



# Politechnika Wrocławska

## Wzmacniacze prądu stałego

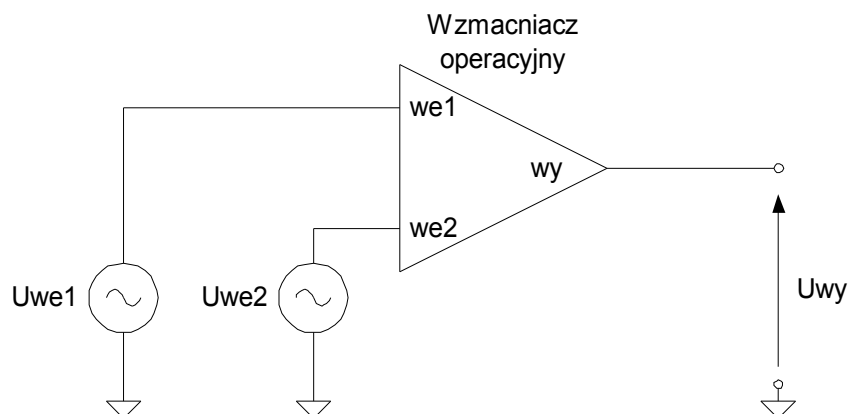
# Wzmacniacze prądu stałego

## Definicja

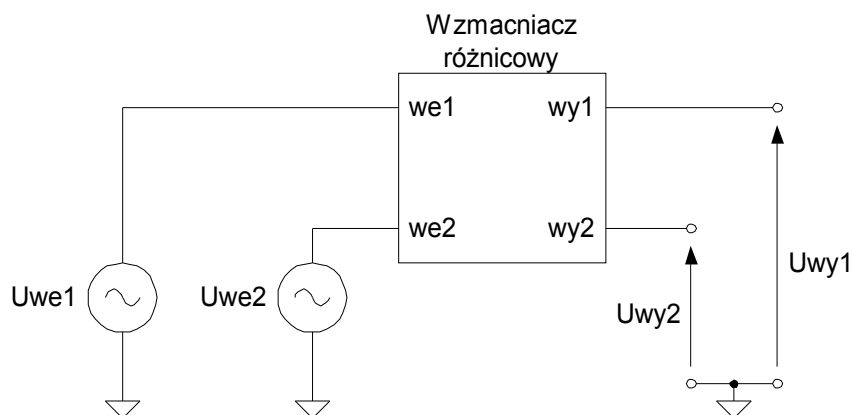
Wzmacniacze prądu stałego są to symetryczne wzmacniacze dolnoprzepustowe o dwóch wejściach i jednym (wzmacniacz operacyjny) lub dwóch (wzmacniacz różnicowy) wyjściach, służące do wzmacniania sygnałów o określonym paśmie częstotliwości włączając w to sygnały wolnozmiennie i stałoprądowe.

Wzmacniacze te zapewniają wzmocnienie sygnałów użytecznych (różnicowych) oraz tłumienie sygnałów niepożądanych (np. wejściowych sumacyjnych).

# Wzmacniacze prądu stałego



Rys. 1. Wzmacniacz z wyjściem niesymetrycznym



Rys.2. Wzmacniacz z wyjściem symetrycznym

# Wzmacniacz różnicowy

Można zdefiniować dwa rodzaje sygnałów:

- różnicowe

$$U_{wer} = U_{we1} - U_{we2}$$

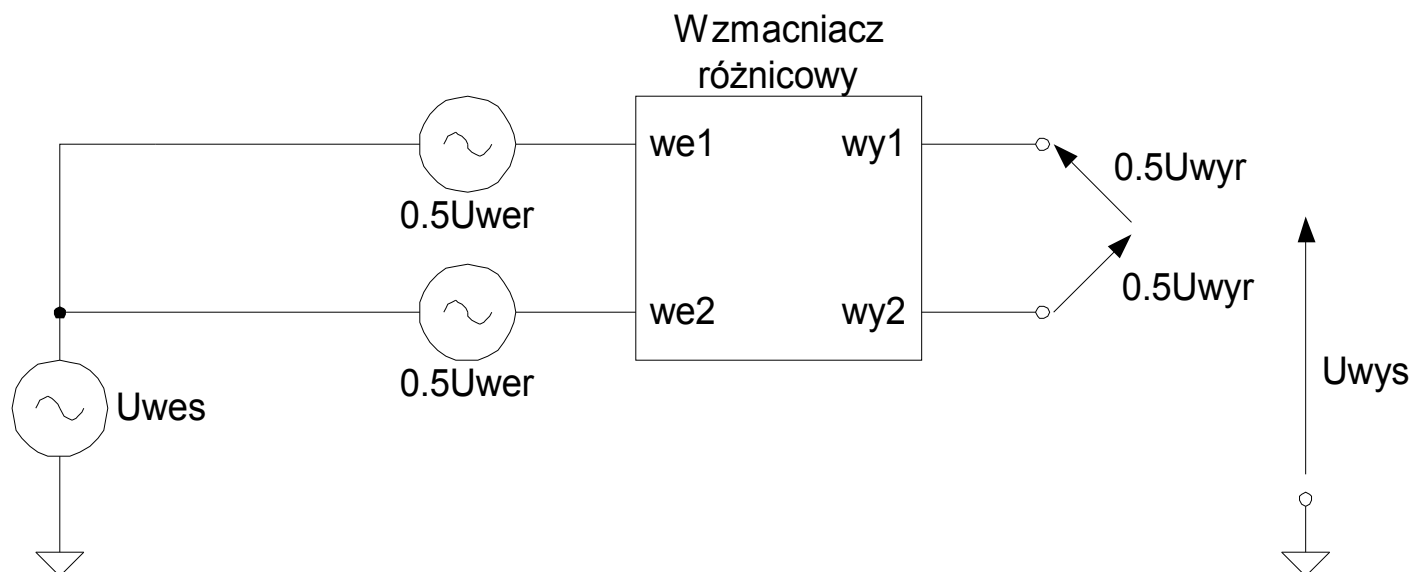
$$U_{wyr} = U_{wy1} - U_{wy2}$$

- sumacyjne, zobrazowane na rys. 3

$$U_{wes} = \frac{U_{we1} + U_{we2}}{2}$$

$$U_{wys} = \frac{U_{wy1} + U_{wy2}}{2}$$

# Wzmacniacz różnicowy



Rys.3. Sterowanie sumacyjne wzmacniacza różnicowego

# Wzmacniacz różnicowy

Zależności na napięcia wyjściowe wzmacniacza różnicowego przybierają postać:

- napięcie wyjściowe różnicowe

$$U_{wyr} = K_{UR}U_{wer} + K_{US}U_{wes}$$

- napięcie wyjściowe sumacyjne

$$U_{wys} = K_{USR}U_{wer} + K_{USS}U_{wes}$$

# Wzmacniacz różnicowy

Poszczególne wzmocnienia definiujemy następująco:

- wzmocnienie różnicowo - różnicowe (nazywane zazwyczaj wzmocnieniem różnicowym)

$$K_{UR} = \frac{U_{wyr}}{U_{wer}} \quad U_{wes} = 0$$

- wzmocnienie różnicowo - sumacyjne (nazywane powszechnie wzmocnieniem sumacyjnym)

