



# Elementy elektroniczne

dr inż. Piotr Ptaś

Politechnika Rzeszowska  
Wydział Elektrotechniki i Informatyki  
Katedra Podstaw Elektroniki

A-303, pptak@prz.edu.pl, tel. 178651113  
konsultacje: pn. – cz. 11-12



## Plan wykładu



### Układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

- Wybór punktu pracy tranzystora
- Układy polaryzacji tranzystora
- Układ wzmacniający z tranzystorem
- Modele nieliniowe tranzystora



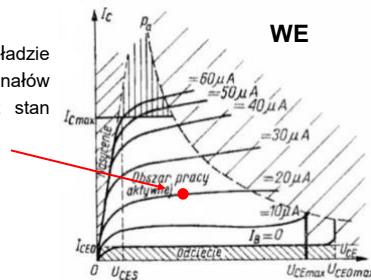
## Punkt pracy tranzystora



### Punkt pracy tranzystora:

- ustalone wartości prądów i napięć stałych – zbiór takich wartości jednoznacznie określa zachowanie się elementu,
- decyduje o statycznym stanie elementu nieliniowego, od którego zależą jego właściwości dynamiczne,
- optymalny jego dobór i zapewnienie stałości w czasie jest podstawowym wstępnym etapem projektowania układów elektronicznych.

Dla pracy tranzystora w układzie wzmacniacza małych sygnałów zmiennych wymagany jest stan **aktywny**.



Punkt pracy:

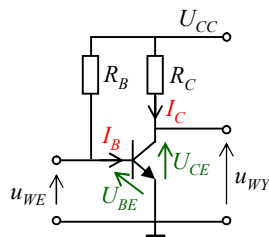
- $I_C$
- $U_{CE}$



## Punkt pracy tranzystora – wzmacniacz WE



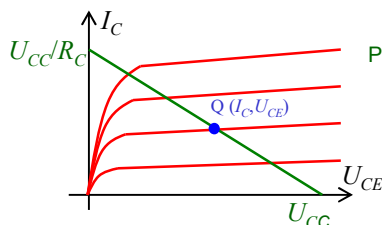
### Obliczenie punktu pracy tranzystora ( $I_C$ , $U_{CE}$ )



$$U_{CC} - I_B R_B - U_{BE} = 0$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$



