



Politechnika Wrocławska
Instytut Telekomunikacji, Teleinformatyki i Akustyki



Podstawowe układy wzmacniaczy

Wrocław 2006



Wzmacniacze tranzystorowe

Tranzystor w układzie wzmacniacza:

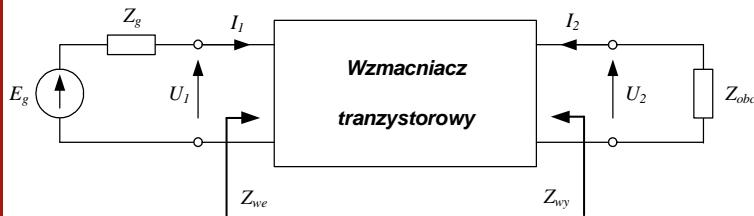
- odpowiednio spolaryzowany,
- ustalony p.p. dostosowany do amplitudy wzmacnianego sygnału,
- źródło sygnału i obciążenie dołączone do tranzystora przez obwody sprzęgające,
- sygnał wyjściowy powinien być niezniekształcony,
- moc wyjściowa większa niż sygnału sterującego.



Wzmacniacze tranzystorowe

Schemat blokowy

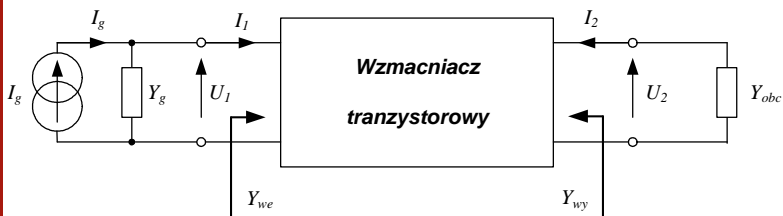
Sterowanie z generatora napięciowego



$$I_g = \frac{E_g}{Z_g}$$

$$Y_g = \frac{1}{Z_g}$$

Sterowanie z generatora prądowego



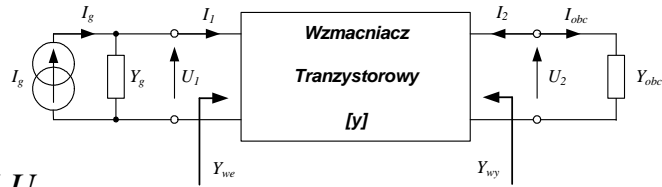
$$Y_{obc} = \frac{1}{Z_{obc}}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Parametry robocze

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} \\ y_{21} & y_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} U_1 \\ U_2 \end{bmatrix}$$



$$I_1 = I_g - I_{Y_g} = I_g - Y_g U_1$$

$$I_2 = -I_{obc} = -Y_{obc} U_2$$

I_2 w zapisie macierzowym

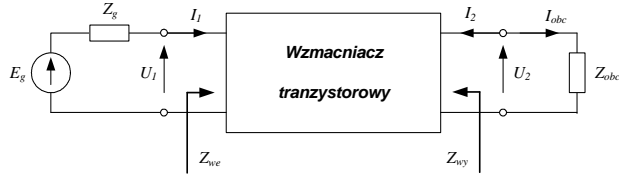
$$I_2 = y_{21} U_1 + y_{22} U_2$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Parametry robocze – wzmacnienie napięciowe

$$k_u = \frac{U_2}{U_1} = - \frac{y_{21}}{y_{22} + Y_{obc}}$$



Skuteczne wzmacnienie napięciowe

$$k_{usk} = \frac{U_2}{E_g} = \frac{U_1}{E_g} \frac{U_2}{U_1} = \gamma_u k_u$$

γ_u - napięciowy współczynnik wykorzystania obwodu wejściowego

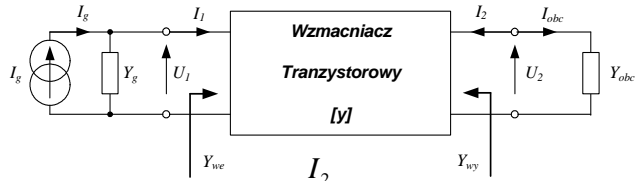
$$U_1 = \frac{Z_{we}}{Z_{we} + Z_g} E_g = \frac{Y_g}{Y_{we} + Y_g} E_g$$

$$\gamma_u = \frac{Z_{we}}{Z_{we} + Z_g} = \frac{Y_g}{Y_{we} + Y_g}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Parametry robocze – wzmocnienie prądowe



$$k_i = \frac{I_{obc}}{I_1} = -\frac{I_2}{I_1} = -\frac{U_2}{U_1} \frac{U_1}{U_2} \frac{I_2}{I_1} = -\frac{U_2}{U_1} \frac{U_2}{U_1} = -k_u \frac{Y_{obc}}{Y_{we}}$$