$$K_{US} = \frac{U_{wyr}}{U_{wes}} \quad U_{wer} = 0$$

# Wzmacniacz różnicowy

- wzmacnienie sumacyjno - różnicowe

$$K_{USR} = \frac{U_{wys}}{U_{wer}} \quad U_{wes} = 0$$

- wzmacnienie sumacyjno - sumacyjne

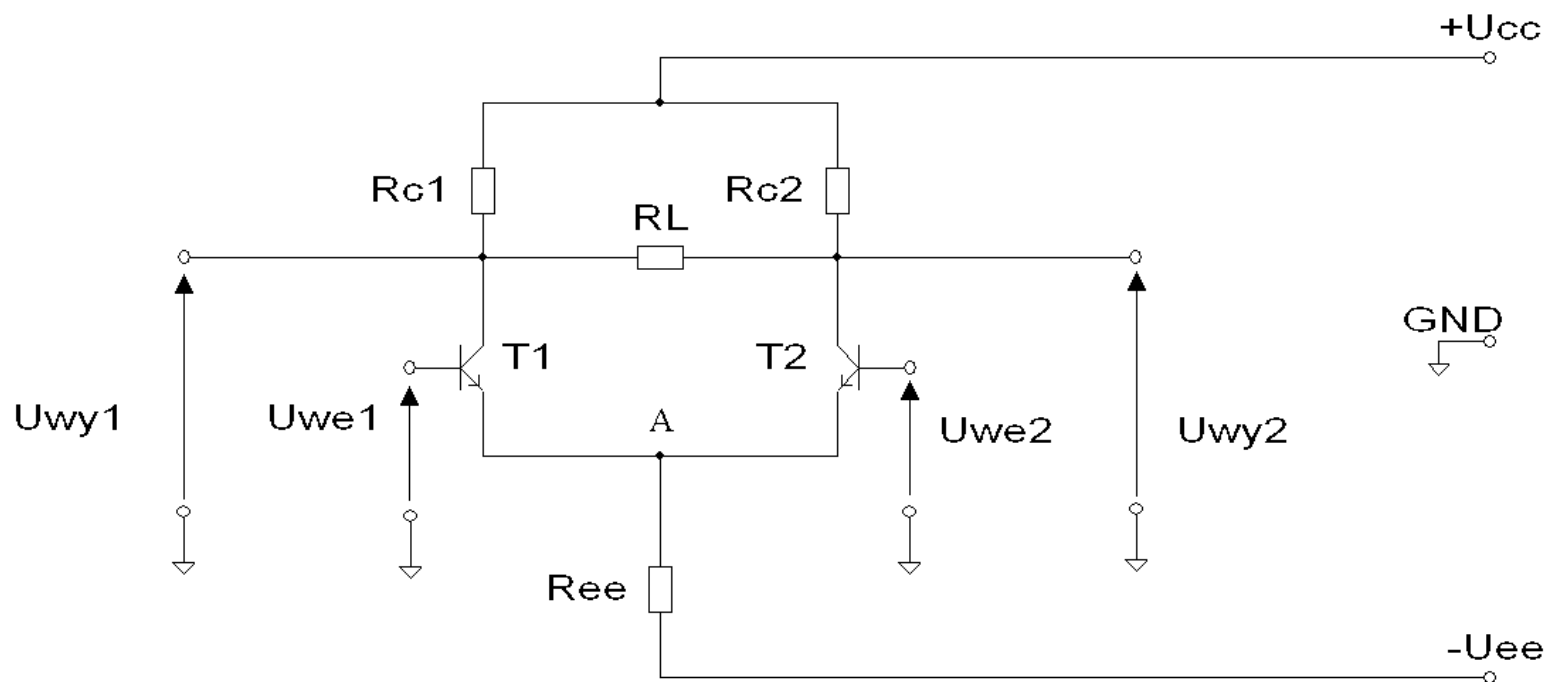
$$K_{USS} = \frac{U_{wys}}{U_{wes}} \quad U_{wer} = 0.$$

Najważniejszymi są wzmacnienia  $K_{UR}$  i  $K_{US}$ . Są to parametry charakterystyczne wzmacniacza różnicowego. Na ich podstawie określa się dodatkowy parametr – współczynnik tłumienia sygnału sumacyjnego CMRR (ang. Common Mode Rejection Ratio):

$$CMRR = \frac{K_{UR}}{K_{US}}$$



# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys.4. Wzmacniacz różnicowy zbudowany na tranzystorach bipolarnych

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

## Wzmocnienia różnicowe i sumacyjne wzmacniacza

Założenia:

- symetria napięcia wyjściowego przy obciążeniu symetrycznym oraz pełnej symetrii wzmacniacza:

$$R_{C1} = R_{C2} = R_C, \quad g_{m1} = g_{m2} = g_m$$

Potencjał masy dla przebiegów zmiennych znajduje się w połowie RL i połowa tej rezystancji obciąża układ.

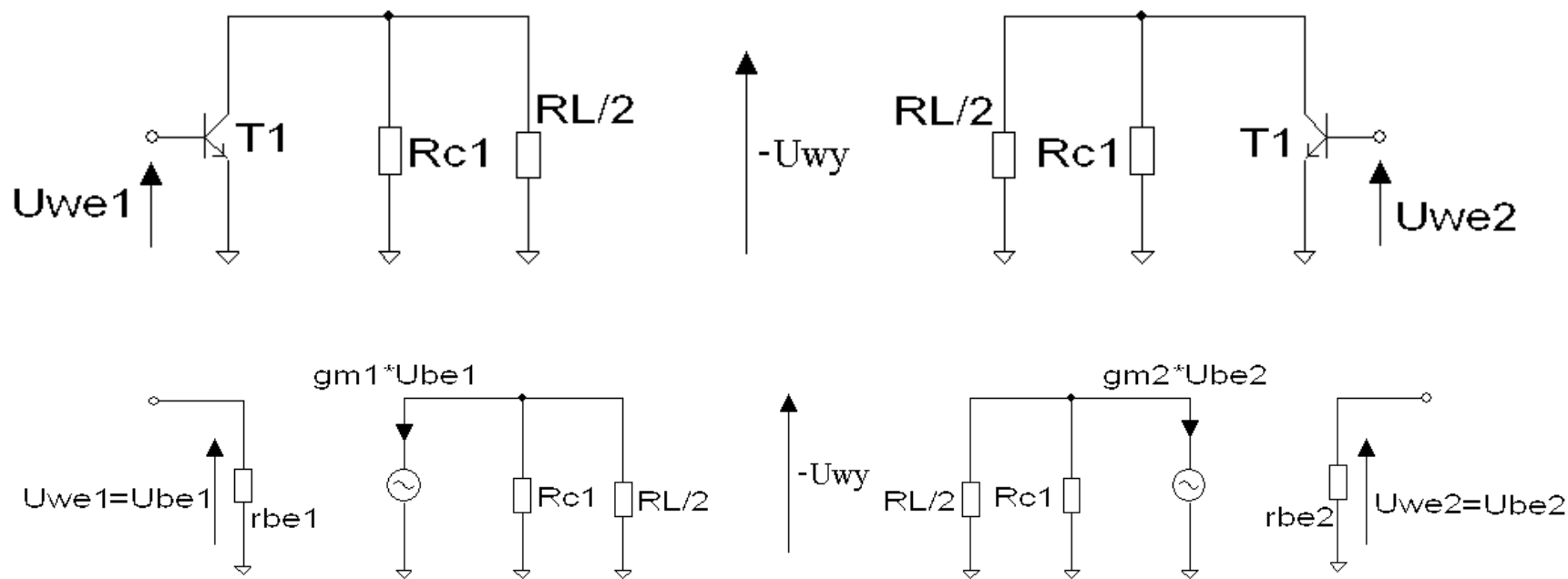
- dla wzmacniacza w pełni symetrycznego, przy  $I_C \approx I_E$

zmiany prądów kolektorów (i napięć kolektor emiter) obu tranzystorów mają taką samą amplitudę i przeciwną fazę, co powoduje, że przez prąd płynący przez rezystor  $R_{ee}$

$$I_{ee} = I_{E1} + I_{E2}$$

jest stały i nie zależy od amplitudy sygnału sterującego. Dlatego też emitery obu tranzystorów znajdują się na stałym potencjale, więc węzeł A (rys.4) można przy analizie zmiennoprądowej połączyć z masą.

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys.5. Schematy zmiennoprądowy wzmacniacza różnicowego

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

Wzmocnienie różnicowe wzmacniacza wynosi:

$$K_{UR} = -g_m R_{OBC}$$

$$R_{OBC} = \frac{R_C \frac{R_L}{2}}{R_C + \frac{R_L}{2}}$$

Wzmocnienie sumacyjne wzmacniacza jest równe zero:

$$K_{US} = 0$$

Współczynnik tłumienia sygnału sumacyjnego:

$$CMRR = 0.$$

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

W przypadku braku symetrii wzmacniacza z rys. 4  $g_{m1} \neq g_{m2}$  lub/i  $R_{C1} \neq R_{C2}$  wzmocnienia układu wynoszą:

Wzmocnienie różnicowe wzmacniacza wynosi:

$$K_{UR} = -\frac{(g_{m1} + g_{m2}) + 4g_{m1}g_{m2}R_{ee}}{2[1 + (g_{m1} + g_{m2})R_{ee}]} R_{OBC}$$

Wzmocnienie sumacyjne wzmacniacza jest równe zeru:

$$K_{US} = \frac{(g_{m1} - g_{m2})R_{OBC}}{4[1 + (g_{m1} + g_{m2})R_{ee}]}$$

Współczynnik tłumienia sygnału sumacyjnego:

$$CMRR = \frac{2g_{m1}g_{m2}R_{ee}}{g_{m1} - g_{m2}}.$$

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

## Rezystancje wejściowa i wyjściowa wzmacniacza.

Wzmacniacz symetryczny.

