|$$

Усилитель на биполярном транзисторе, включенном по схеме с общим эмиттером (ОЭ)



**Входные величины: сила тока базы и напряжение база — эмиттер,
выходные — сила тока коллектора и напряжение коллектор — эмиттер.**

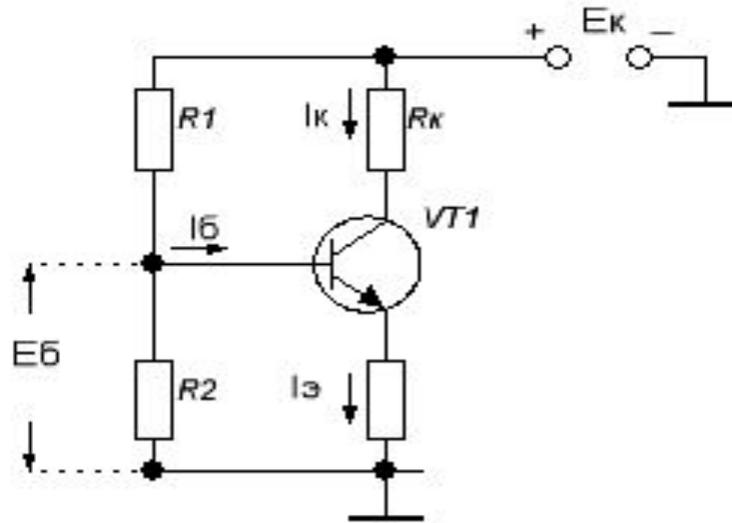
Резисторы R_k , $R_{\text{Э}}$, $R_{\text{б1}}$, $R_{\text{б2}}$ обеспечивают режим работы схемы по постоянному току, конденсаторы C_1 , C_2 разделяют переменную и постоянную составляющие напряжения, C_3 устраняет отрицательную обратную связь по переменному току, R_H — сопротивление нагрузки или входное сопротивление следующего усилительного каскада, E_k — источник питания постоянного тока (для транзисторов p-n-p полярность источника изменится). Поскольку биполярный транзистор ОЭ в усилительном режиме имеет одинаковую полярность постоянных напряжений $U_{\text{бэ,0}}$ и $U_{\text{кэ,0}}$, то для создания требуемой величины $U_{\text{бэ,0}}$ может быть использован всего один источник E_k .

1. При увеличении входного напряжения ($U_{\text{ВХ}} \uparrow$) ширина $p-n$ перехода между коллектором и базой уменьшается, в результате возрастает ток в цепи эмиттера ($I_{\text{Э}} \uparrow$), а выходное сопротивление транзистора (между коллектором и эмиттером) уменьшается ($R_{\text{ВыхТр}} \downarrow$), а следовательно уменьшается и падение напряжения на выходе транзистора ($I_{\text{Э}} R_{\text{ВыхТр}} = U_{\text{Вых}} \downarrow$).

2. При уменьшении входного напряжения ($U_{\text{ВХ}} \downarrow$) ширина $p-n$ перехода между коллектором и базой увеличивается, в результате чего ток в цепи эмиттера уменьшается ($I_{\text{Э}} \downarrow$), а выходное сопротивление транзистора (между коллектором и эмиттером) увеличивается ($R_{\text{ВыхТр}} \uparrow$), следовательно, увеличивается и падение напряжения на выходе транзистора ($I_{\text{Э}} R_{\text{ВыхТр}} = U_{\text{Вых}} \uparrow$).

Таким образом, усилительный каскад с общим эмиттером сдвигает фазу выходного сигнала, относительно входного, на 180.

Расчет усилительного каскада по постоянному току

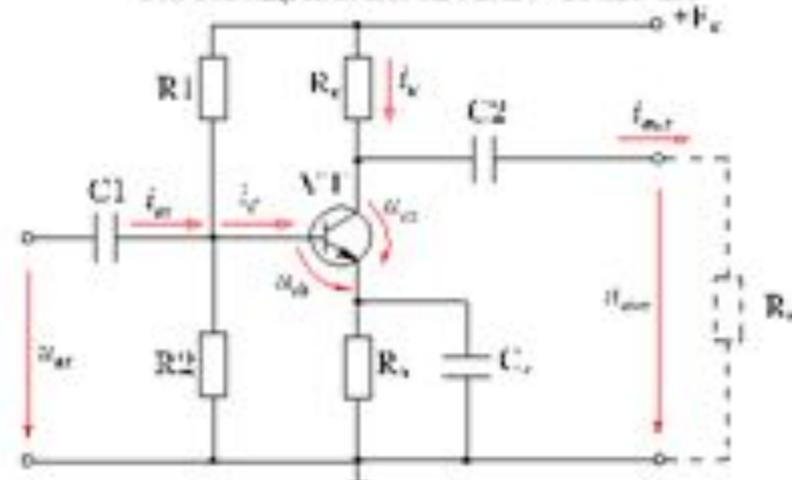


На рисунке схема усилительного каскада, позволяющая производить расчет основных параметров усилительного каскада R_1 , R_2 , $R_э$, $R_к$, обеспечивающих положение рабочей точки и ее стабилизацию по температуре и разбросу параметров. Запишем основные уравнения, используя схему, представленную на рисунке.

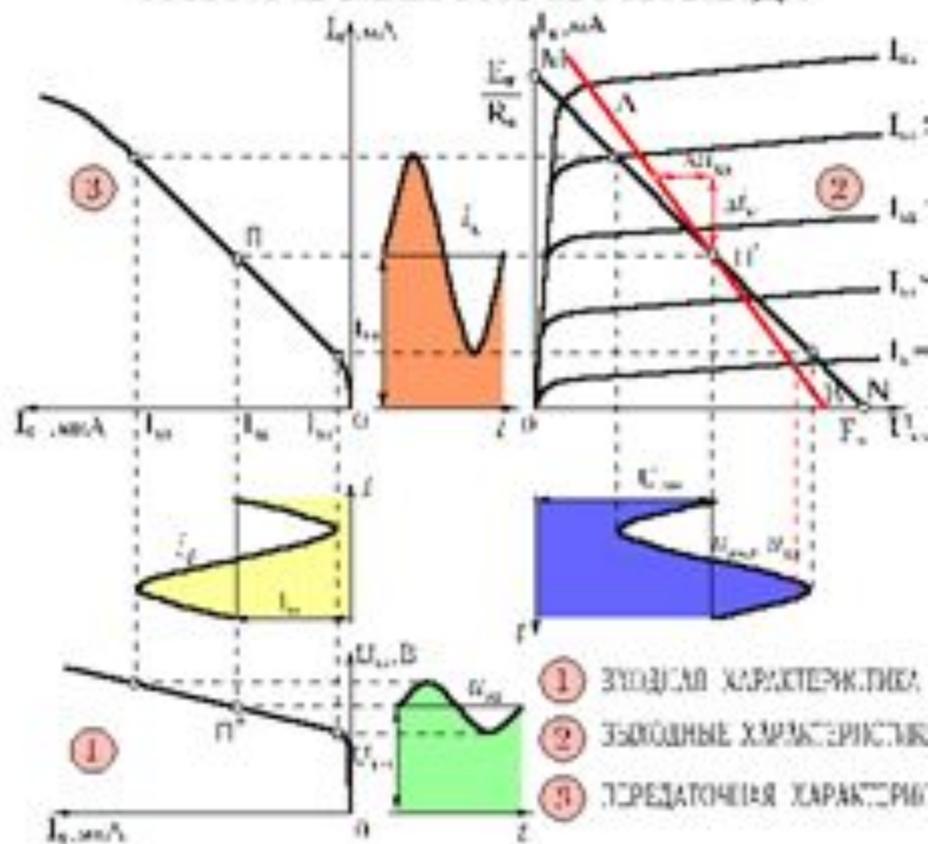
$$E_к = I_к (R_к + R_э) + U_{кэ} \quad E_б = E_к \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad E_б = U_{бэ} + I_к R_э \quad R_б = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА



ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАСКАДА



Пренебрегаем влиянием вспомогательных элементов (R_1, R_2, R_E, R_L). Расчет нелинейной цепи (определение $I_{к1}, U_{кэ1}, U_{кэ}$ для различных $I_{б1}, R_{X1}$) выполняем графически

Для этого на семействе выходных характеристик проводим ВАХ резистора R_{X1} , удовлетворяющую уравнению

$$U_{кэ1} = E_{в1} - (R_{к1} + R_{E1}) I_{к1}$$

Итак
Статическую линию нагрузки строят по двум точкам: 1) $I_{к1} = 0; E_{к1} = U_{кэ1}$ (точка N на линии статической нагрузки);

2) $U_{кэ1} = 0; I_{к1} = E_{к1}/R_{к1}$ (точка M).

MN - линия нагрузки по постоянному току
 $U_{кэ1} = E_{в1} - (R_{к1} + R_{E1}) I_{к1} = E_{в1} - R_{X1} I_{к1}$

AB - линия нагрузки по переменному току

$$\Delta U_{кэ1} = -\Delta I_{к1} \frac{R_{к1} R_{E1}}{R_{к1} + R_{E1}}$$

Пренебрегаем влиянием вспомогательных элементов (R_3, R_1, R_2).

Расчет нелинейной цепи (определение I_K, U_{RK}, U_K для различных I_B, R_K) выполняем графически.

Для этого на семействе выходных характеристик проводим ВАХ резистора R_K , удовлетворяющую уравнению:

$$U_{KЭ} = E_K - R_K I_K$$

Статическую линию нагрузки строят по двум точкам:

- 1) $I_K = 0; E_K = U_{KЭ}$ (точка N на линии статической нагрузки);
- 2) $U_{KЭ} = 0; I_K = E_K/R_K$ (точка M).

За счет смещения I_B резисторами R_1, R_2 обеспечивают оптимальные значения $U_{бп}, I_{бп}$, так, чтобы рабочая точка покоя A находилась на середине линейного участка переходной характеристики, которая строится по точкам пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками транзистора. При подаче на вход $U_{вх}$ ток I_B будет изменяться, иметь переменную составляющую. Одновременно будут изменяться эмиттерный и коллекторный токи транзистора. Перенеся изменения на линию нагрузки получаем $U_{вых}$.

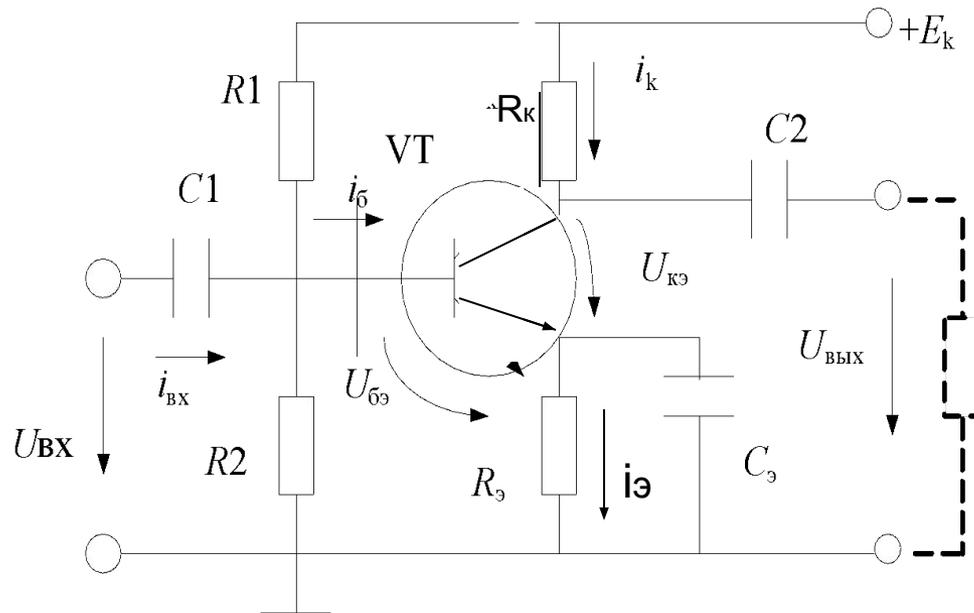
Благодаря тому, что коллекторный ток $i_k \gg i_b$, а $R_K > R_{вх}$, выходное напряжение каскада ОЭ значительно больше $U_{вх}$.

Температурная стабилизация усилительных каскадов

Общим недостатком схем усилительных каскадов является зависимость режима работы транзистора от температуры окружающей среды (температурные изменения токов базы и коллектора, коэффициента передачи тока базы β).

