

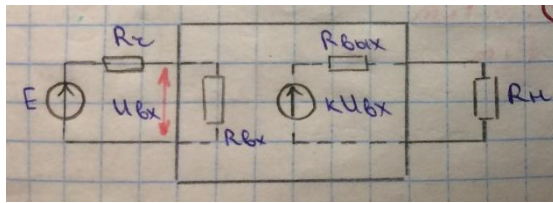
# Основные характеристики и показатели усилителей электрических сигналов

## Структура, схемы и классификация усилителей

**Усилитель электрического сигнала** – электрическое устройство, в котором маломощный электрический сигнал преобразуется в сигнал повышенной мощности за счет энергии. Все усилители сигнала усиливают сигнал по мощности

**Усилитель** - электрическое устройство для усиления сигнала

Структурная схема:



Классификация усилителей:

по назначению:

1. усилители напряжения  
 $R_{\text{генер}} \ll R_{\text{входа}} \quad R_{\text{выхода}} \ll R_{\text{нагр}}$
2. усилители тока  
 $R_{\text{генер}} \gg R_{\text{входа}} \quad R_{\text{выхода}} \gg R_{\text{нагр}}$
3. усилители мощности  
 $R_{\text{генер}} \approx R_{\text{входа}} \quad R_{\text{выхода}} \approx R_{\text{нагр}}$

**Теорема:** максимальная мощность, отданная генератором в нагрузку, соответствует условиям согласования

по характеру изменения электрического сигнала:

1. усилители постоянного тока
2. усилители переменного напряжения (усилители низкой и высокой частоты)

по диапазону усиливаемых частот

1. узкополосные (избирательные)
2. широкополосные

универсальный усилитель – интегральный усилитель напряжения

## Основные характеристики и параметры

основной параметр – коэффициент усиления

$$R_{\text{вх}}, R_{\text{вых}}, K_u, K_i, K_p$$

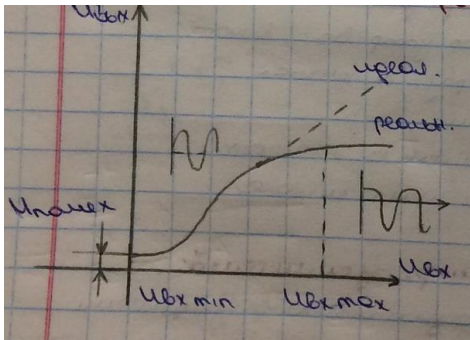
$$K = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}} = \frac{A_{\text{вых}}}{A_{\text{вх}}} e^{j\varphi} = K e^{j\varphi}$$

$$\varphi = \varphi_{\text{вых}} - \varphi_{\text{вх}}$$

$$\dot{K}_u = K_u e^{j\varphi_k} \quad \dot{K}_i = K_i e^{j\varphi_k} \quad \dot{K}_p = K_p e^{j\varphi_k}$$

$$K_u, \text{ дБ} = 20 \lg \frac{U_{\text{вых}}}{U_{\text{вх}}} = 20 \lg K_u \quad K_i, \text{ дБ} = 20 \lg K_i \quad K_p = K_u K_i \quad K = 10 \lg K_p$$

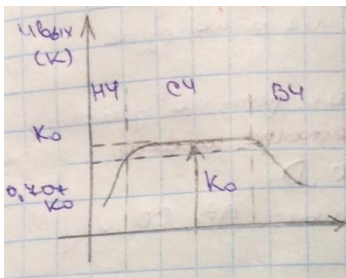
**Амплитудная характеристика** – зависимость выходной амплитуды напряжения от амплитуды входного (АХ)  $U_{\text{вых}} = f(U_{\text{вх}})$   $\omega = \text{const}$



$$D = \frac{U_{\text{вх max}}}{U_{\text{вх min}}} \quad K_{\Gamma} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n U_{nm}^2}}{U_{1m}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n I_{nm}^2}}{I_{1m}} = \frac{\sqrt{\sum_{i=2}^n P_{nm}}}{P_{1m}}$$

**Амплитудно-частотная характеристика** – зависимость выходного напряжения от частоты (АЧХ)

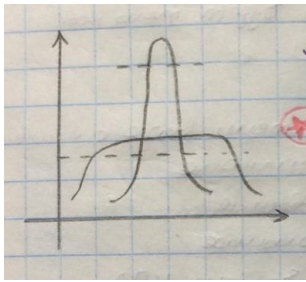
$$U_{\text{вых}} = \varphi(f) \quad U_{\text{вх}} = \text{const}$$



низкие, средние и высокие частоты

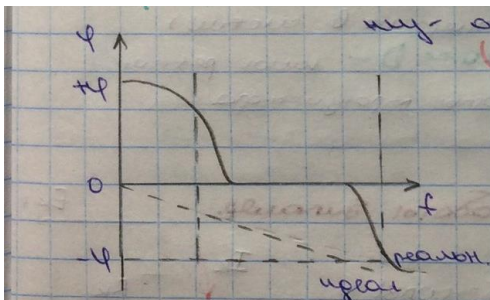
$$M = \frac{K_0}{K} \quad M = \sqrt{2}$$

$\Delta f = f_{\text{в}} - f_{\text{н}}$  полоса пропускания усилителя – диапазон, в котором искажение не превышает заданную величину



**Линейное искажение** – частотно зависимый параметр усилительного прибора. Низкое – реактивный элемент, Высокое – усилительный прибор

**Фазочастотная характеристика** – зависимость фазовых сдвигов усилителя от частоты  $\varphi = \psi(f)$   $U(t) = U_{\text{вых}} = f(t)$   $U_{\text{вх}} = \text{const}$

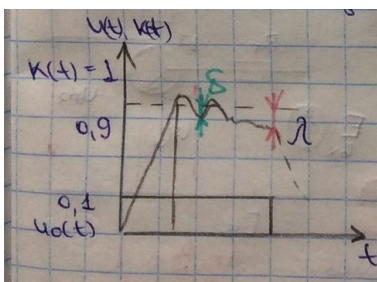


КПД зависит от режима работы прибора

$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{питан}}}$$

**Принцип построения усилительного каскада. Классы и режимы усиления**

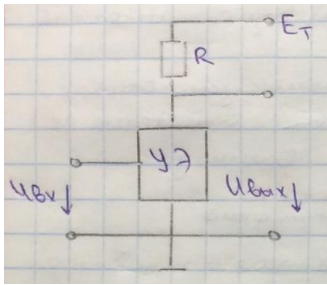
Усилительный каскад – на основании одного активного прибора/компонента



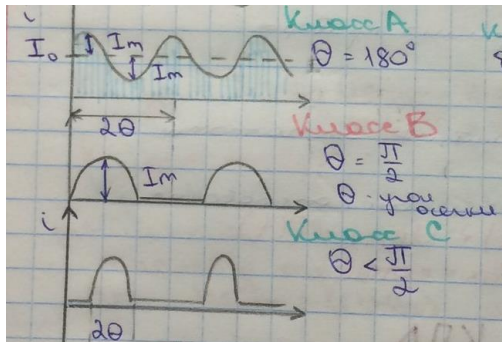
Усилительный элемент (активный прибор) – вакуумная лампа, транзистор, ОДС

режим покоя  $I_0$  ( $U_{\text{вх}} = 0$ )

главные элементы выходной цепи усилительного каскада – усилительный элемент, источник питания и нагрузка



В зависимости от выбора начального режима, в усилителях возможны 4 класса приборов: А, В, С, D. Также есть промежуточные – АВ, СD



В классе А всегда будет течь постоянный ток усиления  $I_0$   $\theta = 180^\circ$

Класс А – линейные усилители входа с минимальным искажением сигнала, усилители напряжения. КПД небольшой

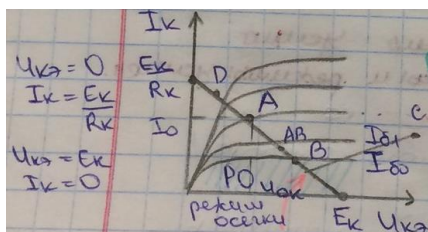
Класс В – КПД больше, но также большое нелинейное искажение сигнала, применяется в двухтактных усилителях

Класс С – генераторы (за короткое время пополняют энергию системы)

Класс D – ключевой режим работы транзистора

Динамический режим работы биполярного транзистора

$$I_K = f(U_{KЭ}) \quad I_0 = const$$

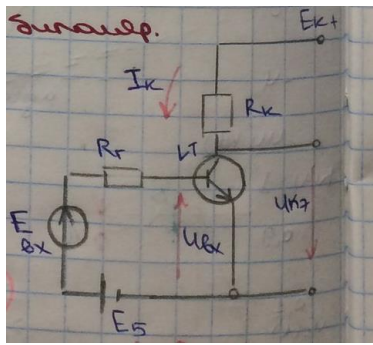


$$E_K = I_K R_K + U_{KЭ}$$

$I_K = \frac{E_K - U_{KЭ}}{R_K}$  – уравнение линии нагрузки по постоянному току. Нагрузочная прямая – динамическая входная характеристика транзистора

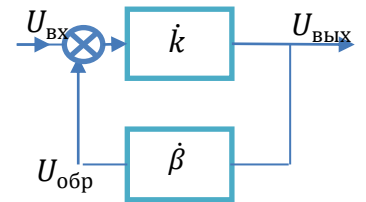
Рабочая точка в классе А выбирается посередине линии нагрузки

$$\operatorname{tg} \beta = \frac{1}{R_K}$$



## Обратная связь усилителя

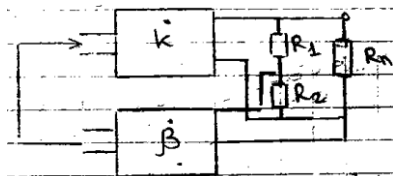
**Обратная связь в усилителях** – явление передачи сигнала с выхода усилителя на его вход. Она необходима для улучшения характеристик параметров усилителя.



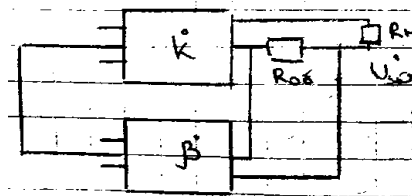
$$\beta = \frac{U_{oc}}{U_{ВЫХ}}$$

*Признаки классификации обратной связи:*

- 1) по знаку:
  - а) Положительная обратная связь (  $U_{обр}$  совпадает по фазе с  $U_{ВХ}$  )
  - б) Отрицательная обратная связь (  $U_{обр}$  связи в противофазе с  $U_{ВХ}$  )
- 2) а) Искусственная – специально вводимая
  - б) Паразитная – присутствует без нашего желани
- 3) а) Частотно зависимая (  $\beta = \varphi(f)$  – функция от частоты )
  - б) Частотно независимая
- 4) По способу получения обратной связи
  - а) Напряжение
  - б) Ток
  - в) Комбинированная



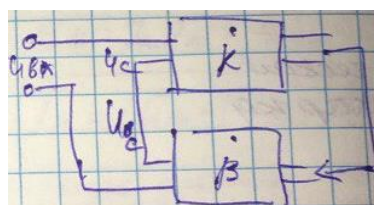
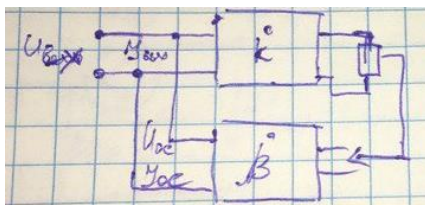
$$U_{oc} \sim U_{ВЫХ}$$



$$U_{oc} \sim I_{ВЫХ} R_{oc}$$

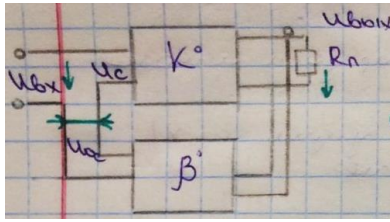
5) По способу подачи:

- а) параллельного типа (со сложением токов)
- б) последовательного типа (со сложением напряжений)
- в) комбинированный



## Влияние обратной связи на характеристики и параметры усилителя

Структурная схема усилителя с обратной связью по напряжению последовательного типа:



$$\dot{K} = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}}, \dot{K}_C = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_C}, \beta = \frac{\dot{U}_{\text{ОС}}}{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}$$

$$\dot{U}_{\text{ВЫХ}} = \dot{K} \dot{U}_C = \dot{K} (\dot{U}_{\text{ВХ}} + \dot{U}_{\text{ОС}})$$

$$\dot{K}_{\text{ОС}} = K(1 + \beta) = \frac{\dot{U}_{\text{ВЫХ}}}{\dot{U}_{\text{ВХ}}}$$

$$\dot{K}_{\text{ОС}} = \frac{\dot{K}}{(1 - \beta K)}$$

$$\dot{K}_{\text{ОС}} = K_{\text{ОС}} e^{j\varphi} \quad \dot{\beta}_k = \beta_k e^{j(\varphi_k - \varphi\beta)}$$

$$\dot{K} = K e^{j\varphi_k} \quad (\varphi_k = \varphi_{\text{yc}}, \varphi_\beta = \varphi_{\text{обр.св}})$$

$$\dot{\beta}_k = \beta e^{j\varphi\beta}$$

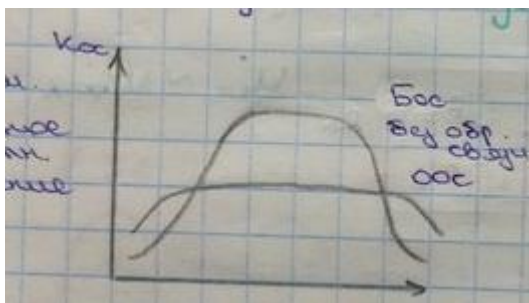
$$\dot{K}_{\text{ОС}} = \frac{ke^{j\varphi_k}}{1 - k\beta e^{j(\varphi_k - \varphi\beta)}}$$

$$\varphi_k + \varphi\beta = \pi * e^{j\pi} = -1$$

1)  $\dot{K}_{\text{ОС}} = \frac{\dot{K}}{(1 + \beta K)}$  ООС коэффициент усиления уменьшается, входное увеличивается.

$R_{\text{ВХ}}$  увеличивается,  $R_{\text{ВЫХ}}$  уменьшается.

$$\frac{dK_{\text{ОС}}}{K_{\text{ОС}}} = \frac{\frac{dk}{k}}{1 + \beta k} \quad \text{нестабильность коэффициента усиления уменьшается}$$



2)  $\varphi_k + \varphi\beta = 2\pi n, n = 0, 1, 2, \dots$

$$e^{j(\varphi_k - \varphi\beta)} = 1$$

$$K_{\text{ОС}} = \frac{K}{(1 - \beta k)}$$

А)  $0 < \beta k < 1$   $K_{\text{ОС}} > k$  — увеличивается, увеличивается неустойчивость

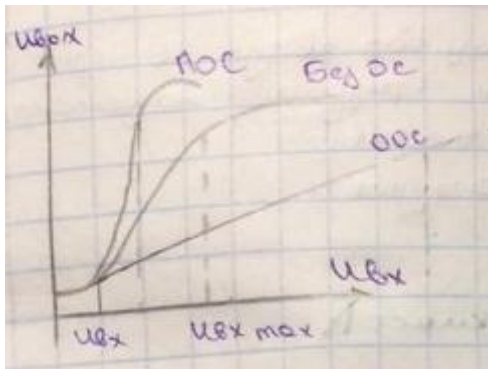
коэффициента усиления, полоса пропускания уменьшается, возрастают шумы



b)  $\beta k = 1, k_{oc} \rightarrow \infty$

$$K_{oc} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}}, U_{вх} = 0, U_{вых} \neq 0$$

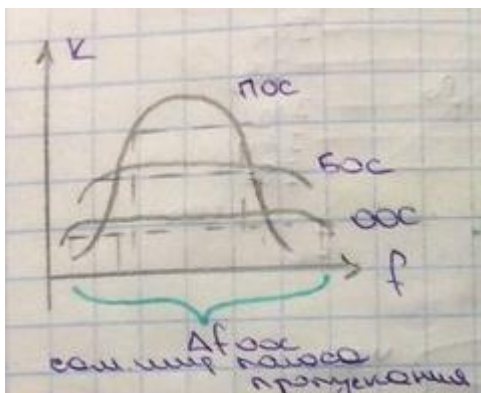
Режим самовозбуждения усилителя (недопустимый режим)



Если выполняется условие самовозбуждения определённой частоты, то он сам становится генератором. Применяется в автогенераторах

При ООС диапазон входного сигнала увеличивается, нелинейные искажения уменьшаются.

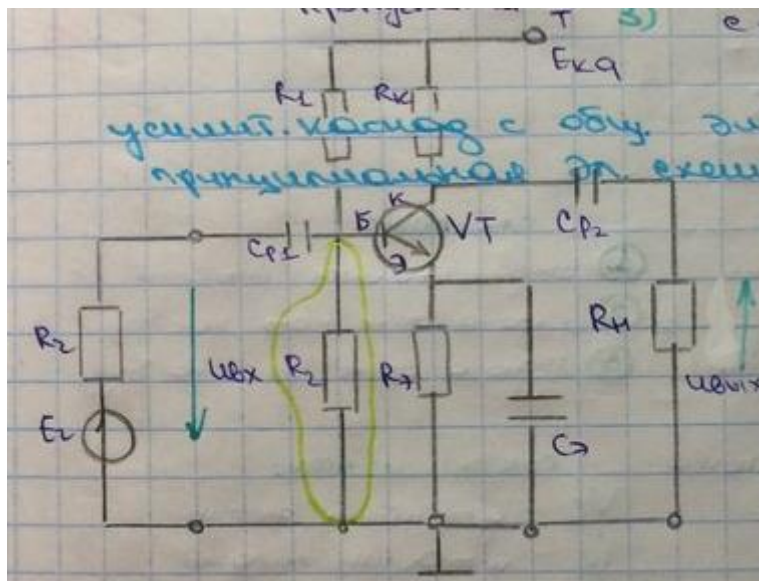
При ПОС уменьшается динамический диапазон, нелинейные искажения увеличиваются.