Skuteczne wzmocnienie prądowe

γ_i - prądowy współczynnik wykorzystania obwodu wejściowego

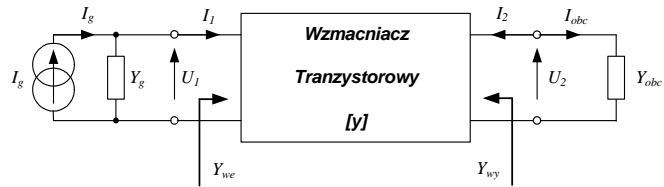
$$k_{isk} = \frac{I_{obc}}{I_g} = \gamma_i k_i$$

$$\gamma_i = \frac{I_{obc}}{I_g} = \frac{Y_{we}}{Y_{we} + Y_g}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Parametry robocze – admitancja (impedancja) wejściowa



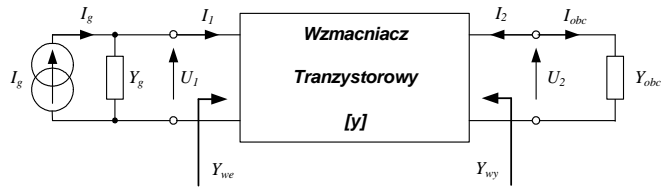
$$Y_{we} = \frac{1}{Z_{we}} = \frac{I_1}{U_1}$$

$$Y_{we} = \frac{I_1}{U_1} = y_{11} - \frac{y_{12}y_{21}}{y_{22} + Y_{obc}}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Parametry robocze – admitancja (impedancja) wyjściowa



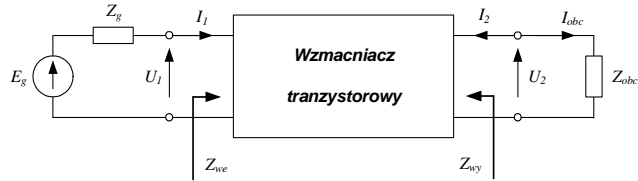
$$Y_{wy} = \frac{1}{Z_{wy}} = \frac{I_2}{U_2}$$

$$Y_{we} = \frac{I_2}{U_2} = y_{22} - \frac{y_{12}y_{21}}{y_{11} + Y_g}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Parametry robocze – wzmacnienie mocy czynnej



$$k_p = \frac{P_{obc}}{P_{we}} = \frac{|U_2|^2 G_{obc}}{|U_1|^2 G_{we}} = |k_u|^2 \frac{G_{obc}}{G_{we}} = \frac{|I_2|^2 R_{obc}}{|I_1|^2 R_{we}} = |k_i|^2 \frac{R_{obc}}{R_{we}}$$

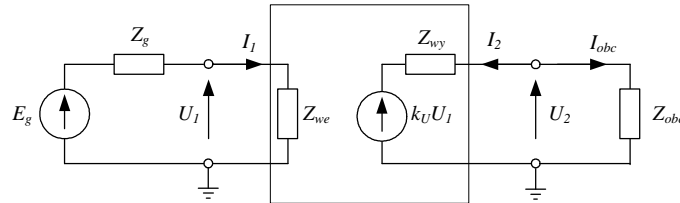
Skuteczne wzmacnienie mocy czynnej

$$k_{psk} = \frac{P_{obc}}{P_{dys\ gen}} = \frac{|U_2|^2 G_{obc}}{\frac{|E_g|^2}{4} G_g} = 4 |k_{usk}|^2 \frac{G_{obc}}{G_g}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Klasyfikacja wzmacniaczy – wzmacniacz napięciowy



Idealny wzmacniacz napięciowy dostarcza U_{wyj} o wartości wprost proporcjonalnej do U_{wej} .
Wzmocnienie nie zależy od Z_g i Z_{obc} .

Idealny wzmacniacz napięciowy

$$Z_{we} \rightarrow \infty$$

$$Z_{wy} = 0$$

$$U_2 = k_u U_1 = k_u E_g$$

Rzeczywisty wzmacniacz napięciowy

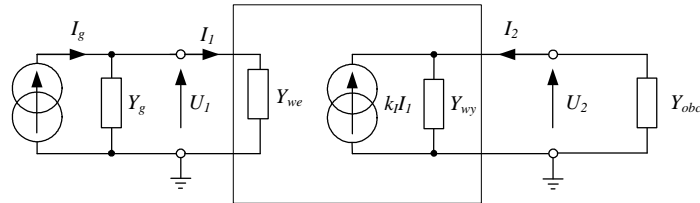
$$Z_{we} \gg Z_g$$

$$Z_{wy} \ll Z_{obc}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Klasyfikacja wzmacniaczy – wzmacniacz prądowy



Idealny wzmacniacz prądowy dostarcza I_{wyj} o wartości proporcjonalnej do I_{wej} .
Wzmocnienie nie zależy od wartości Z_g i Z_{obc} .

