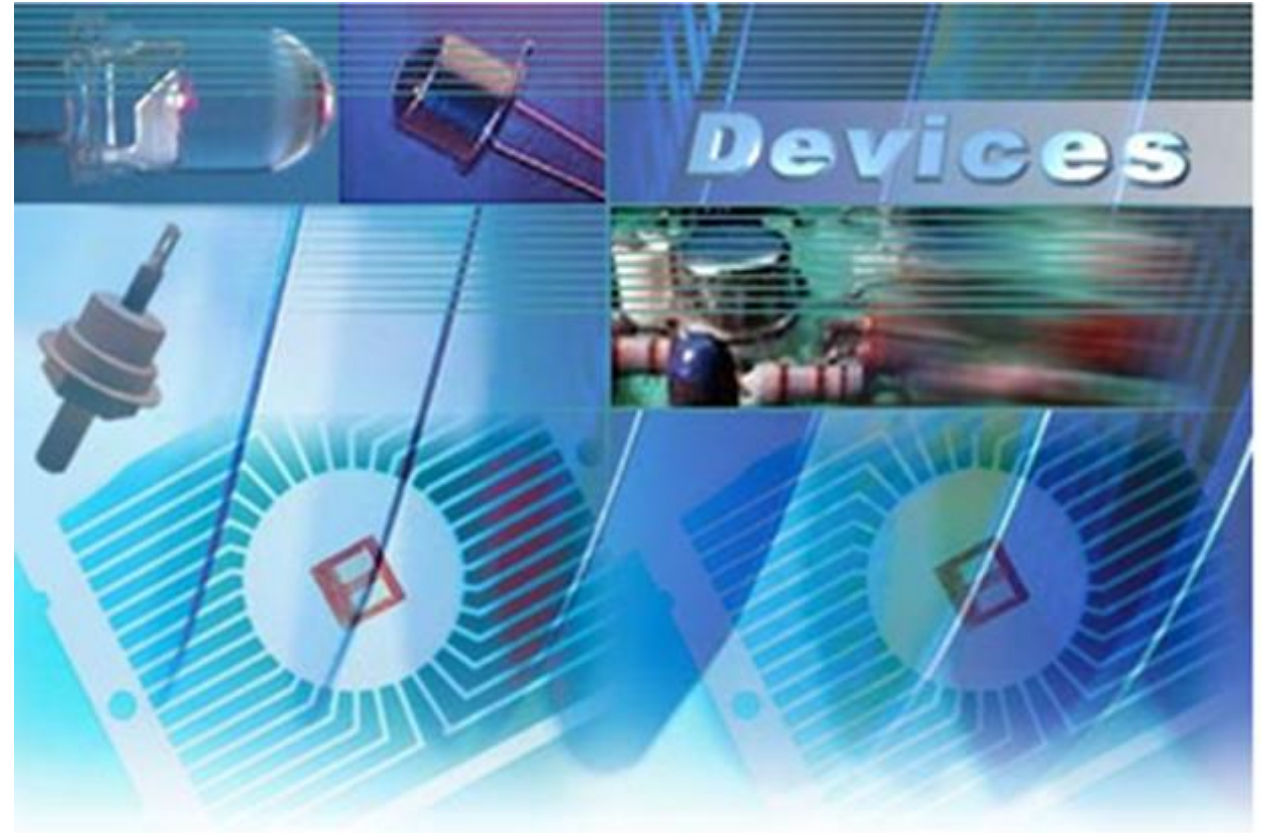




Работа на биполярен транзистор като усилвател

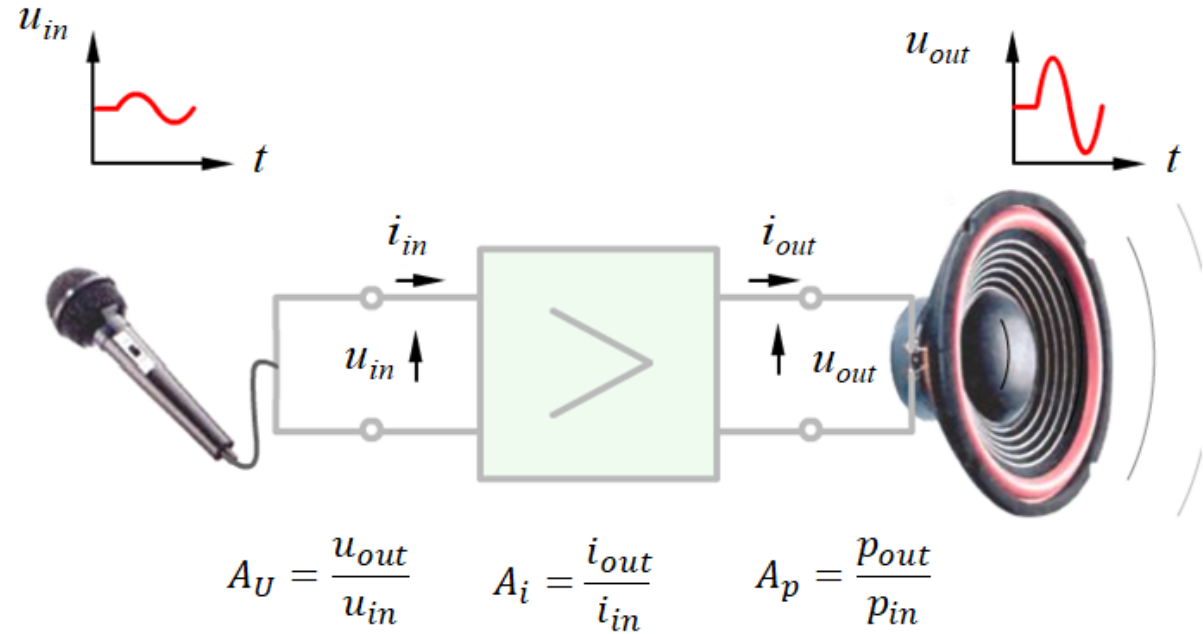
Полупроводникови
елементи



Какво е усилвател?

Усилвател е електронна схема, която увеличава амплитудата на сигнала.

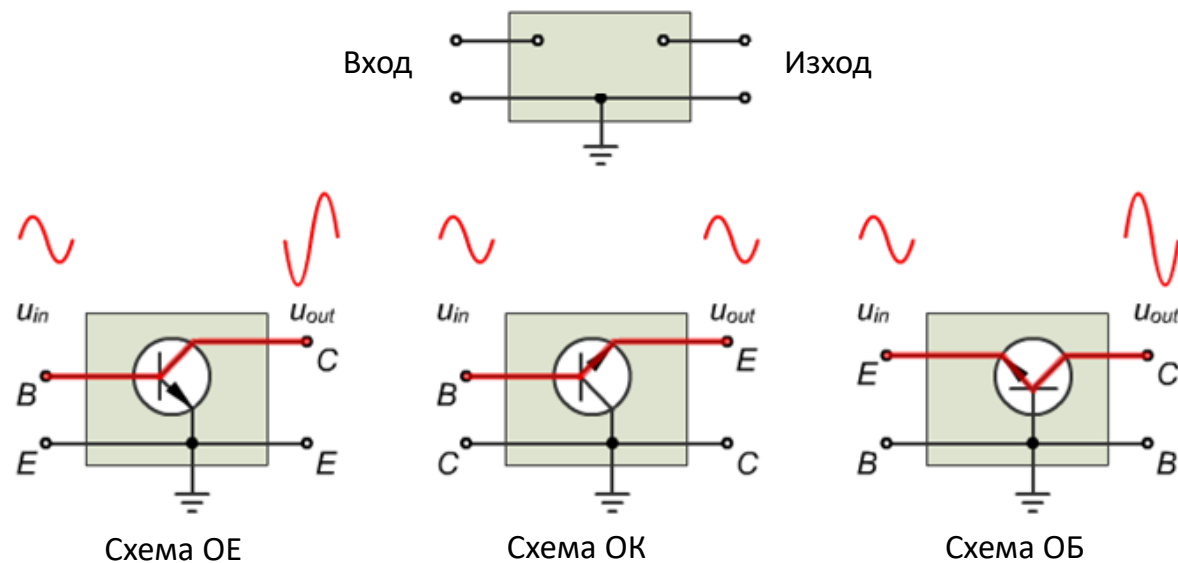
Транзисторът работи като усилвател, ако при осигурен подходящ постоянно токов режим, към входа му е свързан **източник на променлив сигнал**, а в изхода – **товар**, върху който се получава усиленият променлив сигнал.