Применяется в качестве предварительного усилителя, например используется в качестве предварительных каскадов усиления напряжения  
Усилительный каскад с общей базой, эмиттером, коллектором

## Усилительный каскад с ОЭ

Принципиальная электрическая схема. Принцип действия каскада.



$V_t$  — усилительный элемент

$E_k$  — источник питания

$U_{вх} = 0$  (режим покоя)

$R_1, R_2$  — делитель напряжения, подача фиксированного напряжения на базу

$$X_{ср} \ll R_{вх}$$

$$X_{ср} \ll R_{вых}$$



$$X_{сэ} \ll R_э$$

Основные элементы -  $V_t, E_k, R_э$

По постоянному току  $I_{об}(U_{обэ}) \quad I_{ок}(U_{окэ}) \quad P_0$

Работают в режиме класса А

Рабочая точка каскада ~ по центру линии нагрузки

$R_1 - R_2$  — смещение по постоянному току. Делитель напряжения, для подачи фиксированного напряжения на базу (позволяет отказаться от дополнительных усилителей)

$$U_{бэ} = U_{R2} - R_э = \frac{E_k}{R_1 + R_2} R_2 - I_э R_э \rightarrow R_2 \quad \left(\frac{E_k}{R_1 + R_2}\right) - \text{фикс}$$

$$I_э R_э = (0.1 \div 0.3) E_k$$

$$R_1 = \frac{E_k - U_{R2}}{I_d + I_{б0}}, I_d = (2 \div 5) I_{б0} \text{ (ток делится)}$$

$R_э$ - служит элементом эмиттерной температурной стабилизации на рабочей точке. Осуществляется за счёт ООС по постоянному току.

$$U_{бэ} = I_d R_2 - I_э R_э$$

$I_э$ - увеличивается с увеличением температуры

$I_э$  — увеличивается с увеличением напряжения на базе =>  $U_{бэ}$  уменьшается

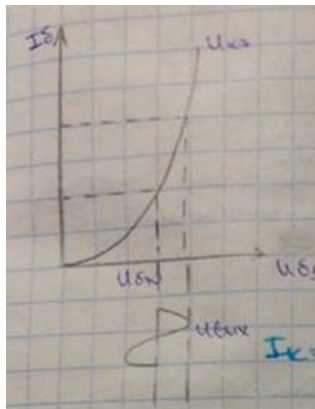
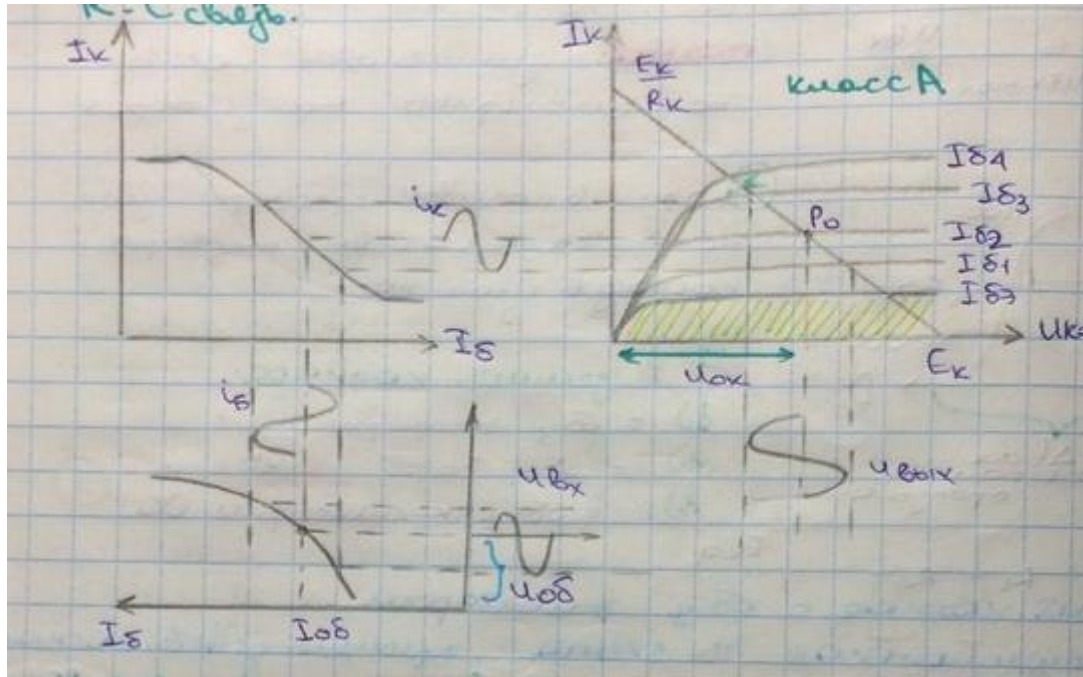
Если  $U_{бэ}$  уменьшается то и уменьшается  $I_k$

$$I_k = \beta I_б$$

$C_э$ - служит для шунтирования и удаления ООС по переменному току.

$C_{R1}$  и  $C_{R2}$  — конденсаторы связи(разделительные конденсаторы) пропускают переменный и не пропускает постоянный ток.

## RC-связь



$$U_{кэ} = E_k - I_k R_k$$

$$\Delta U_{кэ} = U_{вых} = -R_k \Delta I_k$$

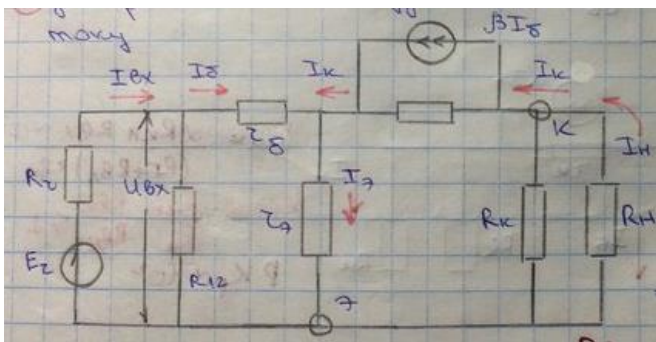
$$I_k = \beta I_b, \text{ где } \beta = h_{э}$$

$$\varphi_{вых} - \varphi_{вх} = 180^\circ - \text{находятся в противофазе}$$

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вых} R_{вых}}{R_{вх} I_{вх}} \approx \frac{I_k R_k}{I_b R_{вх}} \approx \beta \frac{R_k}{R_{вх}} \sim 10^2, \text{ где } \frac{R_k}{R_{вх}} \approx 1$$

## Расчет динамических параметров усилительного каскада с общим эмиттером.

Для расчета воспользуемся эквивалентной схемой по переменному току



$$R_{BX} = \frac{U_{BX}}{I_{BX}} \quad R_{BX} = R_{12} // R_{BX}$$

$$r_{BX} = \frac{U_{бэ}}{I_б} = \frac{I_б r_б I_э r_э}{I_б} = \frac{I_б r_б + (\beta + 1) I_э r_э}{I_б}$$

$$R_{BX} = R_{12} // [r_б + (\beta + 1) r_э]$$

$$R_{BX} = R_k // r_{кэ} \approx R_k \quad 100 \text{ нОм} - 1 \text{ кОм}$$

$$K_u = \frac{U_H}{E_r} = \frac{I_H R_H}{I_{BX} (R_r + R_{BX})} = \frac{I_k R_{кэ} R_{BX}}{I_б (R_r + R_{BX}) r_{BX}} = \beta \frac{R_{кэ} R_{BX}}{(R_r + R_{BX}) r_{BX}}$$

$$I_H R_H = I_K R_K // R_H = I_H R_{KH}$$

$$I_H = I_K \frac{R_{KH}}{R_H}$$

$$I_{BX} R_{BX} = I_0 R_{BX} - I_{BX} = I_0 \frac{r_{BX}}{R_{BX}}$$

$$K_U \max = \beta \frac{R_{KH}}{R_{BX}}$$

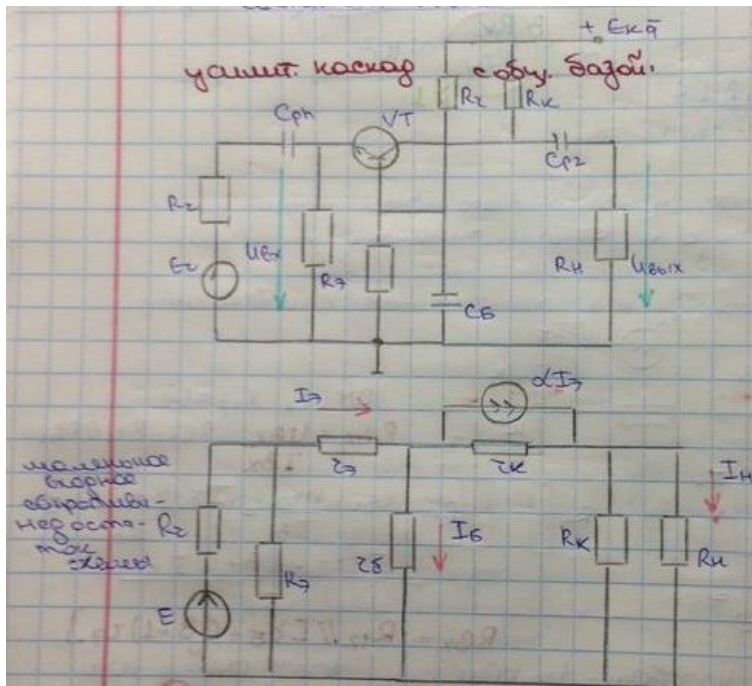
$$K_1 = \beta \frac{R_{KH} R_{BX}}{R_H r_{BX}} \quad K_1 \rightarrow \beta$$

$$K_0 = K_1 K_U \sim 10^4$$

Свойства каскада с общим эмиттером:

1. Усиливает сигнал по направлению  $10^2$
2. Усиливает сигнал по току  $10^2$
3. Усиливает мощность  $10^4$
4. Имеет относительно большие входное и выходное сопротивление ( $\sim 100 \text{ Ом}$ )
5. Усиливает сигнал с поворотом фазы на  $180^\circ$ , что не является частотным искажением

## Усилительный каскад с общей базой



$$K_U = \frac{\alpha R_{KH} R_{BX}}{(R_H - R_{BX}) r_{BX}}$$

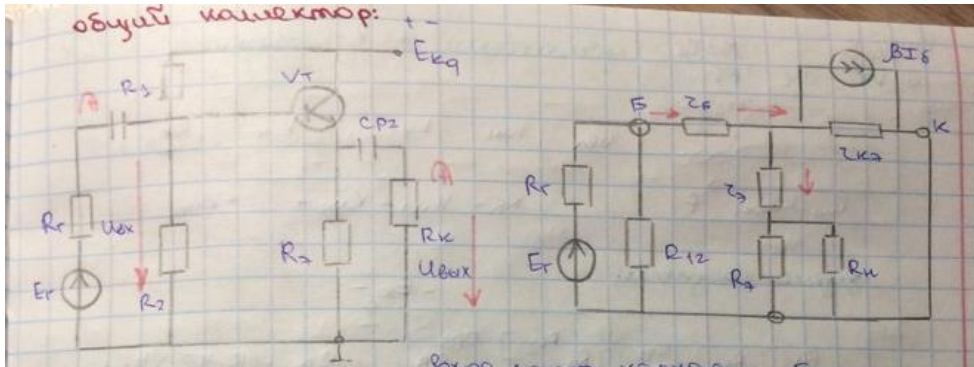
$$K_i = \alpha \frac{R_{KH} R_{BX}}{R_H} < 1$$

$$K_p \sim 10^2$$

### Свойства каскада с общей базой:

1. Схема с общей базой имеет малое входное сопротивление, больше выходное, усиливает сигнал по напряжению ( $\sim 10^2$ )
2. Не усиливает сигнал по току
3. Усиливает сигнал по мощности с повтором по фазе
4. Уступает по усилительным свойствам схеме с общим эмиттером, но является термостабильной и имеет лучшие частотные свойства

### Усилительный каскад с общим коллектором



Входное сопротивление каскада с общим коллектором больше, чем у каскада с общим эмиттером (1-10 Ом), в этой схеме действует глубокая (100%ая) отрицательная обратная связь по переменному току. Все напряжение с выхода подается на вход в противофазе и вычитается

$$R_{BX} = R_{12} || [r_6(\beta + 1)(r_3 + R_3)] = 1 - 10 \text{ кОм}$$

$$K_U = \frac{U_{ВЫХ}}{U_{ВХ}} = \frac{U_{ВХ} - U_{бэ}}{U_{ВХ}} \leq 1$$

$$K_U = \beta \frac{R_{ЭК}}{R_2 + R_{ВХ}} * \frac{R_{ВХ}}{r_{ВХ}} < 1$$

$$K_i = (\beta + 1) \frac{R_{ЭК}}{R_K}$$

### Свойства каскада с общим коллектором:

1. Усиливает сигнал по току ( $\sim 10^2$ )
2. Повторяет сигнал по напряжению и фазе
3. Усиливает мощность ( $\sim 10^2$ )
4. Минимальное выходное сопротивление 10 Ом
5. Эмиттерный повторитель
6. Применяется как согласованный каскад

## Усилительный каскад с общим эмиттером с обратной связью

$$R_{BX} = (R_1 || R_2) || r_{BX}$$

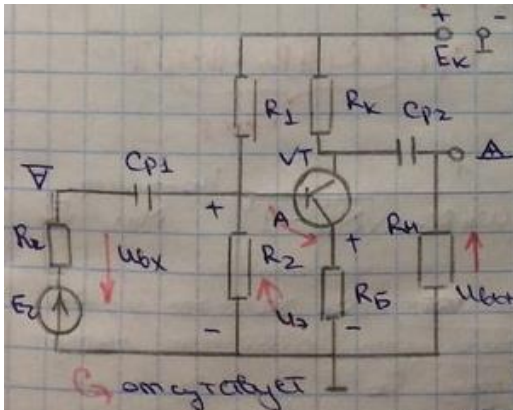
$$r_{BX} = r_6 + (\beta + 1)r_3$$

$$r_3 = \left. \frac{dU_{эб}}{dI_3} \right|_{U_{кб}}$$

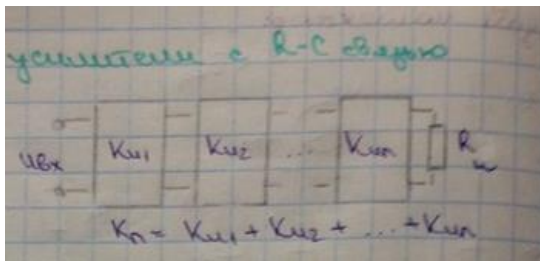
$$r_{BX} = r_6 + (\beta + 1)(r_3 + R_3) - \text{возрастает}$$

$$K_{U0} = \beta \frac{R_{KH}}{(R_{\Gamma} + R_{BX})} \frac{R_{BX}}{r_{BX}} \approx \beta \frac{R_{KH}}{R_{\Gamma} + R_{BX}} \approx \beta \frac{R_{KH}}{R_{BX}} =$$

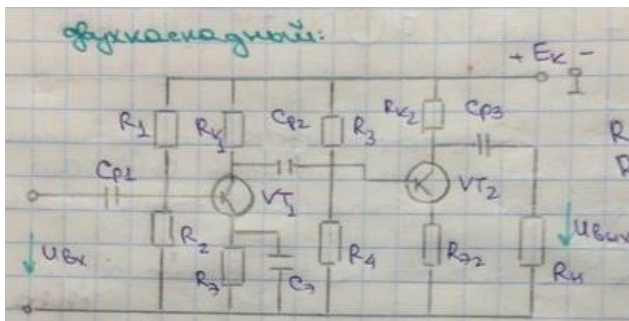
$$= \beta \frac{R_{KH}}{[r_6 + (\beta + 1)(r_3 + R_3)] R_{12}} \text{ --коэф-т усил. по напряжению}$$



## Усилители с R-C связью



Двухкаскадный:



$$R_{BX} = (R_1 || R_2)r_{BX}$$

$$R_{H1} = R_{BX2} = (R_3 + R_4)r_{BX2}$$

$\omega = 2\pi f$  - частотная характеристика

$$K_U = \frac{K_{U0}}{\sqrt{1 + (\omega\tau_B - \frac{1}{\omega\tau_H})^2}}$$

$\omega\tau_B$  - постоянная верхней частоты

$\frac{1}{\omega\tau_H}$  - постоянная нижней частоты

$$K_{U_H} = \frac{K_{U0}}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega \tau_H}\right)^2}} - \text{для низких частот}$$

$C_{p1}, C_{p2}, C_{\Sigma}$  – частотные искажения на низких частотах

$$X_{cp} = \frac{1}{\omega_{cp1}}$$

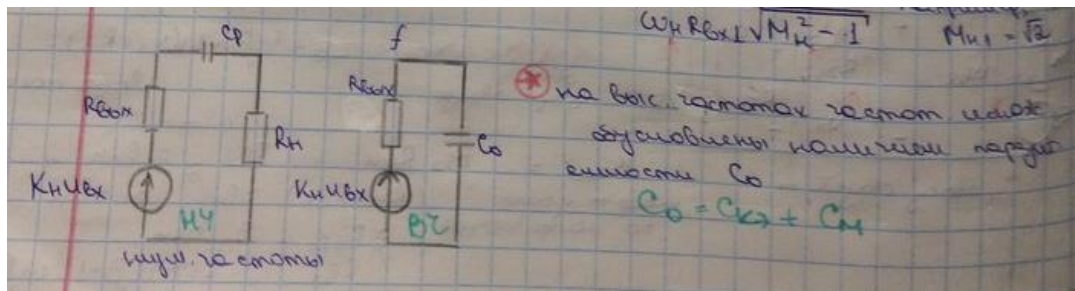
$$M_H = K_{U0} * K_{U_{\text{НИЖ}}} = \sqrt{1 + \frac{1}{\omega_H \tau_H}} - \text{коэф-т частотных искажений}$$

$$M_H = M_{H1} * M_{H2} * \dots * M_{Hn}$$

$$M_{H1} = \sqrt{1 + \frac{1}{(\omega_H \tau_{H1})^2}} \quad \tau_{H1} = C_{p1}[(R_1 || R_2) || r_{BX}] = C_{p1} R_{BX1}$$

$$\sqrt{M_{H1}^2} = \frac{1}{\omega_H C_{p1} R_{BX1}}$$

$$C_{p1} \geq \frac{1}{\omega_H R_{BX1} \sqrt{M_H^2 - 1}}$$



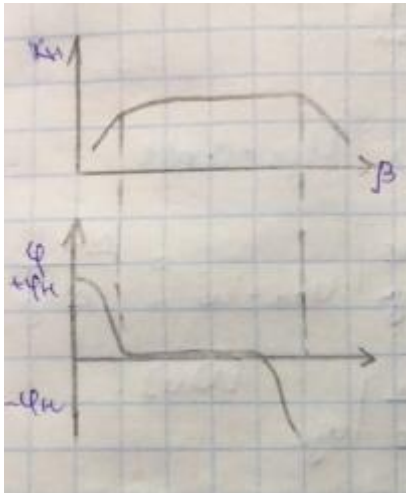
$$K_{uB} = \frac{K_{uo}}{\sqrt{1 + (\omega_B \tau_B)^2}}$$

$$M_{B\beta} = \frac{\beta_o}{\sqrt{1 + \left(\frac{\omega_B}{\omega_\beta}\right)^2}}$$

$$M_B = M_{co} - M_\beta$$

$$\tau_b = \frac{1}{\omega_\beta}$$





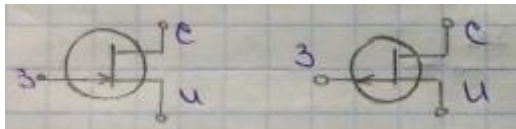
## Усилительные каскады на полевых транзисторах.