Idealny wzmacniacz prądowy

$$Y_{we} \rightarrow \infty$$

$$Y_{wy} = 0$$

$$I_2 = k_i I_1 = k_i I_g$$

Rzeczywisty wzmacniacz prądowy

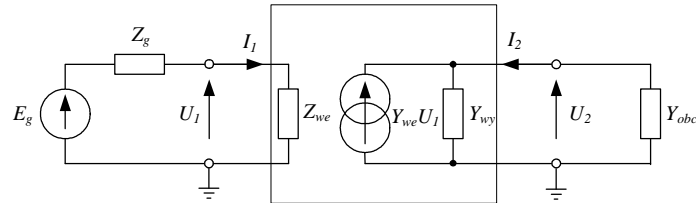
$$Y_{we} \gg Y_g$$

$$Y_{wy} \ll Y_{obc}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Klasyfikacja wzmacniaczy – wzmacniacz transadmitacyjny



Idealny wzmacniacz transadmitacyjny dostarcza I_{wy} o wartości wprost proporcjonalnej do U_{wej} .
Wzmocnienie nie zależy od wartości Z_g i Z_{obc} .

Idealny wzmacniacz transadmitacyjny

$$Z_{we} \rightarrow \infty \quad Y_{wy} = 0$$

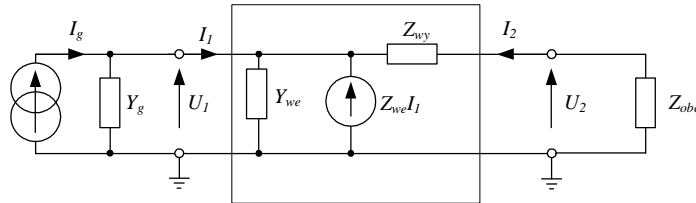
Rzeczywisty wzmacniacz transadmitacyjny

$$Z_{we} \gg Z_g \quad Y_{wy} \ll Y_{obc}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Klasyfikacja wzmacniaczy – wzmacniacz transimpedancyjny



Idealny wzmacniacz transimpedancyjny dostarcza U_{wy} o wartości proporcjonalnej do I_{wej} .
Wzmocnienie nie zależy od wartości Z_g i Z_{obc} .

Idealny wzmacniacz transimpedancyjny

$$Y_{we} \rightarrow \infty \quad Y_{wy} = 0$$

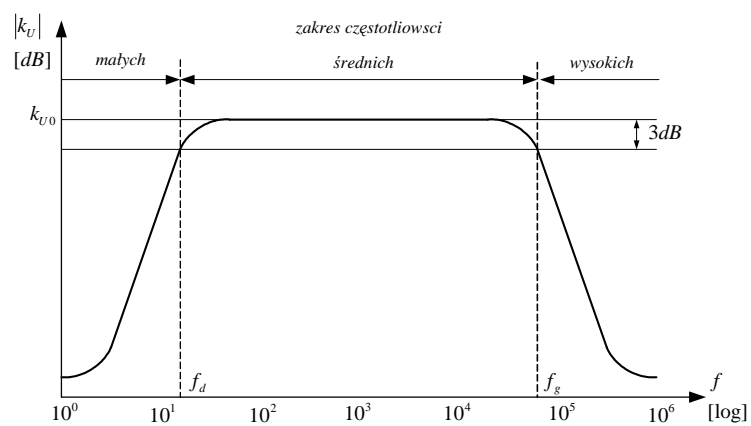
Rzeczywisty wzmacniacz transimpedancyjny

$$Y_{we} \ll Y_g \quad Z_{wy} \ll Z_{obc}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

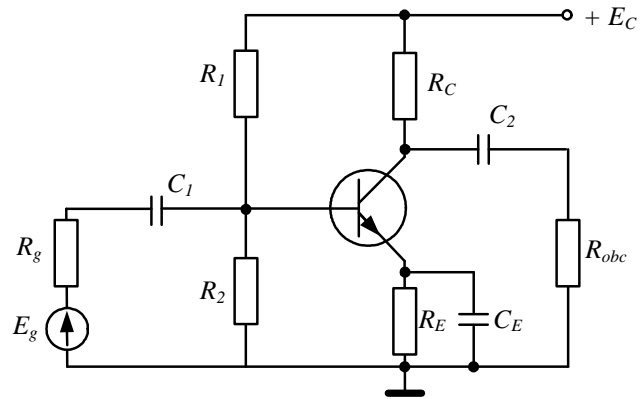
Charakterystyka amplitudowa wzmacniacza RC





