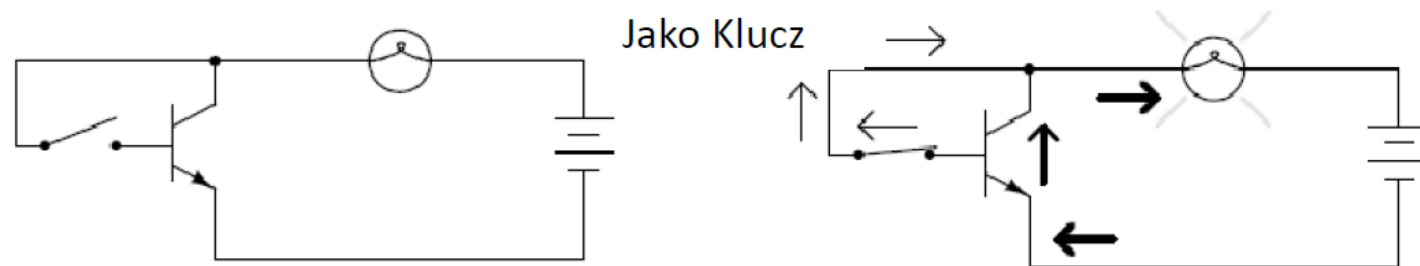
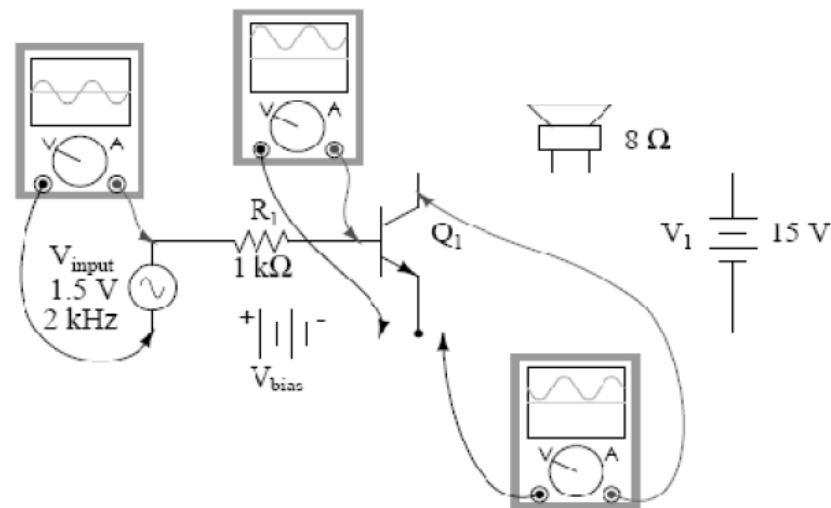


# Tranzystor (TRANSFER-RESISTOR)

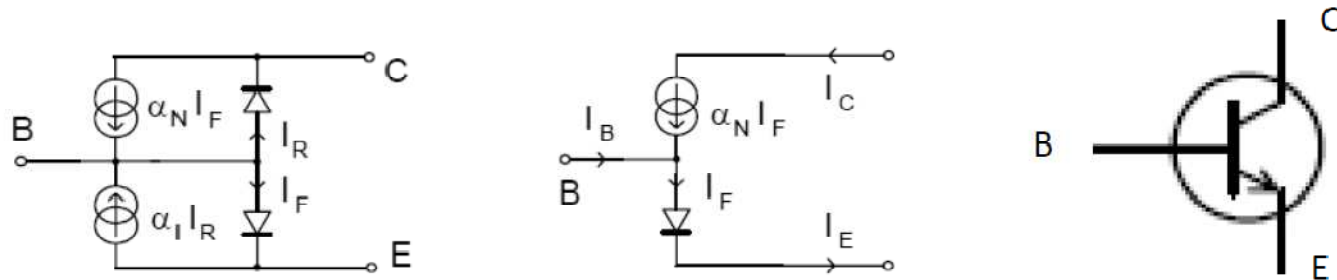
## bipolarny Tranzystor – jak to działa?



Jako Wzmacniacz



## Model nieliniowy (rzeczywisty statyczny) Ebersa - Molla – Tranzystor BJT typu n-p-n



Prądy diod są dane równaniami:

$$I_F = I_{ES} \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{\varphi_T}\right) - 1 \right] , \quad I_R = I_{CS} \left[ \exp\left(\frac{U_{BC}}{\varphi_T}\right) - 1 \right]$$

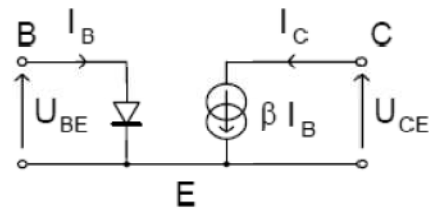
i model jest definiowany za pomocą czterech parametrów:  $I_{CS}$ ,  $I_{ES}$ ,  $\alpha_N$ ,  $\alpha_F$ .

Gdy wiadomo, że tranzystor pracuje w obszarze aktywnym przy polaryzacji normalnej ( $U_{BE} > 0$ ,  $U_{BC} < 0$  – w przypadku tranzystora *n-p-n*)

$$I_E = I_F , \quad I_C = \alpha_N I_F ,$$

zaś 
$$I_B = I_E - I_C = I_F - \alpha_N I_F = (1 - \alpha_N) I_F .$$

Wygodnie jest przekształcić ten model do postaci pokazanej na rysunku:



## Model nieliniowy (rzeczywisty statyczny) Ebersa – Molla uproszczony – Tranzystor BJT typu n-p-n

W tym modelu prądy bazy i kolektora wynoszą:

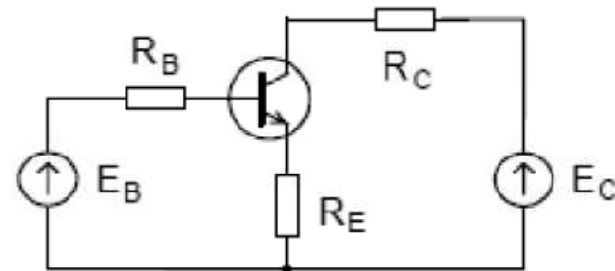
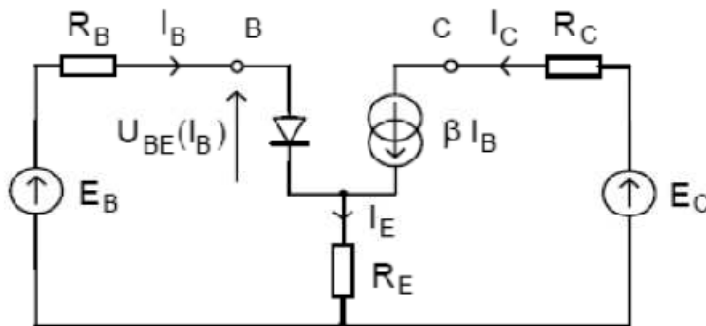
$$I_B = I_{BS} \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{\varphi_T}\right) - 1 \right], \quad I_C = \beta I_B$$

$$I_C = \alpha_N I_F = \beta I_B, \quad I_B = (1 - \alpha_N) I_F,$$

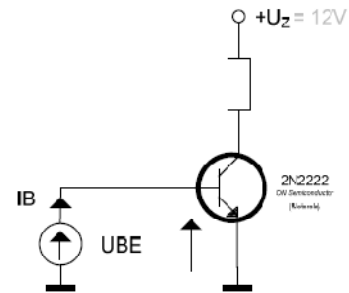
stąd 
$$\beta = \frac{\alpha_N}{1 - \alpha_N},$$

zaś 
$$I_B = (1 - \alpha_N) I_{ES} \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{\varphi_T}\right) - 1 \right] = I_{BS} \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{\varphi_T}\right) - 1 \right],$$

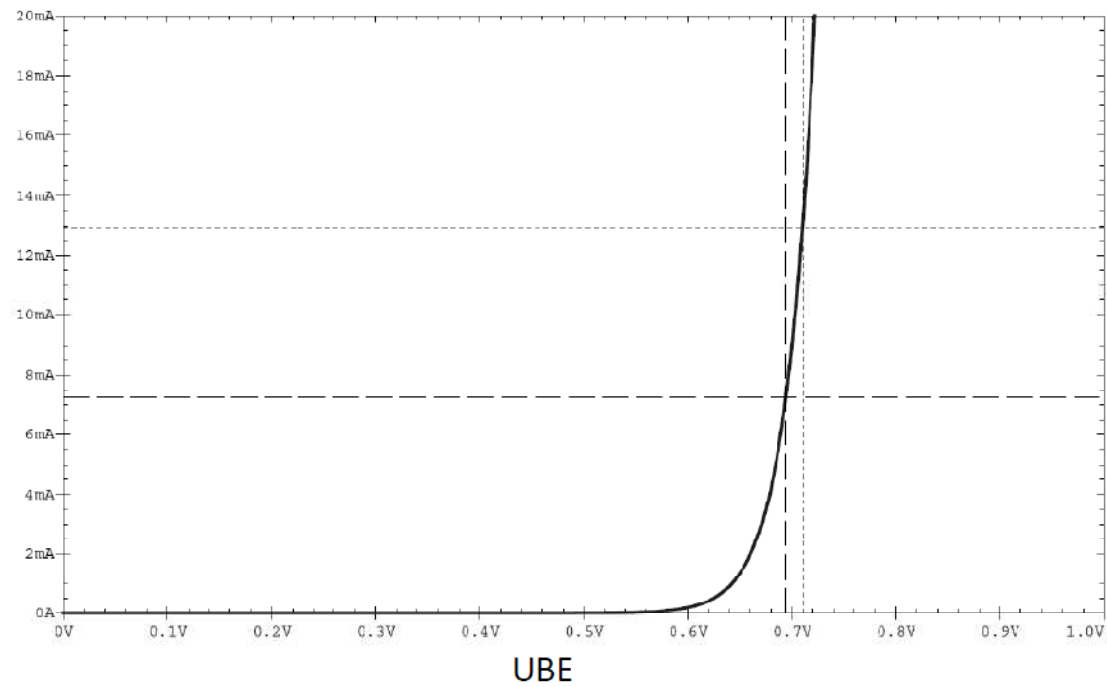
stąd 
$$I_{BS} = (1 - \alpha_N) I_{ES} \approx \frac{I_{ES}}{\beta} \quad (\text{bo } \alpha_N \text{ jest bliskie } 1).$$



