

## Трансформаторный усилительный каскад (ОЭ)

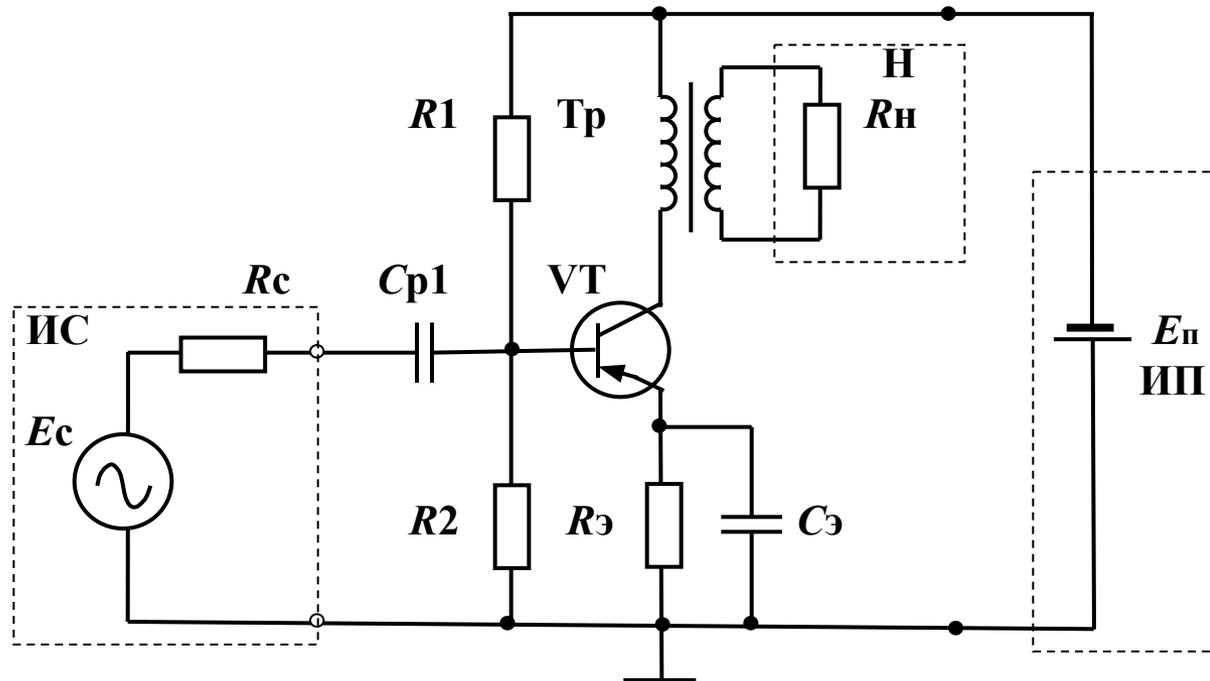


Схема принципиальная электрическая трансформаторного каскада

## Двухкаскадный усилитель с емкостной связью между каскадами (ОЭ + ОС)

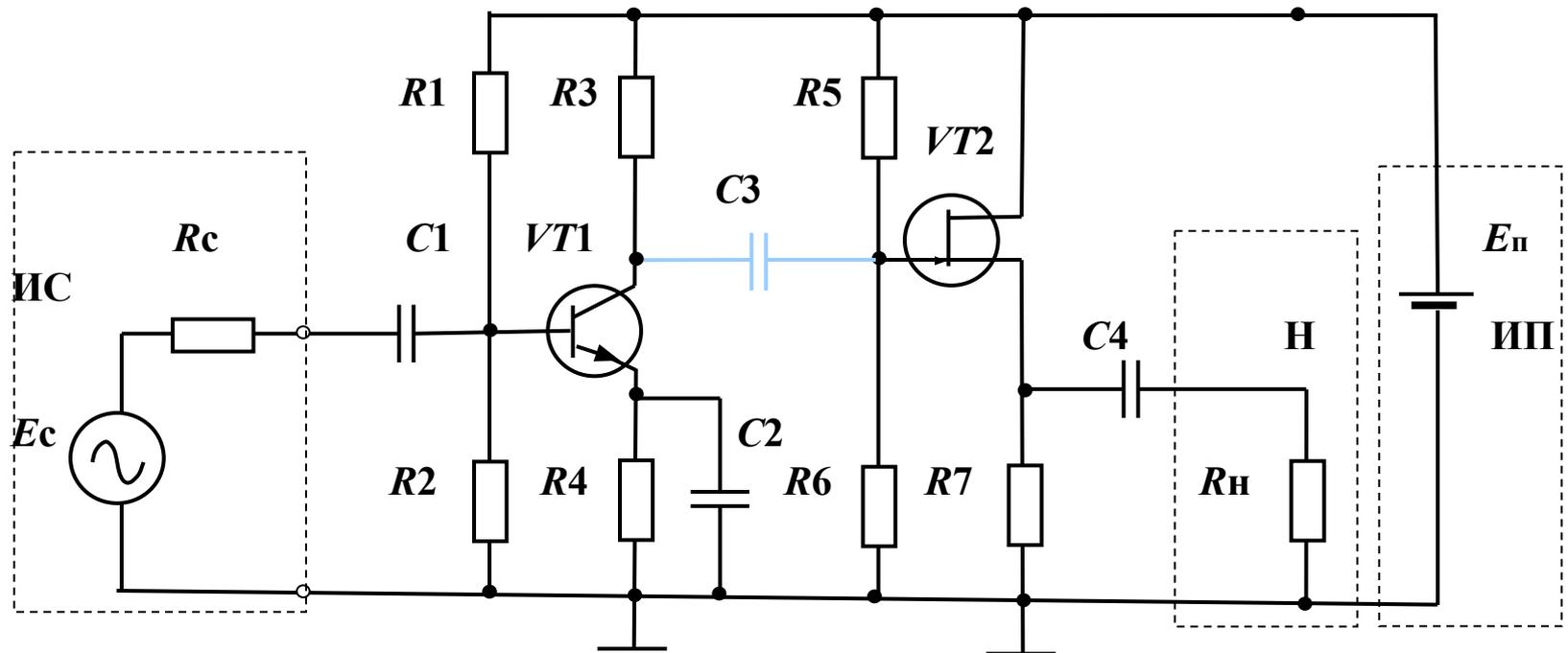


Схема принципиальная электрическая двухкаскадного усилителя

Число двухкаскадных схем на транзисторах восьми разных типов равно 64.

Число трёхкаскадных схем на транзисторах восьми разных типов равно 512.

## Двухкаскадный усилитель с непосредственной (гальванической) связью между каскадами

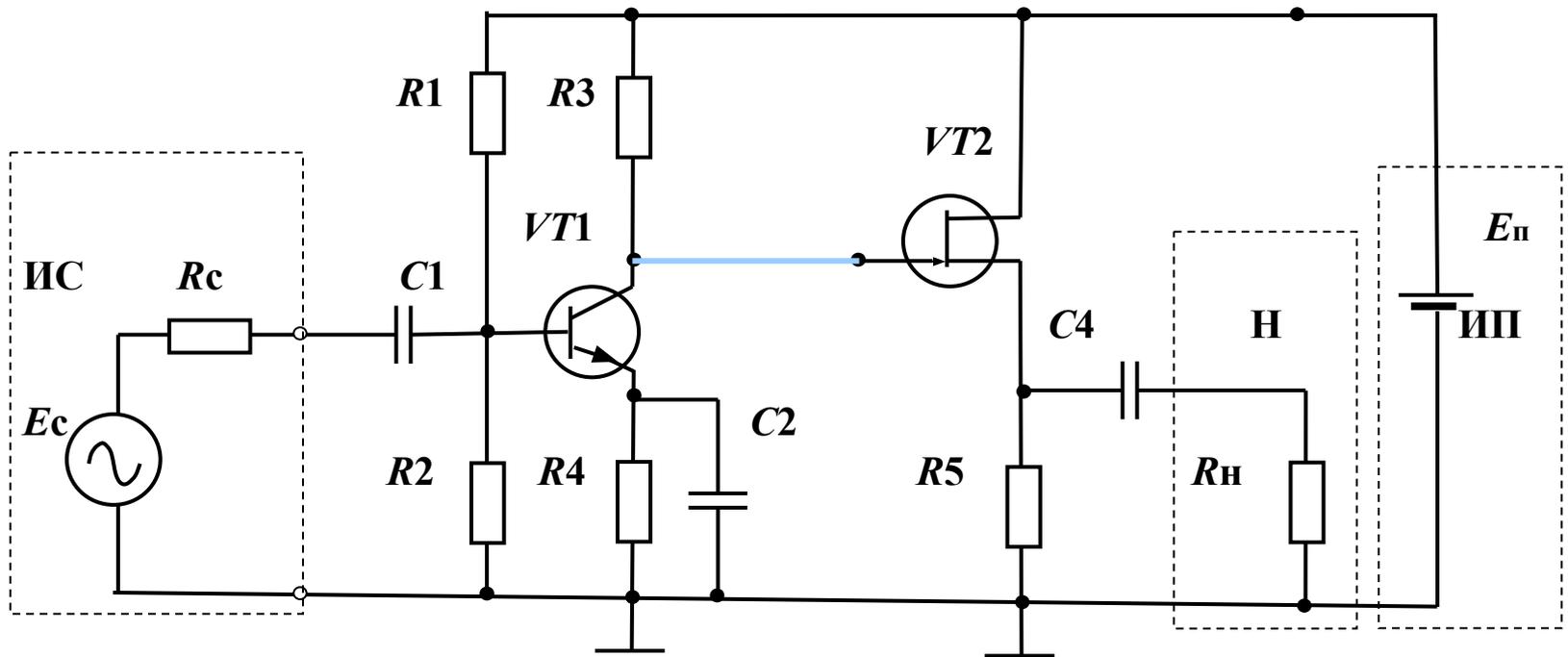


Схема принципиальная электрическая двухкаскадного усилителя

## Двухкаскадный усилитель с трансформаторной связью между каскадами

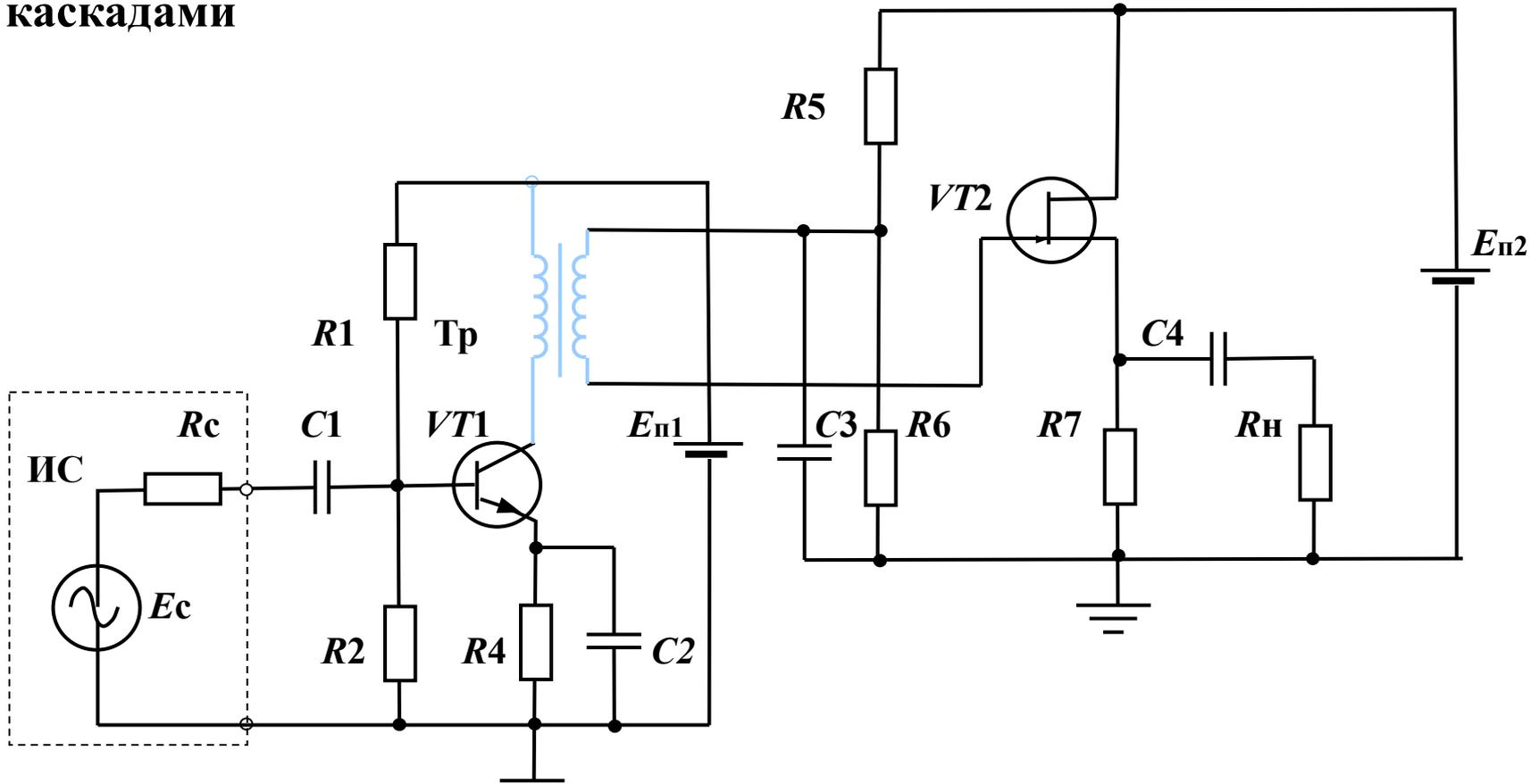


Схема принципиальная электрическая двухкаскадного усилителя трансформаторной связью между каскадами

# Классификация усилителей мощности

## Особенности усилителей мощности (УМ):

Транзисторы в УМ работают во всей области входных и выходных ВАХ. Поэтому в УМ возникают большие нелинейные искажения.

Транзисторы в УМ работают при напряжениях, токах и мощностях близких к предельно допустимым.

Транзисторы в УМ работают при значительных рассеиваемых на них мощностях, что приводит к их нагреву.

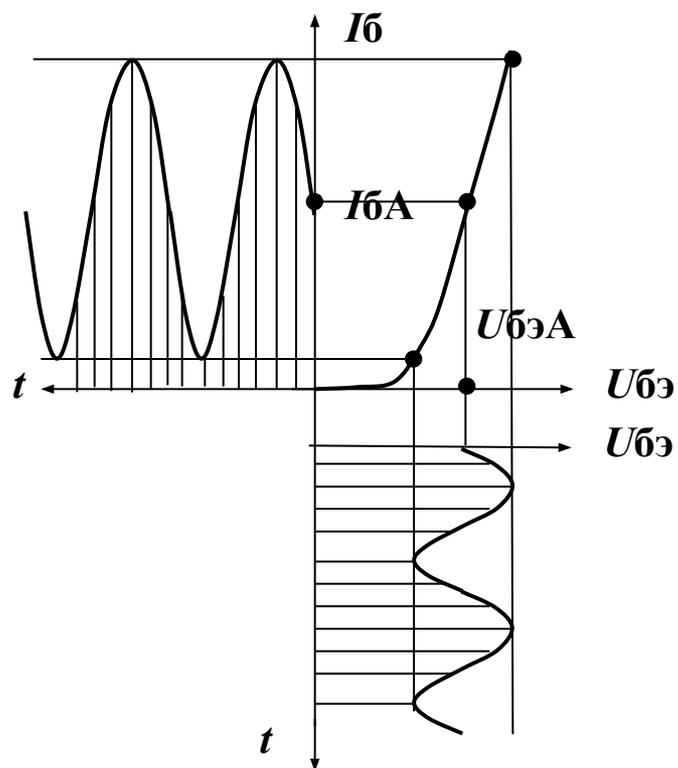
Для снижения температуры их располагают на охлаждающих радиаторах.

Как правило, транзисторы в УМ работают в двухтактном режиме, т. е. в выходных каскадах используют не один, а два или более транзисторов.