Wzmacniacze tranzystorowe

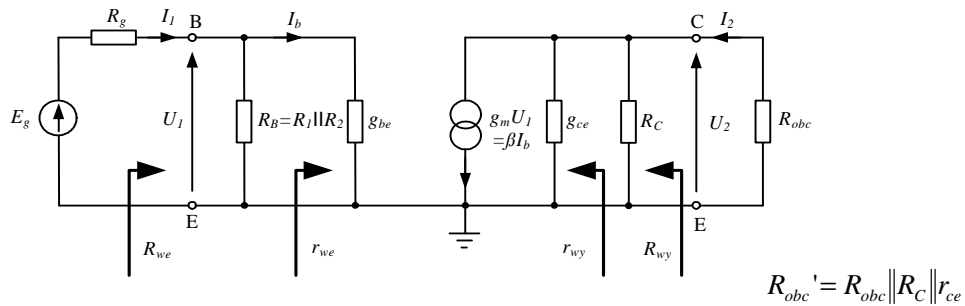
Konfiguracja OE – parametry robocze





Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OE – parametry robocze



$$k_i = \frac{I_2}{I_1} \approx \beta$$

$$k_u = \frac{U_2}{U_1} = -g_m \cdot R_{obc}'$$

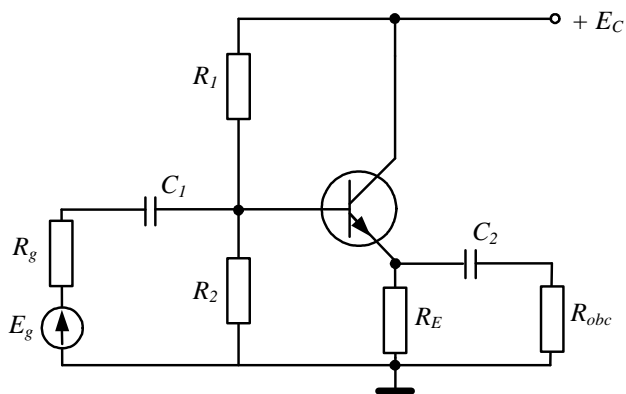
$$R_{we} = \frac{U_1}{I_1} = R_B \parallel r_{we} = R_B \parallel r_{be} \approx r_{be}$$

$$R_{wy} = \frac{U_2}{I_2} = R_C \parallel r_{wy} = R_C \parallel r_{ce} \approx R_C$$



Wzmacniacze tranzystorowe

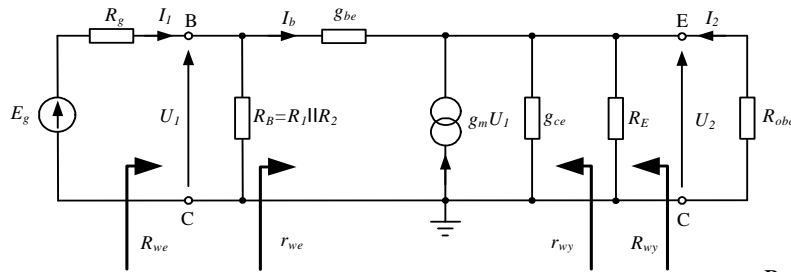
Konfiguracja OC – parametry robocze





Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OC – parametry robocze



$$R_{obe}' = R_{obe} || R_E || r_{ce}$$

$$R_g' = R_g || R_B$$

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} \approx -(\beta + 1) \approx -\beta$$

$$R_{we} \approx r_{be} + (\beta + 1)R_{obe}' \approx \beta R_{obe}'$$

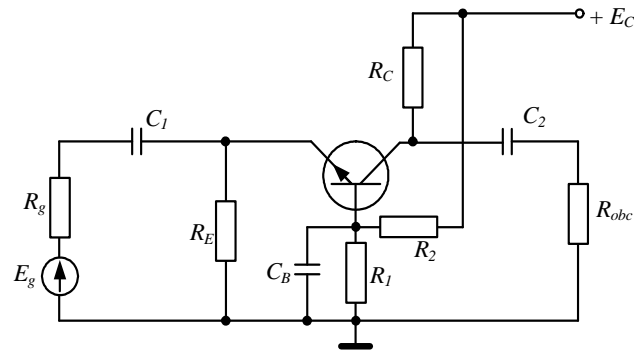
$$k_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{g_m}{1 + g_m \cdot R_{obe}'} \leq 1$$

$$R_{wy} \approx r_{be} + \frac{R_g'}{\beta} \approx \frac{R_g'}{\beta}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

