

схемотехника

Лекция № 6.

Усилительные каскады. Принципы построения схем

# ПРИНЦИПЫ ПОСТРОЕНИЯ УСИЛИТЕЛЬНЫХ КАСКАДОВ

## Схемы межкаскадной связи в усилителях

Схемы межкаскадной связи обеспечивают передачу усиливаемого сигнала от источника сигнала на вход усилителя, от одного каскада к другому, от входной цепи последнего каскада в нагрузку.

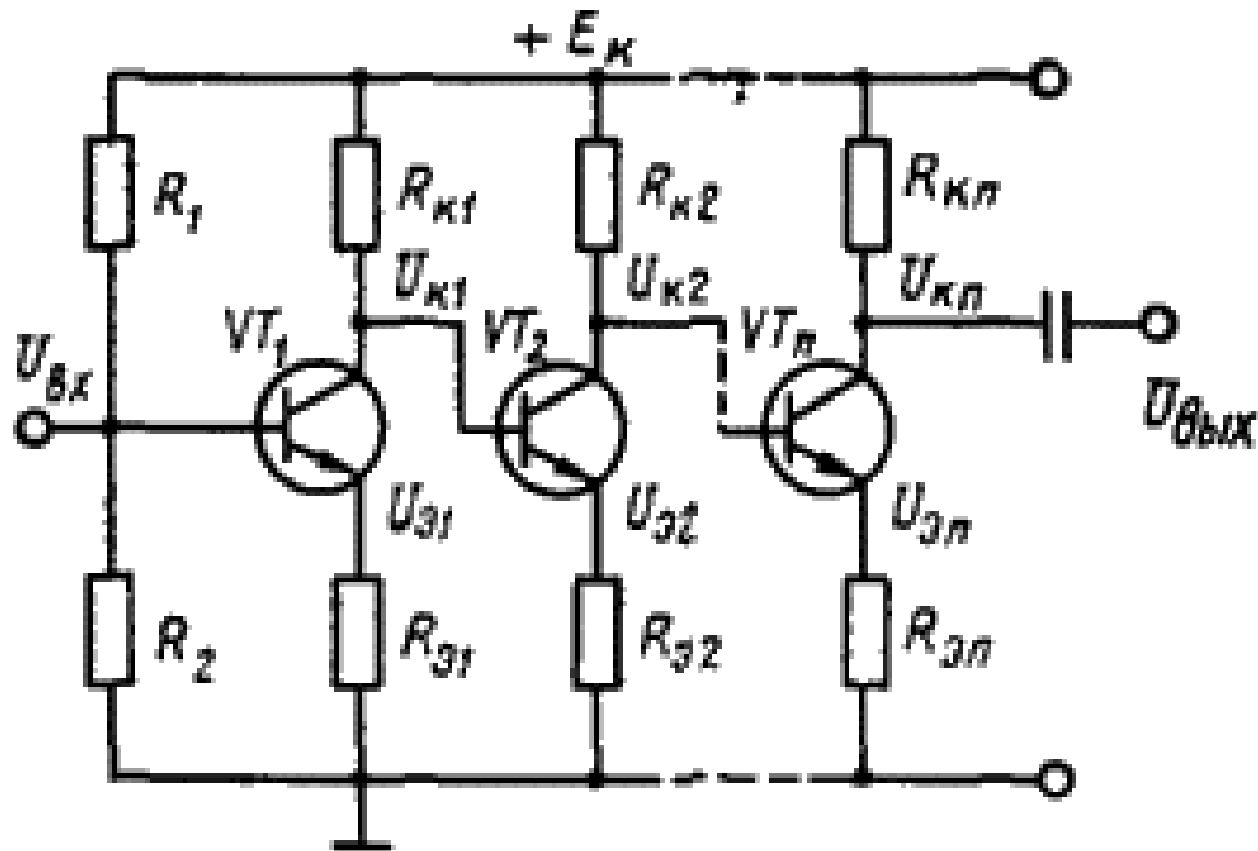
### *Виды межкаскадной связи:*

- Непосредственная;
- Резистивно-ёмкостная;
- Трансформаторная;
- Комбинированная.

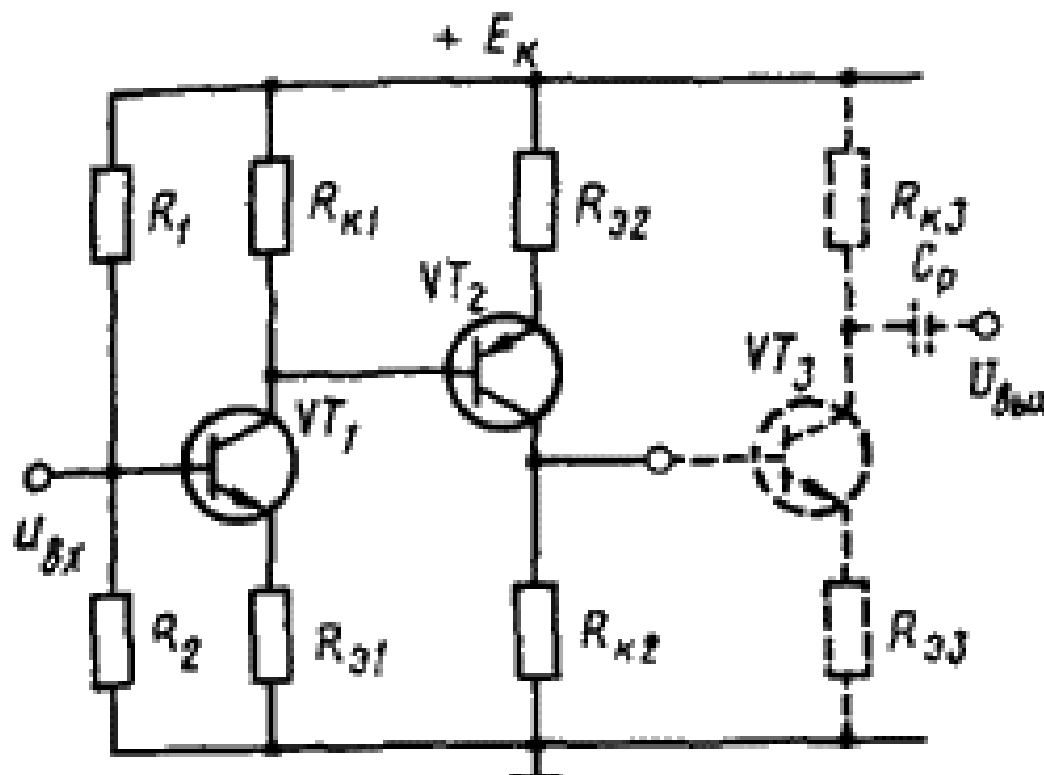
## Каскады с непосредственной связью

Связь между каскадами усилителя осуществляется при помощи элементов, не препятствующих прохождению переменной и постоянной составляющих усиливаемого сигнала.