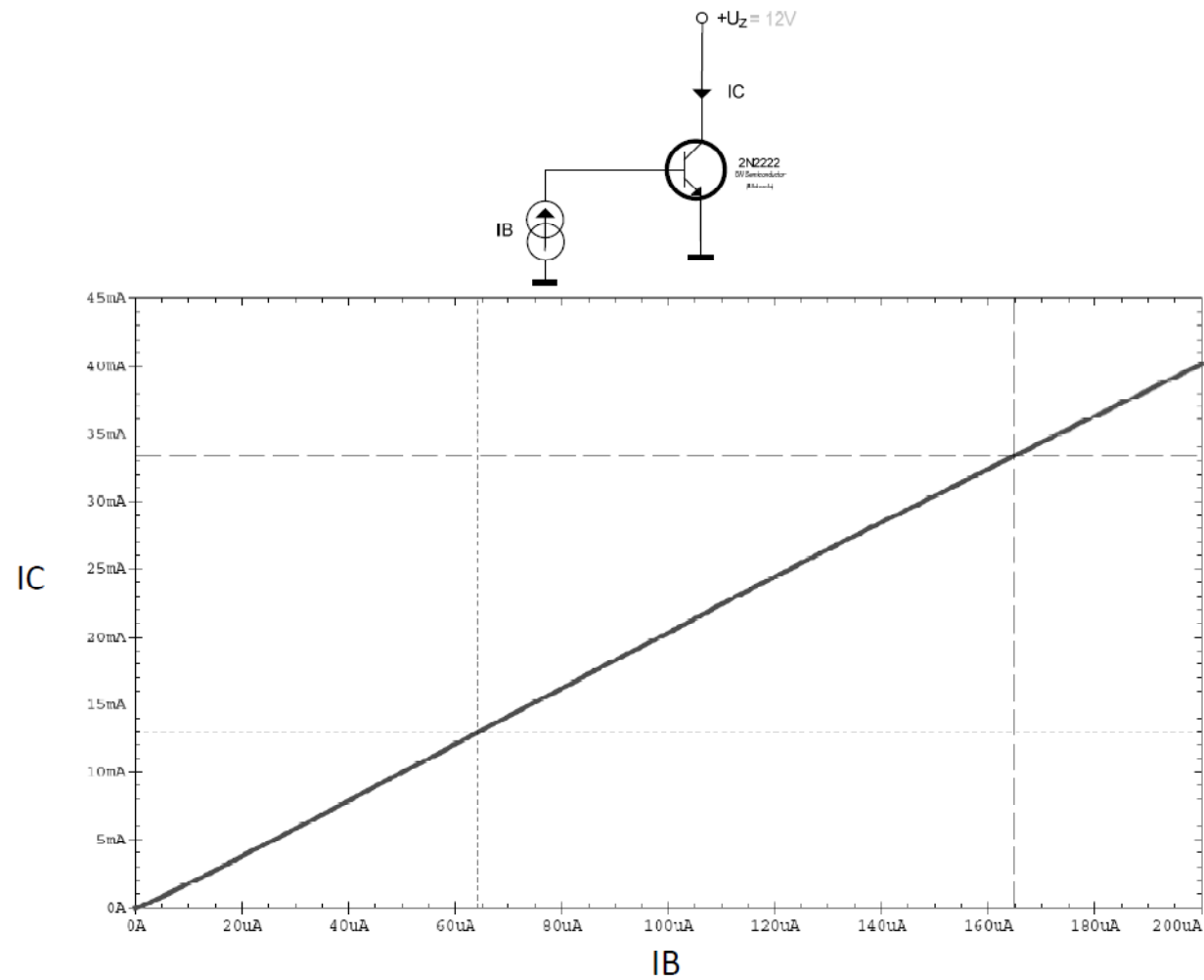
## Charakterystyka wejściowa $I_B=f(U_{BE})$ – Tranzystor BJT



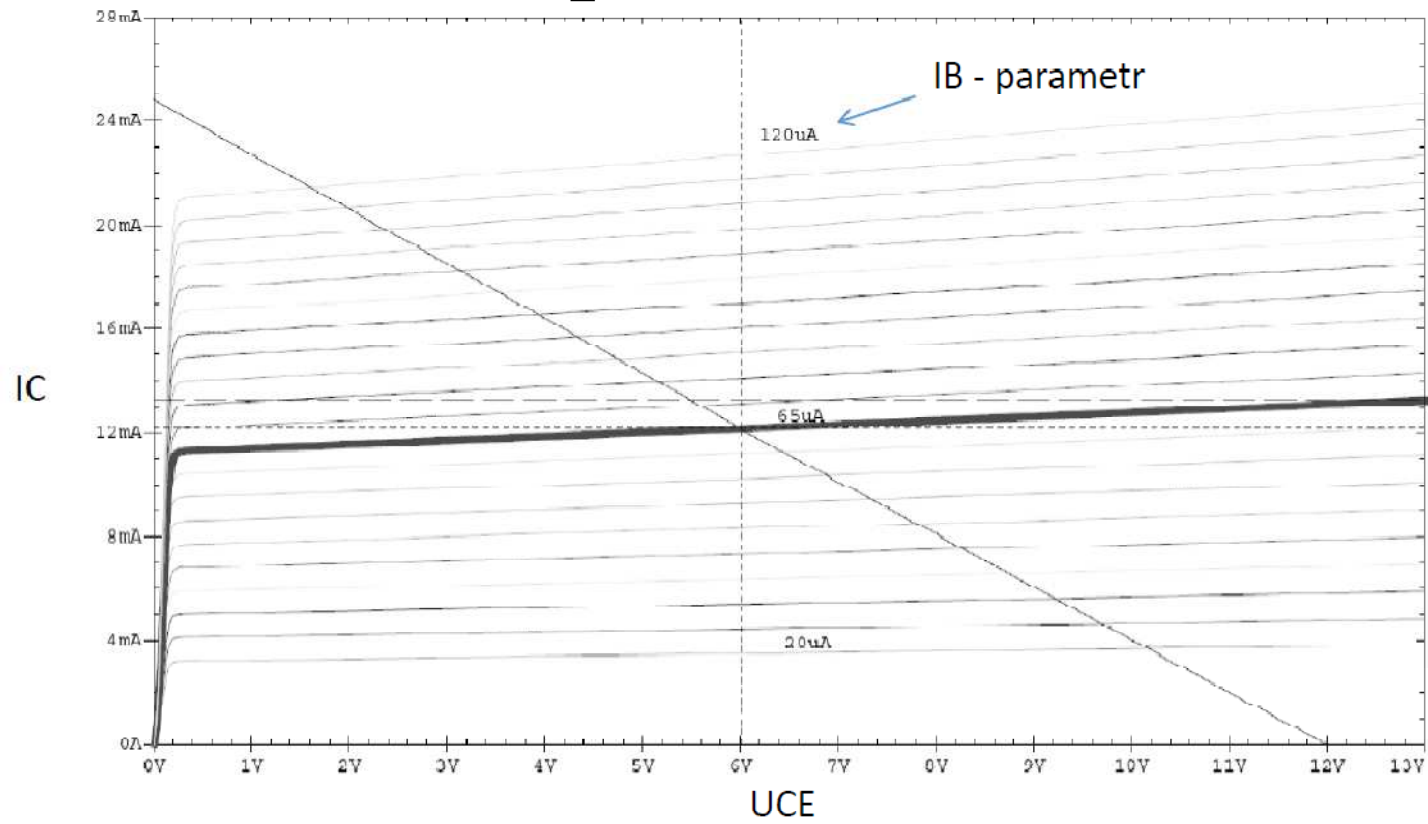
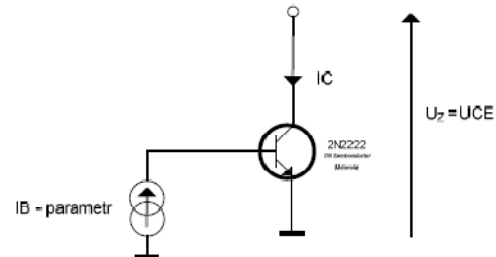
$I_B \cdot \beta$



