

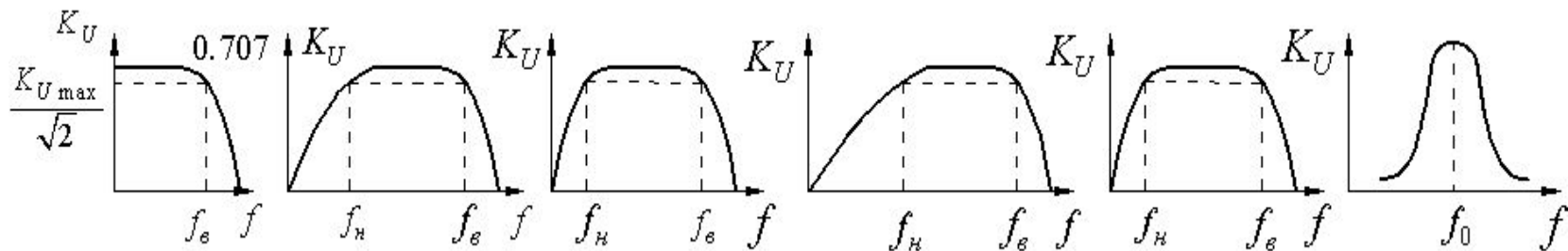
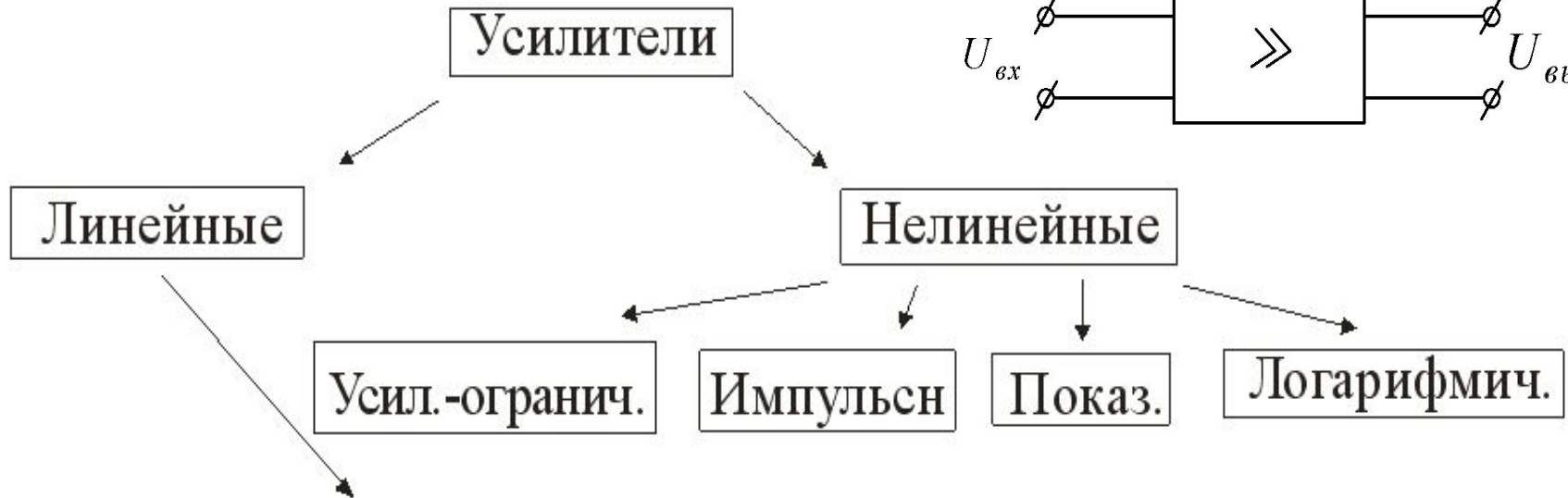
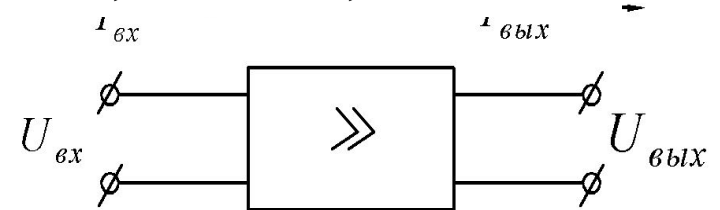
# УСИЛИТЕЛИ

**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

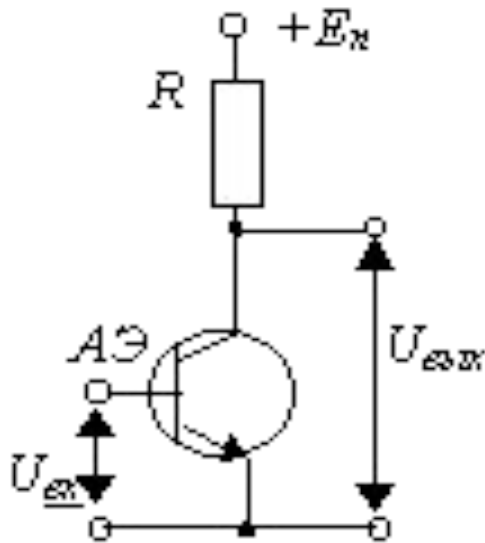
1. По типу усиливаемой величины: тока, напряжения, мощности;



## 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  $U_{вх}$**

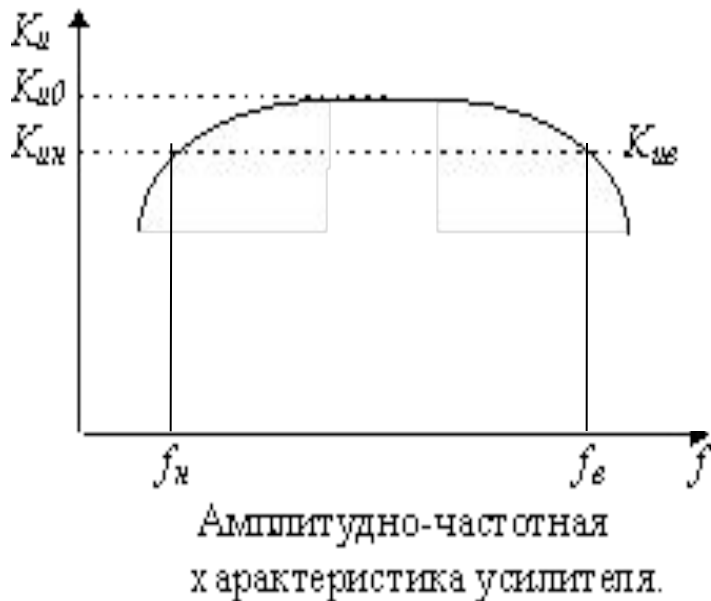
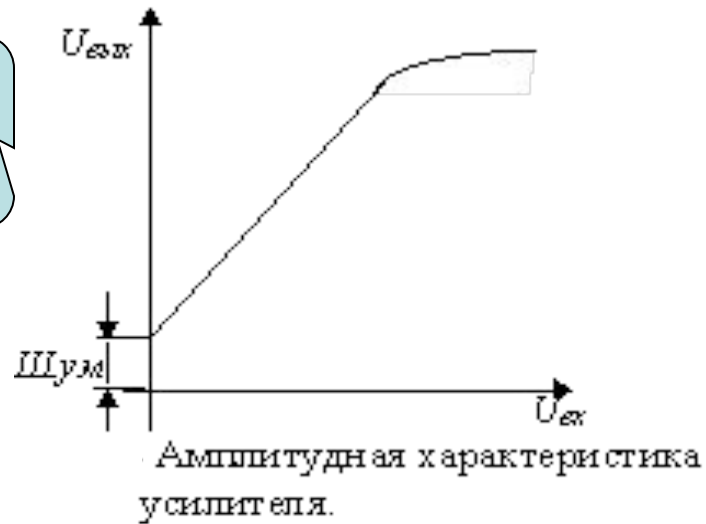
**Параметры УК: Коэффициенты усиления – напряжения, тока, мощности**