Применяется в усилителях постоянного напряжения и тока.



Для увеличения коэффициента усиления усилителя с непосредственной связью используют чередующиеся транзисторы разного типа электропроводности — *комплементарный усилитель или усилитель с дополнительной симметрией*.



*Комплементарная пара (КП)* предназначена для нормирования сигналов относительно потенциала «земли» и усиления по мощности. Схема КП функционирует в линейном режиме **В** и служит усилителем мощности на выходе операционного усилителя, организованного из последовательно включенных дифференциальных каскадов.

## Каскады с резистивно-ёмкостной связью

В схемах усилителя между входными цепями последующих каскадов и выходными цепями предыдущих включаются разделительные конденсаторы  $C_p$ , которые преграждают путь постоянной составляющей усиливаемого сигнала на вход следующего каскада.

Используются в каскадах предварительных усилителей напряжения.

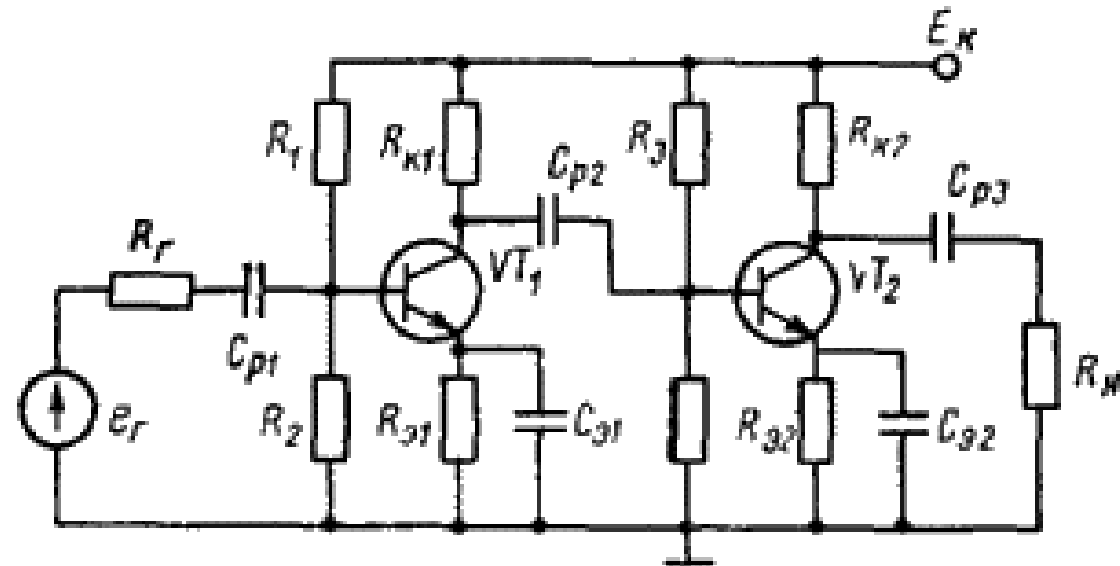
Коэффициенты усиления каскадов:

$$K_{U1} = \frac{U_{\text{ВЫХ1}}}{E_{\Gamma}} = - \frac{h_{21Э1} (R_{K1} \parallel h_{11Э2} \parallel R2 \parallel R3)}{R_{\Gamma} + h_{11Э1}}$$

$$K_{U2} = \frac{U_{\text{ВЫХ2}}}{U_{\text{ВХ2}}} = \frac{U_{\text{ВЫХ2}}}{U_{\text{ВЫХ1}}} = - \frac{h_{21Э2} (R_{K2} \parallel R_H)}{h_{21Э2}}$$

Общий коэффициент усиления:

$$K_u = U_{\text{ВЫХ2}} / E_{\Gamma} = K_{u1} \cdot K_{u2}.$$



Конденсаторы  $C_p$  совместно с входным сопротивлением последующего каскада образуют делитель напряжения. Для согласования по напряжению сопротивление конденсатора на самой нижней частоте усиления должно быть гораздо меньше входного сопротивления соответствующего каскада или нагрузки:  $Z_{Cp} = (\omega_H \cdot C_p)^{-1} \ll R_{\text{ВХ}}$ .

## Паразитные ОС в многокаскадных усилителях

При практическом использовании многокаскадных усилителей почти всегда существуют паразитные ОС, которые могут вызывать самовозбуждение усилителя.

### *Распространённые виды паразитных ОС:*

- ⇒ Электростатические;
- ⇒ Электромагнитные;
- ⇒ Электромеханические;
- ⇒ Паразитные ОС через общий источник питания.

*Электростатическая* связь возникает за счёт паразитных ёмкостей, связывающих последующие каскады с предыдущими. Эта связь представляет собой параллельную обратную связь по напряжению.

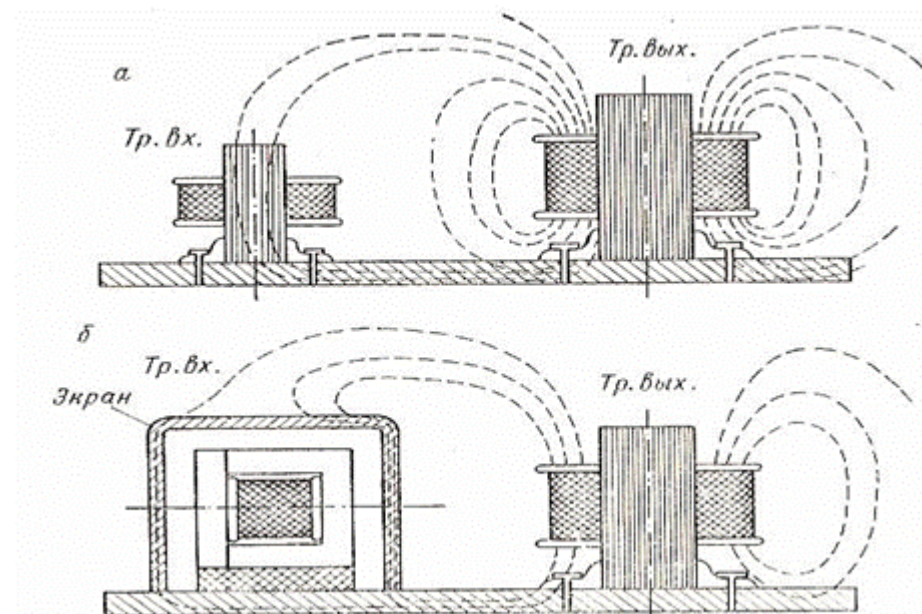
При нескольких каскадах эта связь может стать положительной и привести к генерации,  $\beta \cdot K \geq 1$  (десятки кГц).

