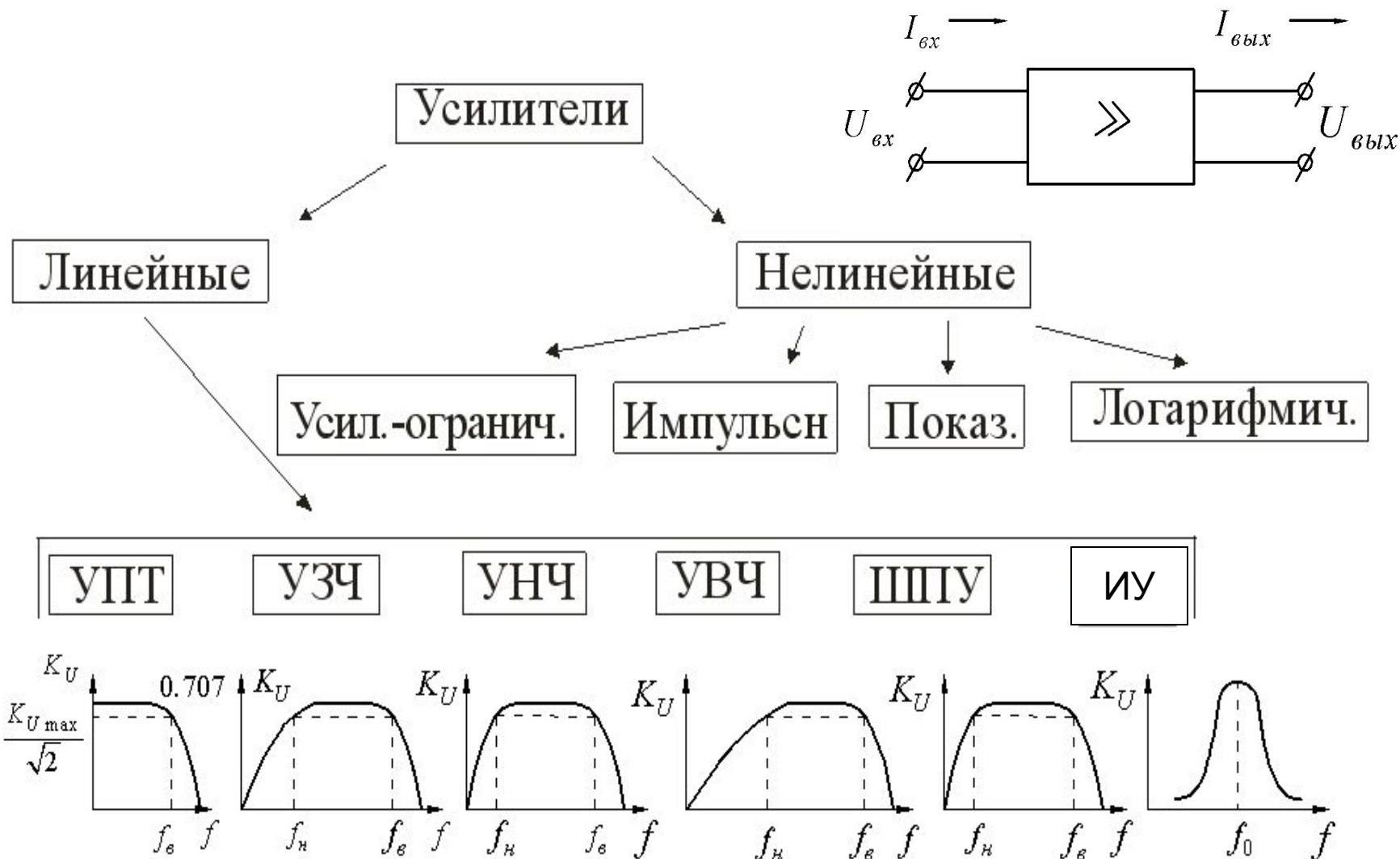


Усилители

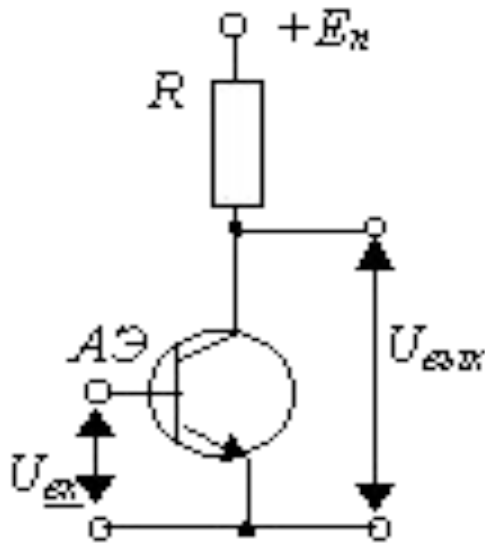
Усилители - устройства, предназначенные для увеличения параметров электрического сигнала (напряжения, тока, мощности) без существенного искажения его формы

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

Классификация усилителей



Параметры усилителей



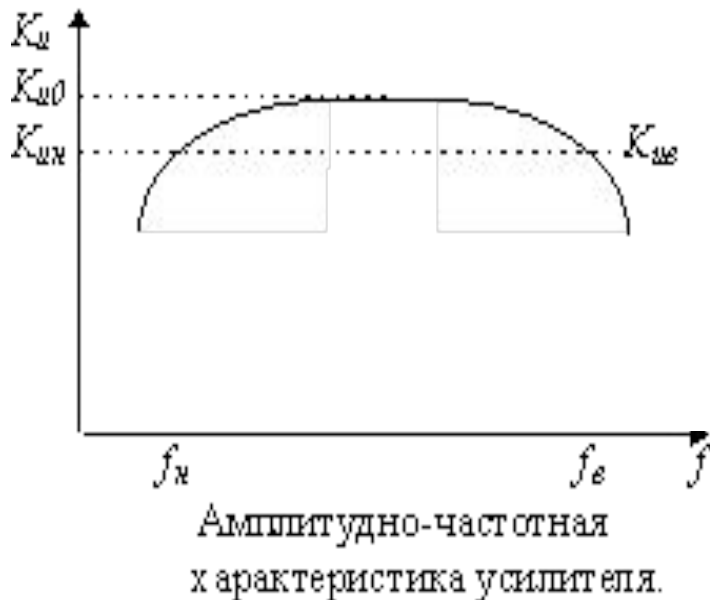
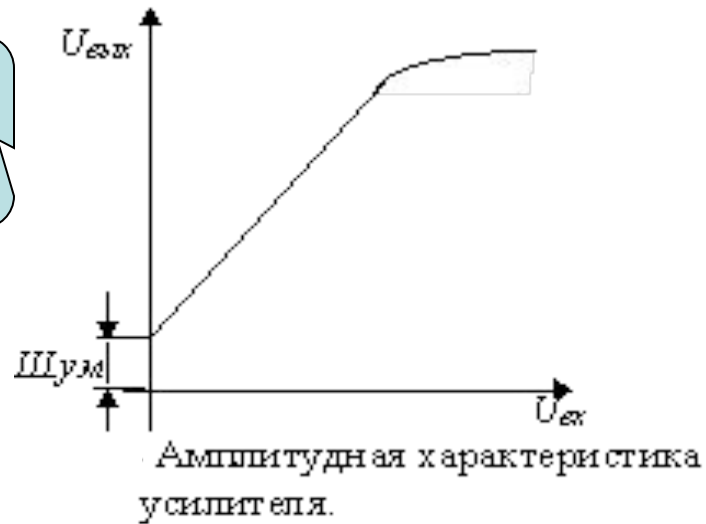
Основой усилителя являются два элемента: резистор R и управляемый активный элемент (АЭ) транзистор, сопротивление которого изменяется под действием входного сигнала $U_{вх}$