### Полевые транзисторы:

Векторно –преобразовательный прибор принцип действия которого основан на модуляции электросопротивления проводящего канала поперечным электрическим полем.

### Типы полевых транзисторов:

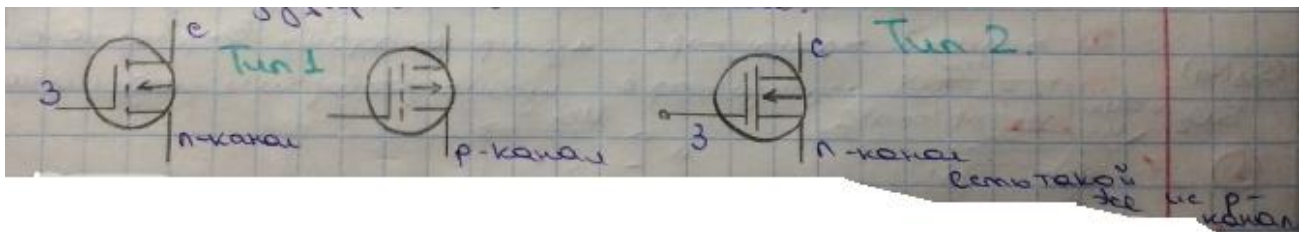
1. С управляющим p-n затвором



n-канал

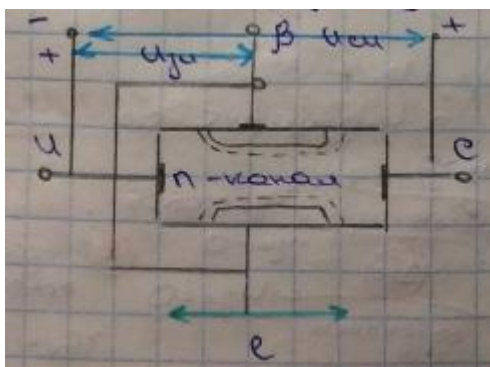
p-канал

2. МОП/МДП транзисторы с изомер. затвором и индуцированным каналом.



### Структура и принцип действия:

\*униполярные- в работе участвуют только основные носители заряда

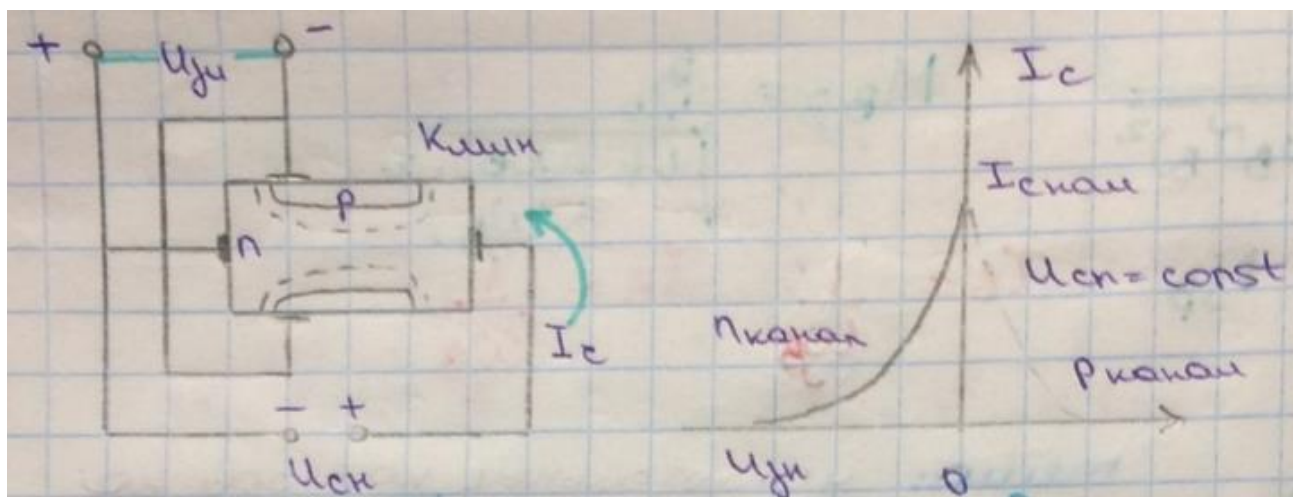


$$R = \rho \frac{e}{\delta} = \frac{e}{\ln M_n \delta}$$

чтобы упр. сечением,

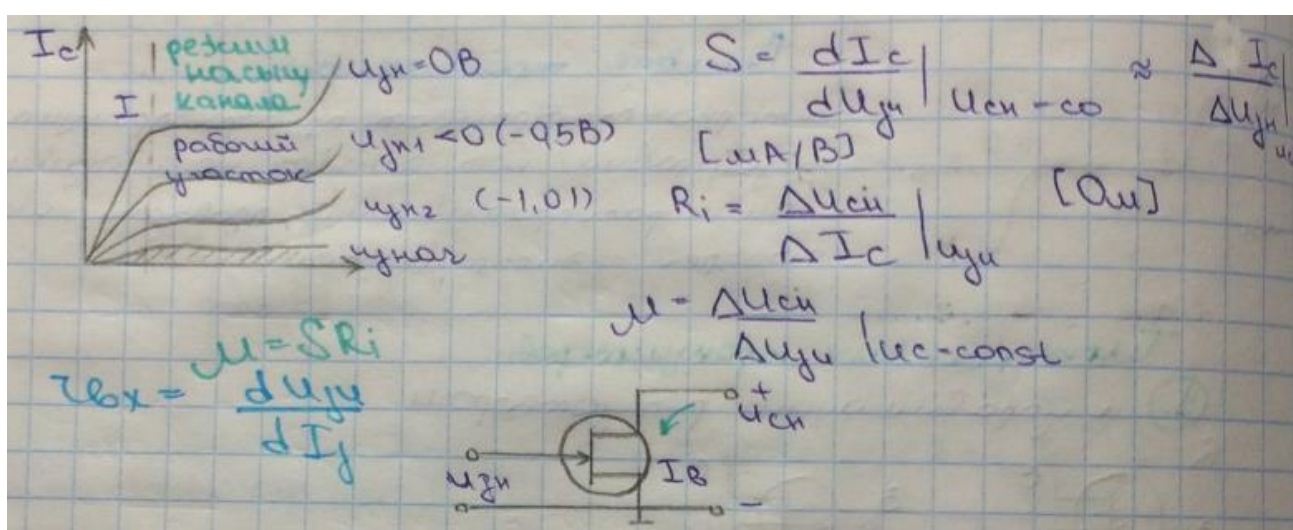
нужно подать напряжение.





$$1. I_c = f(U_{jn})$$

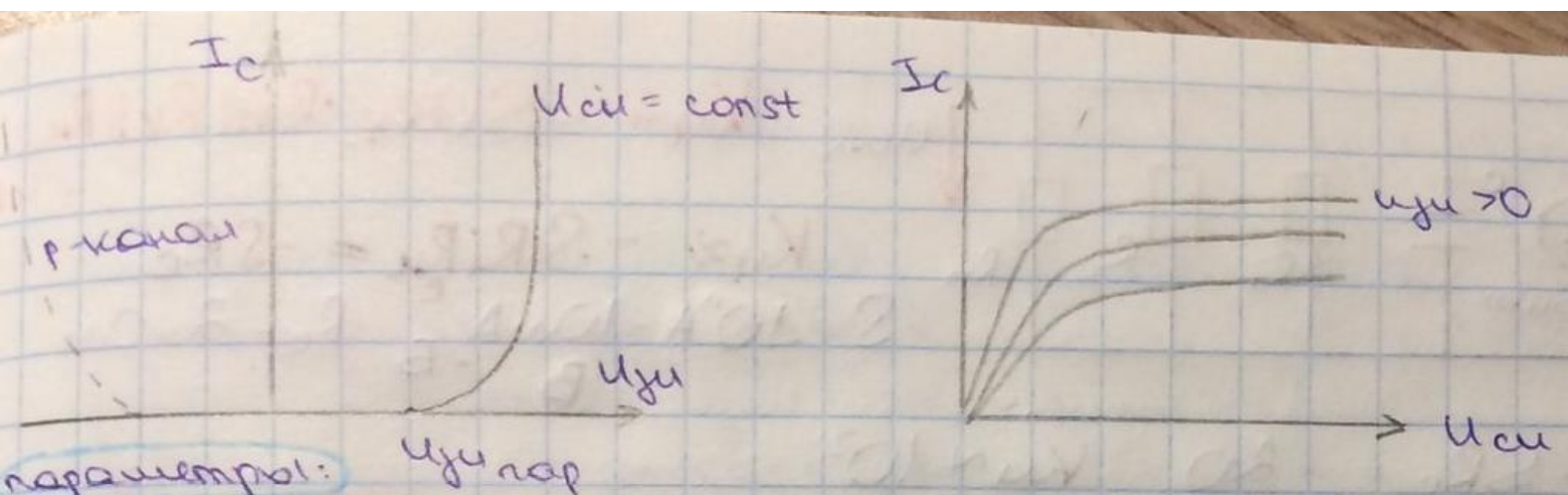
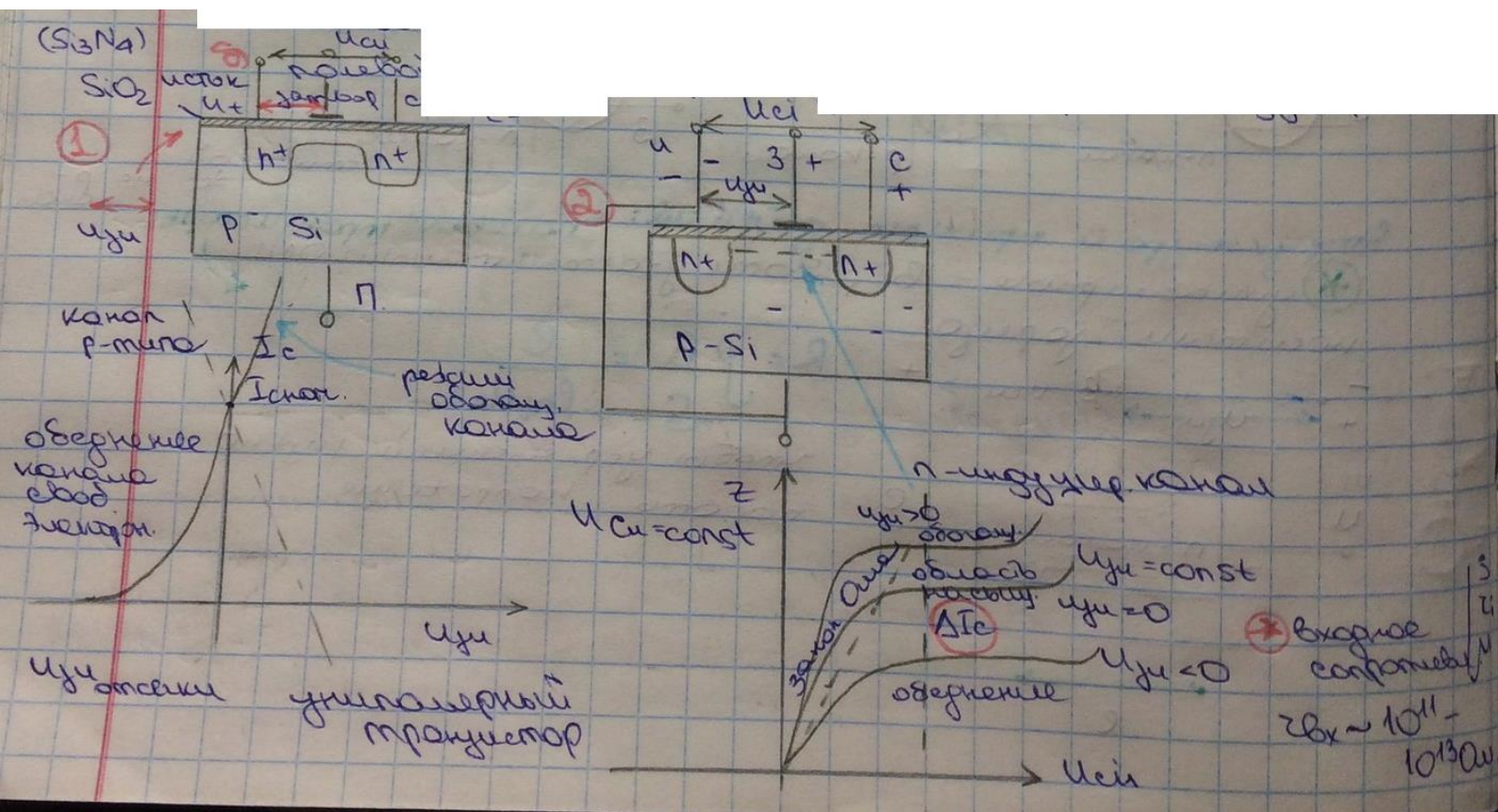
$$2. I_c = f(U_{cu}) \quad U_{jn} = \text{const}$$



Полевые транзисторы с изомер. затворам.

МОП (МДП) разновидности

1. полевой транзистор с изомер. затворам и встроенным каналом
2. полевой транзистор с изомер. затвором и индуцир. каналом.

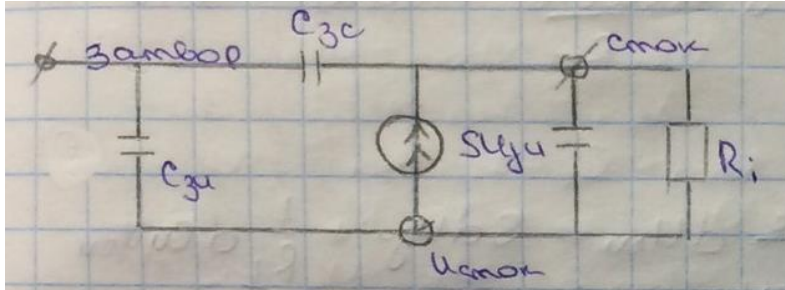




## Параметры

$$S = \frac{\Delta I_c}{\Delta U_{ju}} \quad U_{ju} = \text{const} \quad R_i = \frac{\Delta U_{ci}}{\Delta I_c} \quad U_{ju} = \text{const}$$

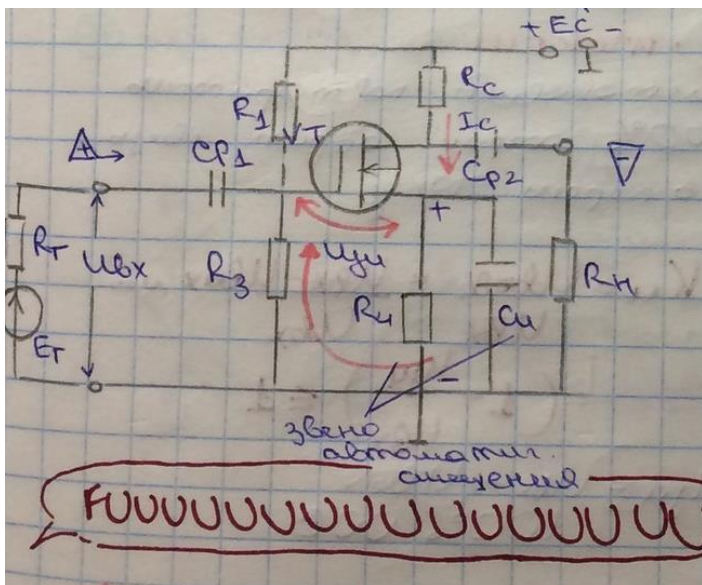
Крутизна  $\mu = S * R_i$  Э биполяр. транзисторы изолир. Затворам. (БТИЗ)



Усилит. Каскад с общ. истоком на полевом транзист.