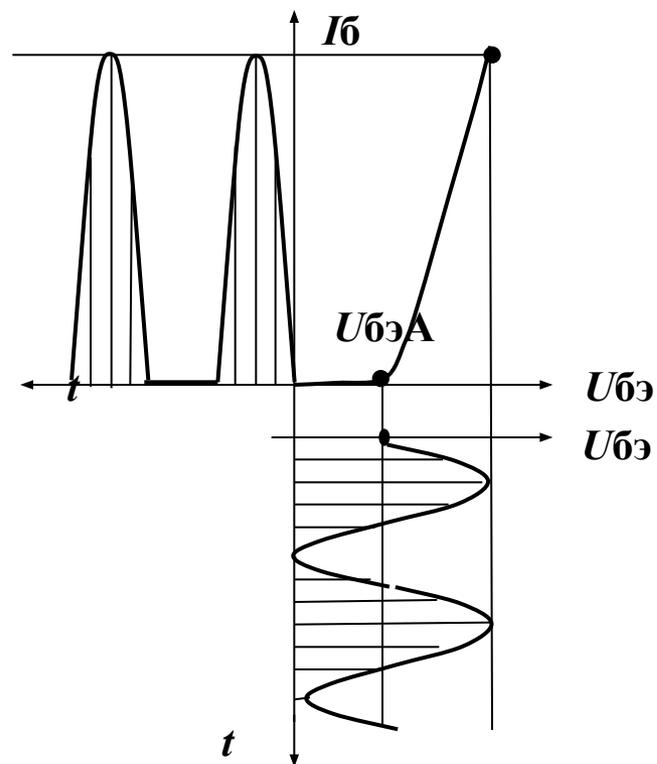
# Усилители мощности

## Выбор рабочей точки транзистора

Класс А.  $\varphi = 180^\circ$



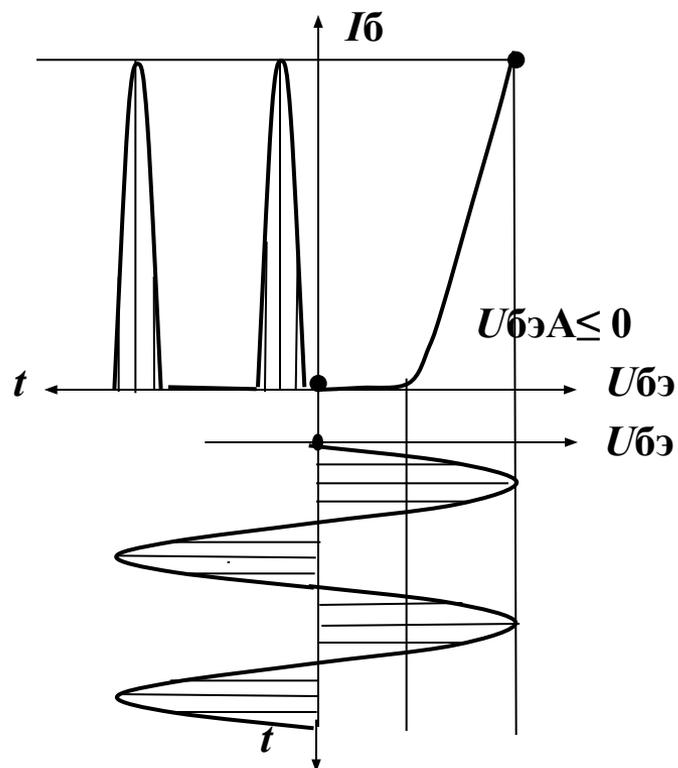
Класс В  $\varphi = 90^\circ$



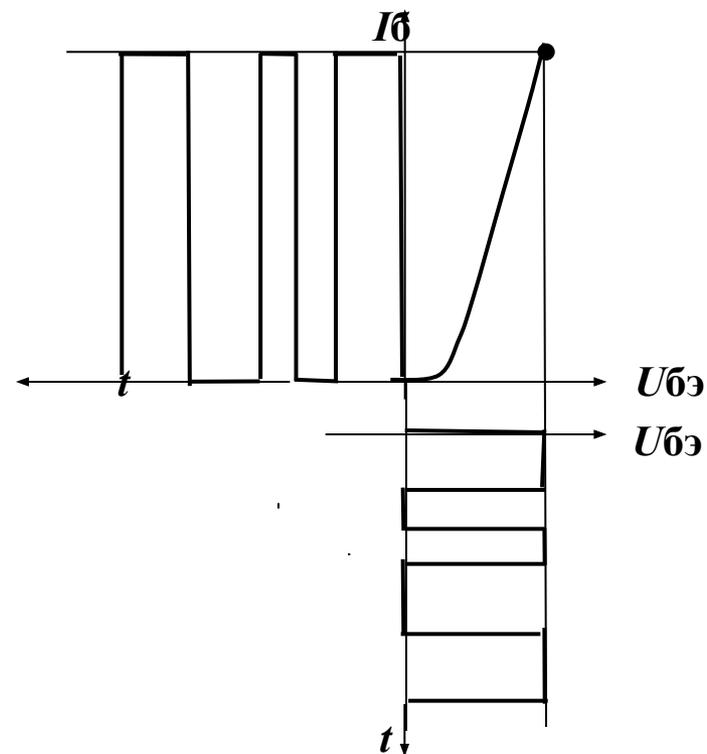
# Усилители мощности

## Выбор рабочей точки транзистора

Класс *C*  $\varphi \leq 90^\circ$

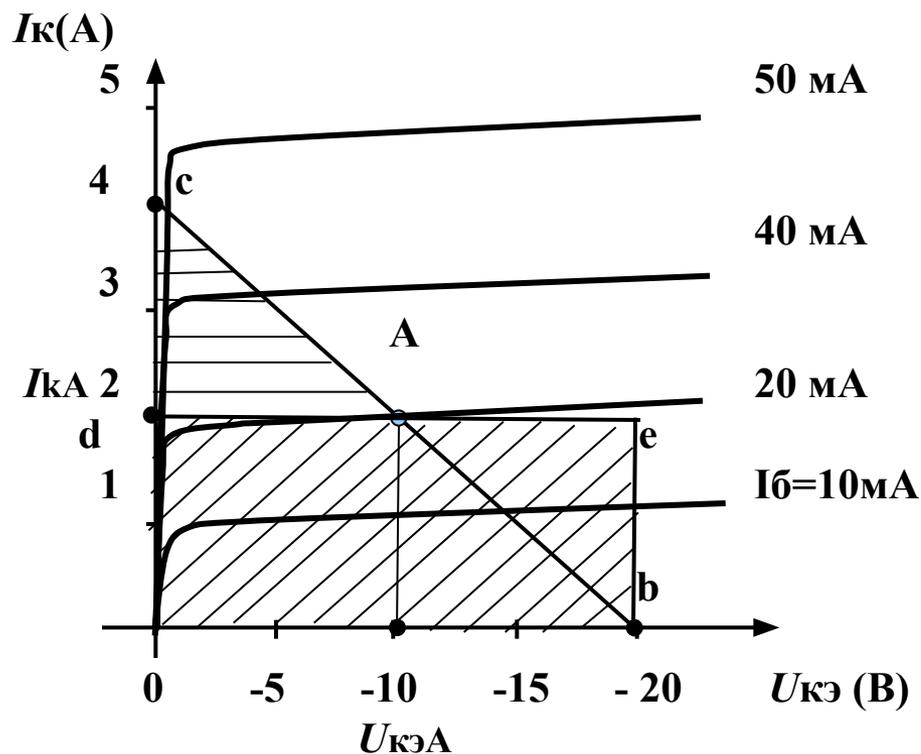


Класс *D*



## Усилители мощности

### Расчёт КПД УМ в режиме класса А



$$E_{п} = 20\text{В},$$

$$R_{к} = 40\text{Ом},$$

$$R_{э} = 10\text{Ом},$$

$$P_{\text{потр}} = E_{п} * I_{кA},$$

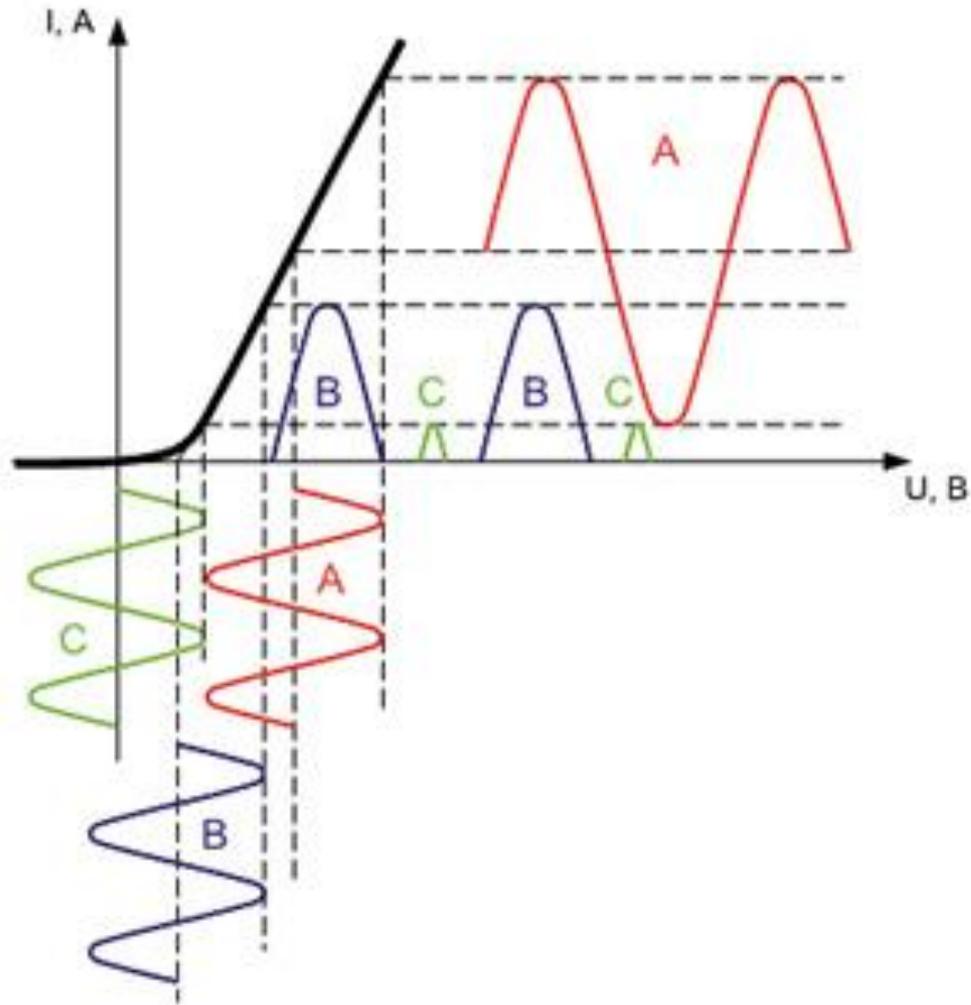
$$P_{н} = U * I = U_{м} * I_{м} / 2 =$$

$$= E_{п} / 2 * I_{кA},$$

$$\eta_{\text{пред}} = P_{н} / P_{\text{потр}} * 100\%$$

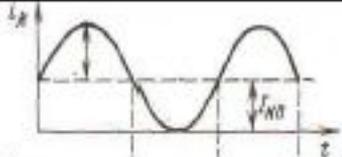
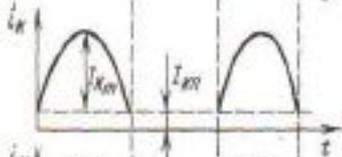
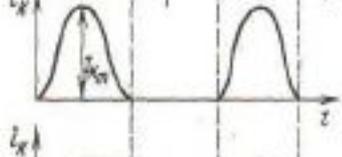
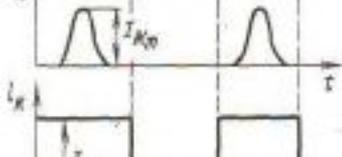
$$= 50\%$$

# Усилители мощности



## Усилители мощности

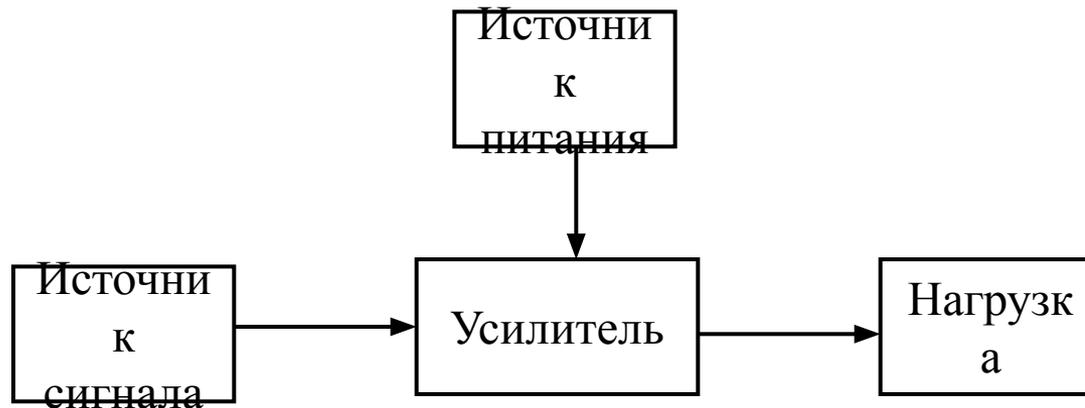
Основные параметры усилителей различных классов усиления

Класс усиления	Напряжение смещения	Ток покоя транзистора	Зависимость тока от времени	Примечание
А	$> 0$	$I_{бп} h_{21э}$		$I_{к м} < I_{кп}$
АВ	$> 0$	$I_{бп} h_{21э}$		$I_{к м} < I_{кп}$ $I_{к м} < U_{к}/R_{кп}$
В	$= 0$	$I_{к нач}$		$I_{к м} \leq U_{к}/R_{кп}$
С	$< 0$	$I_{к0}$		$I_{к м} \leq U_{к}/R_{кп}$
D	$< 0$	$I_{к0}$		$I_{к м} = U_{к}/R_{кп}$

Основные параметры транзисторного каскада для различных классов усиления сведены в таблицу.

# Общие свойства и параметры усилителей

- Усилителем электрических сигналов называют электронное устройство, предназначенное для усиления мощности электрических сигналов.
- В усилителе усиление мощности входного сигнала достигается за счёт мощности внешнего источника электрической энергии: аккумулятора, батарейки, солнечного элемента или энергии электрической сети переменного тока 220В с предварительным её преобразованием в энергию постоянного тока.

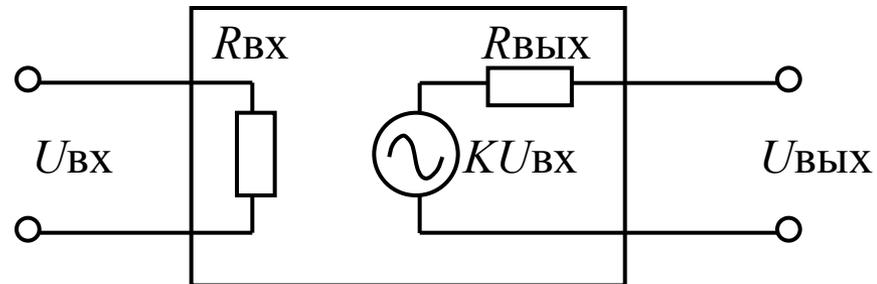
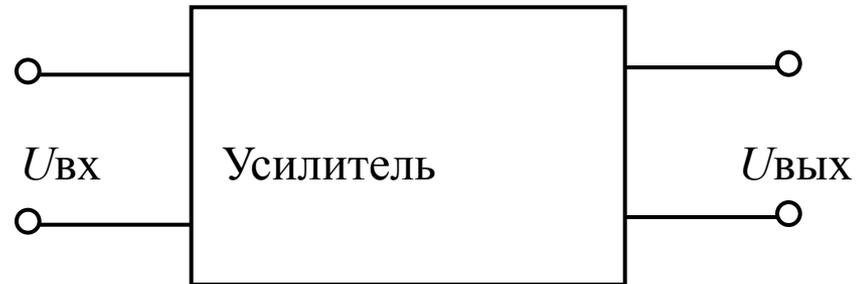


Блок – схема усиления сигнала



Рисунок отображающий принцип преобразования мощности источника питания

# Входное и выходное сопротивление



Эквивалентная линейная схема усилителя

- **Основные параметры:**

коэффициент усиления напряжения

$$K_U = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}};$$

коэффициент усиления тока

$$K_I = I_{\text{ВЫХ}} / I_{\text{ВХ}};$$

коэффициент усиления мощности

$$K_P = P_{\text{ВЫХ}} / P_{\text{ВХ}};$$

коэффициент полезного действия

$$\eta = P_{\text{Н}} / P_{\text{ПОТР}};$$

потребляемая мощность

$$P_{\text{ПОТР}};$$

входное сопротивление

$$R_{\text{ВХ}} = U_{\text{ВХ}} / I_{\text{ВХ}};$$

$$\underline{Z}_{\text{ВХ}} = \underline{U}_{\text{ВХ}} / \underline{I}_{\text{ВХ}};$$

выходное сопротивление

$$R_{\text{ВЫХ}} = U_{\text{ВЫХ. ХХ}} / I_{\text{ВЫХ. КЗ}};$$

диапазон усиливаемых частот

$$\Delta F = F_{\text{ВЧ}} - F_{\text{НЧ}};$$

коэффициент частотных искажений  $M_{\text{НЧ}} = |\underline{K}_{F_{\text{НЧ}}}| / K_{F_{\text{СЧ}}}$ ,  $M_{\text{ВЧ}} = |\underline{K}_{F_{\text{ВЧ}}}| / \underline{K}_{F_{\text{СЧ}}}$ ;

коэффициент нелинейных искажений

;

- **Основные характеристики:**

1. амплитудно – частотная (АЧХ) или логарифмическая амплитудно – частотная (ЛАЧХ);
2. фазо – частотная (ФЧХ);
3. амплитудная (АХ);
4. амплитудно – фазовая (АФХ);
5. переходная (ПХ);

**Амплитудно – частотная характеристика (АЧХ)** это зависимость модуля коэффициента усиления от частоты входного сигнала.

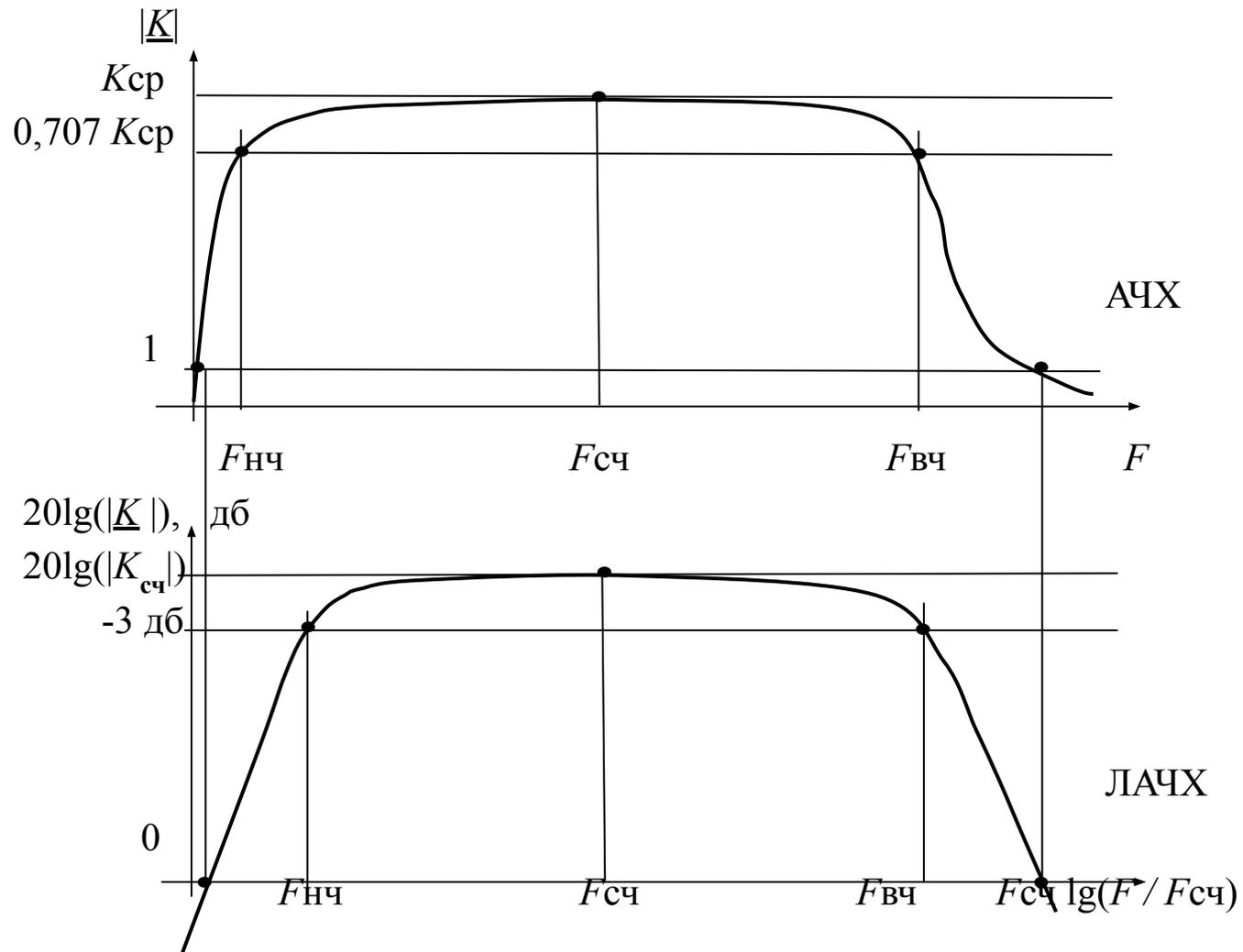
**Логарифмическая амплитудно – частотная характеристика(ЛАЧХ)** это зависимость десятичного логарифма модуля коэффициента усиления от десятичного логарифма частоты входного сигнала.