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

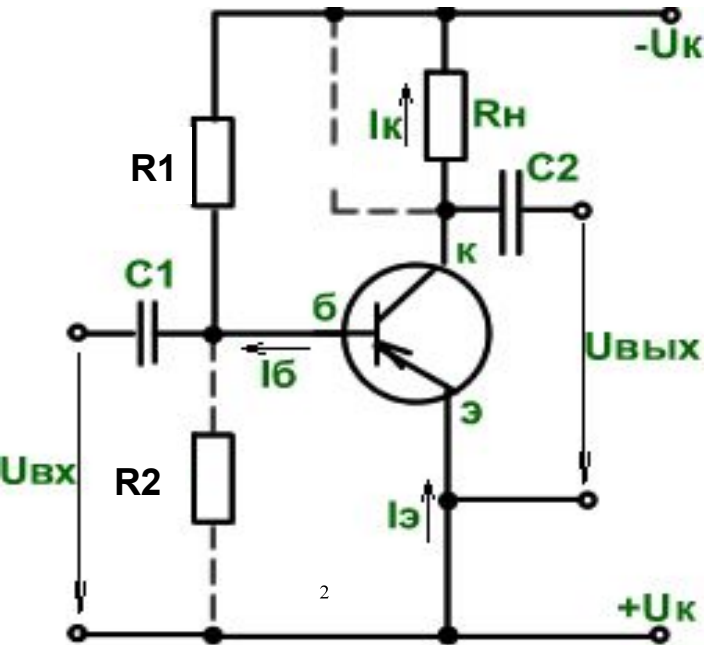


АЧХ даёт возможность рассчитать коэффициенты частотных искажений на низшей M_n и высшей M_e частотах заданного диапазона работы усилителя:

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

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

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



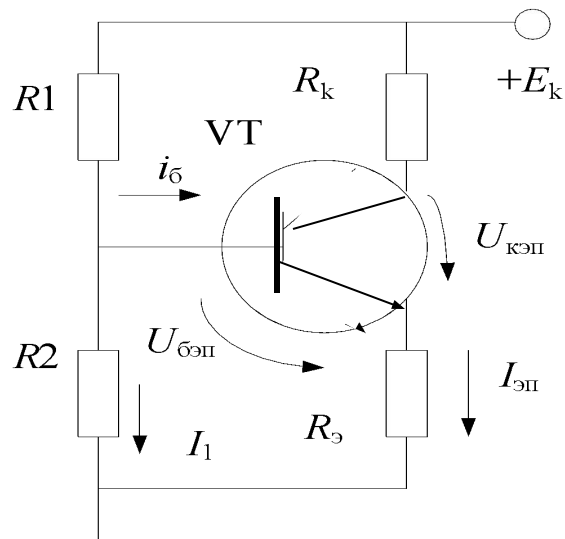
За счет величины U_K происходит усиление выходного сигнала.

Разделительные конденсаторы $C1$, $C2$ на переменном токе имеют сопротивления X_{C1} , X_{C2} близкие к нулю, их назначение:

$C1$ не пропускает постоянный ток во входной источник $U_{вх}$ (от U_K через R).

Конденсатор $C2$ не пропускает постоянный ток в нагрузку.

$R1$, $R2$ – делитель напряжения, для задания нужного напряжения $U_{БЭП}$ покоя (I_b течет через $R1$), он создает постоянное смещение на переходе Б–Э, который приоткрывается и создает коллекторный ток покоя $I_{кп}$ (чтобы транзистор работал, не искажая форму $U_{вх}$).



Статический режим: ($U_{вх} = 0$).

Расчет параметров резисторов:

$$E_k = (R_э + R_k) I_{кп} + U_{кэп}$$

$$R_э + R_k = (E_k - U_{кэп}) / I_{кп}$$

$$R_2 = (U_{бэп} + R_э I_{эп}) / I_1,$$

где $I_1 = (2 \dots 5) I_{бп}$;

$$R_1 = (E_k + R_2 I_1) / (I_1 + I_{бп})$$

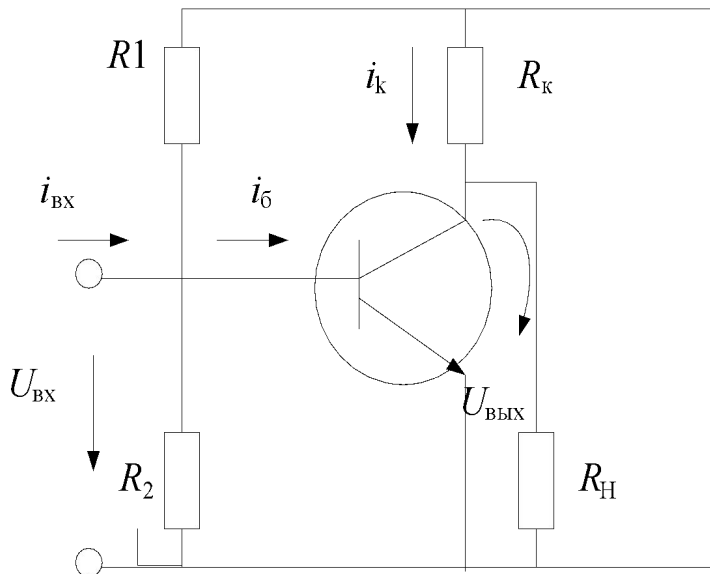
Динамический режим каскада ($U_{вх} \neq 0$).

$$U_{вх} = U_{\max} \sin \omega t$$

$$X_{C1}, X_{C2} \rightarrow 0 \quad \text{пренебрегаем}$$

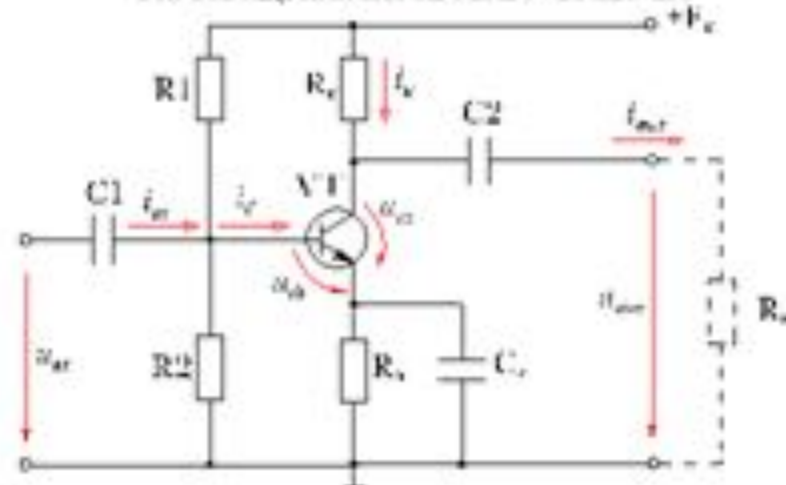
$$R' = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2}$$

$$R_k \parallel R_H \quad R_1 \parallel R_2$$



УСИЛИТЕЛЬНЫЙ КАСКАД С ОБЩИМ ЭМИТТЕРОМ

ПРИНЦИПИАЛЬНАЯ СХЕМА



Пренебрегаем влиянием вспомогательных элементов (R_2, R_3, R_4, R_5). Расчет нелинейной цепи (определение $I_k, U_{кк}, U_k$ для различных I_b, R_k) выполняем графически.

