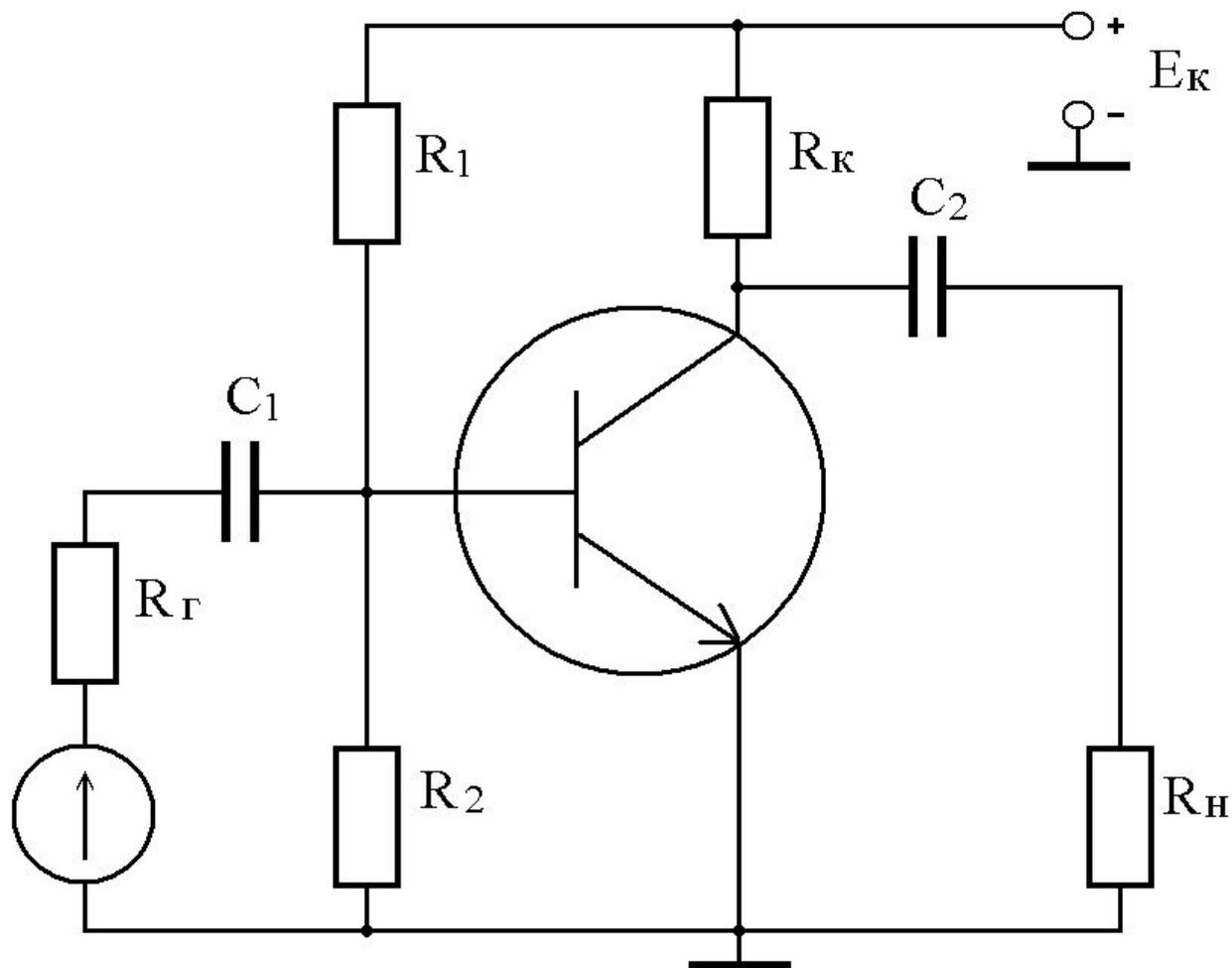


# Раздел 4. Усилители

# Усилители

- Усилитель – устройство, предназначенное для усиления тока, напряжения или мощности
- Усилитель характеризуют коэффициентами усиления по напряжению, току, мощности, амплитудно-частотной характеристикой (АЧХ), фазо-частотной характеристикой (ФЧХ), амплитудной характеристикой
- При каскадном соединении усилителей, общий коэффициент усиления равен произведению коэффициентов усиления всех каскадов.

# 4.1. Усилительный каскад на БПТ с ОЭ



## 4.1. Усилительный каскад на БПТ с ОЭ

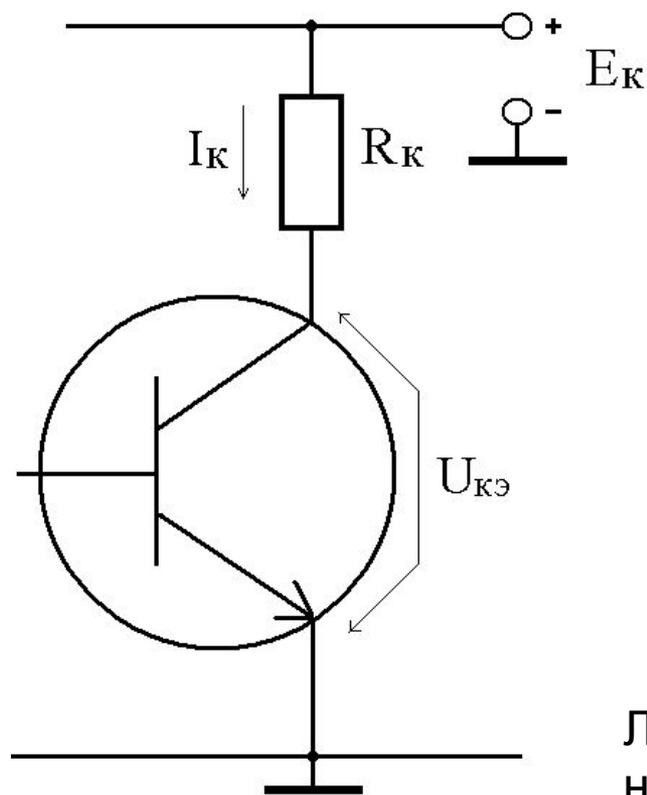
### Принцип действия усилителя.

Пусть источник питания  $E_k$  включен так, чтобы переход база-коллектор был закрыт.

Чтобы усилитель усиливал переменное входное напряжение, необходимо обеспечить режим работы по постоянному току (нужно создать такие значения постоянных  $I_{\bar{б}}$ ,  $I_{\bar{к}}$ ,  $U_{\bar{бэ}}$ ,  $U_{\bar{кэ}}$ , чтобы рабочая точка находилась на линейном участке входной и выходной характеристик). Для обеспечения режима по постоянному току необходимо установить  $R_{\bar{б}}$  ( $R_{\bar{б}}$  определяет  $U_{\bar{бэ}}$ ) такое, чтобы  $U_{\bar{кэ}}$  находилась в середине линии нагрузки ( $U_{\bar{кэ}} \approx E_k / 2$ )

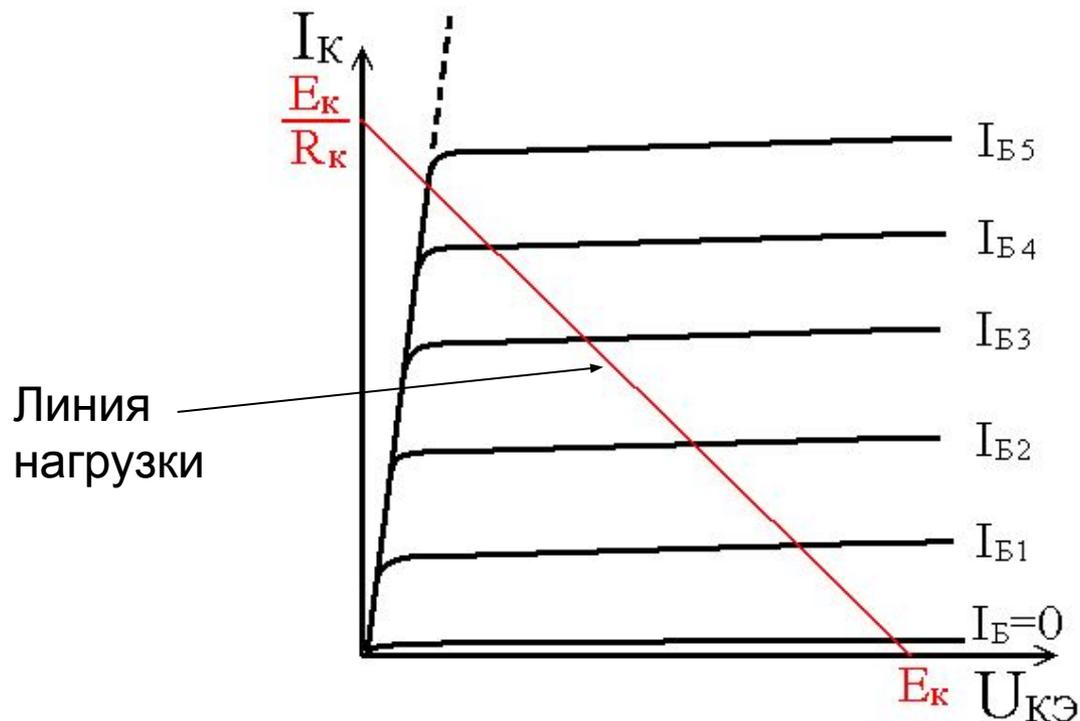
#### 4.1. Усилительный каскад на БПТ с ОЭ

Выбор режима по постоянному току. Коллекторный контур, построение линии нагрузки.