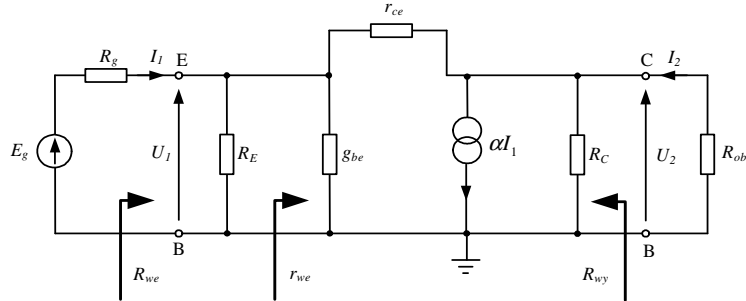
Konfiguracja OB – parametry robocze





Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OB – parametry robocze



$$R_{obc}' = R_{obc} \parallel R_C$$

$$k_i = \frac{I_2}{I_1} \approx -\alpha \approx -1$$

$$k_u = \frac{U_2}{U_1} = g_m \cdot R_{obc}'$$

$$R_{we} \approx r_{be}$$

$$R_{wy} \approx R_C$$



Wzmacniacze tranzystorowe

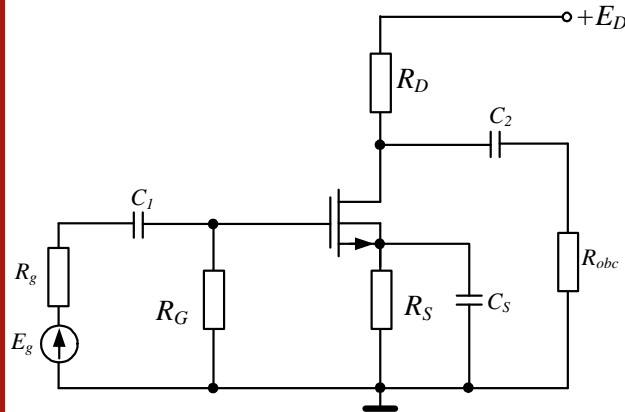
Parametry robocze – tranzystor bipolarny

Parametr	KONFIGURACJA		
	OE	OC	OB
Wzmocnienie napięciowe k_u	$-g_m R_{obc}'$	≤ 1	$+g_m R_{obc}'$
Wzmocnienie prądowe k_i	β	$-\beta$	≤ -1
Wzmocnienie mocy k_p	$\approx k_u k_i$	$\approx k_i$	$\approx k_u$
Rezystancja wejściowa R_{we}	$\approx r_{be}$	$\beta R_{obc}'$	$\approx r_{be}$
Rezystancja wyjściowa R_{wy}	$\approx R_C$	R_g' / β	$\approx R_C$



Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OS – parametry robocze



Układ odpowiada układowi OE.

$$U_{CE} \rightarrow U_{DS}$$

$$U_{BE} \rightarrow U_{GS} < 0$$

stąd:

$$I_B \rightarrow I_G \approx 0 \quad \text{ i } \quad r_{be} \rightarrow r_{gs} \approx \infty$$

dlatego:

$$k_i \rightarrow \infty$$

$$k_p \rightarrow \infty$$

$$I_C \rightarrow I_D$$

$$I_E \rightarrow I_S$$

$$g_m \rightarrow g_m$$

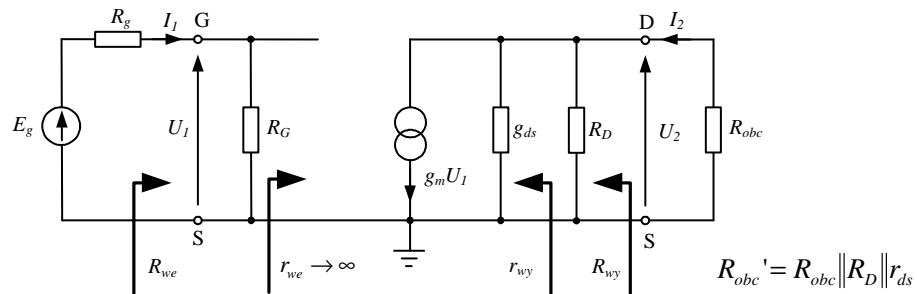
$$r_{ce} \rightarrow r_{ds}$$

$$\beta \rightarrow g_m r_{gs} \approx \infty$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OS – parametry robocze



$$k_u = \frac{U_2}{U_1} = -g_m \cdot R_{obc}'$$

wzmocnienie dla tranzystorów typu n mieści się
w zakresie 100...300V/V dla tranzystorów typu p
jest o połowę mniejsze.
 $\max k_u$ tranzystorów polowych stanowi około
1/10 wzmocnienia tranzystorów bipolarnych

$$R_{we} = \frac{U_1}{I_1} = R_G \parallel r_{we} \approx R_G$$

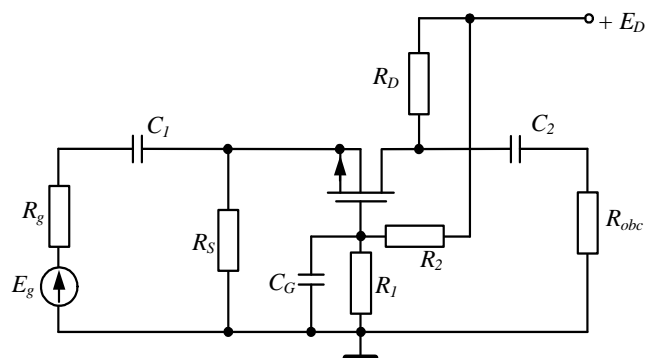
$$R_{wy} = \frac{U_2}{I_2} = R_D \parallel r_{ds}$$

$$R_{obc}' = R_{obc} \parallel R_D \parallel r_{ds}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OG – parametry robocze