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

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

# Характеристики усилителей

Оценивает  
нелинейные  
искажения

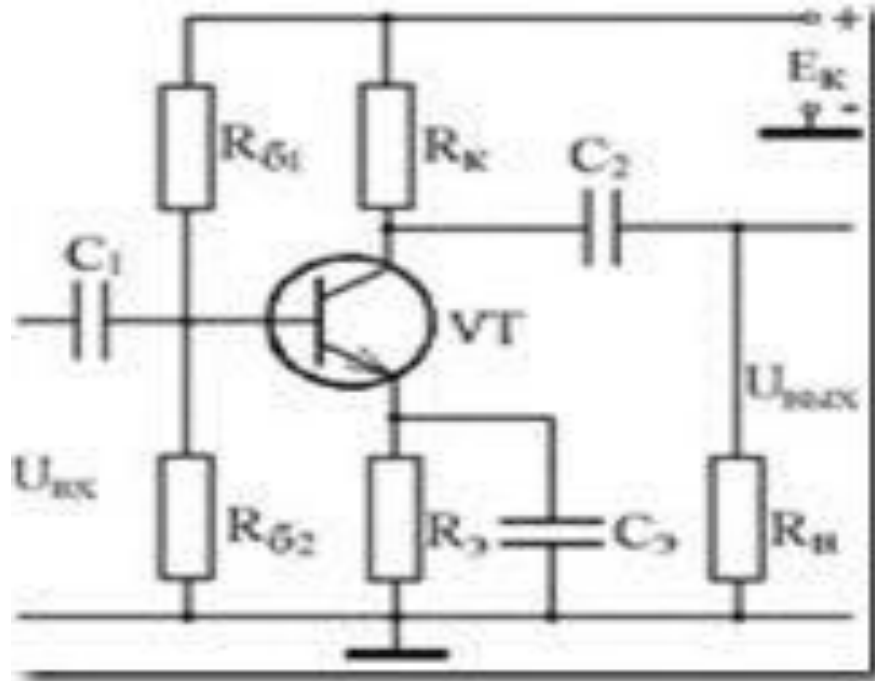


**АЧХ даёт возможность рассчитать коэффициенты частотных искажений на низшей  $M_n$  и высшей  $M_v$  частотах заданного диапазона работы усилителя:**

$$M_n = |K_{д0} / K_{дн}|$$

$$M_v = |K_{д0} / K_{дв}|$$

## 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  $E_k$ .

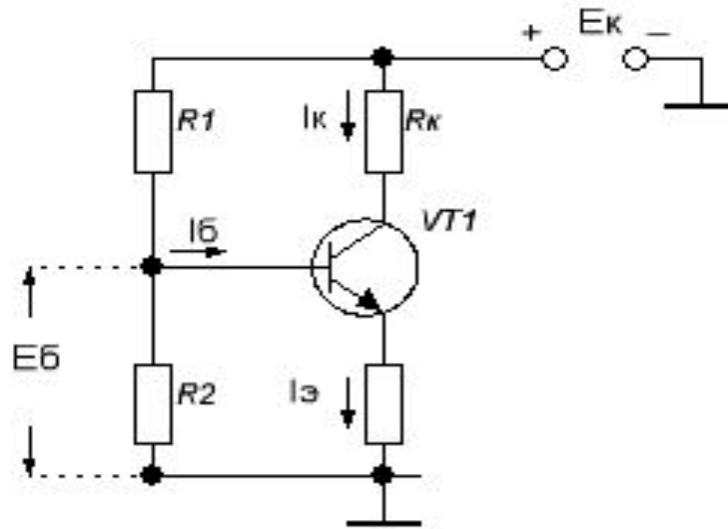
1. При увеличении входного напряжения ( $U_{\text{ВХ}} \uparrow$ ) ширина  $p-n$  перехода между коллектором и базой уменьшается, в результате возрастает ток в цепи эмиттера ( $I_{\text{Э}} \uparrow$ ), а выходное сопротивление транзистора (между коллектором и эмиттером) уменьшается ( $R_{\text{ВыхТр}}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

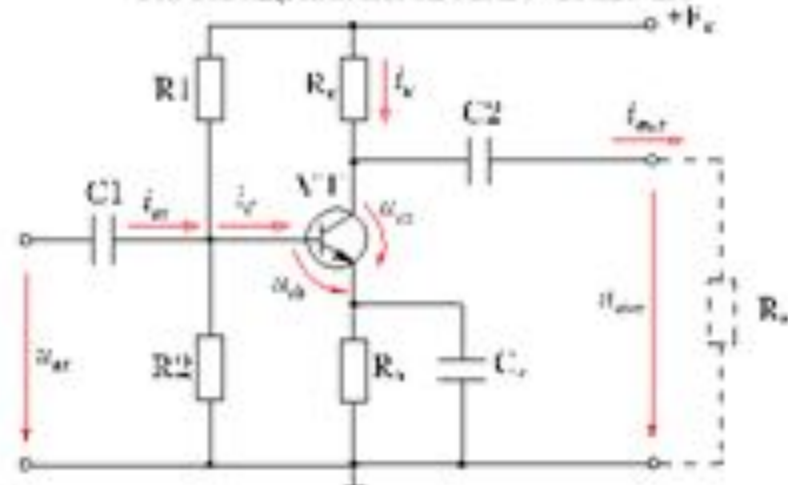


На рисунке схема усилительного каскада, позволяющая производить расчет основных параметров усилительного каскада  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_э$ ,  $R_к$ , обеспечивающих положение рабочей точки и ее стабилизацию по температуре и разбросу параметров. Запишем основные уравнения, используя схему, представленную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

