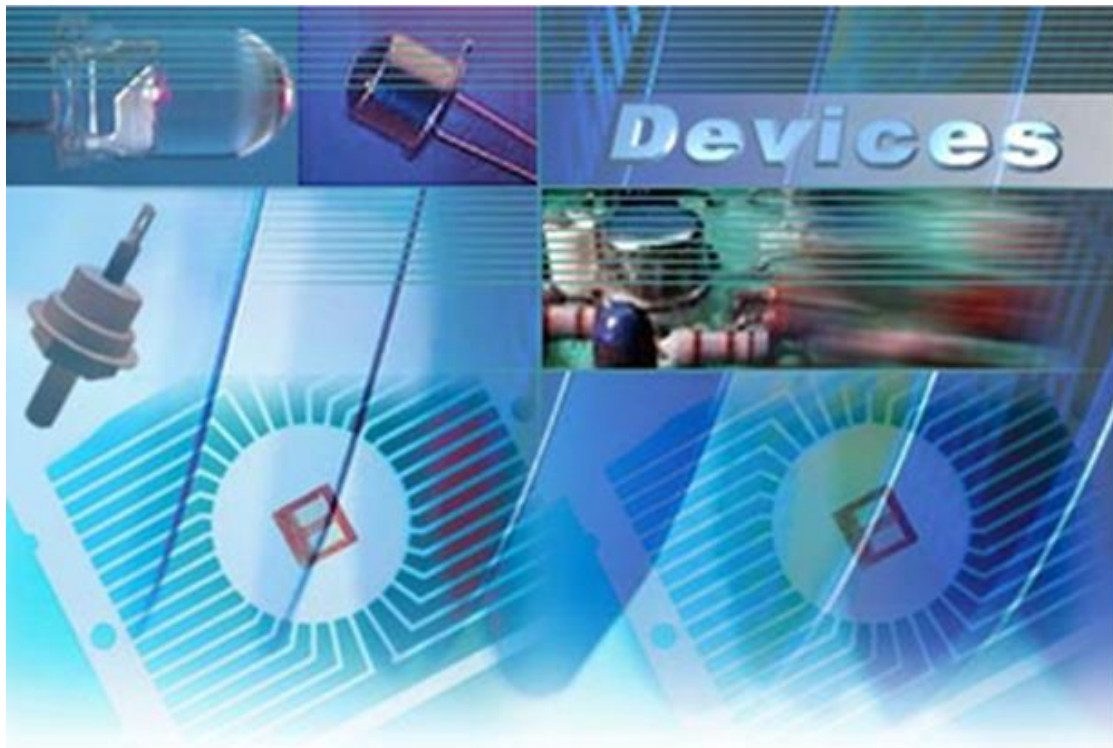




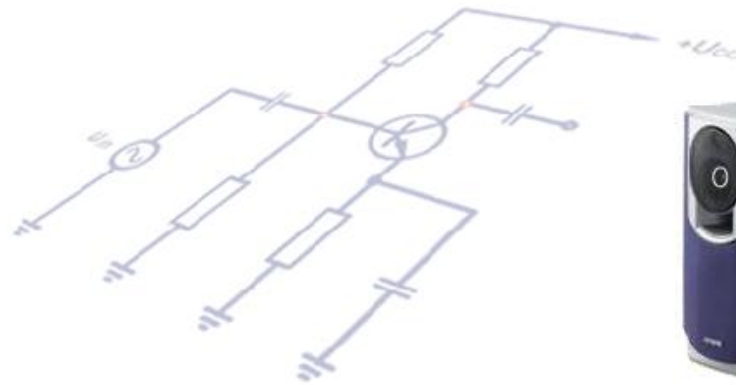
# *Работа на транзистора като усилвател*



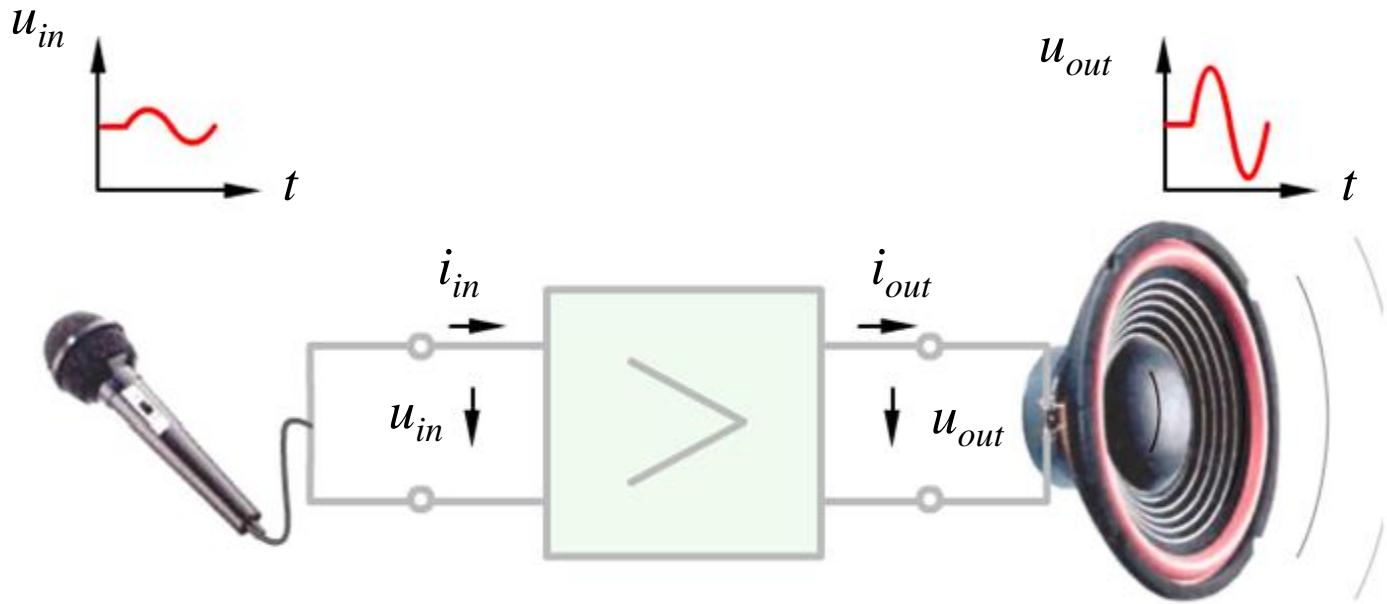
Полупроводникови  
елементи

# Въведение

**Усилвател** е електронна схема, която увеличава амплитудата на сигнала. Усилвателите управляват високоговорителите на стерео системи, за да се възпроизведе достатъчно силен звуков сигнал, усилват видео сигнала за да се подобри контраста и яркостта на телевизионния образ, усилват управляващи сигнали в системи за контрол и др.



# Какво е усилвател?



$$A_U = \frac{u_{out}}{u_{in}} \quad A_i = \frac{i_{out}}{i_{in}} \quad A_p = \frac{p_{out}}{p_{in}}$$

Транзисторът работи като усилвател, ако при осигурен подходящ постоянно токов режим, към входа му е свързан **източник на променлив сигнал**, а в изхода – **товар**, върху който се получава усиленият променлив сигнал.

# Цели и предпоставки

Разглеждат се основите на транзисторните усилватели с биполярни транзистори.

**Познавате**

**Разбирате**

**Анализирате**

След изучаване на материала вие би трябвало да:

- ✿ Различни конфигурации на транзисторни усилватели
- ✿ Схемите за постоянно токово захранване
- ✿ Променливо токовите еквивалентни схеми
- ✿ Граничните честоти на транзистора
- ✿ Как се получава изходния променлив сигнал
- ✿ Важността на товарната права и работната точка
- ✿ Влиянието на честотата на сигнала върху усилването
- ✿ Токовете и напреженията в усилвателни схеми
- ✿ Амплитудата на изходния сигнал

**Предпоставки:** биполярни транзистори

# Схеми на включване

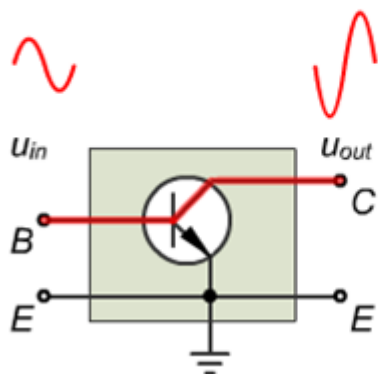
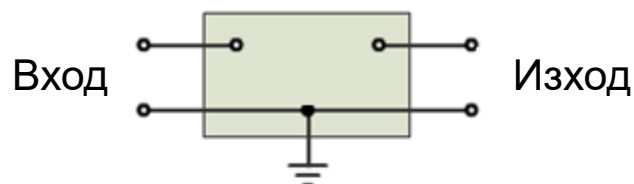


Схема ОЕ

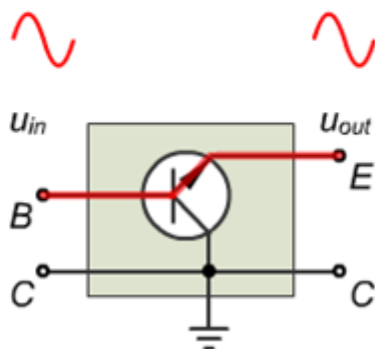


Схема ОК

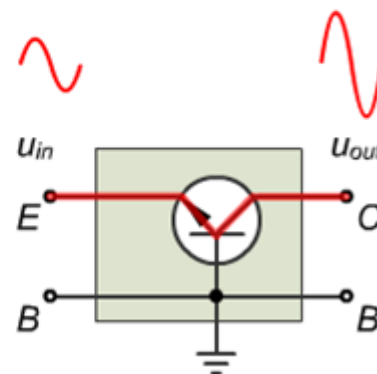


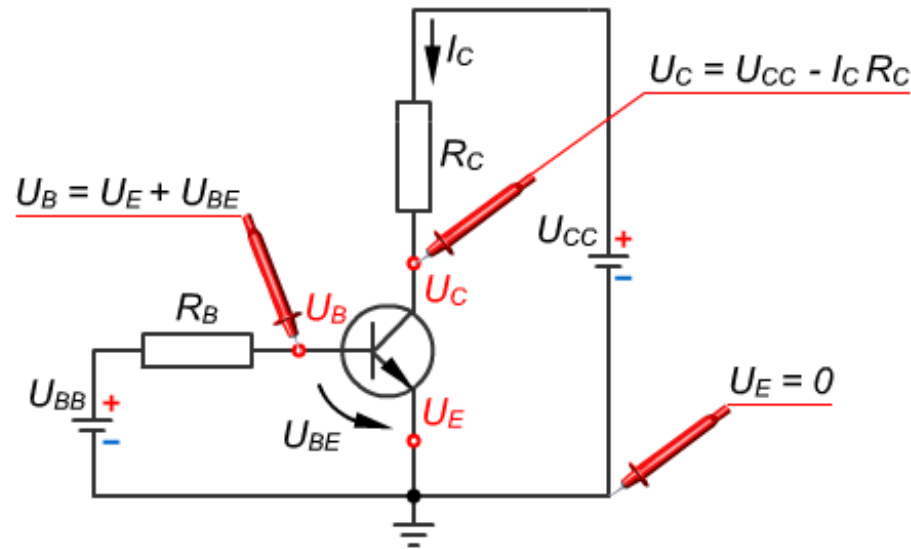
Схема ОБ

В зависимост от това, кой от електродите на транзистора е общ за входната и изходната верига **по отношение на променливата съставка** на сигнала се различават схеми ОЕ, ОБ и ОК.