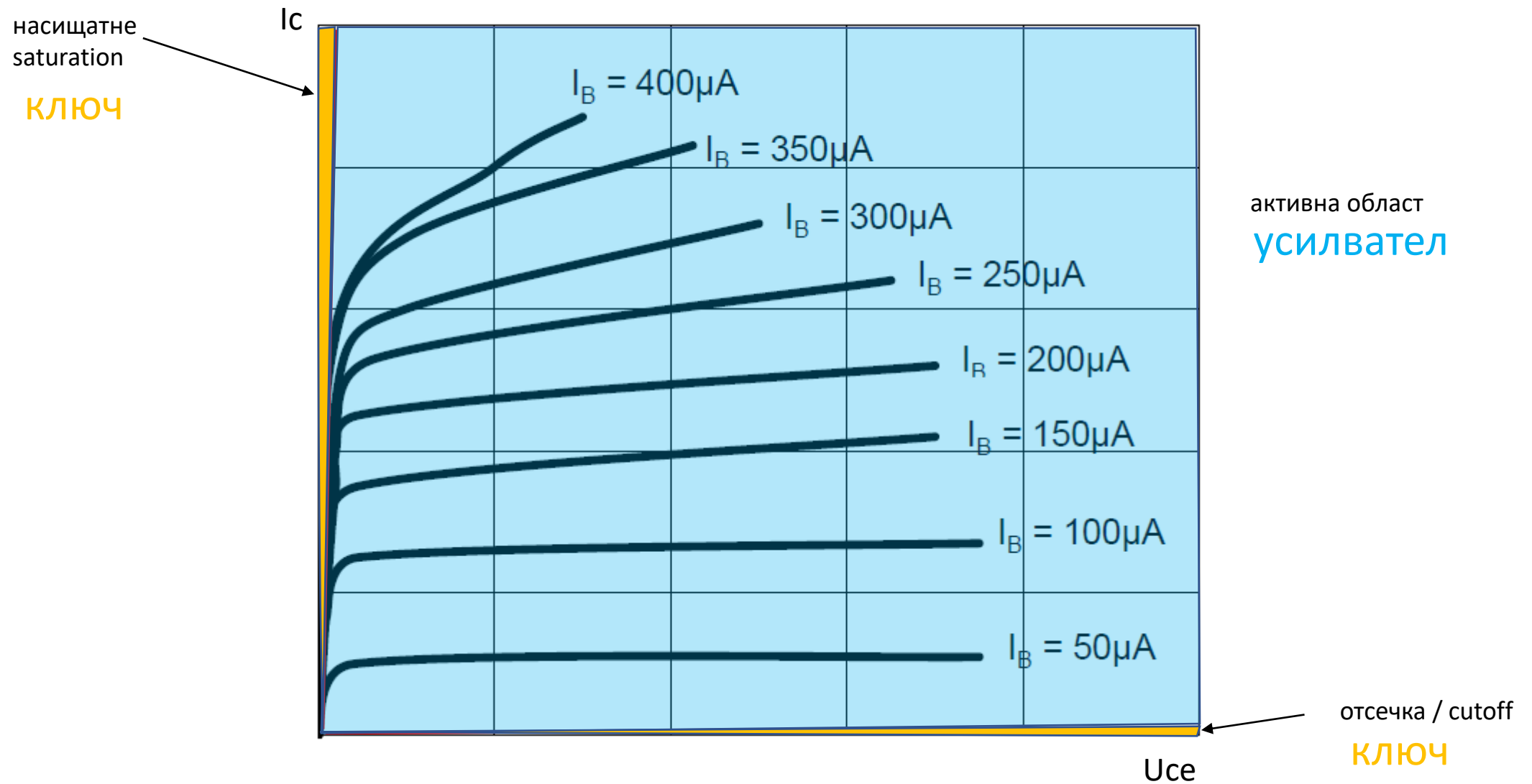
Схеми на включване

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.

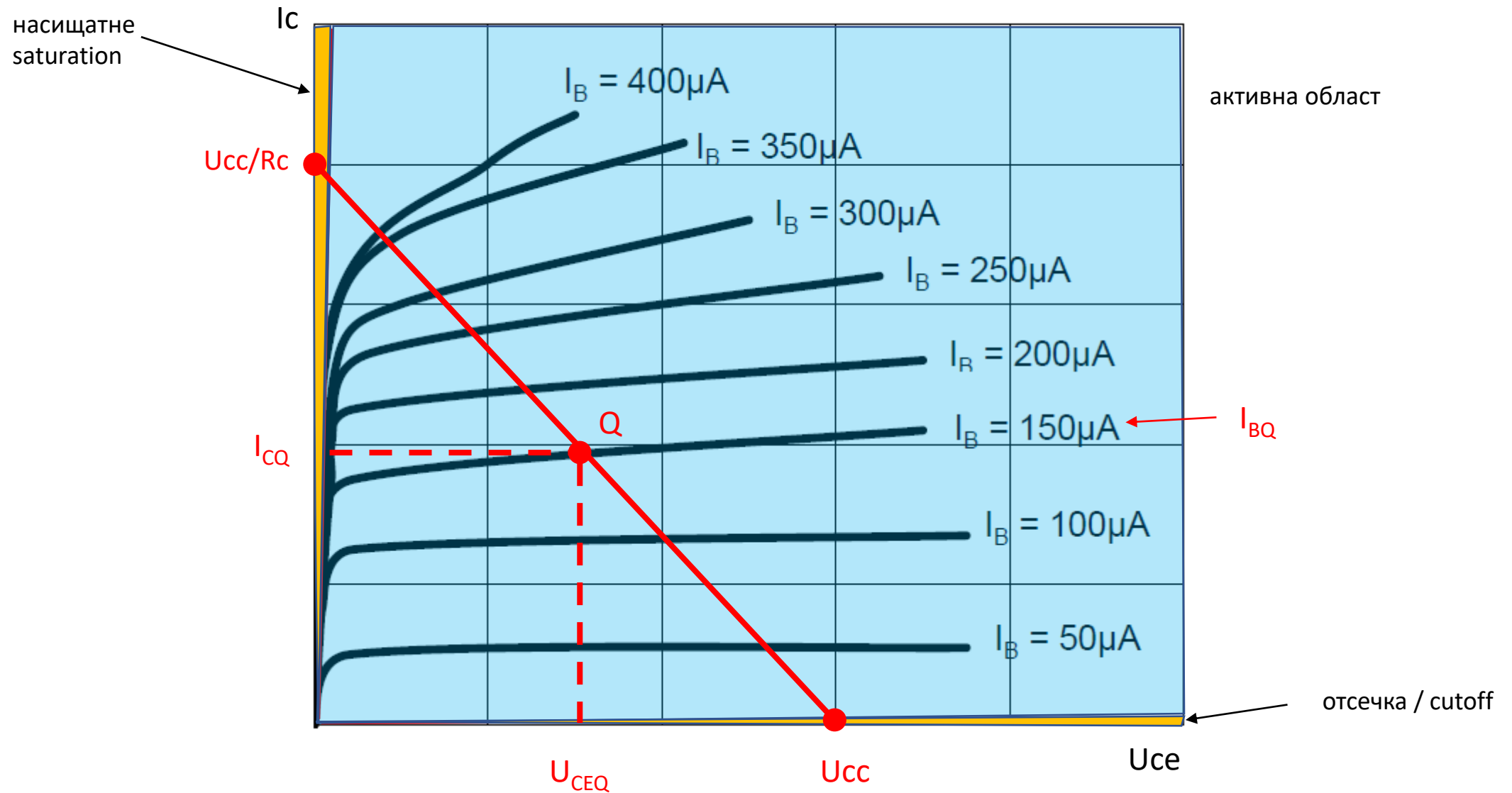
Схема ОЕ дефазира изходния сигнал на 180° спрямо входния. При схеми ОБ и ОК сигналите са във фаза.



Режими на работа на биполярен транзистор



Товарна права



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**.

Установяване на работна точка – фиксиран базов ток

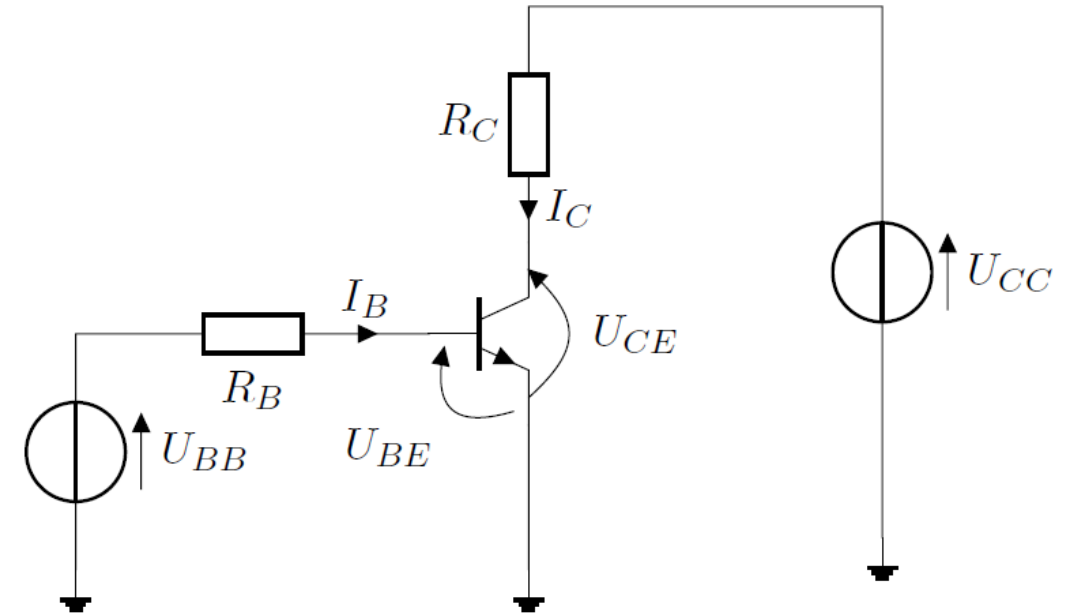
$$I_B = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B} = \frac{5 - 0,7}{28,6 \cdot 10^3} = 150 \cdot 10^{-6} \text{ A} = 150 \text{ }\mu\text{A}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$I_{C\min} = 200 \cdot 150 \cdot 10^{-6} = \mathbf{30 \text{ mA}}$$

$$I_{C\max} = 450 \cdot 150 \cdot 10^{-6} = \mathbf{67,5 \text{ mA}}$$

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



$$U_{BB} = 5\text{V}, U_{CC} = 12\text{V}$$
$$R_C = 150, R_B = 28,6\text{k}$$
$$\beta = \mathbf{200 - 450}$$