Rezystancja wejściowa różnicowa wzmacniacza:

$$r_{wer} = 2r_{b'e}$$

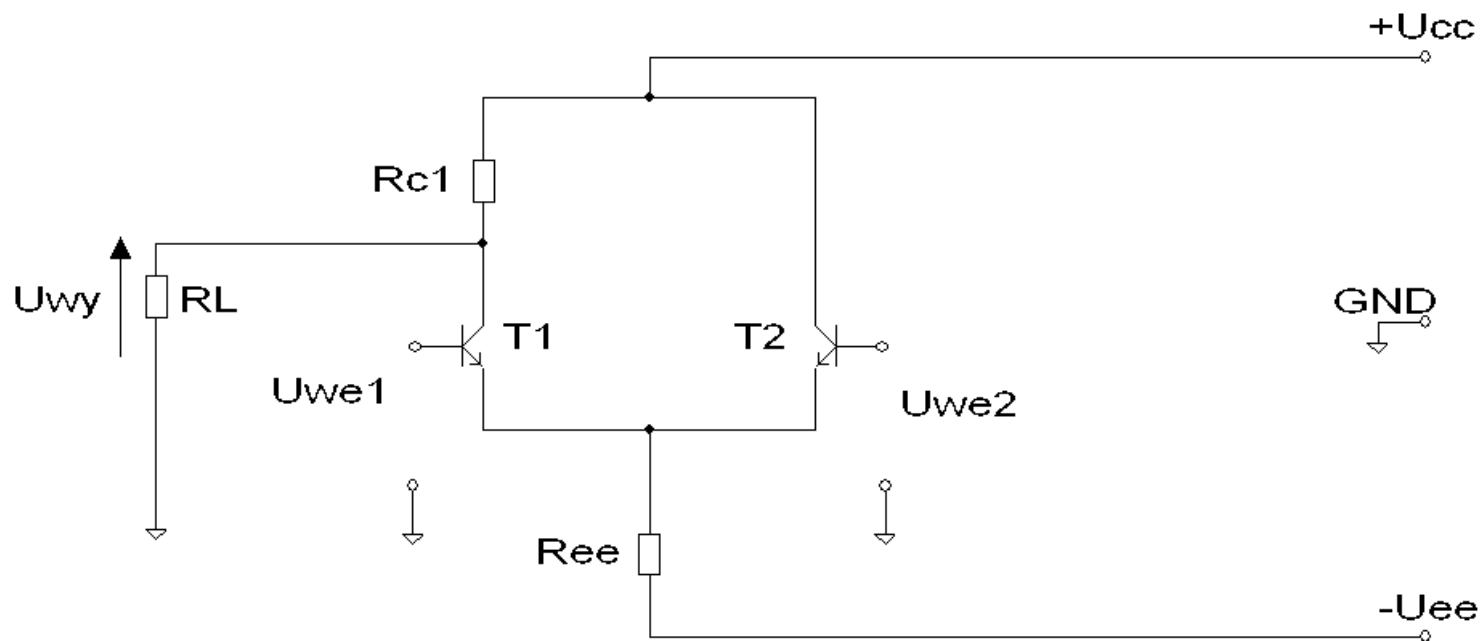
Rezystancja wejściowa sumacyjna wzmacniacza:

$$r_{wes} = \frac{r_{b'e}}{2} + (\beta_0 + 1)R_{ee}$$

Natomiast rezystancja wyjściowa układu wynosi:

$$r_{wy} = \frac{R_C r_{CE}}{R_C + r_{CE}} \approx R_C$$

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys.6. Niesymetryczny wzmacniacz różnicowy

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

Wzmocnienie różnicowe wzmacniacza wynosi:

$$K_{UR} = \frac{-g_m R_{OBC}}{2}$$

Wzmocnienie sumacyjne wzmacniacza jest równe:

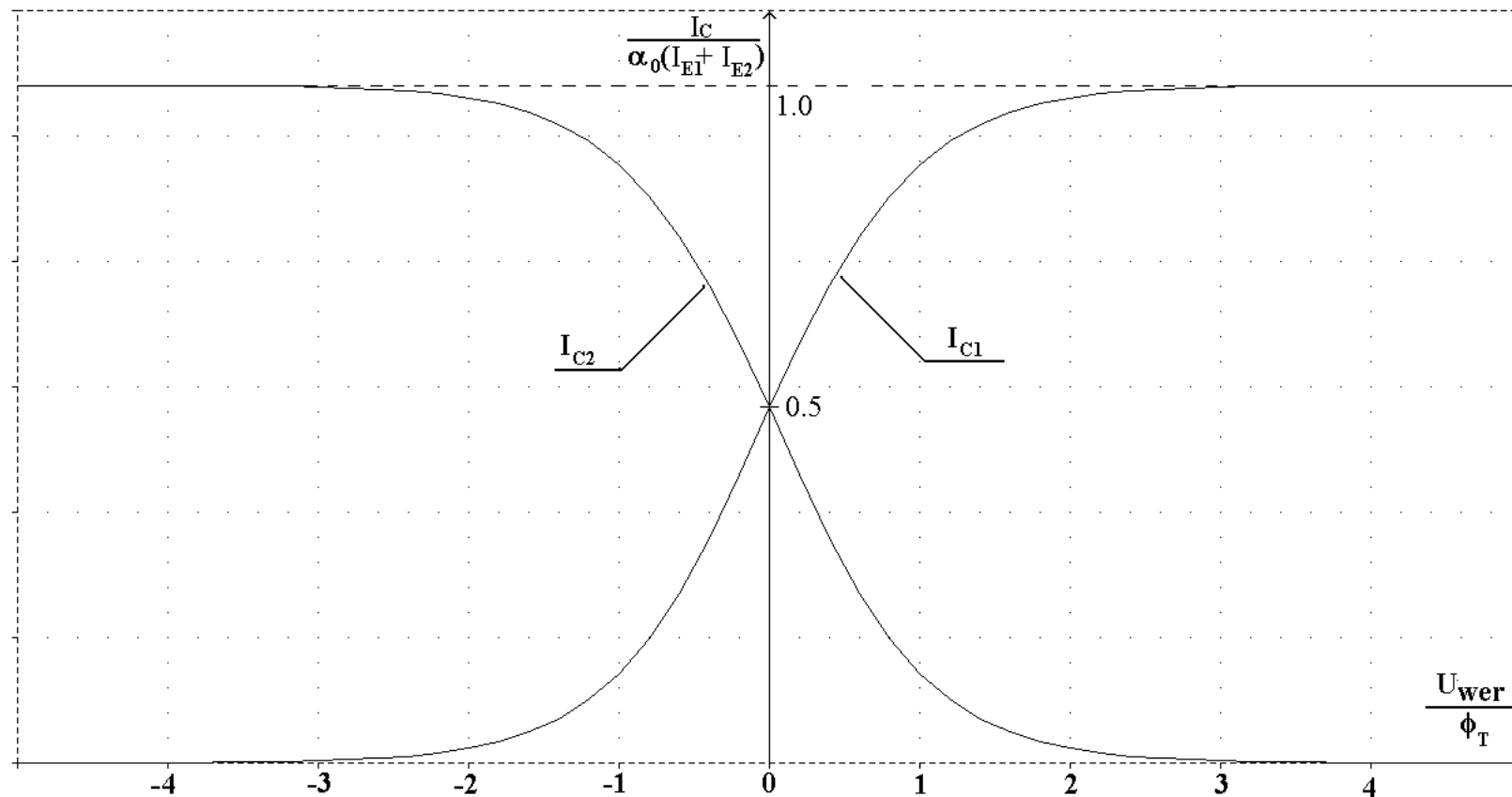
$$K_{US} = \frac{-R_{OBC}}{2R_{ee}}$$

Współczynnik tłumienia sygnału sumacyjnego:

$$CMRR = 2g_m R_{ee}.$$



# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys. 7. Przejściowe charakterystyki prądowe wzmacniacza różnicowego