Схема ОЕ дефазира изходния сигнал на  $180^\circ$  спрямо входния. При схеми ОБ и ОК сигналите са във фаза.

# Установяване на работна точка

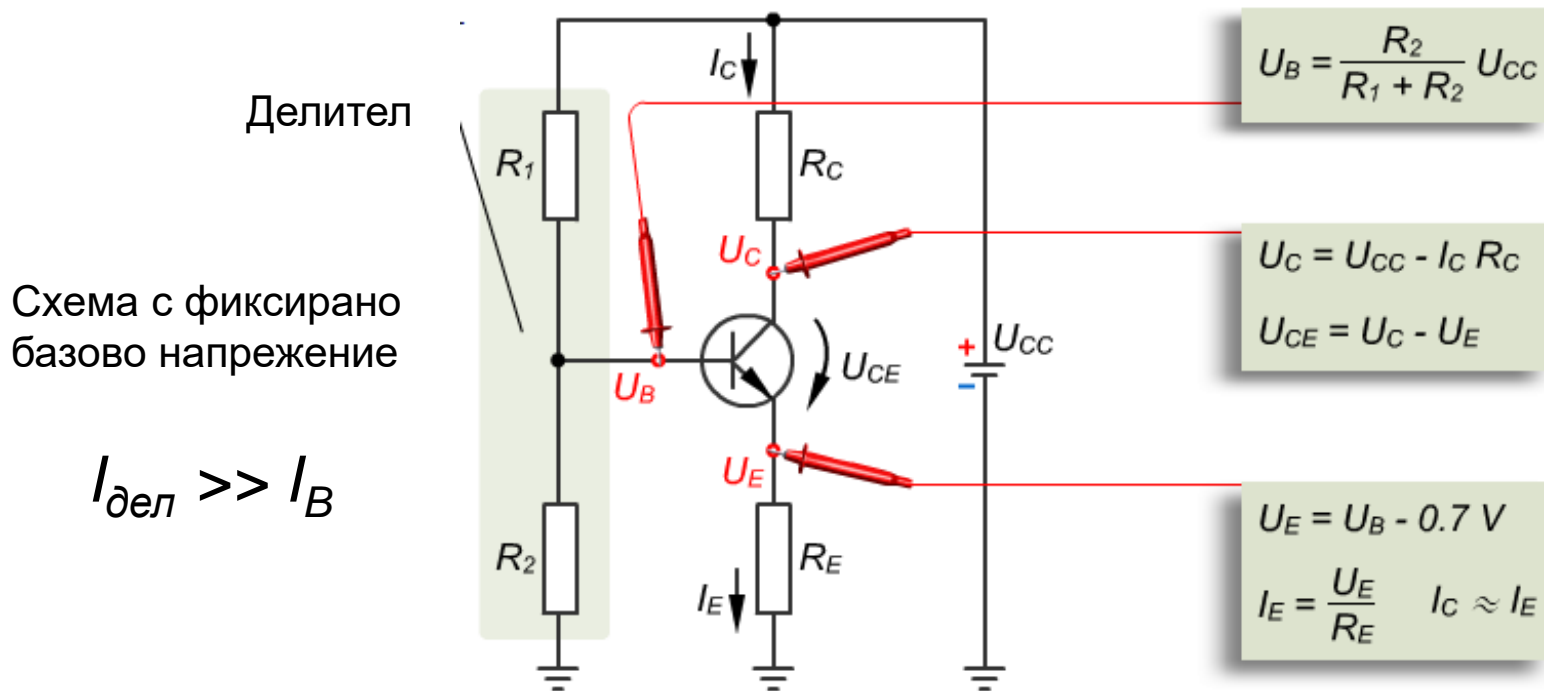
Схема с фиксиран базов ток



Биполярният транзистор трябва да е включен в **активен нормален режим**. Постоянните съставки  $U_B$ ,  $U_C$ ,  $U_E$  се определят, както е показано по-горе.

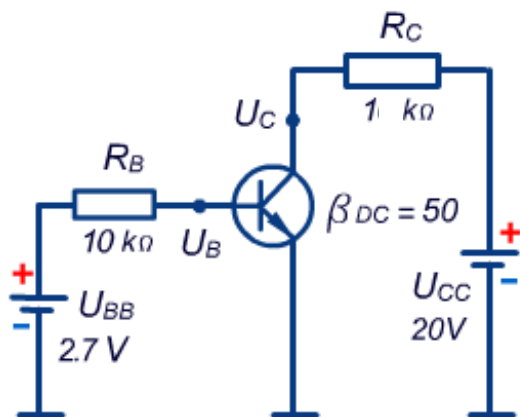
Недостатък на схемата – силна зависимост на  $I_C$  от параметъра  $\beta$ , който има големи производствени толеранси.

# Установяване на работна точка

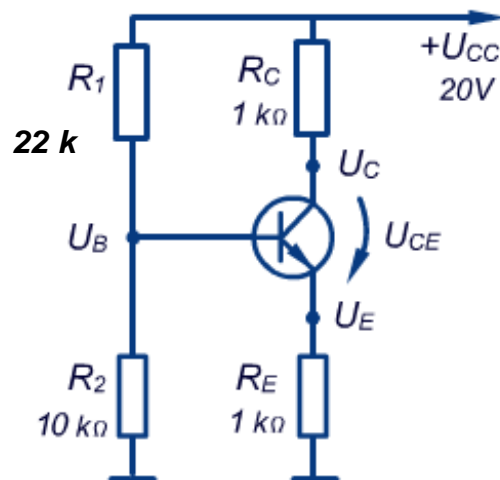


Стойността на  $I_C$  в работната точка не зависи от параметъра  $\beta$ , което гарантира повишена стабилност.

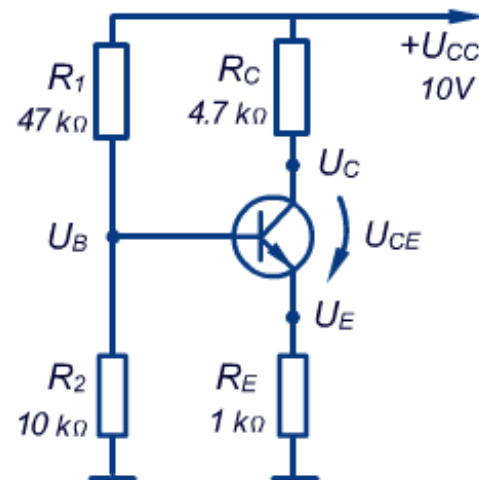
# Примери



$$U_B, I_B, I_C, U_{CE} = ?$$



$$I_C, U_{CE} = ?$$

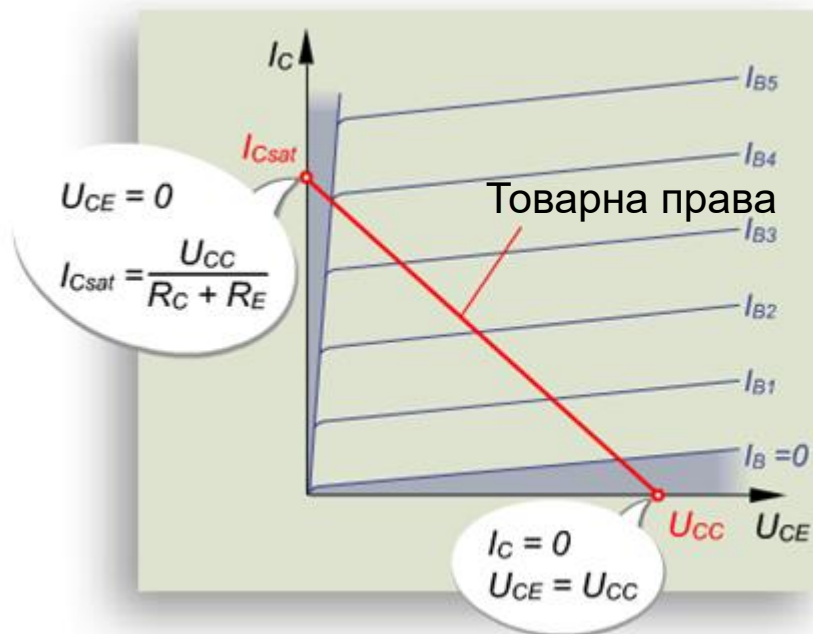
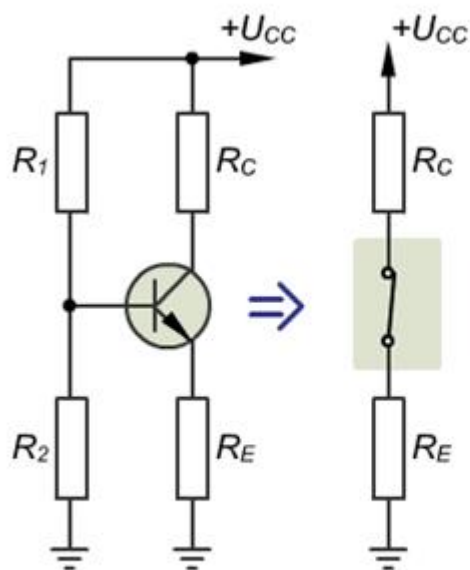


$$I_C, U_{CE} = ?$$

Да се изчислят указаните величини за посочените по-горе схеми.