DC current gain	$V_{CE} = 5 \text{ V},$ $I_C = 2 \text{ mA}$	Current gain group :A	h_{FE}	110	-	220
		B		200	-	450
		C		420	-	800

Пример - фиксиран базов ток

Ток в базата:

$$I_b = (U_{BB} - U_{BE}) / R_B = (2,7V - 0,7V) / 10k = 0,2mA$$

Токове на насищане:

$$I_{csat} = U_{CC} / R_C = 20V / 1k = 20mA$$

$$I_{bsat} = I_{csat} / \beta$$

Определяме I_{bsat} за граничните стойности на β :

$$I_{bsat(max)} = 20mA / 50 = 0.4mA$$

$$I_{bsat(min)} = 20mA / 150 = 0.13mA$$

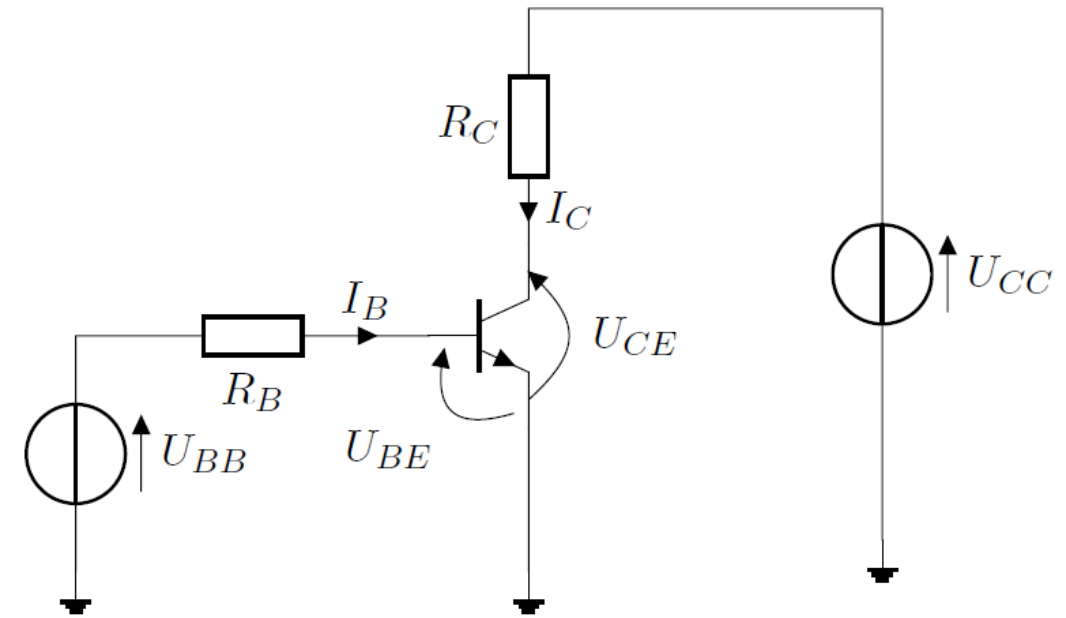
В какъв режим работи транзистора?

$$I_b > I_{bsat(min)}$$

$$I_b < I_{bsat(max)}$$

В зависимост от конкретната стойност на β , транзисторът може да е както в активен режим, така и в режим на насищане.

Извод: схемата с фиксиран базов ток не е подходяща за проектиране на усилватели!



$$U_{BB} = 2,7V, U_{CC} = 20V$$

$$R_C = 1k, R_B = 10k$$

$$\beta = 50-150$$

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

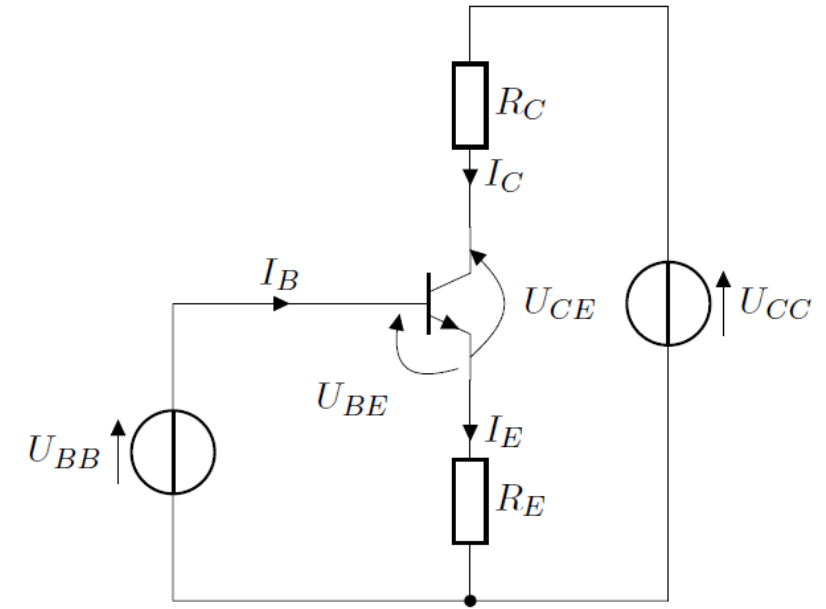
Установяване на работна точка – фиксиран емитерен ток

$$U_{BB} = U_{BE} + U_E = U_{BE} + I_E R_E$$

$$I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E}$$

$$I_C \approx I_E$$

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



Стойността на I_C в работната точка **не зависи от β** , което гарантира стабилност на работната точка.

Пример - фиксиран емитерен ток

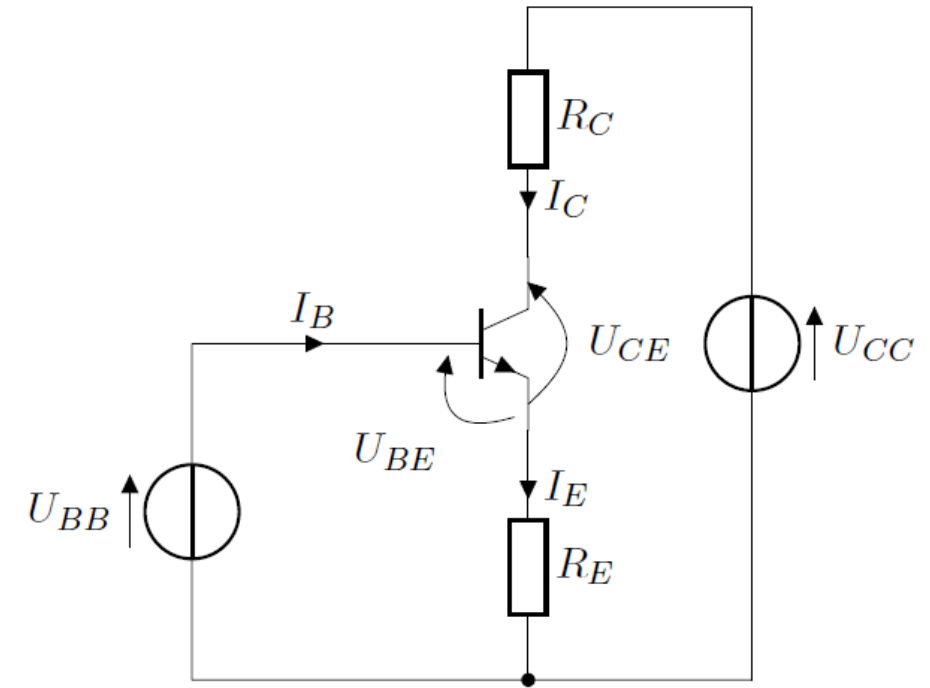
$$U_{BB} = U_{BE} + U_E = U_{BE} + I_E R_E$$

$$I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E} = \frac{5 - 0,7}{2,2 \cdot 10^3} = 1,95 \text{mA}$$

$$I_C \approx I_E = 1.95 \text{mA}$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C - U_E = 15 \text{V} - 1,95 \text{mA} \cdot 1 \text{k}\Omega - 4.3 \text{V} = 8,8 \text{V}$$

Стойността на I_C в работната точка **не зависи от β** , поради което **не е нужно да се определя режима на транзистора** (насищане или активен).