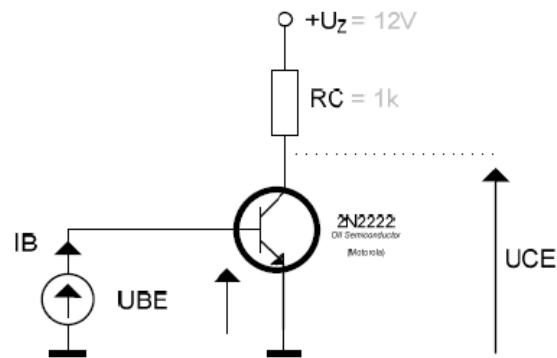
## Charakterystyka przejściowa $I_C=f(I_B)$ – Tranzystor BJT



## Charakterystyka wyjściowa $I_C = f(U_{CE}, I_B)$ – Tranzystor BJT



## Charakterystyka przejściowa w układzie wzmacniającym WE - $U_{CE}=f(U_{BE})$ – Tranzystor BJT



Prąd bazy  $I_B$ , zależy nieliniowo od napięcia  $U_{BE}$ :

$$I_B := \left[ I_{ES} \cdot \left[ e^{\left( \frac{U_{BE}}{U_T} \right)} - 1 \right] \right] \quad (1) \quad \begin{matrix} U_T := 0.026 \\ I_{ES} := 0.88 \cdot 10^{-16} \end{matrix}$$

A, więc napięcie  $U_{CE}$  możemy zapisać w postaci:

$$U_{CE} := U_Z - R_C \cdot \beta_o \cdot \left[ I_{ES} \cdot \left[ e^{\left( \frac{U_{BE}}{U_T} \right)} - 1 \right] \right] \quad (2) \quad \beta_o = 200 \text{ (2N2222)}$$

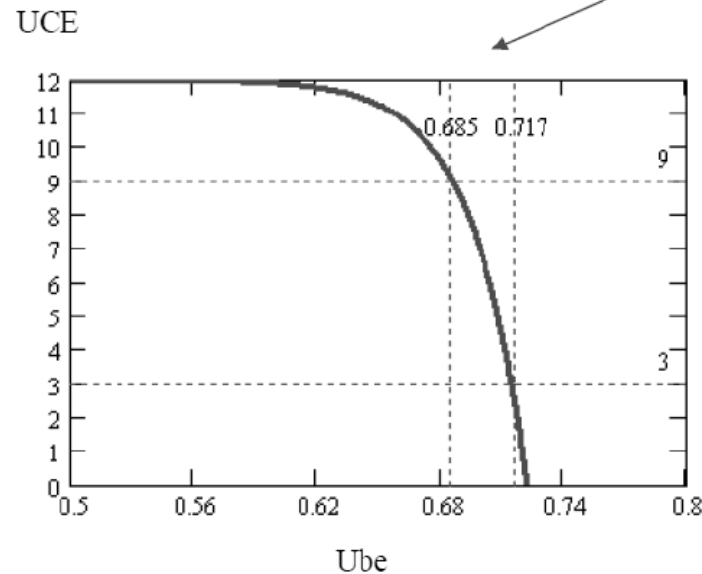
Zakładając aproksymację liniową ch-ki  $U_{CE} = f(U_{BE})$ , w danym punkcie pracy  $U_{CEQ}/U_{BEQ}$ , możemy zapisać liniową zależność  $U_{CE} = f(U_{BE})$ , w postaci:

$$U_{CE}(U_{BE}) := U_Z - R_C \cdot \beta_o \cdot \left[ I_{ES} \cdot \left[ \frac{U_{BE} + U_T - U_{BEQ}}{U_T} \cdot e^{\left( \frac{U_{BEQ}}{U_T} \right)} - 1 \right] \right] \quad (3)$$

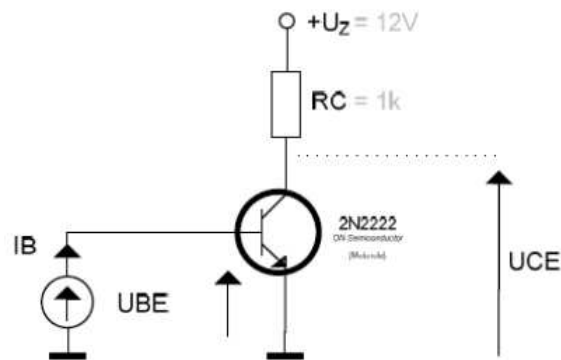
A zatem wzmocnienie napięciowe „różniczkowe” w danym punkcie pracy  $U_{BEQ}$ ,

liczone, jako pochodna  $K_u = \frac{dU_{CE}}{dU_{BE}}$ , możemy wyznaczyć ze wzoru,

$$\frac{d}{dU_{BE}} \left[ U_Z - R_C \cdot \beta_o \cdot \left[ I_{ES} \cdot \left[ \frac{U_{BE} + U_T - U_{BEQ}}{U_T} \cdot e^{\left( \frac{U_{BEQ}}{U_T} \right)} - 1 \right] \right] \right] \rightarrow -R_C \cdot \beta_o \cdot \frac{I_{ES}}{U_T} \cdot \exp\left(\frac{U_{BEQ}}{U_T}\right)$$