Для устранения температурной зависимости в цепь смещения включают элементы коррекции:

$RЭ$, $CЭ$ – звено автоматической термостабилизации (для компенсации влияния температуры), которое обеспечивает отрицательную обратную связь, т. к. часть $U_{ВЫХ}$ подается на вход вызывая уменьшение $U_{ВХ}$;



(К схеме температурной стабилизации с ООС по току в цепи эмиттера)

Сопротивление участка база - эмиттер транзистора, R_3 и R_2 образуют замкнутый контур. Для этого контура справедлив второй закон Кирхгофа, согласно которому:

$$U_{бэ} + U_{R_3} - U_{R_2} = 0$$

Это выражение раскрывает физику стабилизирующего действия ООС. Так, если под воздействием дестабилизирующего фактора ток базы $I_б$ начнет возрастать, то увеличится и ток эмиттера $I_э = (\beta + 1)I_б$

Тогда $U_{R_3} = R_3 \cdot I_э$ и $U_{бэ} = U_{R_2} - U_{R_3}$

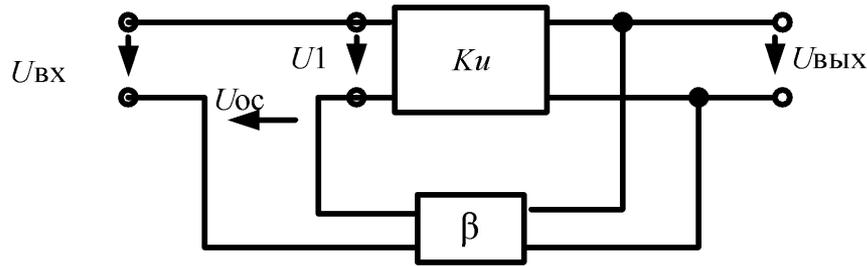
Но это приведет к уменьшению напряжения $U_{бэ}$ настолько, чтобы ток базы принял прежнее значение. ООС всегда препятствует любому изменению тока эмиттера, а значит и тока базы тем эффективнее, чем больше значение R_3 . Это значит, что ООС будет препятствовать приращению тока коллектора под воздействием входного сигнала, резко уменьшая коэффициент усиления каскада. Чтобы устранить этот недостаток параллельно R_3 включают емкость C_3 . Значение емкости выбирают из условия $X_{C_3} \ll R_3$ на минимальной частоте сигнала.

В этом случае переменная составляющая (сигнал) будет замыкаться по C_3 , а медленно изменяющиеся составляющие температурной нестабильности - по R_3 . Каскад сохраняет высокий коэффициент усиления и стабильность свойств в широком диапазоне температуры окружающей среды.

Обратные связи в усилительных каскадах

Обратные связи (ОС) осуществляют подачей на вход усилителя сигнала с его выхода (или части $U_{\text{вых}}$) ОС может быть: положительной, когда $U_{\text{вх}}$ складывается (суммируется) с сигналом обратной связи $U_{\text{ос}}$, увеличивая входной сигнал $U_1 = U_{\text{вых}} + U_{\text{ос}}$; отрицательной, когда U_1 ослабляется сигналом обратной связи $U_1 = U_{\text{вх}} - U_{\text{ос}}$. Различают ОС по напряжению, по току, последовательную и параллельную ОС.

Схема параллельной ООС по напряжению



$U_{\text{ос}} = \beta U_{\text{вых}}$
 где β – коэффициент передачи ОС по напряжению:
 $\beta = U_{\text{ос}} / U_{\text{вых}}$

Коэффициент усиления напряжения без ОС
 $K_u = U_{\text{вых}} / U_1$

Коэффициент усиления с обратной отрицательной связью:

$$K_{\text{ос}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_1 + U_{\text{ос}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_1 + \beta U_{\text{вых}}}$$

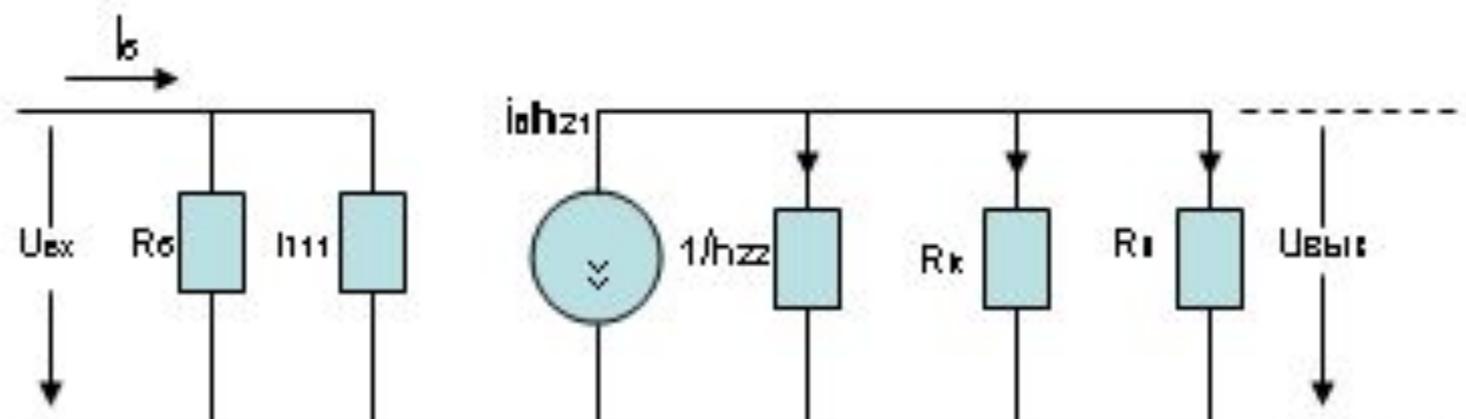
Разделив числитель и знаменатель на U_1 , получим $K_{\text{ос}} = \frac{K_u}{1 + \beta K_u}$.

Т. к. $K_{\text{ос}} < K_u$, т. е. отрицательная ОС ослабляет сигнал. При положительной ОС $K_{\text{ос}} = \frac{K_u}{1 - \beta K_u} > K_u$.

Но положительную ОС не применяют в усилителях, так как ^{уменьшает} снижается стабильность K_u . Для усилителей применяют отрицательную ОС, которая улучшает свойства усилителей:

- 1) повышает стабильность K_u : $R_{\text{вх.ОС}} = R_{\text{вх}} (1 + \beta K_u)$ т. к. $R_{\text{вых.ОС}} = \frac{R_{\text{вых}}}{1 + \beta K_u}$
- 2) снижает нелинейные искажения;
- 3) увеличивает $R_{\text{вх}}$, так как

Схема замещения и коэффициент усиления УК на биполярном транзисторе с общим эмиттером



$$U_{вх} = i_\sigma R_{вх};$$

$$R_{вх} = R_\sigma h_{11} / (R_\sigma + h_{11}) \approx h_{11}; \quad U_{вх} = i_\sigma h_{11}$$

$$i_\sigma h_{21} + U_{вых} / (1/h_{22}) + U_{вых} / R_k + U_{вых} / R_H = 0; \quad R_H \gg R_k$$

$$U_{вых} = - i_\sigma h_{21} / [(1/h_{22}) + R_k] \approx - i_\sigma h_{21} R_k$$

$$K_u = U_{вых} / U_{вх} = - i_\sigma h_{21} R_k / i_\sigma h_{11} = - h_{21} R_k / h_{11}$$