Виды:

1. с общ. истоком – аналог. общ. эмитора (ПРИМЕНЯЕТСЯ ЧАСТО)
2. с общ. стоком – аналог. общ. коллектора (ПРИМЕНЯЕТСЯ ЧАСТО)
3. с общ. базой – аналог. общ. базы (ПРИМЕНЯЕТСЯ ОЧЕНЬ РЕДКО)

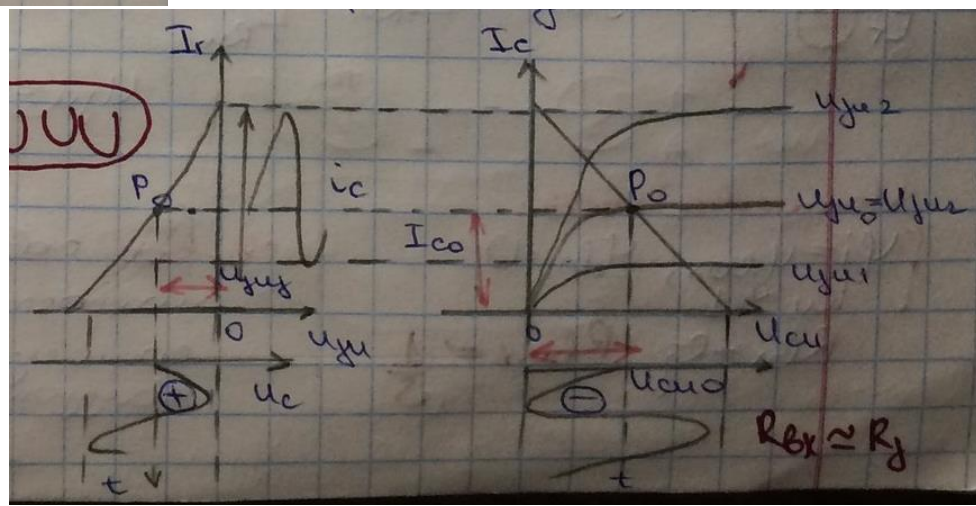


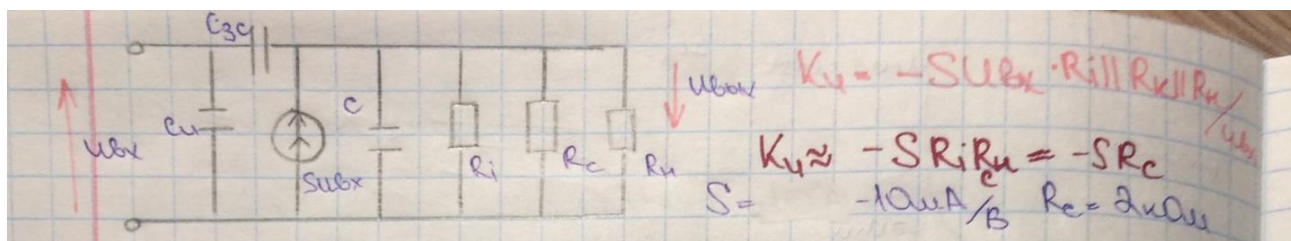
$$*U_{BX} = E_r$$

$$U_{ju} = I_c R_u$$

$R$  затвора служит для подачи напряжения смещения.  $C$  служит для устранения отриц. обр. связи по перем. току.

$$R_{вых} = R_L \parallel R_i \approx R_L$$





$$K_u = -S R_c = -20$$

$$K_u \sim 10^2$$

$$R_{BX} = 1 \text{ M}\Omega$$

$$U_{BX} = 10 \text{ mV}$$

$$I_{BX} = \frac{10 \cdot 10^{-3}}{10^6} = 10^{-8} \text{ A}$$

$$P_{BX} = I_{BX} U_{BX} = 10^{-8} 10^{-2} = 10^{-10} \text{ W}$$

$$K_p = \frac{p_H}{p_{BX}} = \frac{2 \cdot 10^{-5}}{10^{-10}}$$

$$P_{BX} = \frac{U_{BIX}^2}{R} = (0.2)^2 = 2 \cdot 10^{-5} \text{ W}$$

$$I_c = f(U_{ju}, U_{cu})$$

$$dI_c = \frac{\delta I_c}{\delta U_{ju}} dU_{ju} + \frac{\delta I_c}{\delta U_{cu}} dU_{cu} = S dU_{ju} \frac{1}{R_1} dU_{cu}$$

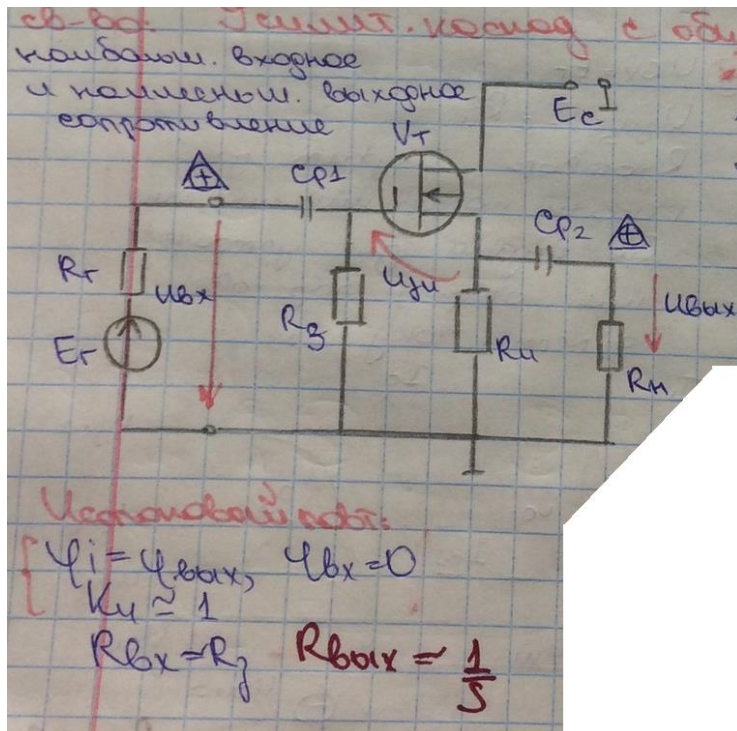
$$U_{cu} = E_c - I_c R_c$$

$$dU_{cu} = -R_c dI_c \quad dI_c = -\frac{dU_{cu}}{R_c}$$

$$-\frac{dU_{cu}}{R_c} = S dU_{ju} + \frac{1}{R} dU_{cu}$$

$$K_u = -S(R_c || R_i)$$

## Усилит. каскада с общ. током



\*источковый повторитель 100%

отриц. обрат. связь. по перем. току

$$K_u = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = \frac{U_{вх} - U_{зу}}{U_{вх}} =$$

$$= \left(1 - \frac{U_{зу}}{U_{вх}}\right) \leq 1$$

$$U_{зу} = U_{вх} - U_{вых}$$

100% ООС

Св-во: Повт. Сигнал по форм-ле,

учил, по мощности, прим. как входной самосущ. Каскад связующий.

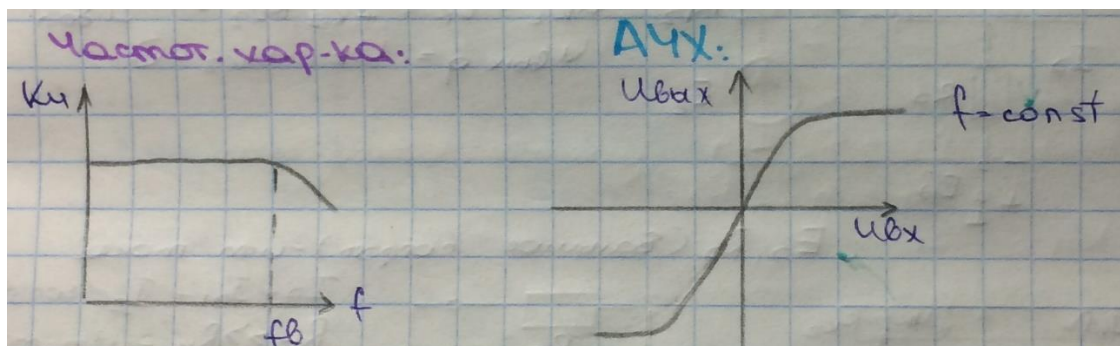
# Дифференциальные усилители

## Определение, назначение, базовая схема

Дифференциальные усилители относятся к классу усилителей постоянного тока – усилителей медленно изменяющегося сигнала. Их работа возможна благодаря применению гальванической или непосредственной связи – нет реактивных элементов, осуществляется с помощью проводников, резисторов и диодов с постоянным током

Дифференциальный усилитель – усилитель постоянного тока, имеющий два входа и усиливающий разность подаваемых на эти входы напряжений как постоянного, так и переменного тока

Важно! Не усиливает синфазный (равный по амплитуде и фазе) сигнал – усиливает дифференциальный (разностный) сигнал



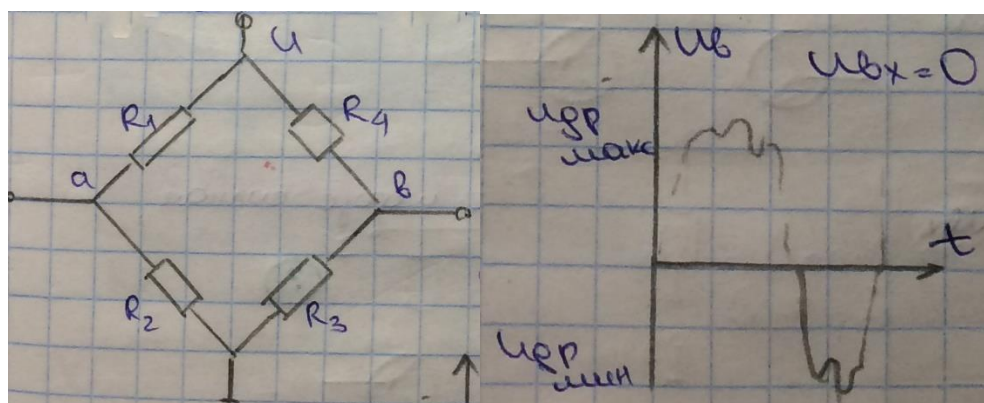
При построении усилителей постоянного тока используются различные способы обеспечения режима покоя. Строится по мостовой схеме

$$U_{вх} = 0$$

$$U_{ab} = \varphi_0 - \varphi_b = 0$$

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{R_3}{R_4} \quad R_1 R_u = R_2 R_3$$

$$\frac{U_{\text{дрейфа макс}} - U_{\text{дрейфа мин}}}{K_u} = d$$

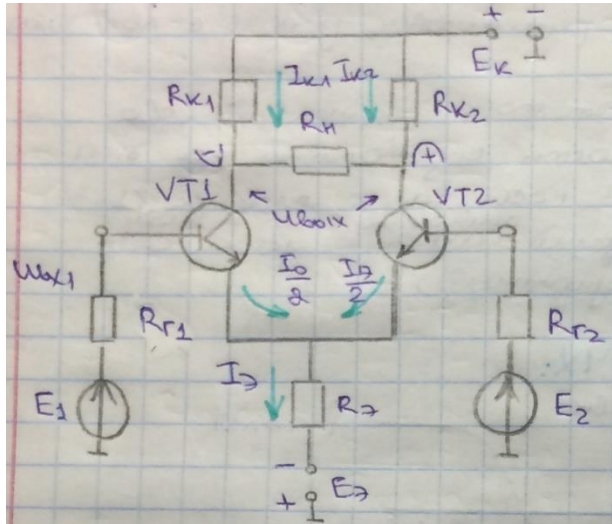




Дрейф нуля – самопроизвольное изменение напряжения на выходе усилителя в отсутствие или при постоянном напряжении на входе

Причины: нестабильность, зависимость от параметров температуры, шумы

Для устранения дрейфа нуля применяют мостовые балансные схемы и отрицательную обратную связь



$$VT_1 = VT_2 \quad h_{2131} = h_{2132} \quad r_{k31} = r_{k32}$$

$$R_{K1} = R_{K2} = R_K$$

$$U_{\text{вх}q} = U_{\text{вх}1} - U_{\text{вх}2} = 0$$

$$I_{K1} = I_{K2} \sim \frac{I_3}{2}$$

$$U_{K1} = E_K - I_{K1}R_{K1}$$

$$U_{K2} = E_K - I_{K2}R_{K2}$$

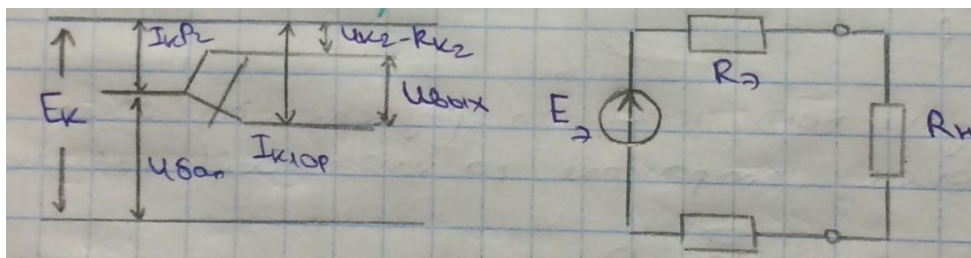
$$U_{K1} = U_{K2} = U_{\text{бал}}$$

$$U_{\text{вых}q} = U_{K1} - U_{K2} = 0$$

$E_3, R_3$  – большое сопротивление, источник тока

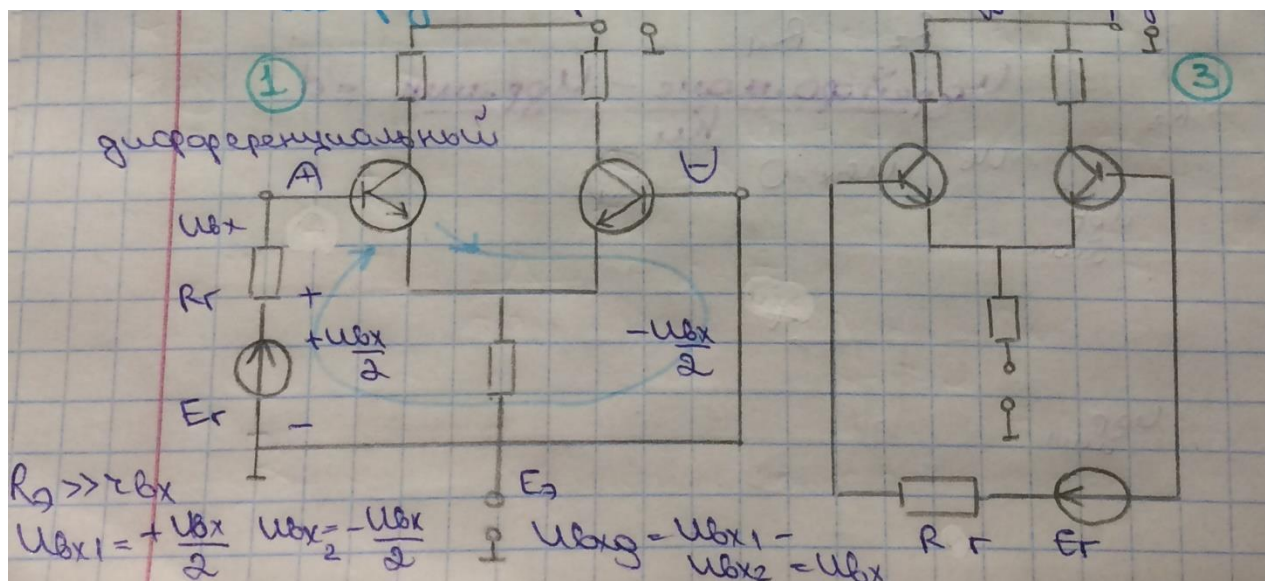
$$I_3 = I_{31} + I_{32} = \text{const}$$

$R_r \gg R_H$  – источник тока





## Дифференциальный:



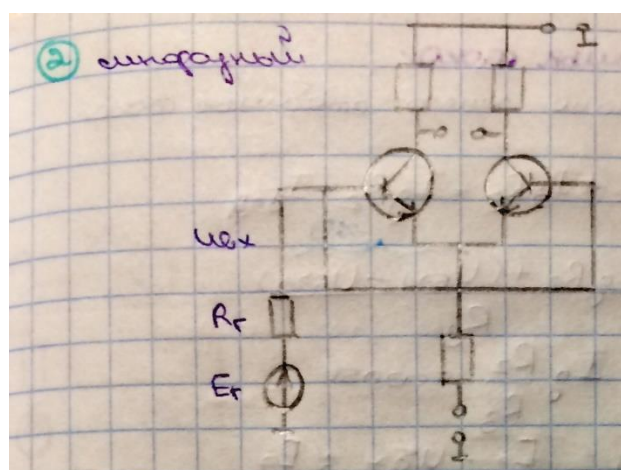
$$R_3 \gg r_{bx}$$

$$U_{bx1} = + \frac{U_{bx}}{2}$$

$$U_{bx2} = - \frac{U_{bx}}{2}$$

$$U_{bxд} = \frac{U_{bx1}}{2} - \frac{U_{bx}}{2} = U_{bx}$$

## Синфазный:



$$U_{\text{вых синф}} = U_{\text{вых1 синф}} - U_{\text{вых2 синф}} = 0_{\text{идеальн}}$$

В реальном случае значение  $U_{\text{вых синф}}$  отлично от нуля

### Динамические параметры:

$$U_{\text{вх}} \neq 0$$

$$K_{\text{ид}} = \frac{U_{\text{вых1}} - U_{\text{вых2}}}{U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}}} = \frac{|U_{\text{вых1}}| + |U_{\text{вых2}}|}{U_{\text{вхд}}}$$

$$K_{\text{ид}} = \frac{h_{21э} R_K}{R_{\Gamma} + R_{\text{вх}}} = \frac{h_{21э} R_K}{R_{\Gamma} + 2r_{\text{вх}}}$$

Если есть R нагрузки:

$$K_{\text{ид}} = \frac{1}{2} \frac{h_{21э} 2R_K || R_H}{R_{\Gamma} + 2r_{\text{вх}}}$$

Дифференциальный каскад усиливает напряжение во столько же раз, сколько и одиночный каскад.