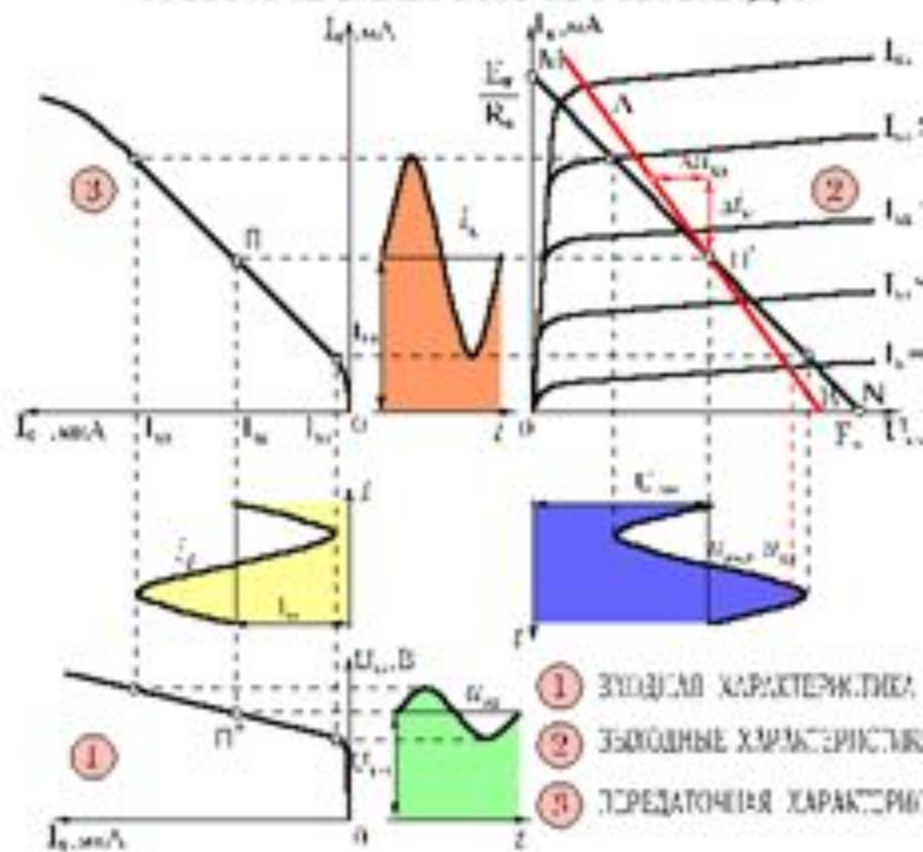
$$E_к = I_к (R_к + R_э) + U_{кэ} \quad E_б = E_к \frac{R_2}{R_2 + R_1} \quad E_б = U_{бэ} + I_к R_э \quad R_б = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

# УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА



ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАСКАДА



Пренебрегаем влиянием вспомогательных элементов ( $R_1, R_2, R_E, R_C$ ). Расчет нелинейной цепи (определение  $I_{к1}, U_{кэ1}, U_{бэ1}$  для различных  $I_{б1}, R_{X1}$ ) выполняем графически

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

$$U_{эм} = E_v - (R_k + R_x) I_{эм}$$

Итак  
Статическую линию нагрузки строят по двум точкам: 1)  $I_{б1} = 0; E_{к1} = U_{кэ1}$  (точка N на линии статической нагрузки);

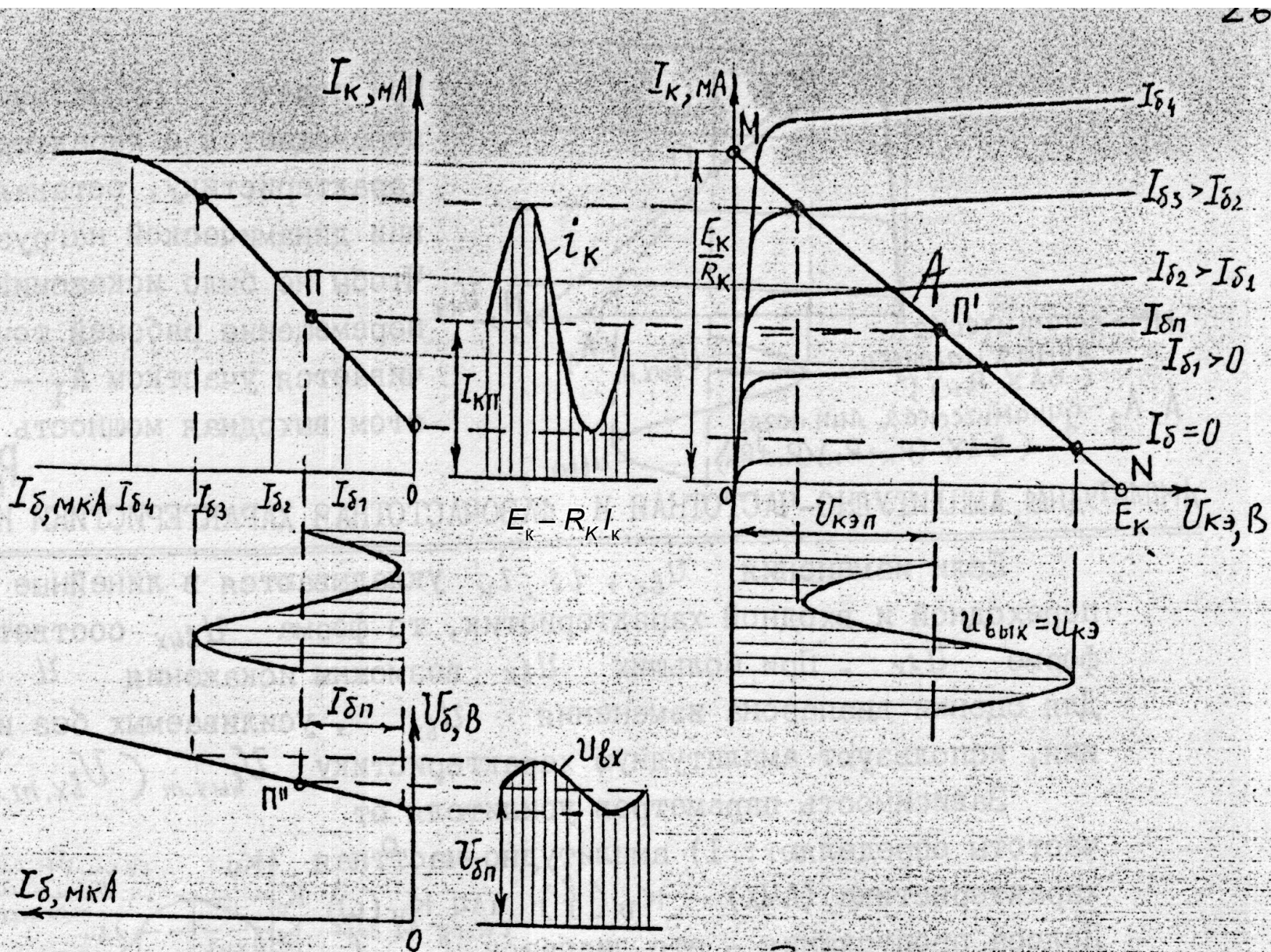
2)  $U_{кэ1} = 0; I_{к1} = E_{к1}/R_{к1}$  (точка M).