Prosta pracy:  $U_{CC} - I_C R_C - U_{CE} = 0$

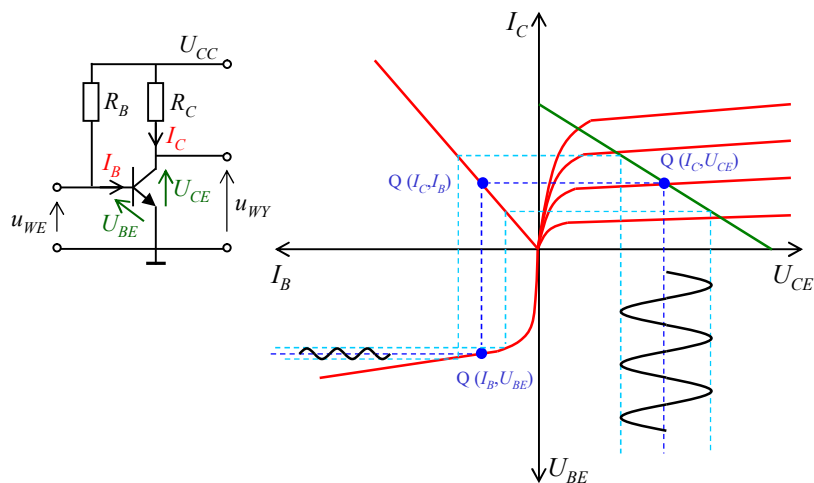
$$U_{CE} = U_{CC} - I_C R_C$$



## Punkt pracy tranzystora – wzmacniacz WE



Wybór punktu pracy – wpływ na właściwości wzmacniające wzmacniacza



Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

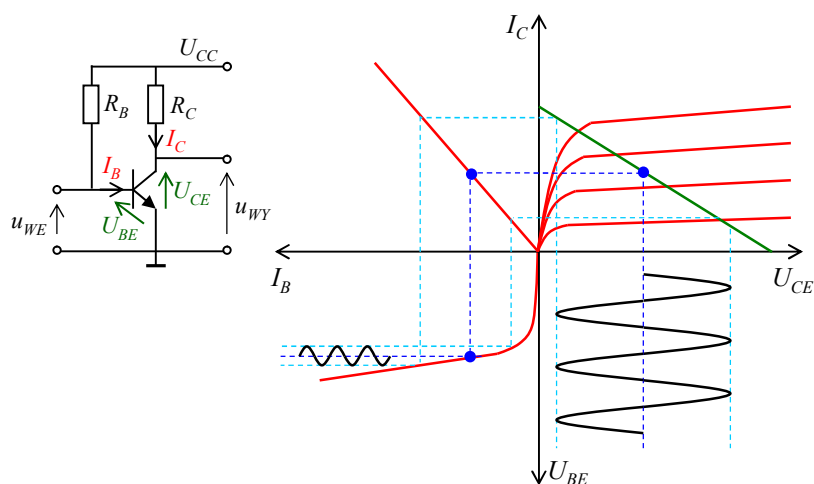
5



## Punkt pracy tranzystora – wzmacniacz WE



Wybór punktu pracy – maksymalna dynamika zmian napięcia wyjściowego



Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

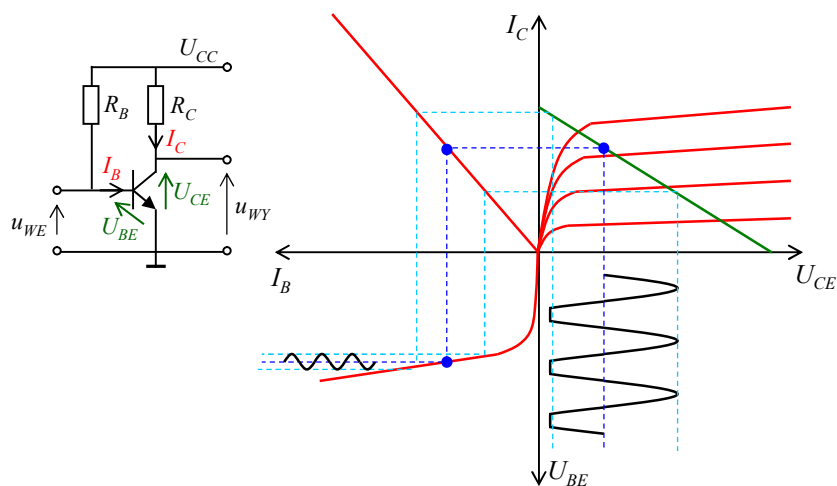
6



## Punkt pracy tranzystora – wzmacniacz WE



Wybór punktu pracy – wejście wzmacniacza w zakres nasycenia



Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

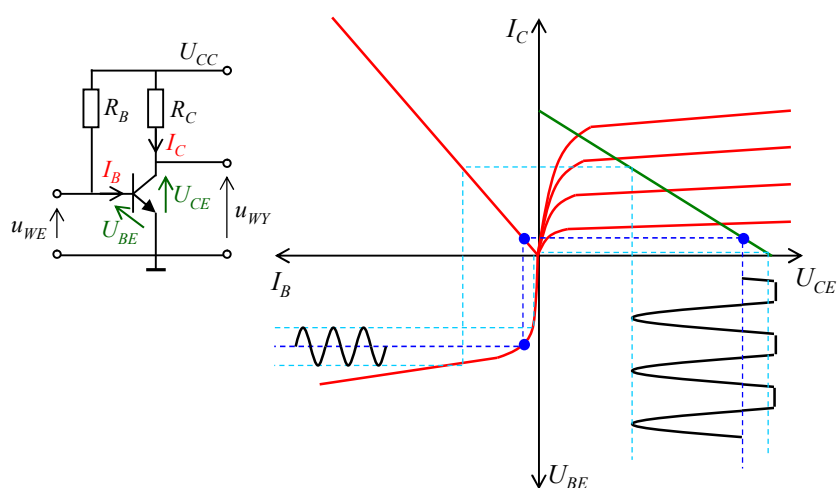
7



## Punkt pracy tranzystora – wzmacniacz WE



Wybór punktu pracy – wejście wzmacniacza w zakres odcięcia



Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

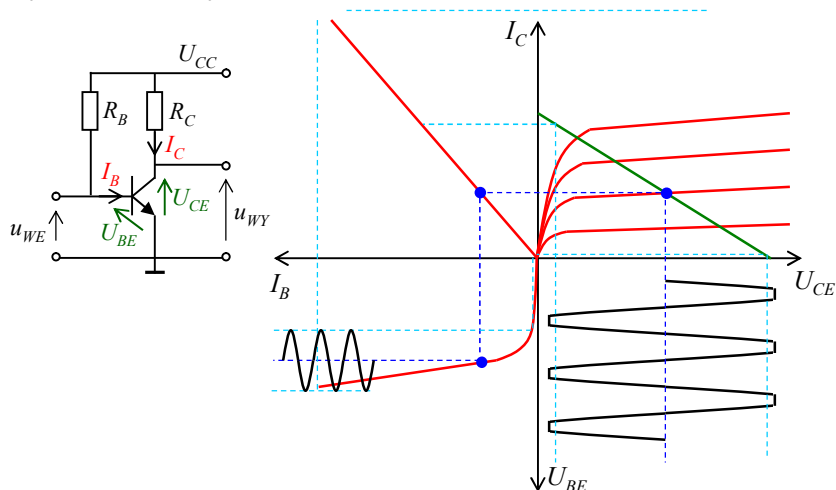
8



## Punkt pracy tranzystora – wzmacniacz WE



Wybór punktu pracy – przesterowanie wzmacniacza



Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

9



## Współczynniki stabilizacji $I_C$



Na zmiany punktu pracy tranzystora ( $I_C$ ,  $U_{CE}$ ) mają wpływ:

- zmiany temperatury,
- rozrzut parametrów poszczególnych egzemplarzy,

które uwidaczniają się poprzez zmiany parametrów takich jak:  $\beta$ ,  $U_{BE}$ .

$$U_{BE} \sim T; \quad \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T} \approx 2,3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$$

$$\frac{\Delta h_{21E}}{\Delta T} \sim \frac{1}{^\circ\text{C}} \Big|_{0+50^\circ\text{C}}$$

$I_C = f(\beta, U_{BE})$  – współczynniki stabilizacji prądu kolektora:

$$S_\beta = \frac{\partial I_C}{\partial \beta} \Big|_{U_{BE}} \quad S_U = \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}} \Big|_\beta$$