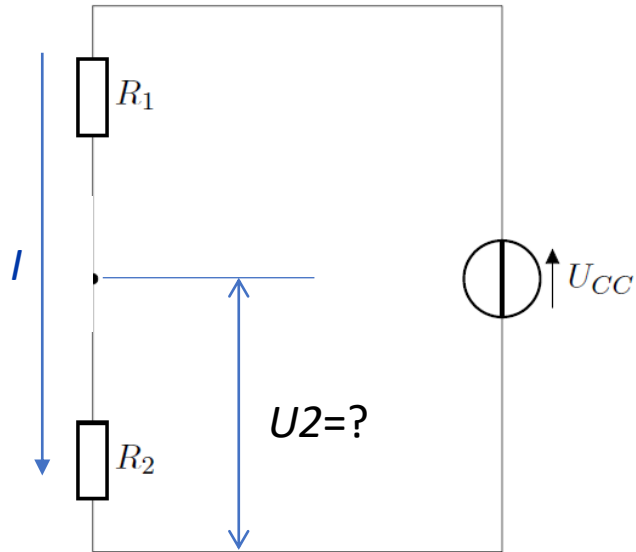
$$U_{BB} = 5 \text{V}, U_{CC} = 15 \text{V}$$

$$R_C = 1 \text{k}, R_E = 2.2 \text{k}$$

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

Установяване на работна точка – делител на напрежение

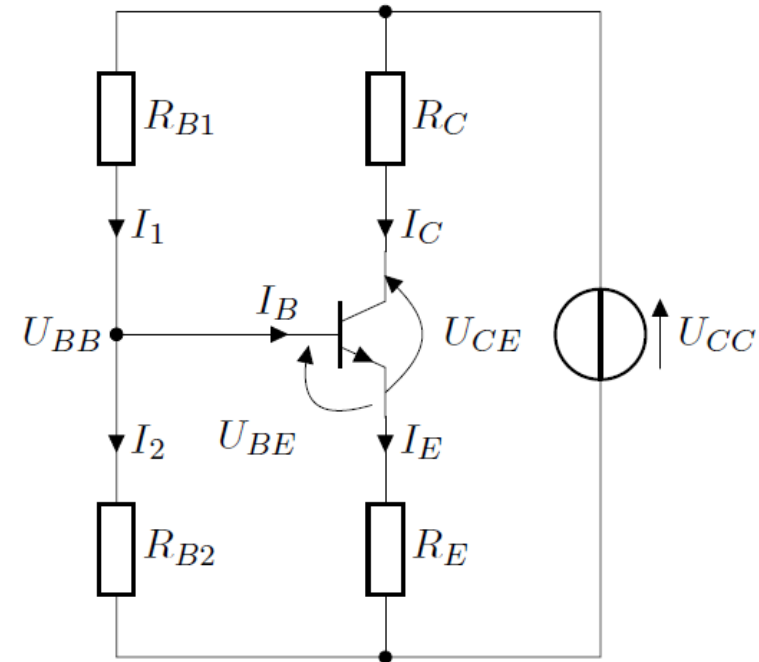
делител на напрежение



$$I = U_{CC} / (R_1 + R_2)$$

$$U_2 = I \cdot R_2 = U_{CC} \cdot R_2 / (R_1 + R_2)$$

Предимство на схемата – не е необходим отделен източник за U_{BB}



$$\text{Ако } I_1 \gg I_B$$

$$U_{BB} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC}$$

$$I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E}$$

$$I_C \approx I_E$$

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

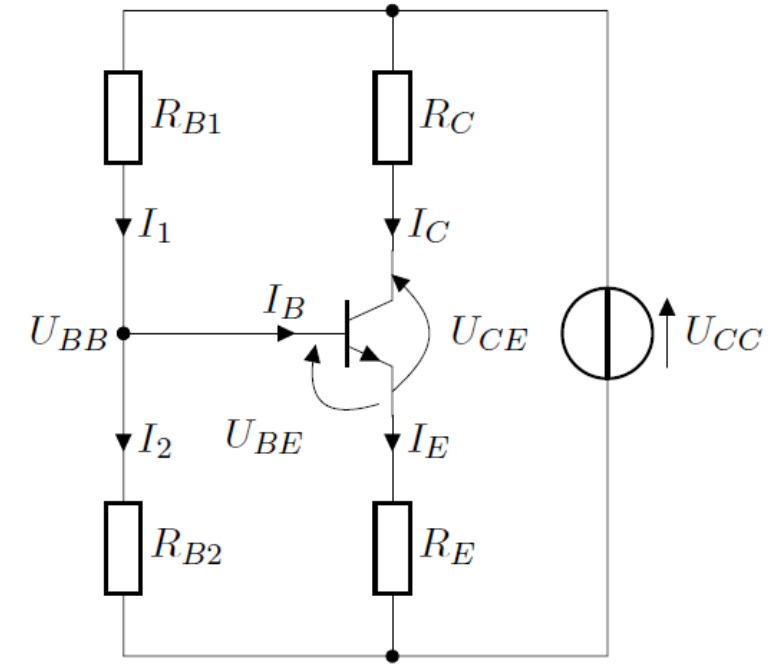
Пример - фиксиран емитерен ток и делител на напрежение в базата

$$U_{BB} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{10k\Omega}{47k\Omega + 10k\Omega} 10V = 1,75V$$

$$I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E} = \frac{1,75V - 0,7V}{1k\Omega} \approx 1mA$$

$$I_C \approx I_E$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C(R_C + R_E) = 10V - 1mA(4,7k\Omega + 1k\Omega) = 10V - 5,7V = 4,3V$$



$$U_{CC} = 10V$$

$$R_{B1} = 47k, R_{B2} = 10k$$

$$R_C = 4.7k, R_E = 1k$$

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

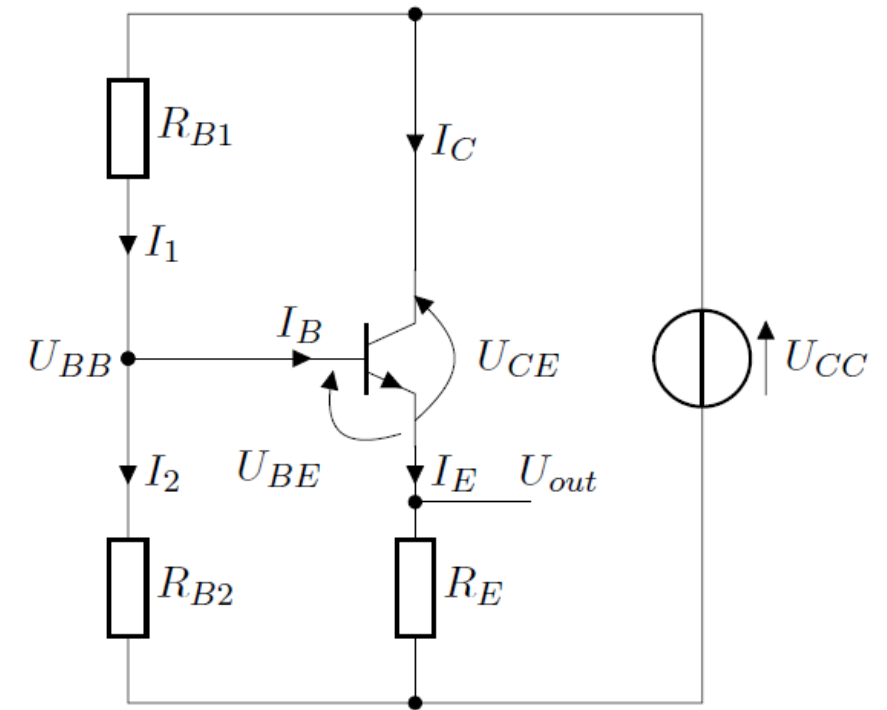
Пример - Схема общ колектор

$$U_{BB} \approx \frac{R_{B2}}{R_{B1} + R_{B2}} U_{CC} = \frac{150k\Omega}{150k\Omega + 100k\Omega} 10V = 6V$$

$$I_E = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E} = \frac{6V - 0,7V}{1k\Omega} = 5,3mA$$

$$I_C \approx I_E$$

$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_E = 10V - 5,3mA \cdot 1k\Omega = 4,7V$$



$$U_{CC} = 10V$$

$$R_{B1} = 100k, R_{B2} = 150k, R_E = 1k$$

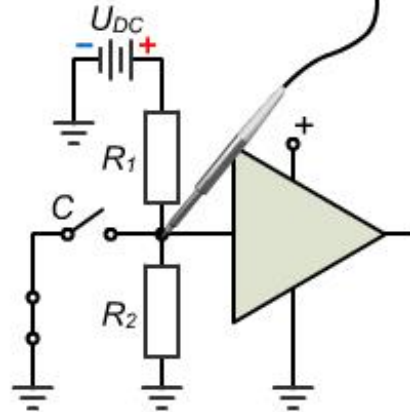
$$U_{CE} = ?, I_C = ?$$

Съставки на базовото напрежение

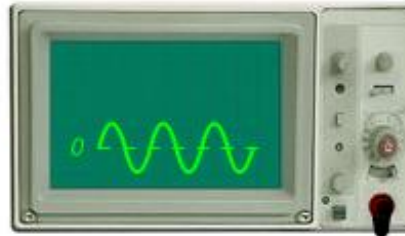
Постоянна съставка
 $U_B = \text{const}$