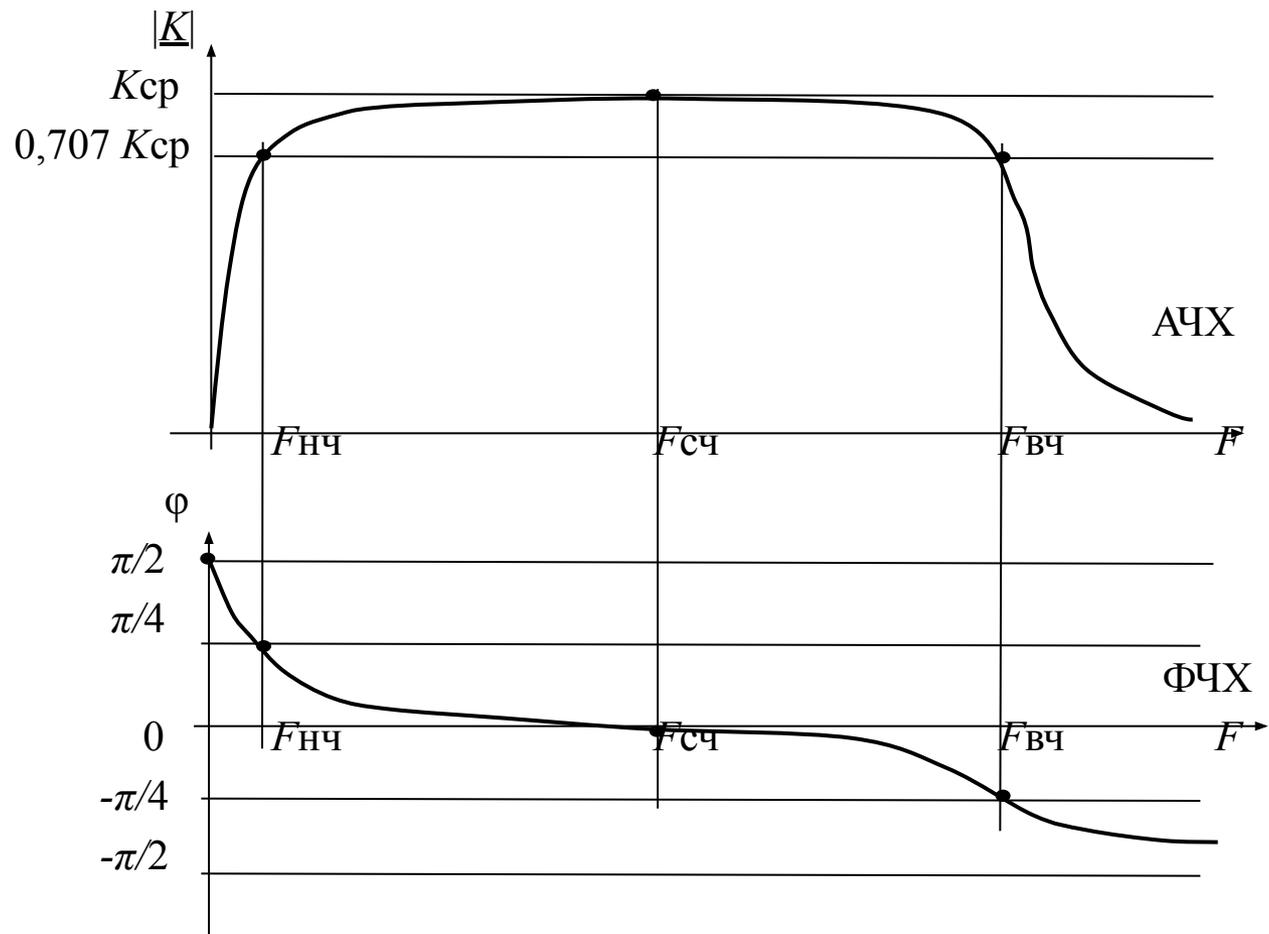
**Фазо – частотная характеристика (ФЧХ)** это зависимость разности начальных фаз выходного и входного напряжений от частоты входного сигнала.

**Полулогарифмическая фазо – частотная характеристика (ПЛФЧХ)** это зависимость разности начальных фаз выходного и входного напряжений от логарифма частоты входного сигнала.

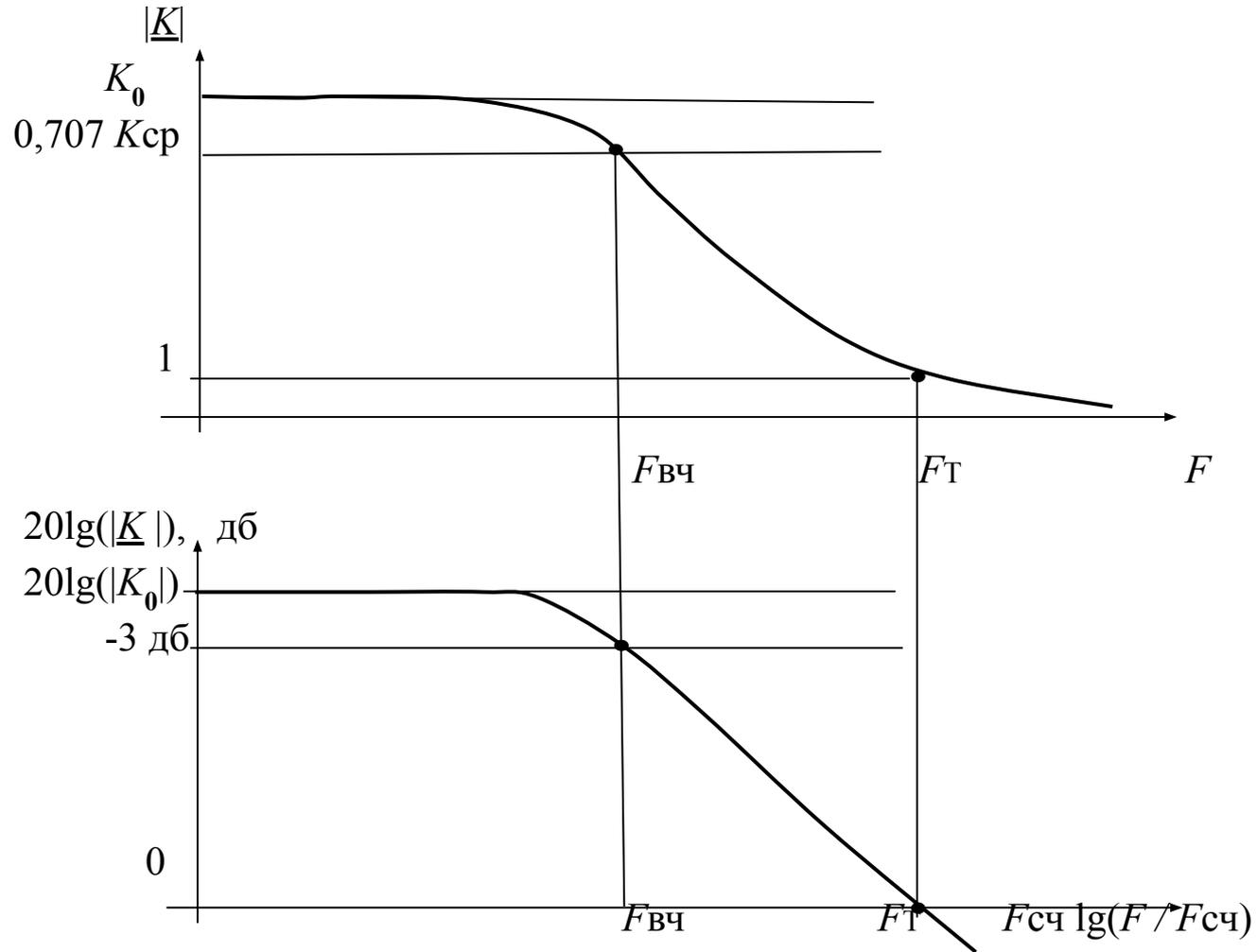
**Переходная характеристика** это зависимость выходного напряжения от времени при скачкообразном изменении входного напряжения.