$$K_{\text{ид}} = \frac{1}{2} \frac{h_{21э} R_K || R_H}{R_{\Gamma} + 2r_{\text{вх}}}$$

$$R_{\text{вх дифф}} = 2[r_6 + (h_{21э} + 1)r_э]$$

$$R_{\text{вых дифф}} = 2R_K || r_K \approx 2R_K$$

### Синфазный сигнал:

$$U_{\text{вх синф}} \neq 0$$

$$R_{\text{вх дифф}} = h_{21э} R_э$$

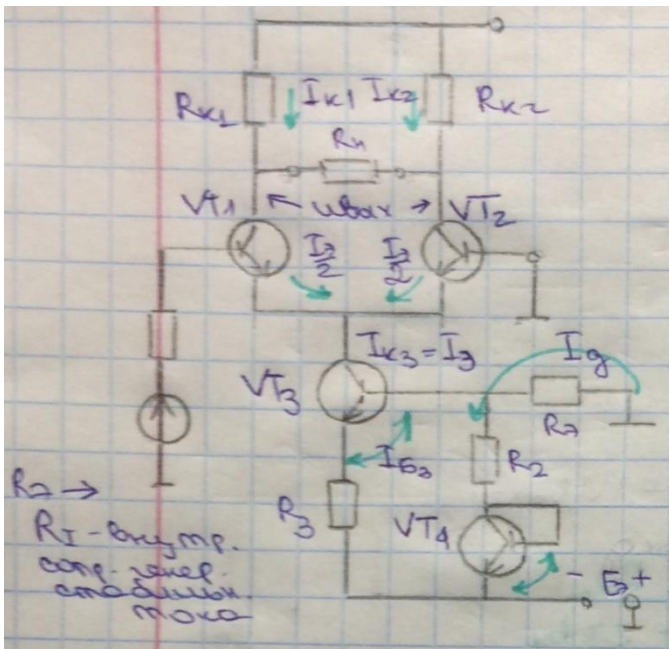
$$R_{\text{вх синф}} \gg R_{\text{вх дифф}}$$

$$K_{\text{и синф}} = \frac{h_{21э} R_K || R_H}{R_{\Gamma} + h_{21э} R_э} \ll K_{\text{ид}}$$

$$K_{\text{ослабления}} = \frac{K_{\text{ид}}}{K_{\text{исинф}}}$$

В дифференциальных усилителях отсутствует обратная связь по дифференциальному сигналу и действует обратная связь по синфазному сигналу

## Дифференциальный усилитель в генераторе стабильного тока



Транзистор – простейшая схема генератора стабильного тока

$$U_{\text{бэ3}} = I_3 R_3 = I_{\text{д}} R_2 + U_{\text{бэ4}}$$

$$I_3 = \frac{I_{\text{д}} R_2 + (U_{\text{бэ4}} - U_{\text{бэ3}})}{R_3} = \frac{I_{\text{д}} R_2}{R_3} = \text{const}$$

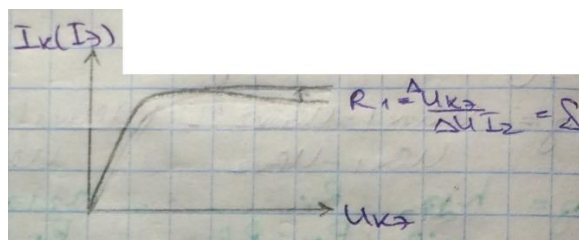
$$I_{\text{д}} = \frac{E_9 - U_{\text{бэ}}}{R_1 + R_2} \approx \frac{E_9}{R_1 + R_2} = \text{const}$$

$$R_1 = \frac{\Delta U_{\text{кэ}}}{\Delta U_{\text{I2}}} = \delta$$

$$R_{\text{вх ср}} \approx h_{213} R_i$$

$$K_{\text{уср}} = \frac{h_{213} R_K | R_1}{R_r + h_{213} R_1}$$

$K_{\text{уср}}$  уменьшается,  $K_{\text{оос}}$  увеличивается



## Дифференциальный усилитель нагрузки

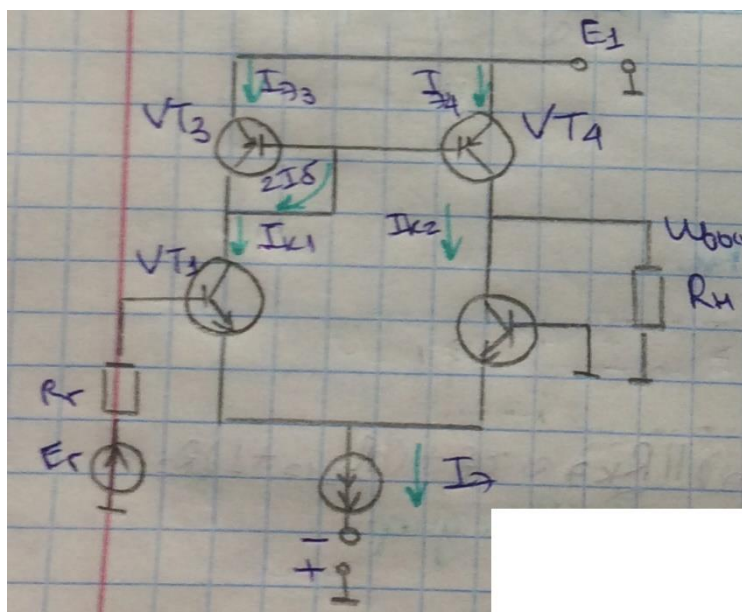
$$R_{K1} \rightarrow VT_3$$

$$R_{K2} \rightarrow VT_4$$

$$r_{\text{кэ}} \gg R_K$$

$K_{\text{уд}} \approx 10^3$  Благодаря применению динамической нагрузки при том же питании

$$U_{\text{бэ3}} = U_{\text{бэ4}}$$



$$I_{K3} = I_{K4}$$

$$I_H = I_{K4} - I_{K2} = I_{K1} - I_{K2} = 0 \text{ при } U_{BX} = 0$$

$$I_{K1} = \frac{I_3}{2} + I_{BX}$$

$$I_{K2} = \frac{I_3}{2} - I_{BX}$$

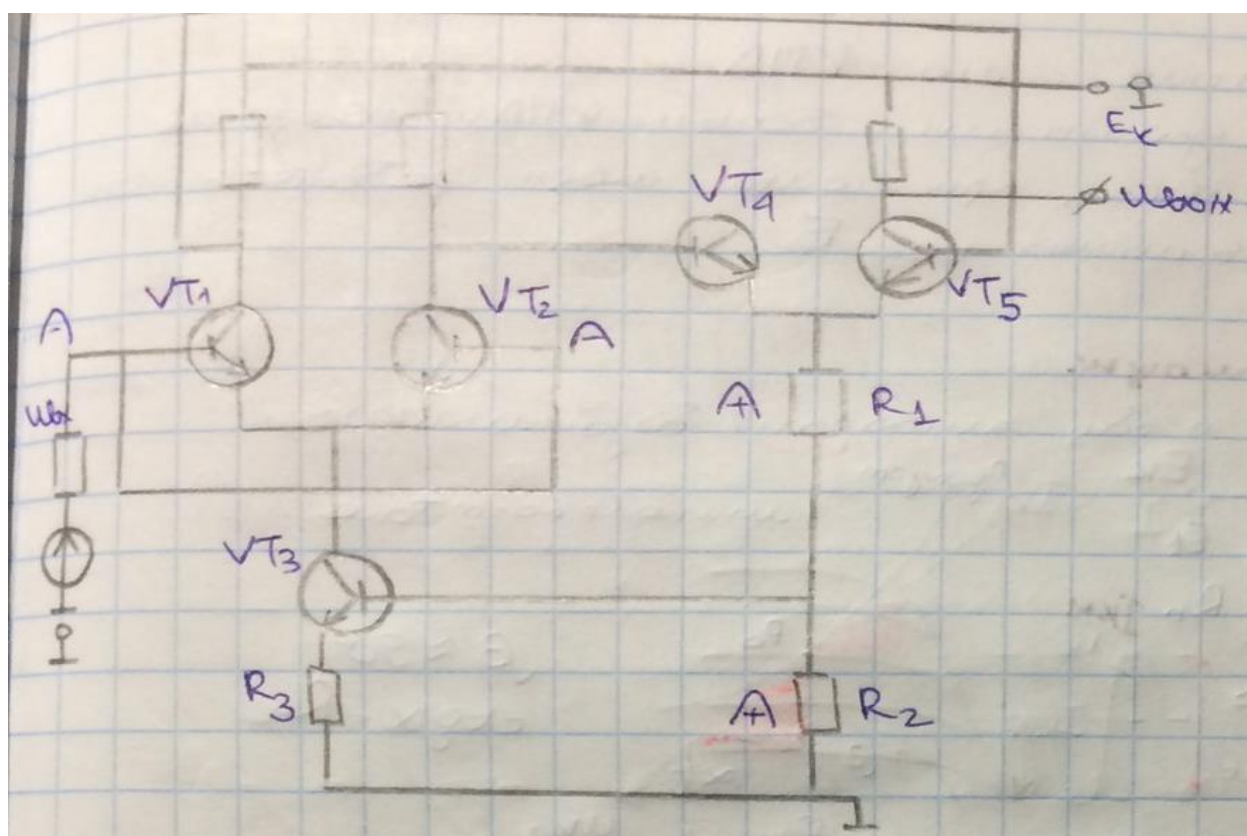
$$I_H = 2\Delta I_K = 2h_{213}I_{BX}$$

$$I_{BIX} = 2h_{213}I_{BX}R_H$$

$$K_u = \frac{2h_{213}I_{BX}R_H}{I_{BX}(R_r + R_{BX})}$$

$$K_{u\Delta} = \frac{2h_{213}R_H}{R_{BX}}$$

В нём происходит большое усиление дифференциального сигнала



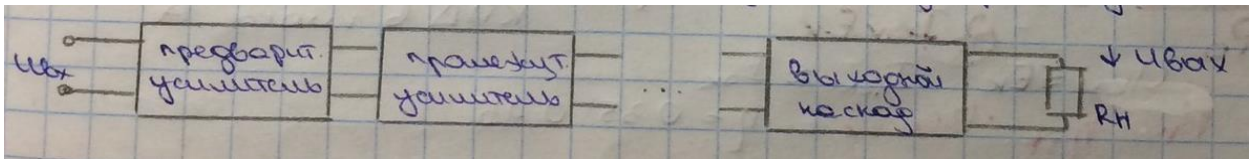
## Усилители мощности

**Усилители мощности** – выходные усилительные каскады, предназначенные для обеспечения в нагрузке заданной максимальной мощности сигнала при наименьшем потреблении мощности источника питания и допустимых нелинейных искажений

**Основные параметры:**

1. Мощность нагрузки  $P_H$
2. Сопротивление нагрузки  $R_H$  – обычно мало, составляет  $\sim 10 \text{ Ом}$

Для усиления малого сигнала усилительное устройство должно содержать



$$\eta = \frac{P_{\text{вых}}}{P_0} * 100\% \quad \text{Потребление от источника питания}$$

$$k_{\Gamma} = \sqrt{\frac{P_2 + P_3 + \dots + P_n}{P_1}} \quad \text{– Коэффициент гармоник}$$

$$k_{\Gamma} = \sqrt{\frac{U_{2m}^2 + U_{3m}^2 + \dots + U_{nm}^2}{U_{1m}^2}}$$

**Схемы усилителей мощности делят на:**

1. Трансформаторные
2. Бестрансформаторные
  1. Однотактные
  2. Двухтактные

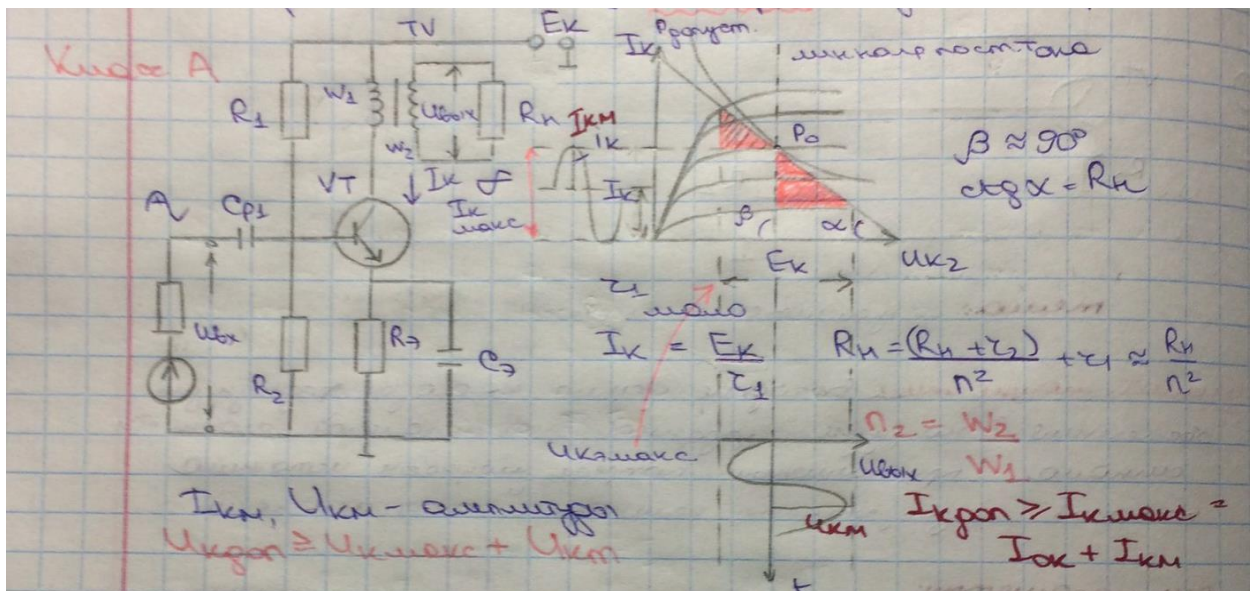
**Классы усилителей мощности:**

1. А – минимальные искажения, малый КПД
2. Б – Двухтактные усилители, большие КПД и искажения
3. АБ – промежуточный класс, при малых мощностях работает как класс А и при больших как класс Б

**Однотактные усилители мощности**

Построенные на схеме с общим эмиттером, базой или коллектором. В нашем случае общий эмиттер





$$P_{\text{вых}} = U_K I_K = \frac{U_{\text{км}} I_{\text{км}}}{2}$$

$$P_0 \approx (I_{\text{ок}} + I_{\text{д}} + I_{\text{об}}) E_K = I_{\text{ок}} E_K$$

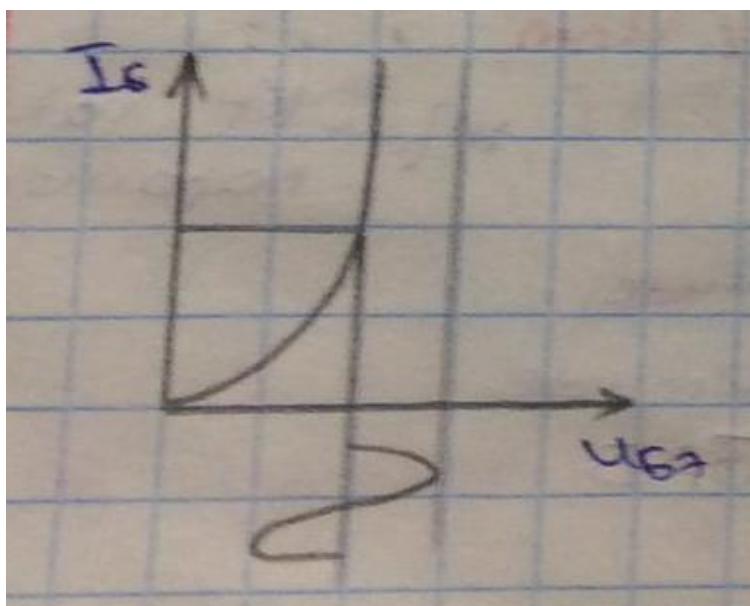
$$\frac{P_{\text{вых к}}}{P_0} = \frac{U_{\text{км}} I_{\text{км}}}{2 I_{\text{ок}} E_K}$$

$\eta = 0.5$  – предельное значение КПД в классе А

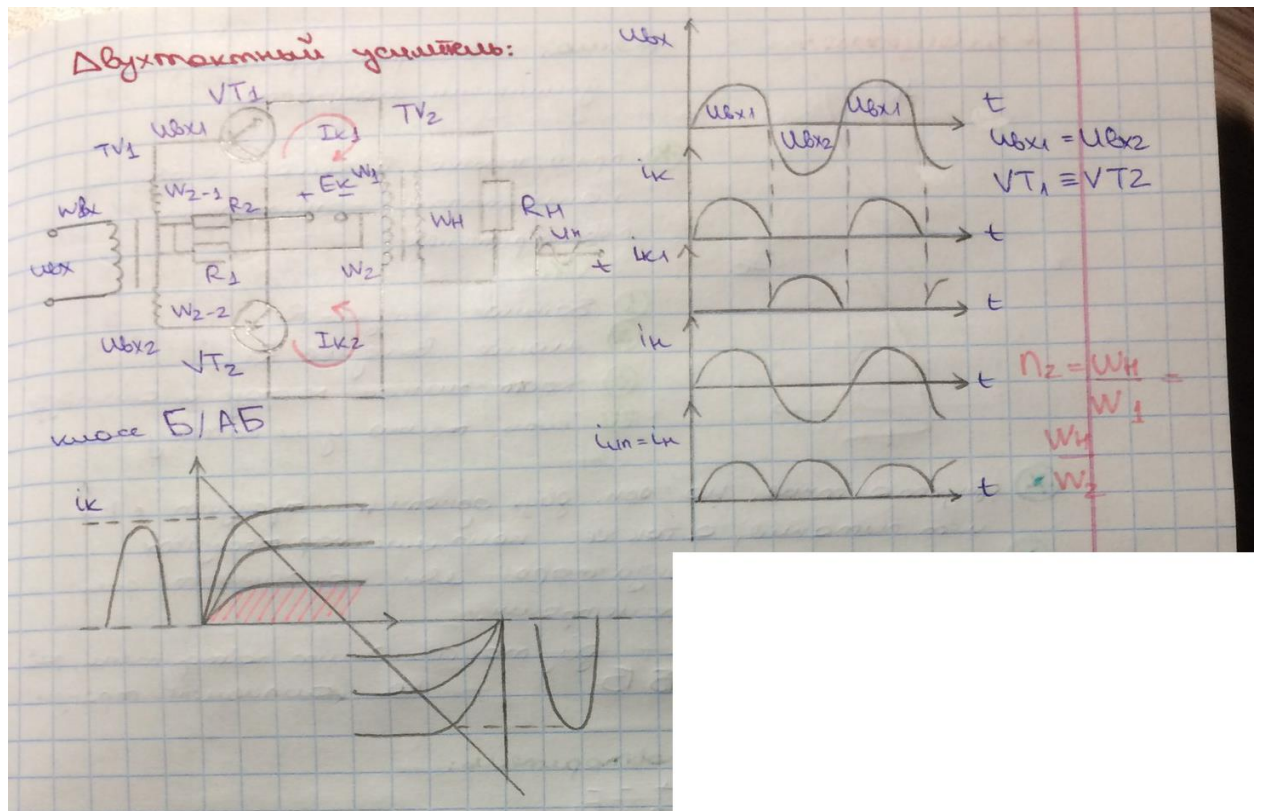
$$U_{\text{км}} \leq E_K \quad I_{\text{км}} \leq I_{\text{ок}}$$

$$P_{\text{н}} = \eta_{\text{тр}} * P_{\text{вых к}} \quad \eta = 0.35 - 0.45$$

Нелинейные искажения сигнала в усилителях мощности обусловлены нелинейностью входных и выходных характеристик транзистора