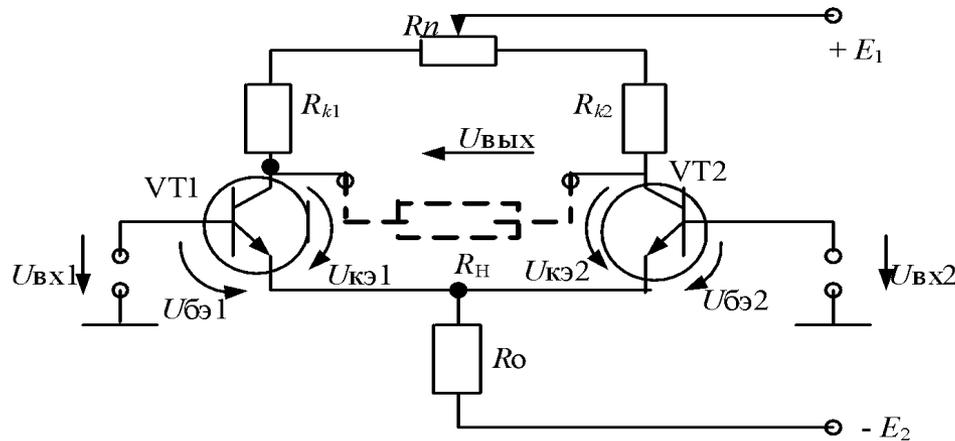
Дифференциальный усилитель

Параллельно-балансный каскад представляет собой мост с двумя линейными резисторами R_{K1} , R_{K2} и двумя нелинейными транзисторами (VT1, VT2). В одну диагональ через резистор R_0 подводится напряжение питания, а в другую (измерительную) включается нагрузка, то есть снимается $U_{ВЫХ}$

При одинаковых транзисторах VT1, VT2 и резисторах R_{K1} , R_{K2} , если $U_{ВХ1} = 0$, $U_{ВХ2} = 0$, то $U_{ВЫХ} = 0$, так как

$$U_{ВЫХ} = K_u (U_{ВХ1} - U_{ВХ2})$$

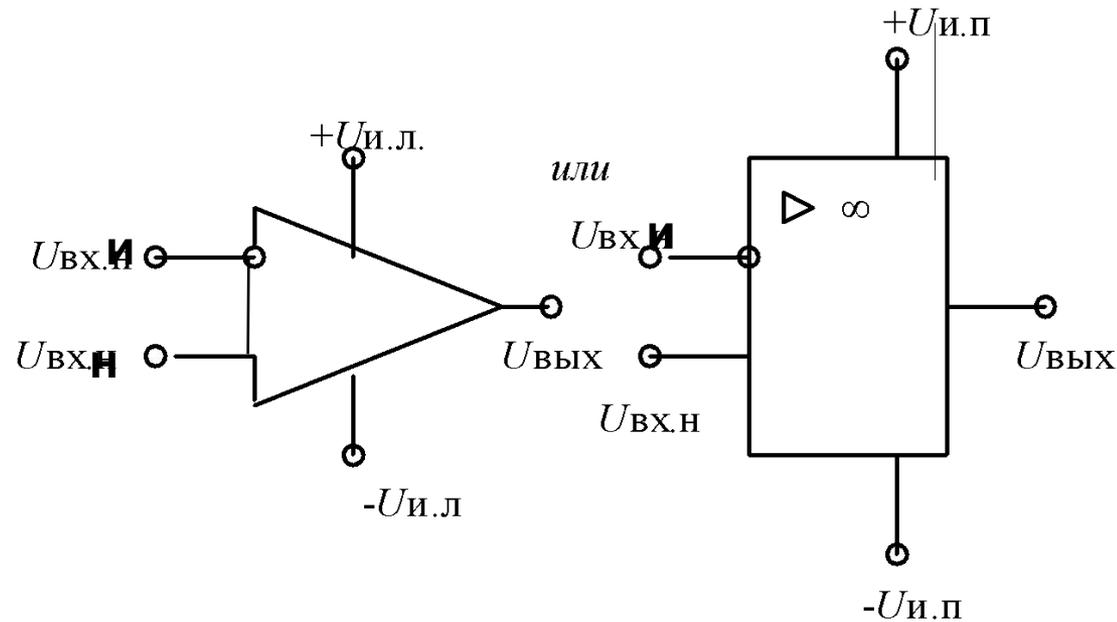
Величина R_{Π} применяется для балансировки каскада (для установки нуля); R_0 стабилизирует ток транзисторов, подобно звену $R_3 - C_3$. Принимают $E_1 = E_2 = E_K/2$. Если изменится E_1 , E_2 , то изменяются токи в обоих транзисторах, а $U_{ВЫХ} = 0$.



Операционные усилители

- Операционные усилители (ОУ) являются разновидностью усилителей постоянного тока, имеют большой коэффициент усиления по напряжению $k_U = 5 \cdot 10^3 - 5 \cdot 10^6$ и высокое входное сопротивление $R_{вх} = 20 \text{ кОм} - 10 \text{ МОм}$. Современные ОУ выполняются многокаскадными и включают в себя ряд дополнительных устройств (защиту, термокомпенсацию и др.). Устройства на ОУ могут осуществлять усиление, выполнять математические операции, сравнивать электрические величины, генерировать сигналы различной формы.

Операционный усилитель



ОУ имеет два входа и один выход. При подаче сигнала на инвертирующий вход $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ находится в противофазе (противоположны по знаку).

При подаче сигнала на неинвертирующий вход $U_{ВХ}$ и $U_{ВЫХ}$ совпадают по фазе (одинаковы по знаку).

В зависимости от конкретного устройства на базе ОУ используют как инвертирующий, так и неинвертирующий входы.