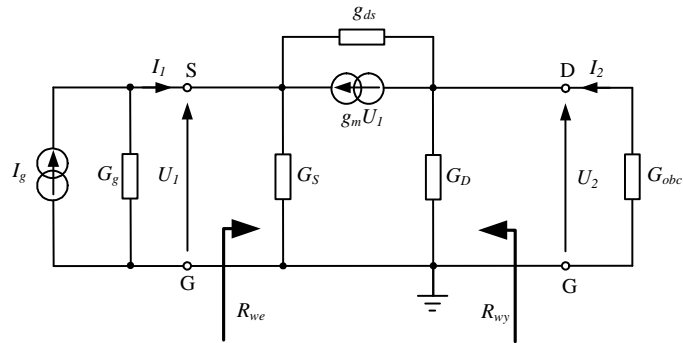
układ ze względu na niewykorzystanie właściwości tranzystorów polowych – dużej r_{gs} , jako samodzielny wzmacniacz praktycznie nie stosowany.

układ wykorzystywany w tzw. układach kaskodowych



Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OG – parametry robocze



$$k_u = \frac{U_2}{U_1} = +g_m \cdot R_{obc}'$$

$$R_{obc}' = R_D \parallel R_{obc}$$

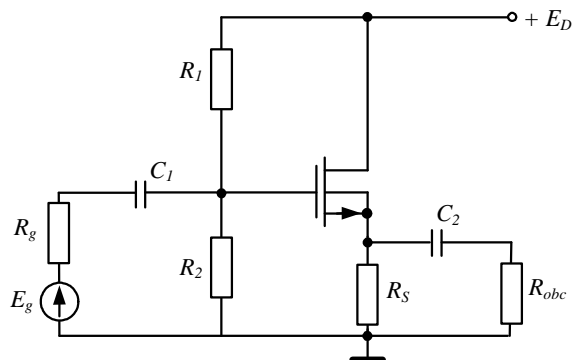
$$R_{we} = \frac{U_1}{I_1} = \frac{1}{G_S + g_m}$$

$$R_{wy} = \frac{U_2}{I_2} \approx R_D$$



Wzmacniacze tranzystorowe

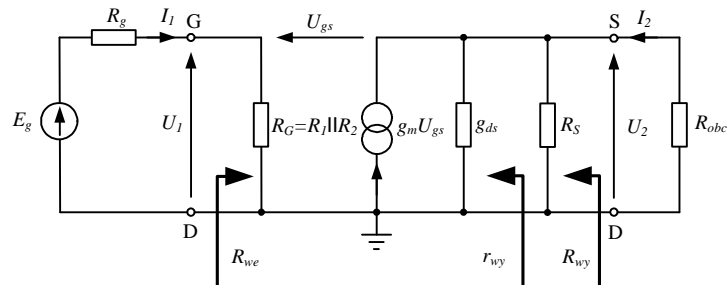
Konfiguracja OD – parametry robocze





Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OD – parametry robocze



$$k_u = \frac{U_2}{U_1} = \frac{g_m}{g_m + R_{obc}'} \leq 1$$

$$R_{obc}' = r_{ds} \parallel R_S \parallel R_{obc}$$

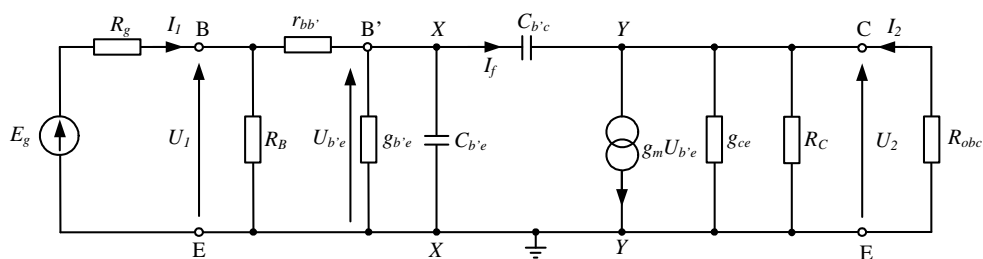
$$R_{we} = \frac{U_1}{I_1} = R_G$$

$$R_{wy} = \frac{U_2}{I_2} = \frac{R_S}{1 + g_m R_S}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OE i OS – wysokie częstotliwości



W układzie sprzężenie wejścia z wyjściem aby łatwiej analizować upraszczamy schemat tworząc schemat unilateralny.