## Charakterystyka przejściowa w układzie wzmacniającym WE - $U_{CE} = f(U_{BE})$ – Tranzystor BJT



Wzmocnienie różniczkowe - dla *bardzo małych sygnałów* których amplituda:  $U_m \ll U_T$

$$K_u = \frac{dU_{CE}}{dU_{BE}} = -R_C \cdot \beta_o \cdot \frac{I_{ES}}{U_T} \cdot \exp\left(\frac{U_{BEQ}}{U_T}\right) \quad (4)$$

możemy wyznaczyć dla poszczególnych punktów pracy przy  $U_{CEQ}$  - zamiast przy  $U_{BEQ}$ , i dla odpowiednich parametrów  $\beta_o$ ,  $U_Z$ ,  $U_T$  i  $R_C$ , zakładając że  $U_{BEQ}$  jest dane wzorem - funkcja odwrotna do wzoru (2) :

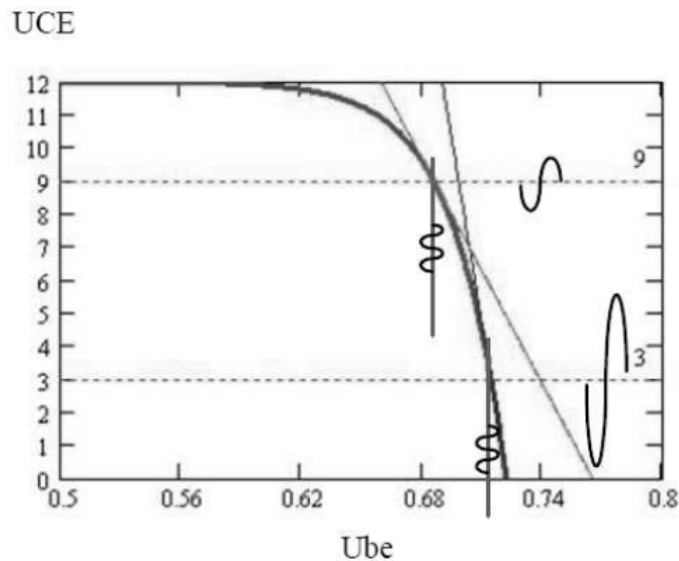
$$U_{BEQ} = U_T \cdot \ln\left(\frac{U_Z - U_{CEQ}}{R_C \cdot \beta_o \cdot I_{ES}} + 1\right) \quad (5)$$

Zatem  $K_u = f(R_C, U_{CEQ})$  jest funkcją  $U_{CEQ}$  – ustalonego położenia na ch-ce przejściowej danej wzorem (2), i ustalonego  $R_C$ .

Ostatecznie, można wyznaczyć wzmocnienia  $K_u$  wg wzoru (4) dla przyjętych przykładowych punktów pracy  $U_{CEQ} = 3V$  i  $U_{CEQ} = 9V$ , zgodnie z wykresami na rysunku będą się zmieniały nachylenia zgodnie ze wzorem (3), daną wartością  $R_C$  i będą wynosiły dla  $U_Z = 12V$ ,  $U_T = 0.026V$ ,  $\beta_o = 200$  – odpowiednio :

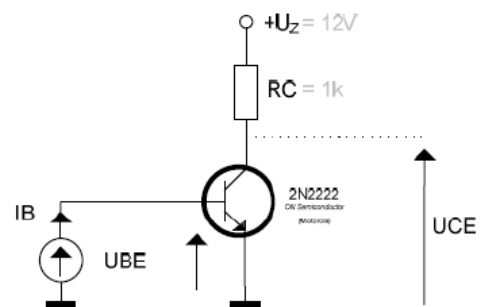
$$K_u(U_{CEQ} @ 9V) = -147 [V/V] \quad U_{BEQ} = 0.686V$$