**Амплитудная характеристика (АХ)** это зависимость амплитуды выходного напряжения от амплитуды входного напряжения.

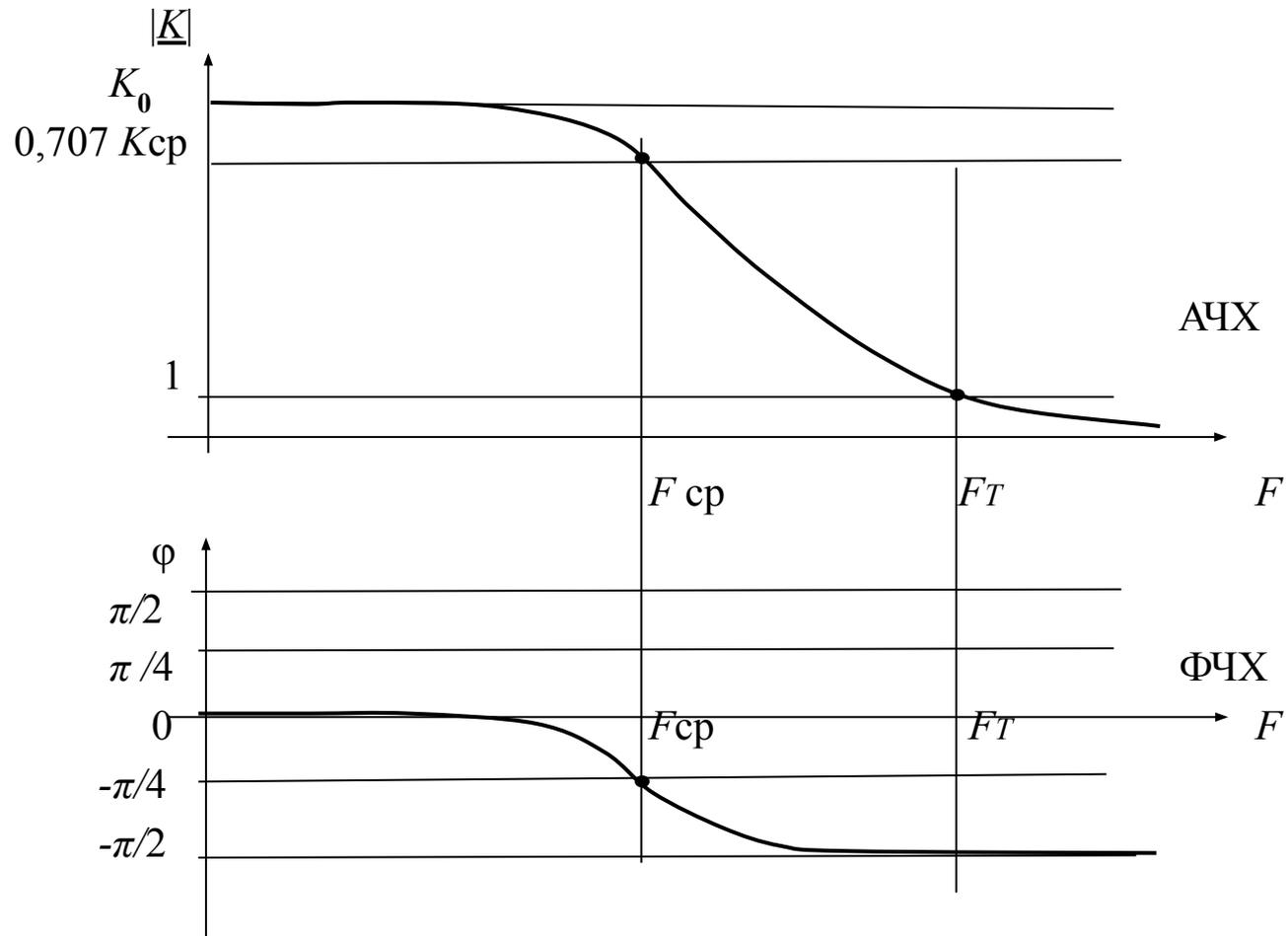




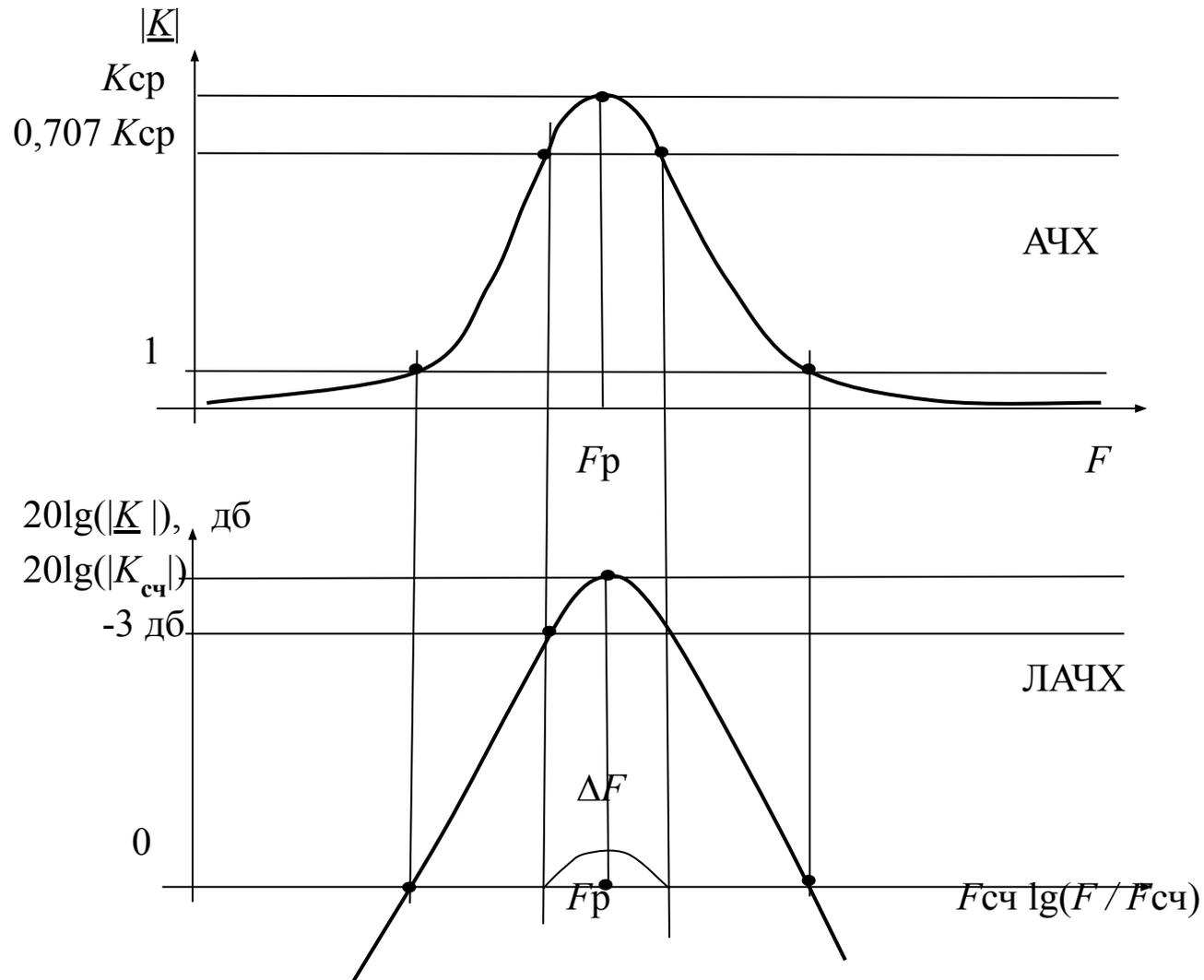
# Усилители ПТ



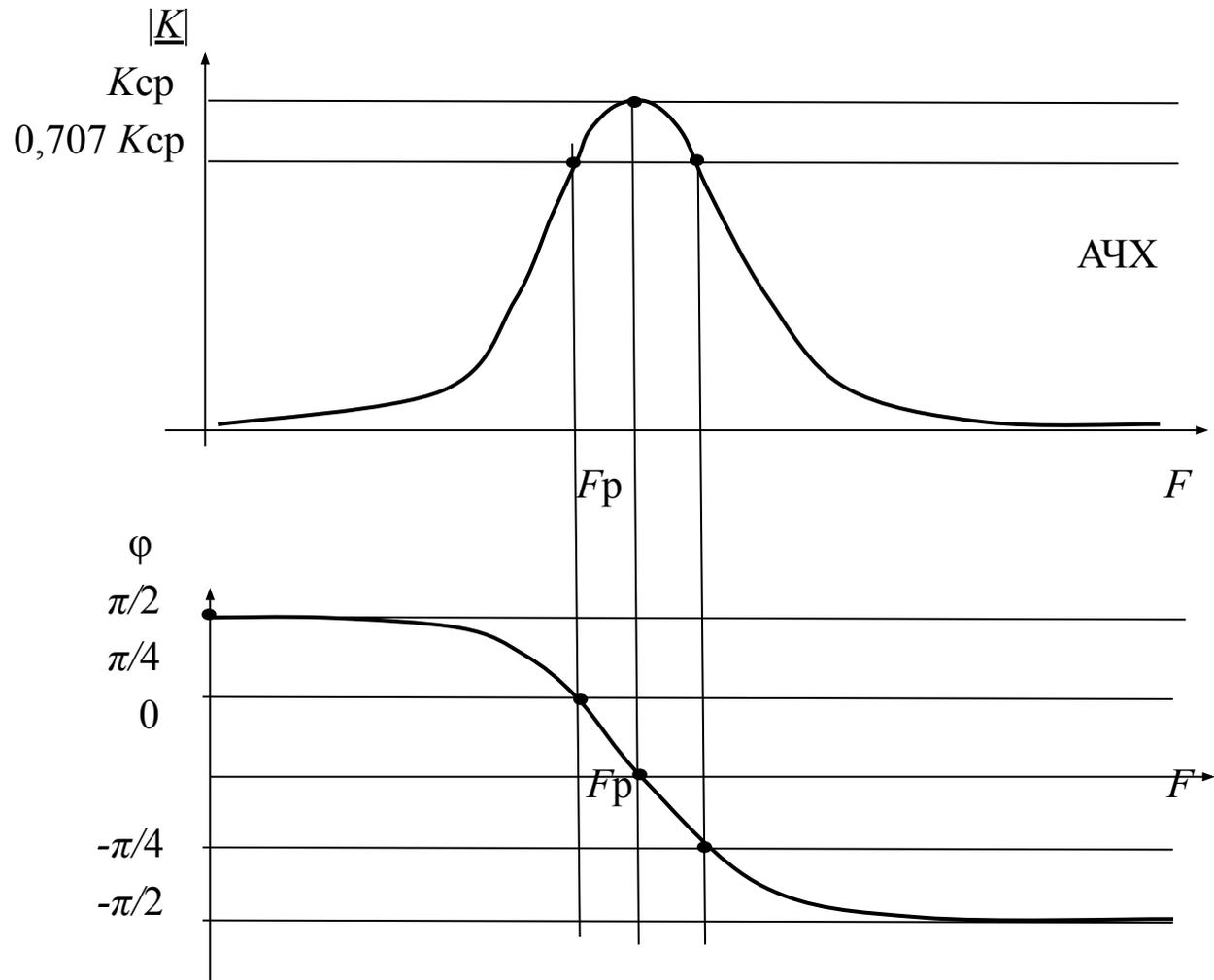
# Усилители ПТ



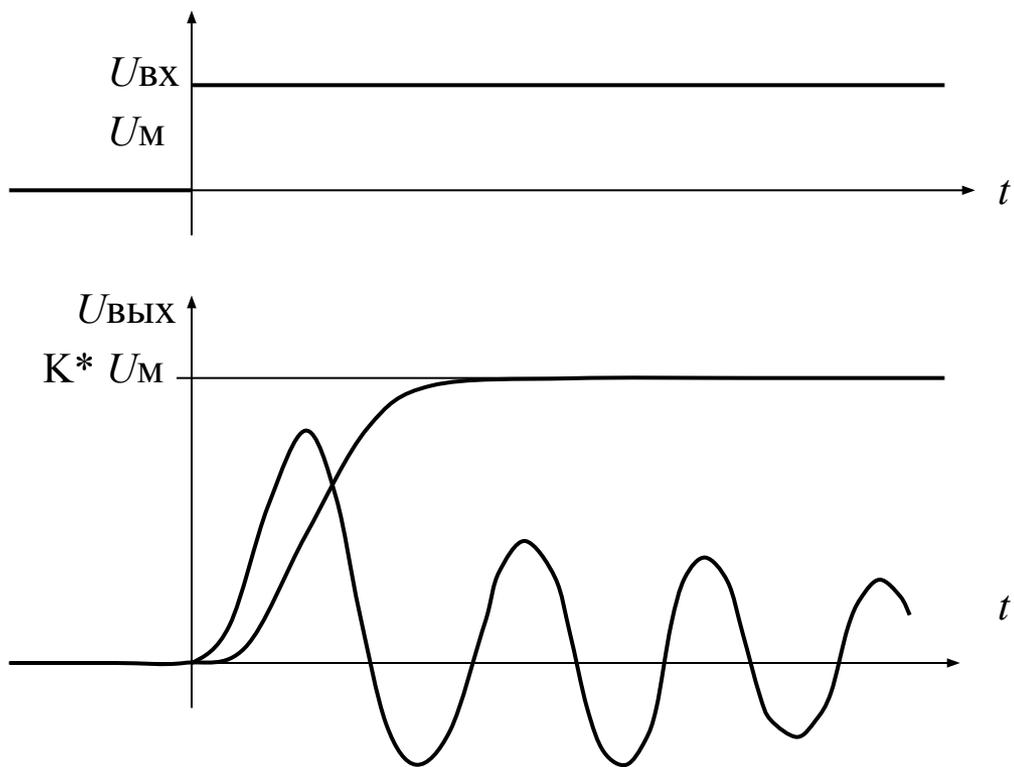
# Резонансные усилители



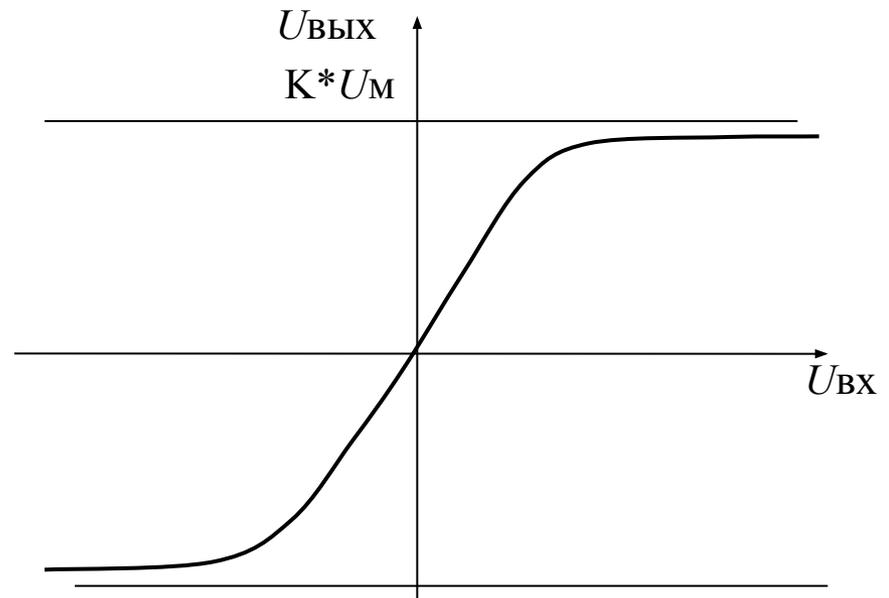
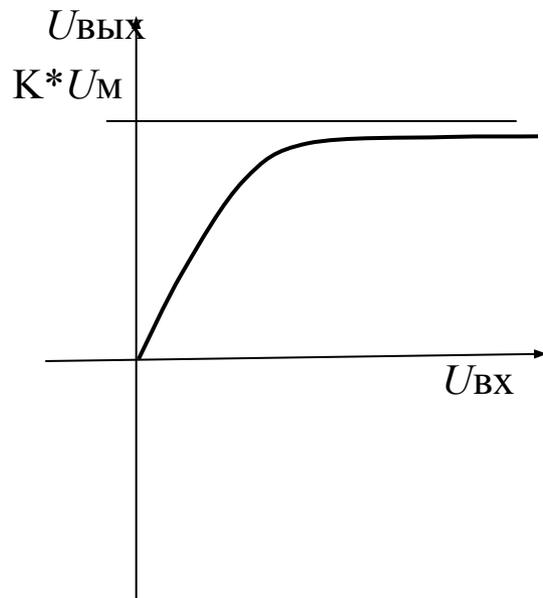
# Резонансные усилители



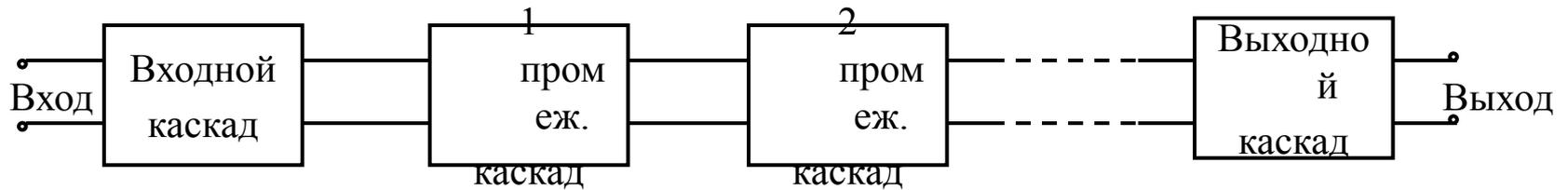
## Переходные характеристики усилителей



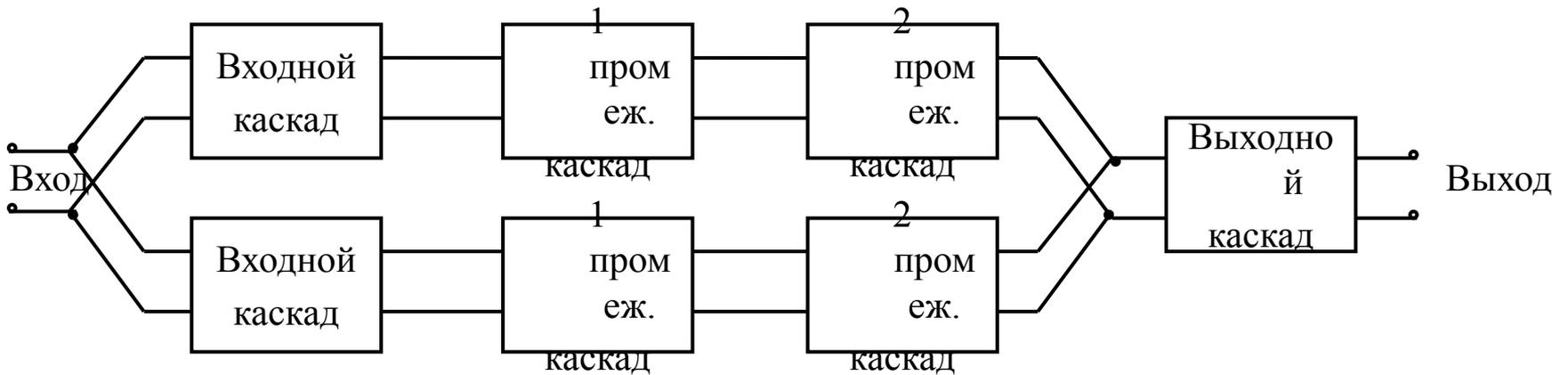
# Амплитудные характеристики усилителей



# Структурные схемы усилительных устройств

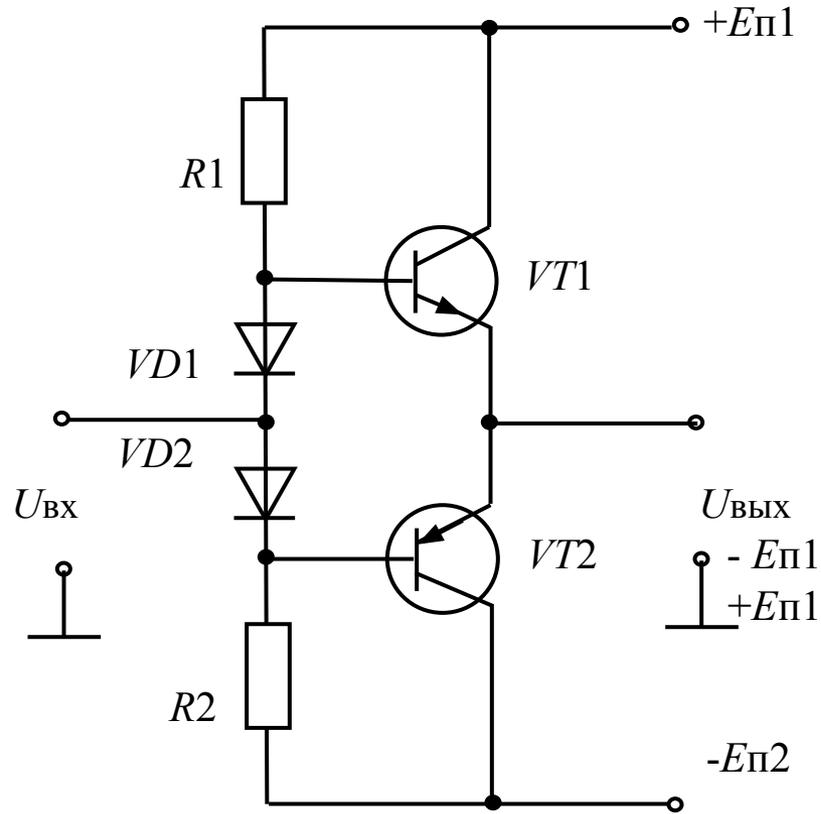


**Каскадная структура**

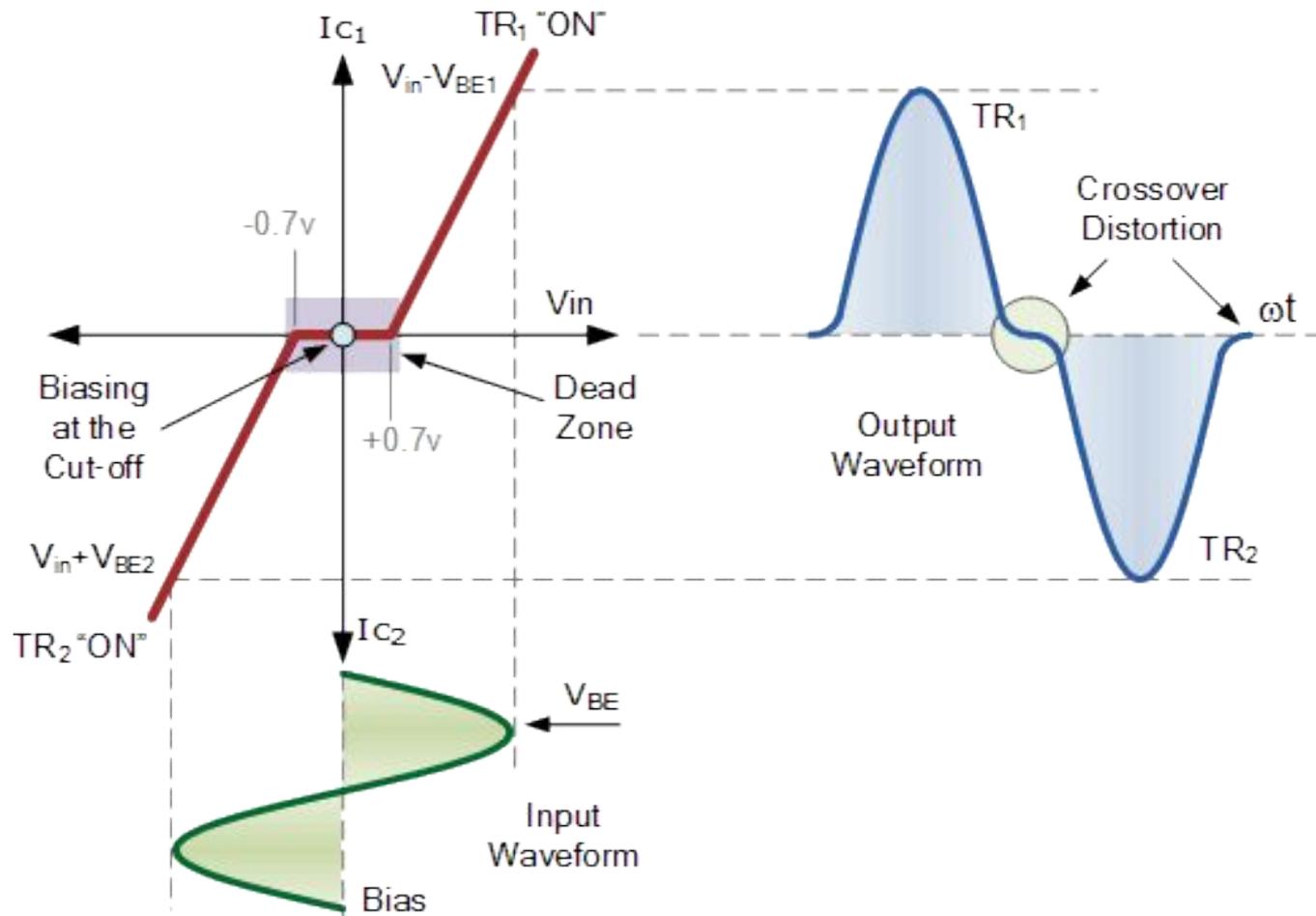


**Параллельно – последовательная структура**

## Усилители на комплементарных парах

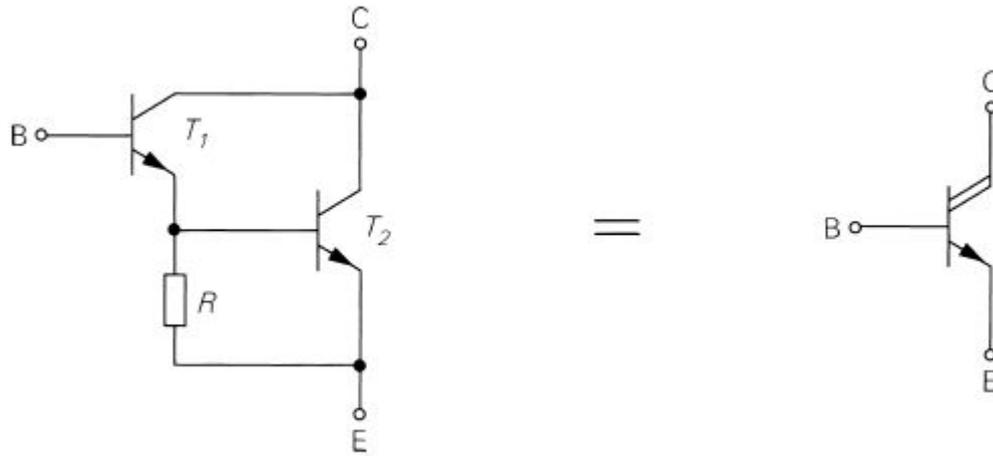


**Двухтактный УМ на комплементарных транзисторах**



# Составные транзисторы

## Схема Дарлингтона



$$\beta = \beta_1 \beta_2$$

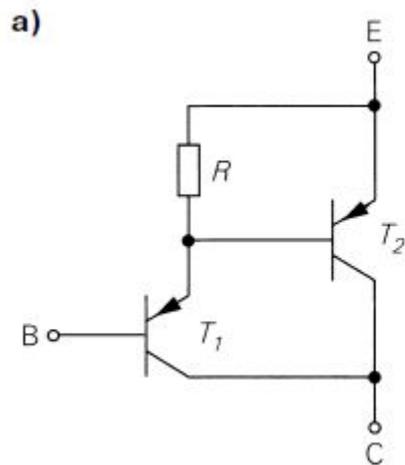
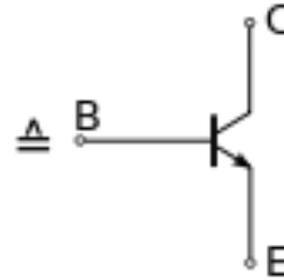
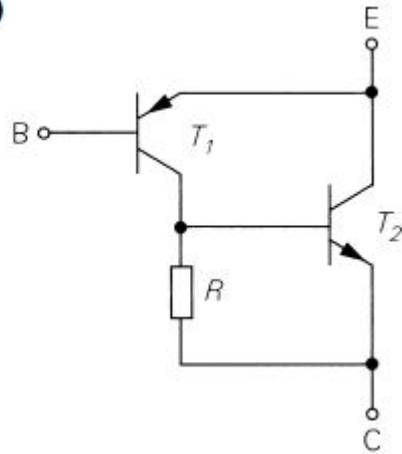
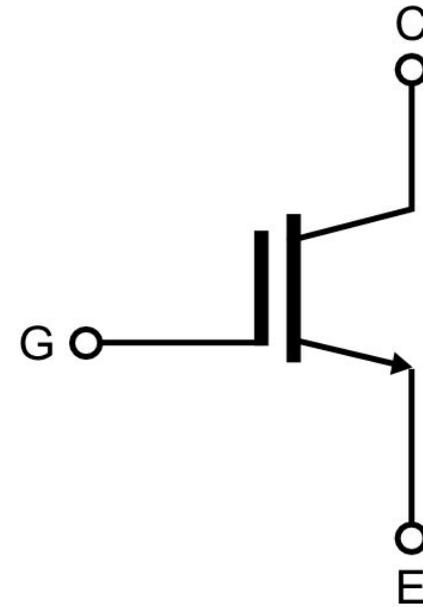
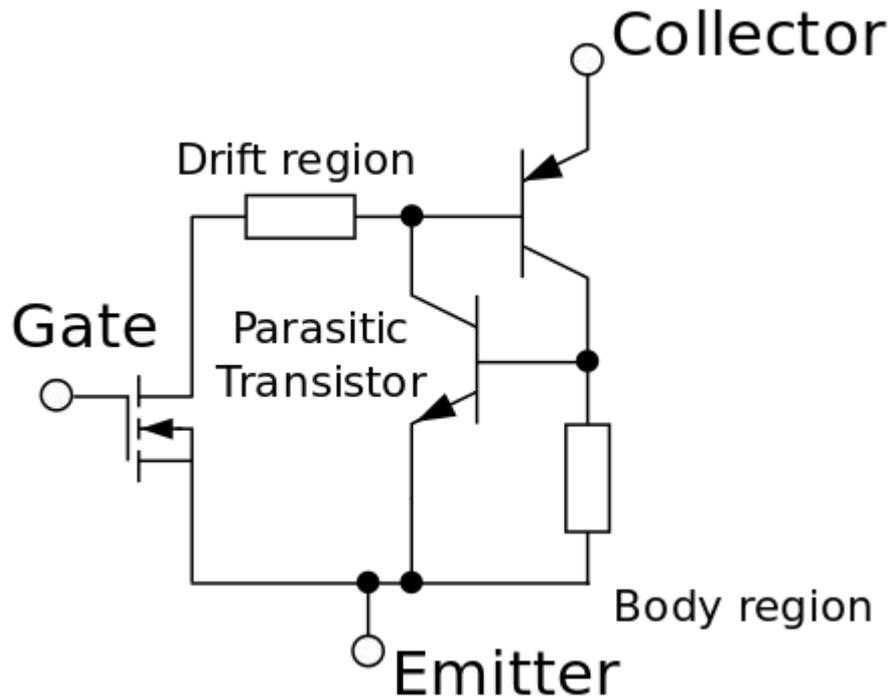


Схема Шиклаи (на комплементарной паре)

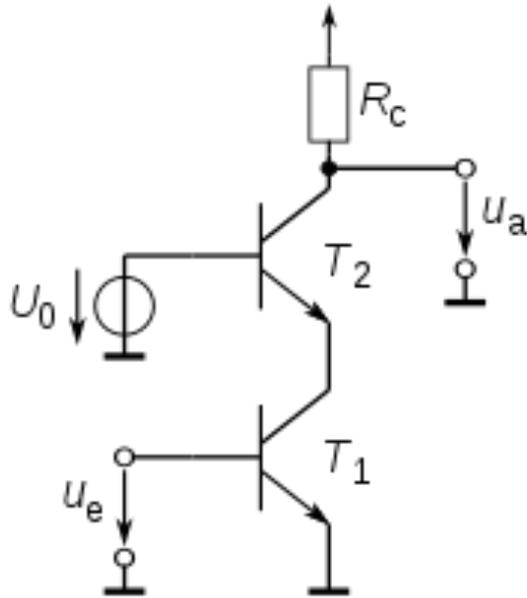
б)



Биполярный транзистор с изолированным затвором



## Каскодная схема



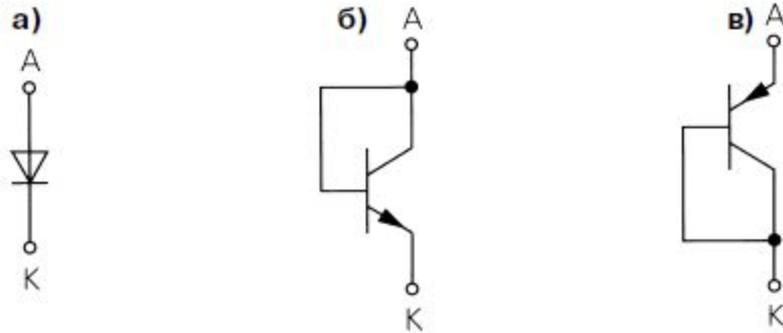
Каскодный усилитель содержит два активных трёхэлектродных элемента, первый из которых для малого сигнала включен по схеме с общим эмиттером (исток — для полевых транзисторов), а второй — по схеме с общей базой (затвором).