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

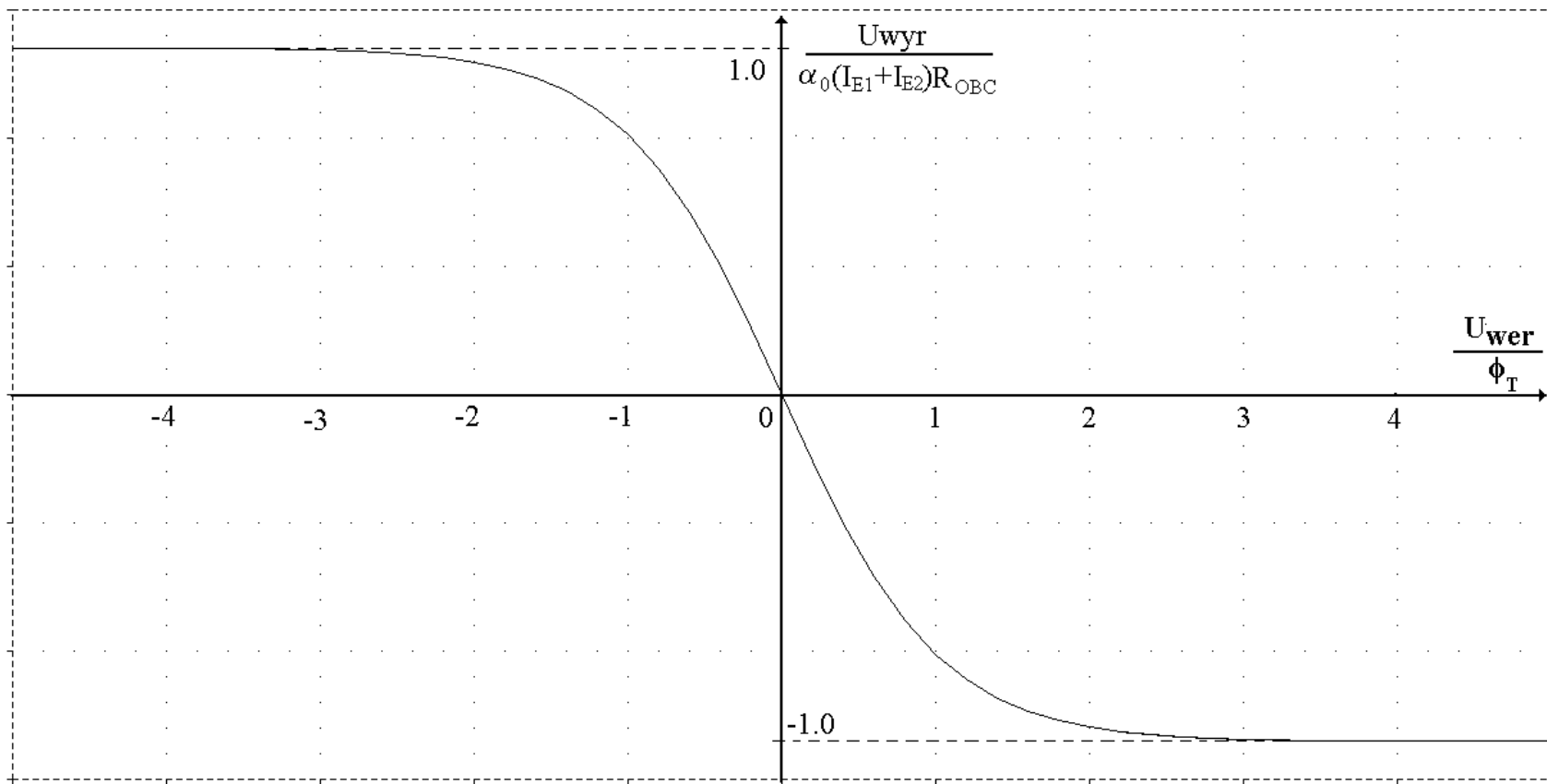
Prądy kolektorów tranzystorów są opisane zależnościami:

$$I_{C1} = \frac{\alpha_0 (I_{E1} + I_{E2})}{1 + e^{\frac{-U_{wer}}{\varphi_T}}}$$
$$I_{C2} = \frac{\alpha_0 (I_{E1} + I_{E2})}{1 + e^{\frac{U_{wer}}{\varphi_T}}}$$

Napięcie wyjściowe różnicowe dane jest równaniem:

$$U_{wyr} = -\alpha_0 (I_{E1} + I_{E2}) R_{OBC} \operatorname{tgh} \left( \frac{U_{wer}}{\varphi_T} \right)$$

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys. 8. Napięciowa charakterystyka przejściowa wzmacniacza różnicowego

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

## Liniowość układu

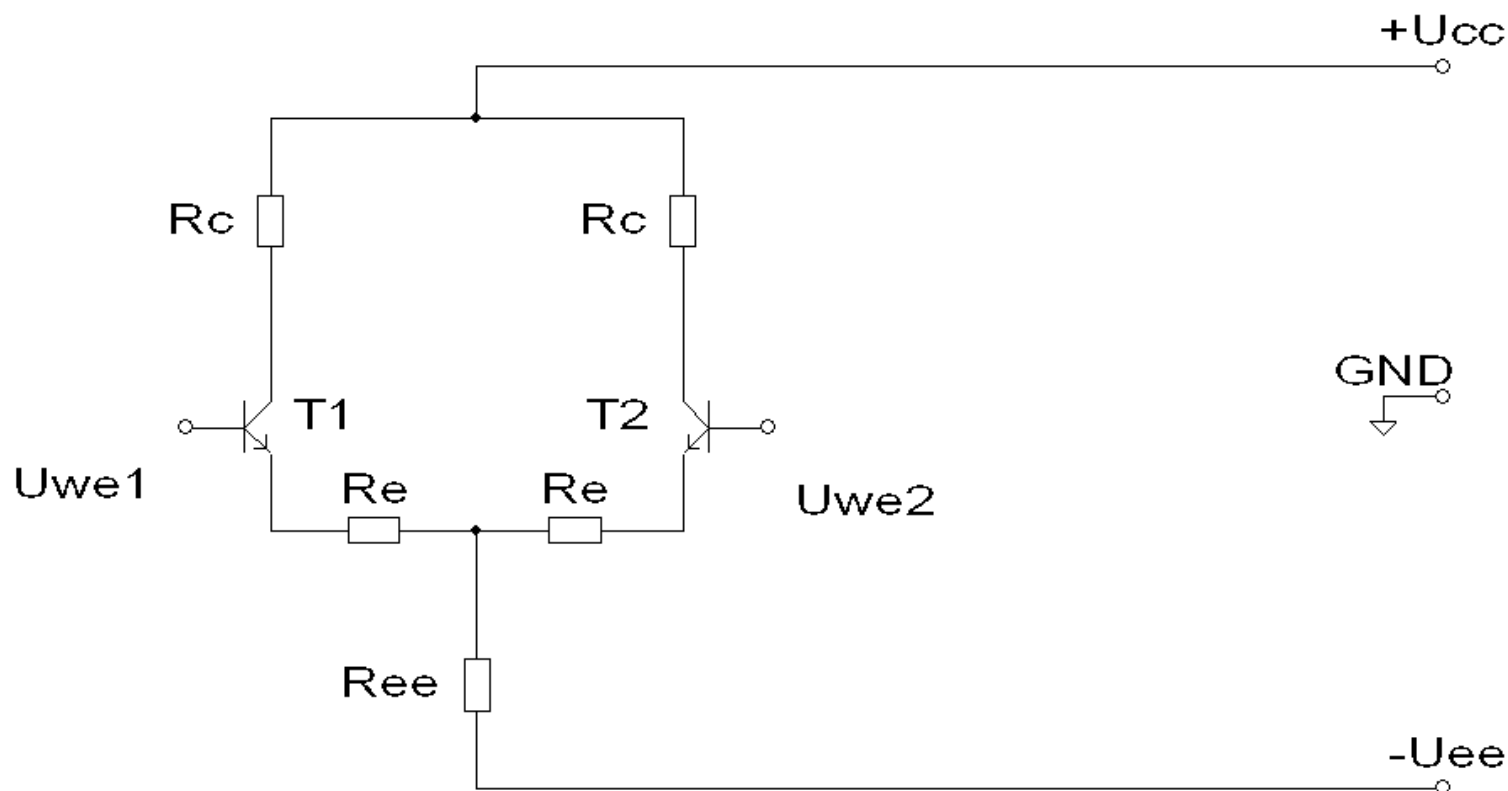
Dla temperatury  $T = 300K$   $\varphi_T = 26mV$

wzmacniacz pracuje liniowo dla napięć wejściowy z zakresu:

$$U_{wer} = (-2\varphi_T \div 2\varphi_T) = (-52mV \div 52mV)$$

Aby zwiększyć liniowość wprowadza się sprzężenie zwrotne dla sygnałów różnicowych zrealizowane na rezystorach  $R_e$ .

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys. 9. Wzmacniacz różnicowy z poszerzonym zakresem liniowości