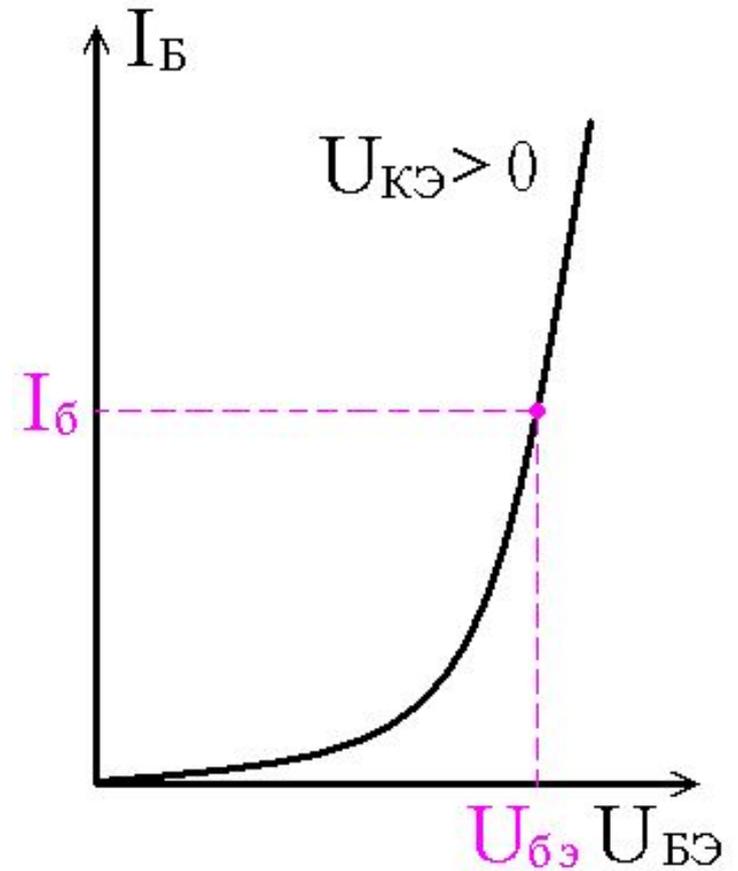
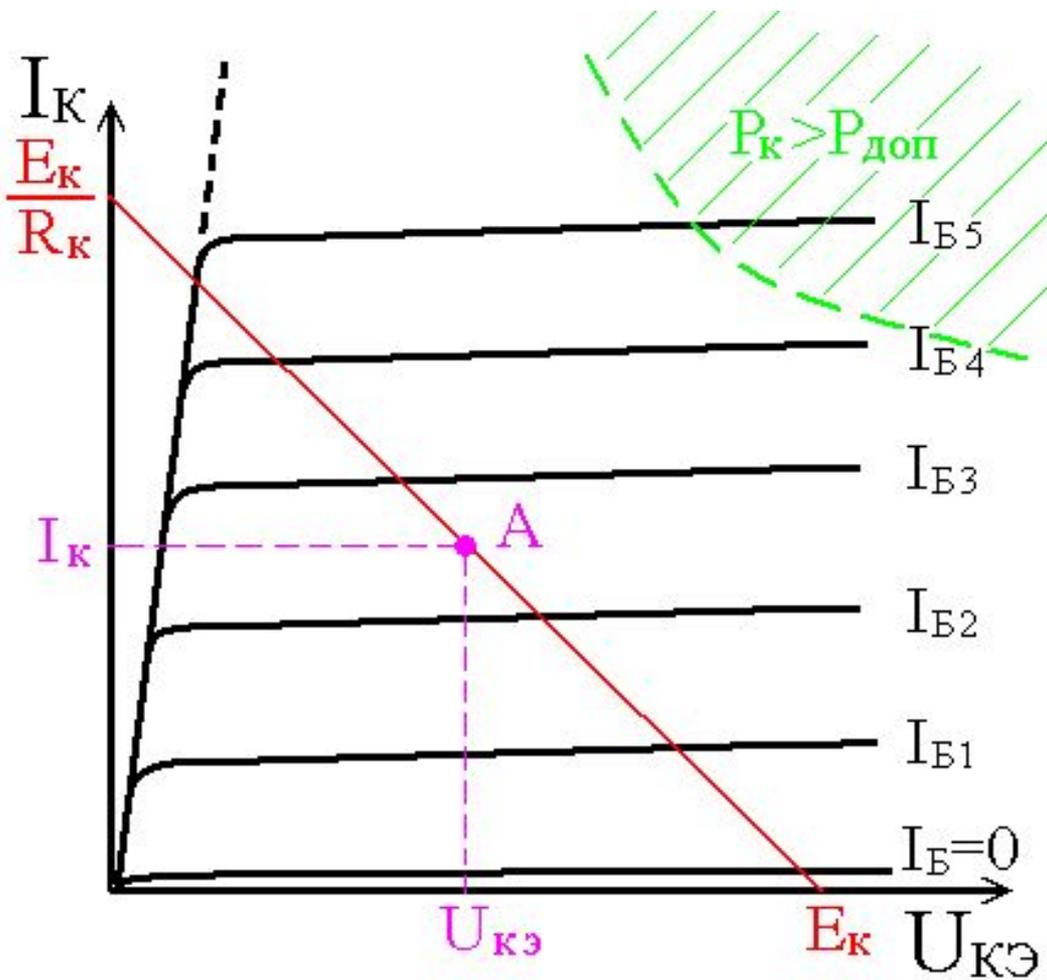


$$U_{КЭ} + I_K \cdot R_K = E_K$$

$$U_{КЭ} = E_K - I_K \cdot R_K$$



#### 4.1. Усилительный каскад на БПТ с ОЭ



По характеристикам транзистора подбираем значения токов и напряжений точки покоя

#### 4.1. Усилительный каскад на БПТ с ОЭ

По уравнению состояния цепи базы определяем сопротивление  $R_{\text{б}}$ , обеспечивающее нужный режим по постоянному току

$$U_{\text{бэ}} + I_{\text{б}} \cdot R_{\text{б}} = E_{\text{к}}$$

$$R_{\text{б}} = \frac{E_{\text{к}} - U_{\text{бэ}}}{I_{\text{б}}}$$

Чтобы при подключении источника входного переменного напряжения ток базы покоя не тек через малое сопротивление источника  $R_{\text{г}}$ , и не нарушался бы режим покоя, источник и транзистор разделяют конденсатором  $C_1$ .

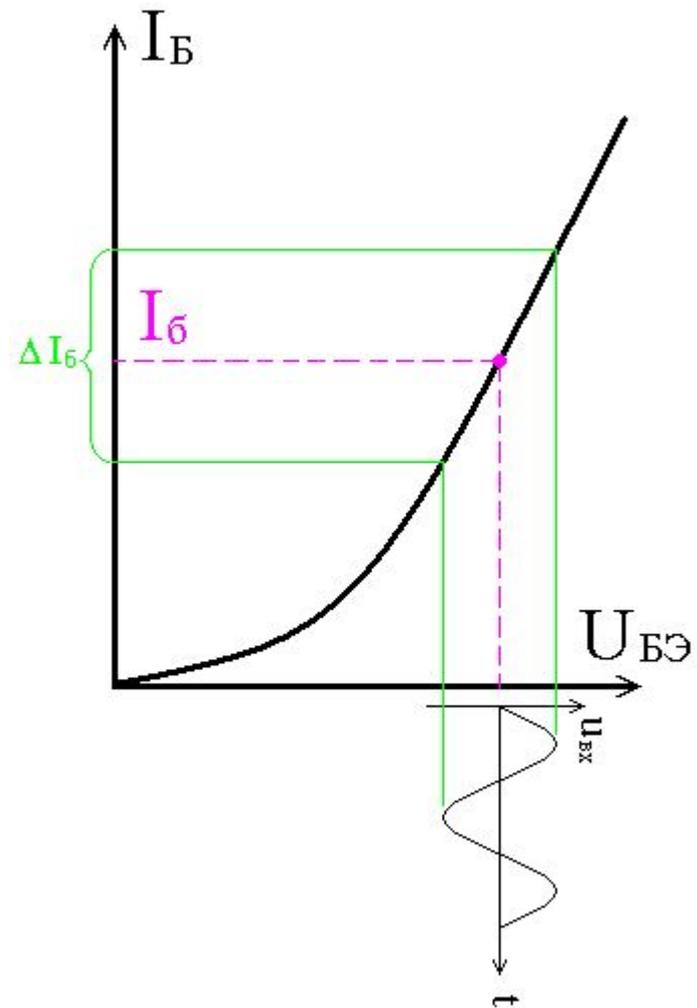
#### 4.1. Усилительный каскад на БПТ с ОЭ

Подадим на вход переменное напряжение  $u_{вх}$  такое, чтобы в любой момент времени значения токов и напряжений лежали в пределах линейного диапазона входной и выходной характеристик транзистора.

Переменное входное напряжение вызовет переменный ток базы

$$i_{\text{б}} = \frac{u_{\text{бэ}}}{h_{11}}$$

$$u_{\text{бэ}} = u_{\text{вх}}$$



#### 4.1. Усилительный каскад на БПТ с ОЭ

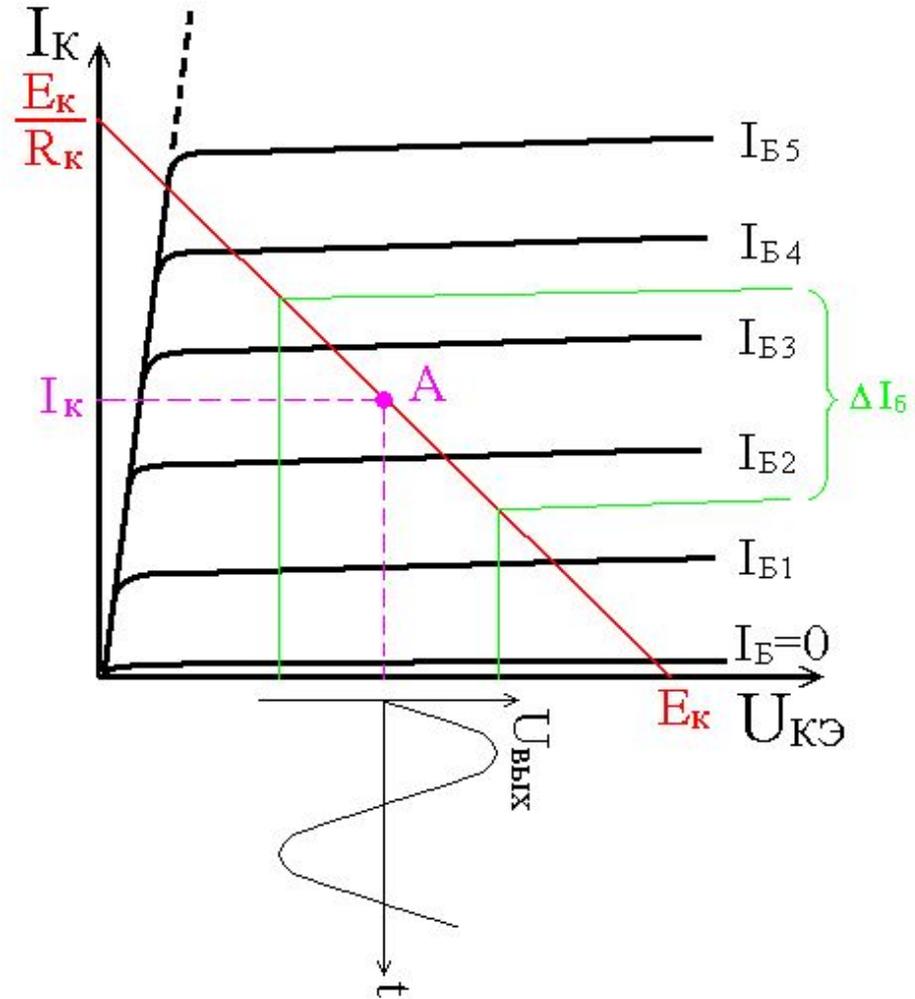
Транзистор усиливает переменную составляющую тока базы в  $h_{21}$  раз

$$i_K = h_{21} \cdot i_B$$

Для преобразования тока коллектора в напряжение служит резистор  $R_K$ :

$$u_{KЭ} = i_K \cdot R_K$$

Чтобы отделить на нагрузочном резисторе постоянную и переменную составляющую, используют разделительный конденсатор  $C_2$ .

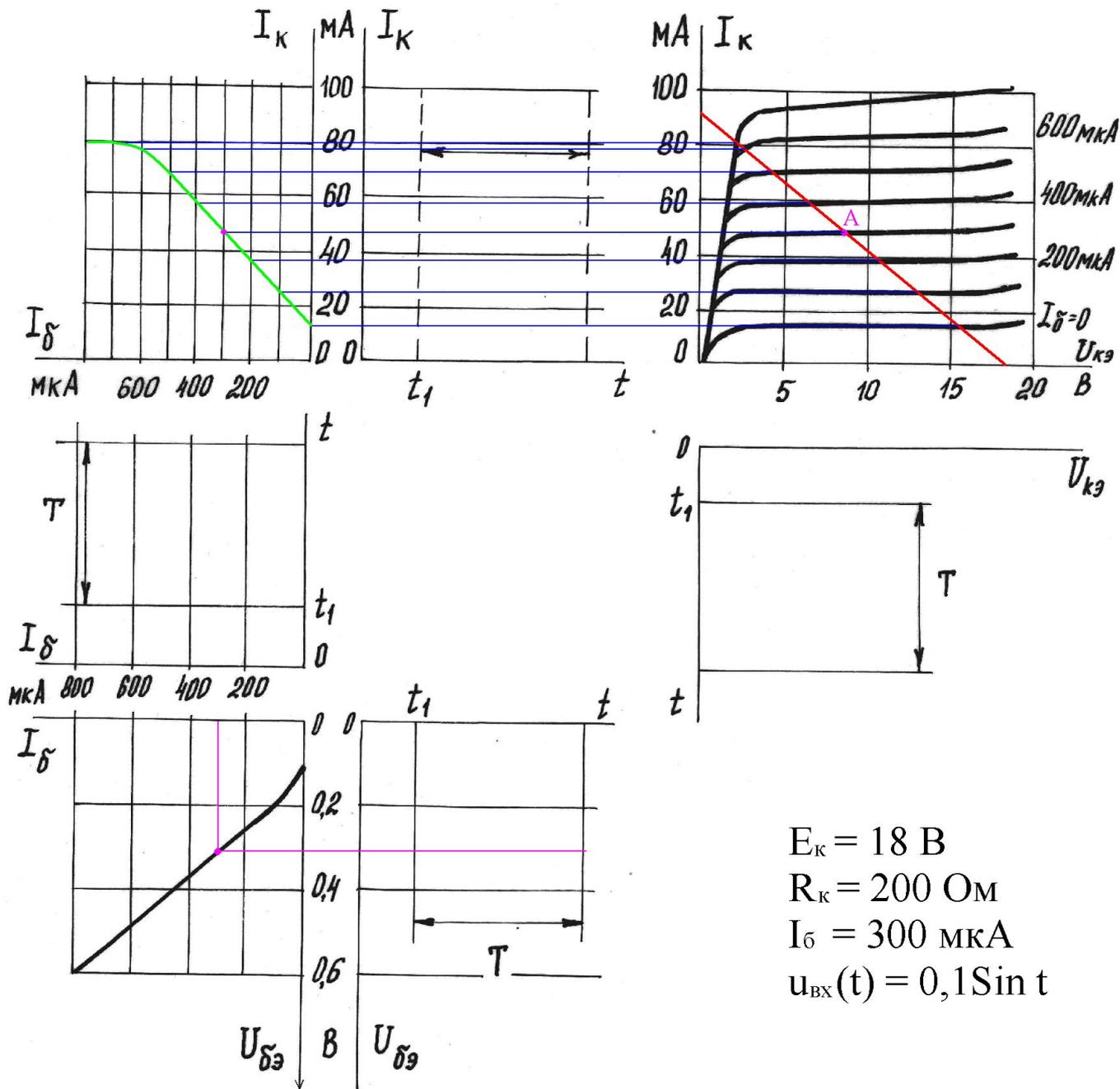


## 4.2. Анализ работы усилителя на БПТ с ОЭ

Есть два метода анализа работы усилителя:

1. Графо-аналитический (наглядный, долгий, не точный);
2. Аналитический (только для расчета на переменном токе, только для линейного режима)

## 4.2. Анализ работы усилителя на БПТ с ОЭ



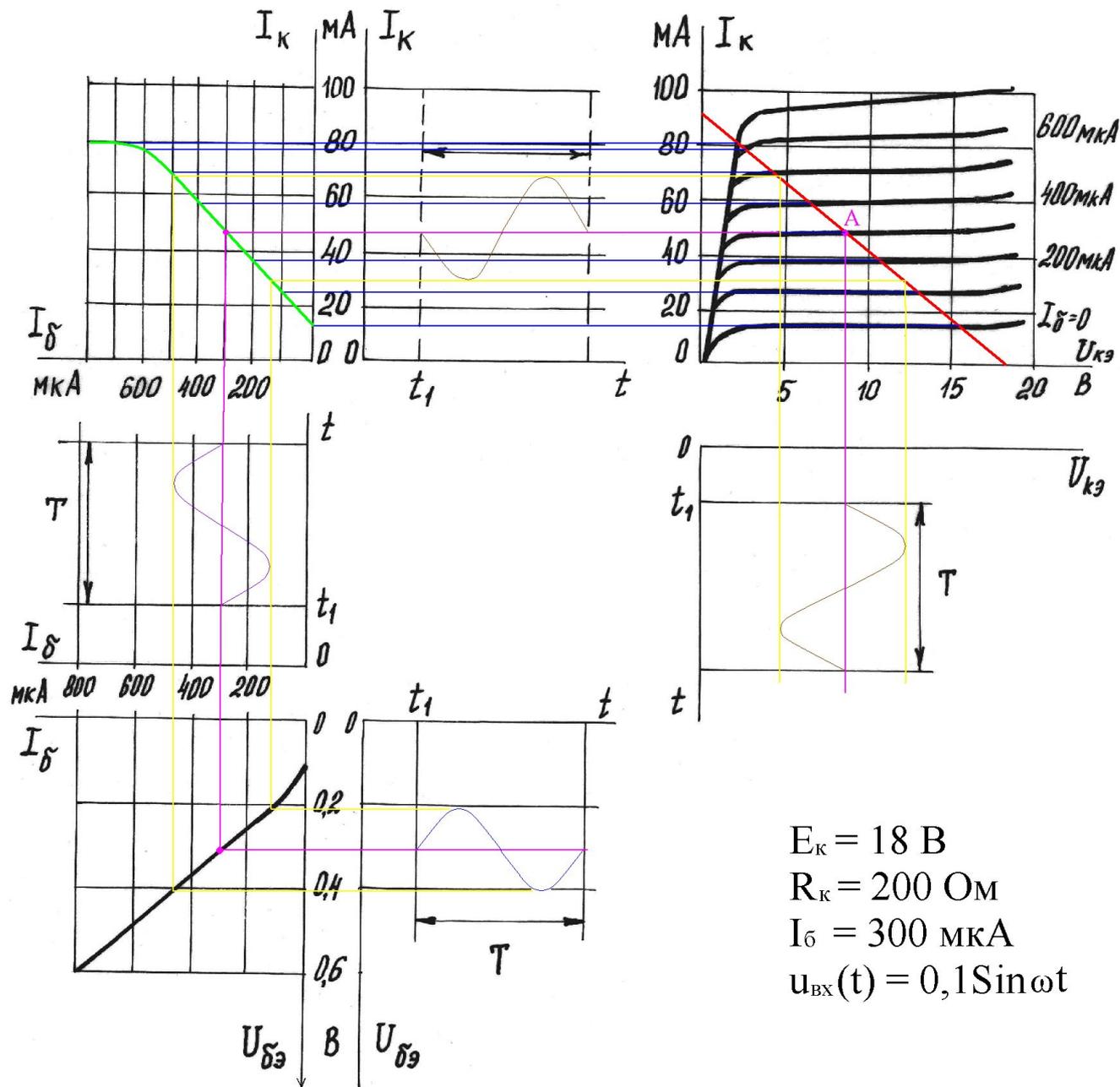
$$E_K = 18 \text{ В}$$

$$R_K = 200 \text{ Ом}$$

$$I_\delta = 300 \text{ мкА}$$

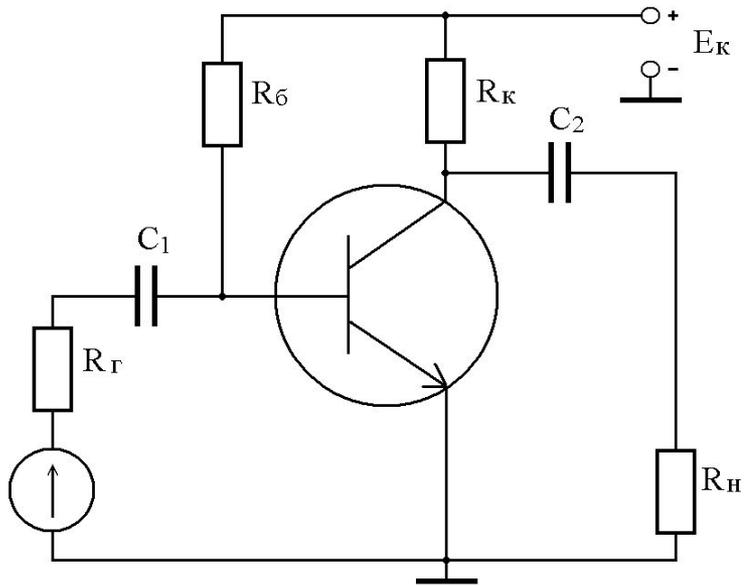
$$u_{\text{вх}}(t) = 0,1 \sin t$$

## 4.2. Анализ работы усилителя на БПТ с ОЭ

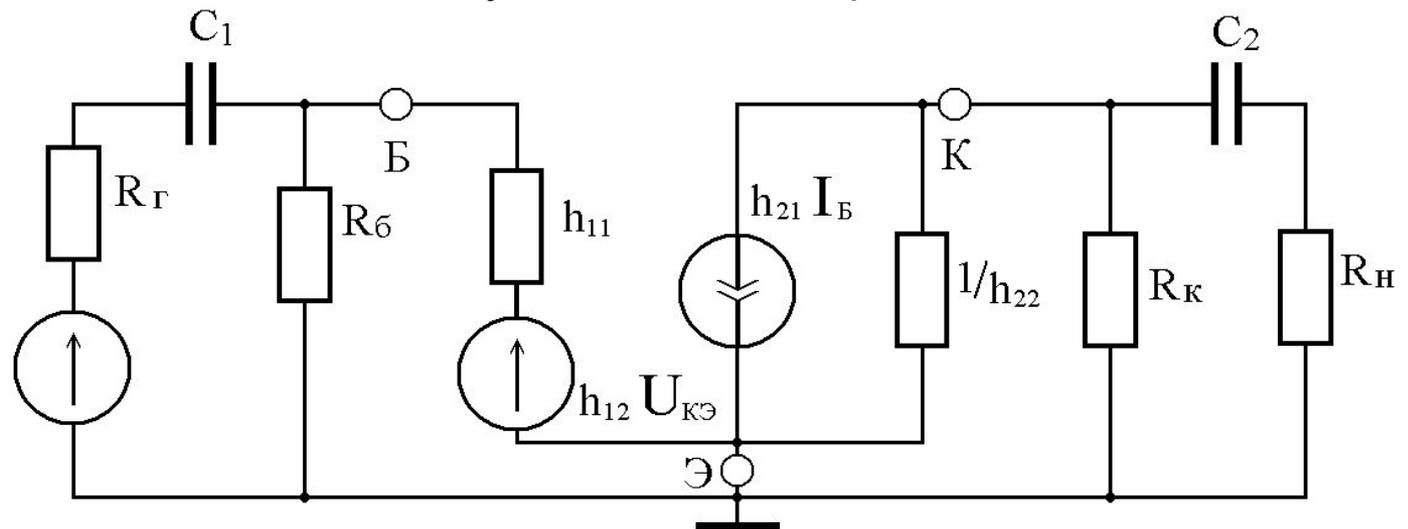


## 4.2. Анализ работы усилителя на БПТ с ОЭ

### Аналитический способ расчета

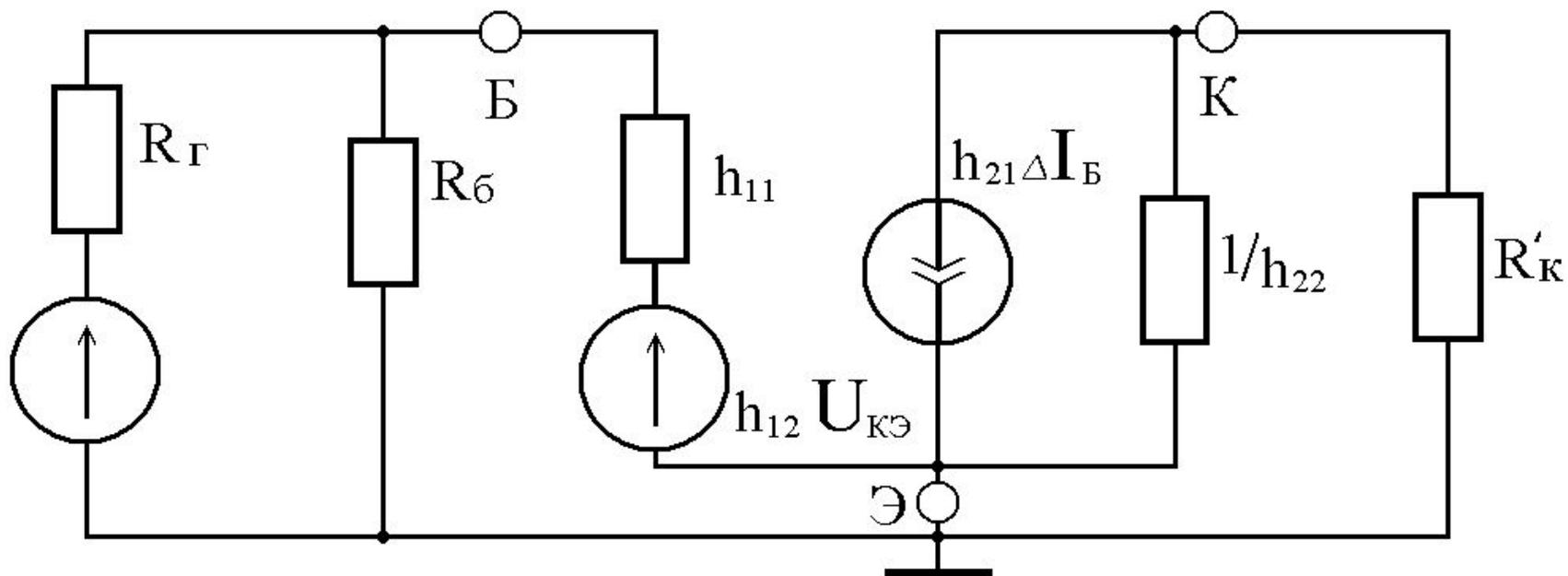


Эквивалентная схема замещения усилителя на переменном токе



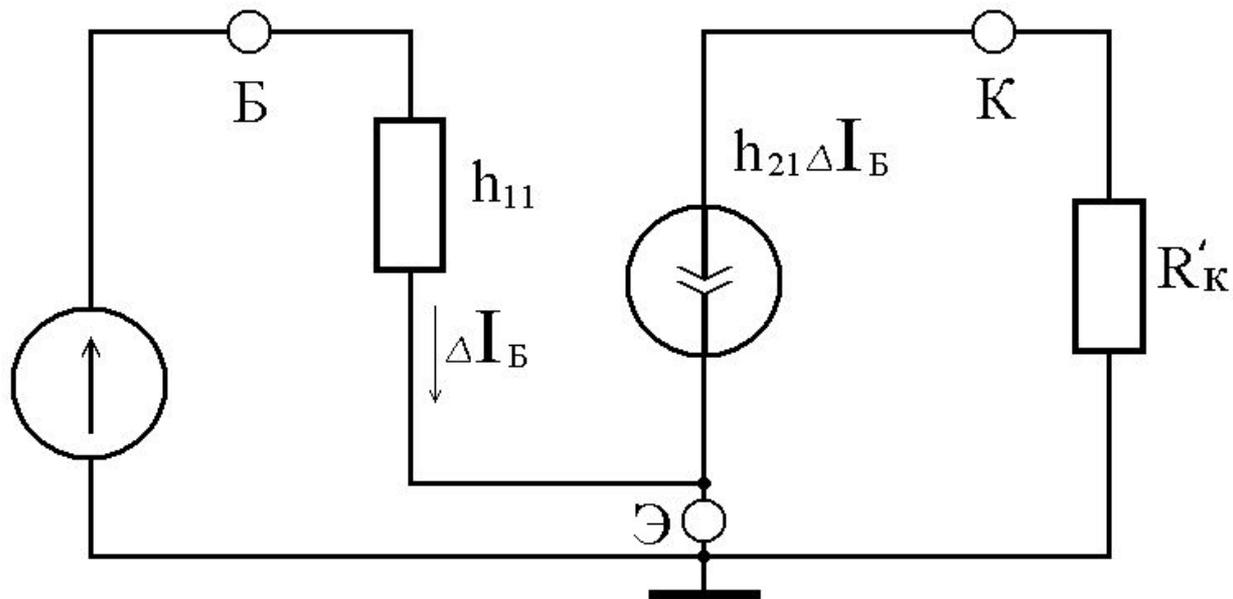
## 4.2. Анализ работы усилителя на БПТ с ОЭ

# Схема замещения усилителя в области средних частот



$$R'_{\text{К}} = \frac{R_{\text{К}} \cdot R_{\text{H}}}{R_{\text{К}} + R_{\text{H}}}$$

## 4.2. Анализ работы усилителя на БПТ с ОЭ



$$\Delta I_{\text{Б}} = \frac{U_{\text{ВХ}}}{h_{11}};$$

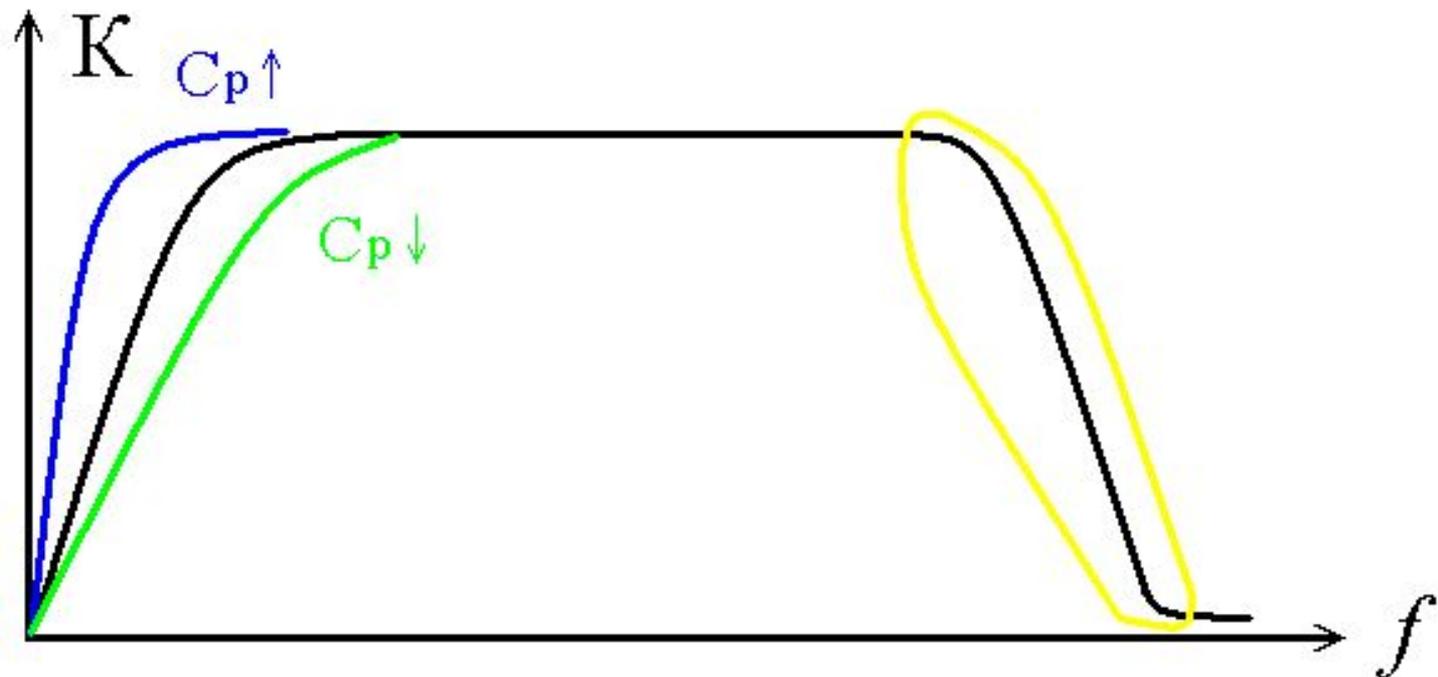
$$U_{\text{ВЫХ}} = -h_{21} \cdot \frac{U_{\text{ВХ}}}{h_{11}} \cdot R'_{\text{К}}$$

## 4.3. Характеристики усилителя

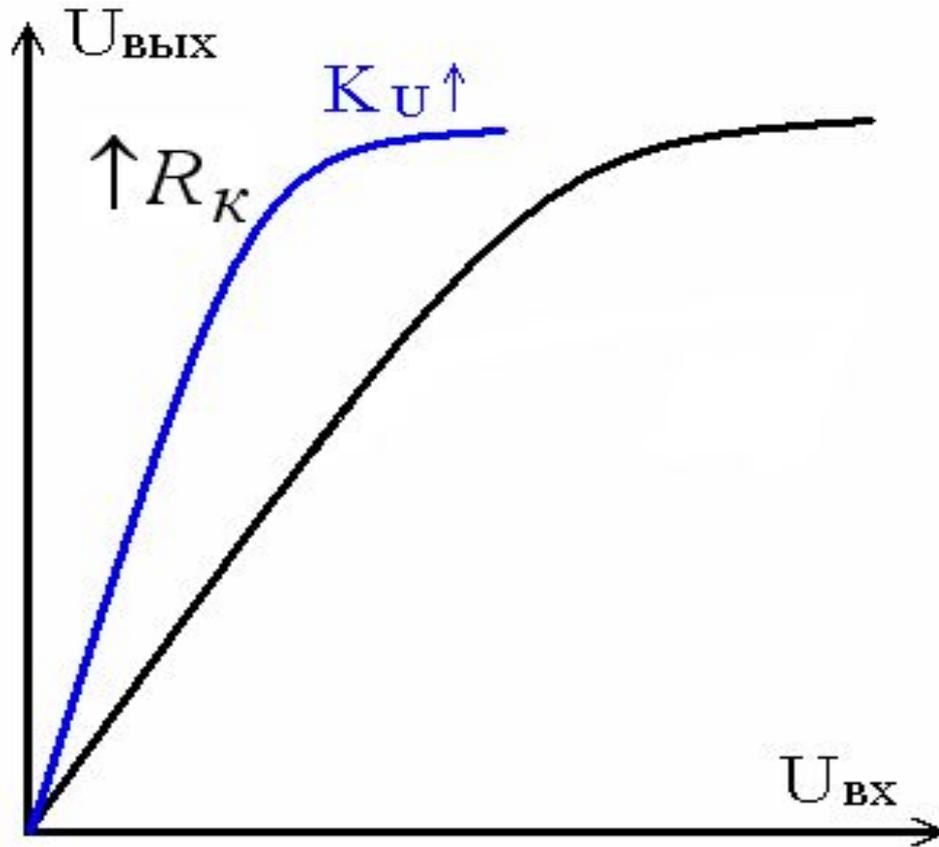