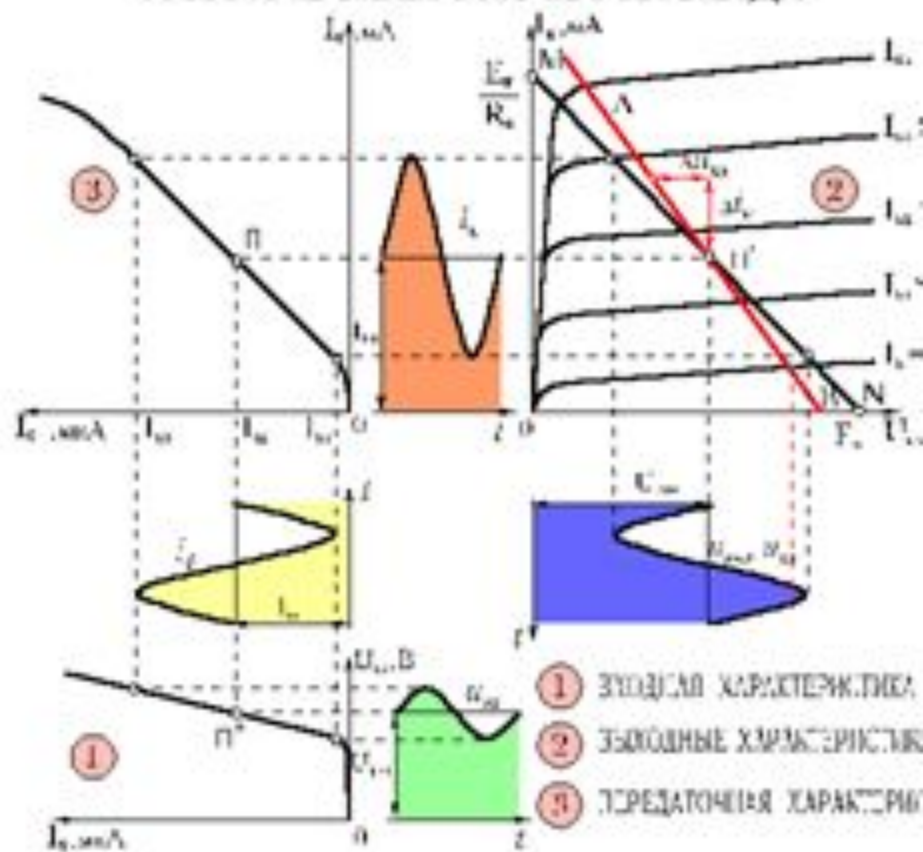
Для этого на семействе выходных характеристик проводим ВАХ резистора R_k , удовлетворяющую уравнению:

$$U_{ан} = E_c - (R_k + R_3) I_m$$

$$U_{кк} = E_c - R_k I_k$$

Итак
Статическую линию нагрузки строят по двум точкам: 1) $I_k = 0; E_k = U_{кк}$ (точка N на линии статической нагрузки);
2) $U_{кк} = 0; I_k = E_k/R_k$ (точка M).

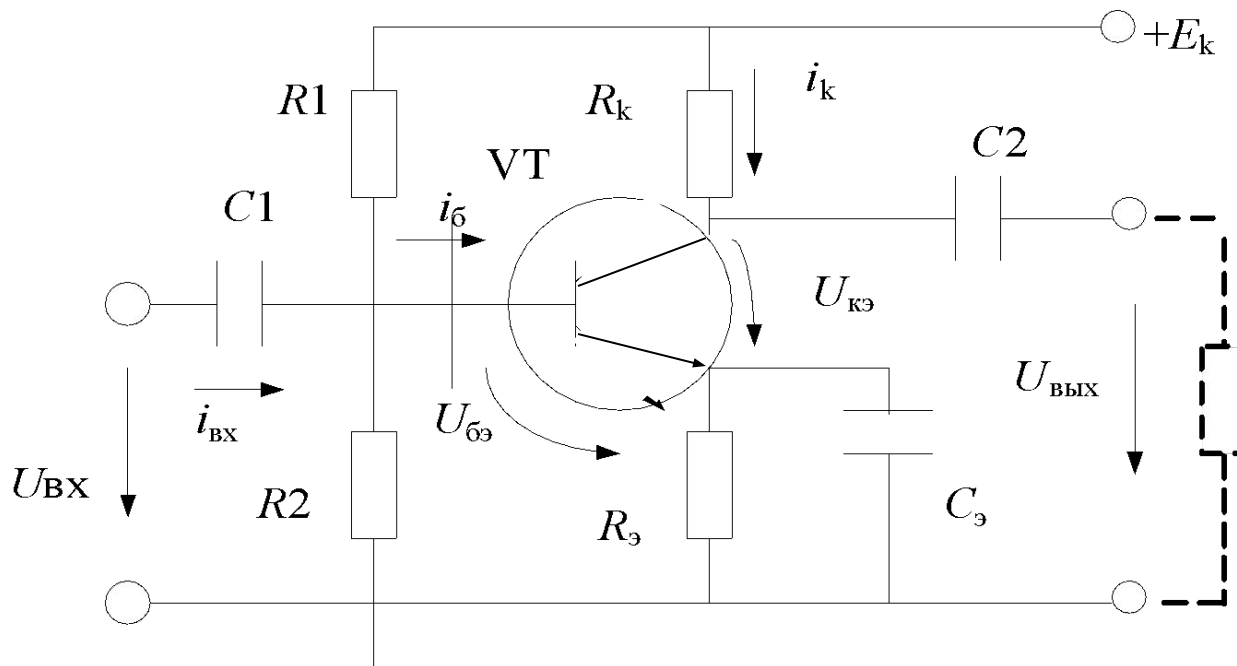
ГРАФИЧЕСКИЙ РАСЧЕТ КАСКАДА



MN - линия нагрузки по постоянному току
 $U_{кк} = E_c - (R_k + R_3) I_k \approx E_c - R_k I_k$

AB - линия нагрузки по переменному току
 $\Delta U_{кк} = -\Delta I_k \frac{R_k + R_3}{1 + \beta}$