$$K_u(U_{CEQ} @ 3V) = -440 [V/V] \quad U_{BEQ} = 0.717V$$

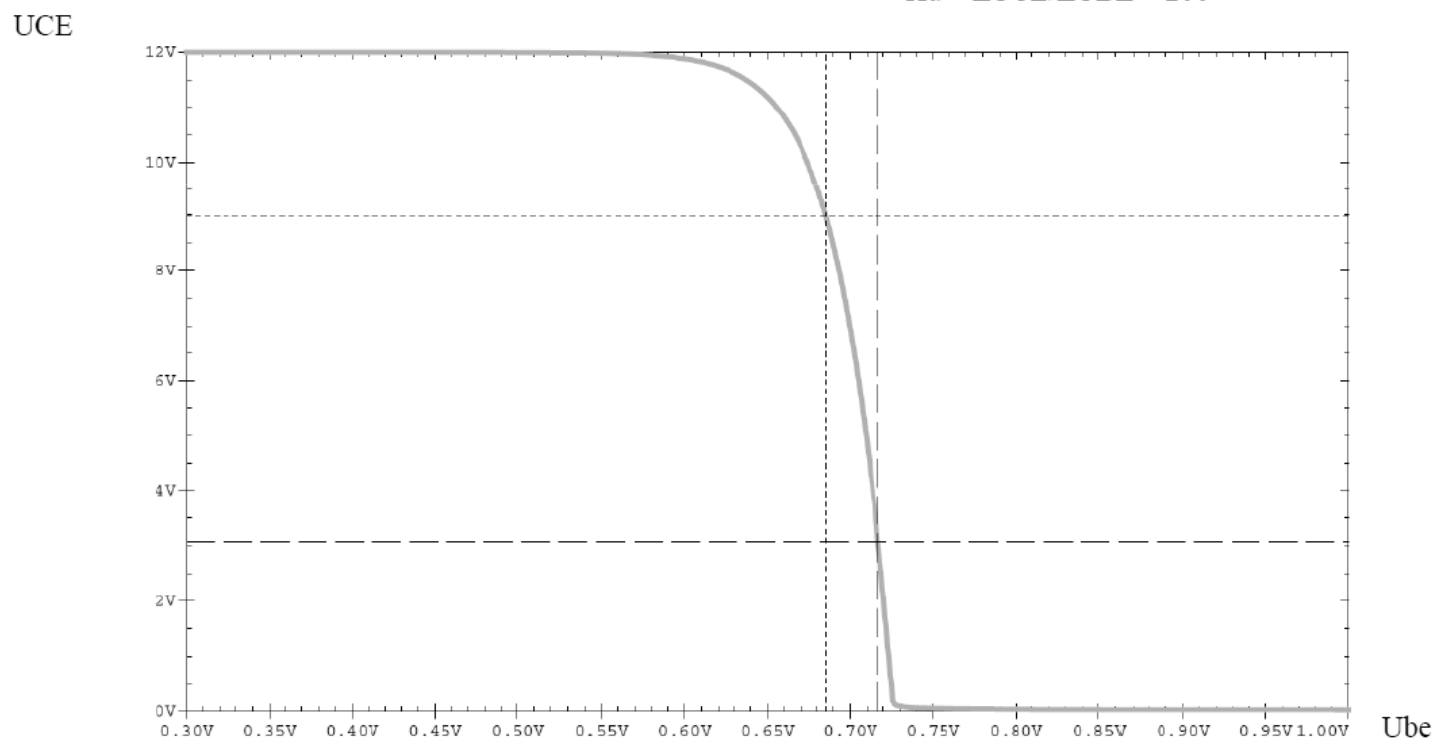




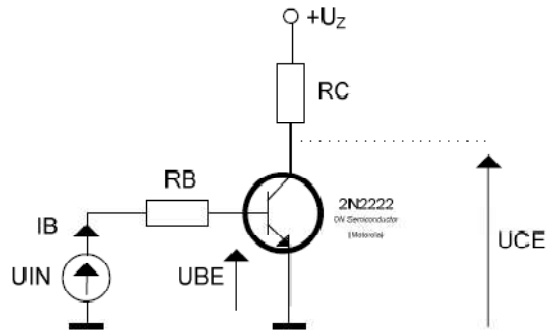
## Charakterystyka przejściowa w układzie wzmacniającym WE - $U_{CE}=f(U_{BE})$ – Tranzystor BJT – symulacja/pomiar



$$K_u = \Delta U_{CE} / \Delta U_{BE} = 200$$



## Charakterystyka przejściowa w układzie wzmacniającym WE - $U_{CE}=f(U_{BE})$ – Tranzystor BJT



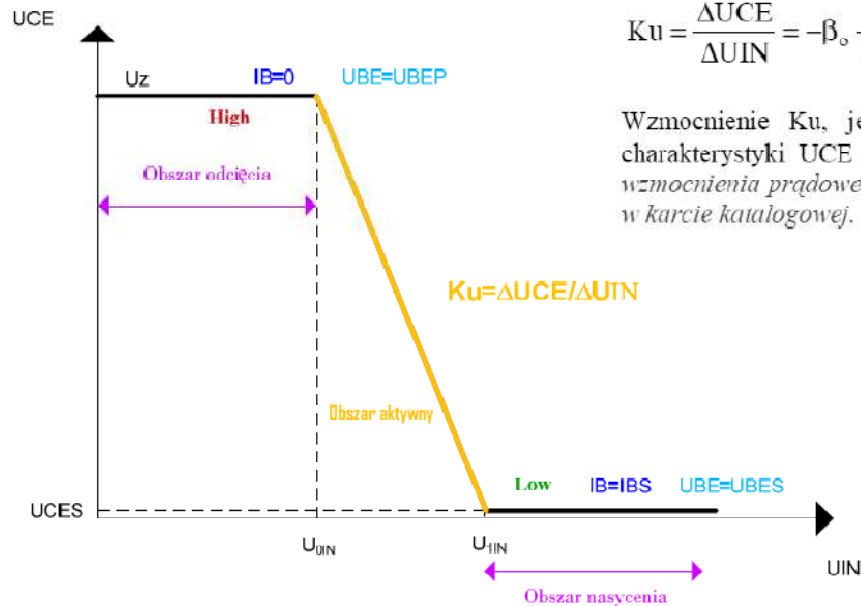
W przypadku wzmacniacza napięciowego z pojedynczym tranzystorem w układzie wspólnego emitera (CE), ze sprzężeniem złącza B-E, przez rezystancję  $R_B$ , możemy zapisać wzór analityczny na napięcie wyjściowe  $U_{CE}$  w zależności od napięcia  $U_{IN}$ :

$$\Delta U_{CE} = \Delta U_{IN} \cdot \frac{U_Z - U_{CES}}{(U_Z - U_{CES}) \frac{R_B + R_{be}}{R_C} - U_{BEP} \frac{R_B}{R_{BES}}}$$