1. Коэффициент усиления в области средних частот

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = -\frac{h_{21} \cdot R'_K}{h_{11}}; \quad K_{U\text{X}} = -\frac{h_{21} \cdot R_K}{h_{11}}$$

2. Амплитудно-частотная характеристика



### 3. Амплитудная характеристика



- Наклон амплитудной характеристики на линейном участке зависит от коэффициента усиления.
- линейный диапазон определяется напряжением питания коллектора (при правильном выборе режима по постоянному току)

### 4.3. Характеристики усилителя

## 4. Входное и выходное сопротивления

$$R_{\text{ВХ}} = \frac{R_{\sigma} \cdot h_{11}}{R_{\sigma} + h_{11}} \approx h_{11}; \quad R_{\text{ВЫХ}} = \frac{R_{\text{К}}}{1 + h_{22} \cdot R_{\text{К}}} \approx R_{\text{К}}$$

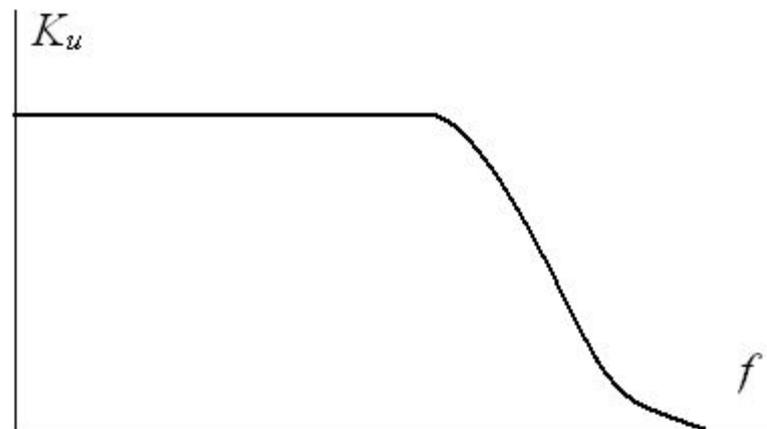
## 4.4. Усилители постоянного тока (УПТ)

#### 4.4. Усилители постоянного тока

- УПТ – усилитель, имеющий равномерную АЧХ до самых низких частот

Требования к УПТ:

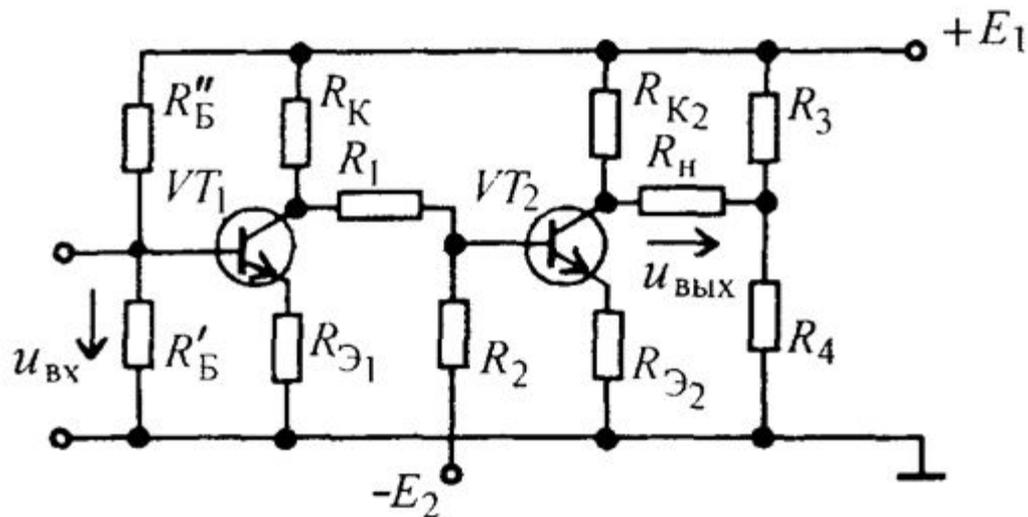
1. При  $U_{вх} = 0$ ,  $U_{вых} = 0$ .
2. При изменении знака входного напряжения изменяется знак выходного напряжения.
3. Выходное напряжение пропорционально входному напряжению.