## Двухтактный усилитель



$$i_{k1} = I_{OK1} + I_{K11} \cos \omega t + I_{K21} \cos 2\omega t + I_{K31} \cos 3\omega t + \dots$$

$$i_{k2} = I_{OK2} + I_{K12} \cos(\omega t + \pi) + I_{K22} \cos(2\omega t + \pi) + I_{K32} \cos(3\omega t + \pi) + \dots$$

$$I_{OK1} = I_{OK2} = I_{OK}$$

$$I_{K11} = I_{K12} = I_{K1}$$

$$i_{k2} = I_{OK2} - I_{K12} \cos \omega t + I_{K22} \cos 2\omega t - I_{K32} \cos 3\omega t + \dots$$

$$i_1 = i_{k1} - i_{k2} = 2I_{K1} \cos \omega t + 2I_{K3} \cos 3\omega t$$

### Свойства двухтактного усилителя мощности:

1. Нет подмагничивания сердечника трансформатора
2. Увеличивается в 2 раза амплитуда гармоник
3. Отсутствуют чётные гармоники

$$P_0 = I_{ип} E_K$$

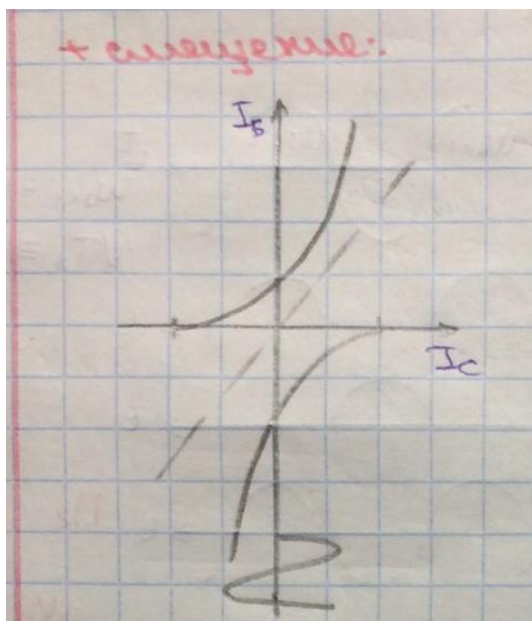
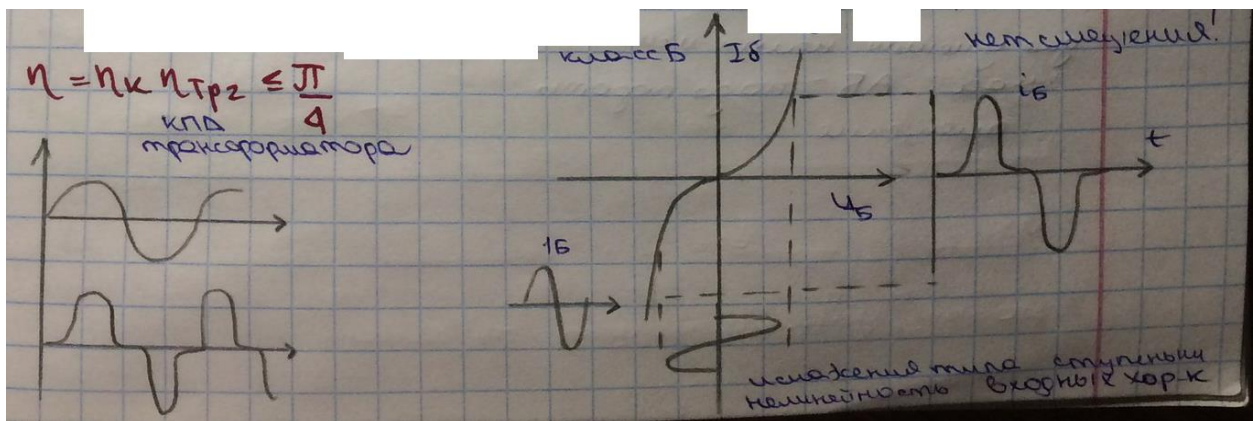
$$I_{ип} = \frac{1}{\pi} \int_0^{\pi} I_{km} \sin \omega t d\omega t = \frac{2I_{km}}{\pi}$$

### Класс Б

$$\eta_K = \frac{U_{km} \pi}{2 * 2E_K} = \frac{\pi U_{km}}{4 E_K}$$



$$\xi \leq 1 \quad \max \eta_k = \frac{\pi}{4} = 0.785$$



## Бестрансформаторные усилители мощности

Применяются только в схемах с общим коллектором (он же эмиттерный повторитель)

### Общий Коллектор:

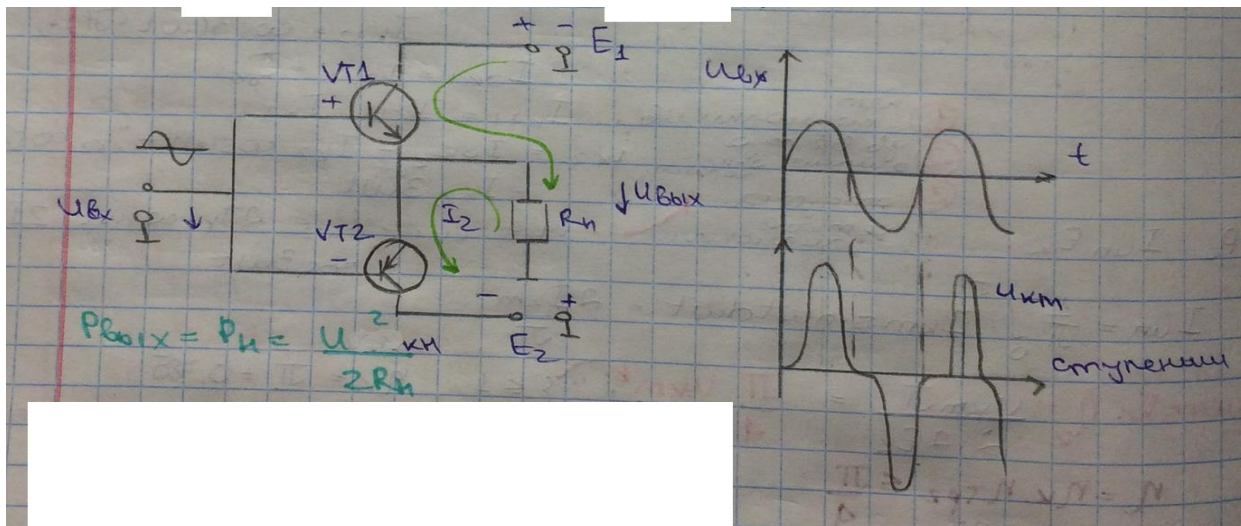
1. Большое входное сопротивление
2. Малое выходное сопротивление
3. Повторяет сигнал по фазе и амплитуде
4. Есть только усиление по току

Двухтактные на основе двух одностипных транзисторов с 1-2 источниками питания, а также комплементарными транзисторами

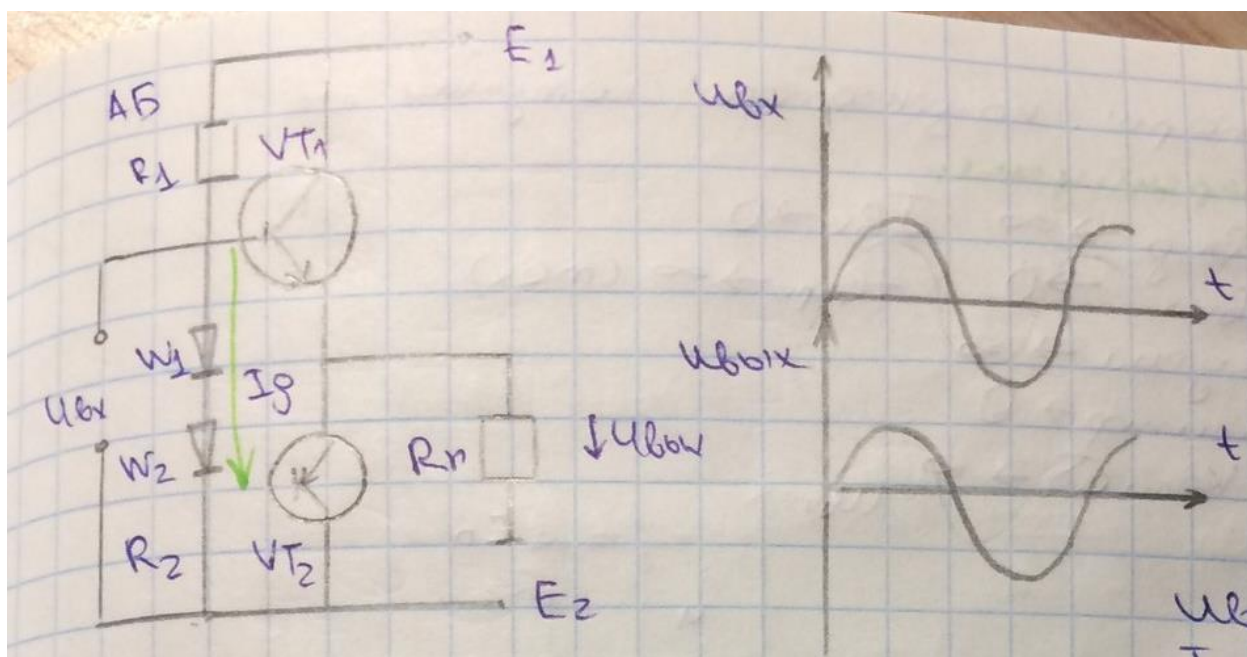
npn- и pnp-транзисторы являются комплементарными, если обладают одинаковыми параметрами

push-pull схема – двухтактный эмиттерный повторитель, работающий в режиме класса Б на комплементарных транзисторах

## Двухтактный эмиттерный повторитель

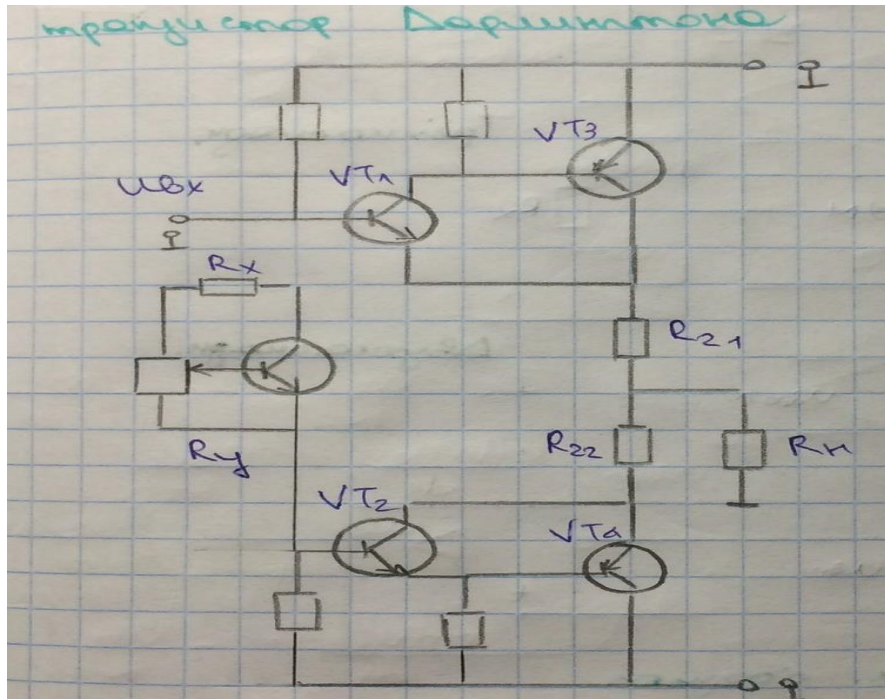


Для уменьшения нелинейных искажений используется класс АБ – надо подать смещение



$U_{вх} = 0, I_0 = 0,05 - 0,15$  (КПД)  $\eta = 78,5 \rightarrow 60 - 65\%$

Транзистор Дарлингтона позволяет получить большую мощность.



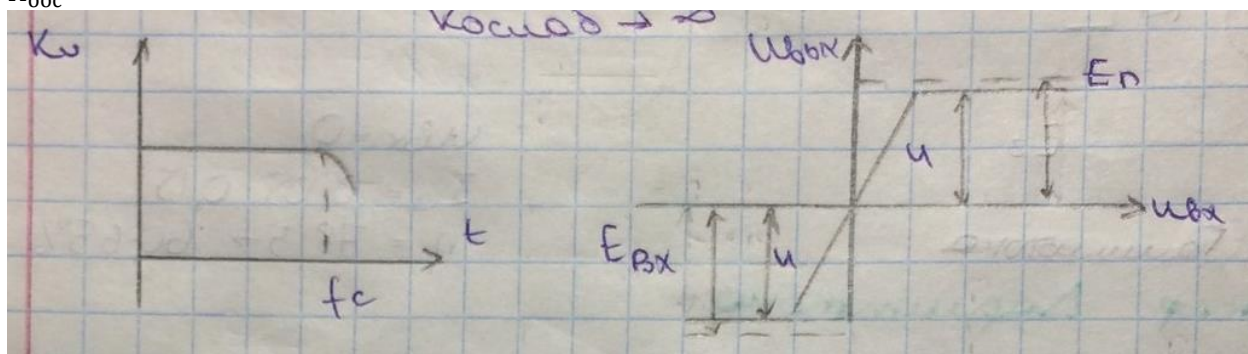
## Операционные усилители

1) Операционным усилителем (ОУ)- называется высококачественным усилителем постоянного тока с двумя входами, одним-двумя выводами, предназначенные для выполнения различных операций над аналоговыми сигналами ( сложение, вычитание, ослабление, усиление, логарифмирование, антилогарифмирование) за счёт введения ООС.

ООС – транзисторы, катушки индуктивности и т.д.

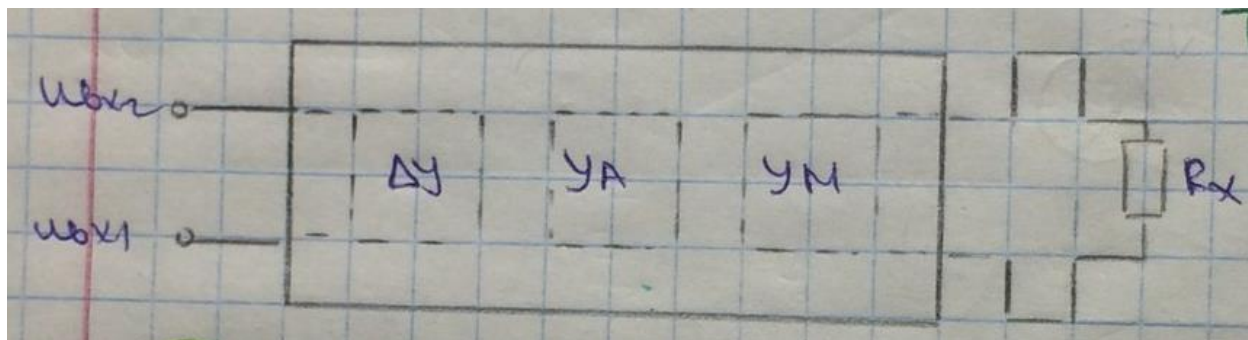
Операционный усилитель(ОУ)- должен обладать:

1.  $R_{вхд} \rightarrow \infty, I_{вх} \rightarrow 0$
2.  $R_{вых} \rightarrow 0, f_{в} \rightarrow \infty(\max)$
3.  $K_{ид} \rightarrow \infty$
4.  $U_{см} \rightarrow 0, U_{сф} \rightarrow 0$
5.  $K_{оос} \rightarrow \infty$