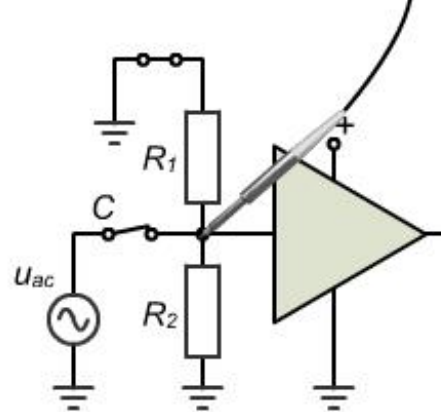
dc equivalent



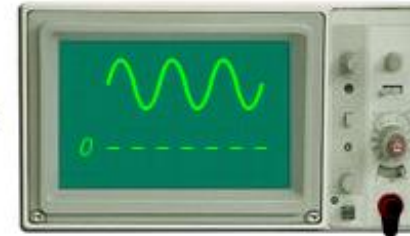
Променлива
съставка u_b



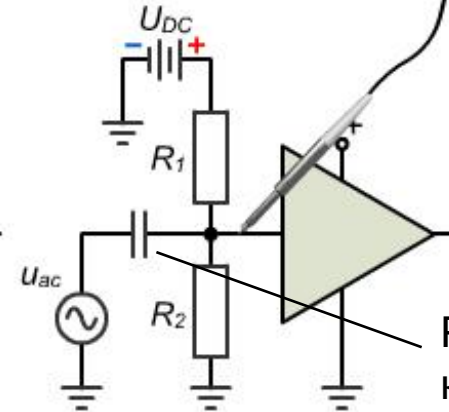
ac equivalent



Моментна стойност
 $u_B = U_B + u_b$



dc + ac



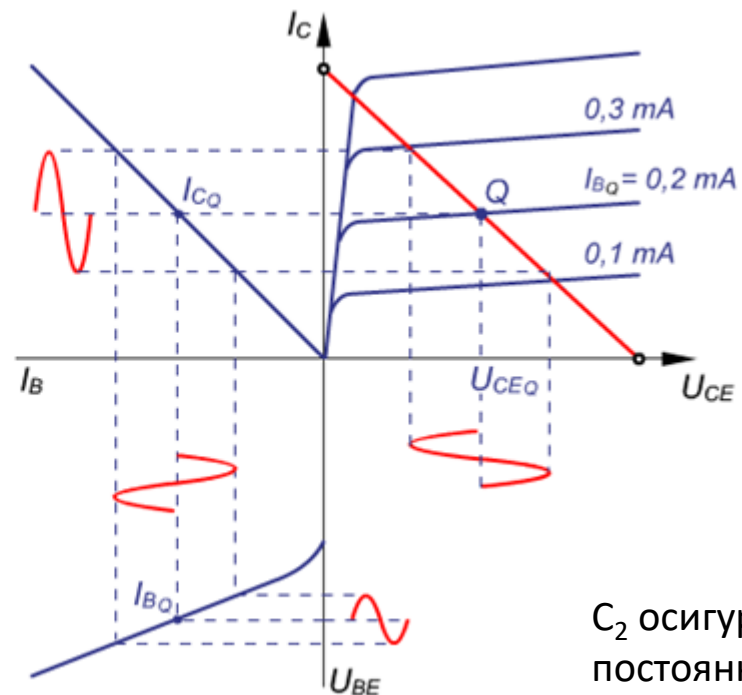
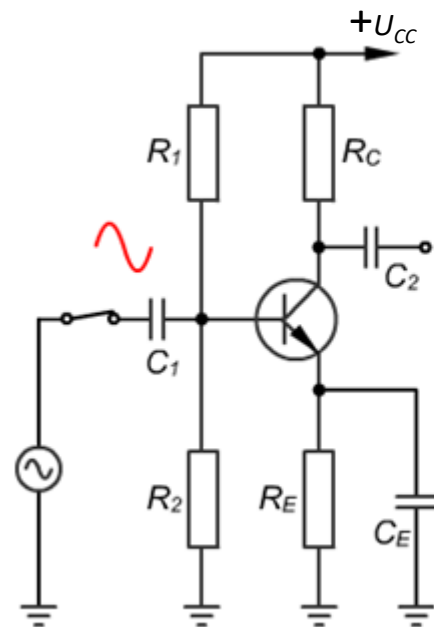
Разделителен
кондензатор

Постоянна съставка – определя се от избраната работна точка

Променлива съставка – това е усилваният сигнал

Графичен анализ

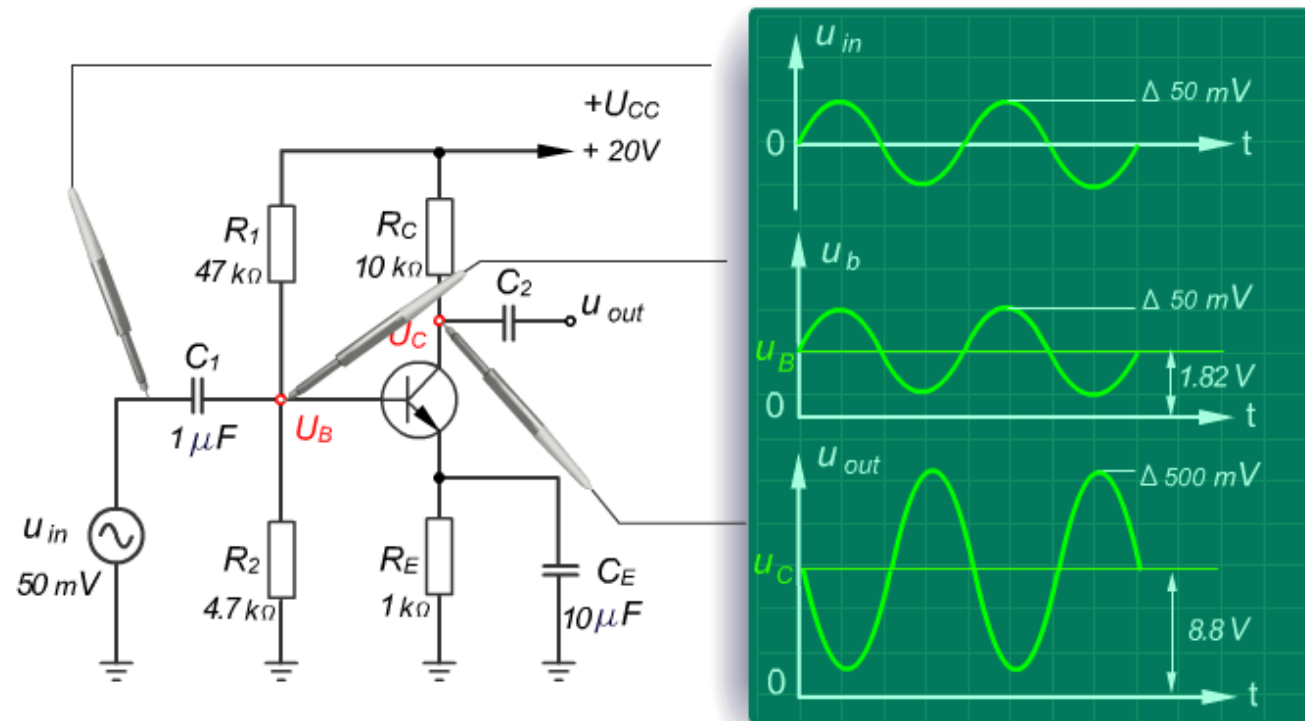
C_1 осигурява независимост на работната точка от постоянната съставка на източника



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.

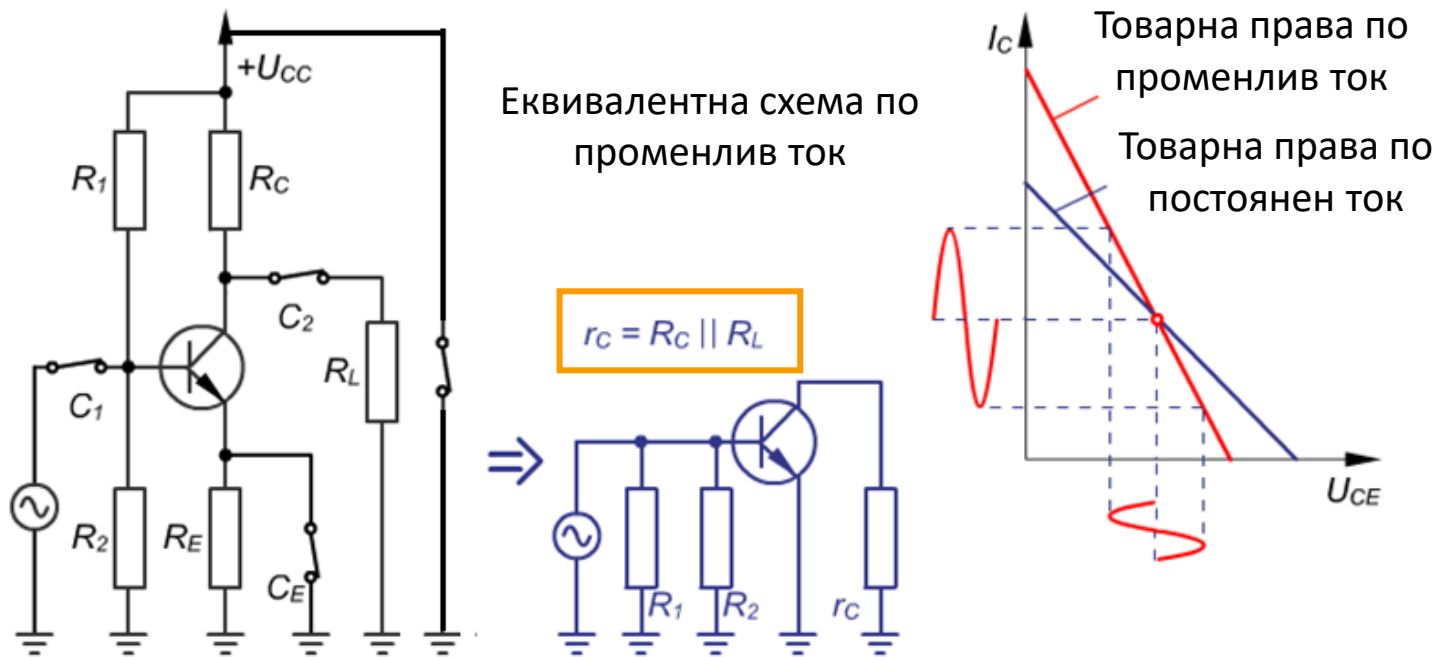
Графичен анализ



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.