#### 4.4. Усилители постоянного тока

Особенности многокаскадных УПТ на базе усилителя на БПТ:

1. Для связи каскадов нельзя использовать емкостные элементы.
2. Необходимо разделять постоянное напряжение, требуемое для обеспечения работы усилительного каскада в линейном режиме, и усиленное входное постоянное напряжение.



#### 4.4. Усилители постоянного тока

3. Дрейф (тепловой) выходного напряжения первых каскадов проявляется как изменение выходного напряжения усилителя.

*Из-за большого температурного дрейфа каскады с непосредственной связью не применяются*

*Для минимизации температурного дрейфа применяют дифференциальные усилители постоянного тока*

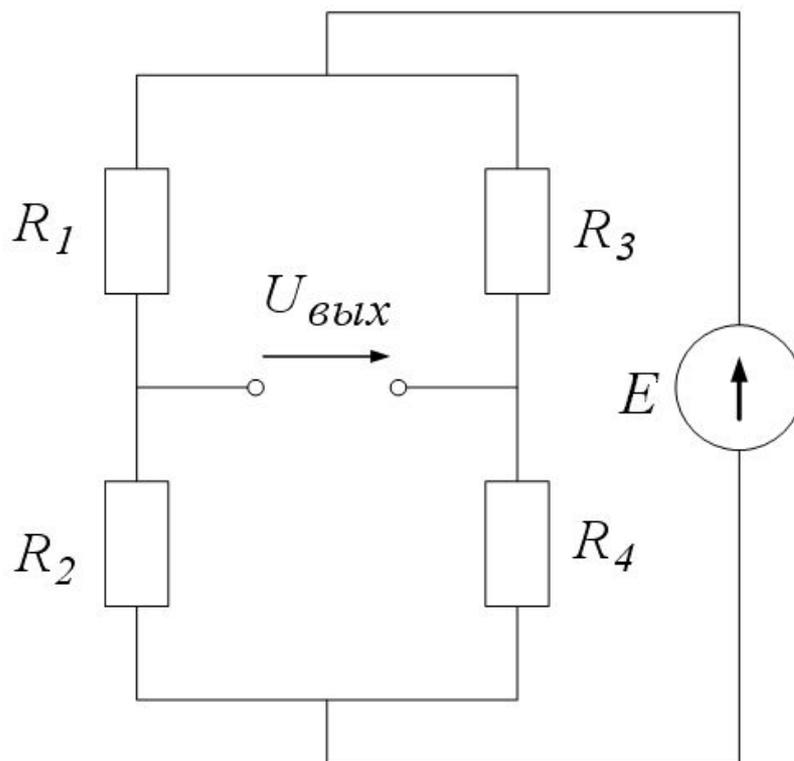
## Электрический мост

$$U_{\text{вых}} = E \cdot \left( \frac{1}{1 + \frac{R_4}{R_3}} - \frac{1}{1 + \frac{R_2}{R_1}} \right)$$

Если мост сбалансирован, т.е.

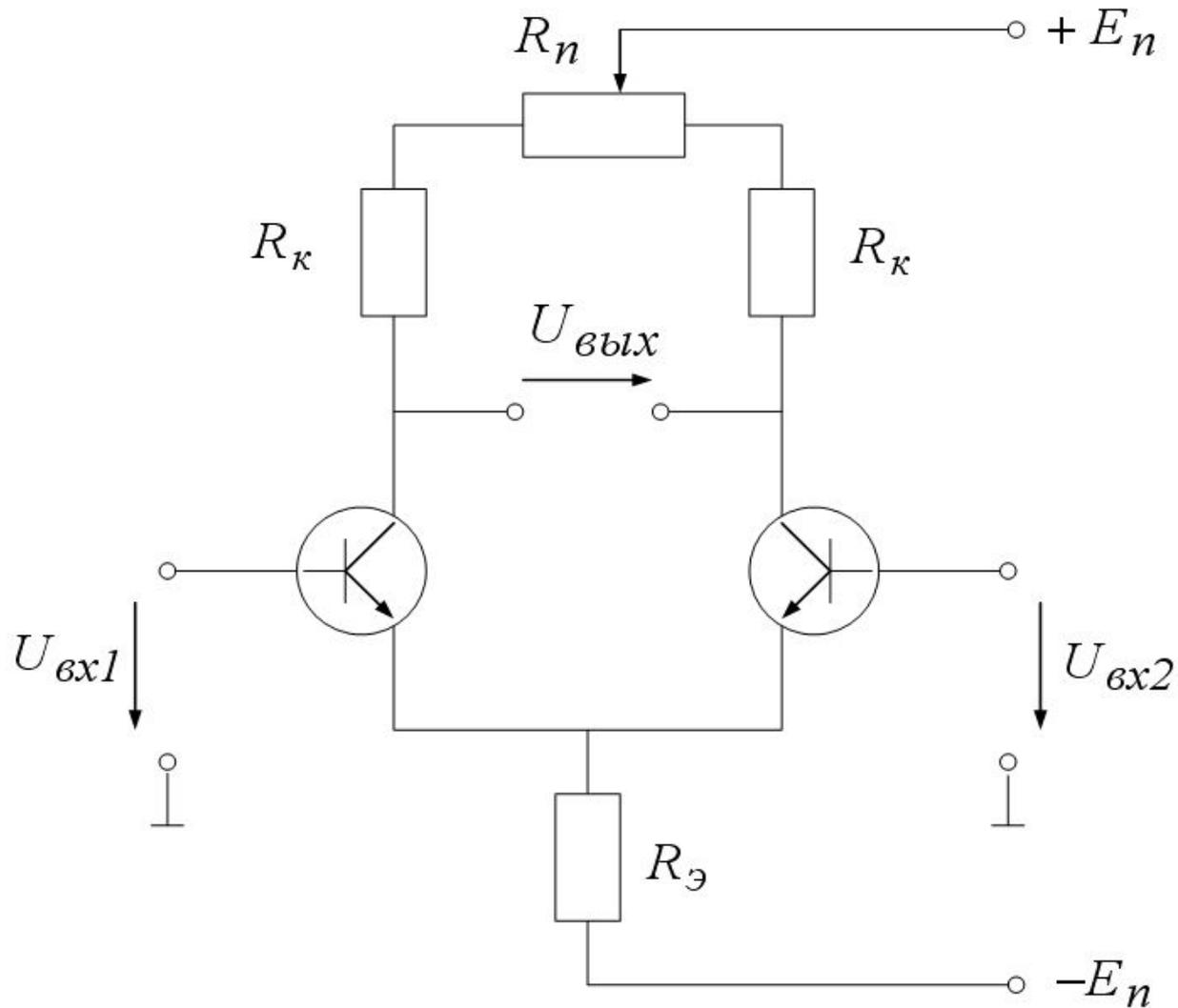
$$\frac{R_4}{R_3} = \frac{R_2}{R_1}$$

- выходное напряжение равно нулю
- выходное напряжение не зависит от напряжения источника питания
- выходное напряжение не зависит от значений сопротивлений плеч моста



## 4.4. Усилители постоянного тока

# Дифференциальный УПТ



#### 4.4. Усилители постоянного тока

### Свойства дифференциального УПТ:

- $U_{\text{вых}} = K_u \cdot (U_{\text{вх1}} - U_{\text{вх2}})$

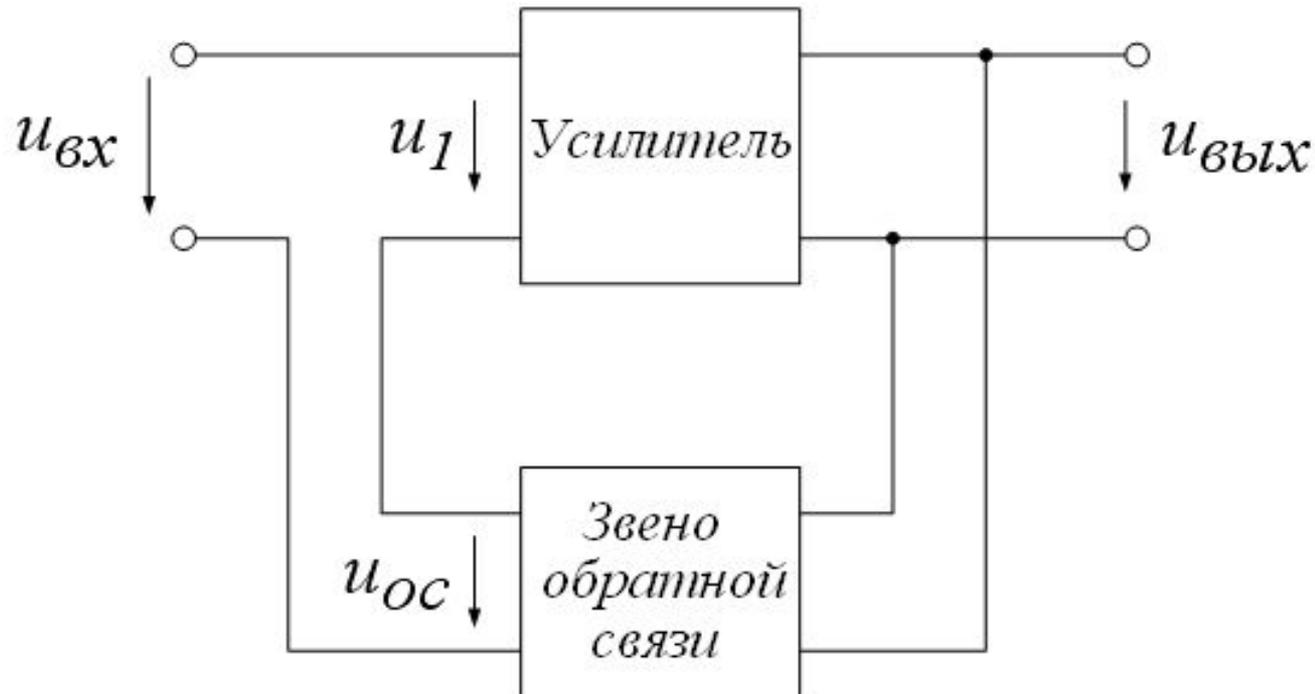
$$K_u = \frac{h_{21}}{h_{11}} \cdot \frac{R_k}{1 + h_{22} \cdot R_k}$$

- малый дрейф нуля;
- высокий уровень подавления синфазных помех

Недостаток дифференциального УПТ: требует двуполярного источника питания, необходим подбор элементов

## 4.5. Обратные связи в усилителях

*Обратной связью* в усилителях называют передачу части (или всего) выходного напряжения усилителя на его вход.