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

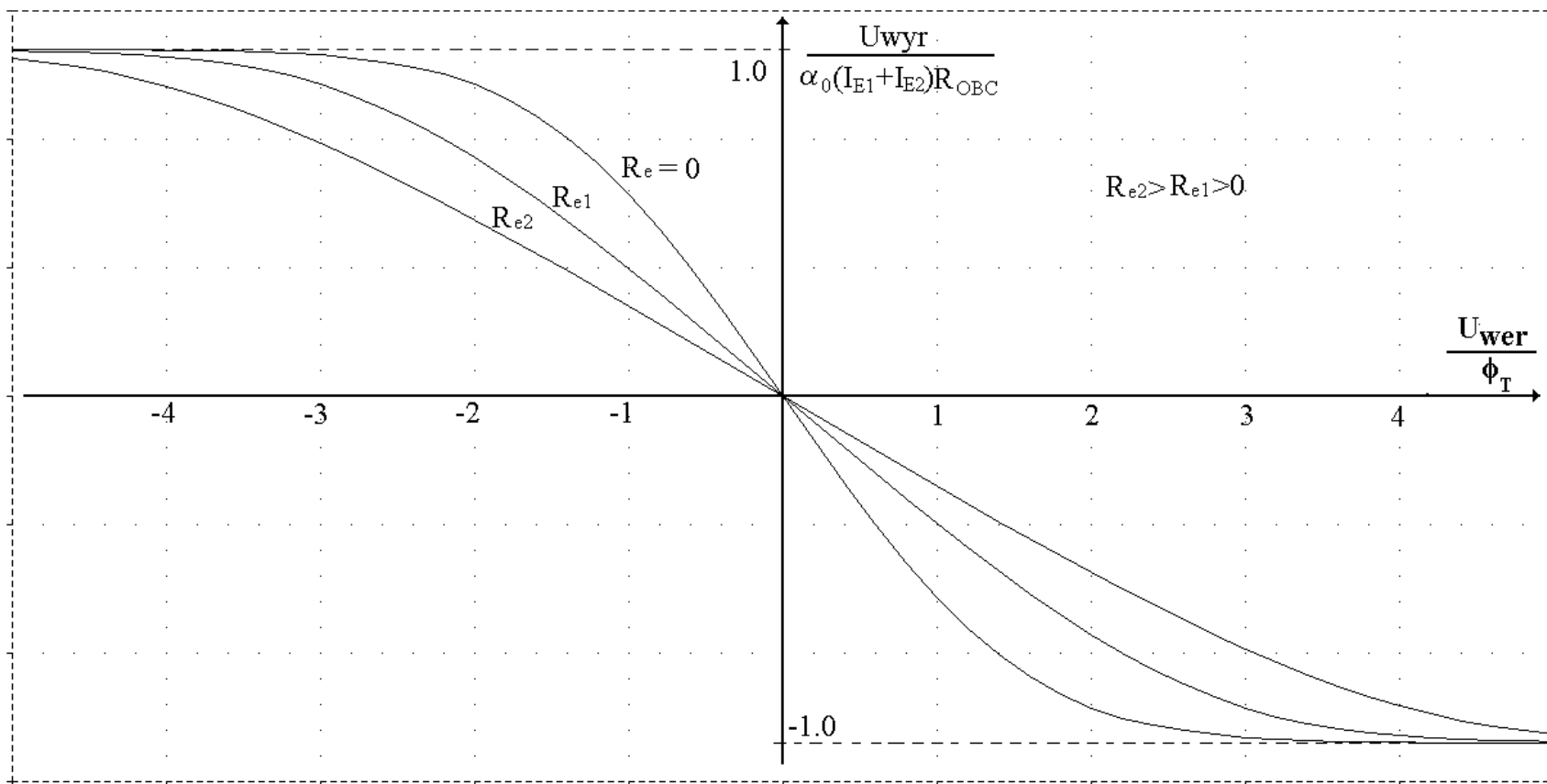
Dla wzmacniacza z poszerzonym zakresem liniowości zakres napięć wejściowych, dla których wzmacniacz pracuje liniowo wynosi:

$$U_{wer} = [(-2\phi_T - I_E R_e) \div (2\phi_T + I_E R_e)] = [(-52mV - I_E R_e) \div (52mV + I_E R_e)]$$

Dla układu ze sprzężeniem zwrotnym wzmocnienie różnicowe wzmacniacza wynosi:

$$K_{UR} = -\frac{g_m R_{OBC}}{1 + g_m R_e} \approx \frac{R_{OBC}}{R_e}$$

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys. 10. Charakterystyki przejściowe wzmacniacza z poszerzonym zakresem liniowości

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

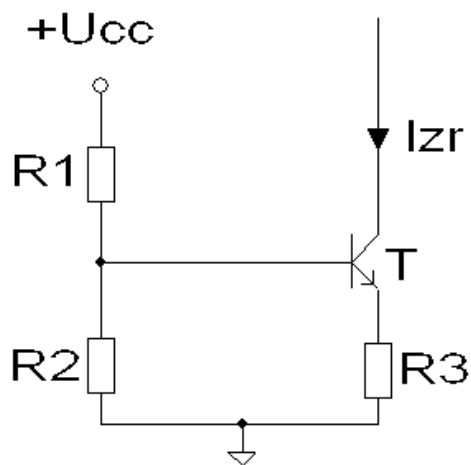
## **Źródła prądowe stosowane we wzmacniaczach różnicowych**

Zastosowanie źródeł prądowych:

- zapewnienie przepływu stałego prądu przez obciążenie źródła – niezależnie od wartości obciążenia,
- zapewnienie dużych wartości rezystancji dynamicznych przy małych spadkach napięcia



# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

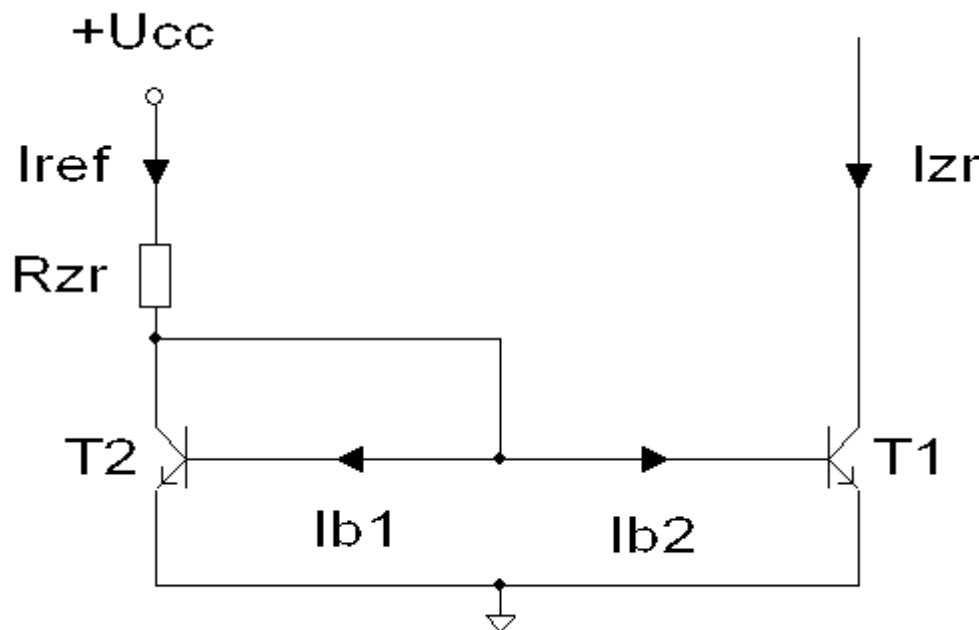


$$I_{\dot{Z}R} = \frac{U_{CC} \frac{R_2}{R_1 + R_2} - U_{BE}}{R_3}$$

$$R_{dyn} = r_{ce} \left[ 1 + \frac{\beta_0 R_3}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} + r_{b'e} + R_3} \right]$$

Rys. 11. Źródło prądowe z potencjometrycznym zasilaniem bazy

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys.12. Lustro prądowe

Przy założeniu, że tranzystory T1 i T2 są identyczne:

$$I_{zr} = I_{C2} = I_{C1} = I_{ref} - (I_{b1} + I_{b2}) = I_{ref} - \frac{2I_{zr}}{\beta_0}$$

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

Prąd źródła:

$$I_{zr} = I_{ref} \frac{\beta_0}{\beta_0 + 2} \approx I_{ref}$$

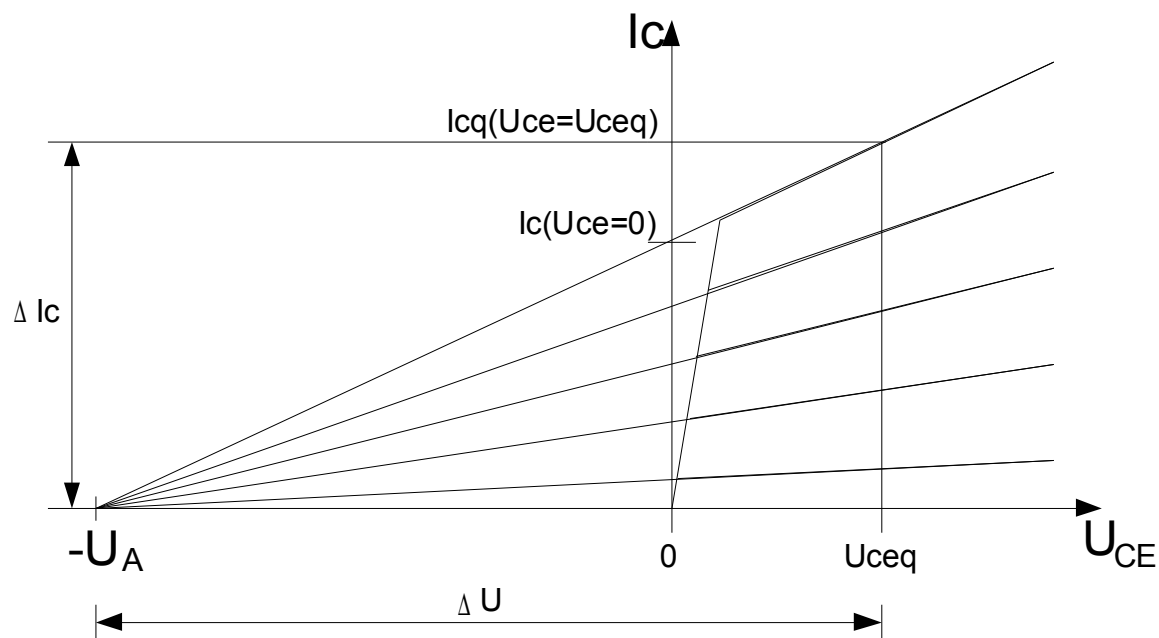
$$I_{ref} = \frac{U_{CC} - U_{BE2}}{R_{zr}}$$