Усилительный каскад с общим эмиттером



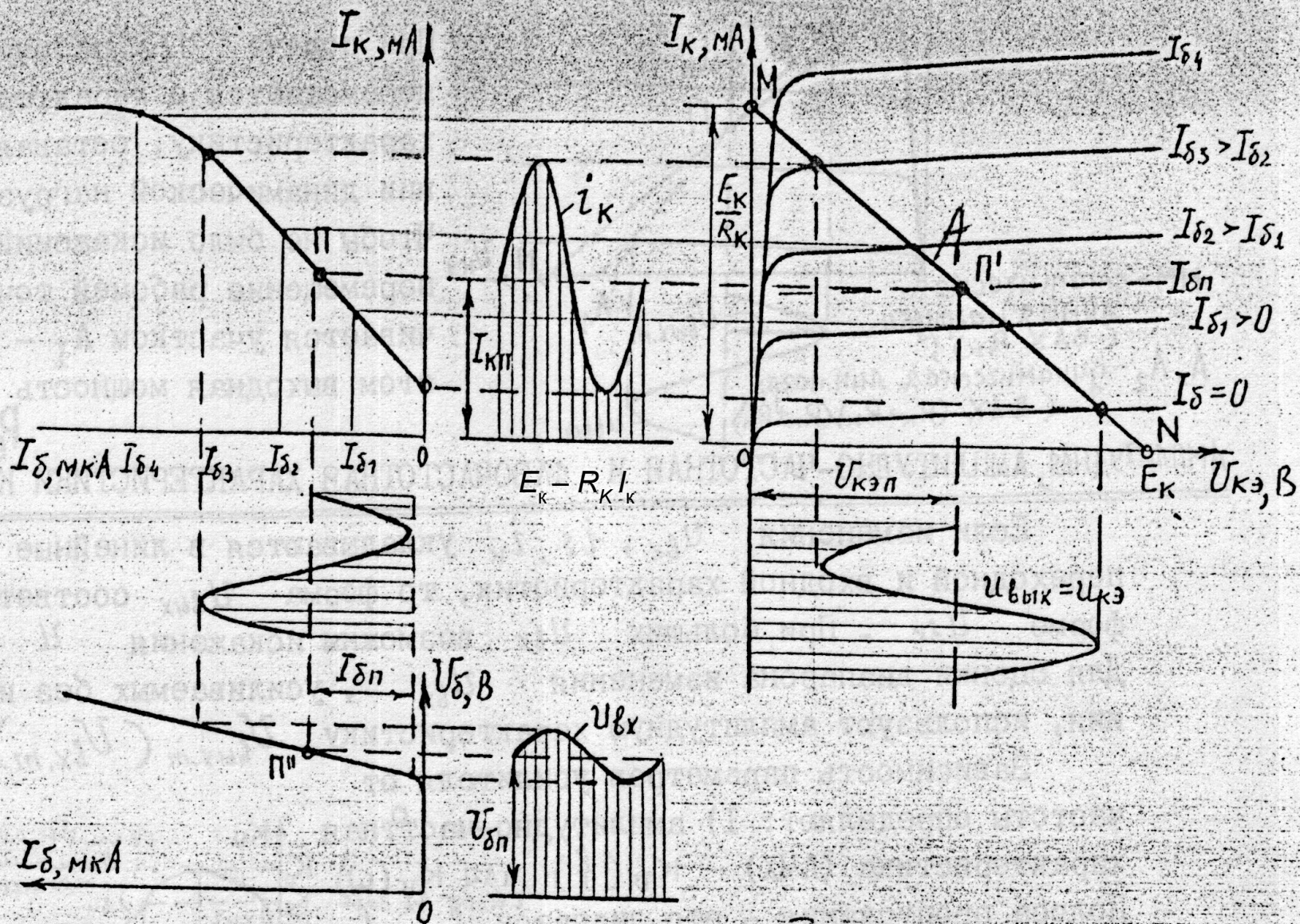
$$U_{кэп} = E_k - (R_k + R_3) I_{кп}$$

$$U_{кэ} = E_k - R_k I_k$$

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).

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:

$$U_{кэп} = E_K - (R_K + R_3) I_{кп}$$

$$U_{кэ} = E_K - R_K I_K$$

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 базы резисторами R_1, R_2 обеспечивают оптимальные значения $U_{бп}, I_{бп}$, чтобы рабочая точка покоя A находилась на середине линейного участка переходной характеристики, которая строится по точкам пересечения линии нагрузки с выходными характеристиками. 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 $U_{вых}$.

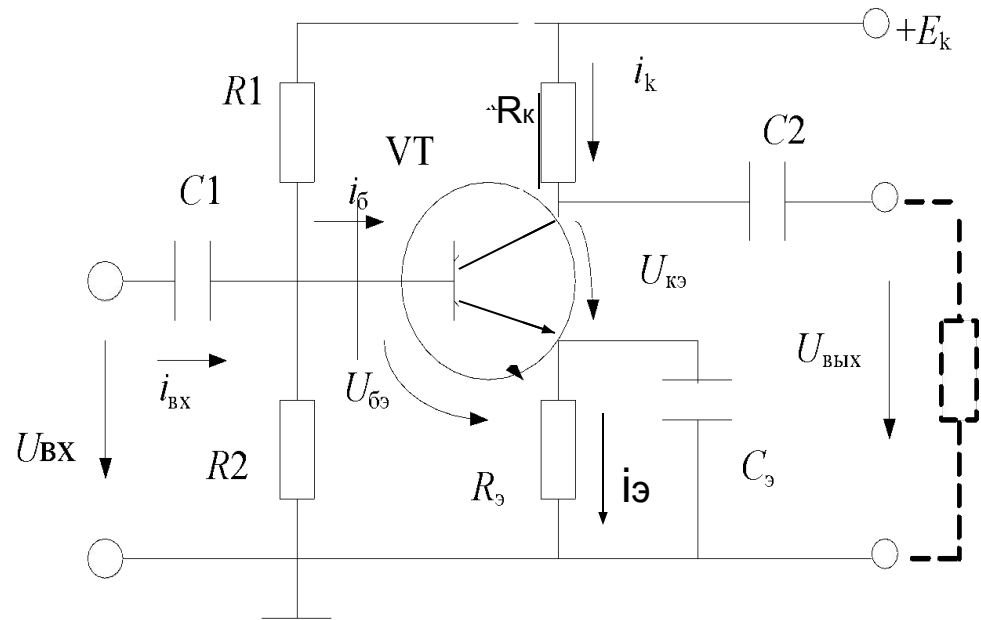
Благодаря тому, что коллекторный ток $i_K \gg i_b$, а $R_K > R_{вх}$, выходное напряжение каскада ОЭ значительно больше $U_{вх}$.