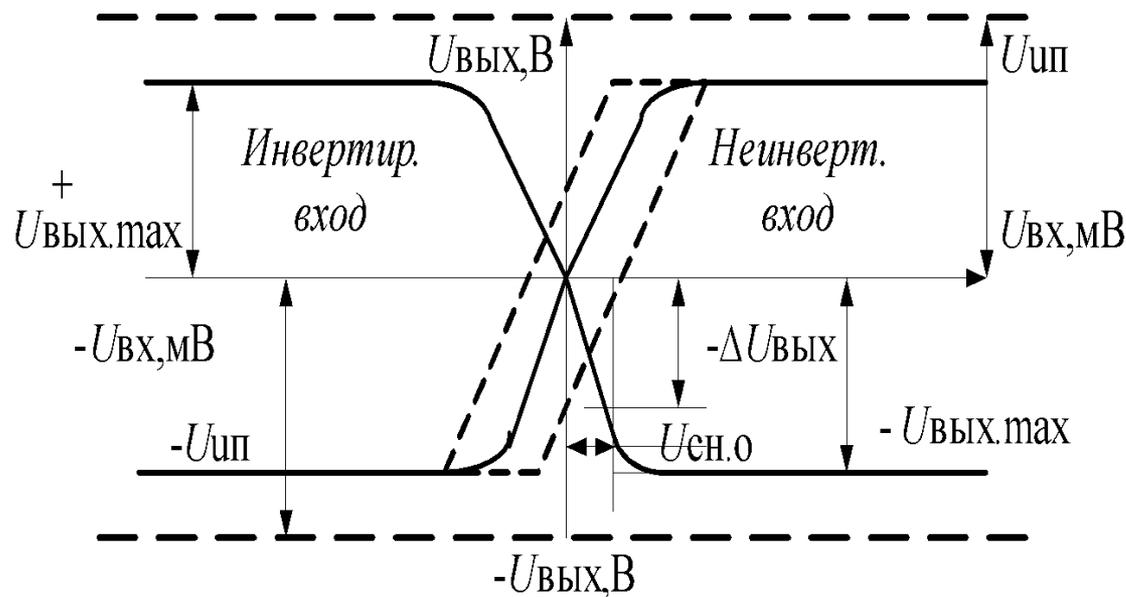
Важнейшими характеристиками ОУ являются амплитудные (передаточные)

$$U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}}) \text{ и амплитудно-частотные (АЧХ) } \kappa_U = f(f).$$

Последние имеют вид АЧХ усилителя постоянного тока за исключением специальных частотнозависимых устройств (избирательный усилитель и др.).

Передаточные характеристики имеют линейный участок, для которого $\kappa_U = \text{const}$ и нелинейный - $\kappa_U' < \kappa_U$.

При реализации конкретных устройств используют линейные и нелинейные участки.



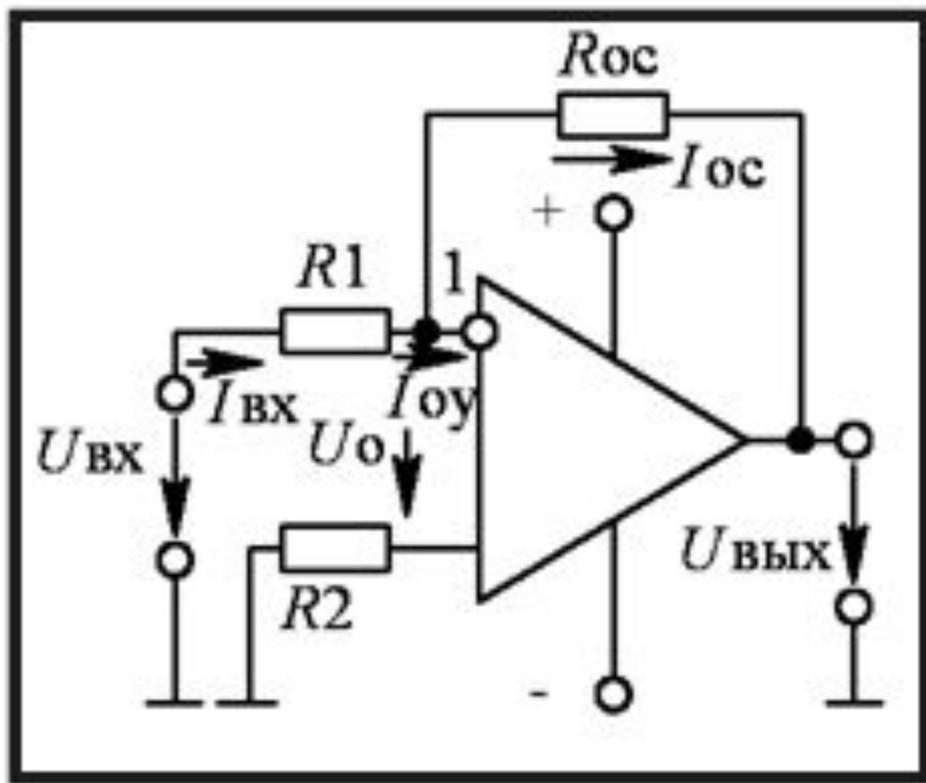
Требования к электрическим характеристикам:

высокий коэффициент усиления по напряжению – до 10^6 ;

большое входное сопротивление $R_{\text{вх}}$ (до 10^9 Ом) и малое выходное;

линейность передаточной характеристики.

Инвертирующий усилитель



- Инвертирующий усилитель изменяет знак выходного сигнала относительно входного. На инвертирующий вход через резистор R_1 подается $U_{вх}$ и вводится параллельная отрицательная обратная связь по напряжению с помощью резистора $R_{o.c.}$
 $V_1 = V_0$; $I_{oy} = 0$, т. к. $R_{вх} = \infty$;
 $i_{вх} = i_{oc}$

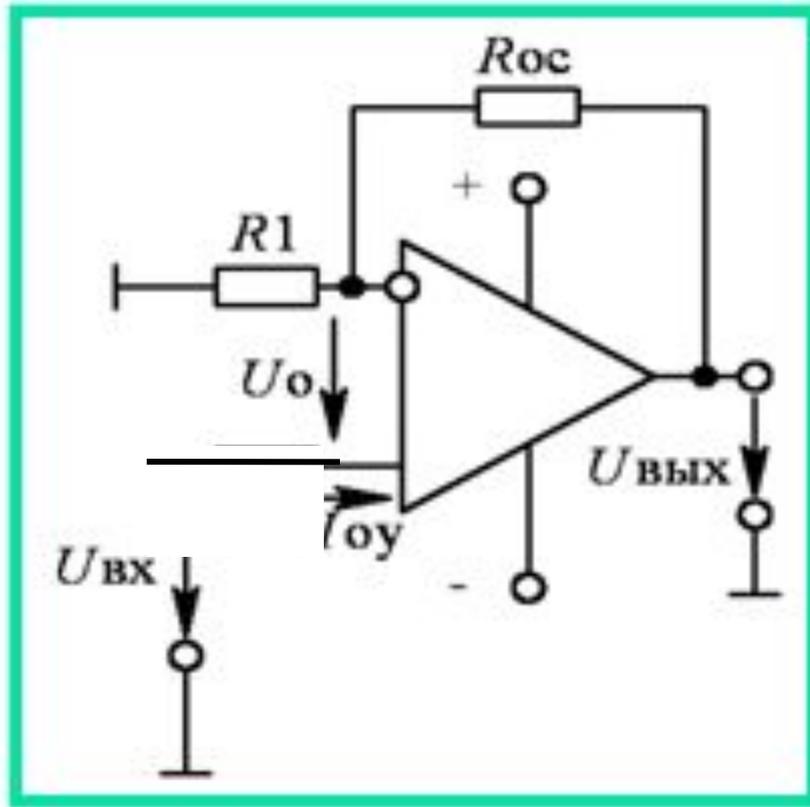
$$U_{вх} / R_1 = - U_{вых} / R_{oc}$$

$$K_{УИ} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = - \frac{R_{o.c.}}{R_1}$$