Каскодный усилитель обладает повышенной стабильностью работы и малой входной и проходной ёмкостью, расширенной полосой усиливаемых частот.

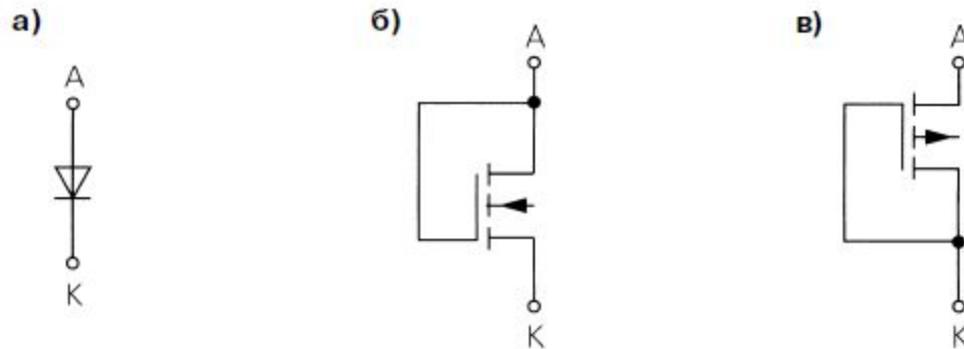
Название усилителя, произошло со времён ламповой схемотехники от соединения частей слов из словосочетания «КАСКад через катОД» (англ. "CASCade to cathODE"). Иногда каскодный усилитель называют просто «каскод».

Поскольку входное сопротивление каскада с ОБ пренебрежимо мало по сравнению с выходным сопротивлением предыдущего каскада с ОЭ, то можно считать, что каскад ОЭ (в цепь коллектора которого включён эмиттер каскада ОБ) работает в режиме короткого замыкания на выходе для малого сигнала. При этом каскод усилитель обеспечивает усиление как идеализированный каскад ОЭ, в котором этот воображаемый транзистор имеет очень большое выходное коллекторное сопротивление, иначе говоря, коэффициент усиления каскода при прочих равных условиях выше, чем у реального каскада ОЭ, причём коэффициент усиления по напряжению увеличивается при увеличении коллекторного резистора и максимален при применении в качестве коллекторного резистора какого-либо электронного генератора тока, например, токового зеркала

# Транзисторы в диодном включении

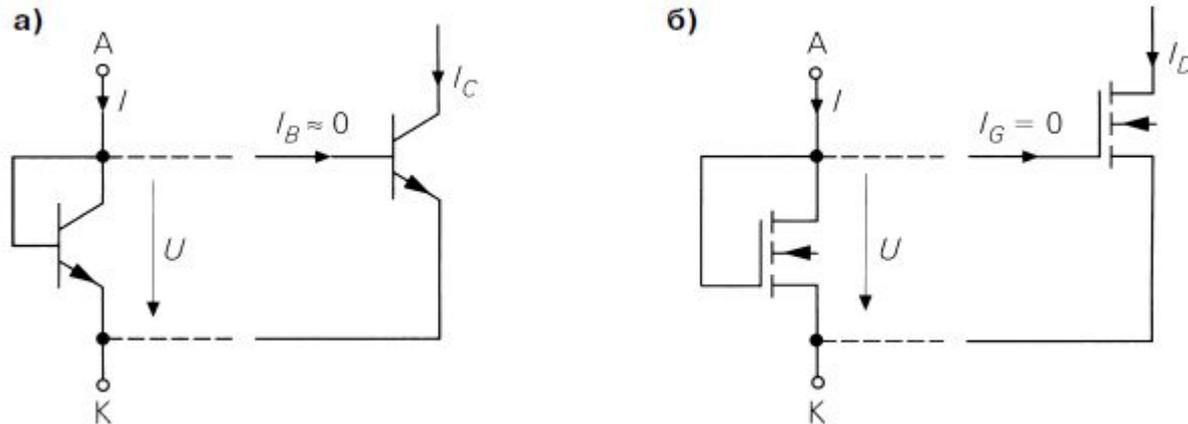


Биполярные диоды в интегральных схемах: а – обычный диод; б – п-р-п диод; в – р-п-р диод



Полевые диоды в интегральных схемах: а – обычный диод; б – п-канальный диод; в – р-канальный диод

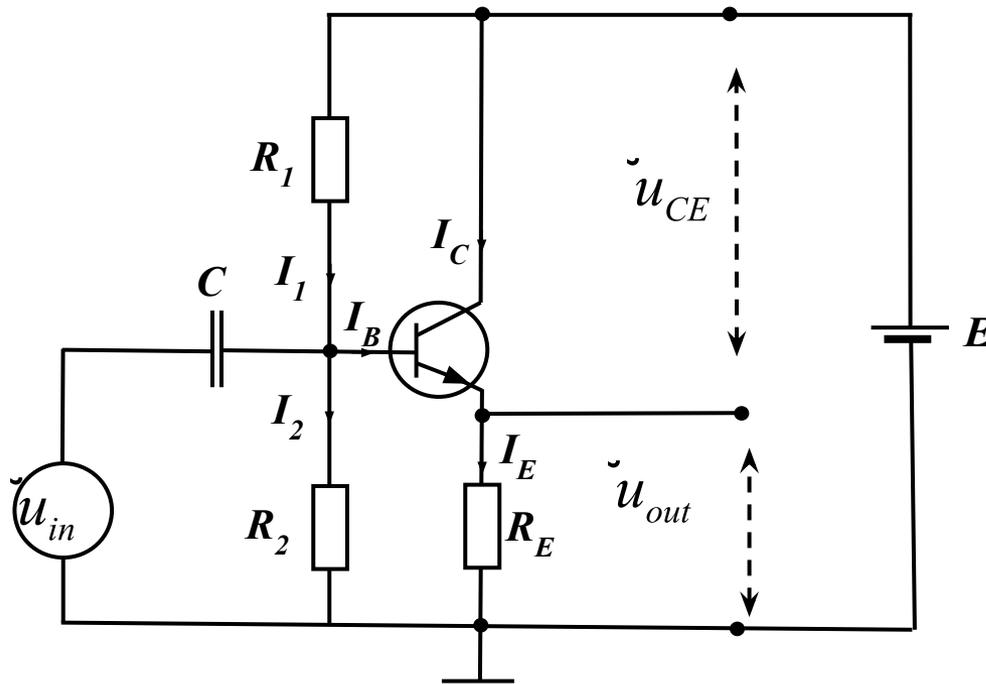
# Преобразование тока в напряжение с последующим масштабированием тока



$$I = I_{S,D} \left( e^{\frac{U}{U_T}} - 1 \right) \Rightarrow U = U_T \ln \left( \frac{I}{I_{S,D}} + 1 \right) \stackrel{I \gg I_{S,D}}{\approx} U_T \ln \frac{I}{I_{S,D}},$$

$$I_C \approx I_{S,T} e^{\frac{U_{BE}}{U_T}} \stackrel{U_{BE}=U}{=} I_{S,T} e^{\ln \frac{I}{I_{S,D}}} = I \frac{I_{S,T}}{I_{S,D}}.$$





$$R_{out} \approx R_E \approx \text{кОм} \quad \boxtimes \quad 1$$

$$R_{in} \approx \beta R_E$$

$$R_{in} \approx 10 \text{ кОм} \quad \text{кОм} 100$$

$$\frac{R_{in}}{R_{out}} \approx \beta$$

# Усилители постоянного тока.

## Операционные усилители

- **Операционными называют (ОУ) усилители постоянного тока с большим коэффициентом усиления, способными работать с глубокой обратной связью.**
- **Ранее ОУ использовались в аналоговых вычислительных машинах для выполнения математических операций над входными сигналами: интегрирования, дифференцирования, сложения, умножения и др.**
- **Первые ОУ выполнялись на электровакуумных лампах: триодах и пентодах, затем, с появлением полупроводниковых приборов, на транзисторах. Сегодня ОУ выполняются в интегральном исполнении на одном кристалле полупроводника и содержат на нём десятки транзисторов.**
- **Современные ОУ выполняются в дифференциальном исполнении, т. е. имеют два входа: инвертирующий и неинвертирующий.**
- **Некоторые из ОУ обладают одновременно большим входным сопротивлением по неинвертирующему входу и малым – по инвертирующему входу.**
- **Выпускаются ОУ с малым выходным сопротивлением или, наоборот, с большим выходным сопротивлением.**

# Операционные усилители

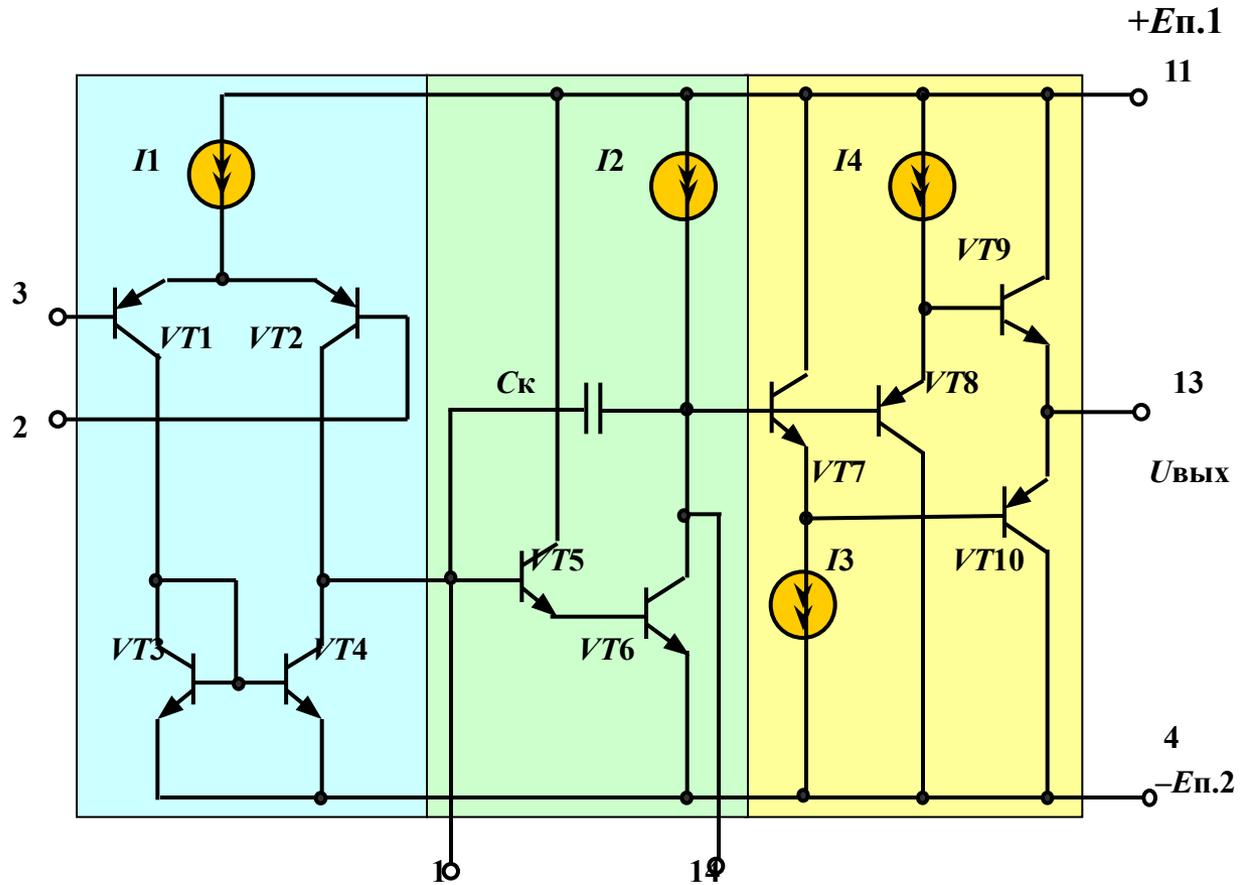
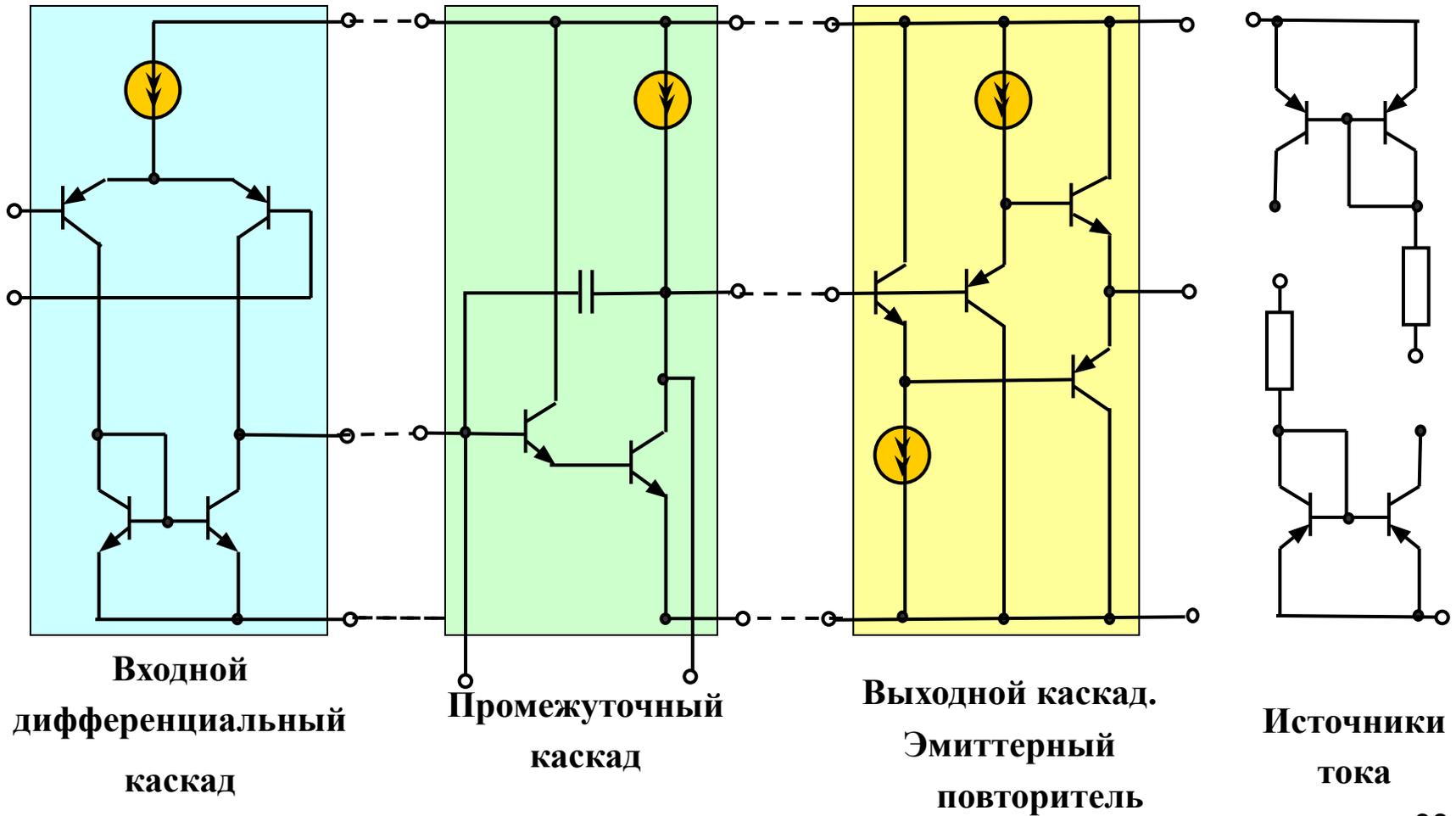


Схема принципиальная электрическая ОУ типа К157УД2

# Операционные усилители



## Операционные усилители

- Дифференциальный коэффициент усиления  $K_{\text{диф}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх}} (>1000)$ .
- Дифференциальное входное сопротивление  $R_{\text{вх}} = U_{\text{вх}} / I_{\text{вх}} (>10 \text{ кОм})$ .
- Входной ток  $I_{\text{вх}} (10 - 0,001 \text{ мкА})$ .
- Разность входных токов  $\Delta I_{\text{вх}} = 0,1 I_{\text{вх}}$ .
- Напряжение смещения нуля  $U_{\text{см}} (10 - 0,001 \text{ мВ})$ .
- Температурный дрейф смещения нуля  $\Delta U_{\text{см}} / 1^\circ \text{C} (10 - 0,001 \text{ мкВ} / 1^\circ \text{C})$ .
- Граничная частота (частота единичного усиления)  $f_{\text{гр}} (1-100 \text{ МГц})$ .
- Скорость нарастания выходного напряжения  $\Delta U_{\text{вых}} / \Delta t (0,1-3000 \text{ В} / \text{мкс})$
- Коэффициент подавления синфазного сигнала  $K_{\text{синф}} = U_{\text{вых}} / U_{\text{вх синф}} (80 - 160 \text{ дБ})$ .
- Напряжение питания ( $\pm (3 - 15) \text{ В}$ ).
- Потребляемый ток (1-10 мА).