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 автоматической термостабилизации (для компенсации влияния температуры), которое обеспечивает отрицательную обратную связь, т. к. часть $U_{\text{вых}}$ подается на вход вызывая уменьшение $U_{\text{вх}}$;



(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 $U_{бэ} = U_{R_2} - U_{R_3}$

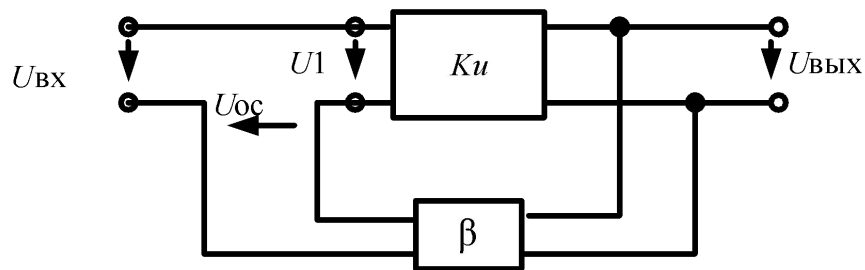
Но это приведет к уменьшению напряжения $U_{бэ}$ настолько, чтобы ток базы принял прежнее значение. ООС всегда препятствует любому изменению тока эмиттера, а значит и тока базы тем эффективнее, чем больше значение R_3 . Это значит, что ООС будет препятствовать приращению тока коллектора под воздействием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

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

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:

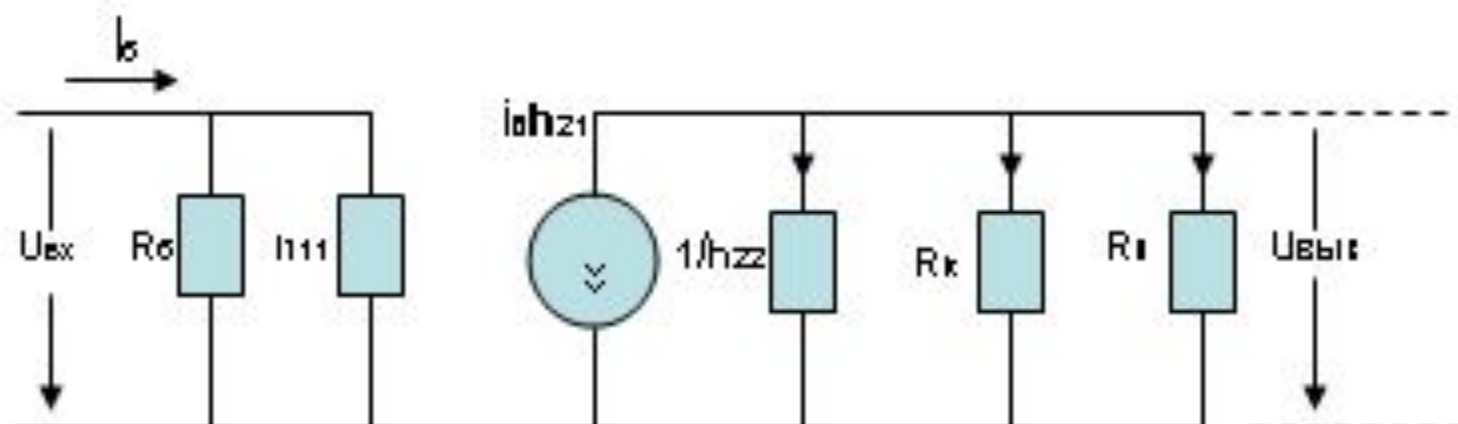
1) повышает стабильность K_u ; $R_{\text{вх.ОС}} = R_{\text{вх}} (1 + \beta K_u)$

$R_{\text{вых}}$ 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



$$U_{вх} = i_{\sigma} R_{вх};$$

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

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

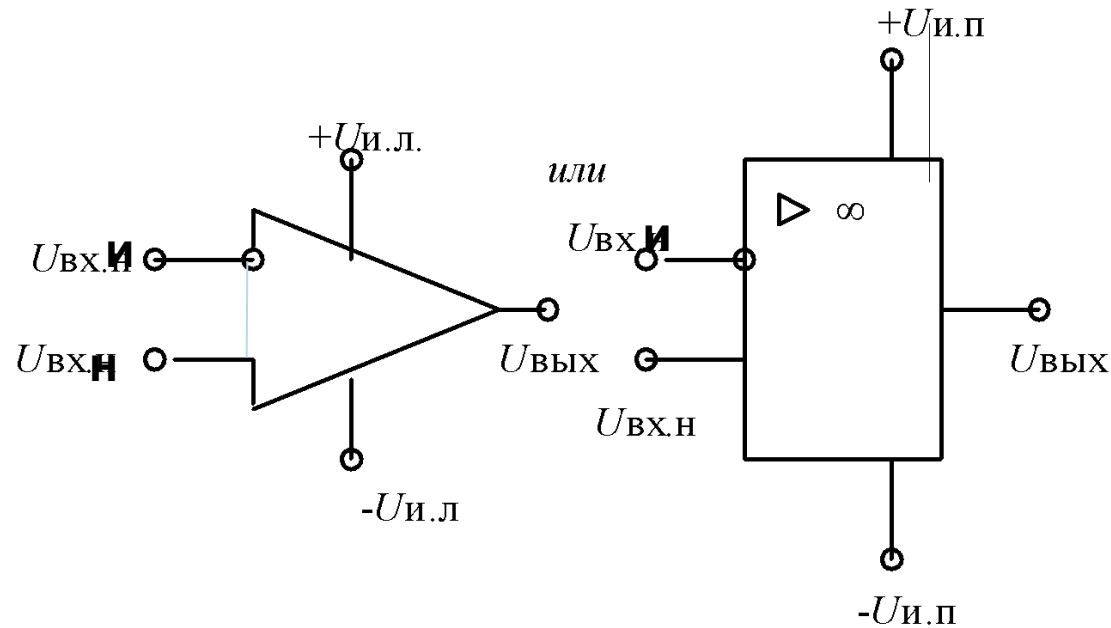
$$U_{вых} = - i_{\sigma} h_{21} / [(1/h_{22}) + R_k] = - i_{\sigma} h_{21} R_k$$

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

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.

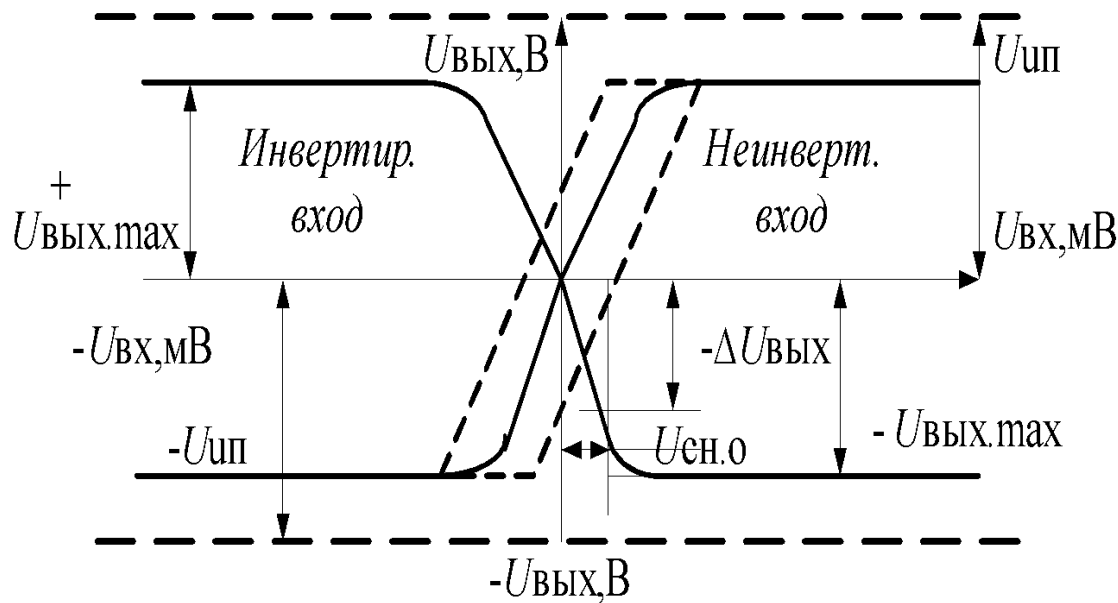
Важнейшими характеристиками ОУ являются амплитудные (передаточные)