# Товарна права по постоянен ток

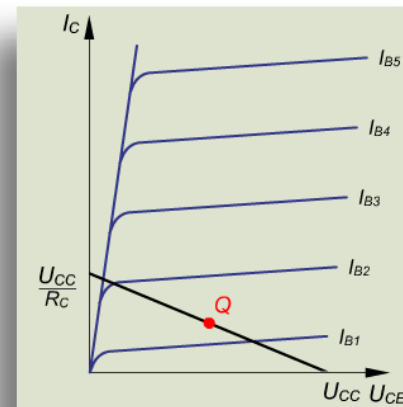
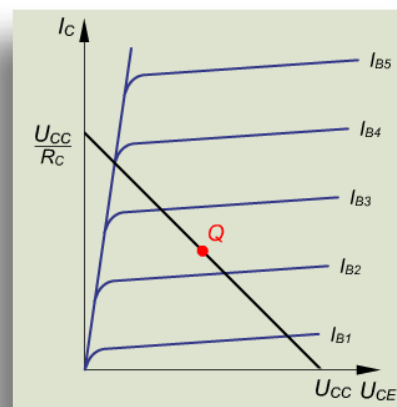
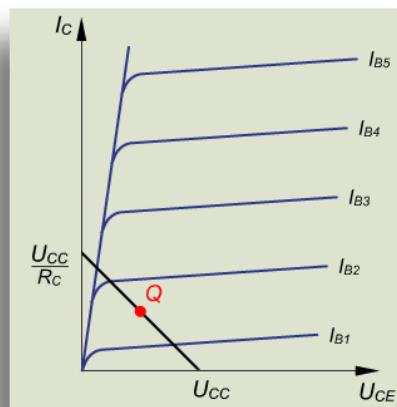
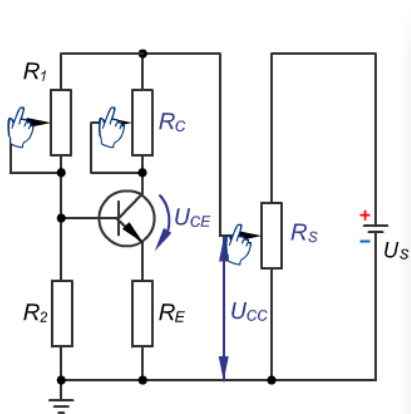


$$E_C = I_C(R_C + R_E) + U_{CE}$$

Уравнение на товарната права

Товарната права по постоянен ток може да се построи с отрезите си от осите.

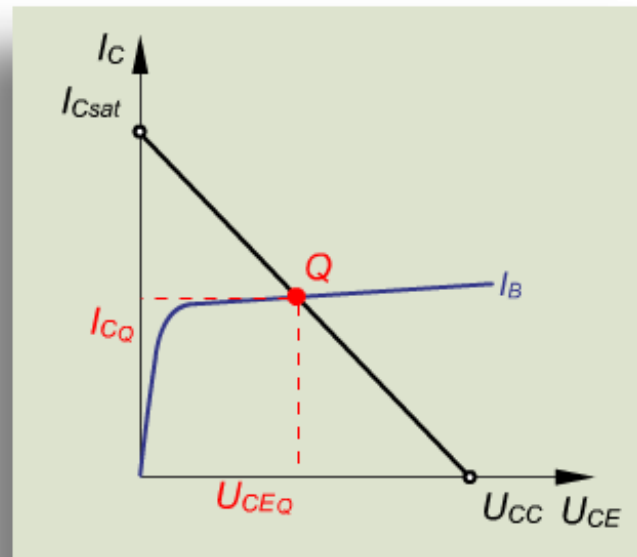
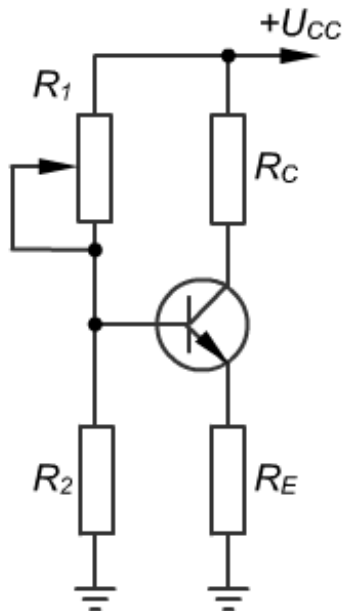
# Положение на товарната права



Положението на товарната права и нейният наклон **не зависят** от типа на транзистора, а само от захранващото напрежение и стойността на товарното съпротивление.

За определени захранващо напрежение и товарно съпротивление, товарната права е **еднозначно определена** в полето на характеристиките.

# Работна точка



Пресечната точка на товарната права с характеристика на транзистора определя постояннотоковата **работна точка** със стойности  $I_{BQ}$ ,  $I_{CQ}$ ,  $U_{CEQ}$ .

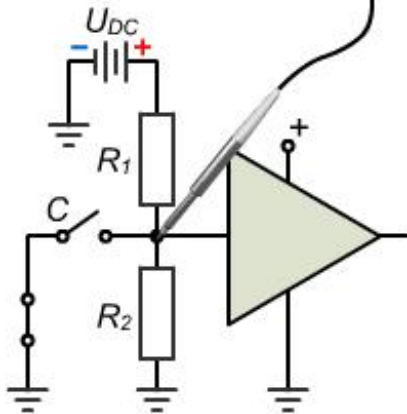
При промяна на постояннотоковия режим (нови стойности на  $I_B$ ,  $I_C$ ,  $U_{CE}$ ) работната точка се движи **само по товарната права**.

# Съставки на базовото напрежение

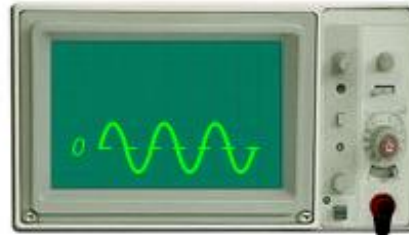
Постоянна съставка  
 $U_B = \text{const}$



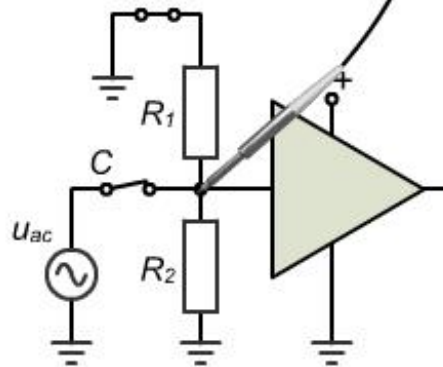
dc equivalent



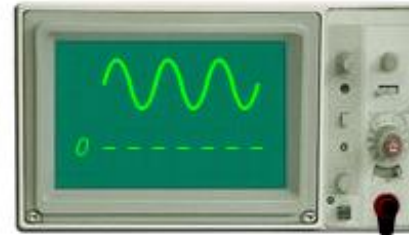
Променлива  
съставка  $u_b$



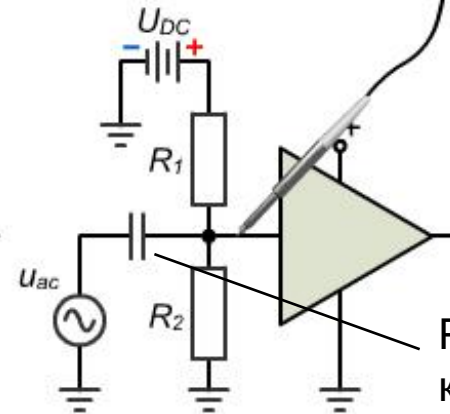
ac equivalent



Моментна стойност  
 $u_B = U_B + u_b$



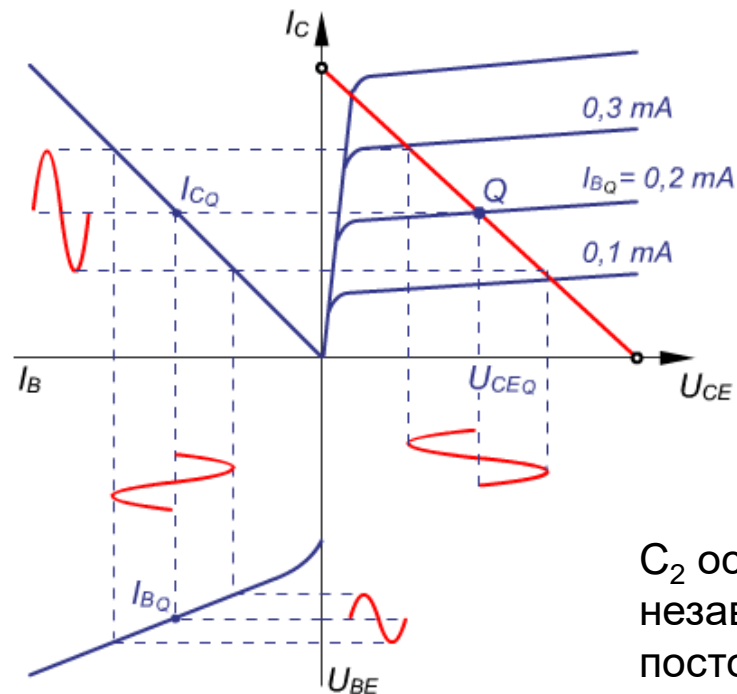
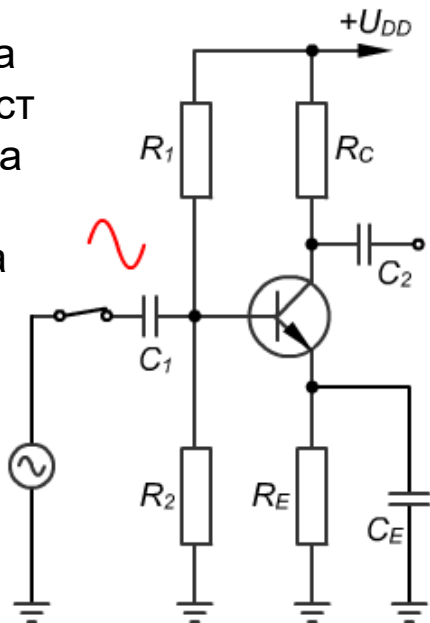
dc + ac