#### 4.5. Обратные связи в усилителях

Если при включении обратной связи выходное напряжение усилителя при неизменном входном напряжении увеличивается, обратную связь считают *положительной*, если уменьшается – *отрицательной*.

Обратные связи делят на обратные связи по току и по напряжению:

- обратная связь по напряжению:  $u_{oc} = \beta \cdot u_{вых}$
- обратная связь по току:  $u_{oc} = R_{oc} \cdot i_{вых}$

$\beta$  – коэффициент обратной связи,  $R_{oc}$  – взаимное сопротивление выходной цепи и цепи обратной связи.

#### 4.5. Обратные связи в усилителях

Пусть коэффициент усиления усилителя без обратной связи равен  $K$ , а коэффициент усиления звена обратной связи равен  $\beta$ . Определим коэффициент усиления с отрицательной обратной связью

$$u_1 = u_{вх} - u_{ос}$$

$$u_{вых} = u_1 \cdot K$$

$$u_{ос} = \beta \cdot u_{вых}$$

$$u_{вых} = K_{ос} \cdot u_{вх}$$

Коэффициент усиления с учетом обратной связи:

$$K_{ос} = \frac{K}{1 + K \cdot \beta}$$

#### 4.5. Обратные связи в усилителях

Для положительной обратной связи

$$K_{oc} = \frac{K}{1 - K \cdot \beta}$$

*Введение отрицательной обратной связи уменьшает коэффициент усиления, введение положительной обратной связи - увеличивает*

#### 4.5. Обратные связи в усилителях

### Влияние ОС на стабильность усилителей.

Пусть коэффициент усиления усилителя  $K$  нестабилен:

$$K = K \pm \Delta K$$

Нестабильность усилителя с обратной связью:

$$\Delta K_{oc} = \frac{\Delta K_{oc}}{\Delta K} \cdot \Delta K$$

Для отрицательной обратной связи

$$K_{oc} = \frac{K}{1 + K \cdot \beta}$$

$$\Delta K_{oc} = \left( \frac{d}{dK} K_{oc} \right) \cdot \Delta K$$

#### 4.5. Обратные связи в усилителях

$$\Delta K_{oc} = \frac{1}{(1 + K \cdot \beta)^2} \cdot \Delta K$$

Относительная нестабильность коэффициента усиления:

$$\frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}} = \frac{\Delta K}{K} \cdot \frac{1}{1 + K \cdot \beta}$$

*Отрицательная обратная связь снижает относительную нестабильность коэффициента усиления!*

#### 4.5. Обратные связи в усилителях

Для положительной обратной связи:

$$\Delta K_{oc} = \Delta K \cdot \frac{1}{(1 - K \cdot \beta)^2}$$

$$\frac{\Delta K_{oc}}{K_{oc}} = \frac{\Delta K}{K} \cdot \frac{1}{1 - K \cdot \beta}$$

*Положительная обратная связь  
повышает относительную  
нестабильность коэффициента  
усиления!*

#### 4.5. Обратные связи в усилителях

Отрицательная обратная связь в усилителях позволяет:

- Повысить стабильность коэффициента усиления
- Снизить входное и повысить выходное сопротивления
- Снизить нелинейные искажения
- Расширить полосу пропускания

#### 4.5. Обратные связи в усилителях

*В усилителях применяют только отрицательную обратную связь.*

*Чем больше коэффициент обратной связи  $\beta$ , тем стабильнее коэффициент усиления.*

При использовании глубокой обратной связи ( $K \cdot \beta \gg 1$ ) коэффициент усиления не зависит от  $K$

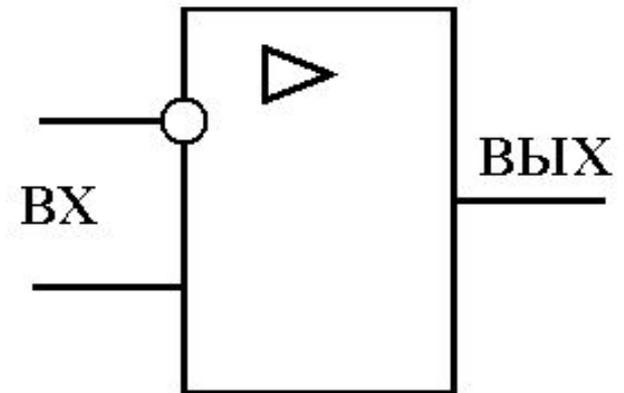
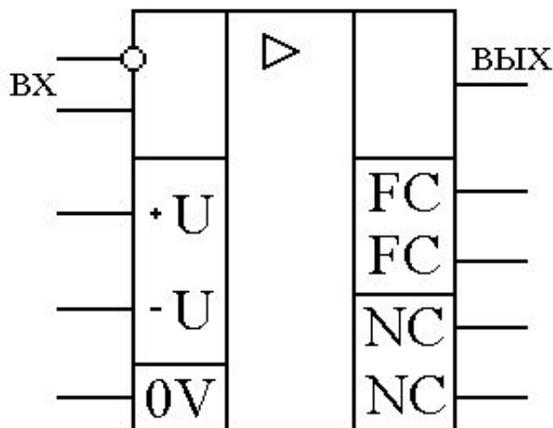
$$K_{ос} = \frac{K}{1 + K \cdot \beta} \approx \frac{K}{K \cdot \beta} = \frac{1}{\beta}$$

*Добиться глубокой обратной связи можно, используя очень большие значения  $K$ .*

# 4.6. Операционные усилители

*Операционный усилитель (ОУ) – это дифференциальный усилитель постоянного тока с большим коэффициентом усиления, предназначенный для работы с отрицательной обратной связью.*

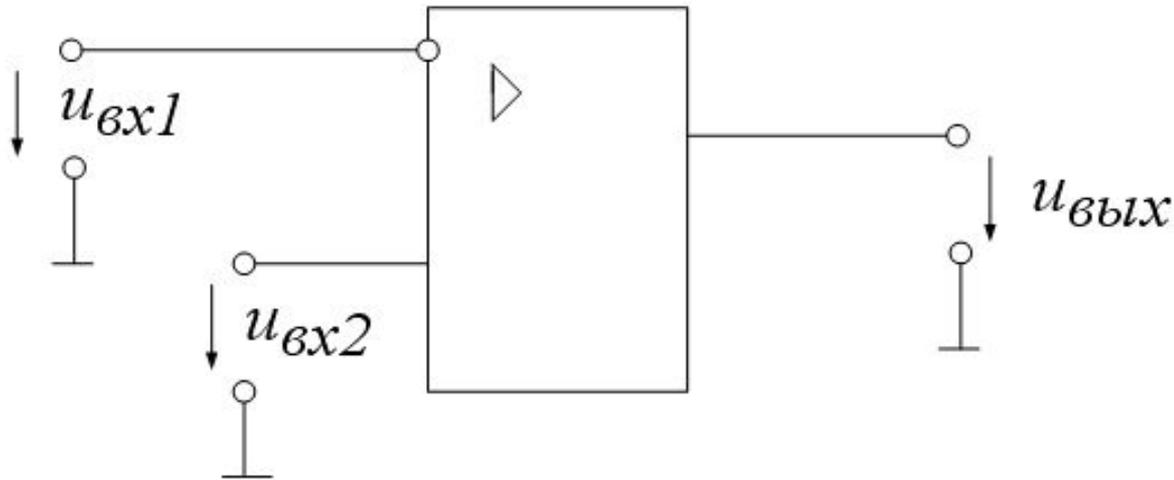
*Типичное значение коэффициента усиления: 10000 - 10000000*



#### 4.6. Операционные усилители

ОУ имеет два входа: *инвертирующий* и *неинвертирующий*.

ОУ усиливает разность входных напряжений



$$u_{вых} = K \cdot (u_{вх2} - u_{вх1})$$

## 4.6. Операционные усилители

ОУ характеризуется:

1. Амплитудной (передаточной) характеристикой,
2. Коэффициентом усиления по напряжению,
3. Входным сопротивлением
4. Выходным сопротивлением
5. Входным напряжением смещения нуля  $U_{см}$
6. Частота единичного усиления
7. Скорость нарастания выходного напряжения
8. Время установления выходного напряжения

## 4.6. Операционные усилители

Идеальный ОУ:

$$R_{\text{вых}} = 0$$

$$R_{\text{вх}} = \infty$$

$$K = \infty$$

$$U_{\text{см}} = 0$$



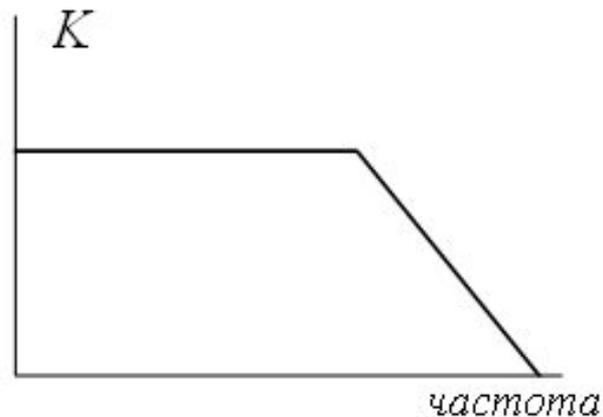
Реальный ОУ:

$$R_{\text{вых}} = 10 - 100 \text{ Ом}$$

$$R_{\text{вх}} = 10^4 - 10^6 \text{ Ом}$$

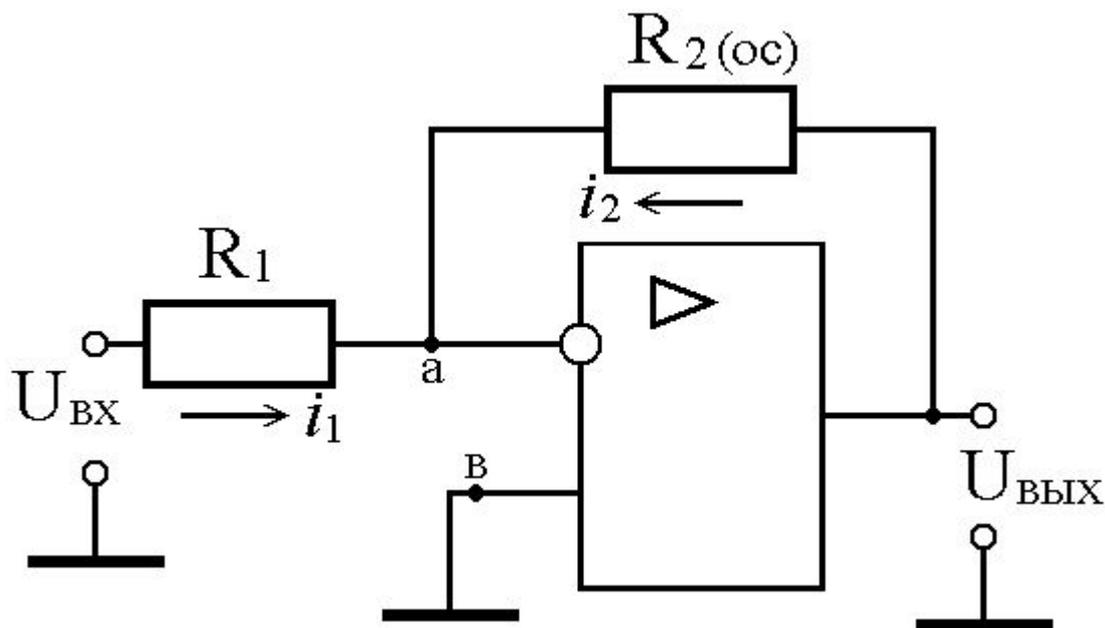
$$K = 10^4 - 10^7$$

$$U_{\text{см}} < 10 \text{ мВ}$$



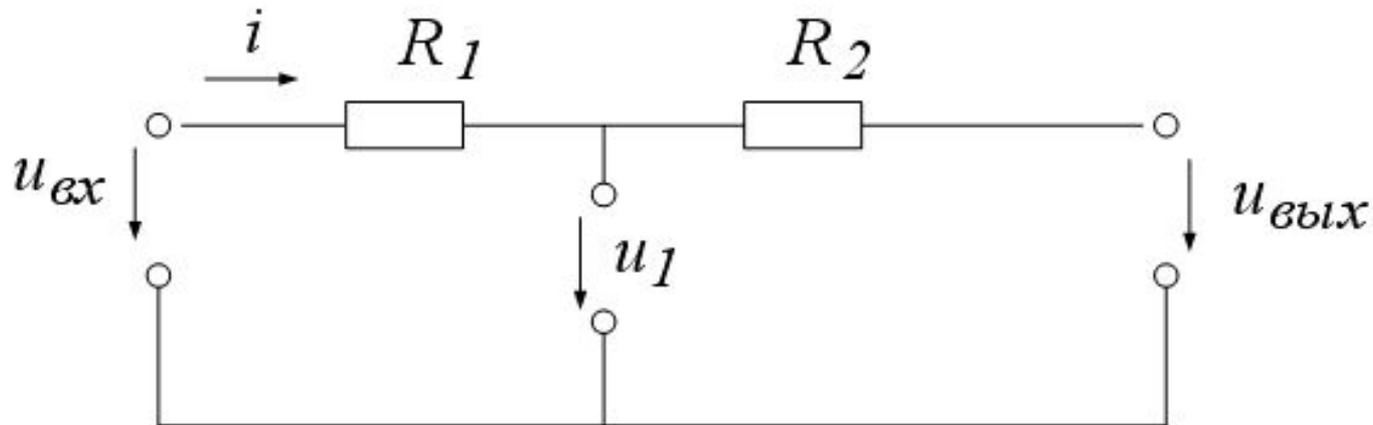
# 4.7. Устройства на ОУ

## 1. Инвертирующий усилитель



#### 4.7. Устройства на ОУ

Примем ОУ идеальным (входные токи ОУ равны нулю)