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

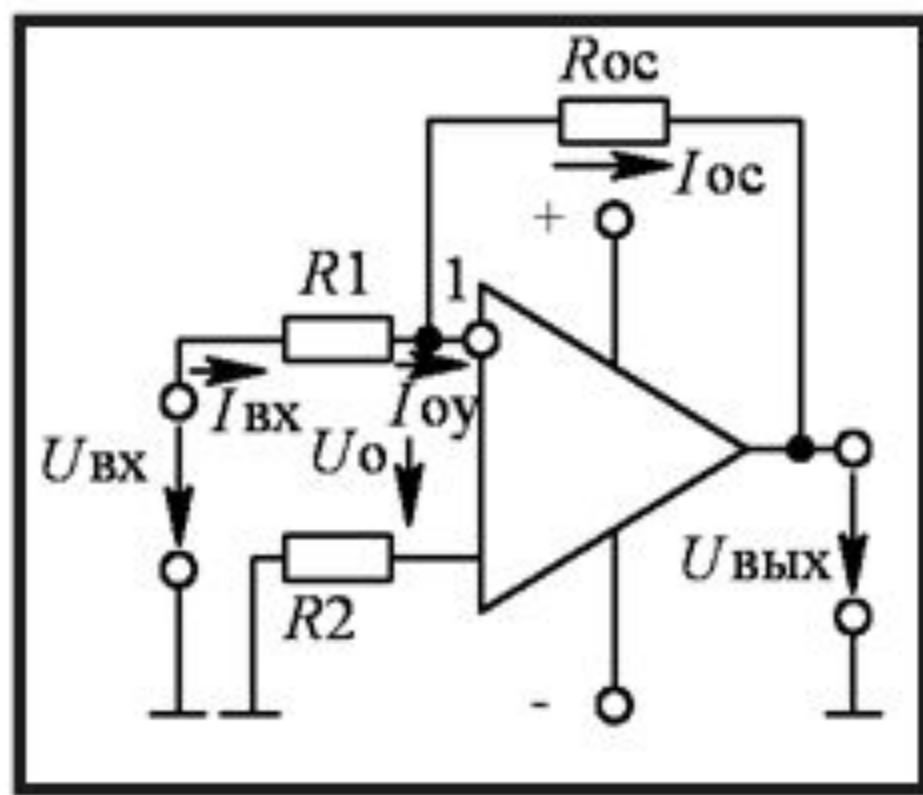
Последние имеют вид АЧХ усилителя постоянного тока за исключением специальных частотнозависимых устройств (избирательный усилитель и др.

Передаточные характеристики имеют линейный участок, для которого $\kappa_U =$

const и нелинейный - $\kappa_U' < \kappa_U$. При реализации конкретных устройств используют линейные и нелинейные участки.



Инвертирующий усилитель

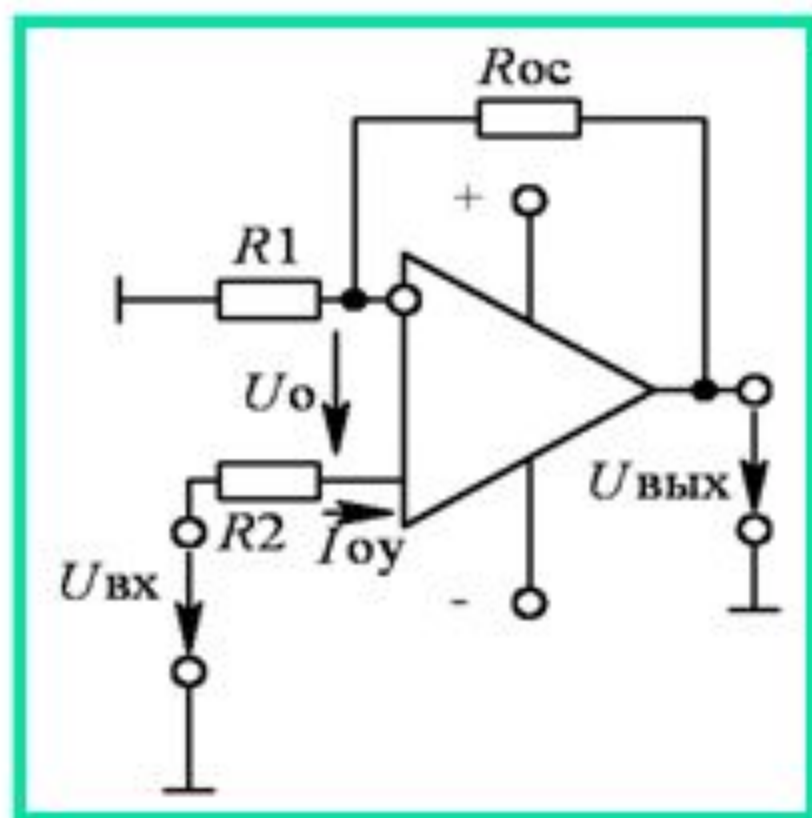


- Инвертирующий усилитель изменяет знак выходного сигнала относительно входного. На инвертирующий вход через резистор R_1 подается $U_{вх}$ и вводится параллельная отрицательная обратная связь по напряжению с помощью резистора $R_{о.с.}$. Коэффициент усиления:

$$K_{УИ} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_{о.с.}}{R_1}$$



Неинвертирующий усилитель

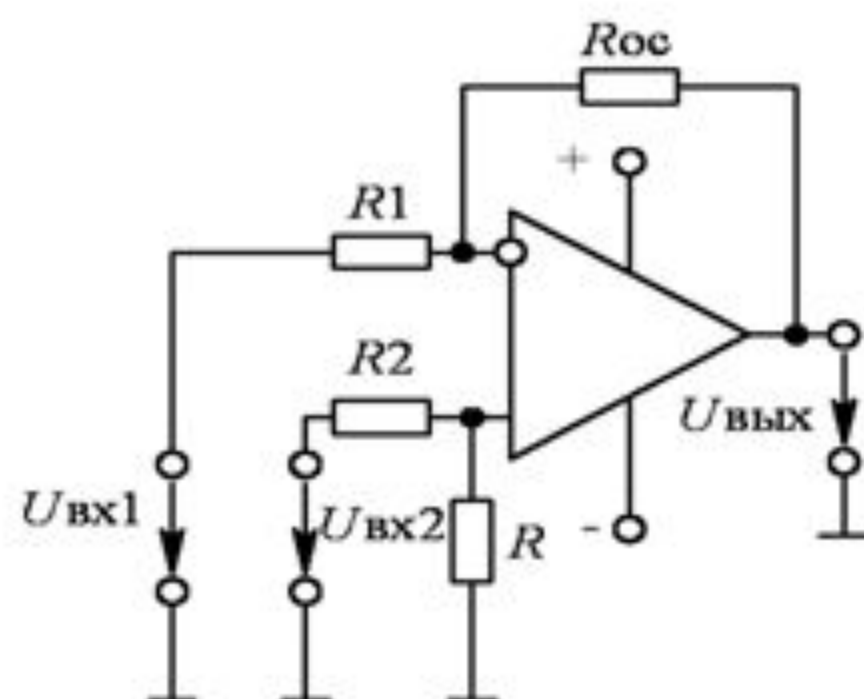


- Неинвертирующий усилитель не изменяет знак выходного сигнала относительно входного