Разделителен  
кондензатор

# Графичен анализ

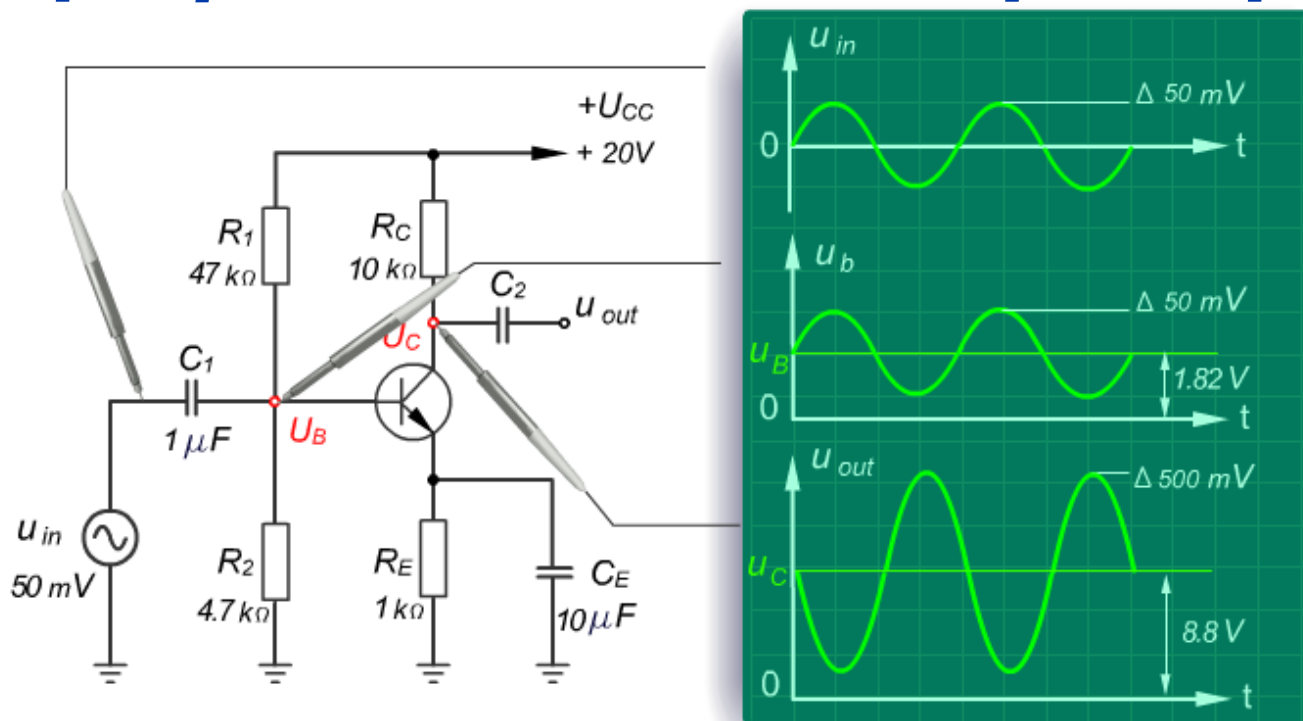
$C_1$  осигурява независимост на работната точка от постоянната съставка на източника



$C_2$  осигурява независимост от постояннотокото ниво в товара

Променливото входно напрежение предизвиква появата на променлив ток в базата, което довежда до промяна в колекторния ток и съответно до промяна в изходното напрежение.

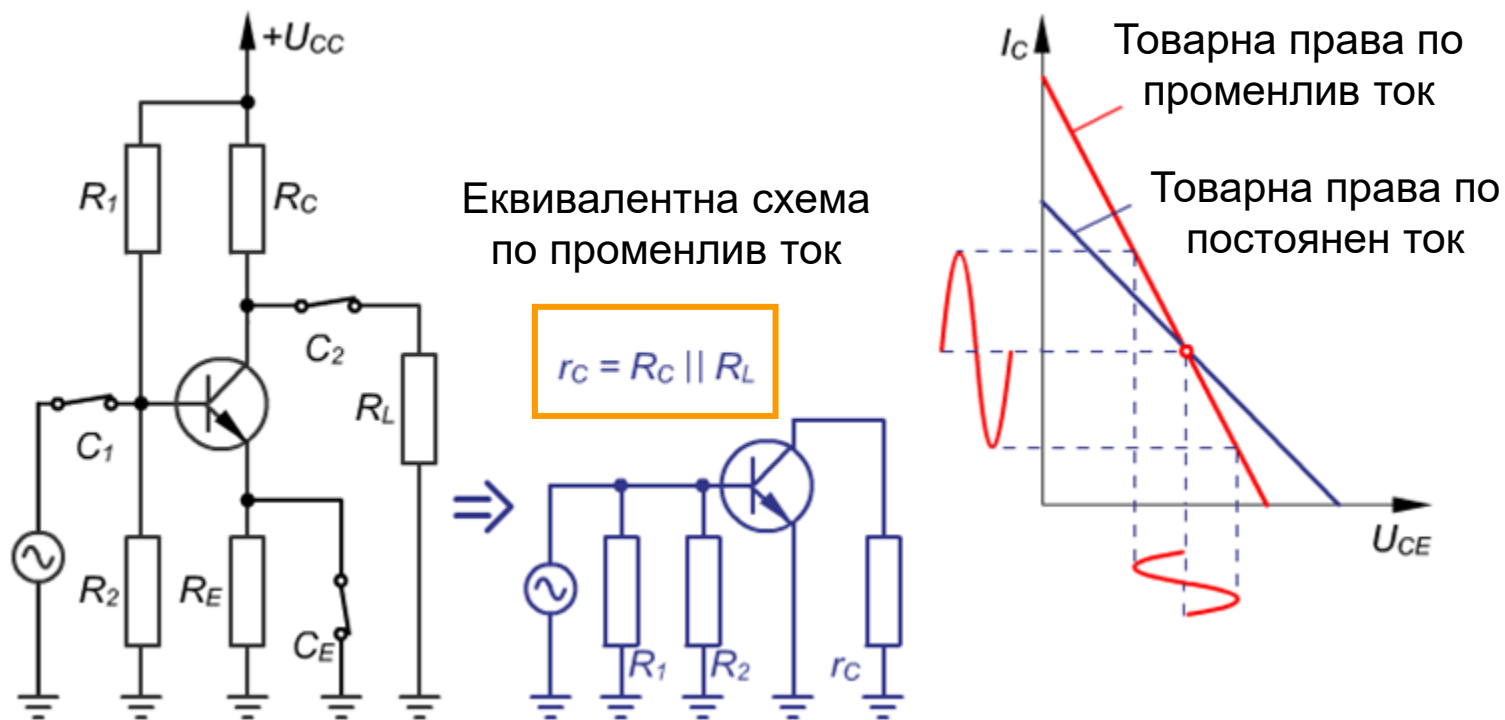
# Графичен анализ – пример



Графика на входния и изходния променливи сигнали

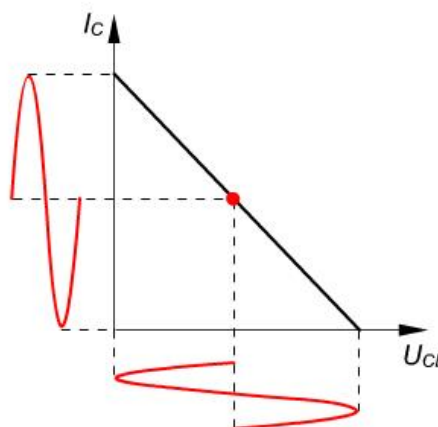
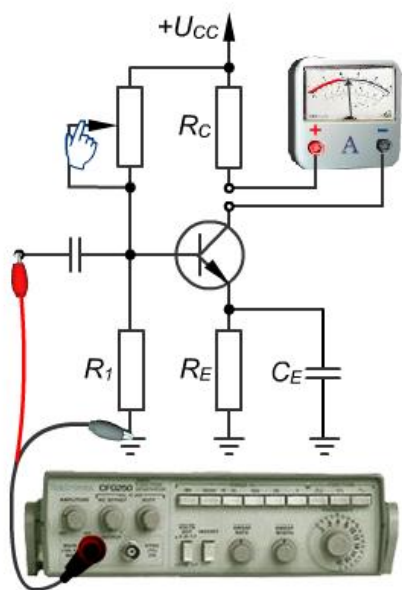
Сравнението на амплитудите на променливите съставки на входния и изходен сигнал показва, че изходният сигнал е усилен 10 пъти.

# Товарна права по променлив ток

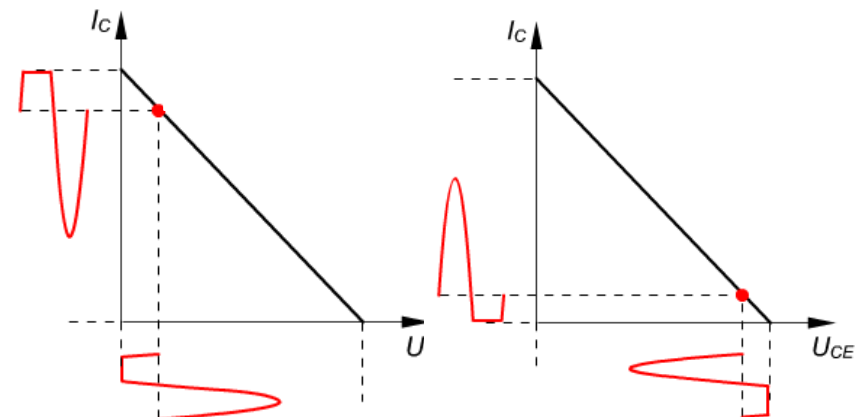


Разделителните кондензатори представляват отворена верига по отношение на постоянния сигнал и късо съединение по отношение на променливата съставка.

# Влияние на работната точка



Отрязване поради  
насищане



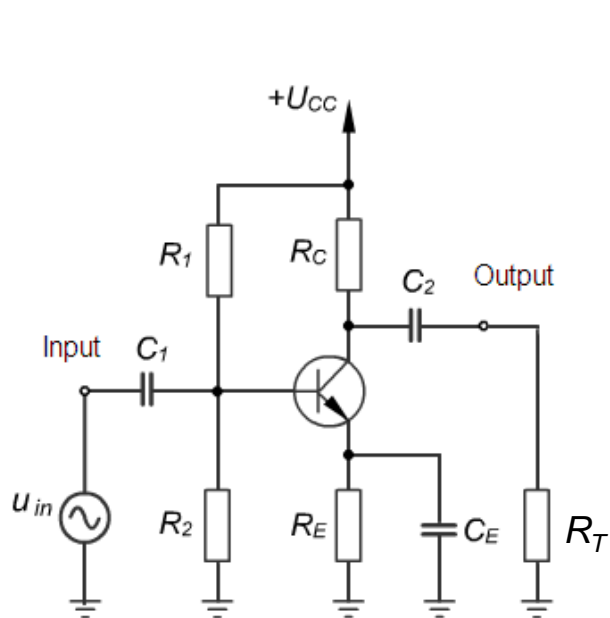
Отрязване поради  
запушване

Основно изискване на усилвателите е да осигуряват линейност на усилването, т.е. да не променят формата на сигнала, а само амплитудата му. Нежелателни изкривявания се получават, когато работната точка се избере в близост до областта на насищане или на отсечка.

За максимално неизкривена амплитуда на сигнала работната точка се избира **в средата на товарната права** по постоянен ток.