Методы ослабления такой паразитной связи: разнесение входных и выходных цепей УУ, снижение паразитных ёмкостей между каскадами.

**Электромагнитная** связь возникает за счёт магнитной связи между трансформаторами предыдущих и последующих усилительных каскадов.

Искажение сигнала проявляется в виде фона переменного тока.

Для её устранения применяют экранирование трансформаторов, на этапе проектирования платы трансформаторы устанавливают в положении минимального влияния.



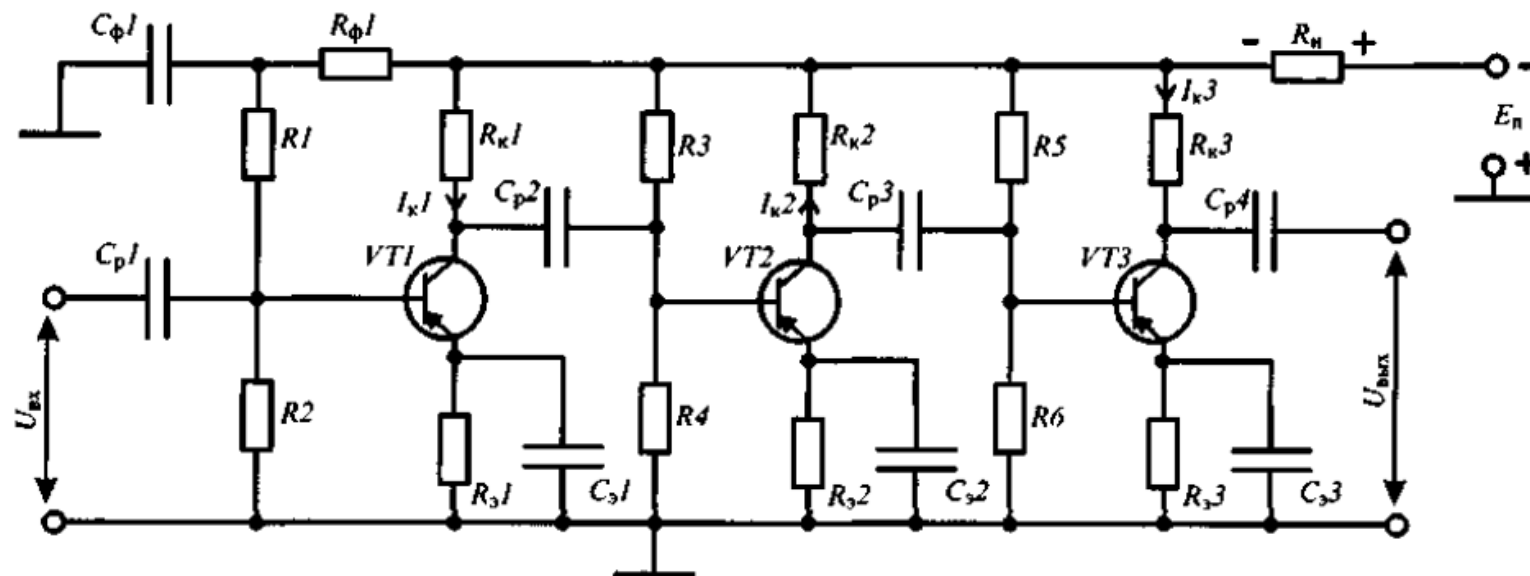
**Электромеханическая** связь проявляется в УУ, подвергающихся механическому воздействию (например, сотрясениям или вибрациям).

Для её устранения используют амортизацию вибрирующих частей схемы или всего усилителя.

**Паразитные ОС через общий источник питания (ИП)** возникает за счёт падения напряжения на внутреннем сопротивлении ИП при протекании через него переменных составляющих токов каскада. Это приводит к генерации усилителя на очень низких частотах, ниже  $f_H$  (обычно  $\sim 1$  кГц).

Для ослабления таких видов ОС применяется развязывающий фильтр, ослабляющий паразитные ОС между каскадами, которые могут возникать через общий ИП.

Включение развязывающего фильтра понижает напряжение питания первых каскадов усилителя, что позволяет применить в них менее мощные транзисторы, чем в оконечных каскадах.



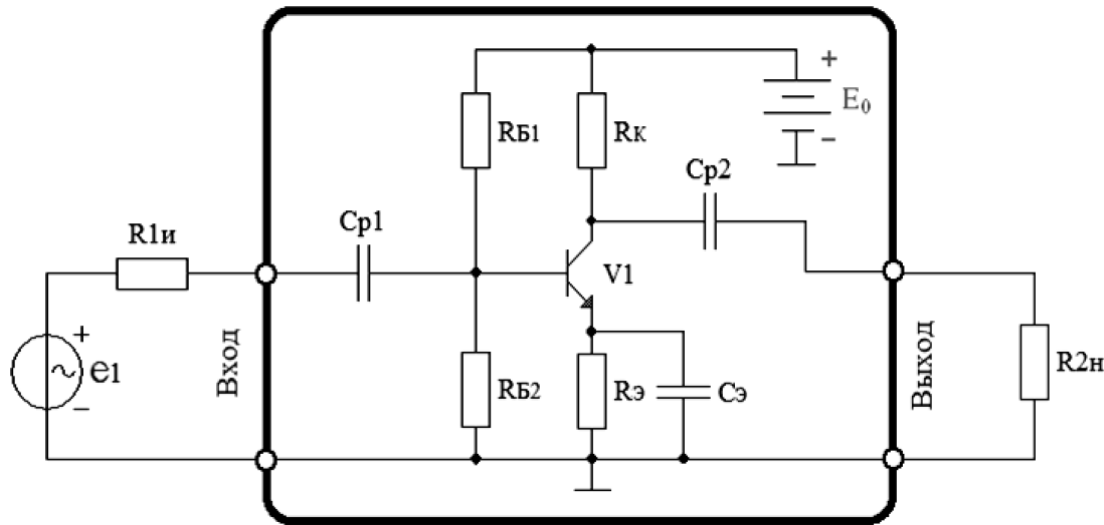
$$Z_{C\Phi} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_H \sqrt{2}} \ll R_{\Phi}$$