$$u_1 - u_{\text{вх}} + i \cdot R_1 = 0$$

$$-u_{\text{вх}} + i \cdot (R_1 + R_2) + u_{\text{вых}} = 0$$

$$u_{\text{вых}} = -K \cdot u_1$$

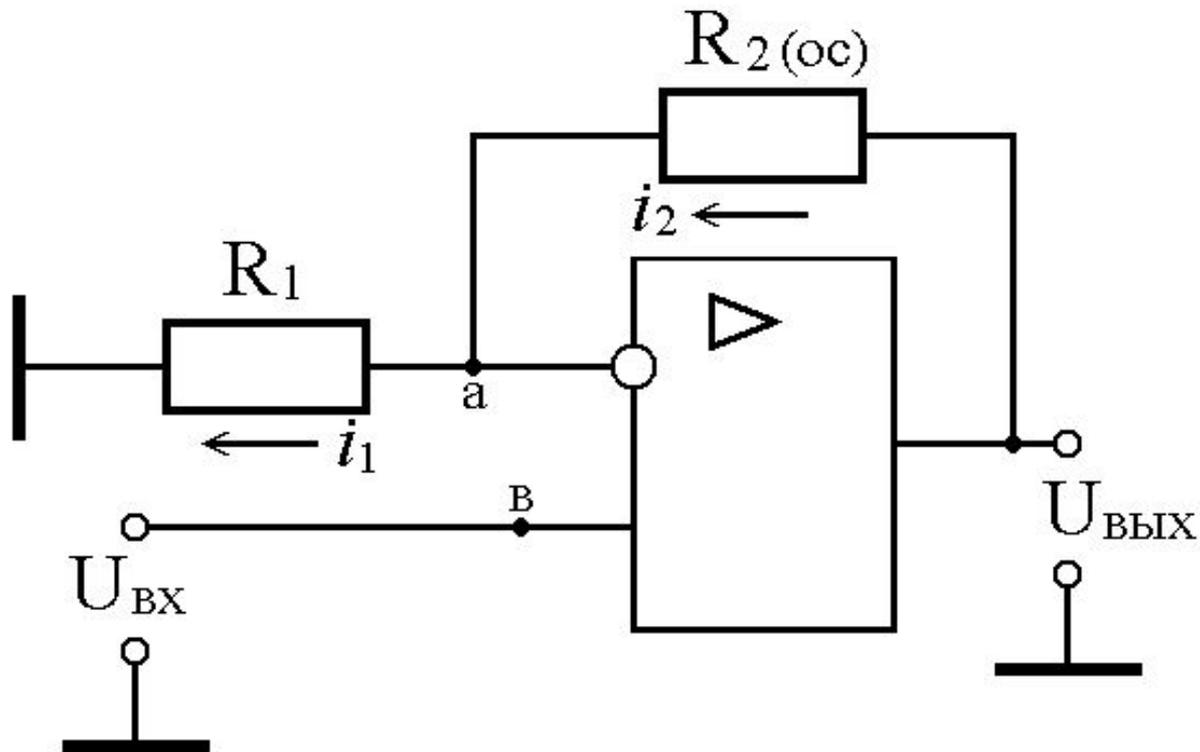
#### 4.7. Устройства на ОУ

$$u_{\text{вых}} = \frac{-R_2}{R_1} \cdot u_{\text{вх}}$$

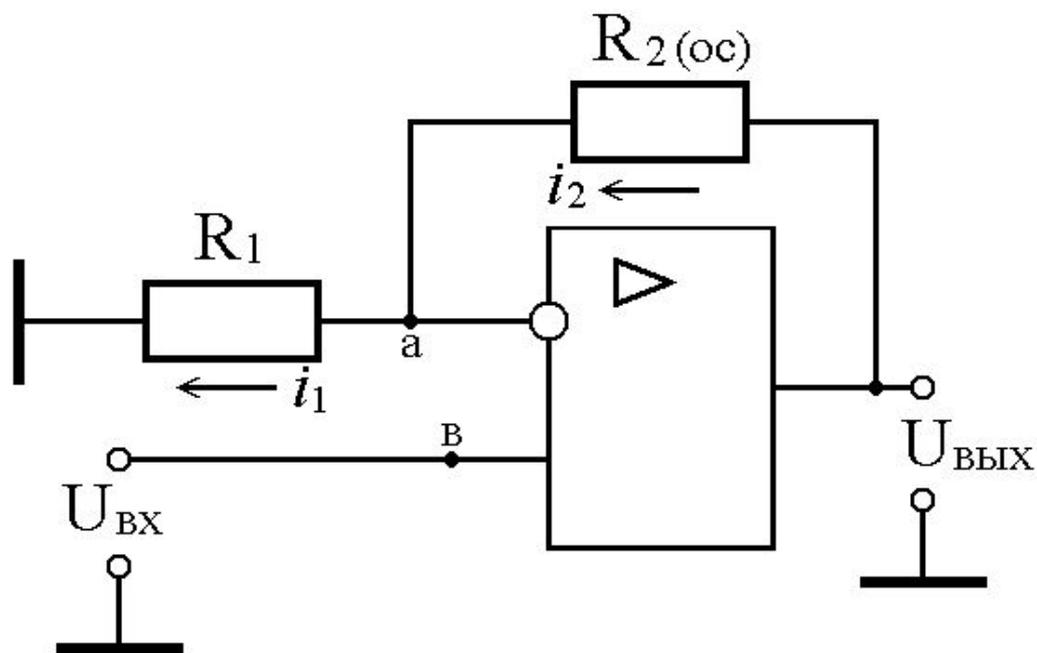
$$K_u = \frac{-R_2}{R_1}$$

*Коэффициент усиления инвертирующего усилителя не зависит от коэффициента усиления ОУ, а определяется только сопротивлениями резисторов в цепи обратной связи*

## 2. Неинвертирующий усилитель



# Неинвертирующий усилитель



$$\varphi_B = U_{\text{ВХ}}$$

$$\varphi_a - \varphi_B \approx 0$$

$$\varphi_a = U_{\text{ВХ}}$$

$$a: -i_1 + i_2 = 0$$

$$i_1 = i_2$$

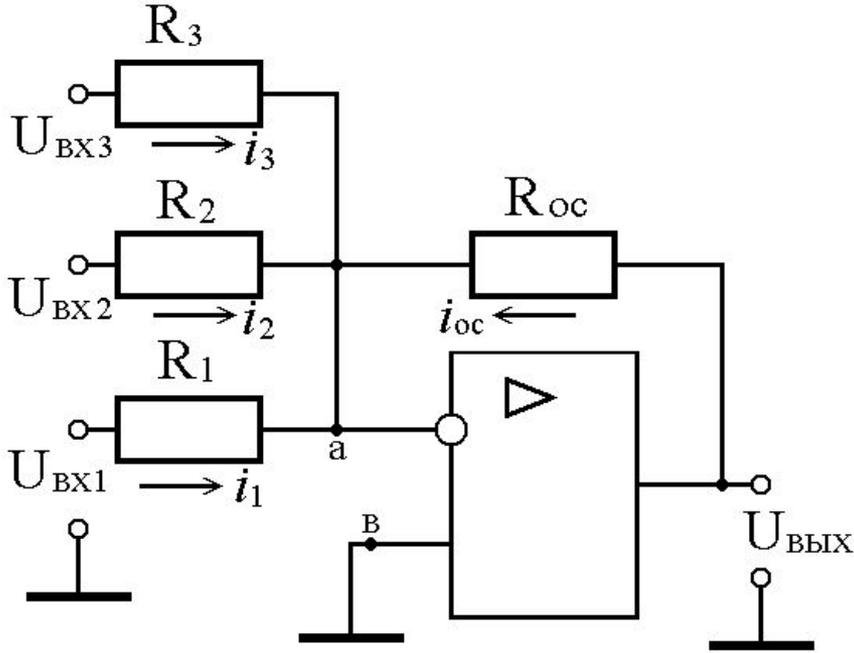
$$i_1 = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1}$$

$$i_2 = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_1 + R_2}$$

$$\frac{U_{\text{ВХ}}}{R_1} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_1 + R_2}$$

$$K_U = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

# 3. Сумматор



$$i_1 = \frac{U_{\text{BX1}}}{R_1}; \quad i_2 = \frac{U_{\text{BX2}}}{R_2}; \quad i_3 = \frac{U_{\text{BX3}}}{R_3}$$

$$i_{\text{oc}} = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_{\text{oc}}} = -\left(\frac{U_{\text{BX1}}}{R_1} + \frac{U_{\text{BX2}}}{R_2} + \frac{U_{\text{BX3}}}{R_3}\right)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\left(\frac{R_{\text{oc}}}{R_1} U_{\text{BX1}} + \frac{R_{\text{oc}}}{R_2} U_{\text{BX2}} + \frac{R_{\text{oc}}}{R_3} U_{\text{BX3}}\right)$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -(K_1 \cdot U_{\text{BX1}} + K_2 \cdot U_{\text{BX2}} + K_3 \cdot U_{\text{BX3}})$$

$$\varphi_B = 0$$

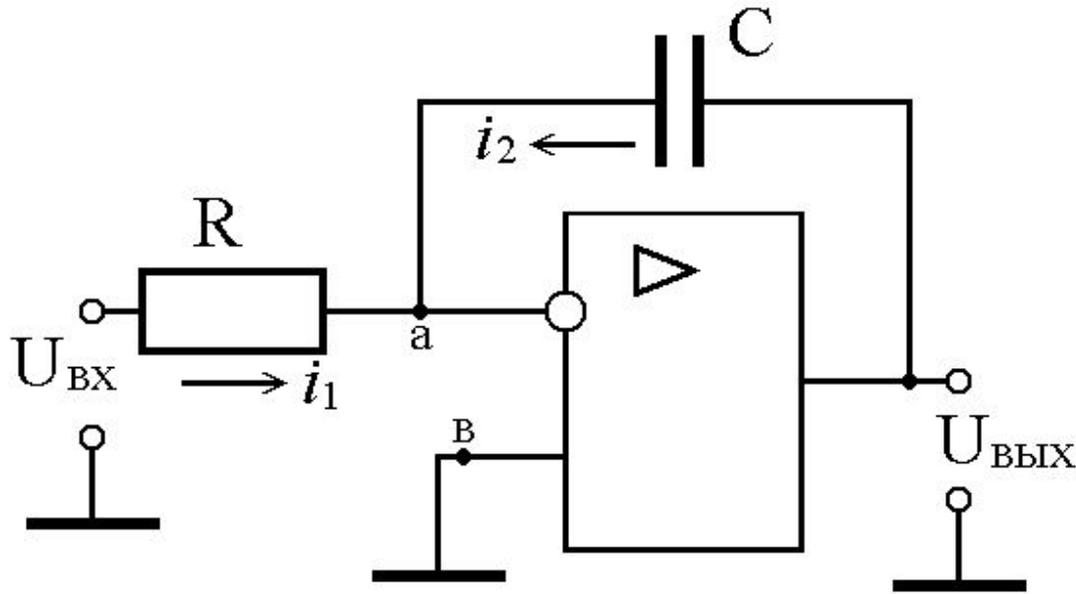
$$a: i_1 + i_2 + i_3 + i_{\text{oc}} = 0$$