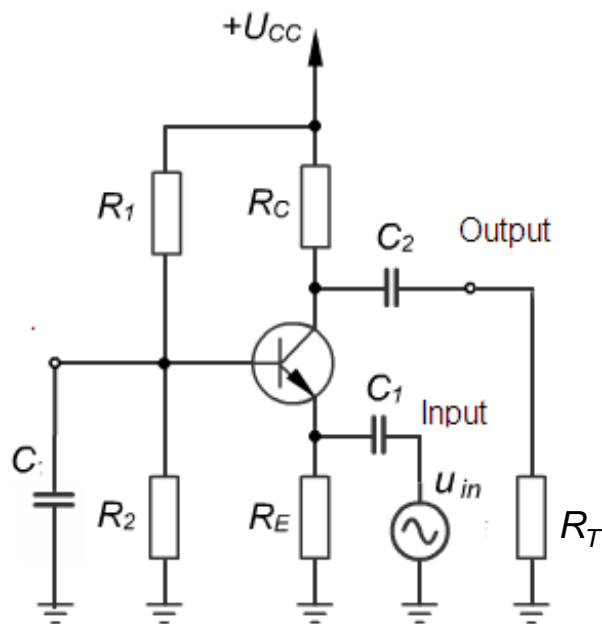
# Примерни схеми на усилватели



Усилвател ОЕ

$A_I$  – висок

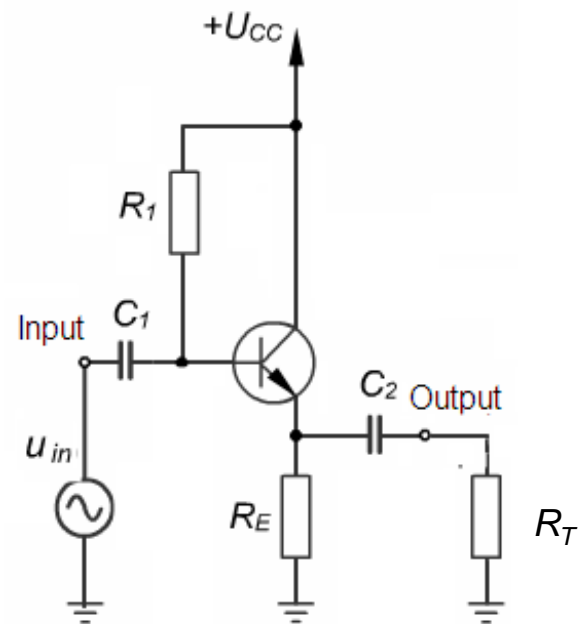
$A_U$  – висок



Усилвател ОБ

$A_I < 1$

$A_U$  – висок

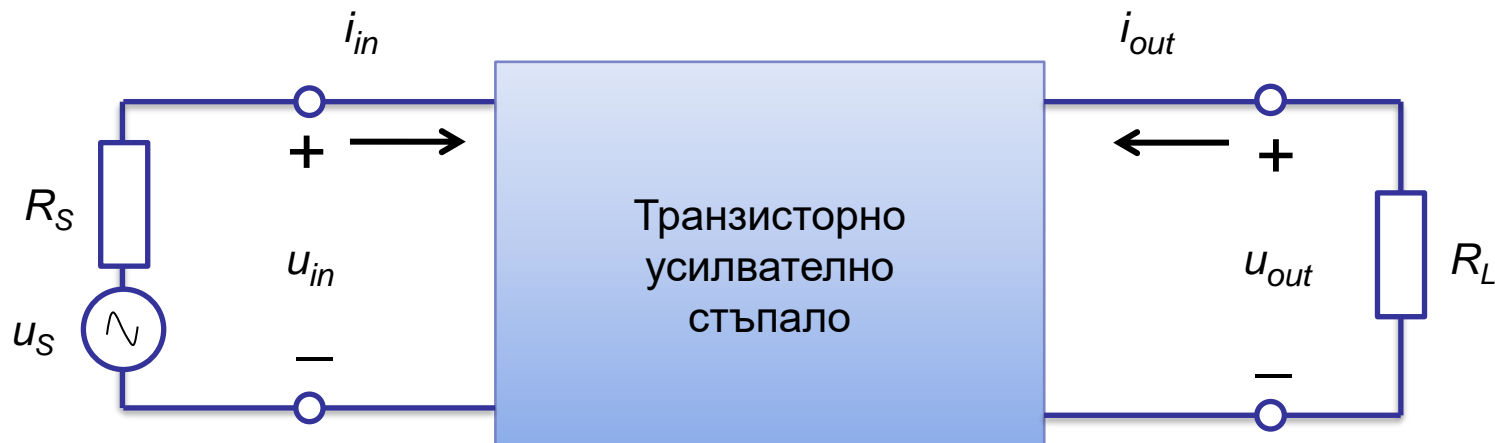


Усилвател ОК

$A_I$  – висок

$A_U < 1$

# Динамични параметри



Динамичните параметри характеризират поведението на транзисторните усилватели по променлив ток. Дефинират се:

$$A_U = \frac{u_{out}}{u_{in}}$$

$$A_I = \frac{i_{out}}{i_{in}}$$

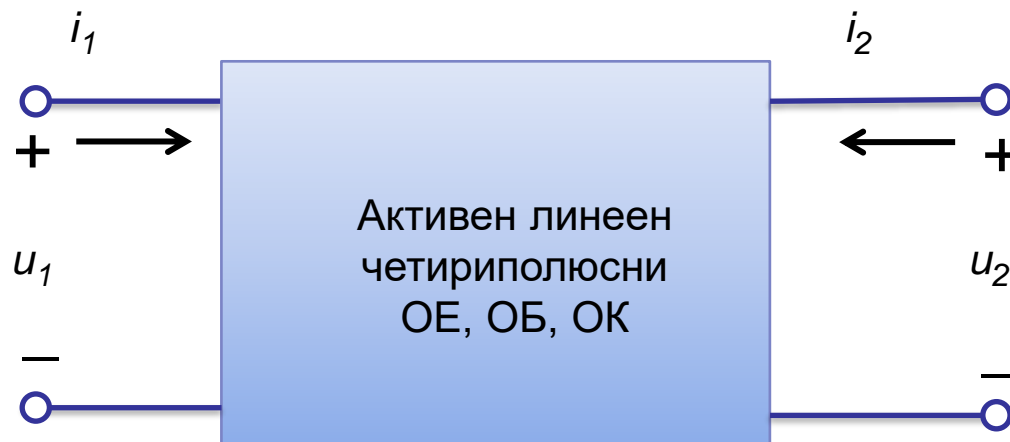
$$A_P = A_U A_I$$

$$r_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}}$$

$$r_{out} = \frac{u_{out}}{i_{out}}$$

За изчислението им се използват еквивалентни схеми на транзисторите по променлив ток.

# Система $h$ -параметри



За анализ на усилвателни стъпала при **ниски честоти и малки променливи сигнали** се използват четириполюсни  $h$ -параметри.

$$u_1 = h_{11}i_1 + h_{12}u_2$$

$$i_2 = h_{21}i_1 + h_{22}u_2$$

Система с  $h$ -параметри – хибридна (смесена) система

$h$  – параметрите имат **различни стойности** за различни схеми на свързване на транзистора.

# ***h-параметри – дефиниции***

$h$  – параметрите са реални числа, които стойности могат лесно да се измерят

$$h_{11} = \left. \frac{u_1}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

**Входно съпротивление** при късо съединение в изхода по променлив ток

$$h_{12} = \left. \frac{u_1}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

**Коефициент на обратна връзка по напрежение** при отворена входна верига по променлив ток

$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

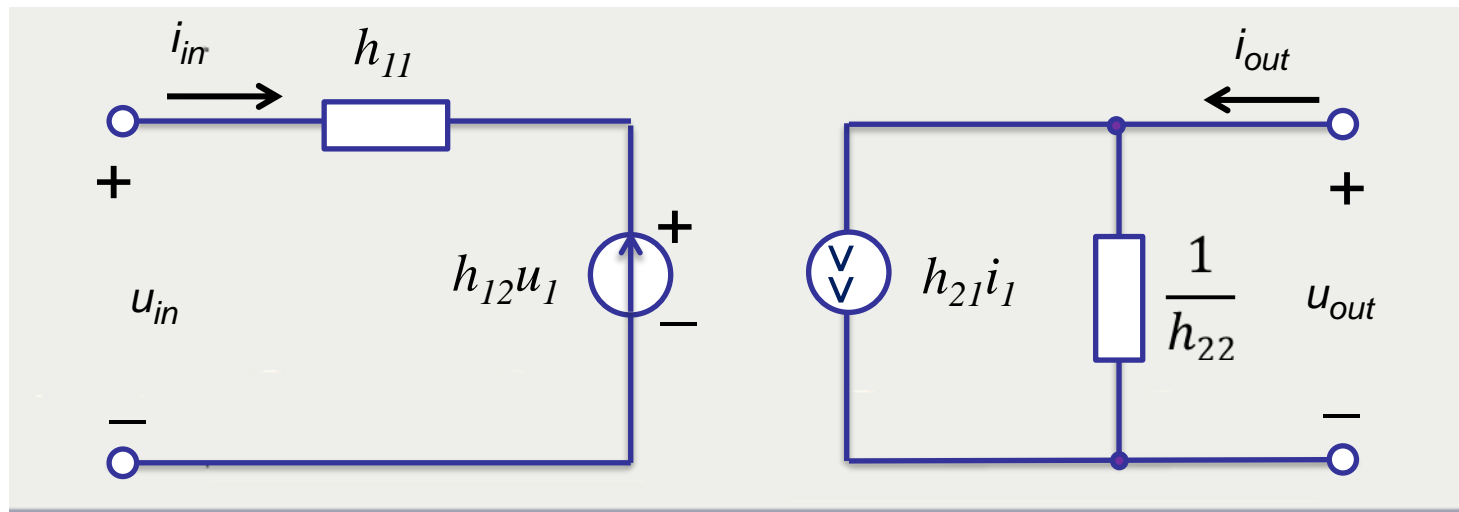
**Коефициент на предаване (усилване) по ток** при късо съединение в изхода по променлив ток

$$h_{22} = \left. \frac{i_2}{u_2} \right|_{i_1=0}$$

**Изходна проводимост** при отворена входна верига по променлив ток

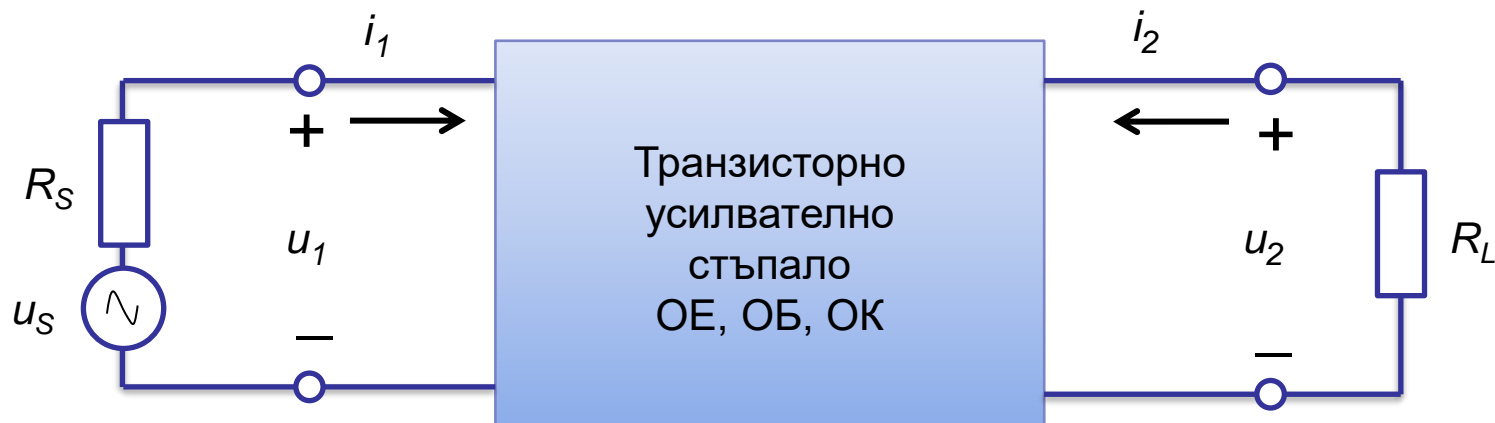
---

# Еквивалентна схема с $h$ -параметри



Обикновено в каталозите се дават  $h$ -параметрите за схема ОЕ, за конкретни стойности на постоянните напрежения и токове (т.е. за фиксирана работна точка), при определена температура. За други случаи в каталозите се дават нормирани криви на относителните  $h$ -параметри при различни токове, напрежения и температури.