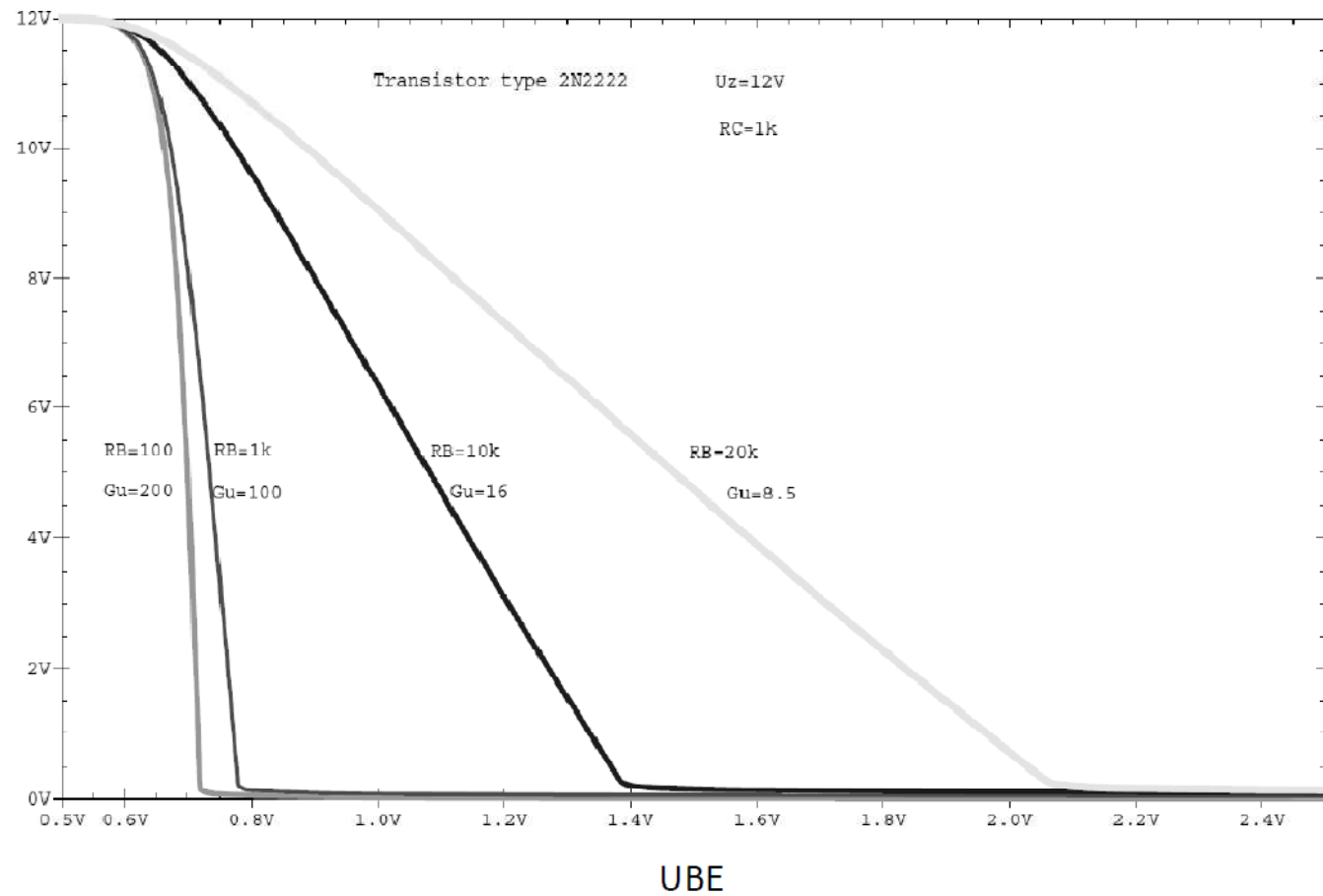
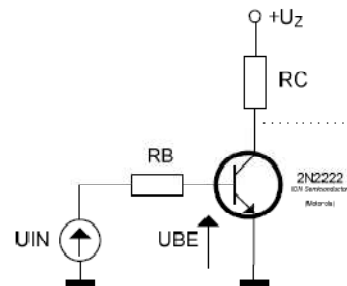
Zakładając, że  $I_B R_B > U_{BE}$ , a ponieważ  $U_{BEP}$  jest prawie stałe, bez względu na prąd  $I_B$ , a rezystancja statyczna bazy  $R_{BES}$ , w zakresie zmian prądu bazy od  $I_B=0$  do  $I_{BS}$ , jest dużo większa od  $R_B$ , to możemy uprościć relację i zapisać wzór na wzmocnienie napięciowe, w obszarze liniowym,  $K_u$  jako:

$$K_u = \frac{\Delta U_{CE}}{\Delta U_{IN}} = -\beta_o \frac{R_C}{R_B + R_{be}}$$

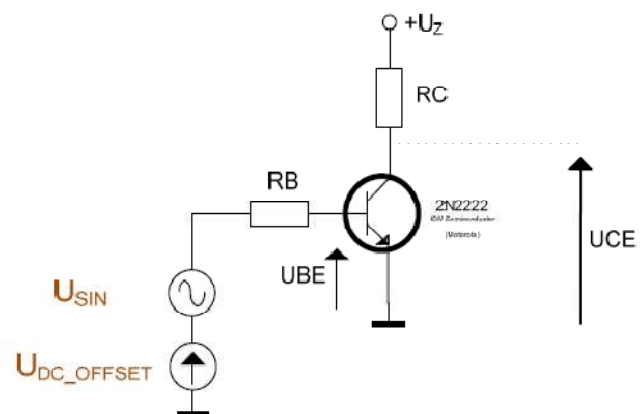
Wzmocnienie  $K_u$ , jest to strefa obszaru przejściowego tzw. aktywnego „liniowego”  $\Delta U_{CE}/\Delta U_{BE}$  – charakterystyki  $U_{CE} = f(U_{IN})$  – a więc pochodna.  $\beta_o$  – jest statycznym zwarciovym współczynnikiem wzmocnienia prądowego w układzie CE – podawanym przez producenta danego tranzystora (tj. BJT 2N2222) – w karcie katalogowej.