# КАСКАДЫ ПРЕДВАРИТЕЛЬНОГО УСИЛЕНИЯ

## Схема усилительного каскада с общим эмиттером

на средней частоте без ООС:



$$K_{\text{сKB}} = \frac{R_6}{(R_{1И} + R_6)} \cdot \frac{h_{21} R_H}{R_{\Gamma} + R_{\text{ВХ}}}$$

$$R_{\Gamma} = R_{1И} \parallel R_6 = \frac{R_{1И} \cdot R_6}{R_{1И} + R_6}, \quad \text{где}$$

$$R_6 = \frac{R_{Б1} \times R_{Б2}}{R_{Б1} + R_{Б2}}$$

Сопротивление нагрузки каскада с подключением внешней цепи с  $R_{2Н}$ :

$$R_H = R_K \parallel R_{2Н} = \frac{R_K \cdot R_{2Н}}{R_K + R_{2Н}}$$

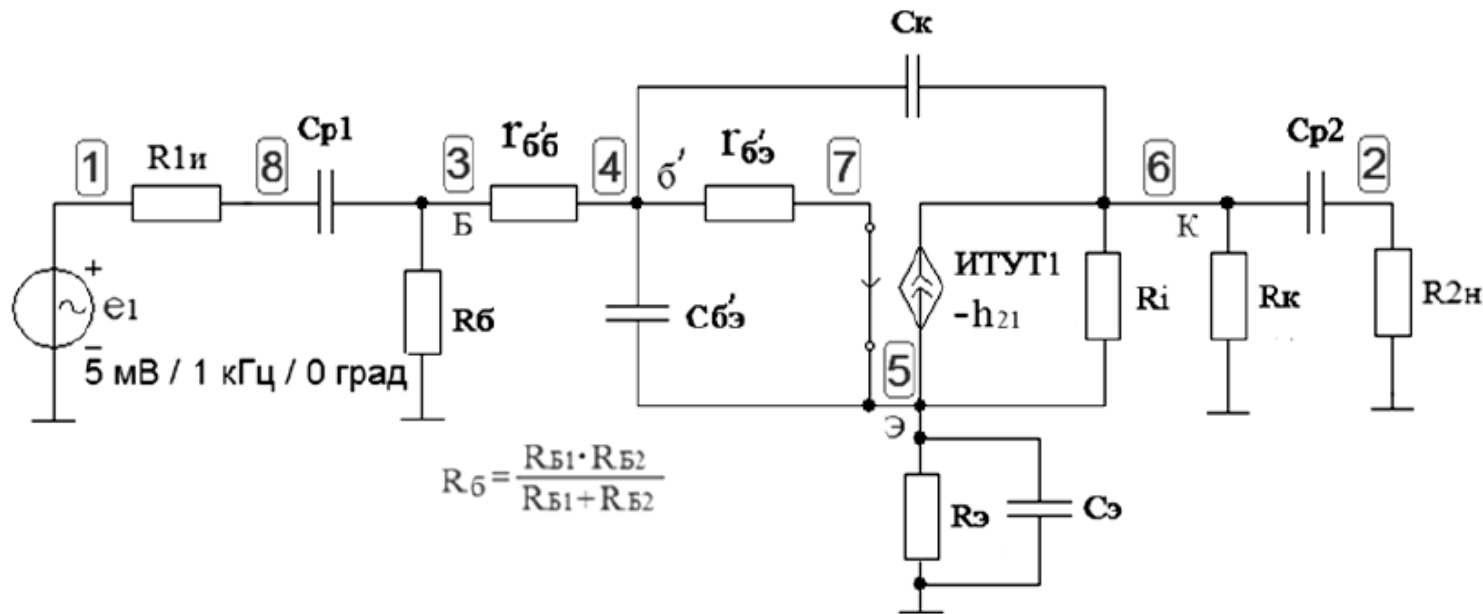
С ООС:

$$K_{\text{сKB}, F} = \frac{R_6 h_{21} R_H}{R_6 R_{1И} + (R_6 + R_{1И}) R_{\text{ВХ}, F}} \quad F = 1 + \frac{h_{21} R_{\text{Э}}}{h_{11} + R_{\text{Э}} + R_{\Gamma}}, \quad R_{\Gamma} = R_{1И} \parallel R_6.$$

Эквивалентное входное сопротивление каскада с ООС:  $R_{\text{ВХ}, F} = h_{11} + (1 + h_{21}) R_{\text{Э}}$

Эквивалентное сопротивление нагрузки каскада с ООС:  $R_H = R_K \parallel R_{2Н}$