# Изчисление на динамични параметри



$h$ -система параметри

$$u_1 = u_s - i_1 R_s$$

$$u_2 = -i_2 R_L$$

$$i_2 = h_{21} i_1 + h_{22} u_2$$

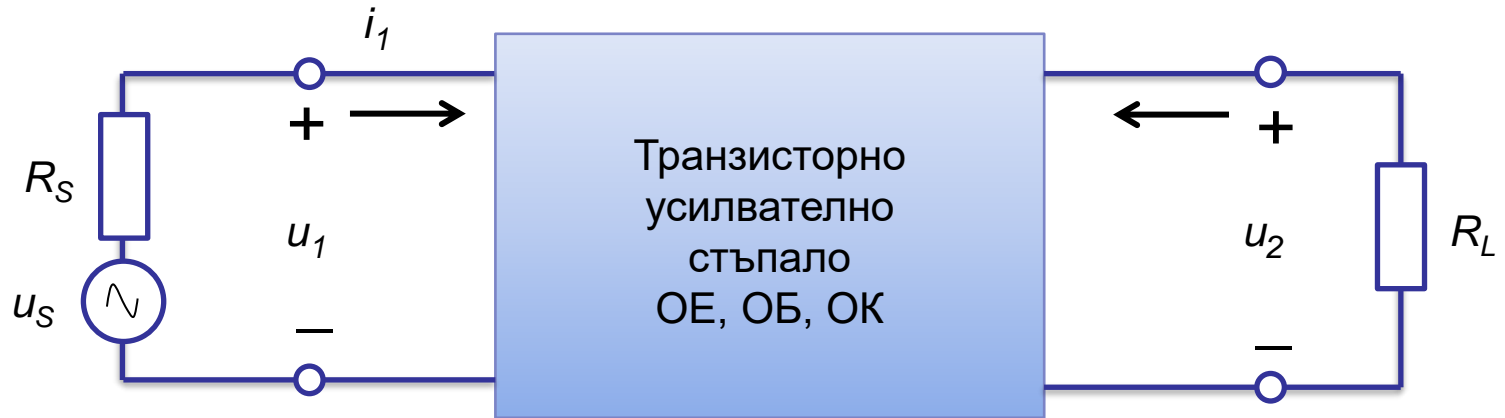
$$u_2 = -i_2 R_L$$

$$i_2 = h_{21} i_1 - h_{22} i_2 R_L$$

$$i_2 (1 + h_{22} R_L) = h_{21} i_1 \Rightarrow$$

$$A_I = \frac{i_2}{i_1} = \frac{h_{21}}{1 + R_L h_{22}}$$

# Сравнение на динамични параметри



$$A_{I_{OK}} > A_{I_{OE}} \gg A_{I_{OB}}$$

$$A_{I_{OB}} < 1$$

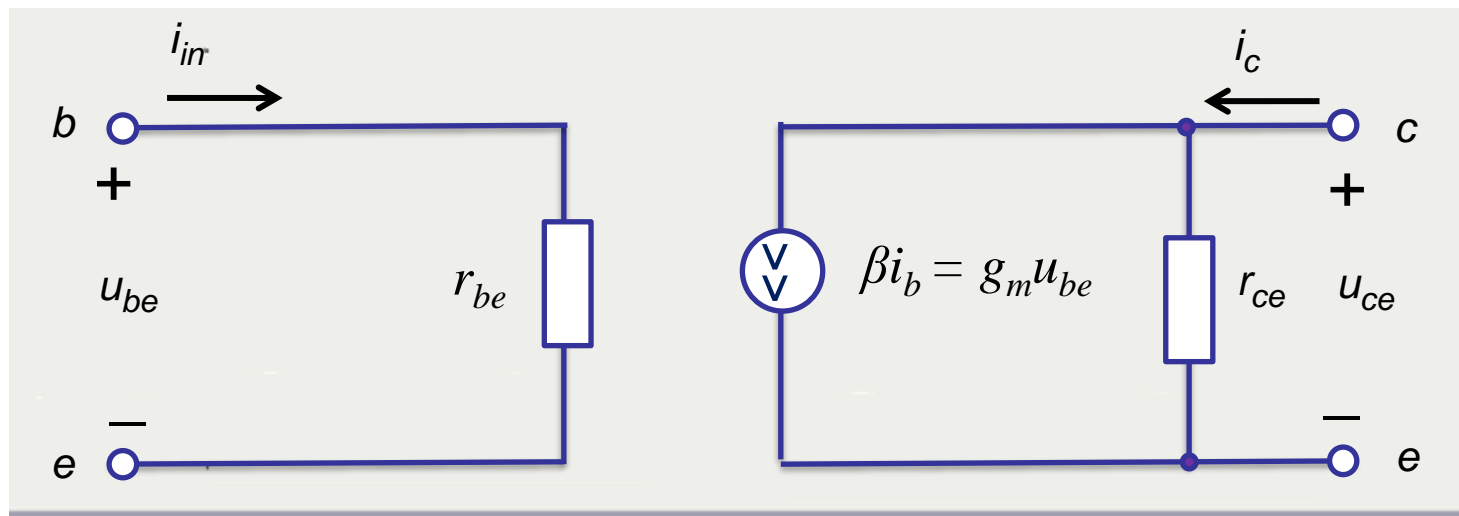
$$r_{in_{OK}} > r_{in_{OE}} > r_{in_{OB}}$$

$$A_{U_{OB}} > A_{U_{OE}} \gg A_{U_{OK}}$$

$$A_{U_{OK}} < 1$$

$$r_{out_{OB}} > r_{out_{OE}} > r_{out_{OK}}$$

# Физични параметри – еkv. схема



Най-често се използва малосигналната нискочестотна еквивалентна схема на транзистора в схема ОЕ с физични параметри.

Физичните параметри са свързани с принципа на действие на транзистора. Съществува връзка между физичните и  $h$ -параметри.



# Физични параметри – дефиниции

$$\beta = \frac{i_c}{i_b}$$

$$u_{ce} = 0$$

**Диференциален коефициент на усилване по ток** при късо съединение в изхода по променлив ток

$$g_m = \frac{i_c}{u_{be}}$$

$$u_{ce} = 0$$

**Стръмност на транзистора** при късо съединение в изхода по променлив ток

$$r_{be} = \frac{u_{be}}{i_b}$$

$$u_{ce} = 0$$

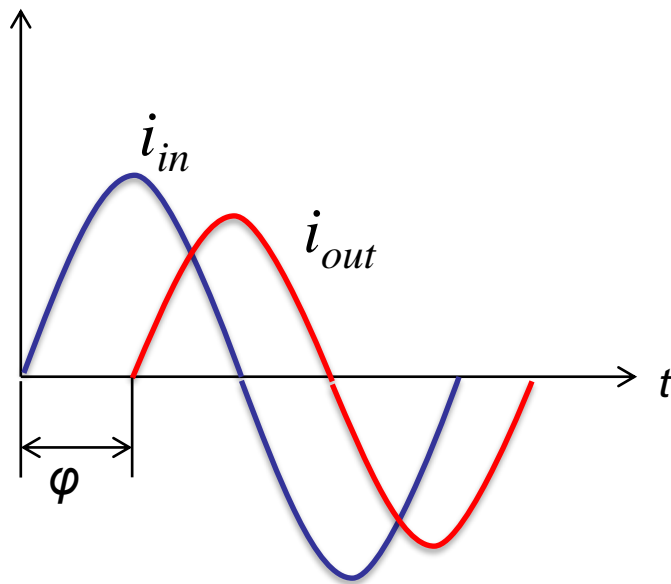
**Диференциално входно съпротивление** при късо съединение в изхода по променлив ток

$$r_{ce} = \frac{u_{ce}}{i_c}$$

$$i_b = 0$$

**Изходно съпротивление** при отворена входна верига по променлив ток

# Работа при високи честоти



При високи честоти върху поведението на транзистора започват да оказват влияние:

- ✚ инерционността на процесите на пренасяне на токоносителите от емитерния до колекторния преход
- ✚ капацитетите на преходите
- ✚ паразитните капацитети на корпуса и индуктивности на изводите

В резултат се наблюдава намаляване на амплитудата на изходния сигнал и изоставането му по фаза (закъсняване) спрямо входния.

За оценка на усилвателните свойства на транзистора при високи честоти се използват **граничните честоти**.