$$K_{U_{н}} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = 1 + \frac{R_{o.c.}}{R_1}$$



Вычитатель-усилитель



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

$$U_{\text{вых}} = (U_{\text{вх2}} - U_{\text{вх1}}) \frac{R_{o.c.}}{R_1}$$

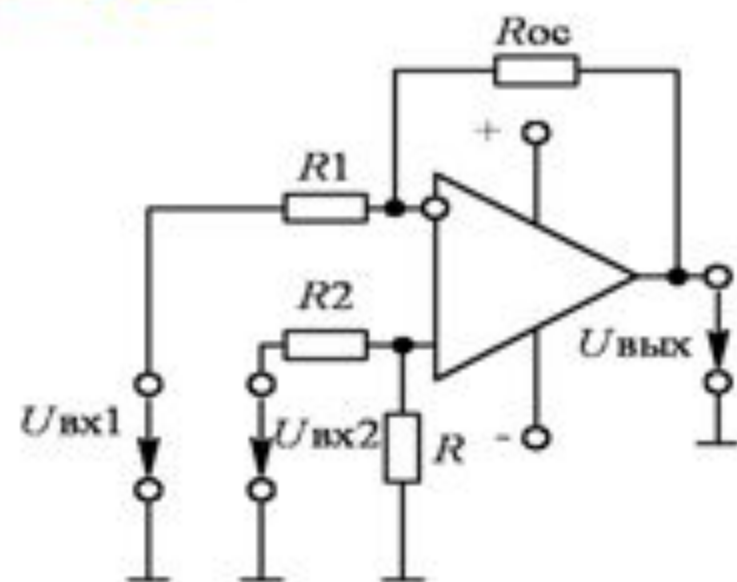


Сумматоры

Инвертирующий сумматор

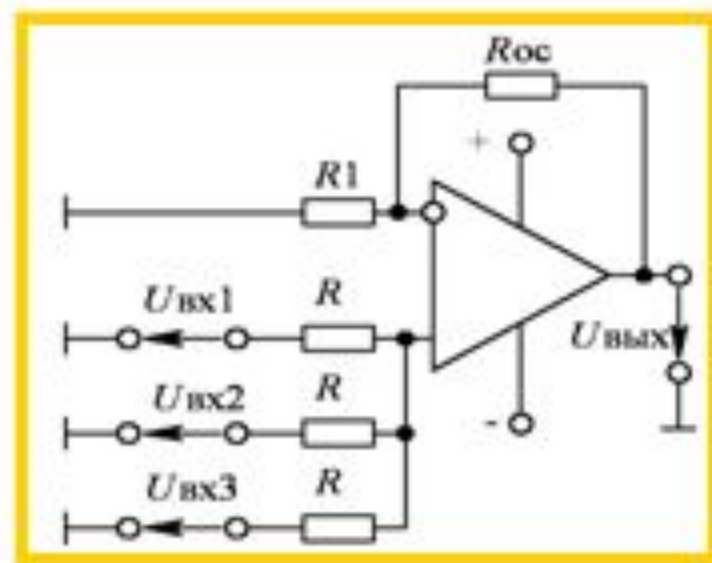
При равенстве входных сопротивлений $R_1=R_2=R$