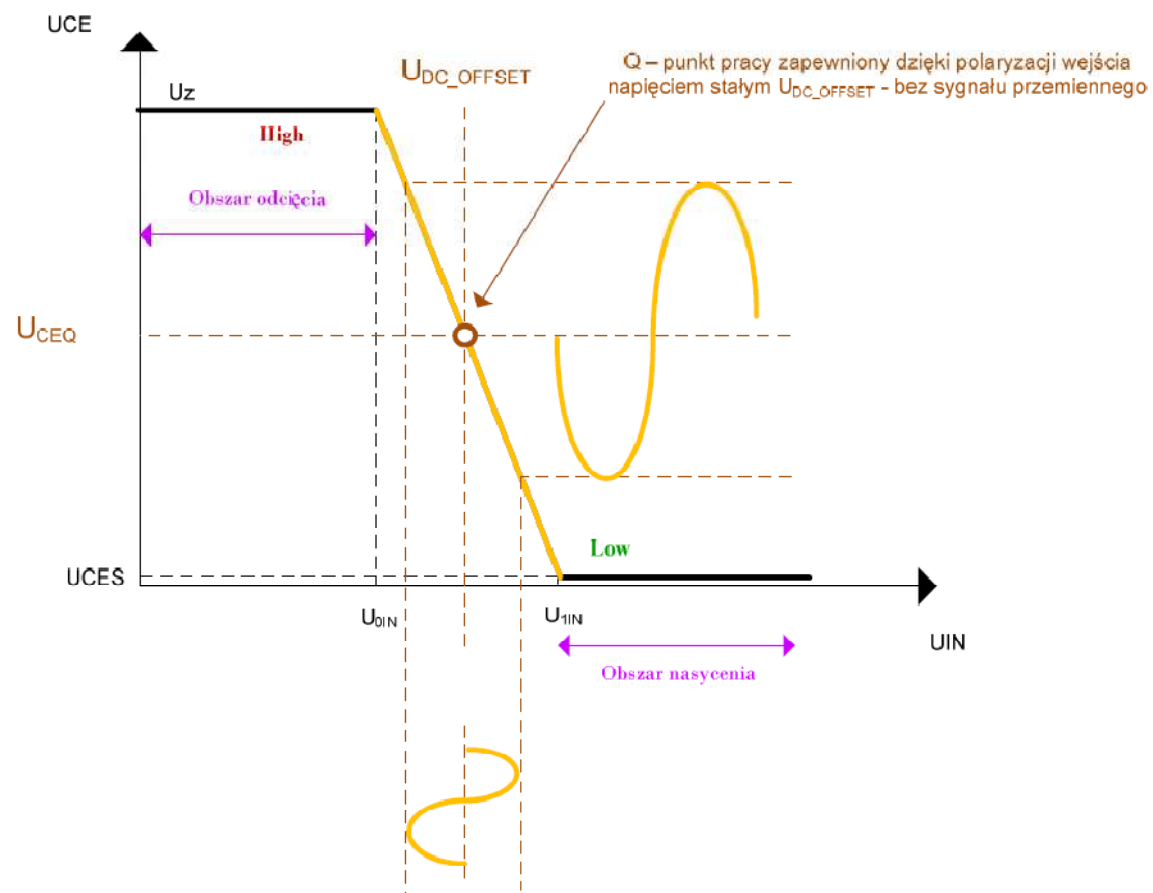
## Charakterystyka przejściowa w układzie wzmacniającym WE - $U_{CE}=f(U_{BE})$ – Tranzystor BJT



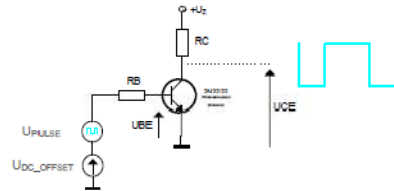
## Charakterystyka przejściowa w układzie wzmacniającym WE - $U_{CE}=f(U_{BE})$ – Tranzystor BJT



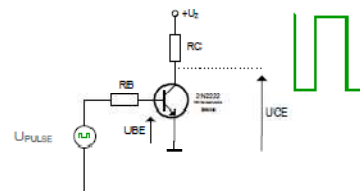
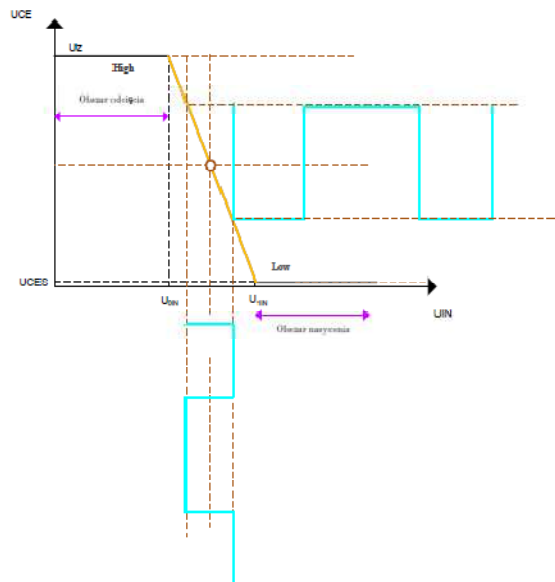
Praca liniowa tranzystora BJT – wzmacniacz w układzie CE – klasa A



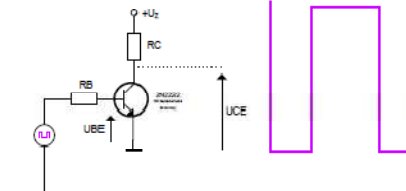
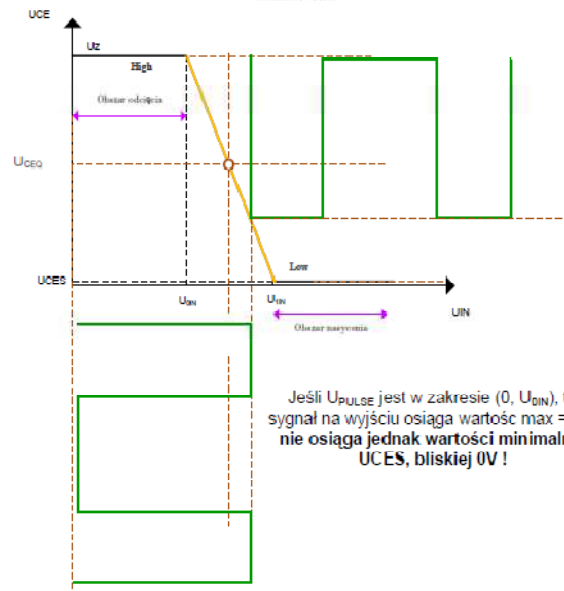
## Charakterystyka przejściowa w układzie impulsowym WE - $U_{CE}=f(U_{BE})$ – Tranzystor BJT



Praca impulsowa tranzystora BJT – wzmacniacz w układzie CE – obszar aktywny



Praca impulsowa tranzystora BJT – wzmacniacz w układzie CE – obszar odciepia i obszar aktywny



Praca impulsowa tranzystora BJT – wzmacniacz w układzie CE – wszystkie 3 obszary