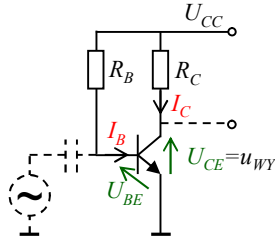
Im mniejsza wartość tych współczynników, tym lepsza stałość prądu kolektora.

Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

10



## Polaryzacja stałym prądem bazy



$$U_{CC} - I_B R_B - U_{BE} = 0$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta \cdot \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$

$$S_\beta = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} = 0,3\text{m}$$

$$S_U = \frac{-\beta}{R_B} = -2\text{m}$$

$$U_{CC} = 15\text{V}, I_C = 30\text{mA}, \\ \beta = 100, I_B = 0,3\text{mA}, \\ U_{CE} = 5\text{V}, R_C = 333\Omega, \\ R_B = 47,7\text{k}\Omega$$

Właściwości punktu pracy:

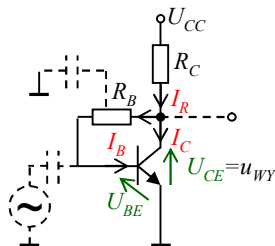
- $U_{BE} \approx 0,7\text{V}$  – tranzystor musi przewodzić,
- ustalony stałym prądem bazy – w dużym stopniu niezależny od zmian  $U_{BE}$ :  
( $\Delta U_{BE} \ll U_{CC} \rightarrow S_\beta \approx \text{const}$ )
- stały prąd bazy jest wymuszony przez  $R_B$  oraz  $U_{CC}$ ,
- mocno zależy od  $\beta$ , które może mieć duży rozrzut oraz dość mocno zależy od  $T$ ,
- duże wartości  $R_B$  – duży szum na wejściu.

Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

11



## Polaryzacja w pętli ujemnego napięciowego sprzężenia zwrotnego (ze sprzężeniem kolektorowym)



$$U_{CC} - I_B(1 + \beta)R_C - I_B R_B - U_{BE} = 0$$

$$I_R = I_B + I_C$$

$$I_C = \beta \cdot \frac{U_{CC} - U_{BE}}{(1 + \beta)R_C + R_B}$$

$$S_\beta = \frac{(U_{CC} - U_{BE})(R_C + R_B)}{((1 + \beta)R_C + R_B)^2} = 90\mu$$

$$S_U = \frac{-\beta}{(1 + \beta)R_C + R_B} = -2\text{m}$$

$$U_{CC} = 15\text{V}, I_C = 30\text{mA}, \\ \beta = 100, I_B = 0,3\text{mA}, \\ U_{CE} = 5\text{V}, R_C = 333\Omega, \\ R_B = 14,3\text{k}\Omega$$

Wpływ sprzężenia zwrotnego:

- działa stabilizująco na  $U_{CE}$  (zapobiega nasyceniu tranzystora):

$$\left. \begin{aligned} U_{CC} &= I_R R_C + U_{CE} \\ U_{CE} &= I_B R_B + U_{BE} \end{aligned} \right\} \Rightarrow \begin{aligned} I_C \uparrow &\rightarrow U_{RC} \uparrow \rightarrow U_{CE} \downarrow \rightarrow I_B \downarrow \rightarrow I_C \downarrow \\ I_C \downarrow &\rightarrow U_{RC} \downarrow \rightarrow U_{CE} \uparrow \rightarrow I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \end{aligned}$$

– zmiana  $I_C$  jest mniejsza niż gdyby u.s.z. nie było,

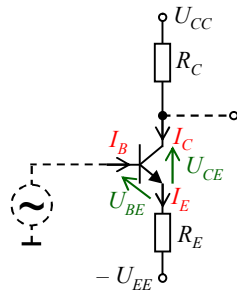
- dla poprawy Q korzystnie jest, aby  $R_B = \text{min}$ , a  $R_C$  jak największe (ale zmniejsza to wzmocnienie wzmacniacza – potrzebny kompromis),
- $C_B$  – eliminuje s.z. dla prądu zmiennego.

Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

12



## Polaryzacja stałym prądem emitera (ze sprzężeniem emiterowym ujemnym)



$$I_E = \frac{U_{EE} - U_{BE}}{R_E} \approx \frac{U_{EE}}{R_E} \approx \text{const} \quad (\text{dla } U_{EE} \gg U_{BE})$$

$$I_C = \frac{\beta}{\beta + 1} \cdot \frac{U_{EE} - U_{BE}}{R_E}$$

$$I_C \approx I_E$$

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

$$\begin{aligned} U_{CC} &= 15\text{V}, \quad U_{EE} = 15\text{V}, \\ I_C &= 30\text{mA}, \quad \beta = 100, \\ I_B &= 0,3\text{mA}, \quad U_{CE} = 5\text{V}, \\ R_E &= 481\Omega, \quad R_C = 357\Omega \end{aligned}$$

Stabilizacja Q tym lepsza, im większe  $R_E$ .

$$S_\beta = \frac{U_{EE} - U_{BE}}{R_E(\beta + 1)^2} = 3\mu$$

Wersja alternatywna:

- dodatkowe źródło napięcia  $U_{BB}$  i  $R_B$ ,
- dodatkowe źródło napięcia  $U_{BB}$  i  $R_B$ , ale bez  $U_{EE}$ .

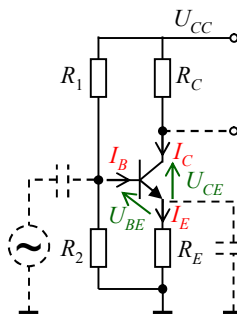
$$S_U = \frac{-\beta}{(\beta + 1)R_E} = -2\text{m}$$

Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

13



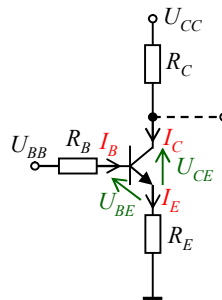
## Potencjometryczne zasilanie bazy ze sprzężeniem emiterowym



tw. Thevenina

$$R_B = R_1 \parallel R_2$$

$$U_{BB} = U_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



Wpływ sprzężenia zwrotnego:

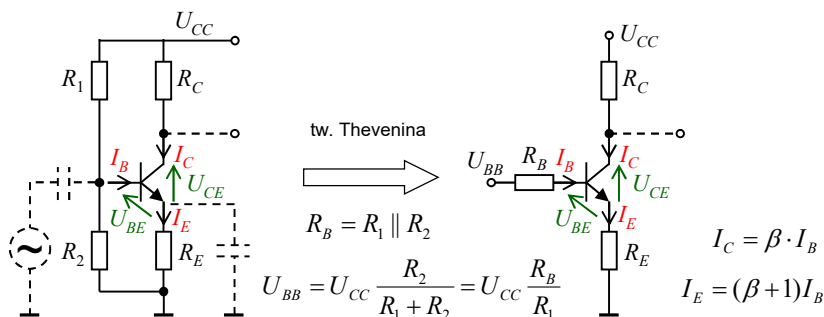
- stabilizuje zmiany  $I_E$ :
- $I_E \downarrow \Rightarrow U_{RE} \downarrow \Rightarrow U_{BE} \uparrow \Rightarrow I_B \uparrow \Rightarrow I_E \uparrow$  –  $I_E$  zmniejsza się mniej niż bez s.z.,
- $C_E$  – eliminuje s.z. dla prądu zmiennego,
- cztery rezystory – dwa z nich można wybrać (w pewnym zakresie) – optymalizacja np. stałości Q lub wzmocnienia – kompromis.

Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

14



## Potencjometryczne zasilanie bazy ze sprzężeniem emiterowym



$$U_{BB} = I_B R_B + U_{BE} + I_E R_E$$

$$I_C = \beta \cdot \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_B + (\beta + 1) R_E}$$

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

$$S_\beta = \frac{I_C (R_B + R_E)}{\beta (R_E (\beta + 1) + R_B)}$$

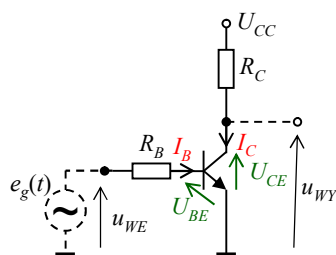
$$S_U = \frac{-\beta}{R_E (\beta + 1) + R_B}$$

Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

15



## Układ wzmacniający z tranzystorem – WE



W stanie aktywnym:

$$U_{WE} = I_B R_B + U_{BE} \Rightarrow I_B = \frac{U_{WE} - U_{BE}}{R_B}$$

$$I_C = \beta \cdot I_B$$

$$U_{CE} = U_{WY}$$

$$U_{CC} = I_C R_C + U_{CE} \quad \text{— prosta pracy}$$

$$y = a \cdot x + b \Rightarrow U_{WY} = \underbrace{-\beta \cdot \frac{R_C}{R_B}}_a U_{WE} + \underbrace{\beta \cdot \frac{R_C}{R_B} U_{BE} + U_{CC}}_b$$

W stanie zatkania?

W stanie nasycenia?

Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

16

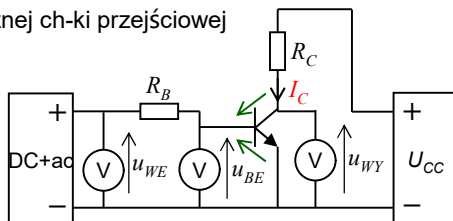




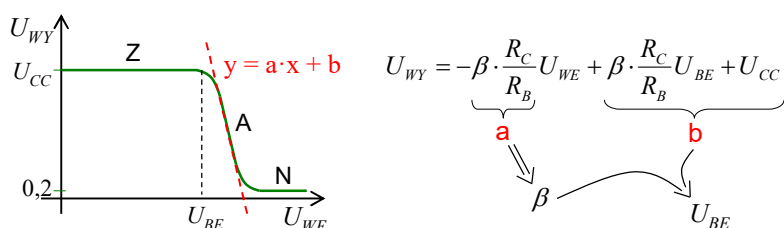
## Układ wzmacniający z tranzystorem – WE



Pomiar statycznej ch-ki przejściowej



A:  $I_B \uparrow \rightarrow I_C \uparrow \rightarrow U_{RC} \uparrow \rightarrow U_{CE}(U_{WY}) \downarrow$



Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

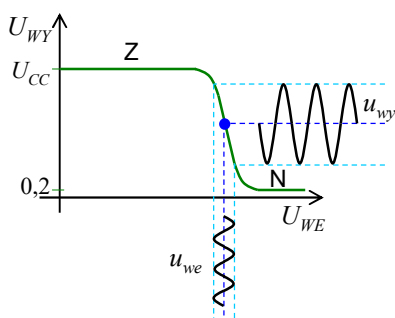
17



## Układ wzmacniający z tranzystorem – WE



Właściwości wzmacniające

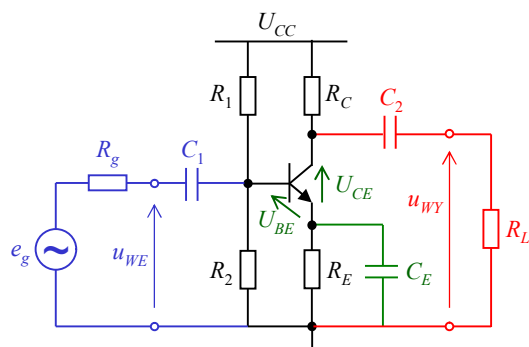


Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

18



## Wzmacniacz w układzie WE

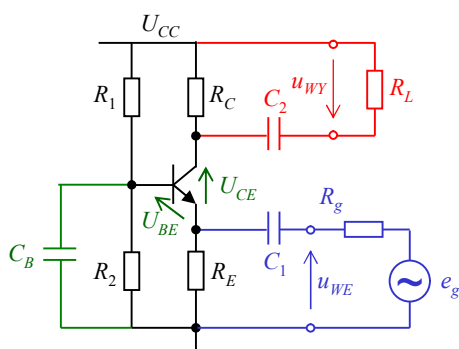


Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

19



## Wzmacniacz w układzie WB

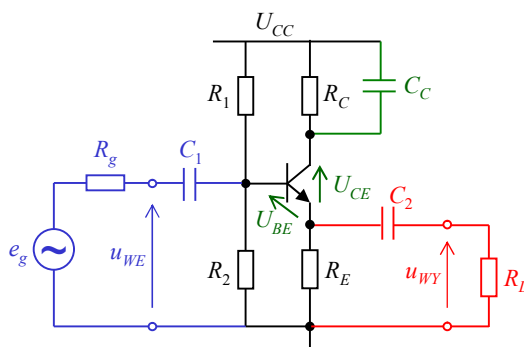


Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

20



## Wzmacniacz w układzie WC



Elementy elektroniczne I – układy polaryzacji tranzystorów bipolarnych

21



## Sposoby analizy pracy tr. bipolarnego



Praca tranzystora:

- nieliniowa:

- statyczna, (i)
  - dynamiczna, (ii)
- } duże sygnały

- liniowa (małe sygnały m. i d. cz.). (iii)

- (i) Praca nieliniowa statyczna – związki między stałymi napięciami i prądami na końcówkach tranzystora.
- (ii) Procesy przejściowe przy przełączaniu tranzystora z **Z** do **N** (włączanie) i odwrotnie (wyłączanie).
- (iii) Tranzystor jest spolaryzowany w określonym punkcie pracy i sterowany małym sygnałem prądu zmiennego (o takiej amplitudzie, że tranzystor zachowuje się jak element liniowy).

Elementy elektroniczne I – modele tranzystora bipolarnego

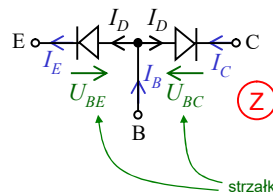
22



## Modele nieliniowe statyczne



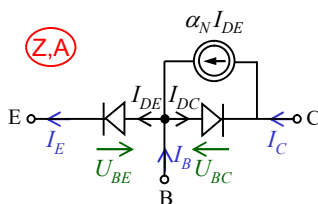
Tranzystor – dwa złącza połączone szeregowo przeciwnie (połączenie dwóch diod),  
np. n-p i p-n w tranzystorze **npn**:



$$I_D = I_S [\exp(U_D/U_T) - 1]$$

- Nie uwzględnia wzajemnego oddziaływania obu złączy (wstrzykiwania nośników ze złącza E-B do złącza B-C) – tylko stan zatkania.

strzałka wskazuje kierunek przewodzenia



- $\alpha_N I_{DE}$  – uwzględnia wstrzykiwanie (w st. aktywnym)

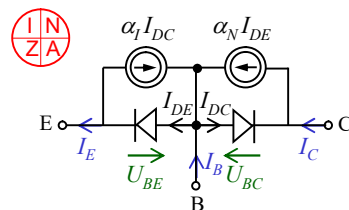
$\alpha_N$  – współczynnik wzmocnienia normalnego



## Modele nieliniowe statyczne



Model Ebersa-Molla (wariant iniekcyjny – zmienne niezależne: prądy wstrzykiwane przez E i C)



- $\alpha_I I_{DC}$  – kolektor wstrzykuje nośniki do bazy (w st. nasycenia i inwersyjnym)

$\alpha_I$  – współczynnik wzmocnienia inwersyjnego

$$I_{DE} = I_{ES} [\exp(U_{BE}/U_T) - 1]$$

$$I_{DC} = I_{CS} [\exp(U_{BC}/U_T) - 1]$$

- $I_{ES}$  – prąd wsteczny nasycenia złącza emiterowego przy zawartym złączu kolektorowym,
- $I_{CS}$  – prąd wsteczny nasycenia złącza kolektorowego przy zawartym złączu emiterowym.

$$I_E = I_{DE} - \alpha_I I_{DC}$$

$$I_C = \alpha_N I_{DE} - I_{DC}$$

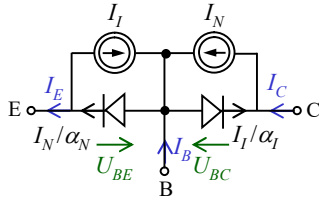
Tranzystor **nie** działa symetrycznie:  $\beta_N \gg \beta_P$ .