Назначение – изменение сигнала в определенном соотношении

Неинвертирующий усилитель

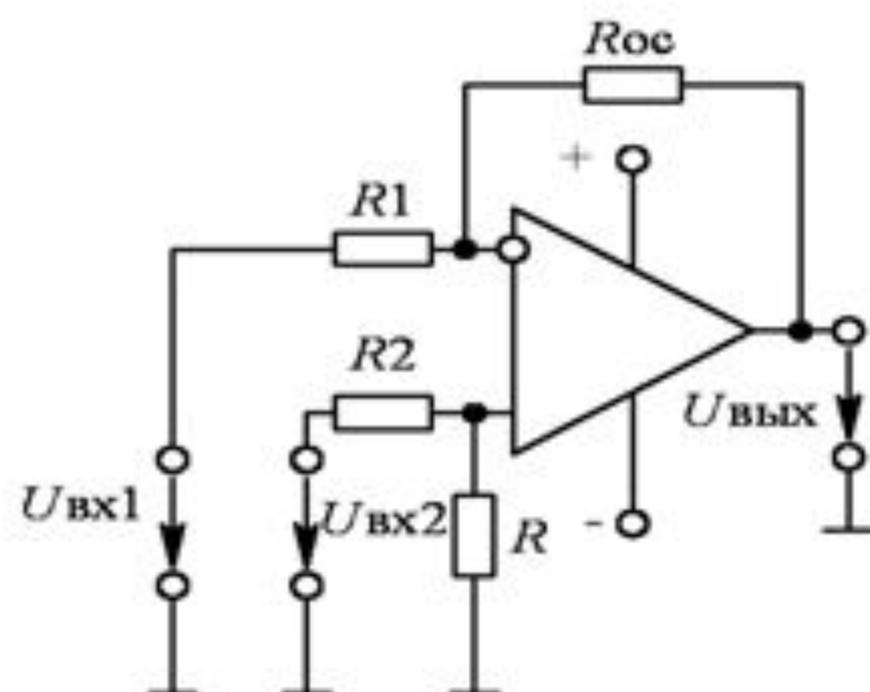


- Неинвертирующий усилитель не изменяет знак выходного сигнала относительно входного
 $U_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} R_1$; $U_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} R_1 + I_{\text{ос}} R_{\text{ос}}$;
 $U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = 1 + R_{\text{ос}} / R_1$

$$K_{U_{\text{н}}} = \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 1 + \frac{R_{\text{о.с.}}}{R_1}$$



Вычитатель-усилитель



- Вычитатель-усилитель предназначен для усиления разностных сигналов.
- Если $R_1=R_2$ и $R_{о.с.}=R$, то

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{ex2}} - U_{\text{ex1}}) \frac{R_{\text{о.с.}}}{R_1}$$

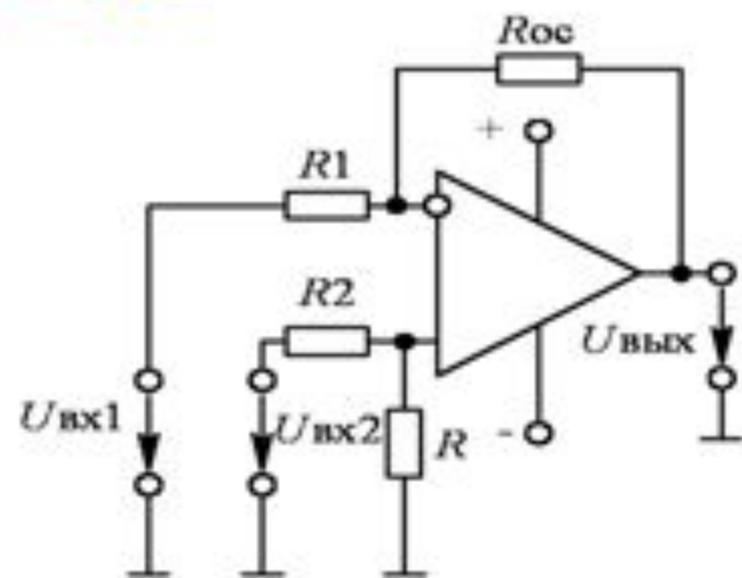


Сумматоры

Инвертирующий сумматор

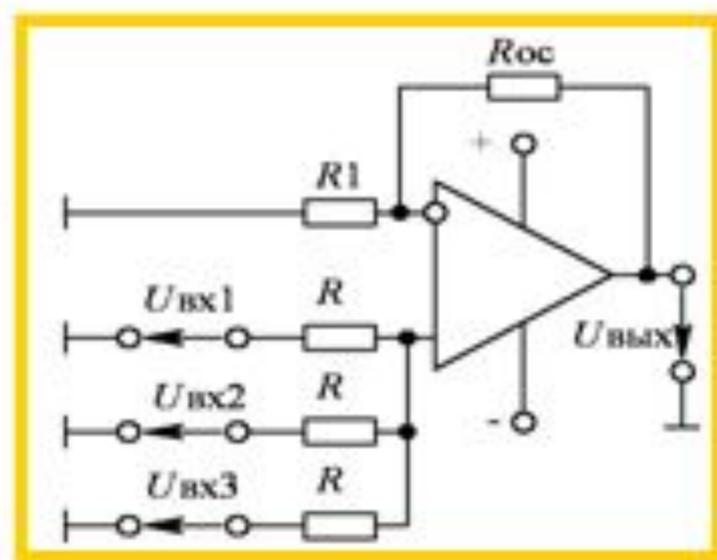
При равенстве входных сопротивлений $R_1=R_2=R$

$$U_{\text{вых}} = -\frac{R_{\text{ос.}}}{R} (U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} + \dots + U_{\text{вхn}})$$