**Rezystancja statyczna i dynamiczna lustra prądowego**

Rezystancja statyczna:

$$R_{stat} = \frac{U_{CEQ}}{I_{CQ}}$$

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys.12. Interpretacja graficzna napięcia Early'ego

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

Rezystancja dynamiczna:

$$R_{dyn} = \frac{U_A}{I_{CQ}}$$

$U_A$  – napięcie Early'ego:

- dla tranzystorów npn  $(50 \div 200)V$  , typowo 100V
- dla pnp typowo 60V

$$R_{dyn} \gg R_{stat} \quad \text{bo} \quad U_A \gg U_{CEQ}$$

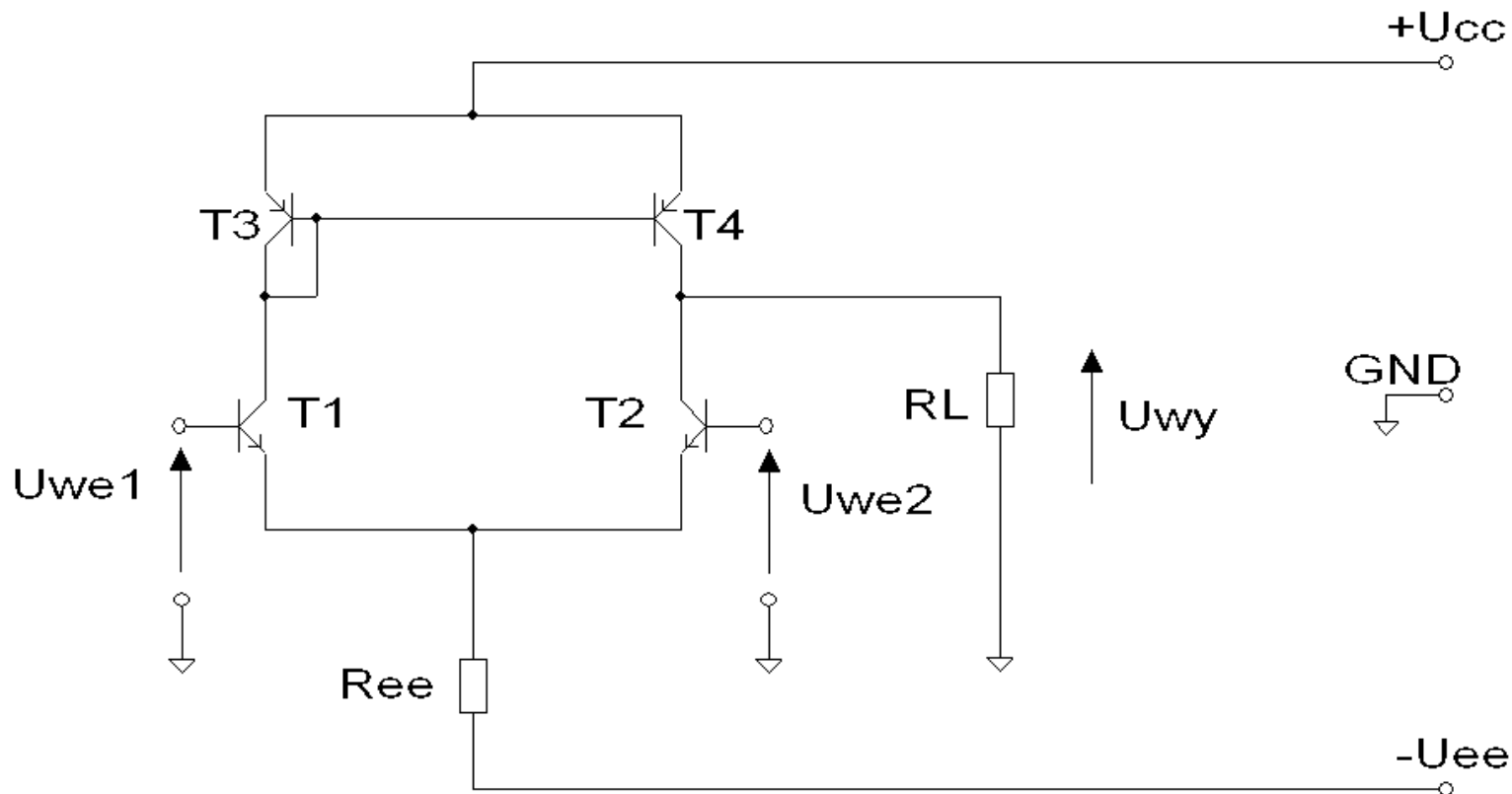
# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

## **Zwiększenie wzmocnienia różnicowego wzmacniacza i współczynnika CMRR – zastosowanie źródeł prądowych**

Zwiększenie  $K_{UR}$  – zastąpienie rezystorów  $R_c$  lustrem prądowym – obciążenie dynamiczne.

Zastosowanie – głównie technika scalona z powodu trudności w realizacji dużych rezystancji w strukturze układów scalonych.

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys. 13. Wzmacniacz różnicowy z obciążeniem dynamicznym



# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

Wzmocnienie różnicowe wzmacniacza z obciążeniem dynamicznym:

$$K_{UR} = -g_m R_{OBC}$$

$$R_{OBC} = \frac{R_L r_{ce4}}{R_L + r_{ce4}}$$

$$r_{ce4} = \frac{U_A}{I_{CQ4}}$$

Wzmocnienie sumacyjne:

$$K_{US} = -\frac{R_L}{2R_{ee}} \frac{2}{2 + \beta_{03}}$$

$\beta_{03}$  – współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora  $T_3$



# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

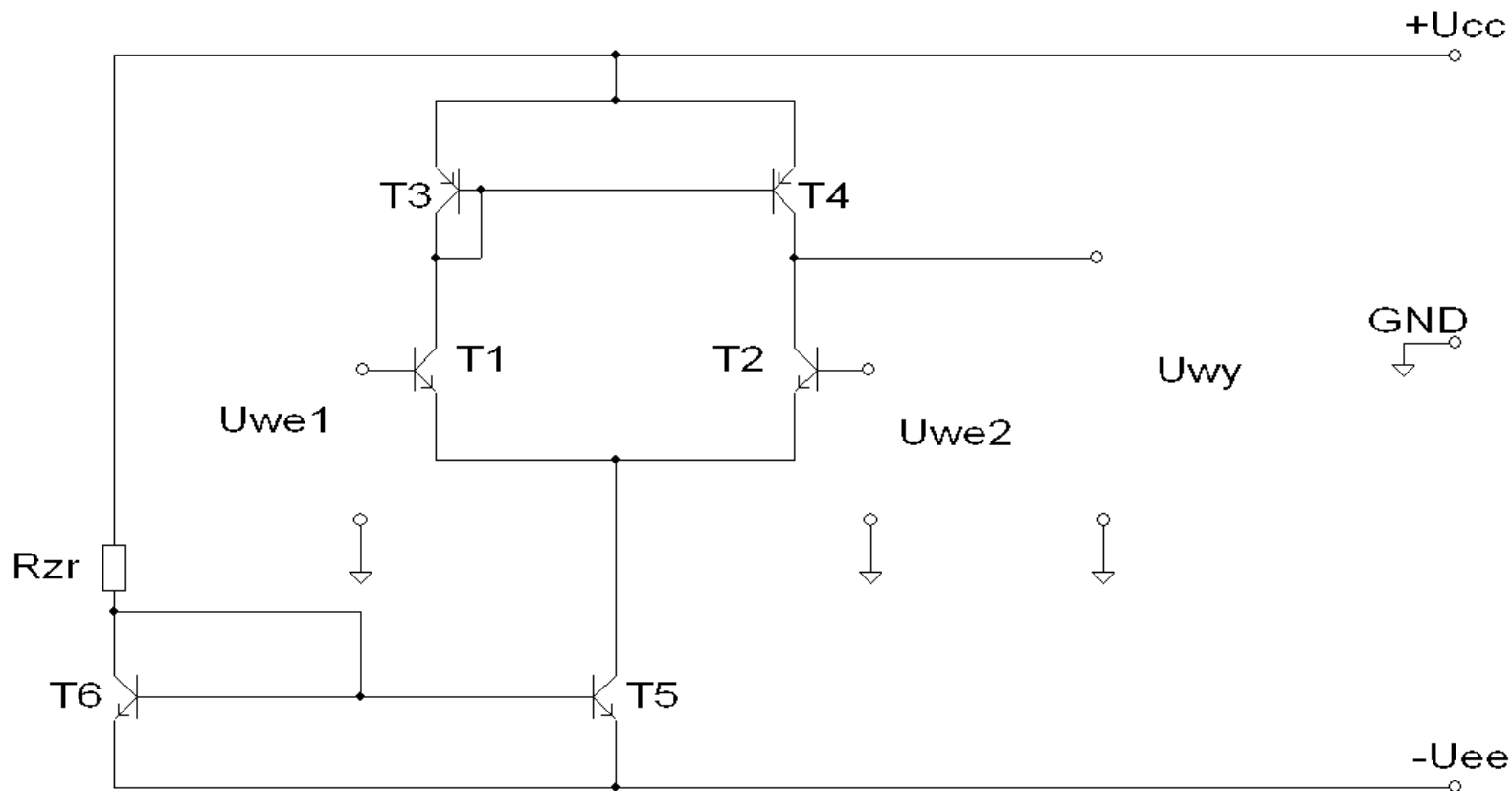
Współczynnik tłumienia sygnału sumacyjnego:

$$CMRR = \frac{g_m R_{OBC} R_{ee} (2 + \beta_3)}{R_L}$$

Zwiększenie CMRR:

- zwiększenie  $K_{UR}$  – źródło prądowe zamiast  $R_C$
- zmniejszenie  $K_{US}$  – zastosowanie źródła prądowego zamiast  $R_{ee}$ .

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys.14. Wzmacniacz różnicowy ze zwiększonym współczynnikiem CMRR

## Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

Zastosowanie lustra prądowego ( $T_5$ ,  $T_6$ ) nie wpływa na wartość  $K_{UR}$ . Zmniejsza tylko  $K_{US}$  (w przypadku wzmacniacza niesymetrycznego), ponieważ:

$$K_{US} = \frac{-R_{OBC}}{2R_{ee}}$$

dla  $R_{ee} = R_{dyn}$

$$K_{US} = \frac{-R_{OBC}}{2R_{dyn}}$$

gdzie:

$$R_{dyn} = \frac{U_A}{I_{CQ5}} \quad I_{CQ5} = \frac{U_{cc} + |U_{ee}| - U_{BE6}}{R_{zr}}$$

Inne źródła zostały omówione podczas analizy układów polaryzacji tranzystorów.



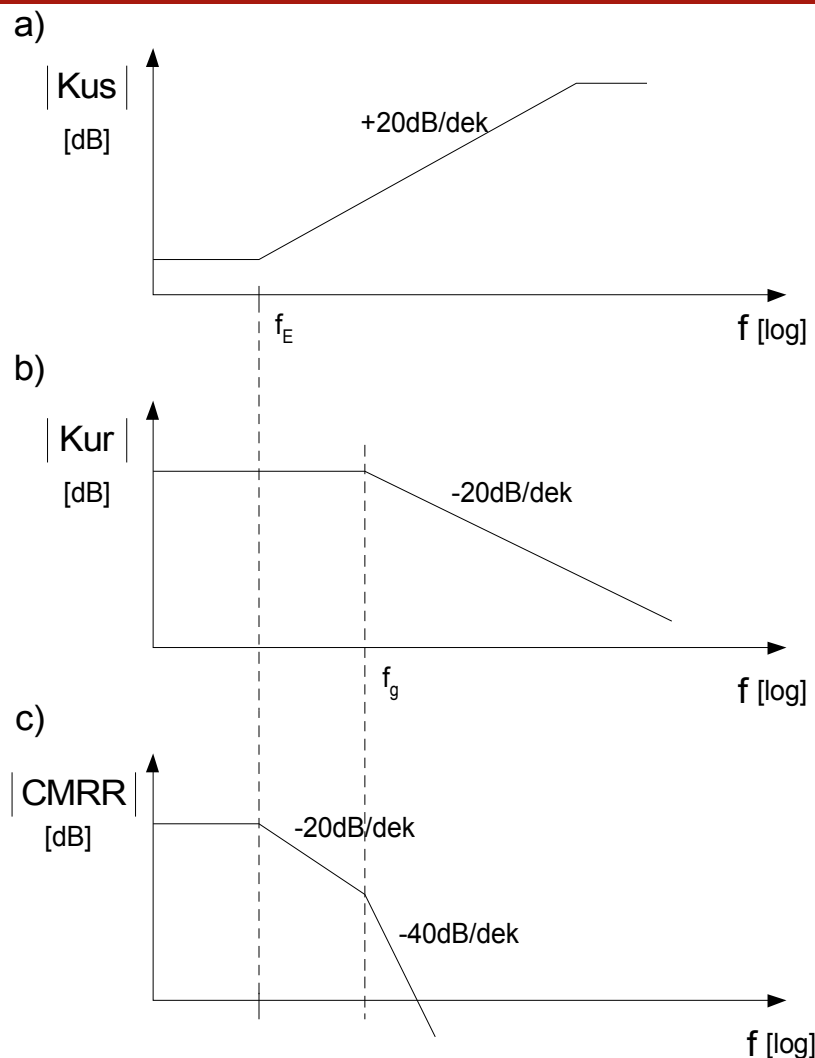
# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

## **Analiza wzmacniacza różnicowego w funkcji częstotliwości**

Wzmacniacz różnicowy wzmacnia napięcia stałe ale także napięcia zmienne.

Obydwa wzmocnienia: różnicowe i sumacyjne zależą od częstotliwości.

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys. 15. Charakterystyki częstotliwościowe wzmacniacza różnicowego:

b)  $|K_{us}| = f(f)$

c)  $|K_{ur}| = f(f)$

d)  $|CMRR| = f(f)$

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

Częstotliwość graniczna  $f_g$ :

$$f_g = \frac{1}{2\pi R C_{we}}$$
$$R = \frac{r_{b'e} \left( r_{bb'} + \frac{R_g}{2} \right)}{r_{b'e} + r_{bb'} + \frac{R_g}{2}} \quad C_{we} = C_{b'e} + C_{b'c} (1 - K_{UR}(j\omega = 0))$$

Częstotliwość graniczna  $f_E$ :

$$f_E = \frac{1}{2\pi (C_{wy} + C_m) r_{wy}}$$

$C_{wy}$  – pojemność widziana od strony zacisków rezystora (lub źródła/lustra prądowego)  $R_{ee}$  znajdującego się we wzmacniaczu różnicowym (rys.4).

$C_m$  – pojemności montażowe

$r_{wy}$  – rezystancja rezystora  $R_{ee}$  (lub wyjścia źródła/lustra prądowego) znajdującego się we wzmacniaczu różnicowym.