$$\varphi_a - \varphi_B \approx 0$$

$$i_{\text{oc}} = -(i_1 + i_2 + i_3)$$

$$\varphi_a \approx 0$$

# 4. Интегрирующее устройство



$$i_1 = \frac{U_{\text{ВХ}}}{R}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = \frac{1}{C} \int i_2 \cdot dt$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -\frac{1}{CR} \int U_{\text{ВХ}} \cdot dt$$

$$\varphi_B = 0$$

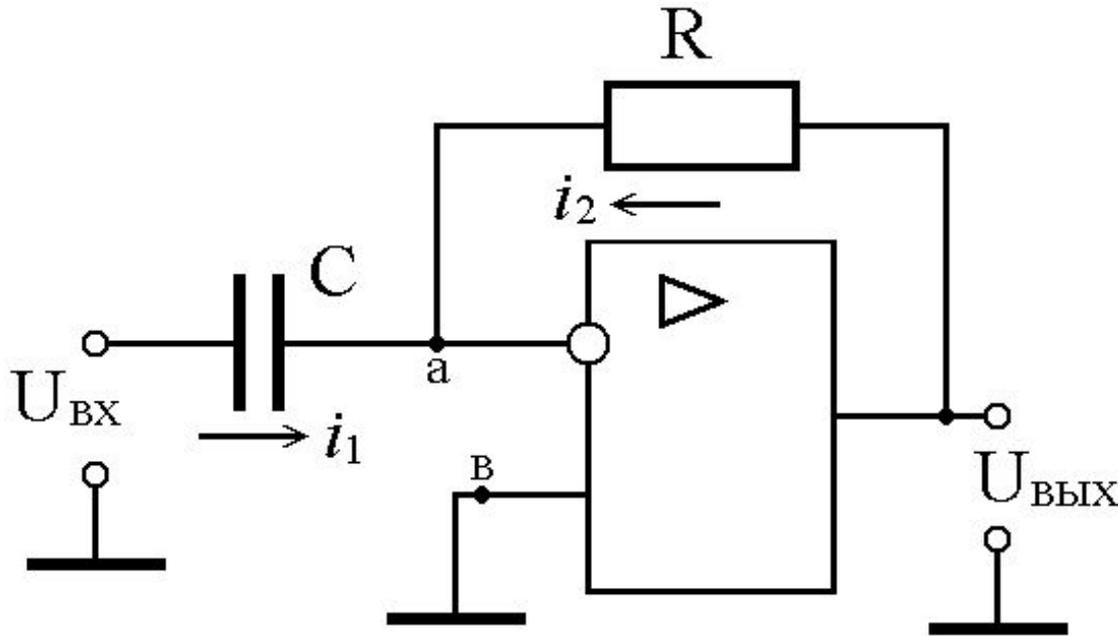
$$a: i_1 + i_2 = 0$$

$$\varphi_a - \varphi_B \approx 0$$

$$i_1 = -i_2$$

$$\varphi_a \approx 0$$

# 5. Дифференцирующее устройство



$$i_1 = C \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}$$

$$i_2 = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R}$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = i_2 \cdot R$$

$$U_{\text{ВЫХ}} = -C \cdot R \frac{dU_{\text{ВХ}}}{dt}$$

$$\varphi_{\text{В}} = 0$$

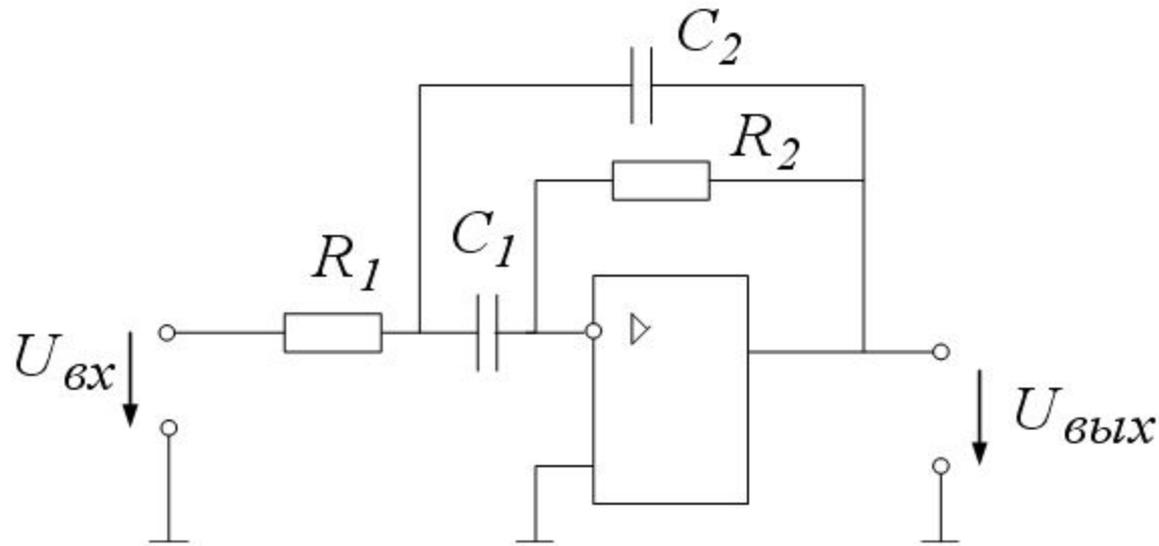
$$\varphi_{\text{а}} - \varphi_{\text{В}} \approx 0$$

$$\varphi_{\text{а}} \approx 0$$

$$a: i_1 + i_2 = 0$$

$$i_1 = -i_2$$

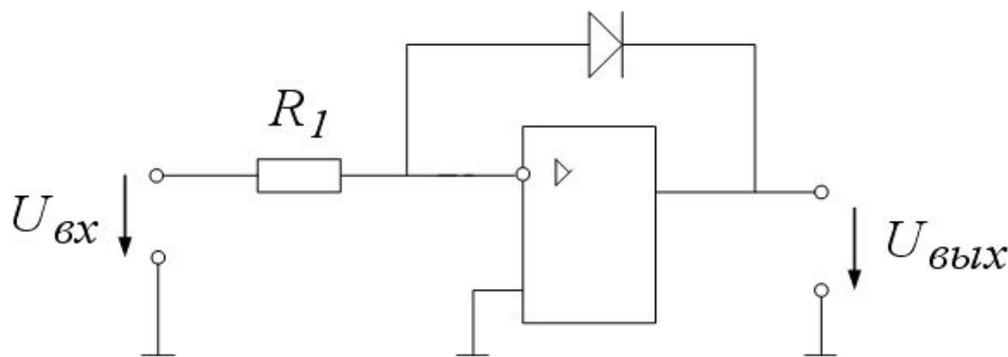
## 6. Избирательный усилитель



$$K_0 := \frac{R_2 \cdot C_1}{R_1 \cdot (C_1 + C_2)}$$

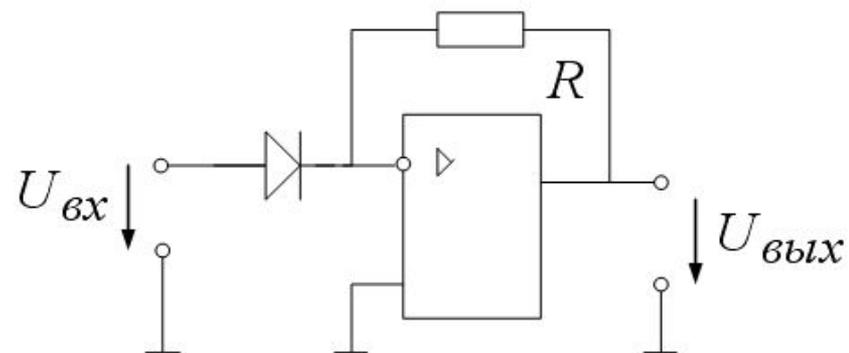
$$\omega_0 := \frac{1}{\sqrt{R_1 \cdot R_2 \cdot C_1 \cdot C_2}}$$

# 7. Логарифмирующий и антилогарифмирующий усилители



$$U_{\text{вых}} = \frac{1}{a} \cdot \ln \left( \frac{U_{\text{вх}}}{I_0 \cdot R_1} \right)$$

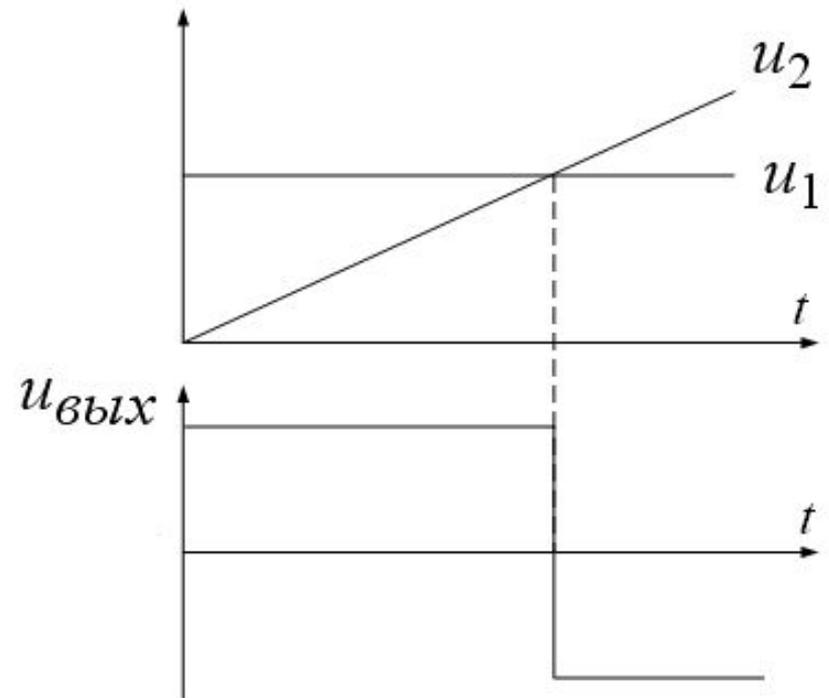
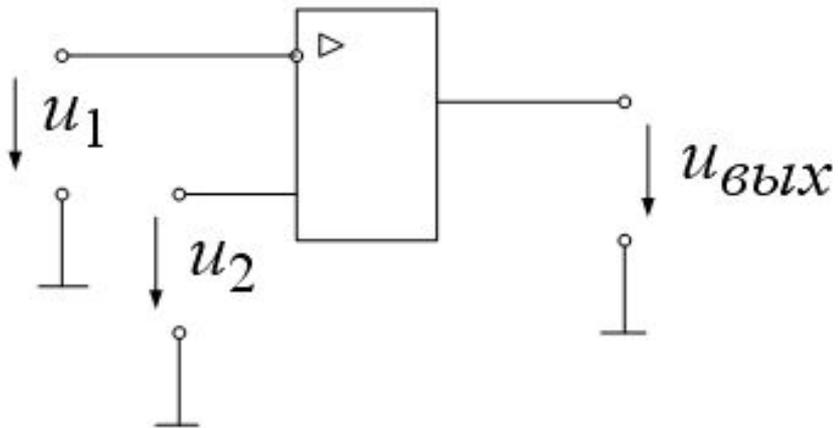
$I_0$  – обратный ток диода



$$U_{\text{вых}} = -I_0 \cdot R \cdot e^{-a \cdot U_{\text{вх}}}$$

# 8. Компаратор

- Компаратор – устройство для сравнения двух напряжений



# 8. Генератор