MN - линия нагрузки по постоянному току  
 $U_{эм} = E_v - (R_k + R_x) I_{эм} = E_v - R_x I_{эм}$

AB - линия нагрузки по переменному току

$$\Delta U_{эм} = -\Delta I_{б1} \frac{R_k R_x}{R_k + R_x}$$

# Графический анализ работы усилительного каскада на биполярном транзисторе с общим эмиттером



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:

$$U_{кэ} = E_k - R_K I_k$$

Статическую линию нагрузки строят по двум точкам:

- 1)  $I_k = 0; E_k = U_{кэ}$  (точка N на линии статической нагрузки);
- 2)  $U_{кэ} = 0; I_k = E_k/R_k$  (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  $U_{вых}$ .

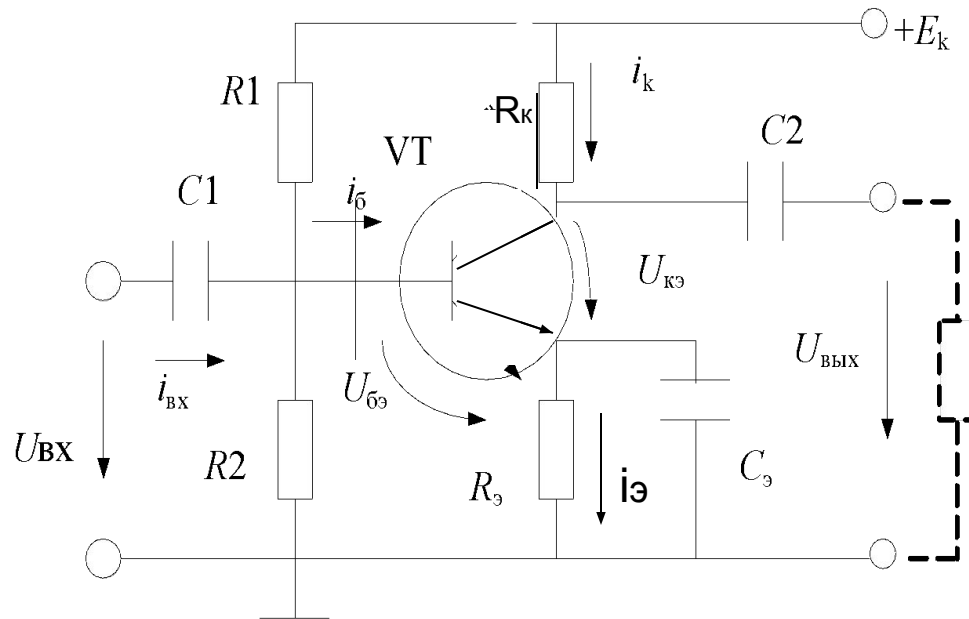
Благодаря тому, что коллекторный ток  $i_k \gg i_b$ , а  $R_k > R_{вх}$ , выходное напряжение каскада ОЭ значительно больше  $U_{вх}$ .

## 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  $\beta$ ).

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  $U_{бэ} = U_{R_2} - U_{R_3}$

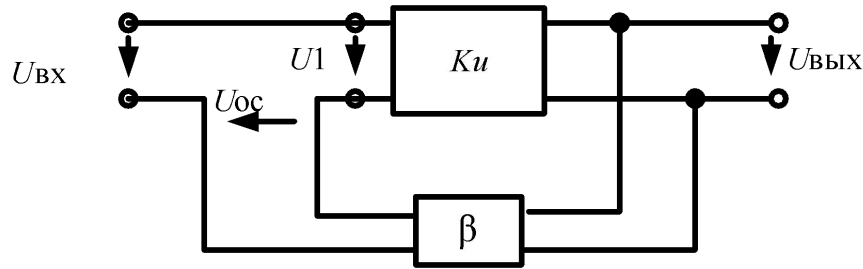
Но это приведет к уменьшению напряжения  $U_{бэ}$  настолько, чтобы ток базы принял прежнее значение. ООС всегда препятствует любому изменению тока эмиттера, а значит и тока базы тем эффективнее, чем больше значение  $R_3$ . Это значит, что ООС будет препятствовать приращению тока коллектора под воздействием 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  $\beta$  – 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:**

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

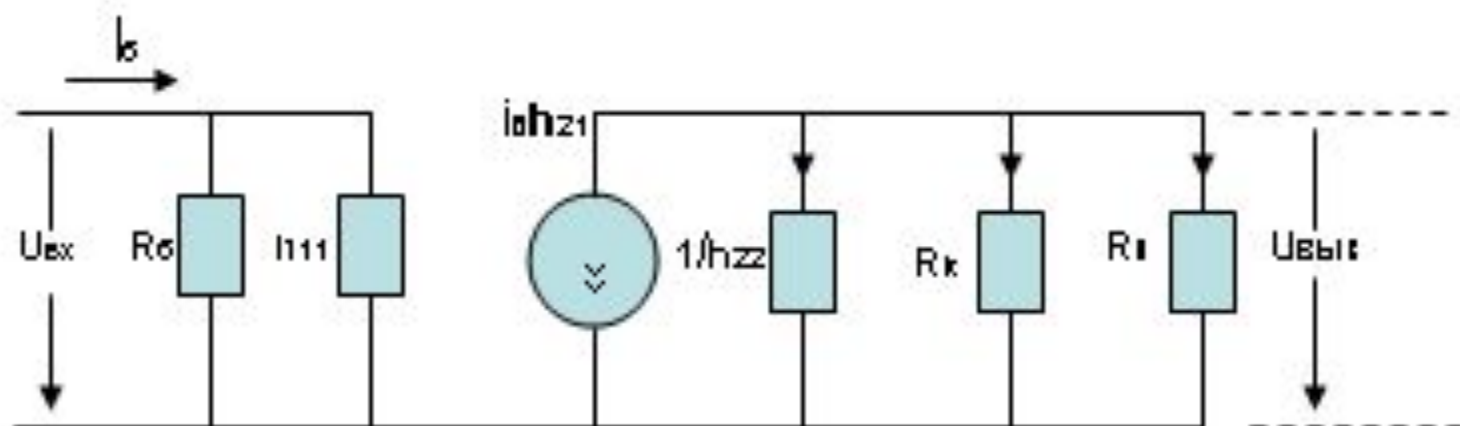
Разделив числитель и знаменатель на  $U_1$ , получим  $K_{\text{ос}} = \frac{K_u}{1 + \beta K_u}$ .