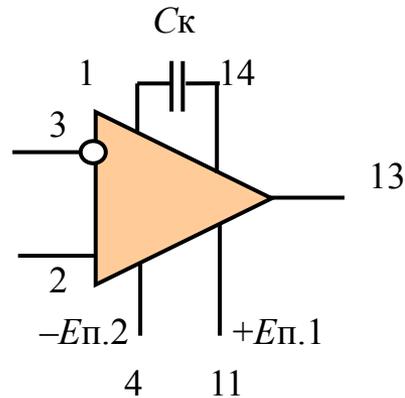
## Операционные усилители

### Идеальный операционный усилитель

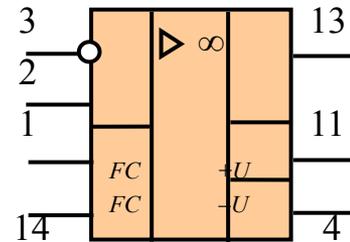
1. Бесконечно большое входное сопротивление.
2. Бесконечно малое выходное сопротивление
3. Бесконечно большой коэффициент усиления

# Операционные усилители.

## Условно – графическое изображение



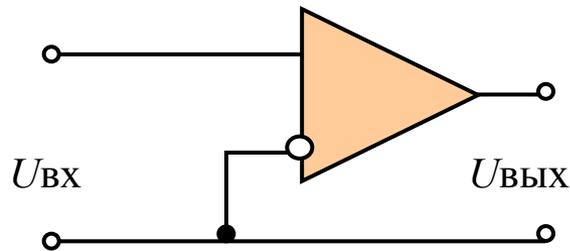
а)



б)

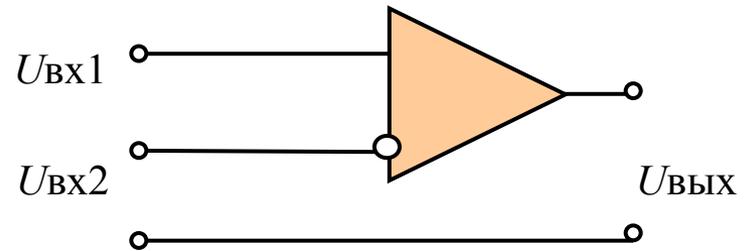
Условное изображение ОУ типа К157УД2А на рисунках (а)  
и чертежах (б)

# Операционные усилители. Схемы включения



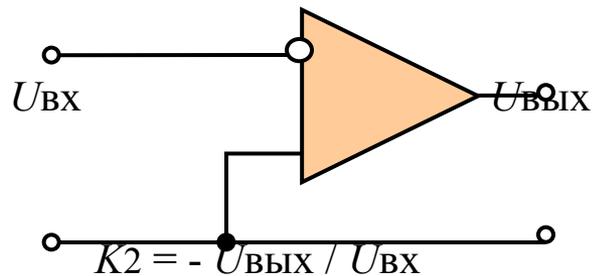
$$K_1 = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$$

Неинвертирующее включение



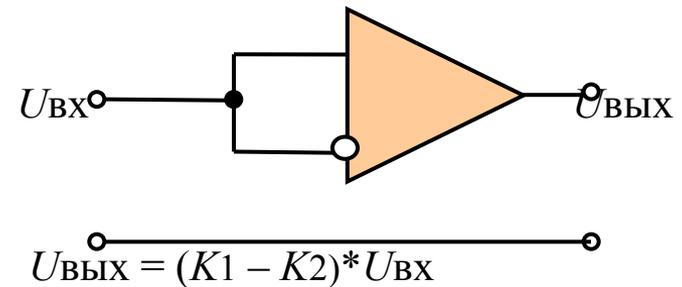
$$U_{\text{ВЫХ}} = K_1 * U_{\text{ВХ1}} - K_2 * U_{\text{ВХ2}}$$

Дифференциальное включение



$$K_2 = - U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ}}$$

Инвертирующее включение

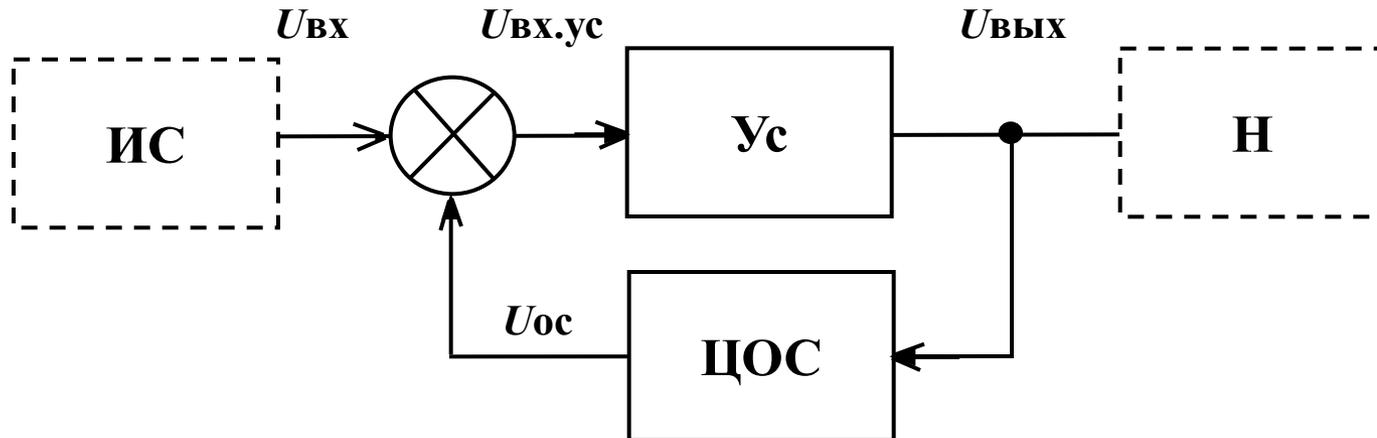


$$U_{\text{ВЫХ}} = (K_1 - K_2) * U_{\text{ВХ}}$$

Синфазное включение

## Обратная связь в усилителях

Обратная связь – это явление передачи выходного сигнала или его части на вход усилителя для улучшения или изменения его параметров и характеристик в нужном направлении.



$$U_{\text{ВЫХ}} = K_{\text{ОС}} \cdot U_{\text{ВХ}},$$

$$K = U_{\text{ВЫХ}} / U_{\text{ВХ.УС}},$$

$$\beta = U_{\text{ОС}} / U_{\text{ВЫХ}}$$

$$U_{\text{ВХ.УС}} = U_{\text{ВХ}} \pm U_{\text{ОС}}$$

$$K_{\text{ОС}} = K / (1 \pm K \cdot \beta)$$

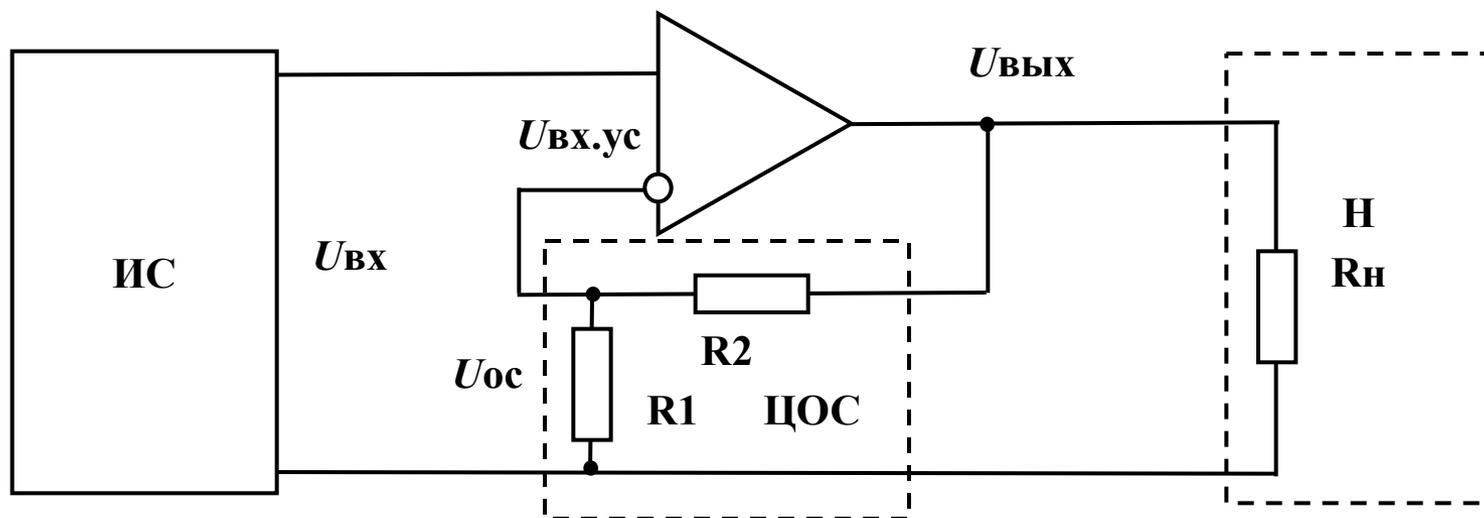
$$K_{\text{ОС}} = K / (1 + K \cdot \beta)$$

$$K_{\text{ПОС}} = K / (1 - K \cdot \beta)$$

$$F = 1 + K \cdot \beta \text{ – глубина ООС}$$

$$T = K \cdot \beta \text{ – петлевое усиление}$$

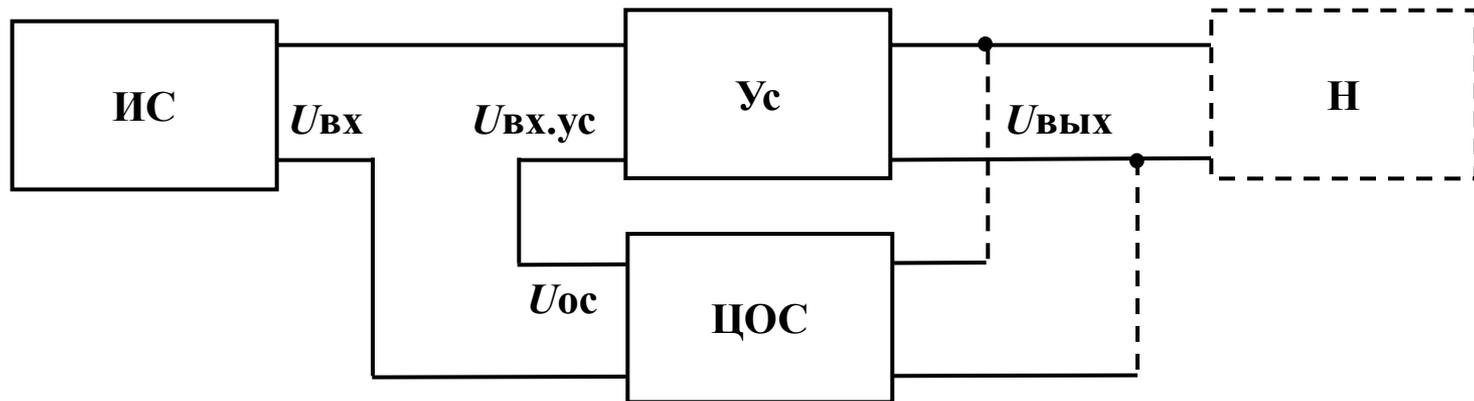
## Обратная связь в усилителях Пример введения ООС



$$\beta = R1 / (R1+R2),$$

$$K_{ос} = K / (1 + K \cdot \beta) = K (R1+R2) / (R2+R1(1+K)) \approx (R1+R2) / R1$$

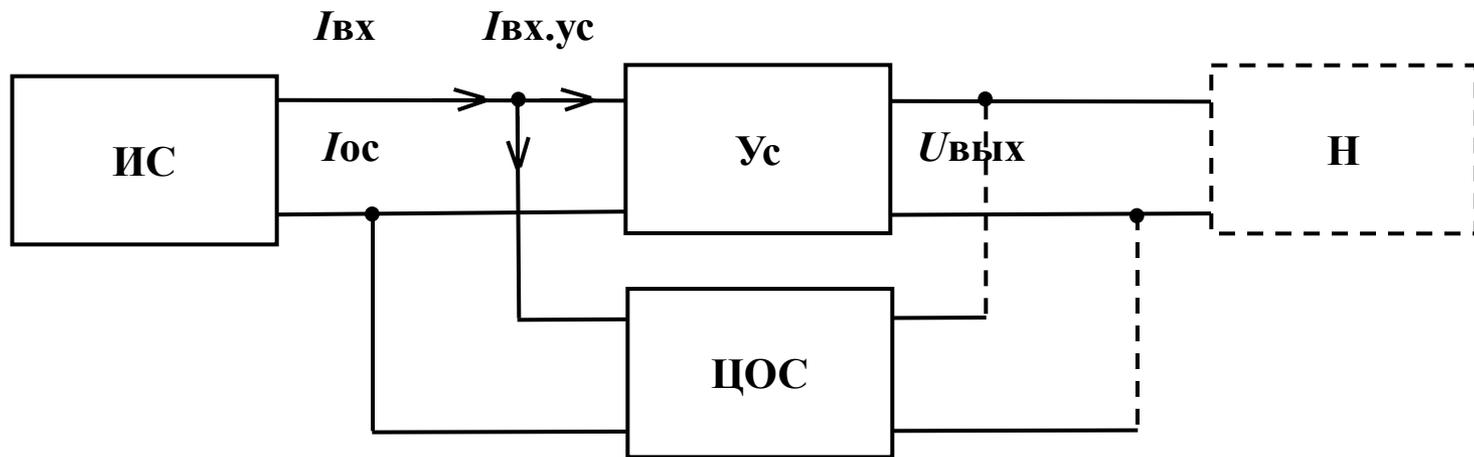
## Обратная связь в усилителях. Введение сигнала ОС на вход усилителя



$$U_{ВХ} - U_{ос} = U_{ВХ.ус}$$

Последовательная ООС

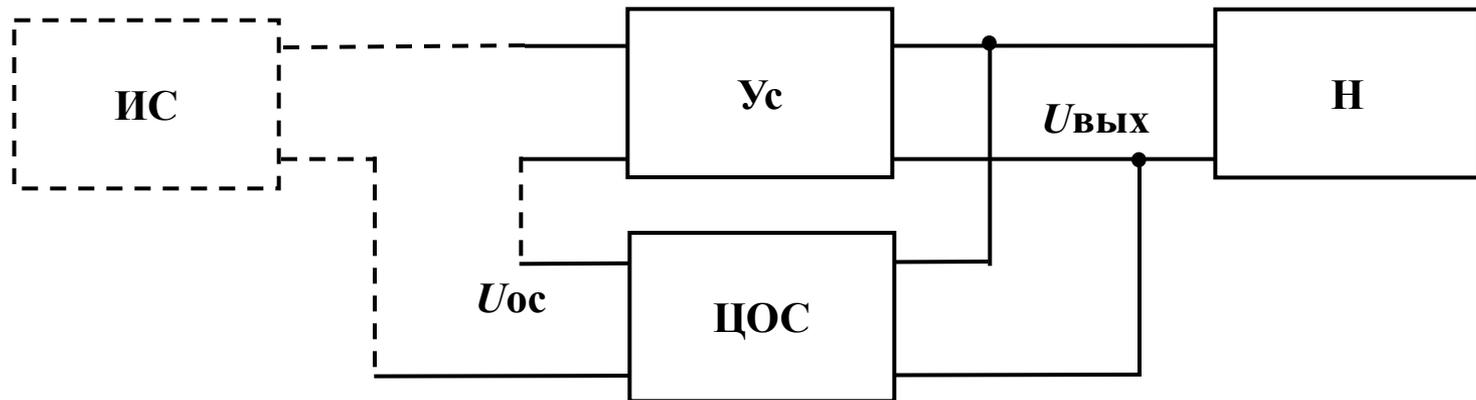
## Обратная связь в усилителях. Введение сигнала ОС на вход усилителя



$$I_{вх} - I_{ос} = I_{вх.ус}$$

Параллельная ООС

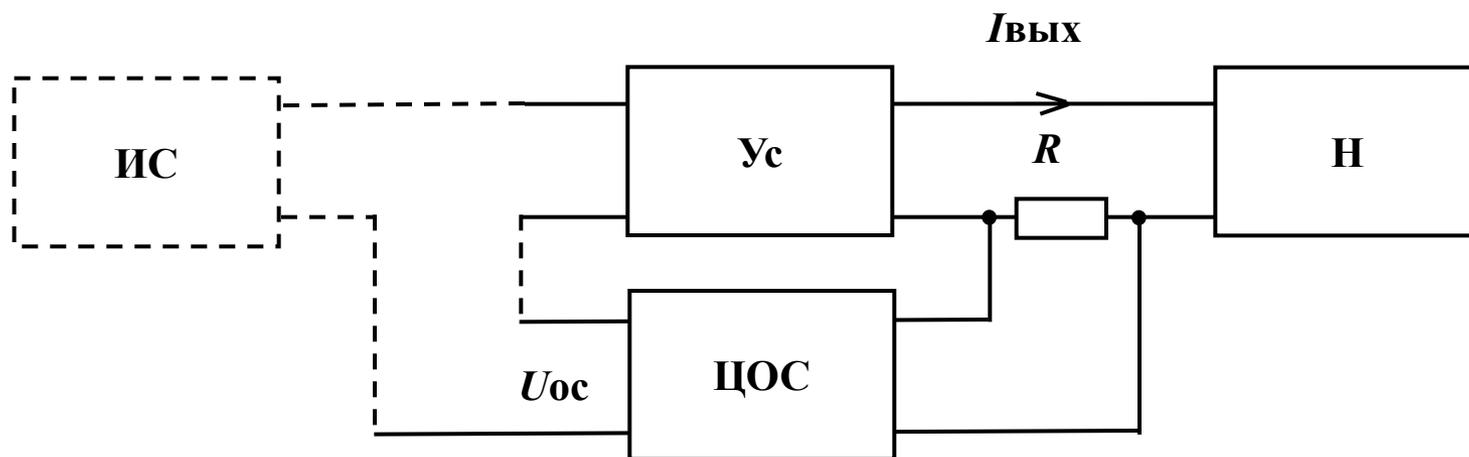
# Обратная связь в усилителях. Получение сигнала ОС на выходе усилителя