## Modele nieliniowe statyczne



Model Ebersa-Molla (wariant transportowy – zmienne niezależne: prądy zbierane przez E i C)



$$I_E = I_N / \alpha_N - I_I$$

$$I_C = I_N - I_I / \alpha_I$$

$$I_N = \alpha_N I_{ES} [\exp(U_{BE}/U_T) - 1]$$

$$I_I = \alpha_I I_{CS} [\exp(U_{BC}/U_T) - 1]$$

W modelu Ebersa-Molla wszystkie zależności prądowo-napięciowe można wyznaczyć znając tylko cztery parametry:  $I_{ES}$ ,  $I_{CS}$ ,  $\alpha_N$ ,  $\alpha_I$ , które są łatwe do zmierzenia.

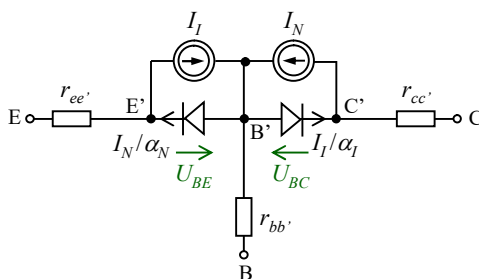
$\alpha_N I_{ES} = \alpha_I I_{CS}$  – liczbę parametrów można zmniejszyć do trzech. Równanie to nie jest słuszne jeśli uwzględnić zależność  $\alpha_N, \alpha_I = f(I_E, I_C)$ .



## Modele nieliniowe statyczne



Model Ebersa-Molla – poprawa dokładności modelu



$$I_N = \alpha_N I_{ES} \left[ \exp\left(\frac{U_{BE}}{\eta_E U_T}\right) - 1 \right]$$

$$I_I = \alpha_I I_{CS} \left[ \exp\left(\frac{U_{BC}}{\eta_C U_T}\right) - 1 \right]$$

$$r_{ee'} \approx 0$$

$$r_{cc'} \approx 0$$

Możliwości poprawy dokładności modelu poprzez uwzględnienie:

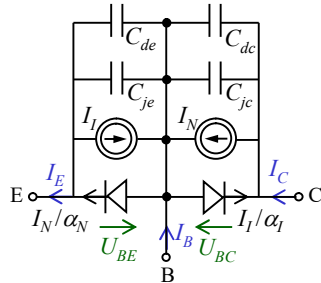
- zależności  $\alpha_N = f(I_E, U_{BC})$ ,  $\alpha_I = f(I_C, U_{BE})$ ,
- $\eta_E, \eta_C$  – współczynników nieidealności (emisji) złącz,
- $r_{bb'}$ ,  $r_{ee'}$ ,  $r_{cc'}$  – rezystancji szeregowych (doprowadzeń i obszarów obojętnych; poza warstwami zaporowymi).



## Model nieliniowy dynamiczny



### Model Ebersa-Molla (variant transportowy)



Pojemności reprezentują zjawiska ładowania (rozładowania) obu warstw zaporowych i obszarów neutralnych (głównie obszaru bazy).

- $C_{je}$ ,  $C_{jc}$  – pojemności złączone E i C – warstwa zaporowa zawiera ładunek przestrzenny  $Q$  – zachowuje się jak kondensator nieliniowy  $Q(U)$ ,
- $C_{de}$ ,  $C_{dc}$  – pojemności dyfuzyjne E i C – wynikają ze zmian ładunku nośników mniejszościowych nadmiarowych pod wpływem napięcia. W st. Z nie występują.

$$C_{je} = C_{je0} \left( 1 - \frac{U_{BE}}{\phi_E} \right)^{-m_E}$$

$$C_{jc} = C_{jc0} \left( 1 - \frac{U_{BC}}{\phi_C} \right)^{-m_C}$$

$$C_d = \frac{\Delta Q}{\Delta U}$$

$$i_E = I_N / \alpha_N - I_I + (C_{je} + C_{de}) \frac{dU_{BE}}{dt}$$

$$i_C = I_N - I_I / \alpha_I + (C_{jc} + C_{dc}) \frac{dU_{BC}}{dt}$$

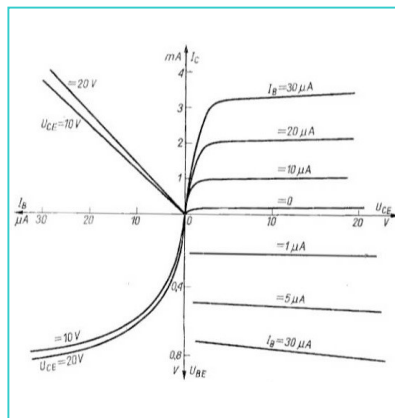


## Model małosygnałowy



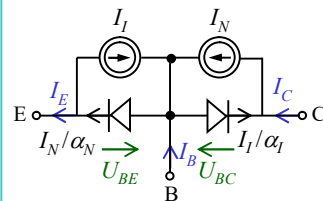
### Tranzystor jest elementem nieliniowym