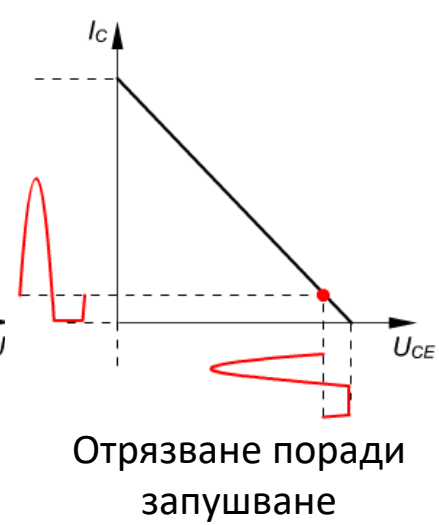
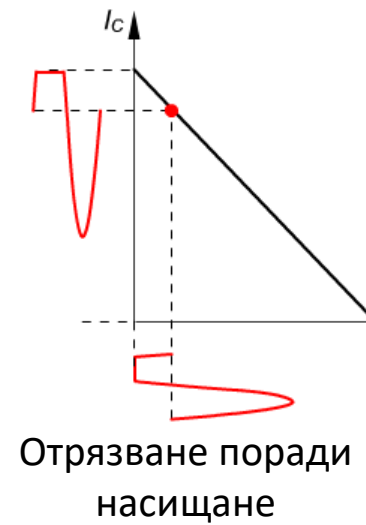
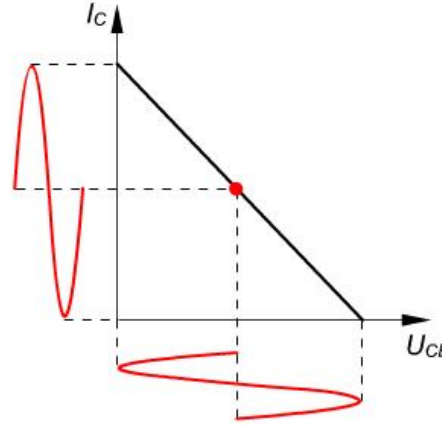
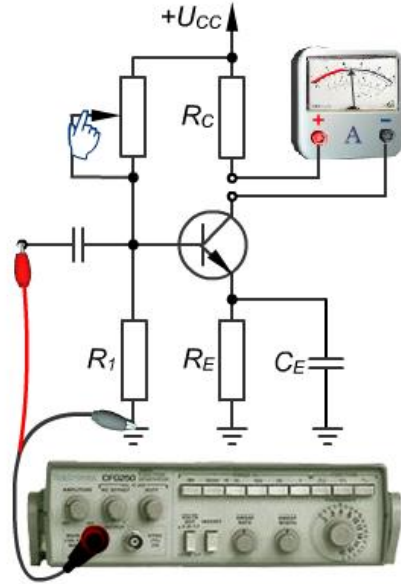
Товарна права по променлив ток



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

Постояннотоковият источник е **късо съединение** за променливата съставка.

Влияние на работната точка



Основно изискване на усилвателите е да осигуряват линейност на усилването, т.е. да не променят формата на сигнала, а само амплитудата му.

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 между насищане и запушване.

Динамични параметри

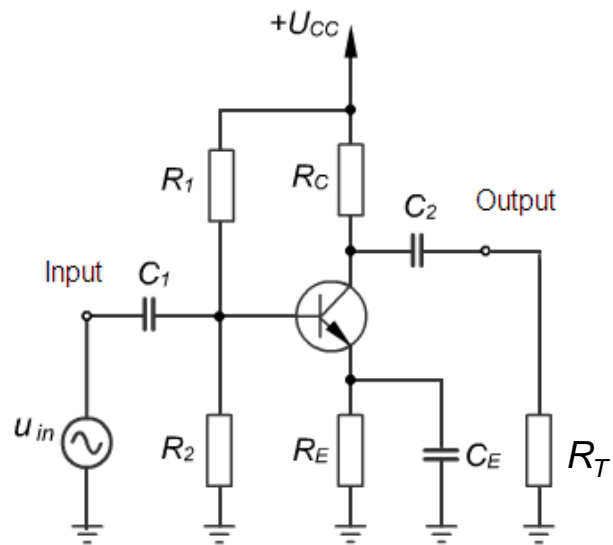


Динамичните параметри характеризират поведението на транзисторните усилватели по променлив ток.

$$A_U = \frac{u_{out}}{u_{in}} \quad A_I = \frac{i_{out}}{i_{in}} \quad A_P = A_U A_I \quad r_{in} = \frac{u_{in}}{i_{in}} \quad r_{out} = \frac{u_{out}}{i_{out}}$$