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

ООС по выходному напряжению

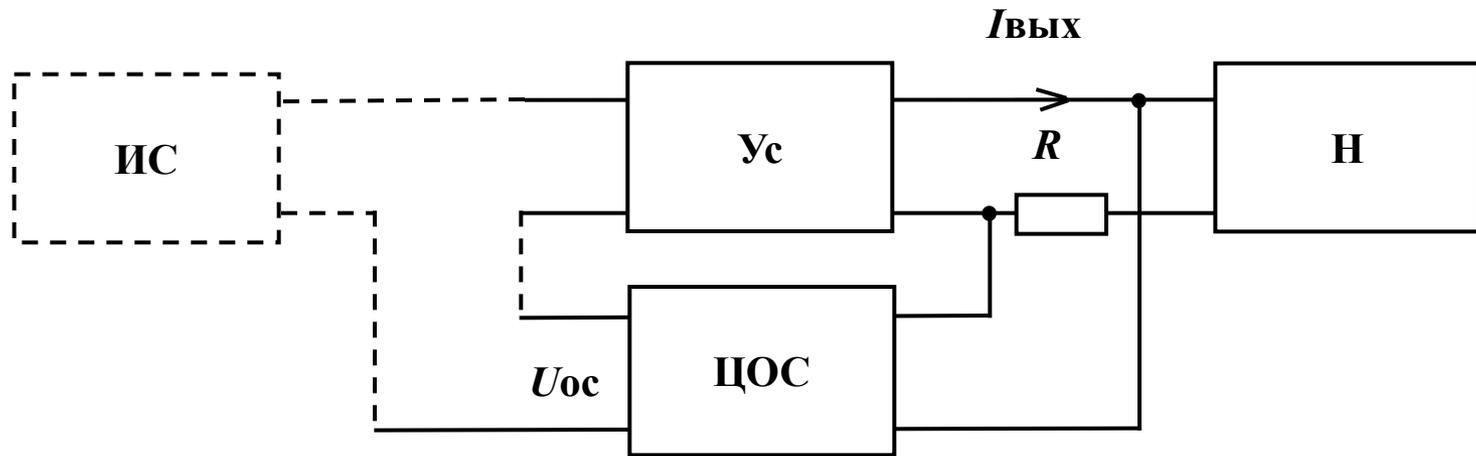
## Обратная связь в усилителях. Получение сигнала ОС на выходе усилителя



$$U_{ос} = \beta \cdot I_{вых} \cdot R$$

ООС по выходному току

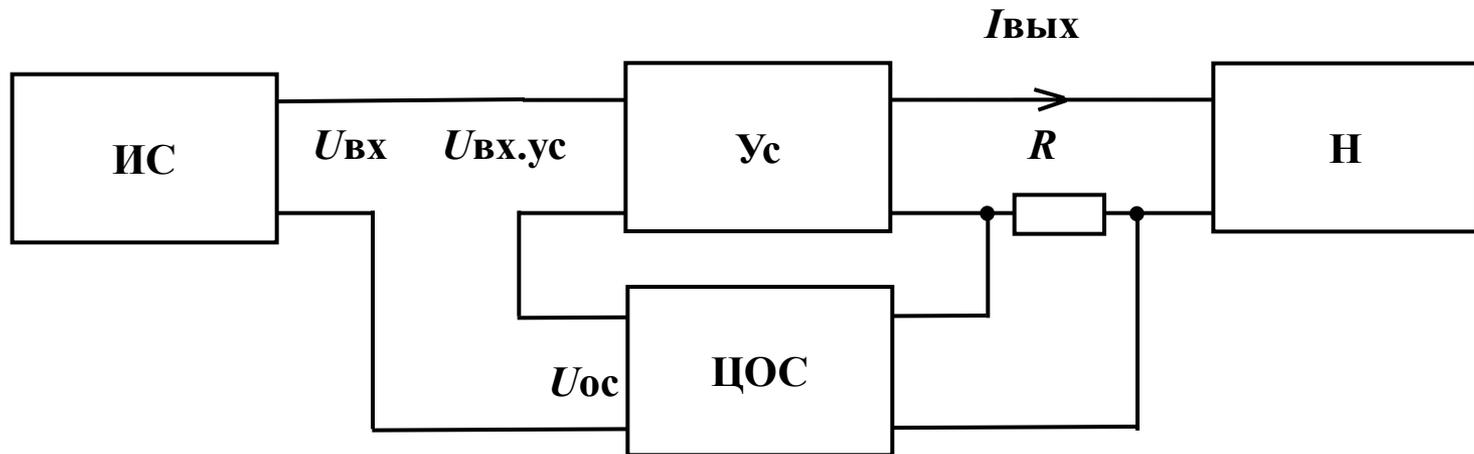
## Обратная связь в усилителях. Получение сигнала ОС на выходе усилителя



$$U_{\text{ОС}} = \beta \cdot (U_{\text{ВЫХ}} + I_{\text{ВЫХ}} \cdot R)$$

Комбинированная ООС по выходному току и выходному напряжению

## Обратная связь в усилителях. Название усилителя с ООС

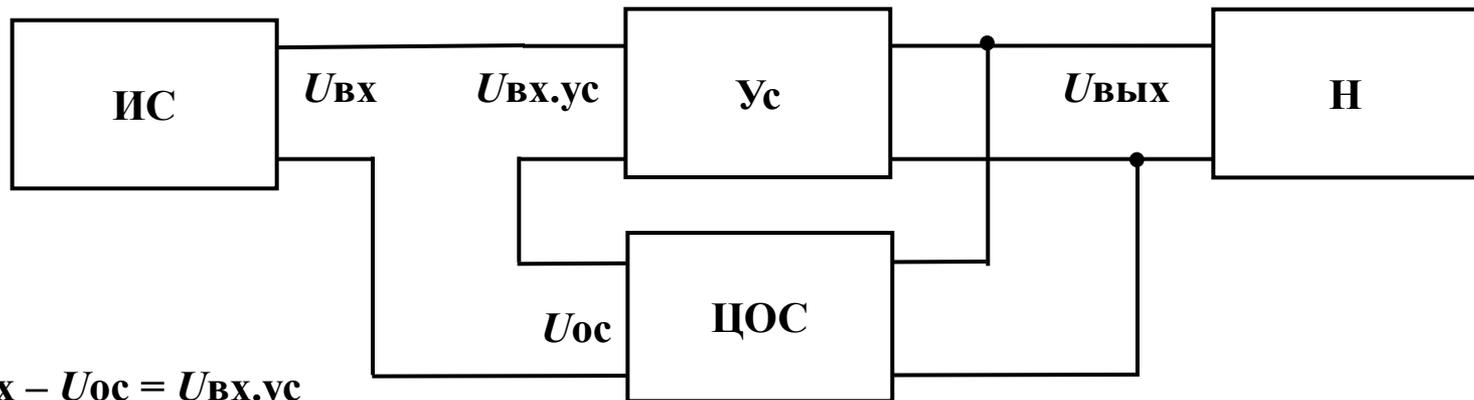


$$U_{вх} - U_{ос} = U_{вх.ус}$$

$$U_{ос} = \beta \cdot I_{вых} \cdot R$$

Усилитель с последовательной ООС по выходному току

## Обратная связь в усилителях. Название усилителя с ООС

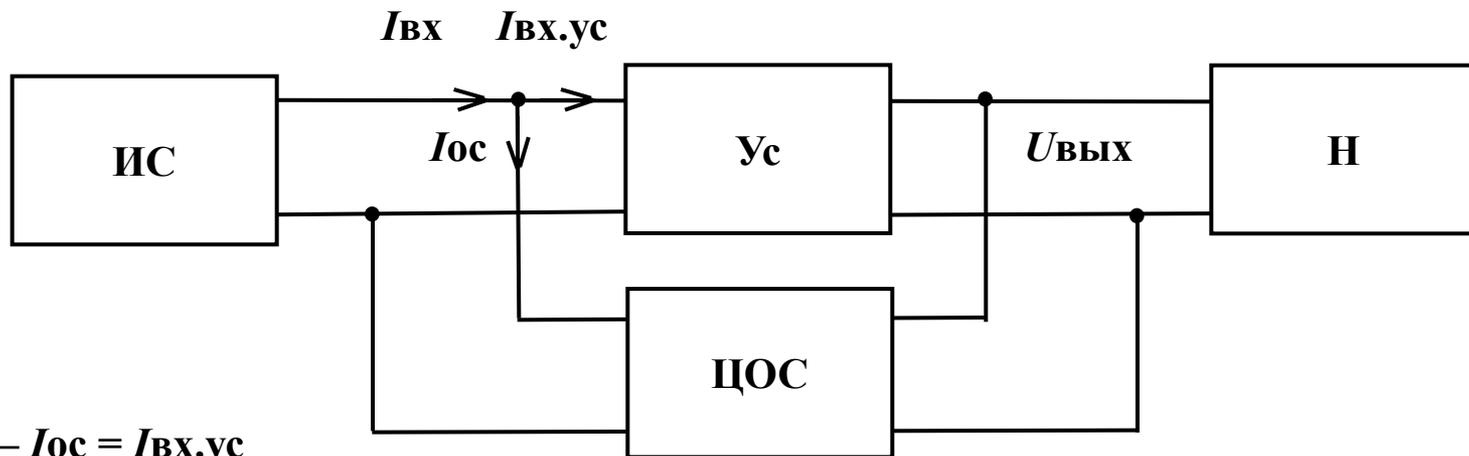


$$U_{вх} - U_{ос} = U_{вх.ус}$$

$$U_{ос} = \beta \cdot U_{вых}$$

**Усилитель с последовательной ООС по выходному напряжению**

## Обратная связь в усилителях. Название усилителя с ООС

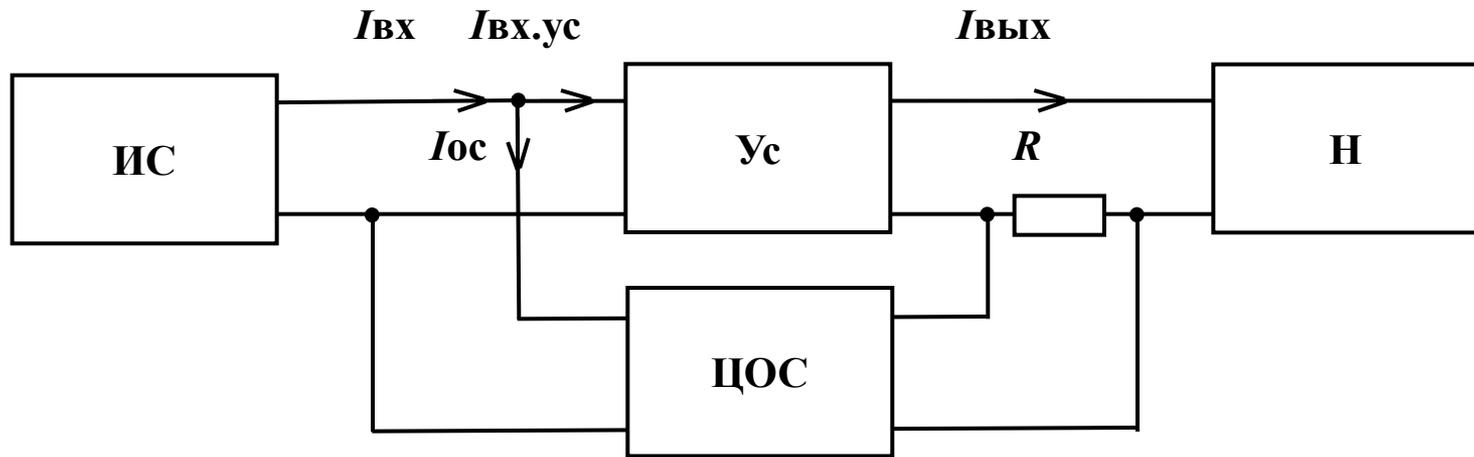


$$I_{\text{вх}} - I_{\text{ос}} = I_{\text{вх.ус}}$$

$$I_{\text{ос}} = \beta g \cdot U_{\text{вых}}$$

Усилитель с параллельной ООС по выходному напряжению

# Обратная связь в усилителях. Название усилителя с ООС



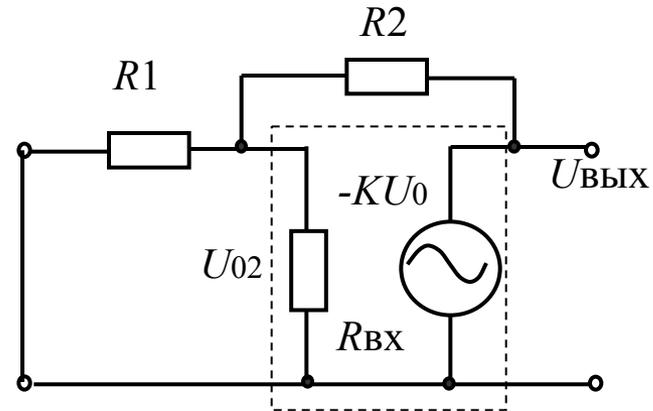
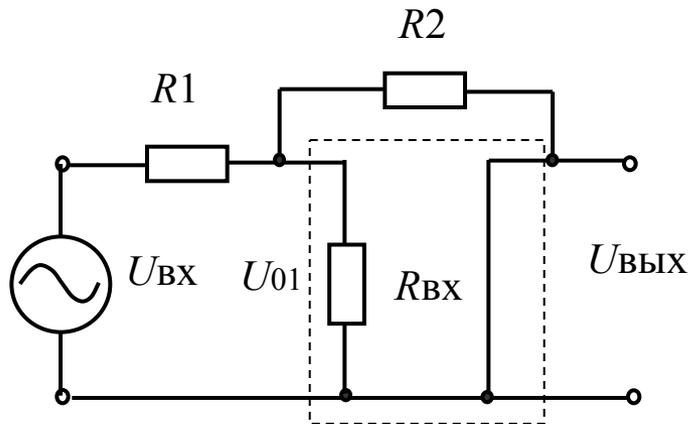
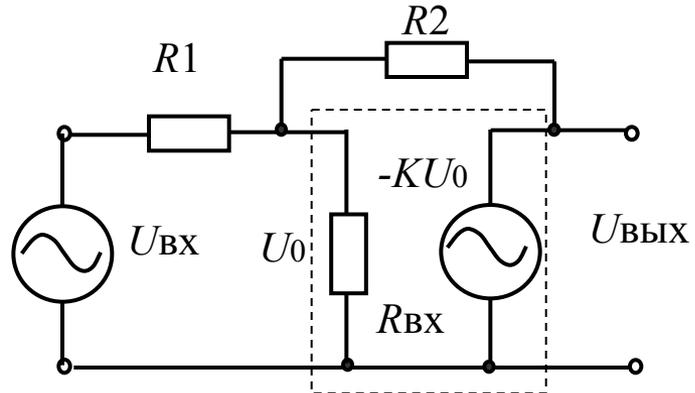
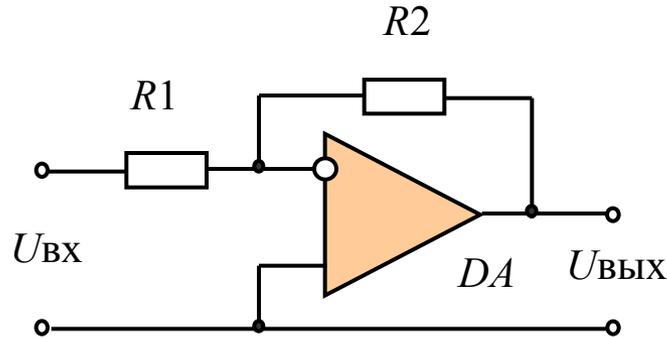
$$I_{вх} - I_{ос} = I_{вх.ус}$$

$$I_{ос} = \beta g \cdot R \cdot I_{вых}$$

Усилитель с параллельной ООС по выходному току

# Линейные функциональные устройства на ОУ.

## Инвертирующий усилитель



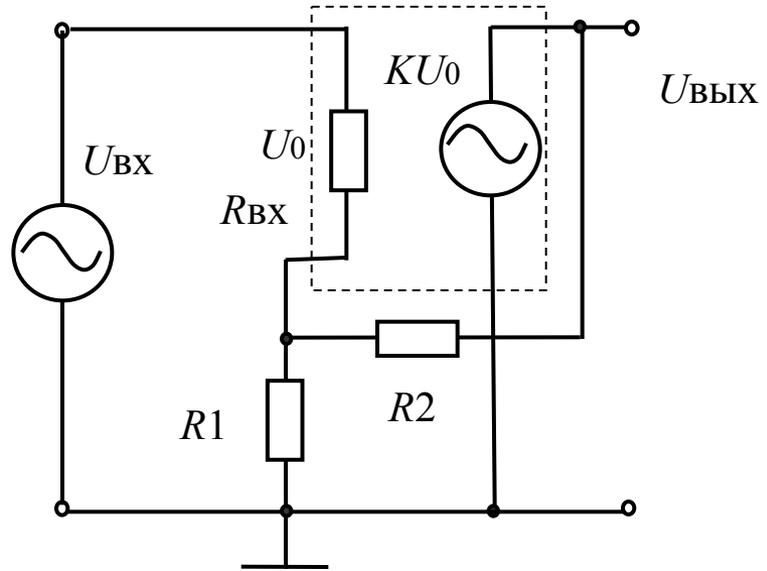
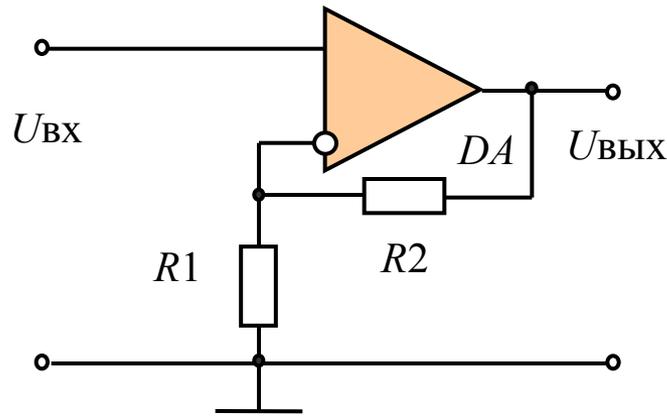
$$U_{\theta x} = U \frac{R_{\text{вх}} \parallel R}{R_{\text{вх}} + R_2 \parallel R}$$

$$U_{\theta \text{вх}} = U \frac{R_{\text{вх}} \parallel R}{R_{\text{вх}} + R_1 \parallel R}$$

$$K_{\text{oc}} \approx - \frac{K \frac{R_{\text{вх}} \parallel R}{R_{\text{вх}} + R_2 \parallel R_2}}{1 + K \frac{R_{\text{вх}} \parallel R}{R_{\text{вх}} + R_1 \parallel R}} \approx - \frac{R}{R_1}$$

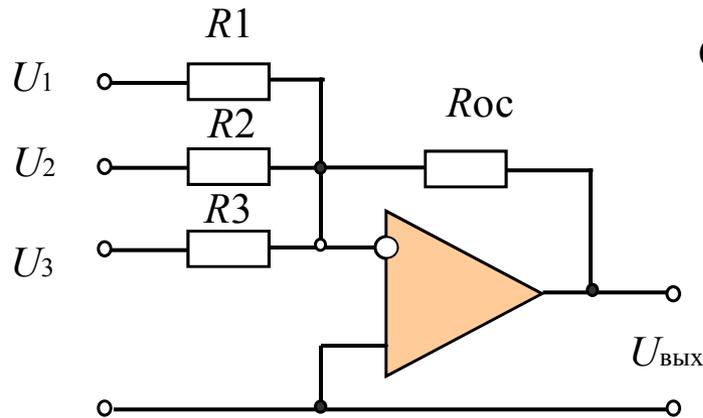
# Линейные функциональные устройства на ОУ.