## Эквивалентная схема усилительного каскада с общим эмиттером по переменному сигналу



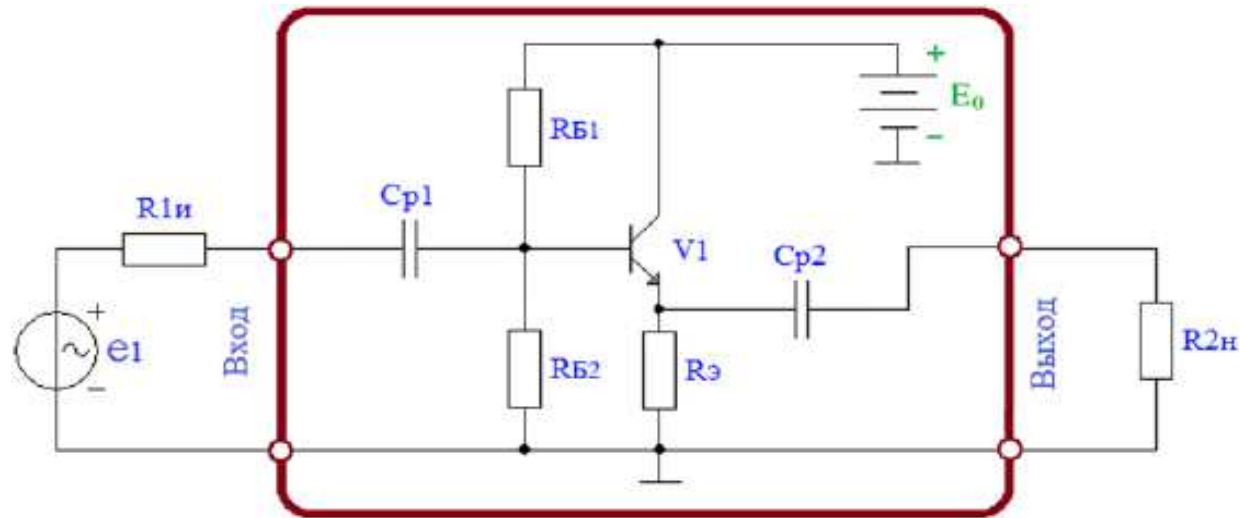
Эквивалентная входная ёмкость:  $C_0 = C_{бэ}' + C_K \times \left( 1 + \frac{h_{21}}{h_{11}} R_H \right)$  будет определять частоту верхнего среза:

$$f_{в\sqrt{2}} = \frac{1}{2\pi C_0 \times \left[ r_{бэ}' \parallel (r_{бб}' + R_\Gamma) \right]}, \quad \text{где } R_{вх} = h_{11}$$

При включении ООС:  $f_{в\sqrt{2}, F} = f_{в\sqrt{2}} F$

## Эмиттерный повторитель

Усилительный каскад, в котором транзистор включен по схеме с общим коллектором.



Фазы входного и выходного сигналов совпадают.

Сквозной коэффициент усиления: 
$$K_{\text{ОК СКВ}} = \frac{R_6}{R_{1И} + R_6} \times \frac{(1 + h_{21})R_H}{R_{\Gamma} + R_{\text{ЭК ОК}}}, \quad \text{где } R_{\Gamma} = R_{1И} \parallel R_6 = \frac{R_{1И} \times R_6}{R_{1И} + R_6}.$$

ЭП можно рассматривать как обычный каскад с ОЭ, охваченный 100 % ООС, т.е.  $\beta \approx 1$  и коэффициент усиления:

$$K_{u \text{ OC}} = \frac{(\beta + 1)R_H}{r_{\text{б'б}} + r_{\text{б'э}} + (\beta + 1)R_H}, \text{ т. е. } K_{u \text{ OC}} < 1.$$

Как правило, это величина  $K_{u \text{ OC}} = 0,85 \dots 0,95$ .

Сопротивление нагрузки по переменной составляющей усиленного сигнала:

$$R_{H\approx} = R_{\Theta} \parallel R_H.$$

Входное сопротивление с ООС:

$$R_{ВХ\text{ ОС}} = (1 + h_{21\Theta}) \cdot R_{H\approx} = (\beta + 1) \cdot R_{H\approx}, \text{ или в комплексной форме: } \dot{Z}_{ВХ\text{ ОС}} = (\beta + 1) \dot{Z}_H.$$

Выходное сопротивление ЭП определяется как внутреннее сопротивление эквивалентного генератора:

$$R_{ВЫХ} = R_{\Gamma} / (1 + h_{21\Theta})$$

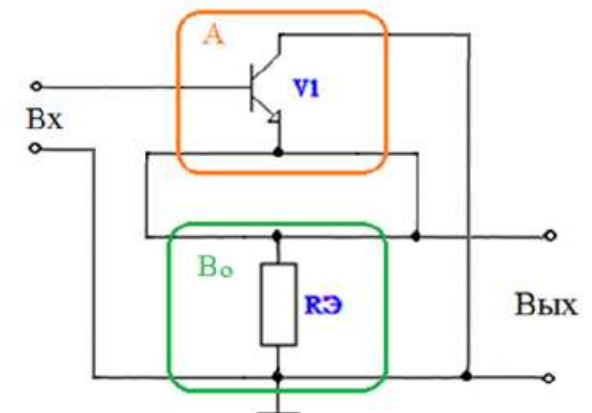
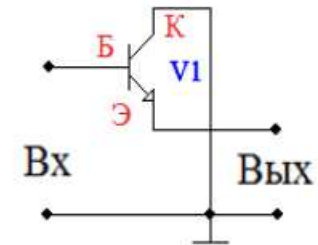
$$Z_{ВЫХ} = \frac{R_r + r_{\delta\delta} + r_{\delta\Theta}}{(\beta + 1)}.$$

или в комплексной форме:

Из выражений видно, что  $Z_{ВХ\text{ ОС}}$  определяется  $R_{H\approx}$ ,  $Z_{ВЫХ\text{ ОС}} - R_{\Gamma}$ , т.е. ЭП как трансформатор сопротивлений.