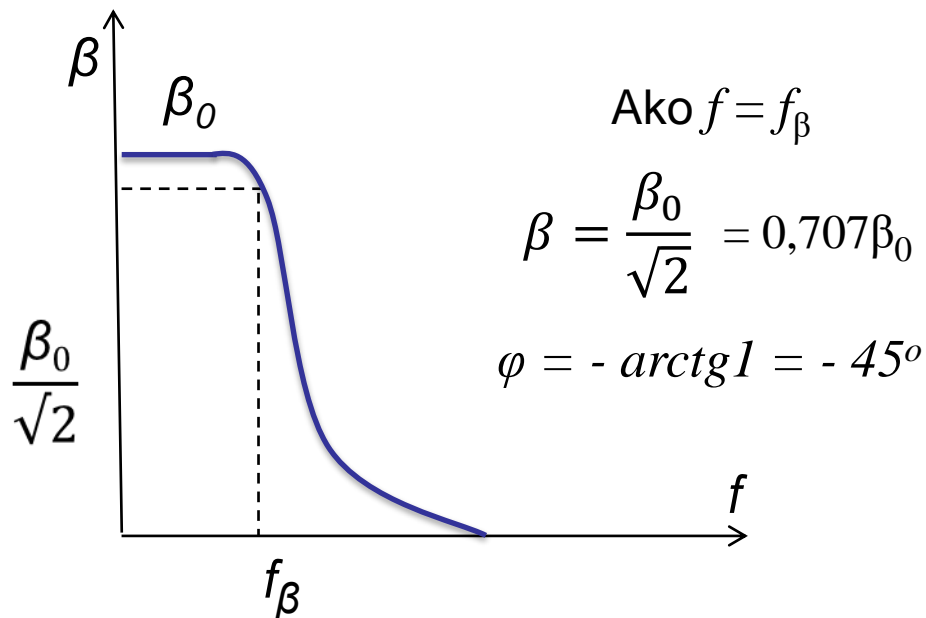
# Гранична честота $f_\beta$

$f_\beta$  — гранична честота на коефициента на усилване по ток в схема ОЕ

$$\dot{\beta} = \frac{\beta_0}{1 + j \frac{f}{f_\beta}}$$

$$\beta = \frac{\beta_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\beta}\right)^2}}$$

$$\varphi = -\arctg \frac{f}{f_\beta}$$



Граничната честота  $f_\beta$  е честотата, при която модулът на диференциалния коефициент на усилване по ток в схема ОЕ  $\beta$  намалява  $\sqrt{2}$  пъти спрямо стойността си при ниски честоти  $\beta_0$ .

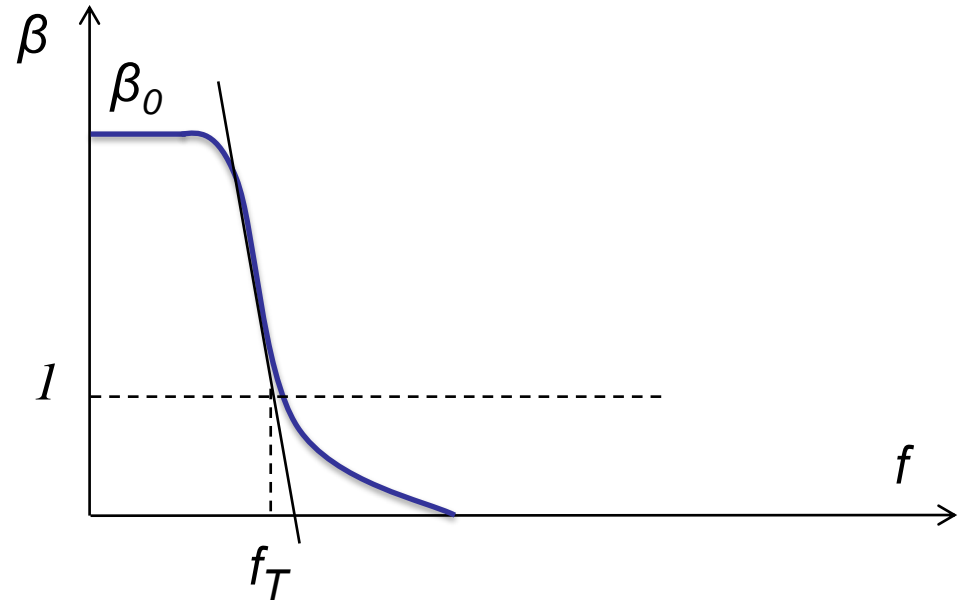
# Транзитна честота $f_T$

$f_T$  — транзитна честота. Тя се измерва лесно при честота  $f \gg f_\beta$ .

При честота  $f > (2 - 5) f_\beta$  произведението на модула на диференциалния коефициент на усилване  $\beta$  и текущата честота е константа и се нарича транзитна честота  $f_T$ .

$$\beta \cdot f = \text{const} = f_T$$

Ако  $f = f_T$ ,  $\beta \approx 1$



Транзитната честота  $f_T$  може да се дефинира и като честотата, при която модулет на коефициента  $\beta$  става приблизително единица.

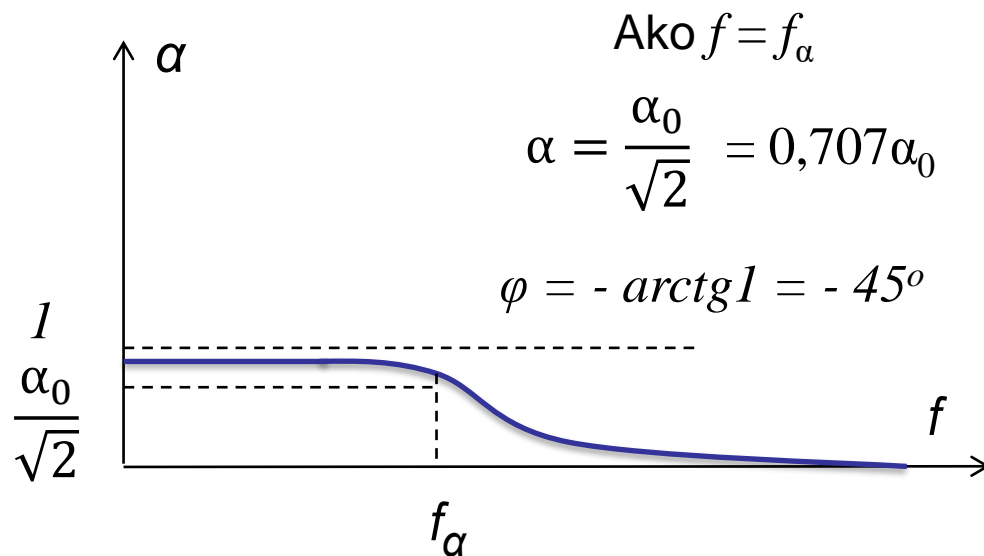
# Гранична честота $f_\alpha$

$f_\alpha$  — гранична честота на коефициента на усилване по ток в схема ОБ

$$\dot{\alpha} = \frac{\alpha_0}{1 + j \frac{f}{f_\alpha}}$$

$$\alpha = \frac{\alpha_0}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_\alpha}\right)^2}}$$

$$\varphi = -\arctg \frac{f}{f_\alpha}$$

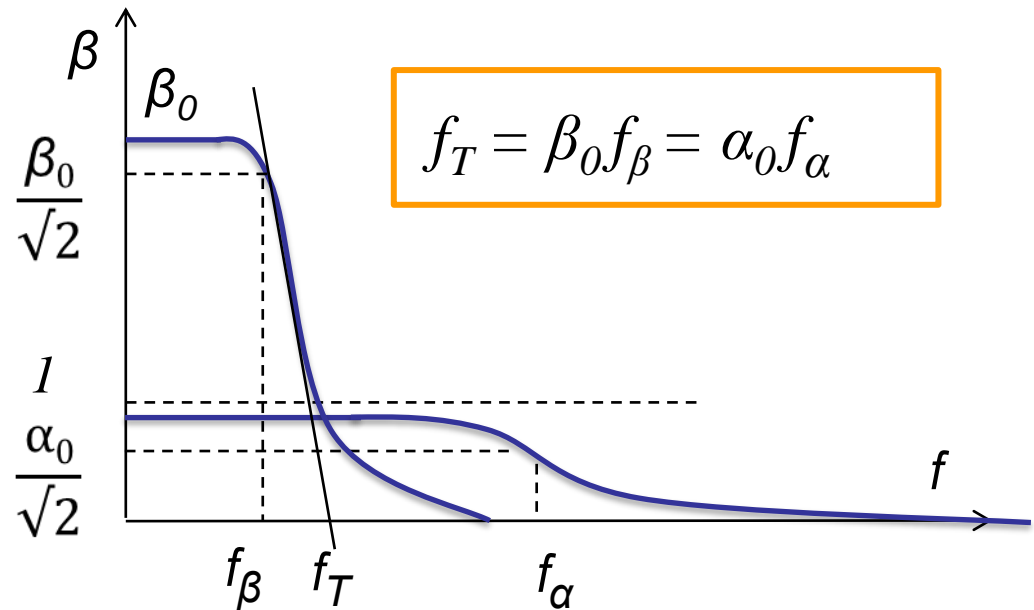


Граничната честота  $f_\alpha$  е честотата, при която модулет на диференциалния коефициент на предаване по ток в схема ОБ  $\alpha$  намалява  $\sqrt{2}$  пъти спрямо стойността си при ниски честоти  $\alpha_0$ .

# Връзка между граничните честоти

$$f_{\alpha} = (1,2 - 2) \cdot f_T$$

$$f_T = \beta_0 \cdot f_{\beta}$$



Граничната честота  $f_T$  се измерва лесно и от нея се определят останалите честоти.

# Други гранични честоти

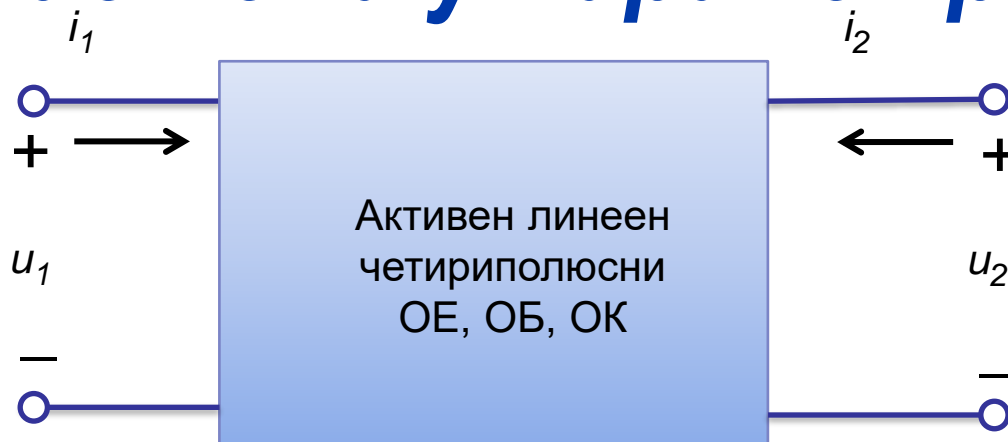
Други характерни честоти за транзистора са:

- ✚ **Гранична честота на стръмността**  $f_{gm}$  – честотата, при която модулът на стръмността  $g_m$  спада  $\sqrt{2}$  пъти спрямо стойността си при ниски честоти.
- ✚ **Макимална честота при генериране**  $f_{max}$  – честотата, при която коефициентът на усилване по мощност за схема ОЕ става единица –  $k_p = 1$ . Над тази честота транзисторът престава да бъде активен елемент.
- ✚ **Гранична честота на шума**  $f_N$  – честотата, при която собствените шумове на транзистора намаляват 2 пъти.