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

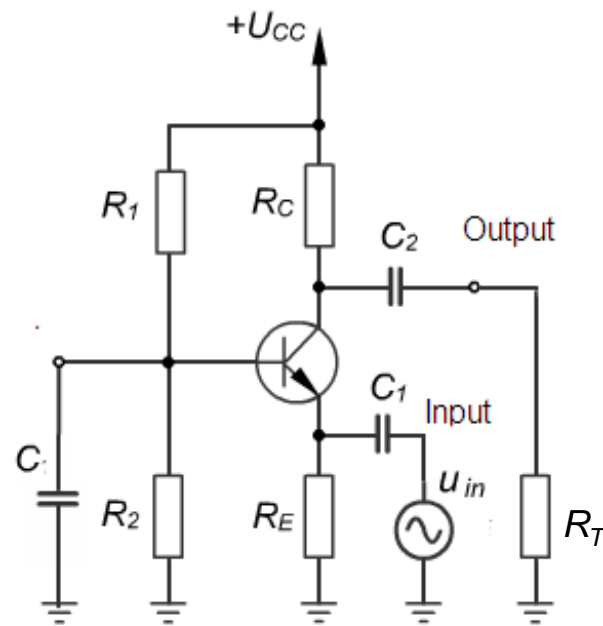
Схеми на усилватели



Усилвател ОЕ

A_I – висок

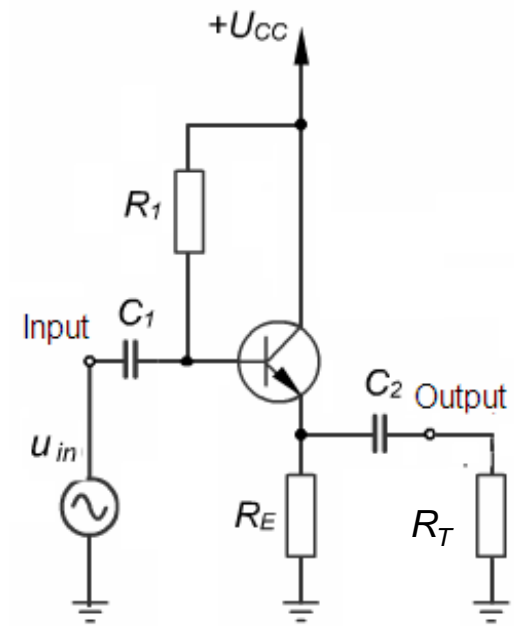
A_U – висок



Усилвател ОБ

$A_I < 1$

A_U – висок

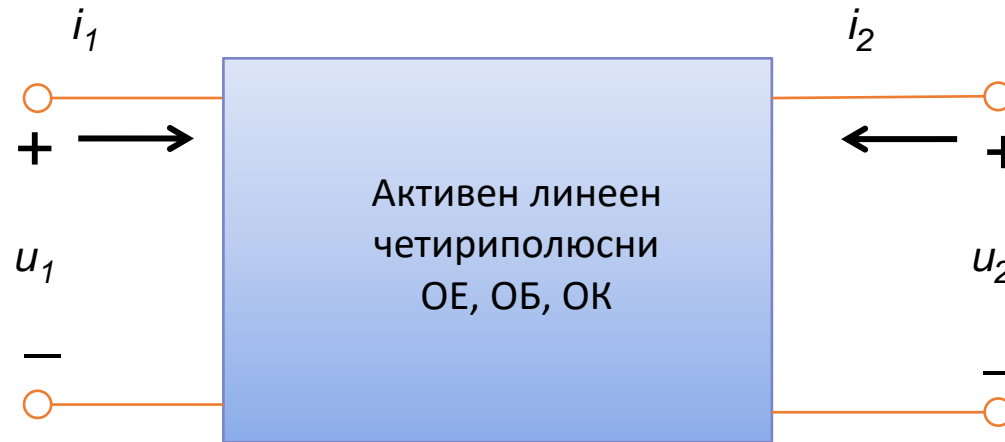


Усилвател ОК

A_I – висок

$A_U < 1$

h-параметри



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

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

Система с h -параметри – хибридна (смесена) система

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

h-параметри

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

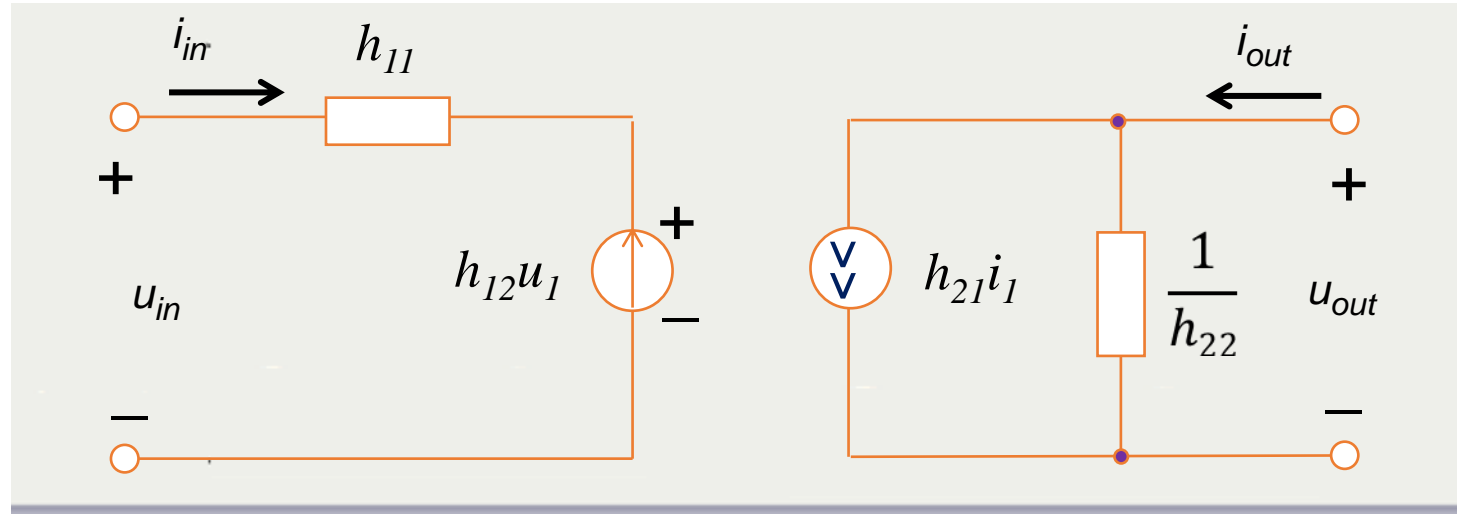
$$h_{21} = \left. \frac{i_2}{i_1} \right|_{u_2=0}$$

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

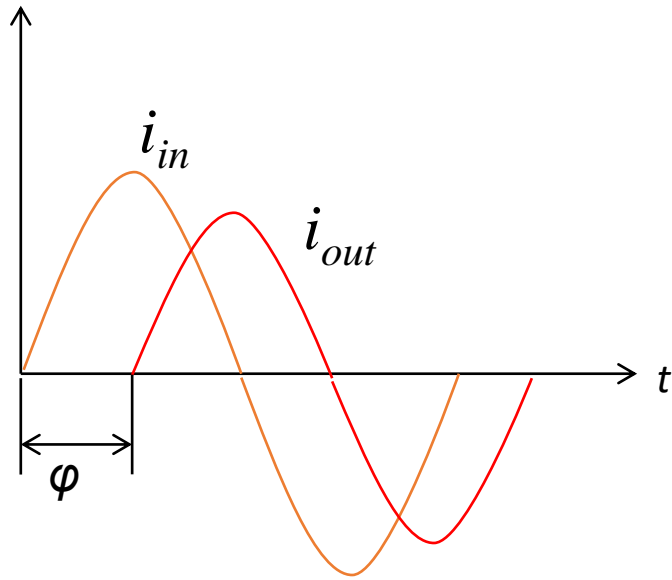
Еквивалентна схема с h -параметри



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 останалите случаи в каталозите се дават нормирани криви на относителните h - параметри при различни токове, напрежения и температури.

Работа при високи честототи



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.

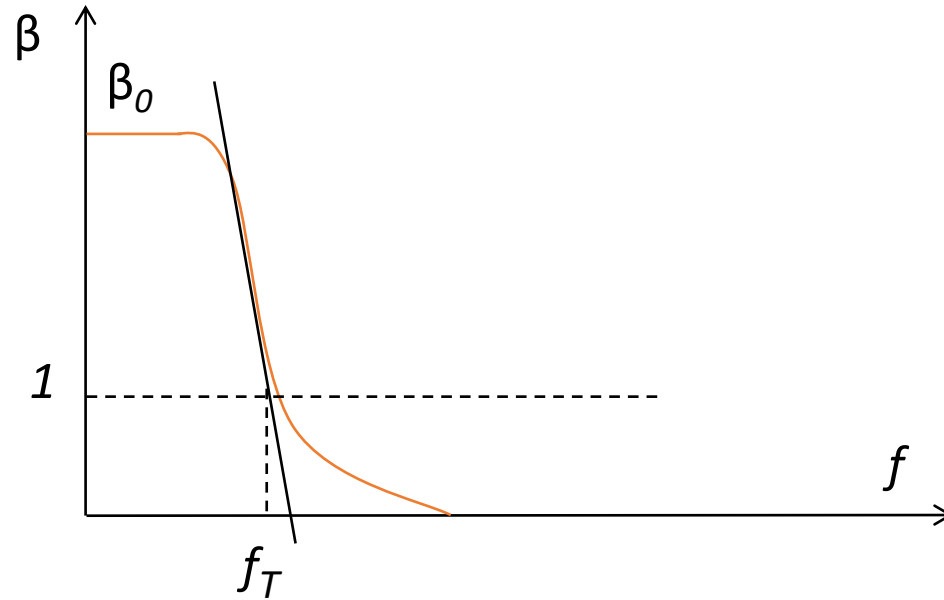
За оценка на усилвателните свойства на транзистора при високи честоти се използват **граничните честоти**.

Транзитна честота

Произведението на модула на диференциалния коефициент на усилване β и текущата честота се нарича транзитна честота f_T .

$$\beta \cdot f = f_T$$

$$\text{Ако } f = f_T, \beta \approx 1$$



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

Транзитна честота (gain bandwidth product)