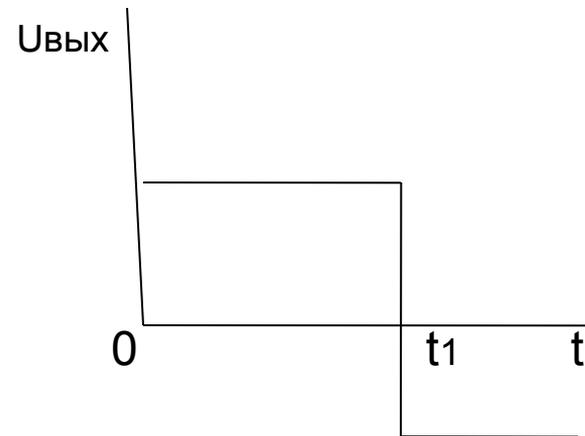
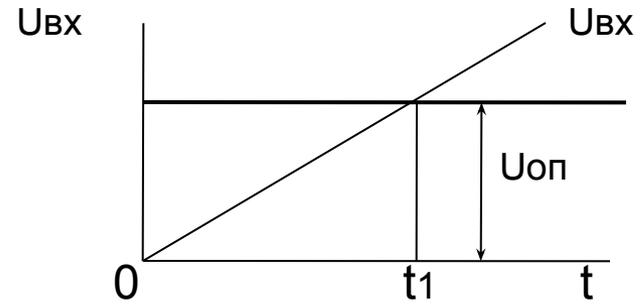
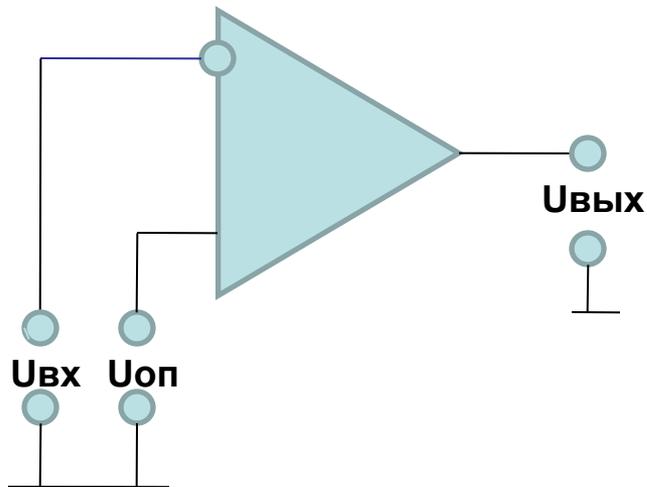
Неинвертирующий сумматор

$$U_{\text{вых}} = \frac{1 + R_{\text{ос.}}/R}{n} (U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} + \dots + U_{\text{вхn}})$$



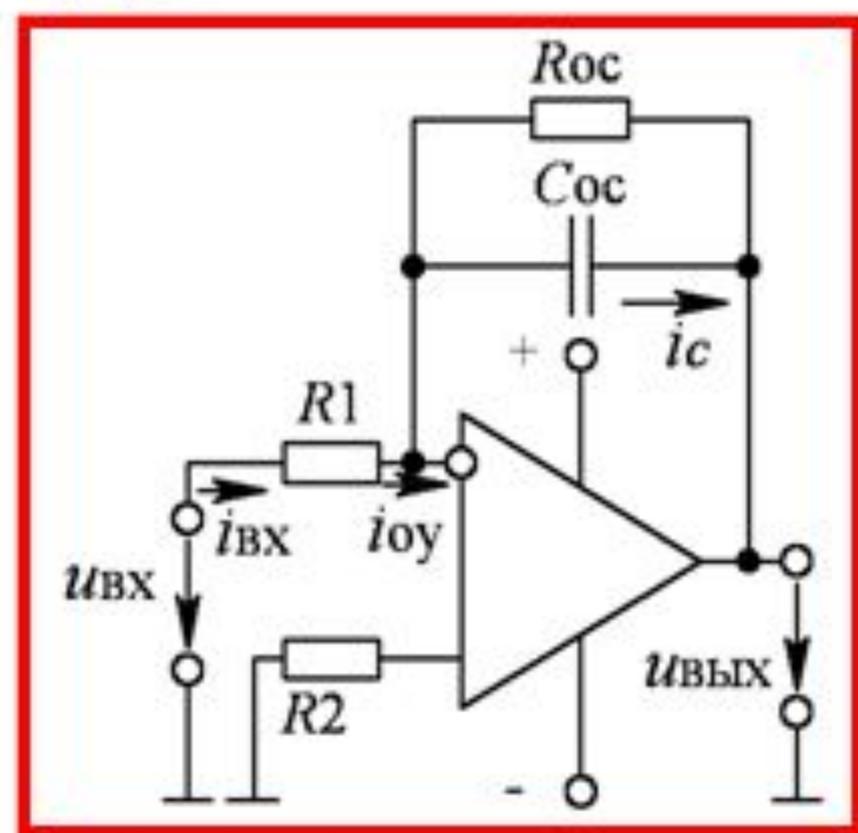
КОМПАРАТОР СИГНАЛОВ

Компаратор сигналов – схема для сравнения двух напряжений



Использование – для преобразования формы сигнала, получения прямоугольных импульсов

Интегратор



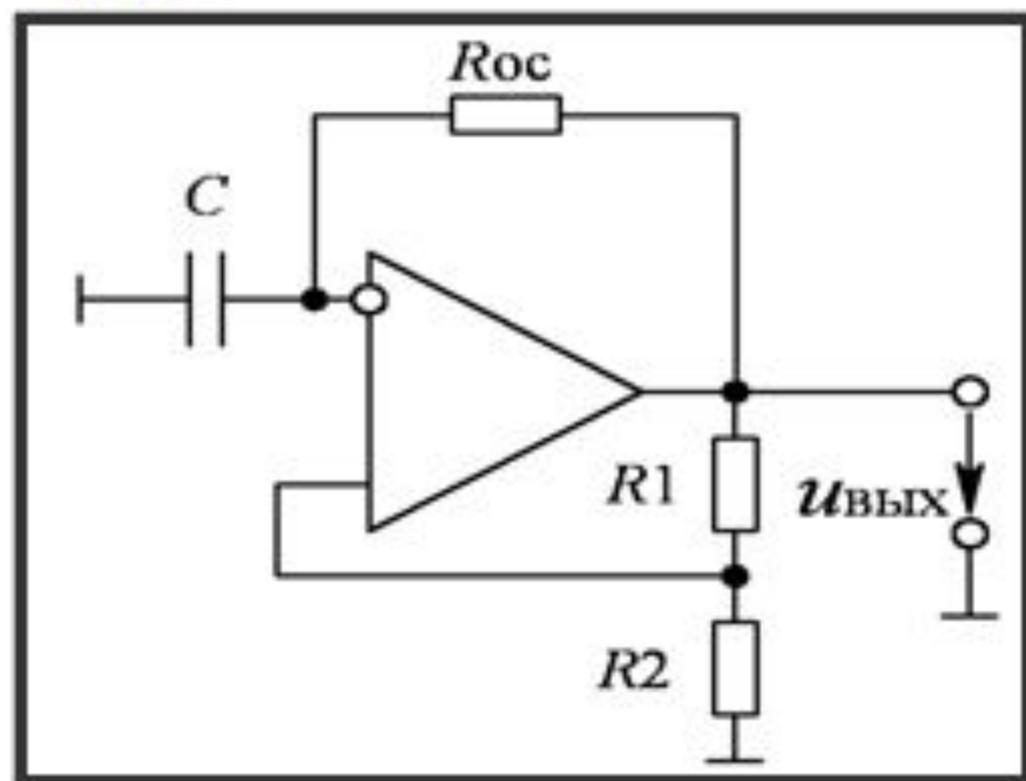
реализует операцию

$$U_{\text{вых}} = -\frac{1}{R_1 C_{\text{ос}}} \int_0^t U_{\text{вх}} \cdot dt = -\frac{1}{\tau} \int_0^t U_{\text{вх}} \cdot dt$$

где $\tau = R_1 \cdot C_{\text{ос}}$.