Граничните честоти се подреждат по големина, както следва:

$$f_{\beta} < f_{gm} < f_N < f_T < f_{\alpha} < f_{max}$$

# Система у-параметри



За анализ на усилвателни стъпала при **високи честоти** и **малки променливи сигнали** се използват четириполъсни у-параметри.

$$\begin{cases} i_1 = y_{11}u_1 + y_{12}u_2 \\ i_2 = y_{21}u_1 + y_{22}u_2 \end{cases}$$

Система с у-параметри

у – параметрите имат **различни стойности** за различни схеми на свързване на транзистора. Използват се за анализ на схеми при честоти до 300 MHz.



# *у-параметри – дефиниции*

$$y_{11} = \frac{i_1}{u_1} \quad \left| \quad u_2 = 0 \right.$$

**Входна проводимост** при късо съединение в изхода по променлив ток

$$y_{12} = \frac{i_1}{u_2} \quad \left| \quad u_1 = 0 \right.$$

**Обратна проходна проводимост** при късо съединение на входа по променлив ток

$$y_{21} = \frac{i_2}{u_1} \quad \left| \quad u_2 = 0 \right.$$

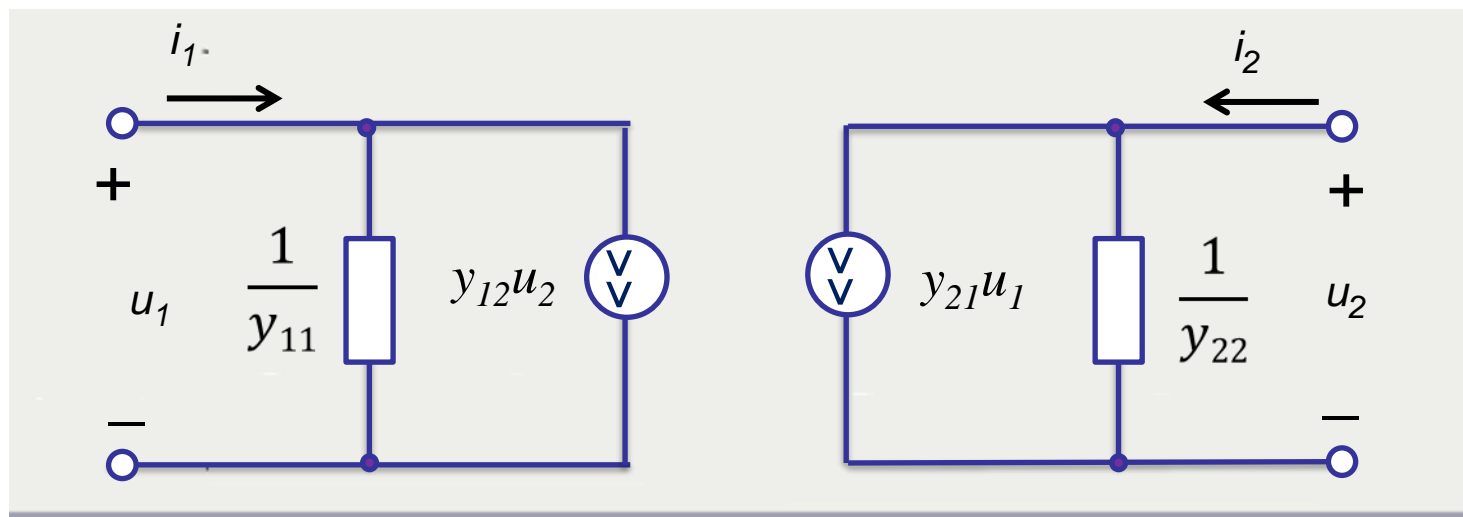
**Права проходна проводимост (стръмност)** при късо съединение в изхода по променлив ток

$$y_{22} = \frac{i_2}{u_2} \quad \left| \quad u_1 = 0 \right.$$

**Изходна проводимост** при късо съединение на входа по променлив ток

Съществува връзка между  $y$ - и  $h$ -параметри.

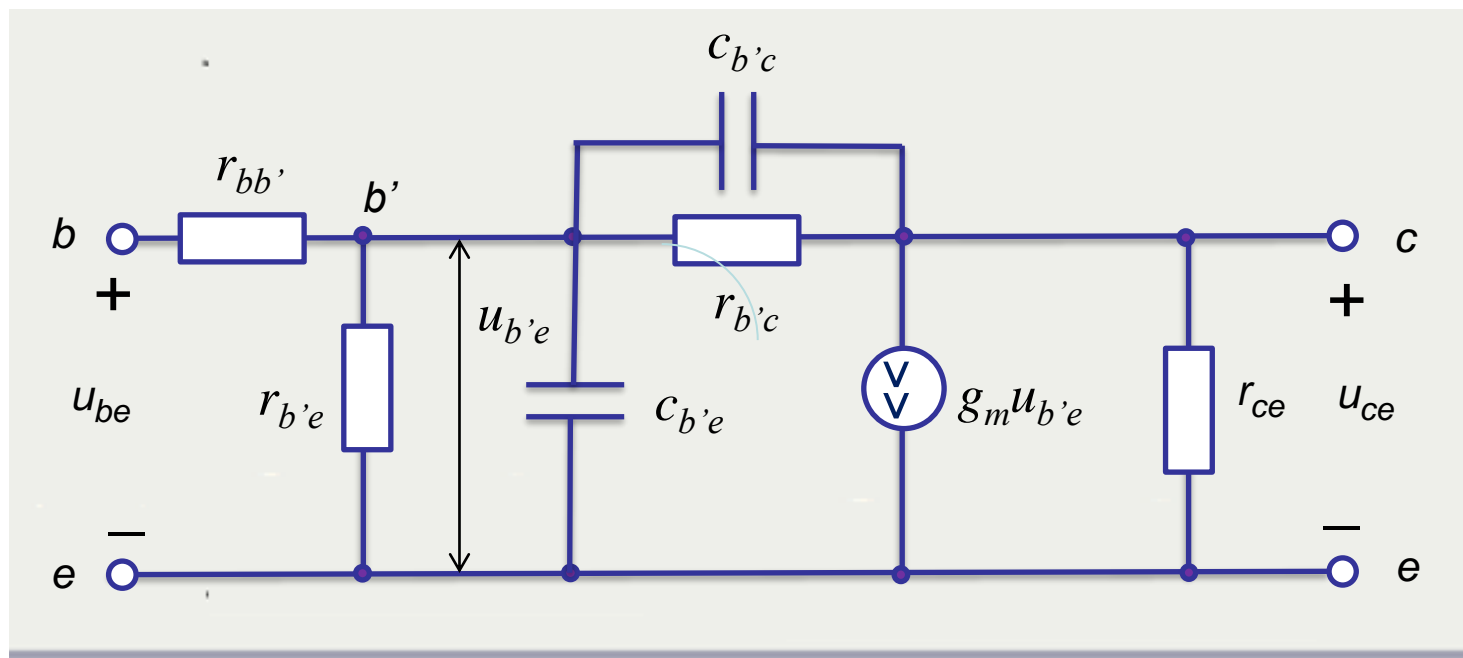
# Еквивалентна схема с у-параметри



Еквивалентна схема на транзистора с у - параметри при **високи честоти** и **малък променлив** входен сигнал

Недостатък – у- параметрите зависят от честотата.

# Еквивалентна схема на Джиаколето



$r_{b'b}$  – обемно съпротивление на базата

$C_{b'e}$  – дифузен капацитет на емитерния преход

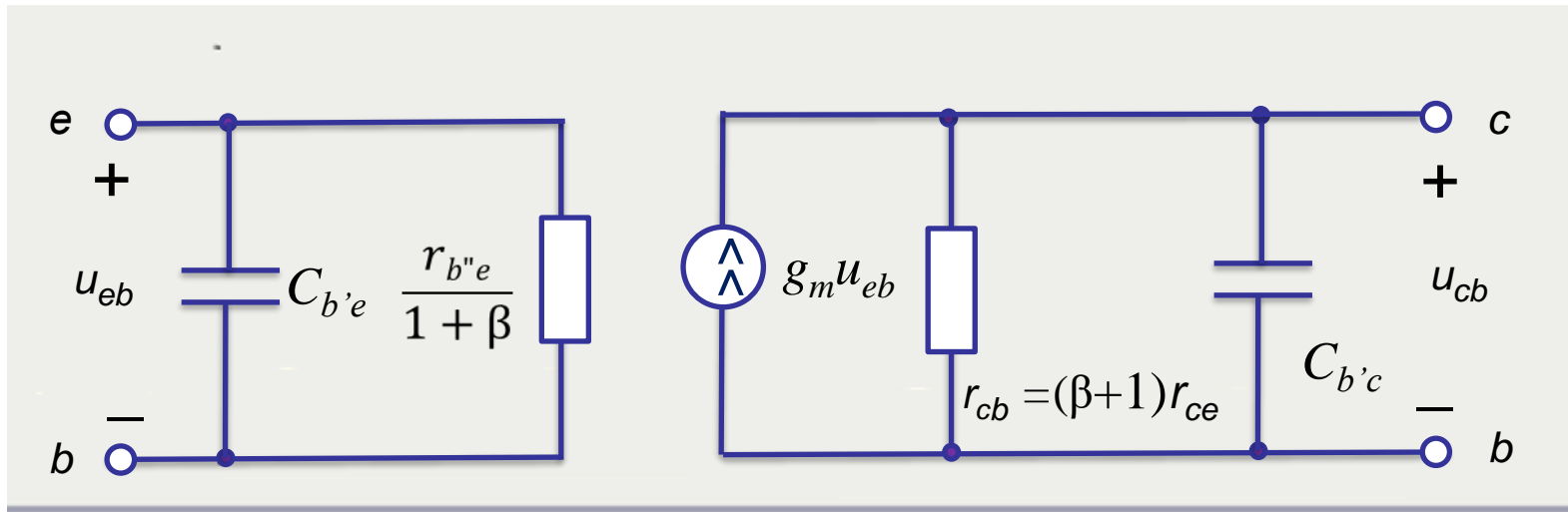
$C_{b'c}$  – бариерен капацитет на колекторния преход

$r_{b'c}$  – отчита ефента на Ърли

$r_{ce}$  – изходно съпротивление

$g_m$  – стръмност на транзистора

# В.ч. еквивалентна схема за ОБ



Еквивалентна схема на транзистора в схема ОБ с физични параметри при високи честоти и малък променлив входен сигнал

Тези еквивалентни схеми се използват за анализ на усилвателни стъпала при честоти не превишаващи половината от транзитната честота на използвания транзистор.