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 <sup>уменьшает</sup> 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



$$U_{вх} = i_\sigma R_{вх};$$

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

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

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

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



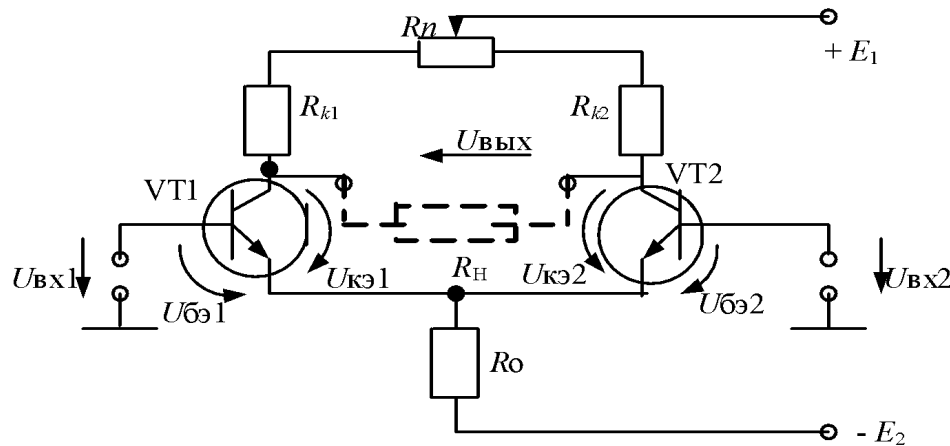
# Дифференциальный усилитель

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  $U_{\text{ВЫХ}}$

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

$$U_{\text{ВЫХ}} = K_u (U_{\text{ВХ1}} - U_{\text{ВХ2}})$$

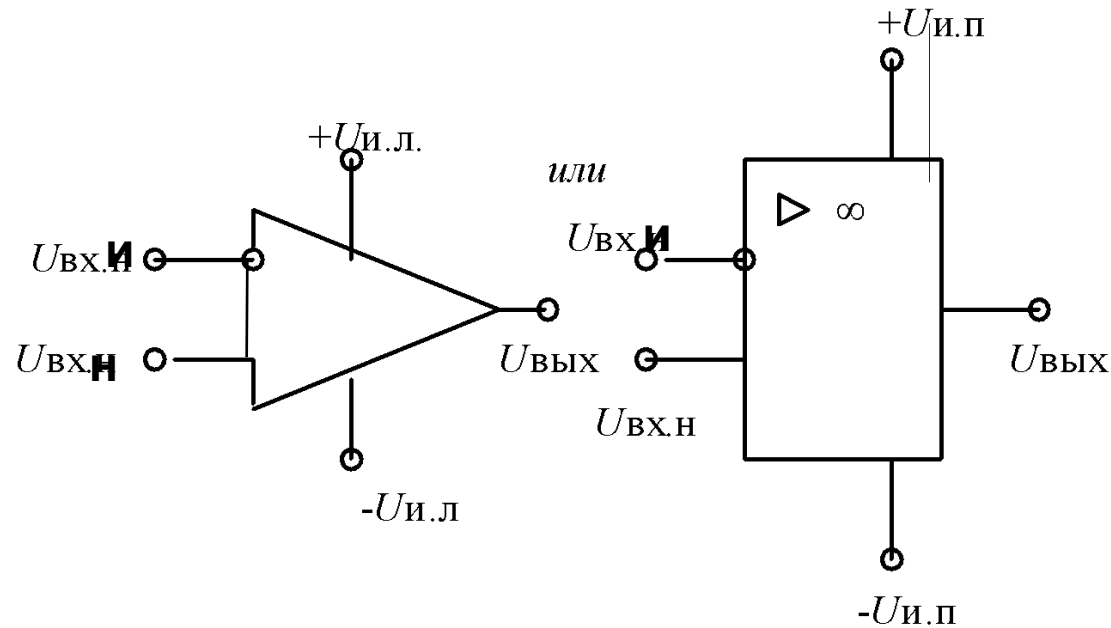
Величина  $R_{\text{П}}$  применяется для балансировки каскада (для установки нуля);  $R_0$  стабилизирует ток транзисторов, подобно звену  $R_3 - C_3$ . Принимают  $E_1 = E_2 = E_K/2$ . Если изменится  $E_1$ ,  $E_2$ , то изменяются токи в обоих транзисторах, а  $U_{\text{ВЫХ}} = 0$ .



## 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.**

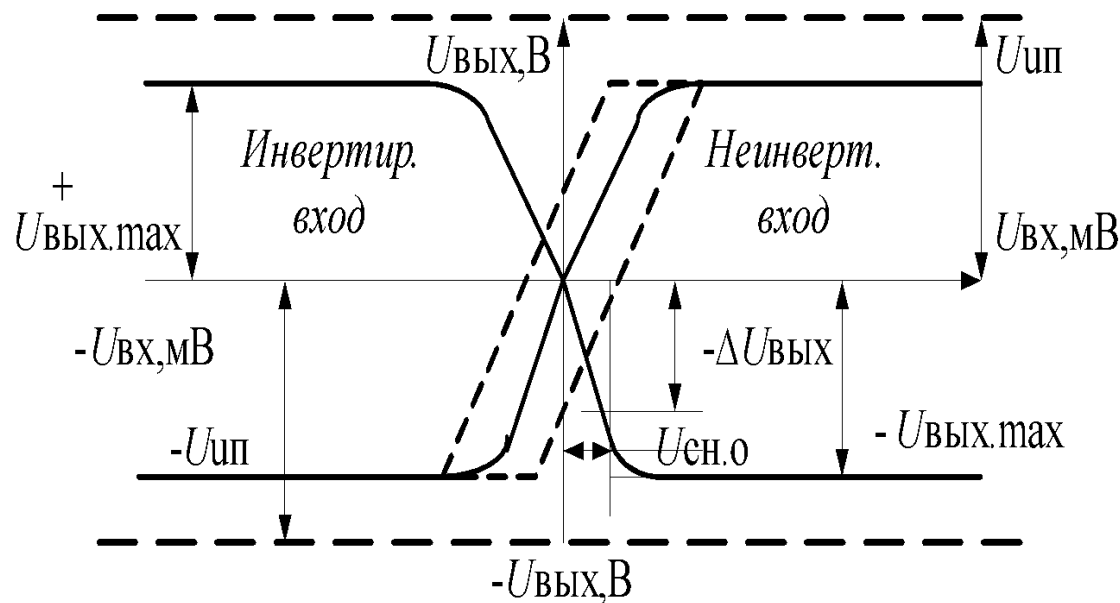
Важнейшими характеристиками ОУ являются амплитудные (передаточные)

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

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.



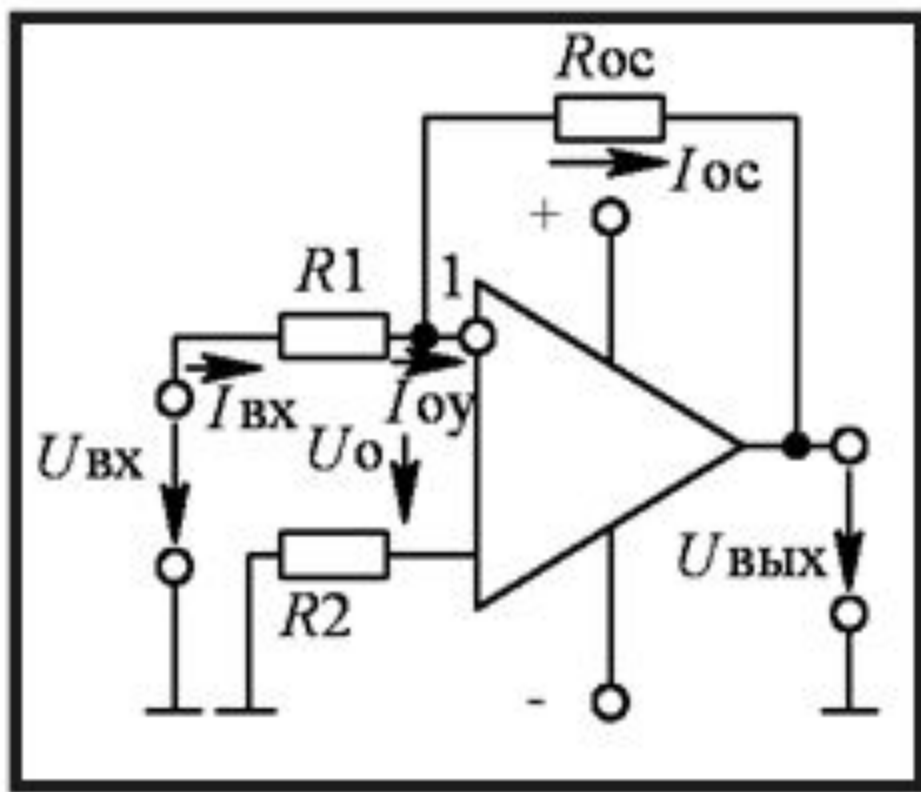
**Требования к электрическим характеристикам:**