Дифференциатор



ВЫПОЛНЯЕТ

$$U_{\text{вых}} = -R_{oc} \cdot C \frac{dU_{\text{ex}}}{dt} = -\tau \frac{dU_{\text{ex}}}{dt}$$



Мультивибратор

- генератор периодически повторяющихся импульсов, например прямоугольной формы. Мультивибратор является автогенератором и работает без подачи входного сигнала.

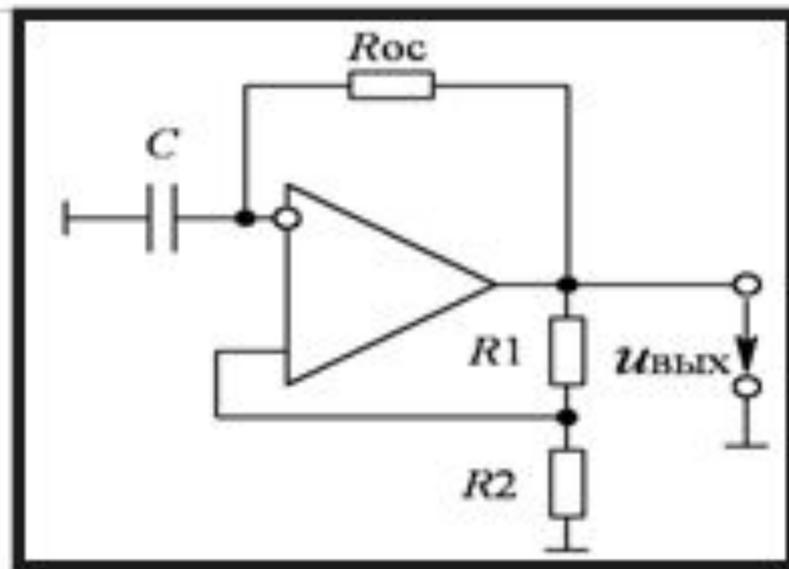
Данный генератор является симметричным и для него длительность импульса и паузы равны

$$t_u = t_n = R_{o.c.} \cdot \ln \left(1 + \frac{2 \cdot R_2}{R_1} \right)$$

При $R_1 = R_2$ $t_u = t_n = R_{o.c.} \cdot \ln 3$

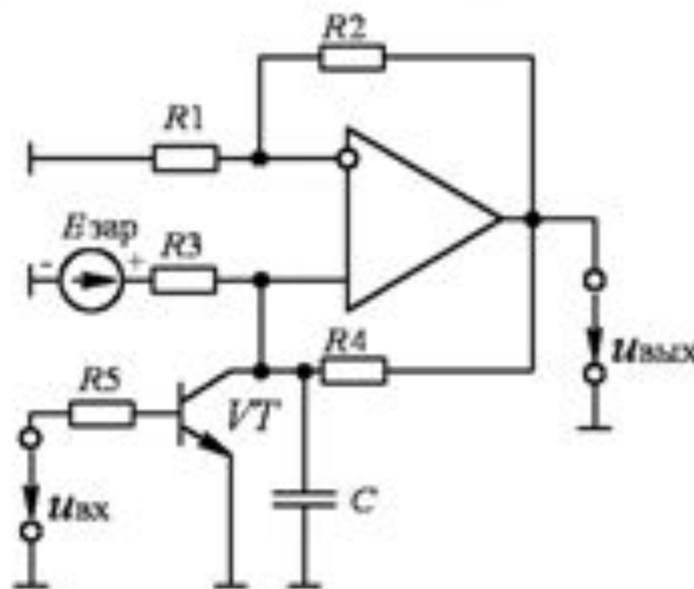
Период повторения импульсов $T_n = (t_u + t_n) = 2 \cdot t_u$ Сквозность $Q = \frac{T_n}{t_u} = 2$

Изменяя $\tau = R_{o.c.} \cdot C$ и величины R_1 и R_2 можно регулировать длительность, частоту и амплитуду импульсов.

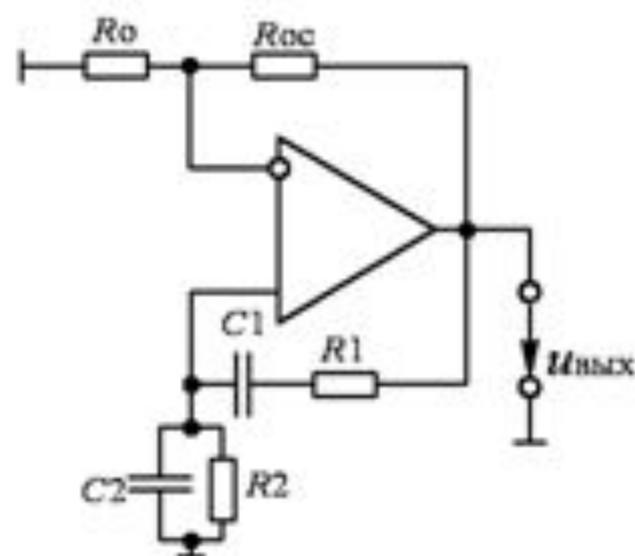


Генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН)

- Предназначен для получения напряжения, которое в течение некоторого времени нарастает или спадает по линейному или близкому к линейному закону и используется в каскадах сравнения, схемах временной задержки импульсов, для получения временных разверток в электронно-лучевых трубках и т.д.



Генератор гармонических колебаний с мостом Вина на базе ОУ



является самовозбуждающимся устройством. Мост Вина, состоящий из элементов R_1, R_2, C_1, C_2 , образует звено частотно-зависимой положительной обратной связи, для которого f_0 - частота генерации частотно-зависимой цепи.

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}$$

При $R_1=R_2=R$ и $C_1=C_2=C$ (условие обязательное)

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot R \cdot C}$$

Соотношение параметров R_{0c} и R_0 определяет коэффициент усиления K_u .