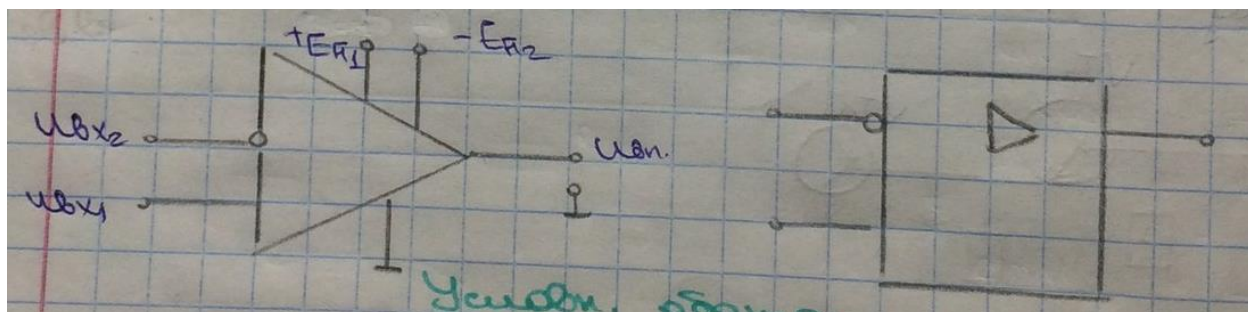
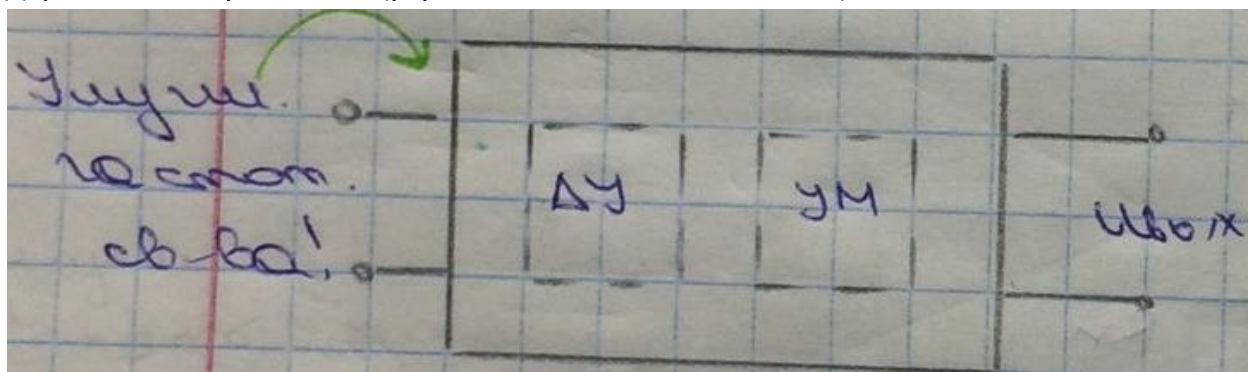


## Трёхкаскадный Операционный Усилитель(ОУ)



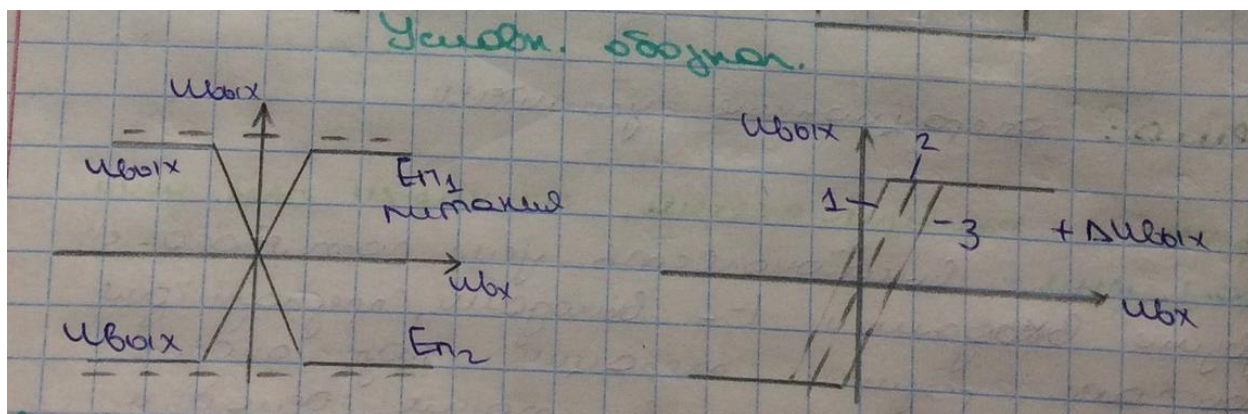
УА- усилитель амплитуды, УМ- Усилитель мощности, ДУ- дифференциальный усилитель.

Двухкаскадный усилитель (улучшены частотные свойства)



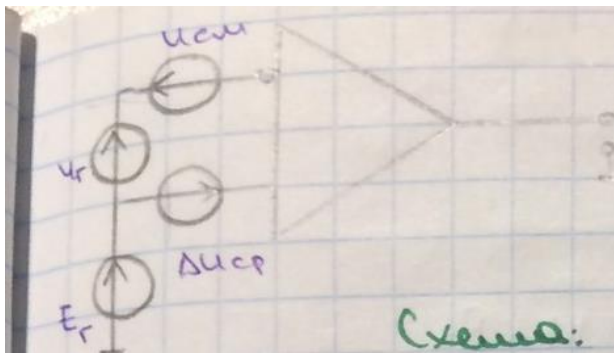
$U_{вх1}$  — неинвертирующий,  $U_{вх2}$  — инвертирующий

Условные обозначения:

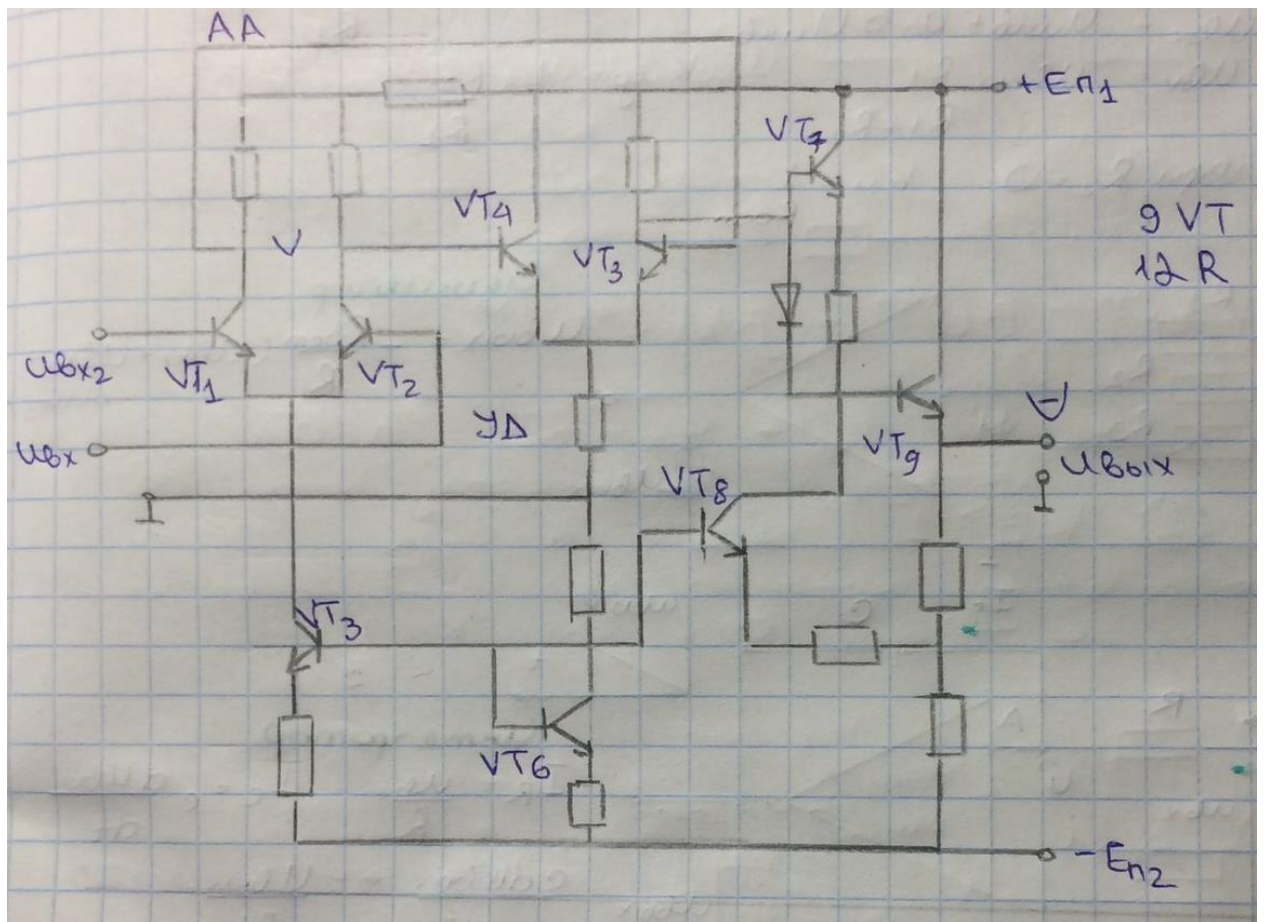


! реальные усилители имеют разбаланс

Агрейд:



Принципиальная схема Операционного усилителя (ОУ) (первая интегральная):



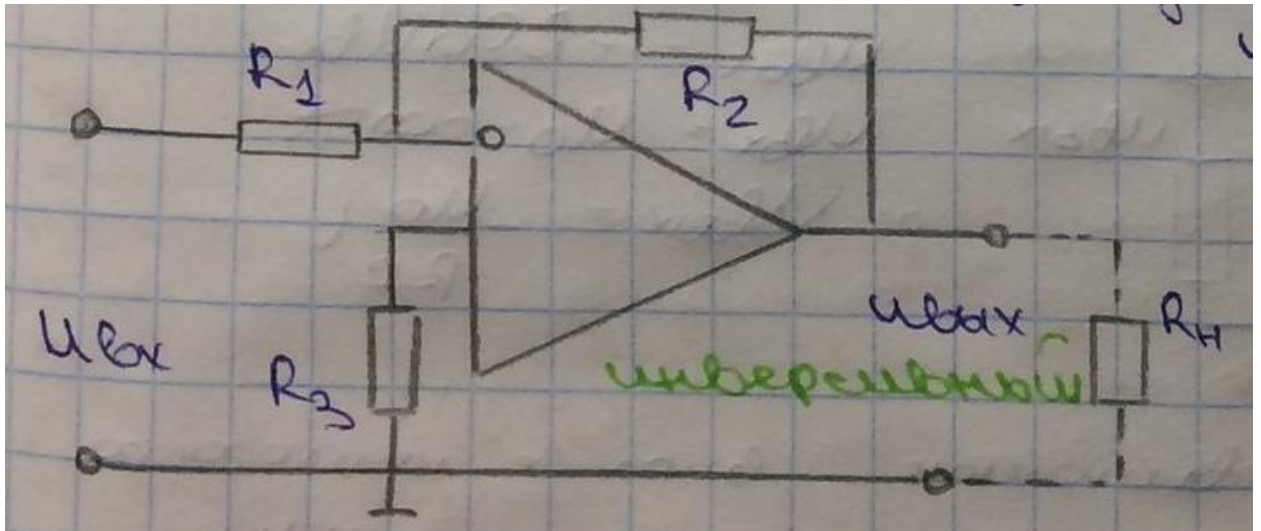
Типовые схемы включения(применение) Операционного усилителя(ОУ)

ОУ- широко применяется для:

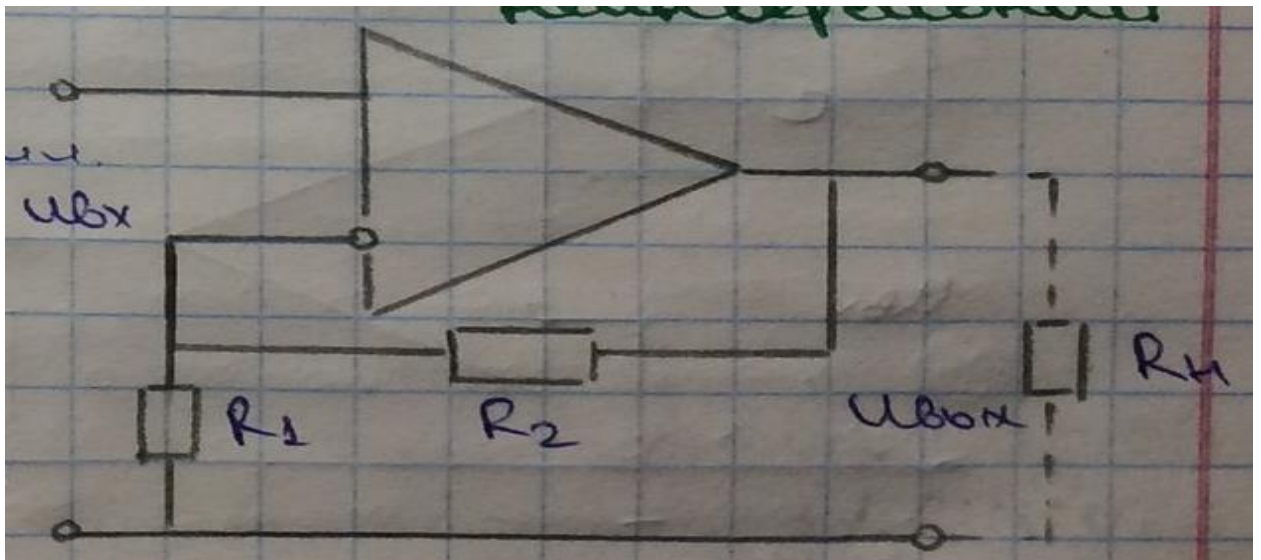
1. Инвертирование/ неинвертирование усилителей в качестве дифференциального усилителя сигнала
2. Логарифмирующего и потанцирующего усилителя, в качестве компараторов и различных устройств



### Инвертированный усилитель



### Неинвертированный усилитель:



$R_2, R_1$  — обеспечивают ООС

$$\beta_{oc} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \text{ (коэффициент усиления)}$$

$$U' \cong 0$$

По закону Кирхгофа:

$$I_1 + I_2 = 0$$

$$I_1 = \frac{U_{вх} - U'}{R_1} = \frac{U_{вх}}{R_1}$$

$$I_2 = -\frac{U_{вых}}{R_2}$$

$$\frac{U_{вх}}{R_1} = -\frac{U_{вых}}{R_2}$$

$$K_{ид} = \frac{U_{вых}}{U_{вх}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Неинвертированный усилитель (каскад):

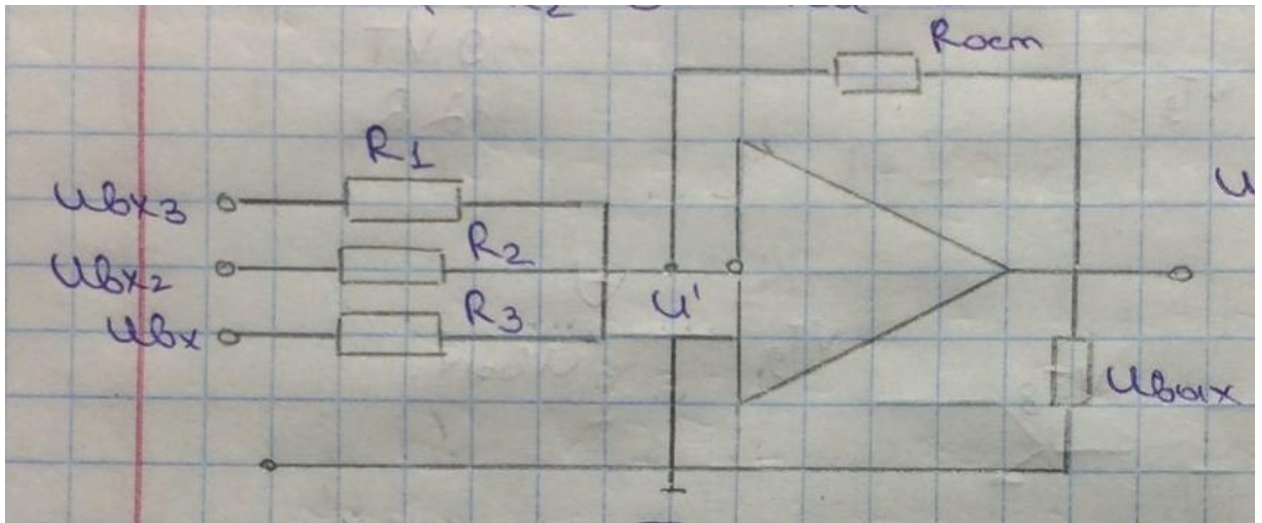
$$U_{инв.вх.} = U_{ос} = U_{вых} * \beta_{ос} = U_{вых} * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

$$U_{вх} = U_{инв} + U' = U_{инв}$$

$$U_{вх} = U_{вых} * \frac{R_1}{R_1 + R_2}$$

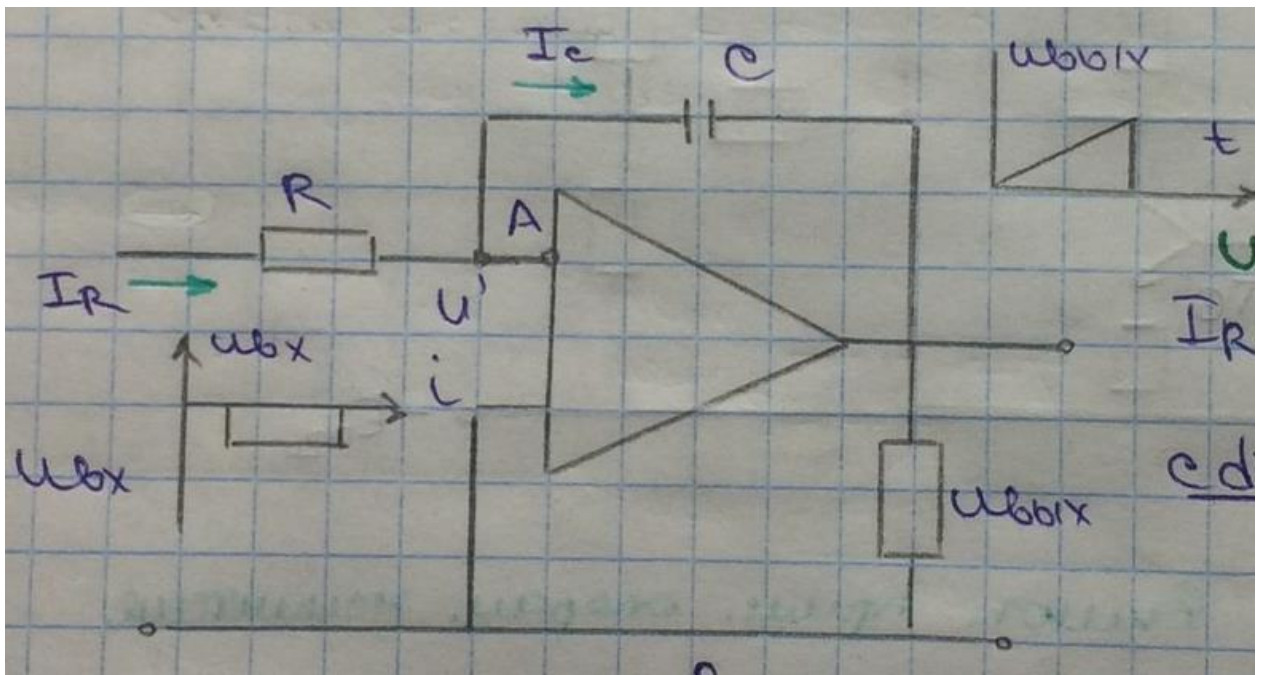
$$K_{ид} = 1 + \frac{R_2}{R_1}, \text{ при } R_2 = 0, K_u = 1$$