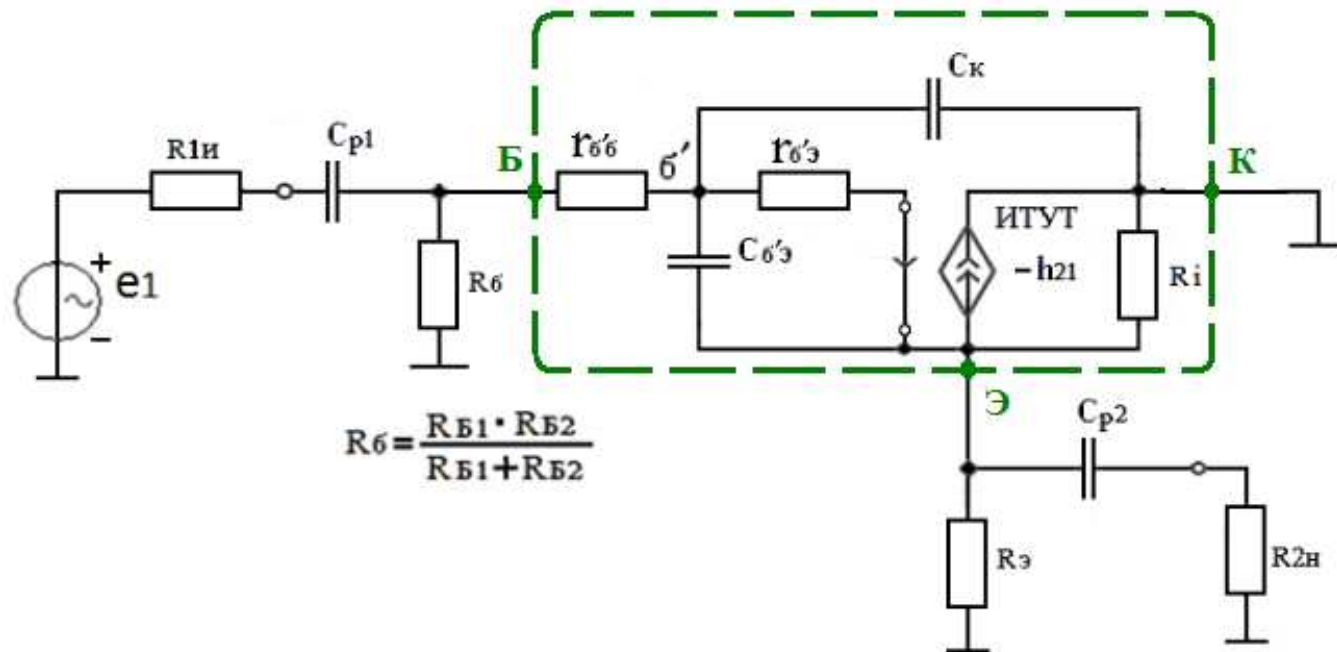
$R_{ВХ}$  ЭП выше, а величина  $C_{ВХ}$  и  $R_{ВЫХ}$  ниже, чем у каскада с ОЭ.

ООС по напряжению последовательного типа.



Структурная схема ОС  
в схеме ОК

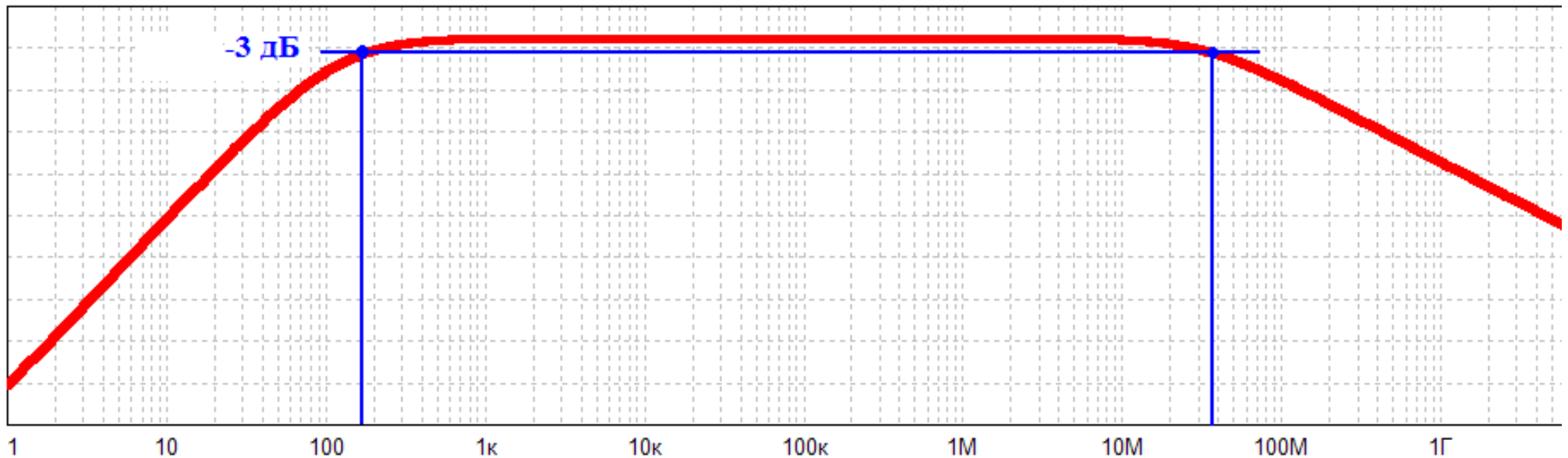
## Динамическая эквивалентная схема каска с ОК