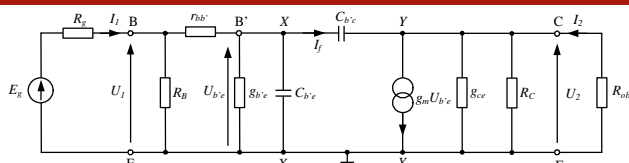
Przy tworzeniu schematu unilateralnego korzystamy ze zjawiska Millera:

Zjawisko zwielokrotniania pojemności (ogólnie amplitancji) między wejściem i wyjściem wzmacniacza, w stosunku zależnym od k_u .



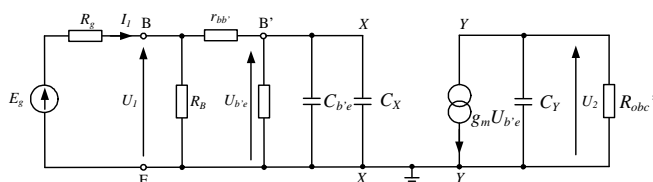
Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OE i OS – wysokie częstotliwości



$C_{b'c}$ zastępujemy pojemnościami C_X i C_Y równolegle włączonymi do $g_{b'e}$ i g_{ce} .

C_X i C_Y takie by admitancja widziana z zacisków $X-X$ i $Y-Y$ była taka sama dla obu schematów



$$R_{obc}' = r_{ce} \parallel R_C \parallel R_{obc}$$

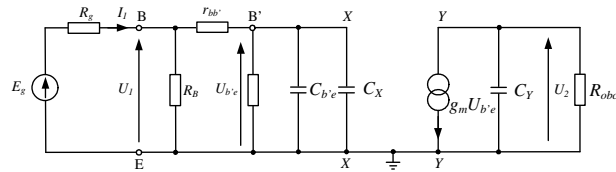
$$C_X = \frac{I_f}{U_1} = \frac{j\omega C_{b'c}(U_1 - U_2)}{U_1} = j\omega C_{b'c}(1 - k_u)$$

$$C_Y = \frac{-I_f}{U_2} = \frac{-j\omega C_{b'c}(U_1 - U_2)}{U_2} = j\omega C_{b'c}\left(1 - \frac{1}{k_u}\right) \approx j\omega C_{b'c}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

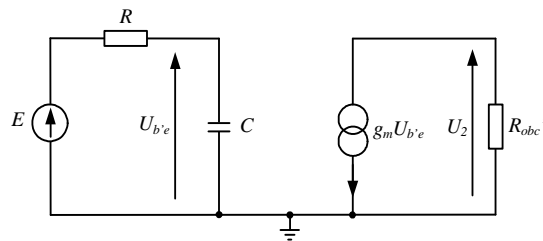
Konfiguracja OE i OS – wysokie częstotliwości



Ponieważ $\omega C_{b'e} \ll R_{obc}'$ pojemność tą można pominąć w dalszych rozważaniach

Korzystając z tw. Thevenina

$$E = \frac{1}{1 + r_{bb'} g_{b'e}} \frac{R_{we}}{R_{we} + R_g} E_g \quad R = \frac{r_{bb'} + R_B \parallel R_g}{1 + g_{b'e} (r_{bb'} + R_B \parallel R_g)}$$

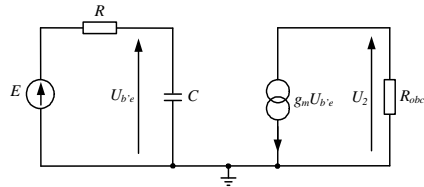


$$C = C_{b'e} + C_{b'c} (1 - k_u)$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OE i OS – wysokie częstotliwości



$$U_2(j\omega) = \frac{-g_m R_{abc}'}{1 + j\omega RC} E$$

stąd:

$$k_{usk}(j\omega) = \frac{k_{usk0}}{1 + j\omega / \omega_g}$$

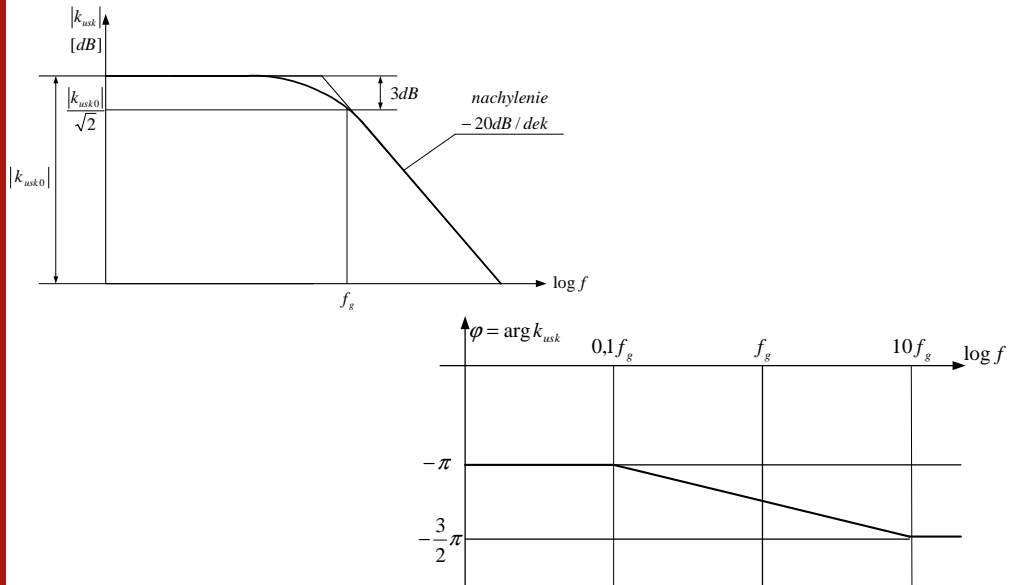
gdzie:

$$\omega_g = \frac{1}{RC}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OE i OS – wysokie częstotliwości





Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OE i OS – wysokie częstotliwości

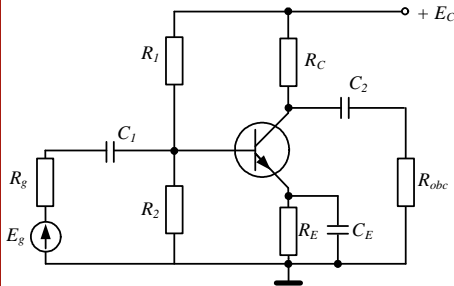
Dla OS postępujemy analogicznie.

Jeśli przyjmiemy, że $r_{bb'}=0$ oraz $g_{b'e}=0$ to wszystkie zależności wyprowadzone dla OE są słuszne dla OS.



Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OE – niskie częstotliwości



Spadek wzmacnienia przy niskich częstotliwościach jest skutkiem wzrostu reaktancji kondensatorów C_1 , C_2 , C_E .

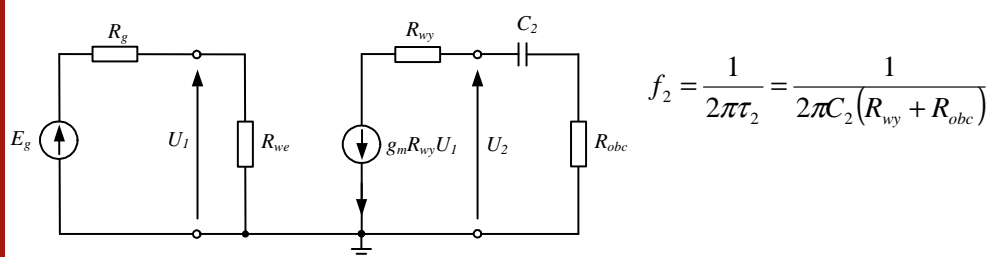
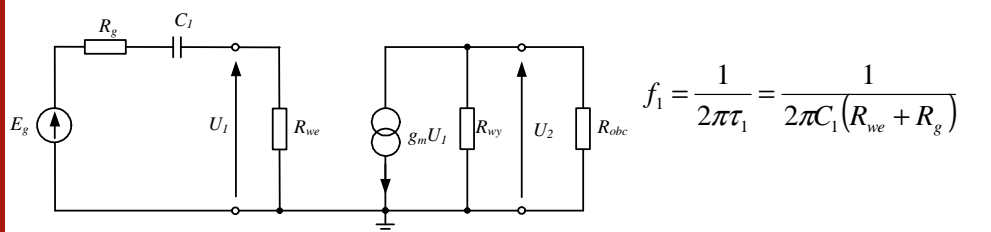
Wpływ kondensatorów na ch-yki częstotliwościowe bada się przy oddzielnym uwzględnieniu każdego z kondensatorów.

$$f_d = \sqrt{f_1^2 + f_2^2 + f_E^2}$$



Wzmacniacze tranzystorowe

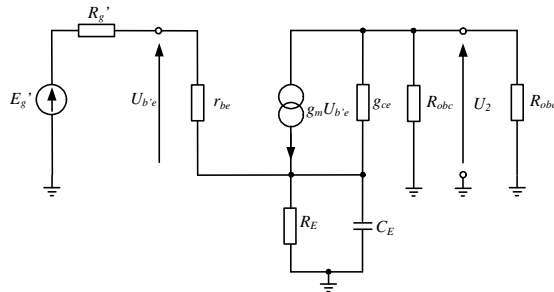
Konfiguracja OE – niskie częstotliwości





Wzmacniacze tranzystorowe

Konfiguracja OE – niskie częstotliwości



$$f_E = \frac{\beta_0}{2\pi C_E (R_g' + r_{b'e})}$$

$$f_3 \gg f_1, f_2$$