Схема включения усилителя (Сумматор)



$$U_{вых} = -\frac{R_{ос}}{R} (U_{вх1} + U_{вх2} + U_{вх3})$$

Интегратор:





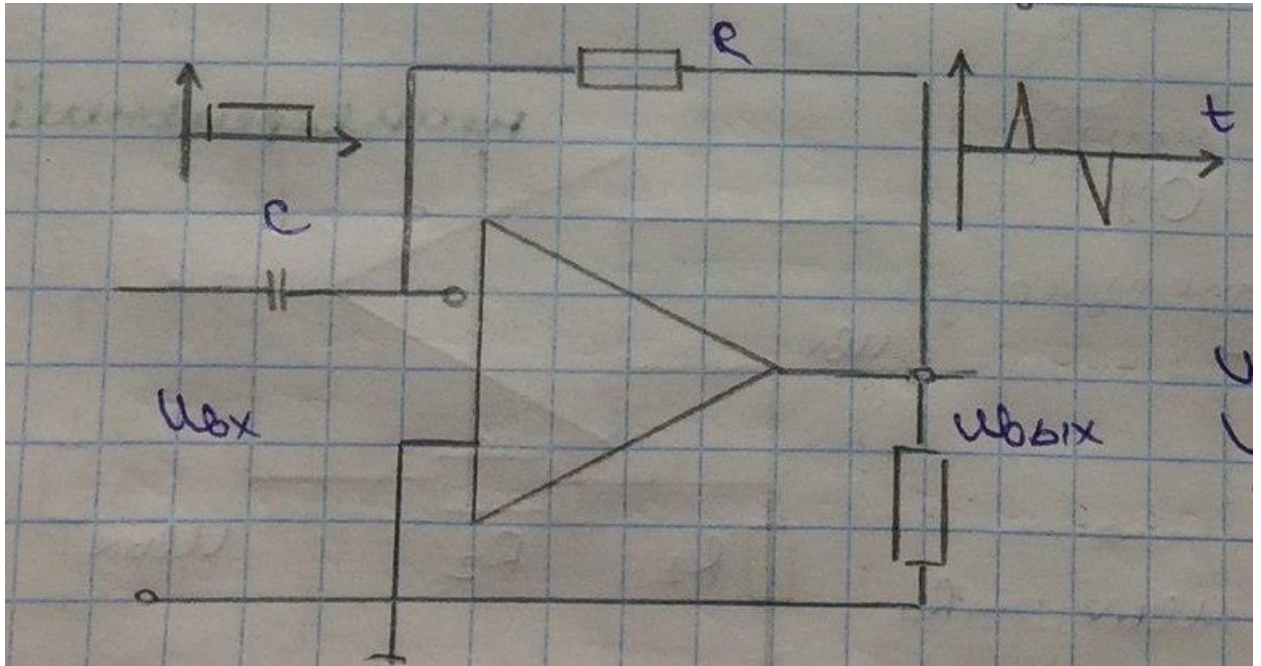
$$I_R = \frac{U_{BX}}{R}$$

$$I_C = C \frac{dU_{BbIX}}{dt}$$

$$\frac{CdU_{BbIX}}{dt} = -\frac{U_{BX}}{R_t}$$

$$U_{BbIX} = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{BX} dt, U_{BX} = U_0 = const, U_{BbIX} = -\frac{U_0}{RC} t$$

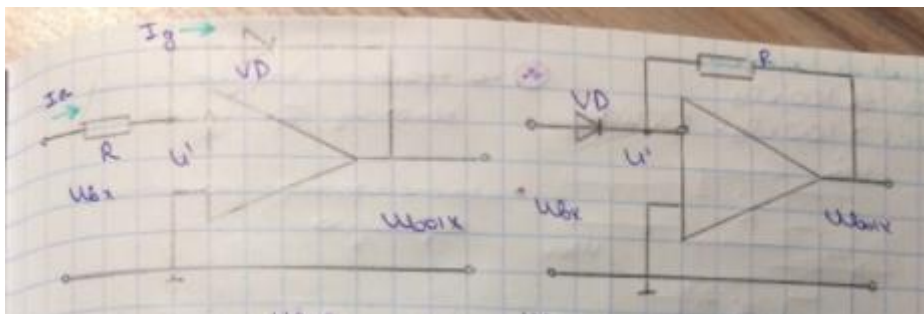
Дифференциатор:



$$C \frac{dU_{BX}}{dt} = \frac{U_{BbIX}}{R}$$

$$U_{BbIX} = -RC dU_{BX}$$

В операционных усилителях используют включение в качестве компаратора, операционный усилитель является самым разносторонним и где только не применяется.

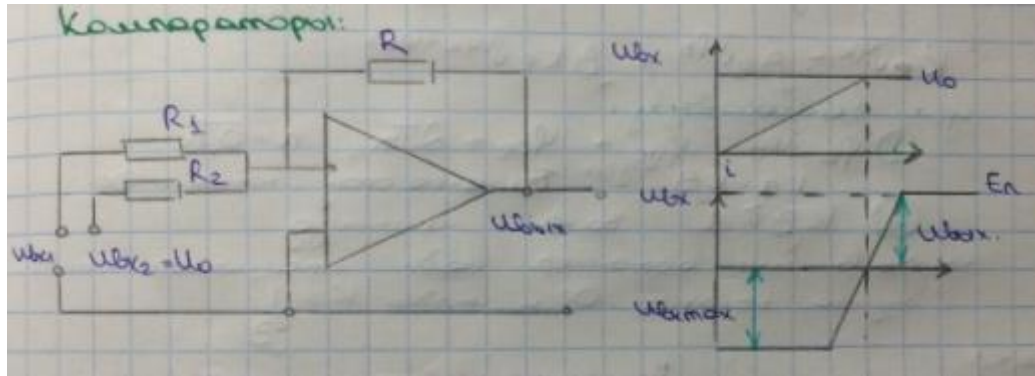


$$\frac{U_{BX}}{R} = I_0 \left( e^{\frac{U_{BbIX}}{\Phi_T}} - 1 \right) \approx I_0 e^{\frac{\Phi_{BbIX}}{\Phi_T}}$$

$$I_0 e^{\frac{U_{BX}}{\phi_T}} = \frac{U_{ВЫХ}}{R}$$

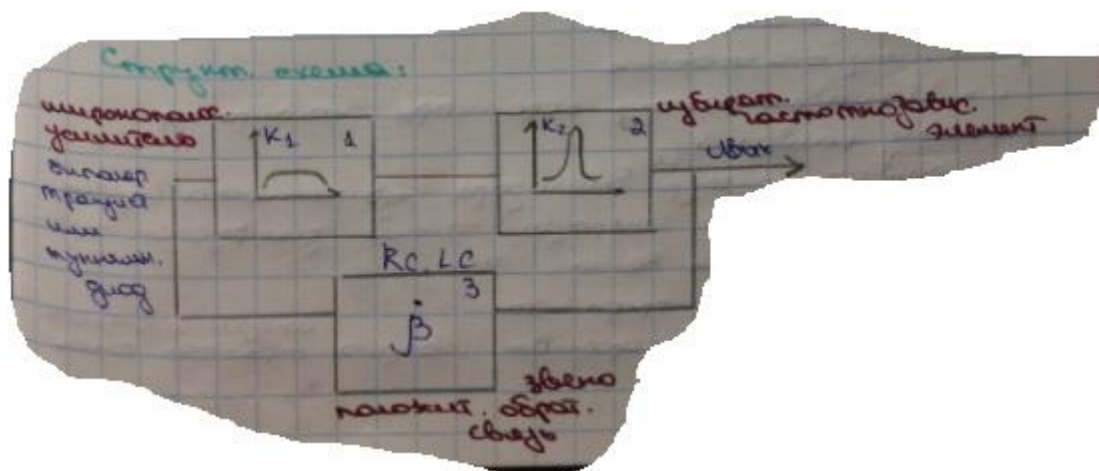
$$U_{ВЫХ} = \phi_T \ln \left( \frac{U_{BX}}{I_0 R} \right)$$

**Компараторы:**



## Автогенераторы гармонических колебаний

**Автогенератор** – устройство, преобразующее энергию источника постоянного тока в энергию незатухающих электрических колебаний заданной формы, амплитуды и частоты.



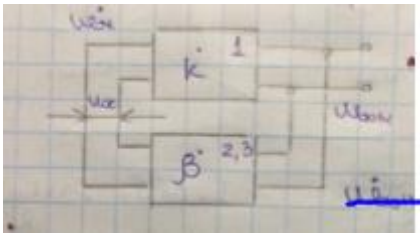
Классификация:

- генераторы с внешним независимым возбуждением или самовозбуждением
- низко-, высоко- и сверхвысокочастотные

На практике структурные схемы чаще всего состоят из 2 узлов

Диапазон частот:

- **Низкие**  $\leq 100$  кГц
- **Высокие**  $> 100$  кГц – 100 мГц



автогенератор-усилитель с обратной связью

$$\dot{U}_{\text{вых}} = K \dot{U}_{\text{вх}} = \dot{K} \dot{U}_{\text{ос}} = \dot{K} \dot{\beta} \dot{U}_{\text{вых}}$$

$$\dot{K} \dot{\beta} = 1$$

Чтобы напряжение оставалось устойчивым на выходе:  $\dot{K} \dot{\beta} = 1$

$K_{\phi c} = \frac{\dot{K}}{1 - \dot{\beta} \dot{K}}$  – коэффициент деления усилителя

$$K e^{j\phi_K} - \beta e^{j\phi_B} = \beta K e^{j(\phi_K + \phi_B)}$$

### Условия самовозбуждения:

1.  $\phi_K - \phi_B = \phi_{yc} + \phi_{oc} = 2\pi n, n = \overline{0, n}$   
 $K\beta = \dot{K}\dot{\beta}$   
 условие баланса фаз – положительная обратная связь
2.  $K\beta \geq 1$  – баланс амплитуд

Чтобы в схеме автогенератора наблюдались стационарные колебания, необходима ПОС и условие, гласящее, что  $K > \frac{1}{\beta}$



### Автогенераторы LC типа

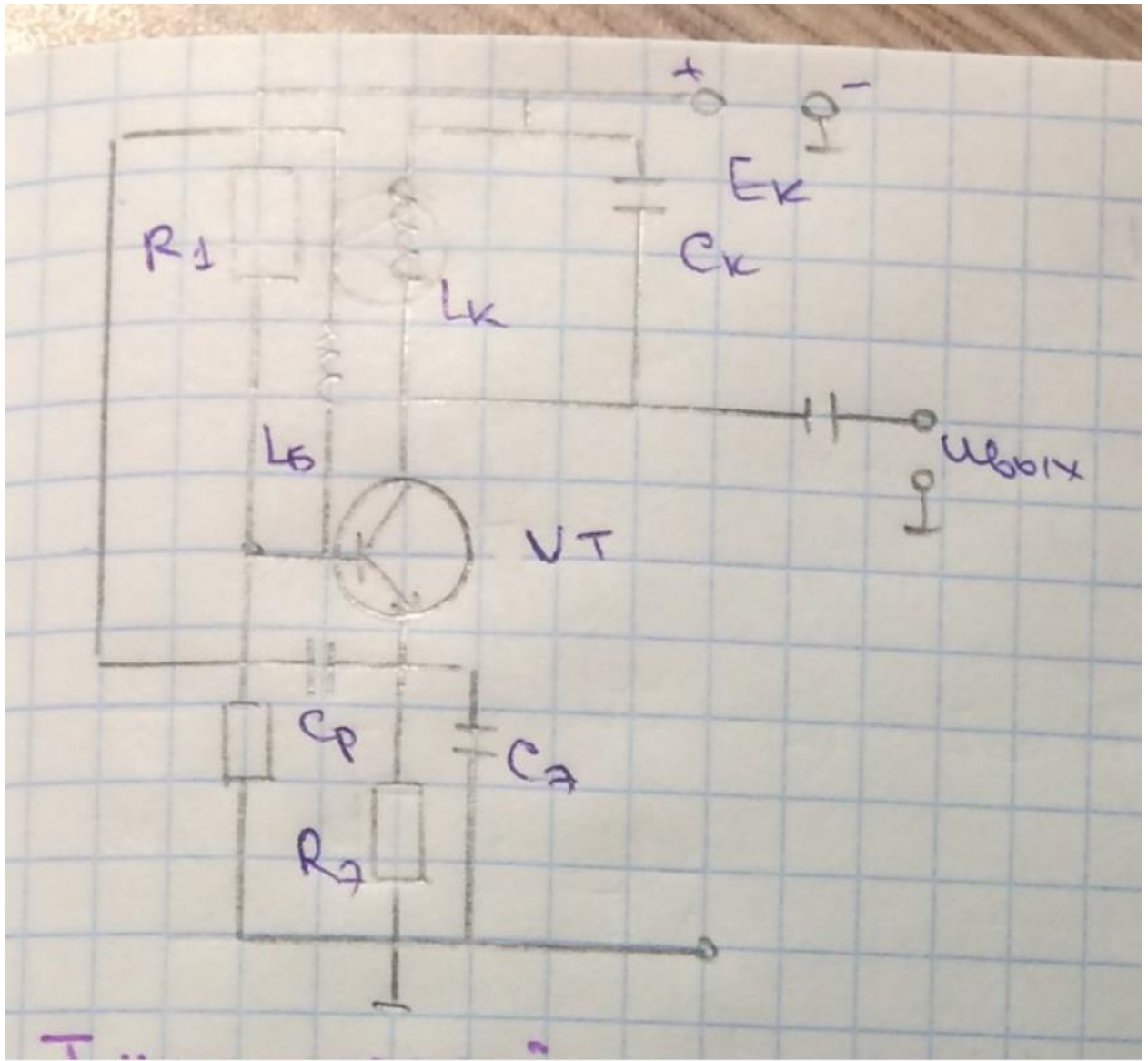
генераторы синусоидальных колебаний бывают LC (низкочастотные) и RC (высокочастотные) типа

Параметры колебательного контура LC определяют частоту генератора

благодаря избирательности (резонанс) колебательные контуры LC обеспечивают выполнение условий генерации при резонансной частоте. Усилитель – только баланс амплитуд

Существует множество схем, среди которых:

- LC генераторы
  - с трансформаторной связью
  - трёхточечный



$$K\beta \geq 1$$

$$\phi_{yc} = 180^\circ$$

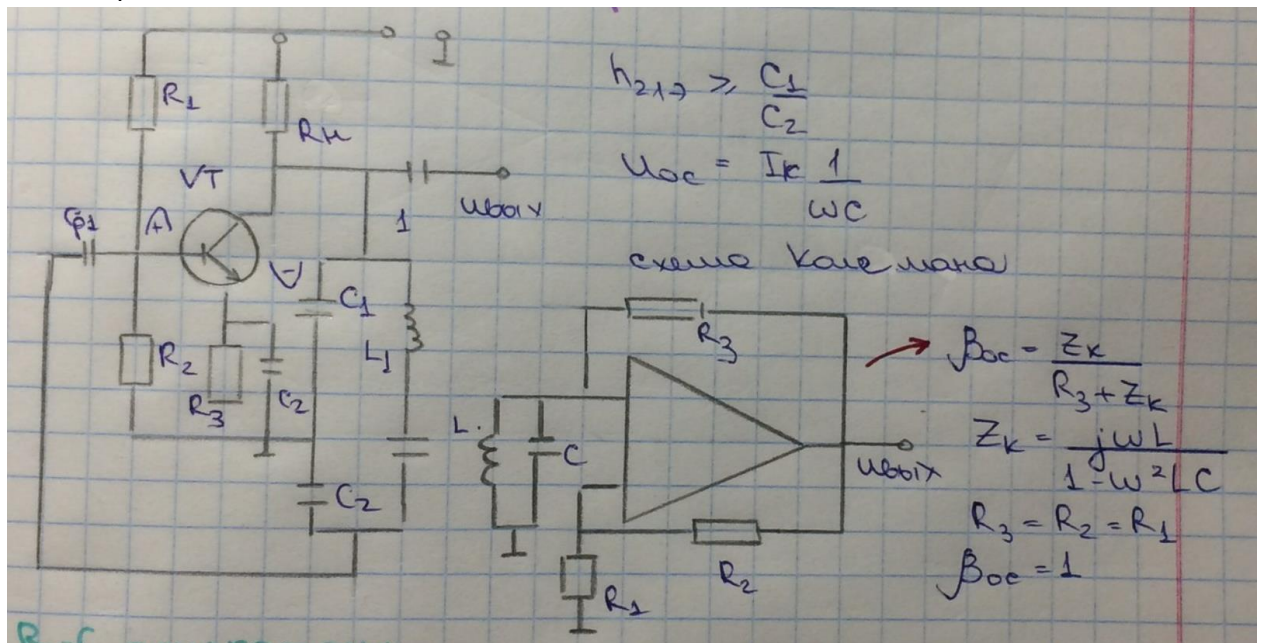
$$\phi_{oc} = 180^\circ$$

$$h_{213} \geq \sqrt{\frac{L_K}{L_B}}$$

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$



- трёхточечный



$$h_{21э} \geq \frac{C_1}{C_2}$$

$$U_{oc} = I_K \frac{1}{\omega C}$$

$$\beta_{oc} = \frac{Z_K}{R_3 + Z_K}$$

$$\beta_{oc} = 1$$

## RC генераторы

в качестве частотнозависимых ОС используются RC схемы

- автогенераторы RC типа с поворотом фазы ( $\phi = \pm\pi$ )
- с нулевым фазовым сдвигом ( $\phi=0$ ) – мостовая RC схема