Входное сопротивление каскада:  $R_{вх\text{ ОК}} = h_{11} + (1 + h_{21})R_{Н}.$

Входное сопротивление транзистора:  $h_{11} = r_{б'б} + r_{б'э}.$

## АЧХ каскада с ОК

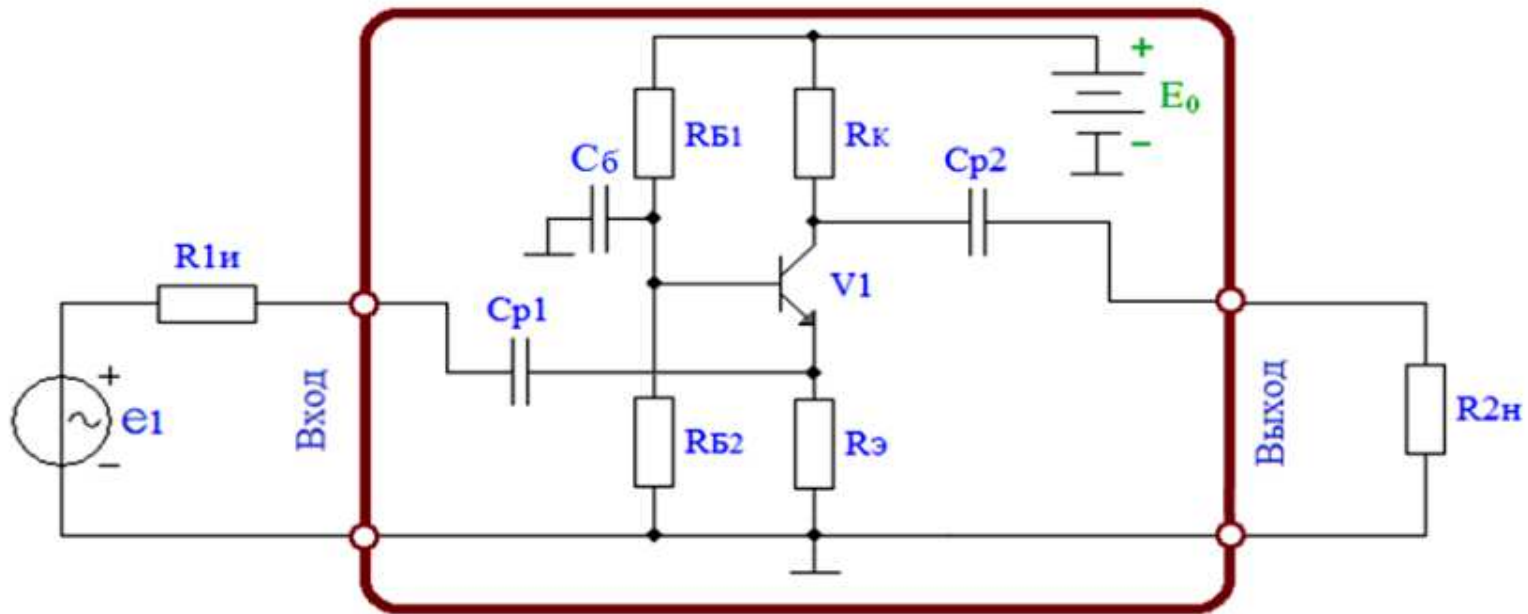


$$\omega_{-3\text{дБ}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{-3\text{дБ}} \approx \frac{1}{\left( \frac{C_{\text{Э}}}{S \cdot R'_H} + C_K \right) R'_\Gamma} ; \quad \omega_{-3\text{дБ}, \text{max}} \Big|_{R'_H \rightarrow \infty, R'_\Gamma \rightarrow \infty} = \frac{1}{C_K \cdot r_B} .$$

Типичные значения:  $C_K = 10$  пФ,  $r_{БЭ} = 10$  Ом, тогда

$\omega_{-3\text{дБ}, \text{max}} = 10^{10}$  или  $f_{-3\text{дБ}, \text{max}} = 1.5$  ГГц – очень широкополосная схема.

## Каскад с общей базой



**Коэффициент передачи тока для каскада с ОБ:**

БОС (с подключенным  $C_б$ ):  $K_{iOC} = h_{21Э} / (h_{21Э} + 1) < 1$ ,

ОС:  $K_{iOC} = \beta / (\beta + 1) < 1$

из-за ответвления в базу части тока эмиттера:  $I_Э - I_Б = I_К$ .

**Коэффициент усиления по напряжению ОБ с ОС:**  $K_{uOC} = (\beta + 1) \cdot R_Н / R_{ВХ}$ .

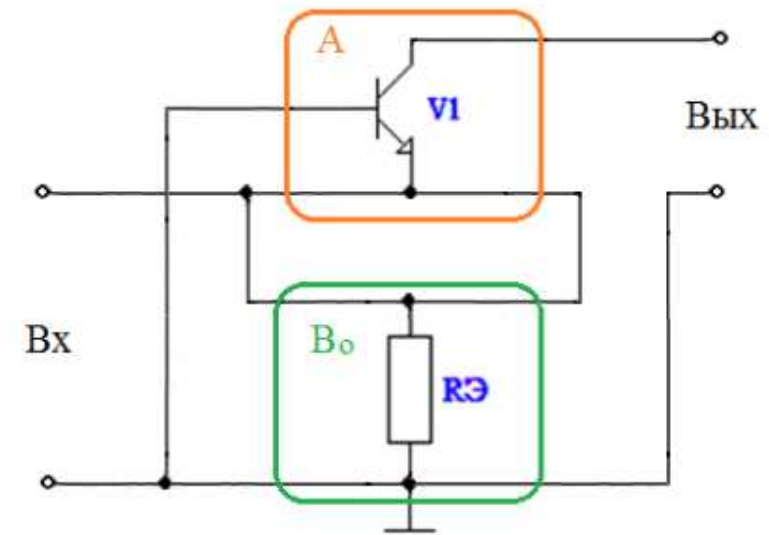
**Входное сопротивление:**  $R_{ВХ} = r_Э = 25 \text{ [мВ]} / I_Э$  – мало, не зависит от нагрузки.

**Выходное сопротивление:**  $R_{ВХ} = U_{ВЫХ} / I_{ВХ} = R_К$ .

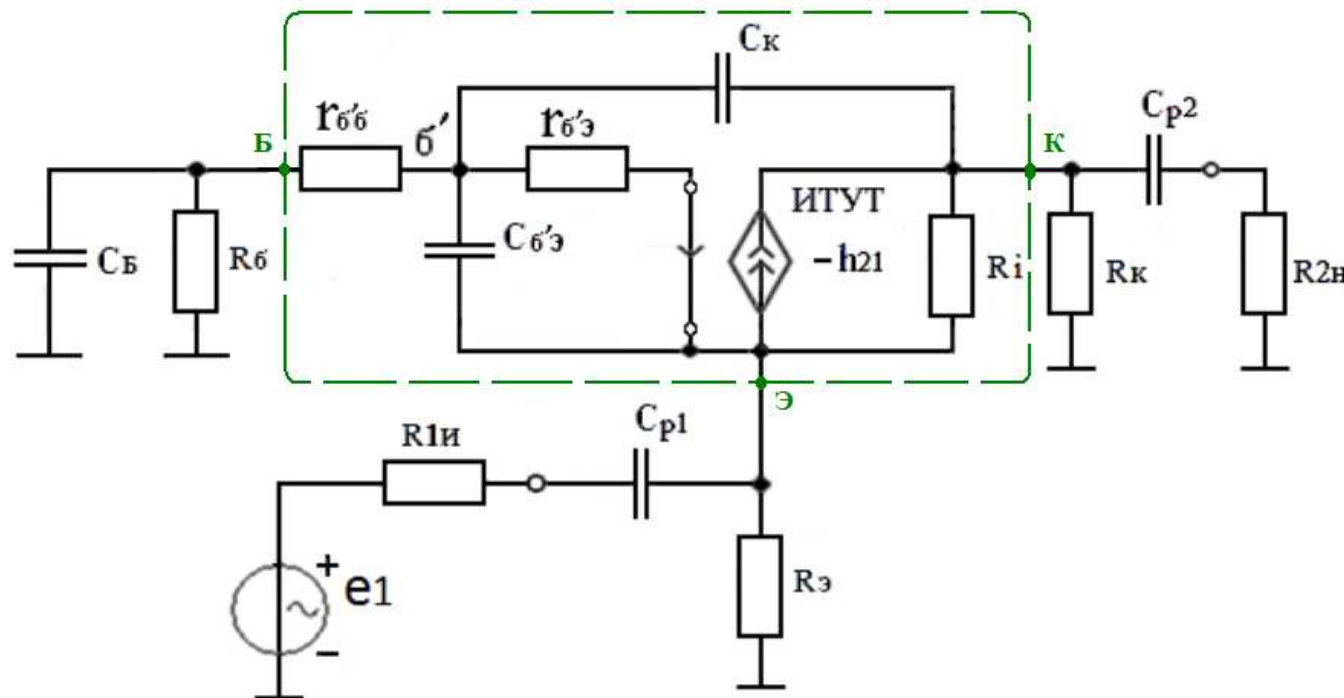
Каскад с ОБ можно рассматривать как каскад с ОЭ, охваченный 100 % параллельной ОС по току, т.к.  $I_K$  в схеме с ОБ протекает по сопротивлению  $R_K$ , включенному параллельно источнику сигнала.