## Неинвертирующий усилитель



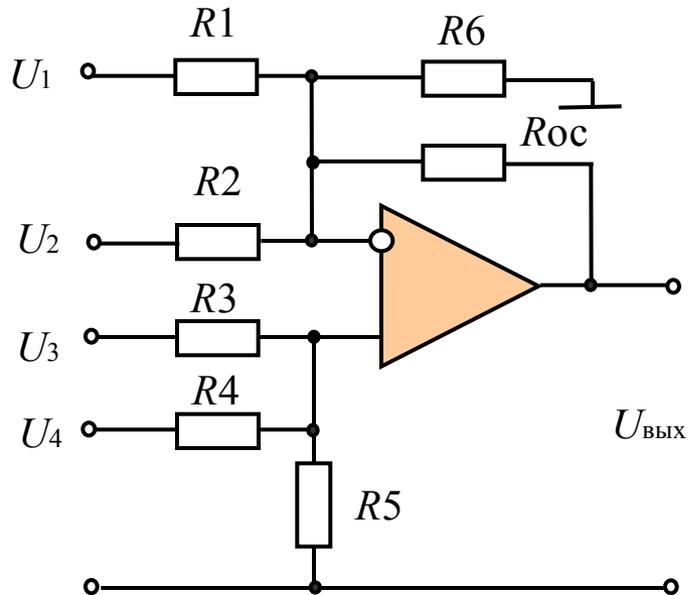
$$U_{\text{вх}} = U \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_1 \parallel R_2} \quad U_{\text{вых}} = -U \frac{R_{\text{вх}} \parallel R}{R_{\text{вх}} + R_1 \parallel R} \quad K_{\text{oc}} \approx \frac{K \frac{R_{\text{вх}}}{R_{\text{вх}} + R_1 \parallel R_2}}{1 + K \frac{R_{\text{вх}} \parallel R}{R_{\text{вх}} + R_1 \parallel R}} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

## Линейные функциональные устройства на ОУ



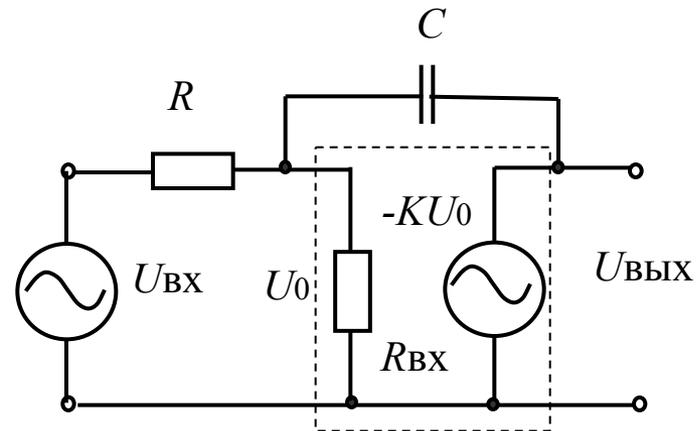
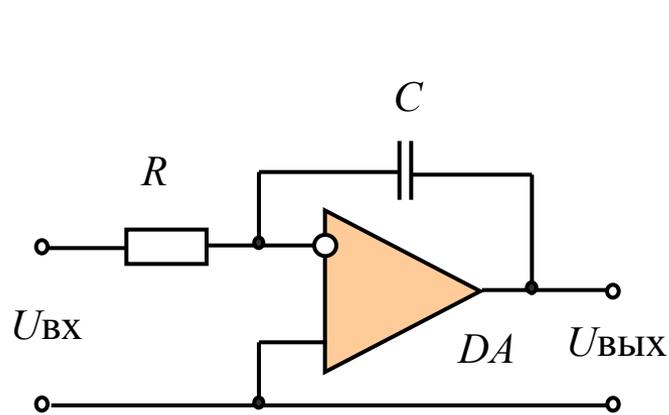
Суммирующий усилитель

$$U_{\text{ВЫХ}} = - \left( \frac{R_{\text{oc}}}{R_1} U_1 + \frac{R_{\text{oc}}}{R_2} U_2 + \frac{R_{\text{oc}}}{R_3} U_3 \right)$$



Суммирующий и вычитающий усилитель

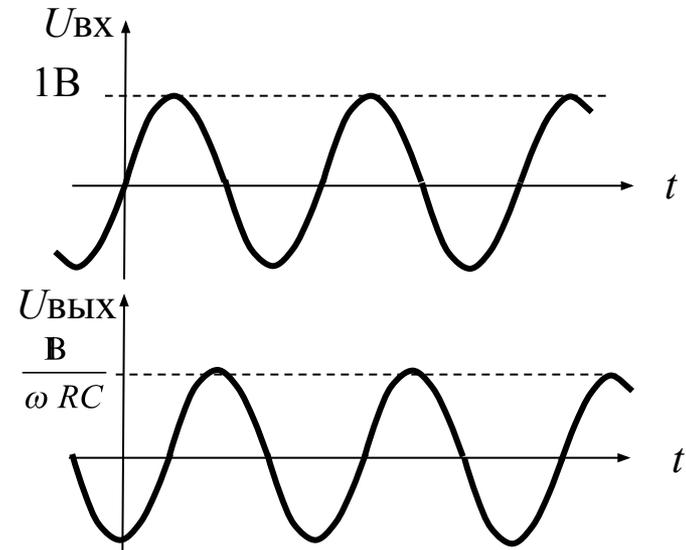
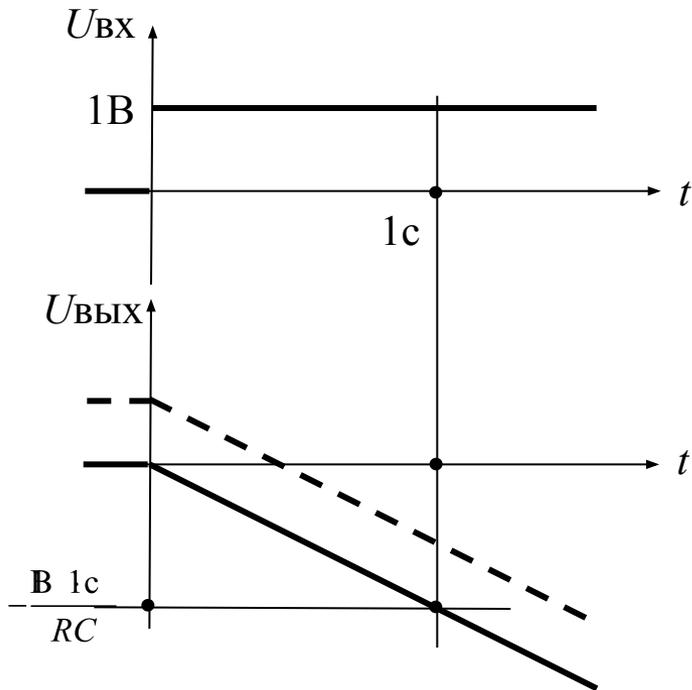
# Линейные функциональные устройства на ОУ. Интегратор



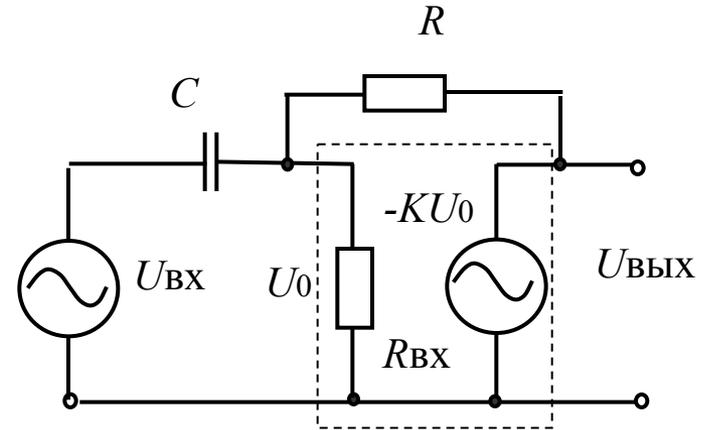
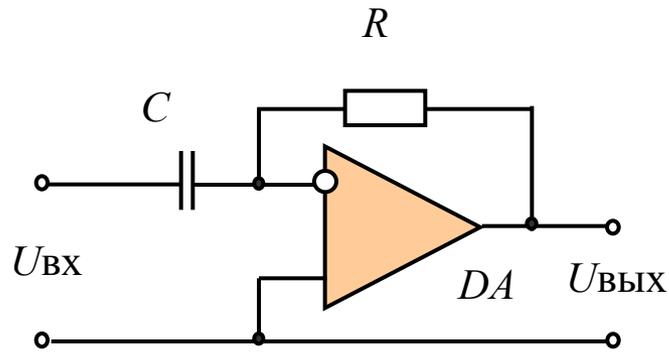
$$\dot{K}_{oc}(\omega) \boxtimes -\frac{K \frac{1/j\omega C \parallel R_{BX}}{R + 1/j\omega C \parallel R_{BX}}}{1 + K \frac{R \parallel R_{BX}}{1/j\omega C + R \parallel R_{BX}}} \approx -\frac{1}{j\omega RC}$$

$$U_{ВЫХ}(t) \boxtimes -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{ВХ}(t) dt + U_c(0)$$

# Линейные функциональные устройства на ОУ. Интегратор



# Линейные функциональные устройства на ОУ. Дифференциатор



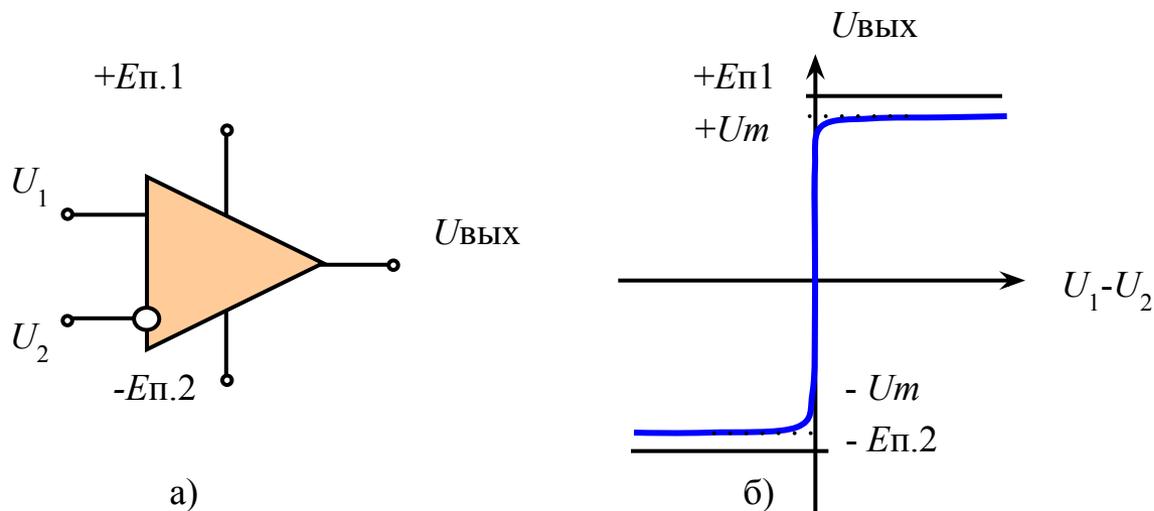
$$\dot{K}_{oc}(\omega) \boxtimes -\frac{K \frac{R \parallel R_{BX}}{1/j\omega C + R \parallel R_{BX}}}{1 + K \frac{1/j\omega C \parallel R_{BX}}{R + 1/j\omega C \parallel R_{BX}}} \approx -j\omega RC$$

$$U_{ВЫХ}(t) \boxtimes -\frac{dU_{ВХ}}{dt}$$

# Нелинейные функциональные устройства на ОУ. Компаратор

**Компаратор напряжений** предназначен для сравнения двух входных напряжений  $U_1$  и  $U_2$ . Выходное напряжение компаратора принимает два значения:  $+U_m$  и  $-U_m$ . Максимальное положительное напряжение на выходе компаратора появляется в том случае, когда напряжение  $U_1$  больше чем  $U_2$ , а минимальное отрицательное, когда, наоборот. Такая связь входных и выходного напряжений описывается знаковой функцией,

$$U_{\text{вых}} = U_m \operatorname{sign} ( U_1 - U_2 )$$



Типовая схема включения компаратора а) и его амплитудная характеристика б)

# Нелинейные функциональные устройства на ОУ.

## Логарифматор

**Логарифмирующий усилитель.** Логарифмирующие усилители предназначены для получения выходного напряжения, пропорционального логарифму входного напряжения. Они используются в компандерах и эспандерах сигналов (в устройствах сжатия и расширения динамического диапазона входных сигналов при магнитной записи), в системах шумопонижения, устройствах перемножения напряжений и т. д.

Теоретически логарифмическая зависимость определяется следующим соотношением:  $y = \log_a(x)$ . При  $a = e$  имеем  $y = \ln(x)$ .

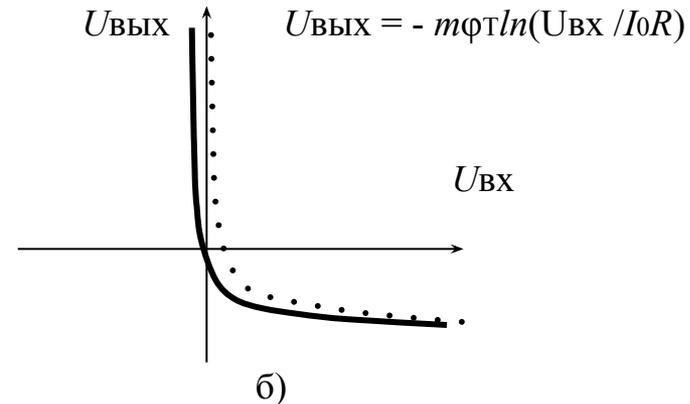
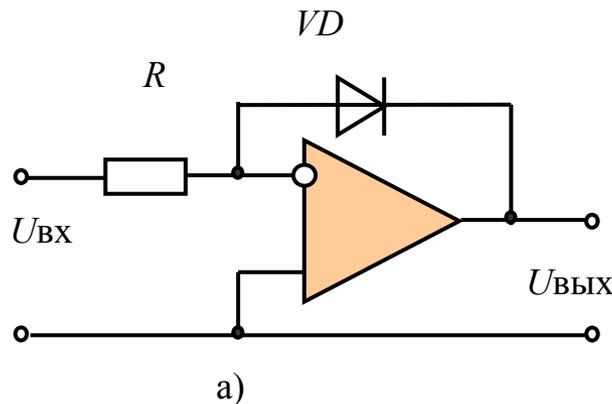
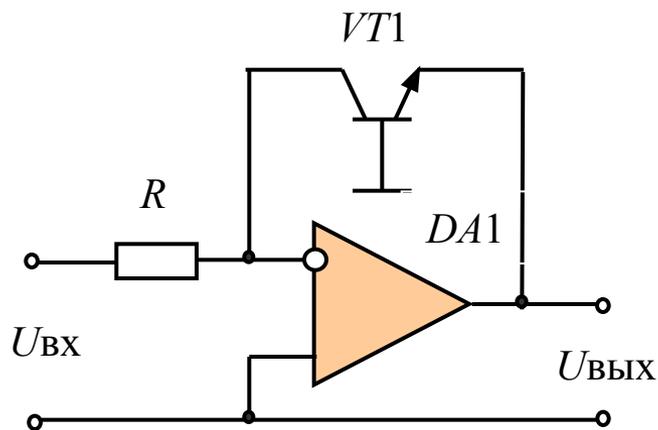


Схема логарифмирующего усилителя *а)* и его амплитудная характеристика *б)*

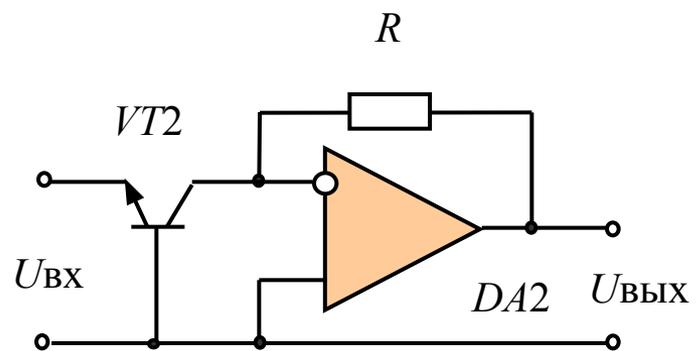
# Нелинейные функциональные устройства на ОУ. Логарифматор и потенциатор

$$U_{\text{ВЫХ}} = -m\varphi_T \ln\left(\frac{U_{\text{ВХ}}}{I_0 R}\right)$$



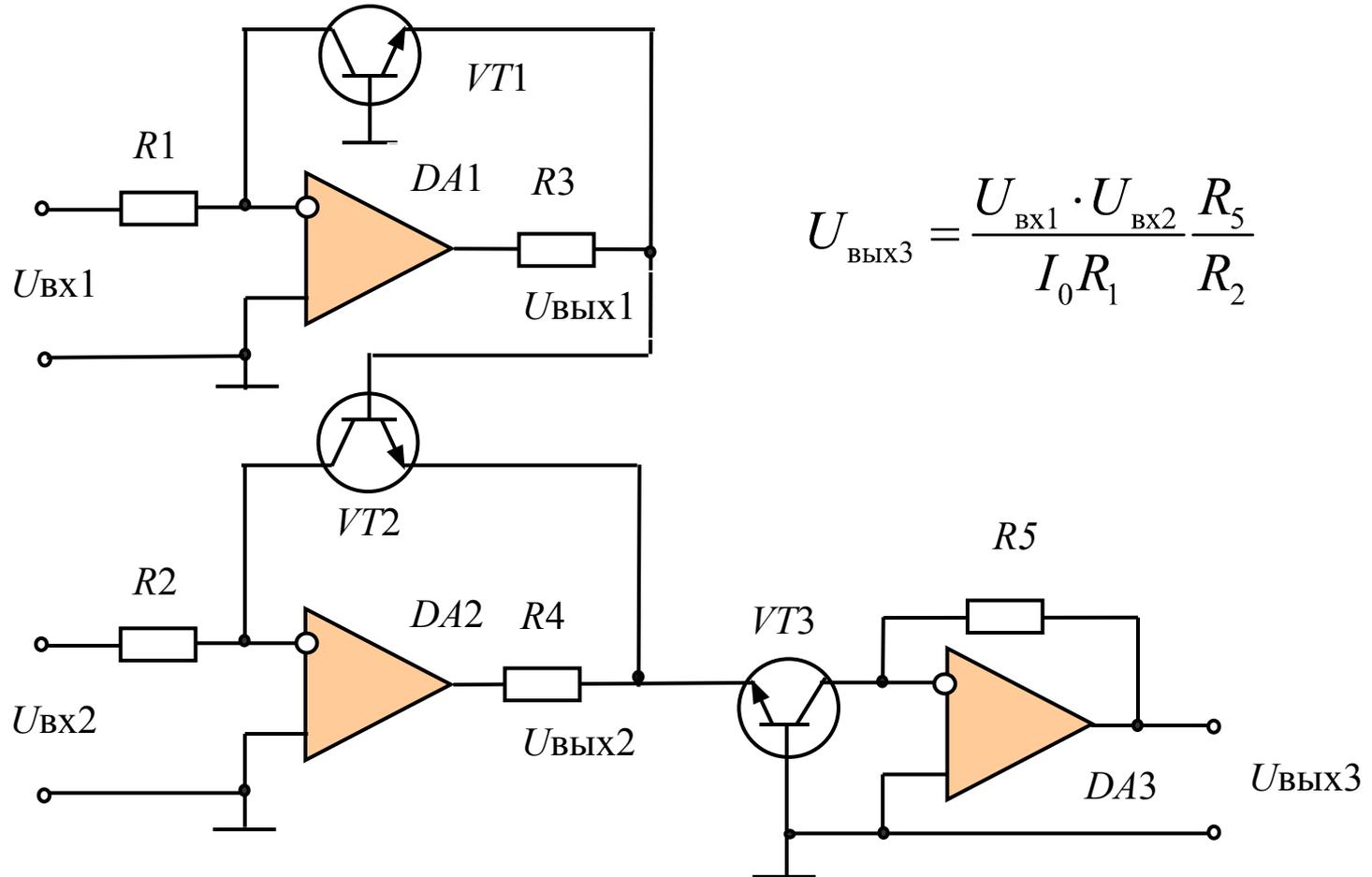
Логарифматор

$$U_{\text{ВЫХ}} = -I_0 R \left( e^{\frac{U_{\text{ВХ}}}{m\varphi_T}} - 1 \right)$$



Потенциатор (антилогарифматор)

## Нелинейные функциональные устройства на ОУ. Устройство перемножения напряжений



Перемножитель напряжений

# Нелинейные функциональные устройства на ОУ. Операционный выпрямитель