#### Nieliniowe charakterystyki



W. Marciniak – „Przyrządy półprzewodnikowe i układy scalone”

#### Nieliniowy model



$$I_E = I_N / \alpha_N - I_I$$

$$I_C = I_N - I_I / \alpha_I$$

$$I_N = \alpha_N I_{ES} [\exp(U_{BE} / U_T) - 1]$$

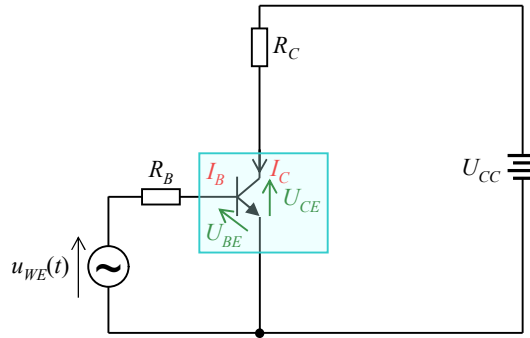
$$I_I = \alpha_I I_{CS} [\exp(U_{BC} / U_T) - 1]$$



## Model małosygnałowy



Układ wzmacniający z tranzystorem – WE



Elementy elektroniczne I – modele tranzystora bipolarnego

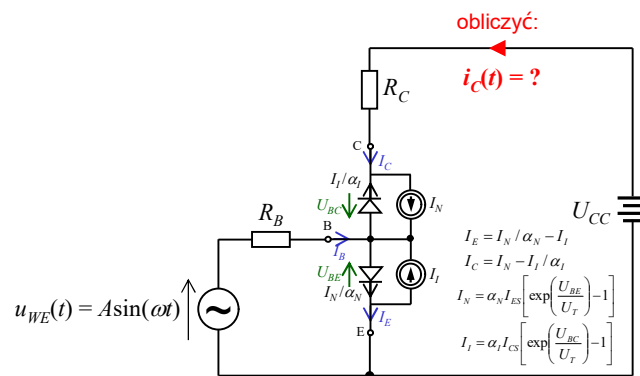
29



## Model małosygnałowy



Układ wzmacniający z tranzystorem – WE



Elementy elektroniczne I – modele tranzystora bipolarnego

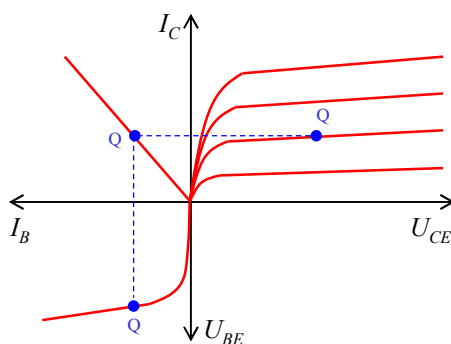
30



## Model małosygnałowy



Tranzystor jest elementem nieliniowym  $\Rightarrow$  Model liniowy  
??



Ustalenie punktu pracy



Linearyzacja  
charakterystyk wokół Q



Model z elementów  
liniowych

Elementy elektroniczne I – modele tranzystora bipolarnego

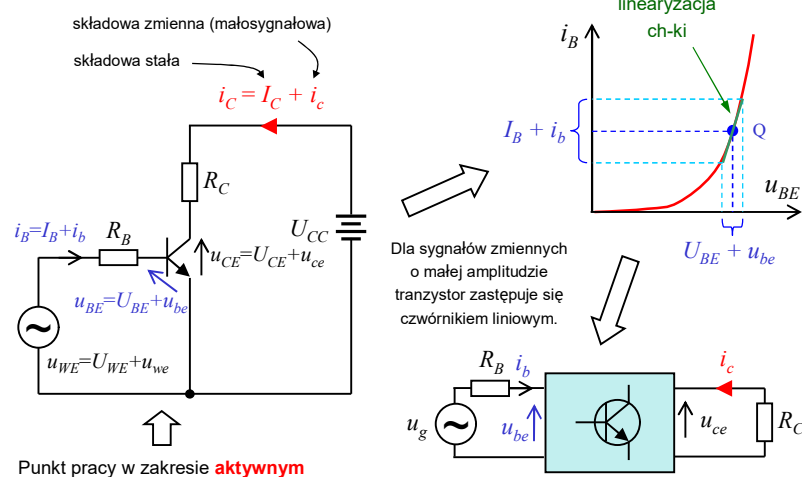
31



## Model małosygnałowy



Układ wzmacniający z tranzystorem – WE



Elementy elektroniczne I – modele tranzystora bipolarnego

32