Фазу выходного сигнала не меняет относительно фазы входного.

**Применение:** усилители РЧ в радиоприемниках и телевизорах, усилители ПЧ в ЧМ-приемниках и т. д.



**Динамическая эквивалентная схема каскада с ОБ**



Сквозной коэффициент усиления:

$$K_{\text{ОБ скв}} = \frac{R_{\text{Э}}}{R_{1\text{И}} + R_{\text{Э}}} \cdot \frac{h_{21} R_{\text{Н}}}{h_{11} + R_{\Gamma} (1 + h_{21})},$$

где

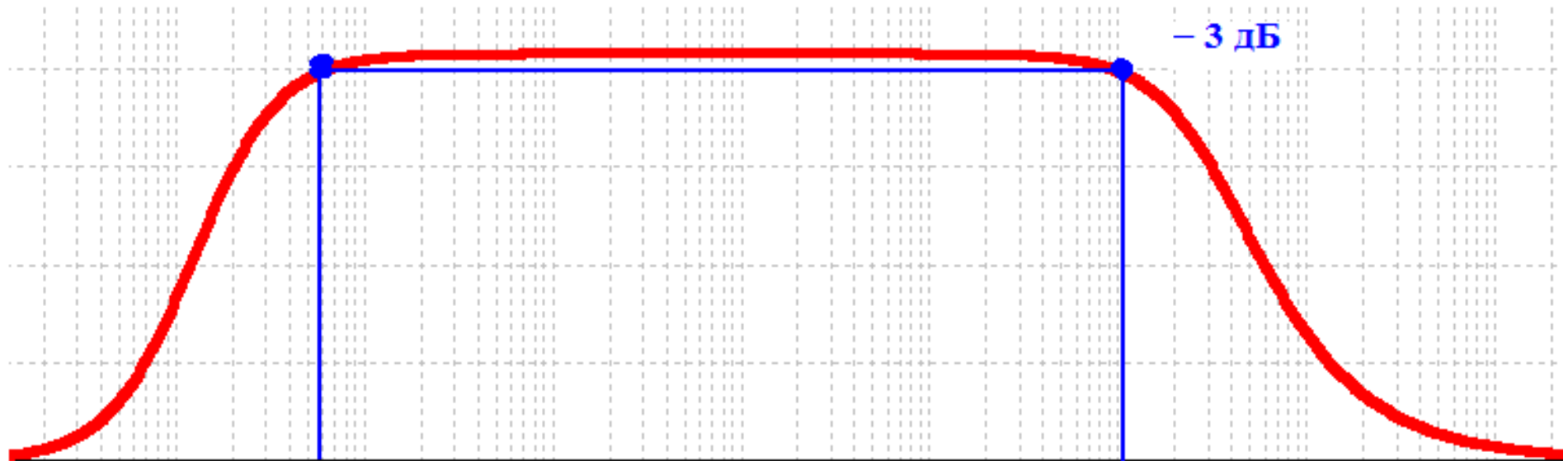
$$R_{\Gamma} = R_{1\text{И}} \parallel R_{\text{Э}} = \frac{R_{1\text{И}} \times R_{\text{Э}}}{R_{1\text{И}} + R_{\text{Э}}},$$

$$R_{\text{Н}} = R_{\text{К}} \parallel R_{2\text{Н}} = \frac{R_{\text{К}} \times R_{2\text{Н}}}{R_{\text{К}} + R_{2\text{Н}}},$$

$$R_{\text{Б}} = \frac{R_{\text{Б1}} \times R_{\text{Б2}}}{R_{\text{Б1}} + R_{\text{Б2}}}, \quad h_{11} = r_{\text{Б'Б}} + r_{\text{Б'Э}}.$$



## АЧХ каскада с ОБ



$$\omega_{-3дБ} = 2 \cdot \pi \cdot f_{-3дБ} \approx \frac{1}{\frac{C_{\text{Э}}}{S} + C_K R'_H}.$$

Однако через переход Б–Э действует паразитная ОС:  $C_{\text{БЭ}} + (1 + K_0) \cdot C_K$ , т.е. есть эффект Миллера.

$\omega_{-3дБ, \text{ ОБ}} \gg \omega_{-3дБ, \text{ ОЭ}}$ , т.е. схема с ОБ более широкополосная, чем схема с ОЭ.

## Подбор ёмкостей конденсаторов каскада

Выбор конденсаторов  $C_p$  и  $C_\delta$  должен быть таким, чтобы в области средних частот их ёмкостные сопротивления были достаточно малы и ими можно было пренебречь. Расчёт основан на условиях, что сопротивление **разделительного конденсатора** на входе в каскад много меньше входного сопротивления каскада:  $C_{p1} \ll R_{вх}$  или

$$\frac{1}{\omega_H C_p} \cong \frac{R_{вх}}{10},$$

где  $\omega_H = 2\pi f_H$  – нижняя круговая частота рабочего диапазона.

Отсюда

$$C_p = \frac{10}{\omega_H \cdot R_{вх}} = \frac{10}{2\pi f_H R_{вх}}.$$

Расчёт **блокировочного конденсатора** определяется условием:

$$\frac{1}{\tau_H} = \frac{1}{\omega_H \cdot C_\delta} \cong \frac{R_{ос}}{10}$$

Тогда,

$$C_\delta = \frac{10}{\omega_H \cdot R_{ос}} = \frac{10}{2\pi \cdot f_H \cdot R_\Sigma}.$$