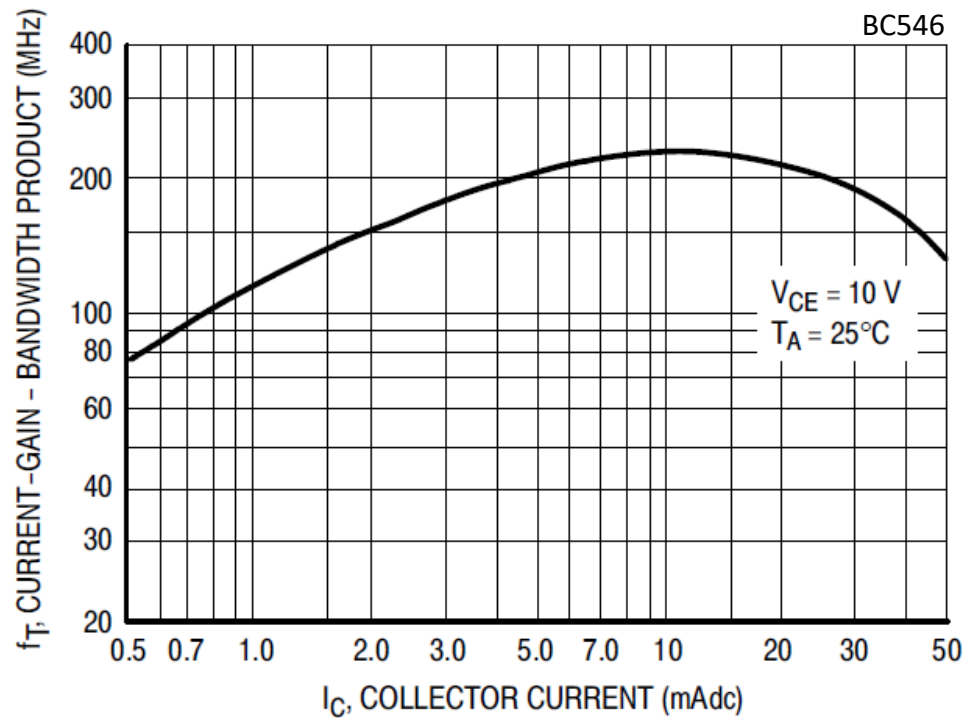


Figure 6. Current-Gain – Bandwidth Product

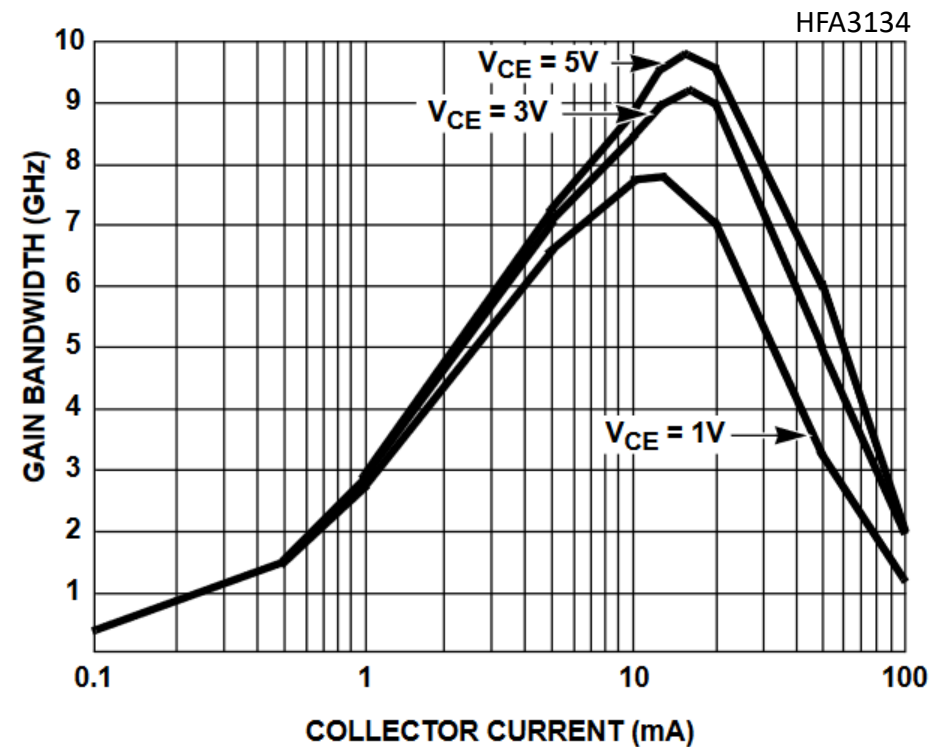
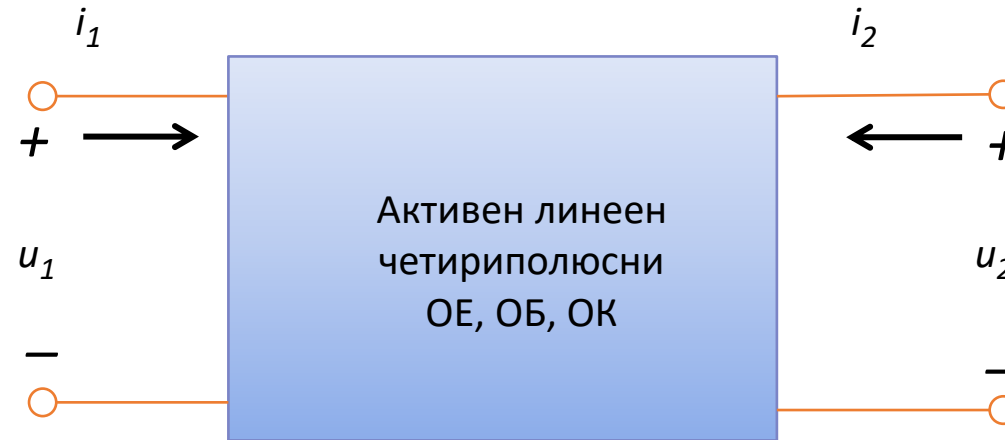


FIGURE 4. NPN GAIN BANDWIDTH PRODUCT vs COLLECTOR CURRENT

y - параметри



За анализ на усилвателни стъпала при **високи честоти и малки променливи сигнали** се използват четириполюсни y-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 y-параметри

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

Използват се за анализ на схеми при честоти до 300 MHz.

y - параметри

$$y_{11} = \frac{i_1}{u_1} \bigg|_{u_2=0}$$

Входна проводимост при късо съединение в изхода по променлив ток

$$y_{12} = \frac{i_1}{u_2} \bigg|_{u_1=0}$$

Обратна проходна проводимост при късо съединение на входа по променлив ток

$$y_{21} = \frac{i_2}{u_1} \bigg|_{u_2=0}$$

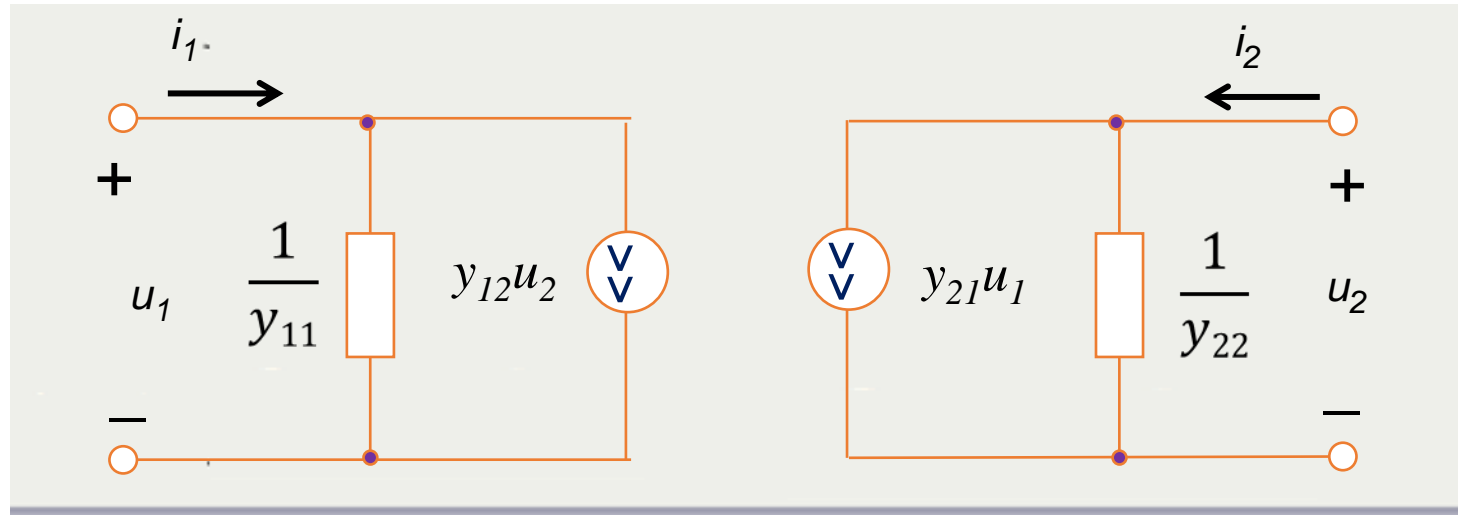
Права проходна проводимост (стръмност) при късо съединение в изхода по променлив ток

$$y_{22} = \frac{i_2}{u_2} \bigg|_{u_1=0}$$

Изходна проводимост при късо съединение на входа по променлив ток

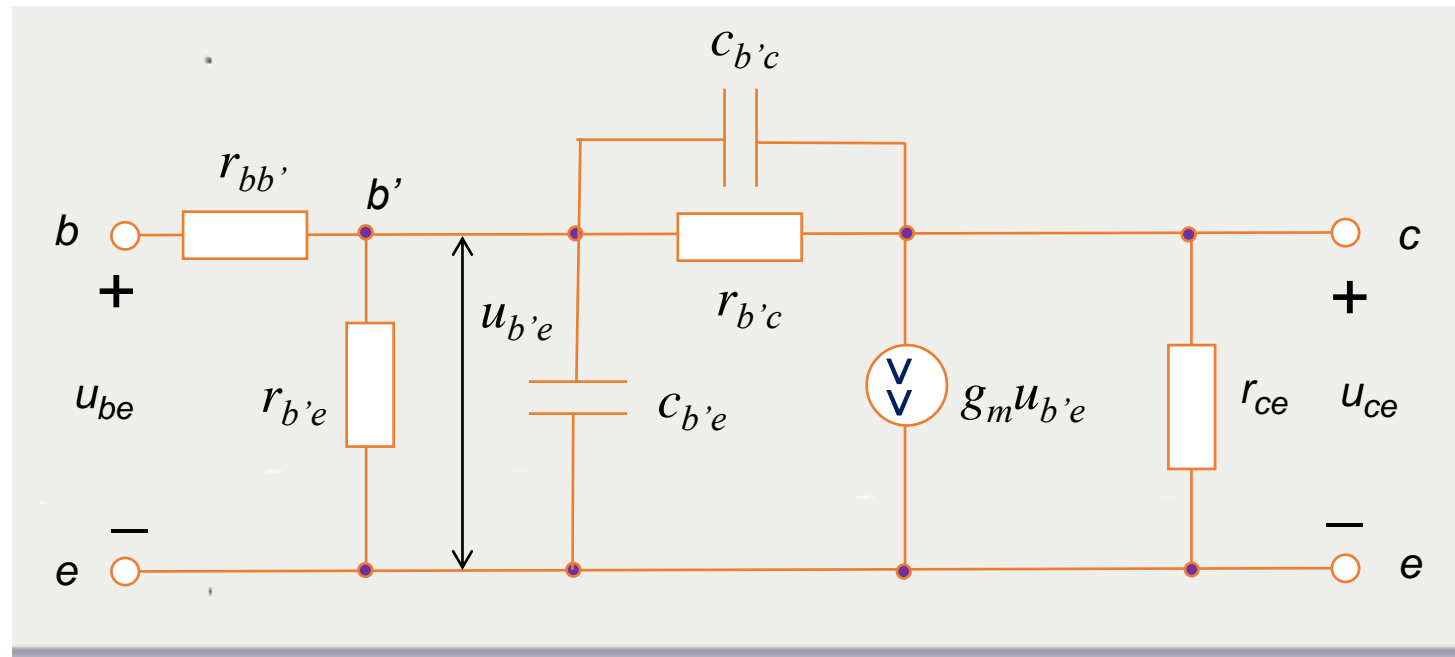
Съществува връзка между y- и h-параметри.

Еквивалентна схема с y - параметри



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

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