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.  $R_{вх} = \infty$ ;  
 $i_{вх} = i_{oc}$

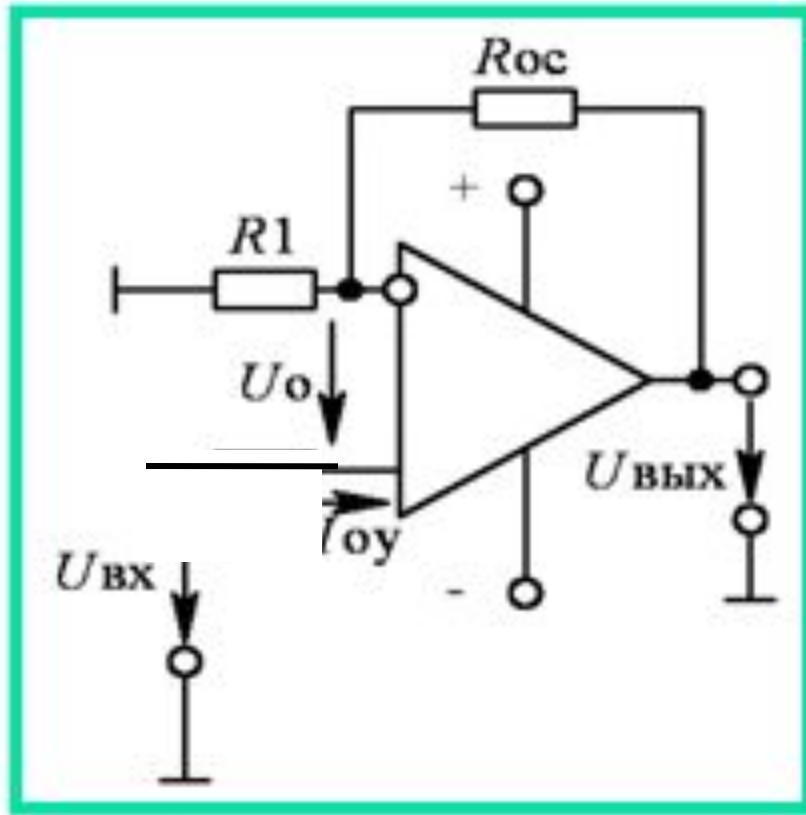
$$U_{вх} / R_1 = - U_{вых} / R_{oc}$$

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



Назначение – изменение сигнала в определенном соотношении

# Неинвертирующий усилитель

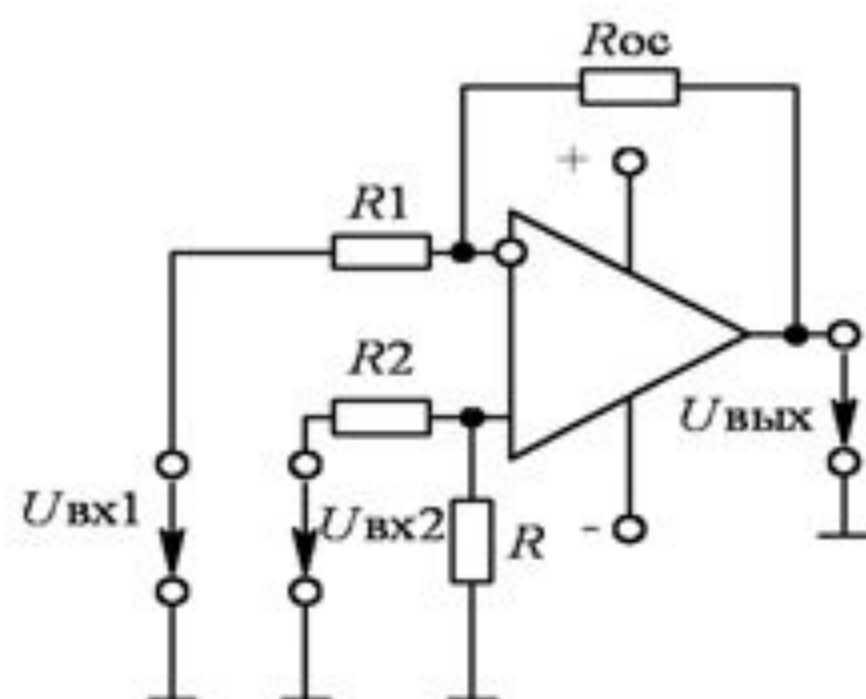


- Неинвертирующий усилитель не изменяет знак выходного сигнала относительно входного  
 $U_{\text{вх}} = I_{\text{вх}} R_1$ ;  $U_{\text{вых}} = I_{\text{вх}} R_1 + I_{\text{ос}} R_{\text{ос}}$ ;  
 $U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} = 1 + R_{\text{ос}} / R_1$