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

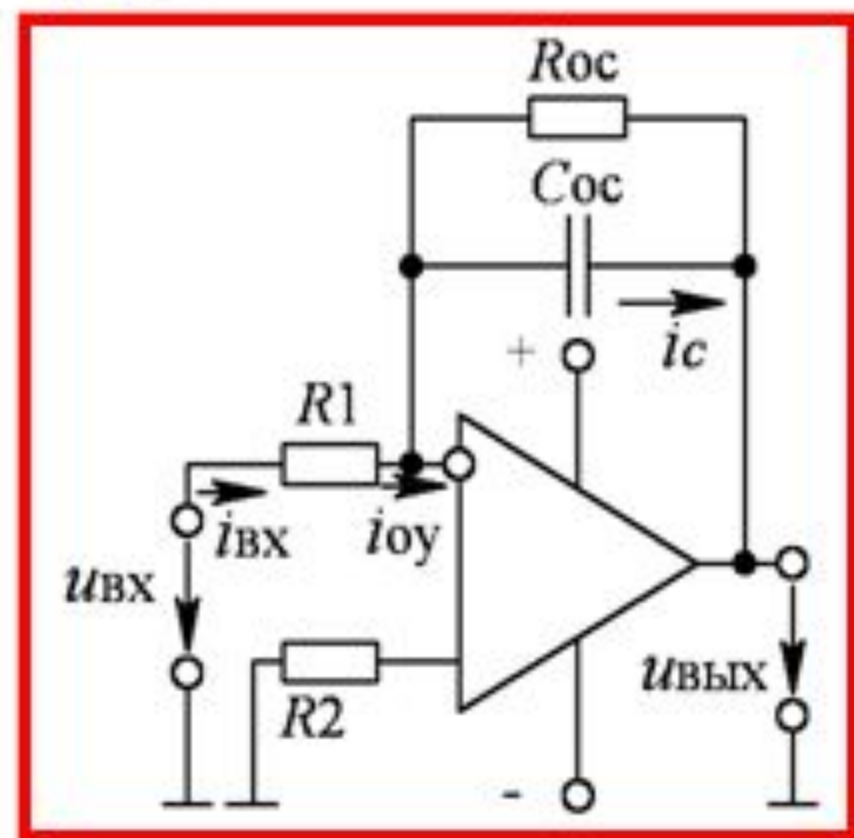


Неинвертирующий сумматор

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



Интегратор



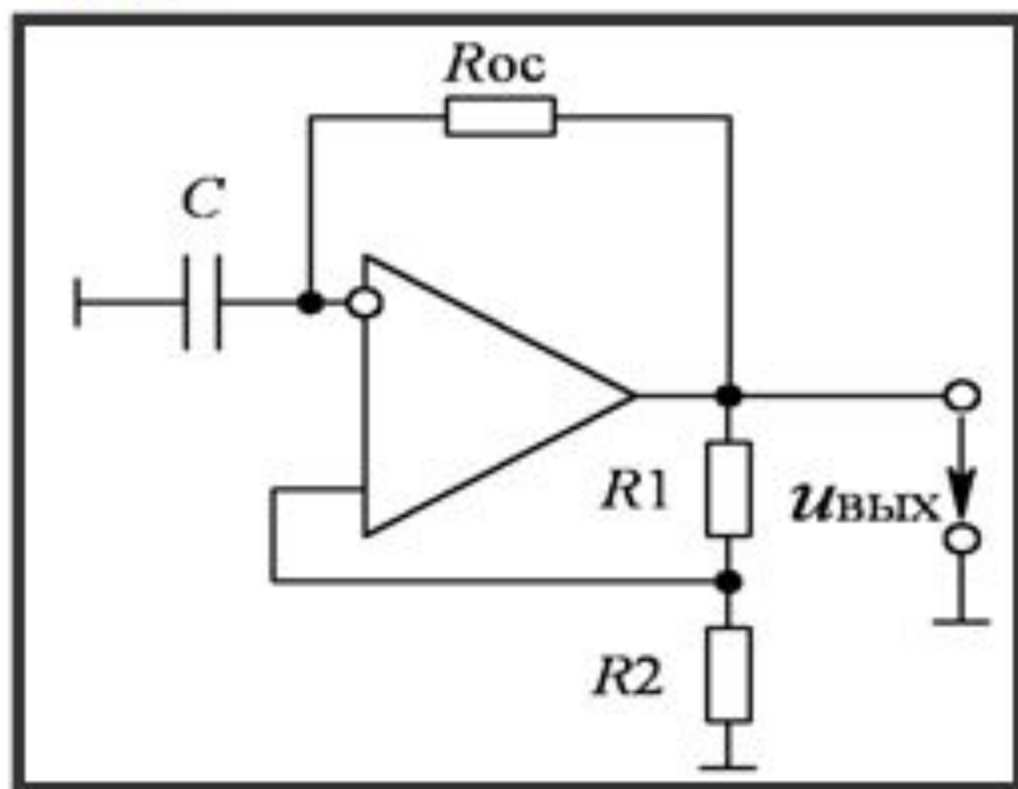
реализует операцию

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

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.

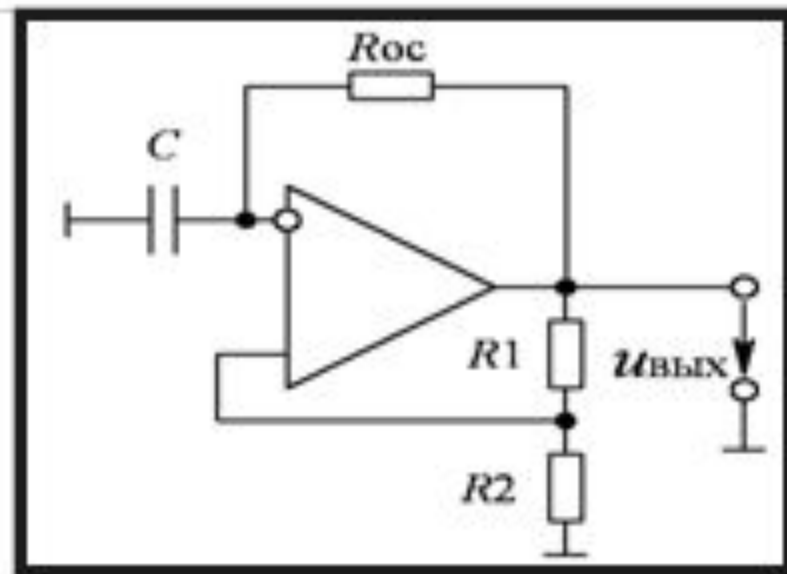
Данный генератор является симметричным и для него длительность импульса и паузы равны

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

При $R_1 = R_2$ $t_u = t_n = R_{oc} \cdot \ln 3$

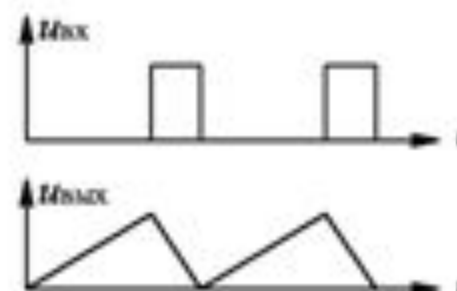
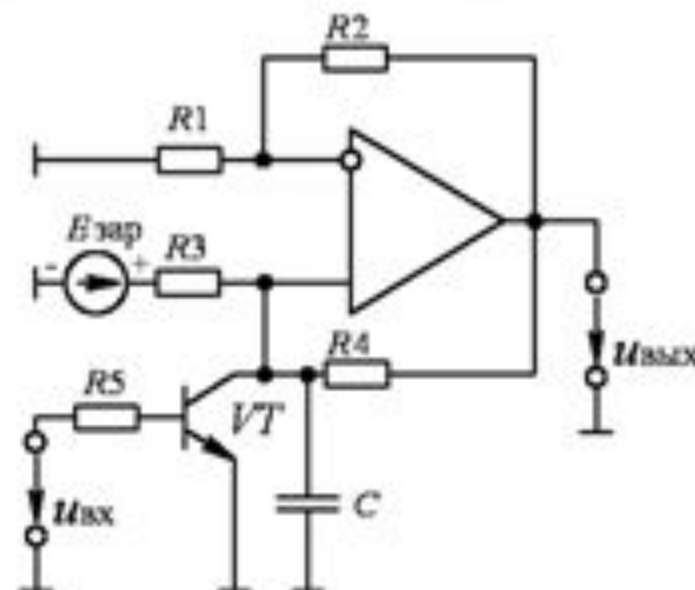
Период повторения импульсов $T_n = (t_u + t_n) = 2 \cdot t_u$ Скважность $Q = \frac{T_n}{t_u} = 2$

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

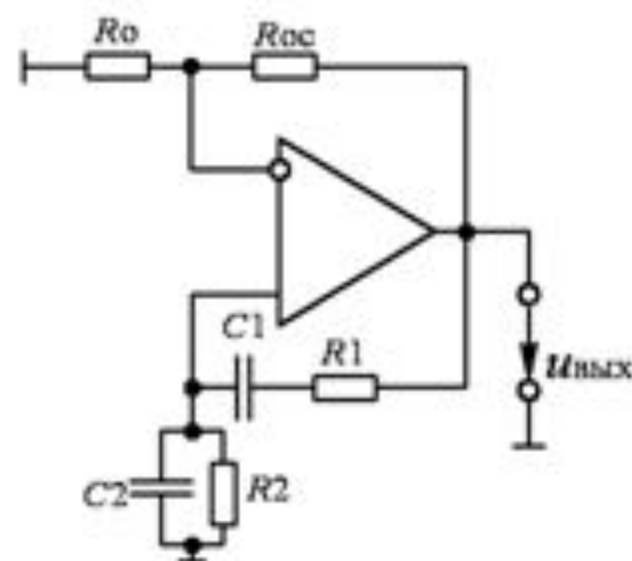


Генератор линейно-изменяющегося напряжения (ГЛИН)

- 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 .