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



# Вычитатель-усилитель



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

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

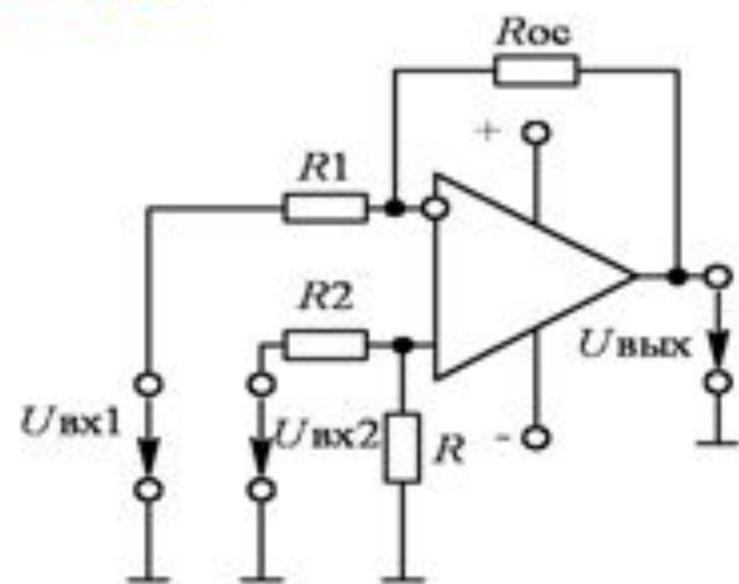


# Сумматоры

## Инвертирующий сумматор

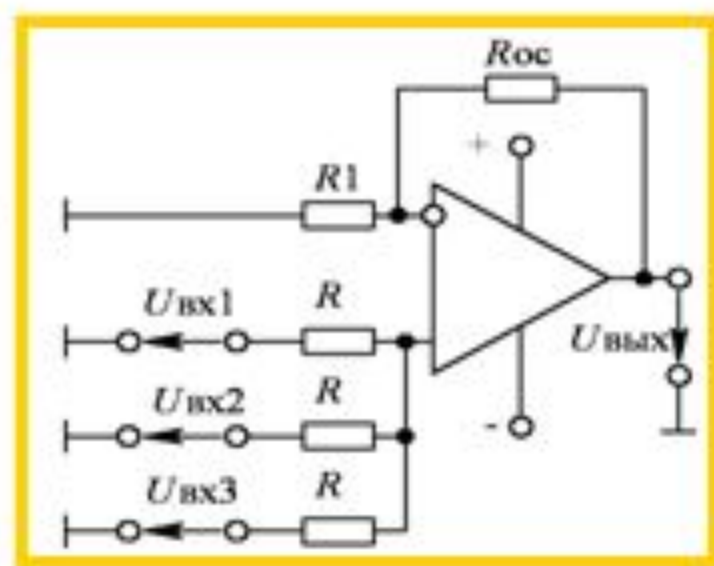
При равенстве входных сопротивлений  $R_1=R_2=R$

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



## Неинвертирующий сумматор

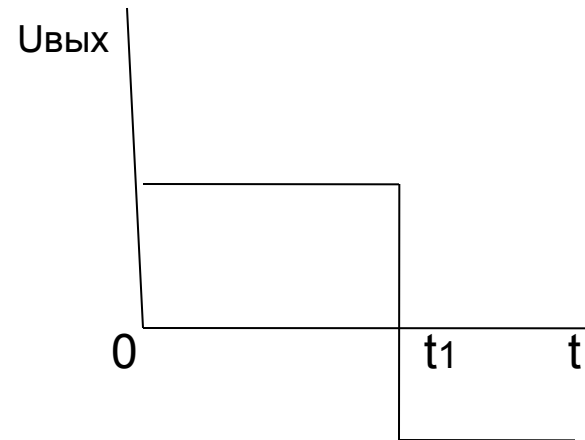
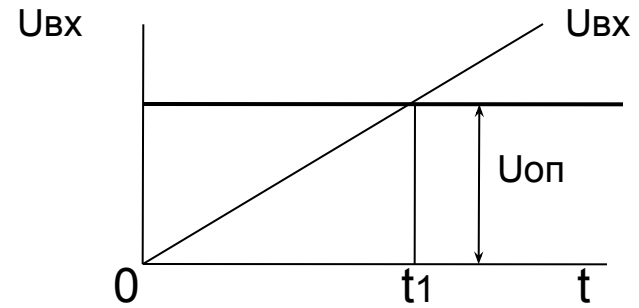
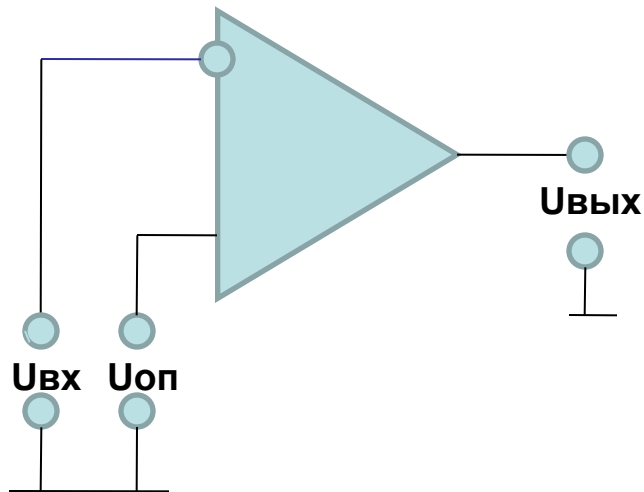
$$U_{\text{вых}} = \frac{1 + R_{\text{ос.}}/R}{n} (U_{\text{вх1}} + U_{\text{вх2}} + \dots + U_{\text{вхn}})$$





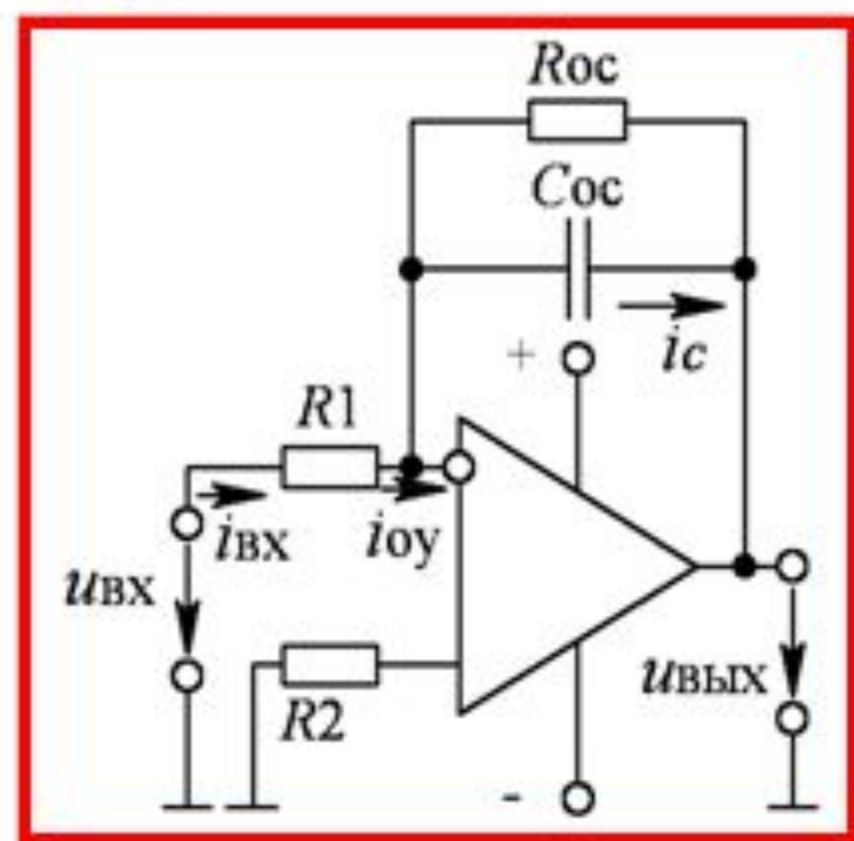
# КОМПАРАТОР СИГНАЛОВ

Компаратор сигналов – схема для сравнения двух напряжений



**Использование – для преобразования формы сигнала, получения прямоугольных импульсов**

# Интегратор



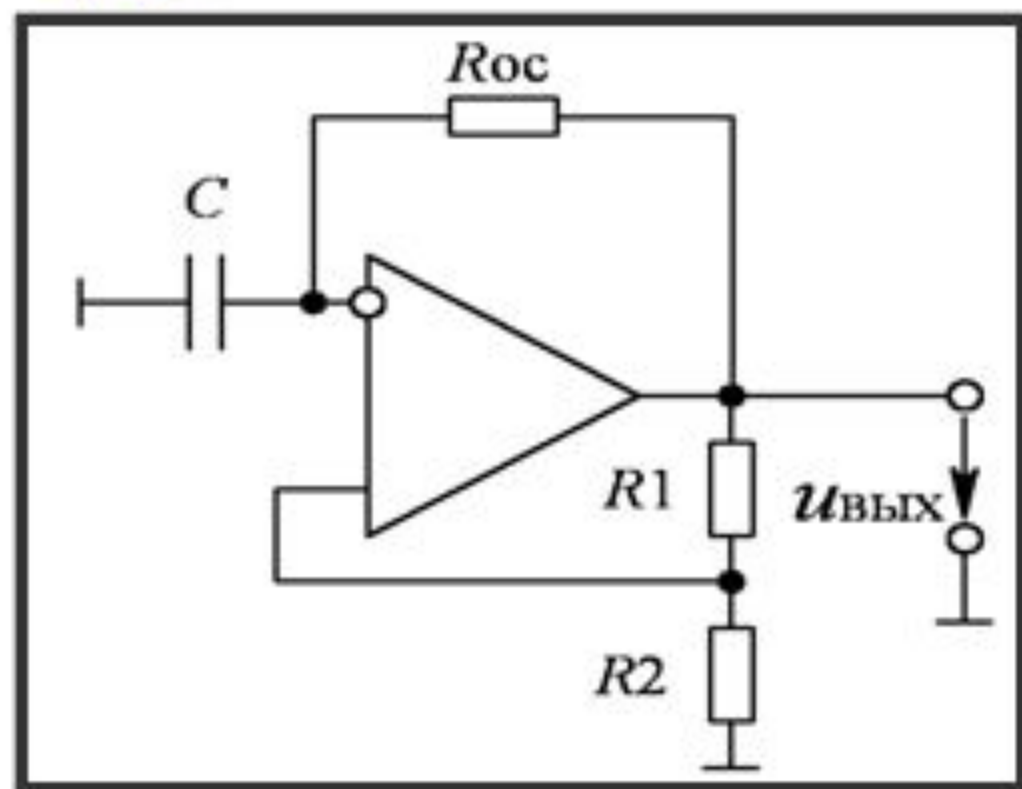
реализует операцию

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

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.

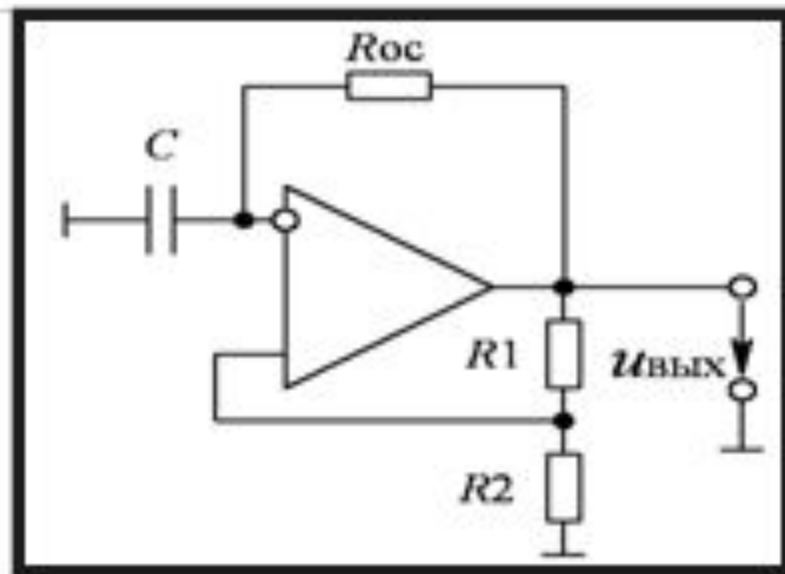
Данный генератор является симметричным и для него длительность импульса и паузы равны

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

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

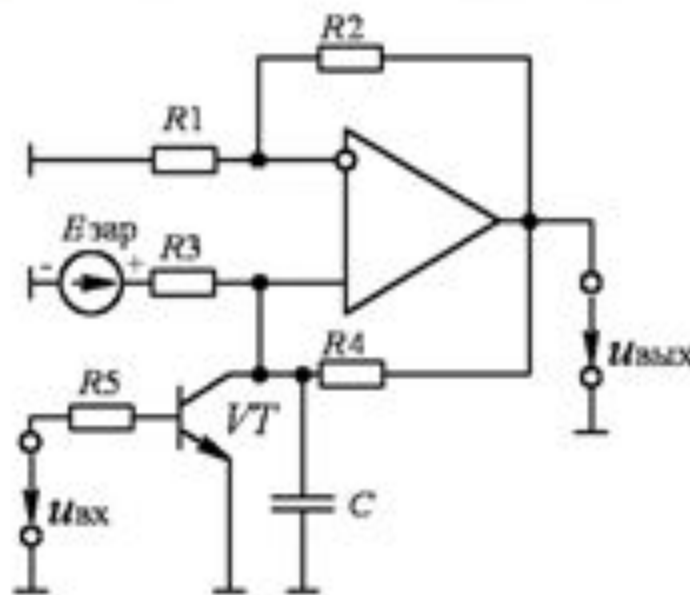
Период повторения импульсов  $T_n = (t_u + t_n) = 2 \cdot t_u$  Сквозность  $Q = \frac{T_n}{t_u} = 2$

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

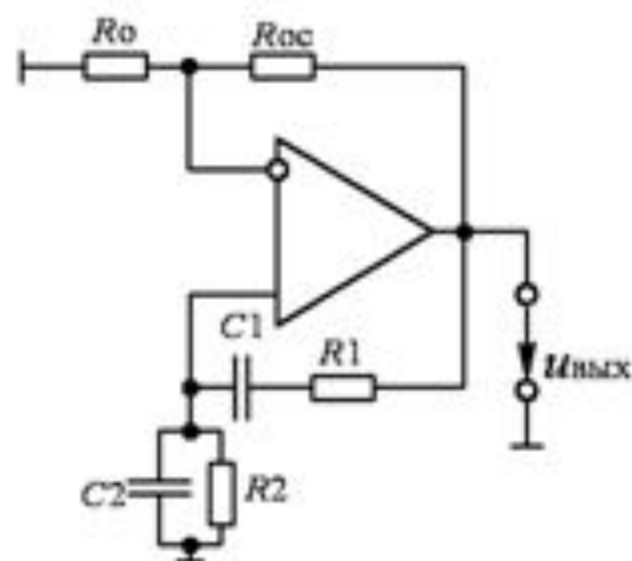


# Генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН)

- 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  $R_{oc}$  и  $R_0$  определяет коэффициент усиления  $K_u$ .