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

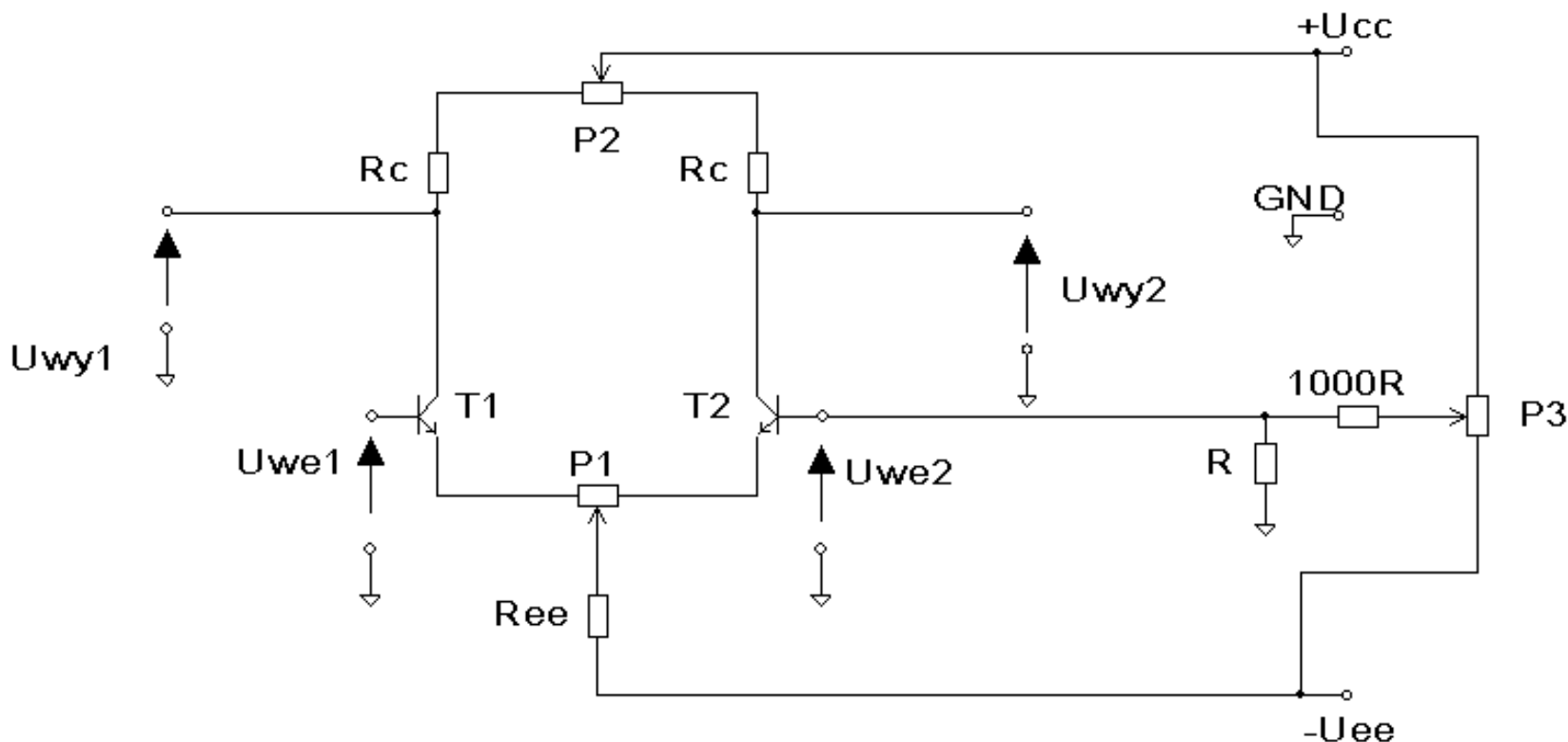
## Inne parametry wzmacniacza różnicowego

a) wejściowe napięcie niezrównoważenia (ang. input offset voltage) – jest to taka różnica napięć wejściowych wzmacniacza różnicowego, którą należy podać na jego wejście aby napięcia wyjściowe  $U_{wy1} = U_{wy2}$ .

Przyczyna powstawania brak symetrii tranzystorów we wzmacniaczu różnicowym:

$$U_{be1} \neq U_{be2}$$

# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych



Rys. 16. Sposoby niwelowania wejściowego napięcia niezrównoważenia



# Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

Dryf napięcia niezrównoważenia w funkcji temperatury:

- zmiana  $U_{be1,2}$   $2\text{mV}/^{\circ}\text{C}$  wpływa na napięcie wyjściowe  $U_{wy}$   
 $K_{US}$  razy – sterowanie wspólne
- dwa tranzystory tego samego typu mają nieznacznie różniące się współczynniki temperaturowe – sterowanie różnicowe. Różnica zmian napięć  $U_{be}$  w funkcji temperatury pomnożona przez  $K_{UR}$  wpływa na wartość  $U_{wy}$ . Częściowa eliminacja zjawiska – wspólne podłoże dla obu tranzystorów.

## Para różnicowa zrealizowana na tranzystorach bipolarnych

b) wejściowy prąd niezrównoważenia – jest to prąd równy różnicy wejściowych prądów polaryzacji tranzystorów we wzmacniaczu różnicowym, przy stałych prądach wyjściowych.

Przyczyna powstawania – różnica w wartościach współczynników wzmocnienia prądowego tranzystorów

$$\beta_{01} \neq \beta_{02}$$

Sposoby niwelowania – takie jak dla eliminacji wejściowego napięcia niezrównoważenia

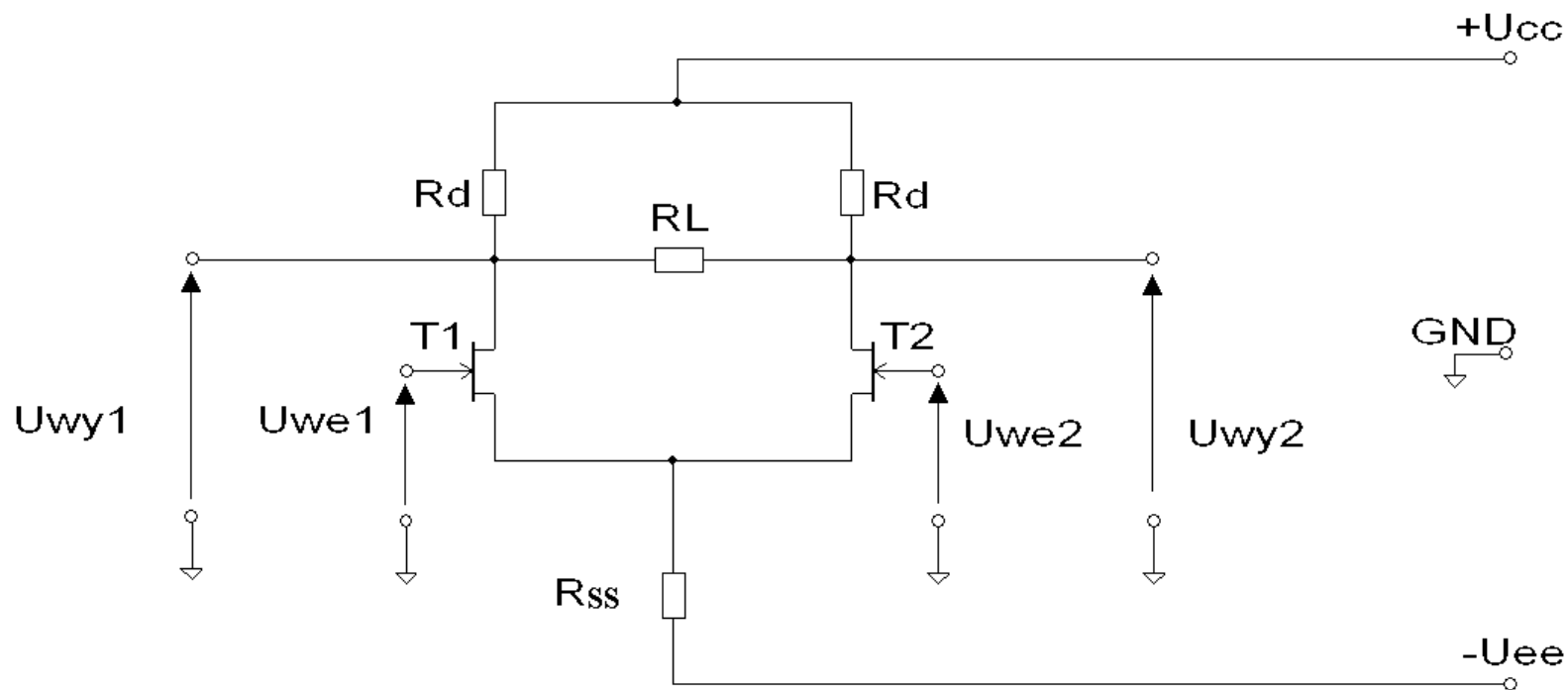


# Wzmacniacz różnicowy zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów polowych

Pełna analogia do wzmacniaczy zbudowanych w oparciu o tranzystory bipolarne:

$$R_e \rightarrow R_s, R_c \rightarrow R_d, R_{ee} \rightarrow R_{ss}$$

# Wzmacniacz różnicowy zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów polowych



Rys. 17. Wzmacniacz różnicowy zbudowany w oparciu o tranzystory polowe

# Wzmacniacz różnicowy zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów polowych

Wzmocnienie różnicowe układu:

$$K_{UR} = -g_m R_{OBC}$$

$$R_{OBC} = \frac{R_d \frac{R_L}{2}}{R_d + \frac{R_L}{2}}$$

Wzmocnienie sumacyjne układu:

$$K_{US} = -\frac{g_m R_{OBC}}{1 + 2R_{ss}g_m}$$

Współczynnik CMRR:

$$CMRR \approx g_m R_{ss}$$

# Wzmacniacz różnicowy zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów polowych

Rezystancje wejściowe:

$$r_{wer} = r_{wes} \approx \infty$$

Rezystancja wyjściowa:

$$r_{wy} = \frac{R_d r_{ds}}{R_d + r_{ds}}$$

$r_{ds} = (g_{ds})^{-1}$  – rezystancja dren-źródło w modelu małosygnałowym tranzystora polowego

# Wzmacniacz różnicowy zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów polowych

Zalety zastosowania tranzystorów unipolarnych:

- liniowość wzmacniacza  $|U_{wemax}| = (2 \div 5)V$  dużo większa niż dla układu z tranzystorami bipolarnymi  $|U_{wemax}| = 52mV$ .
- dużo większa rezystancja wejściowa wzmacniacza w porównaniu do rozwiązań z tranzystorami bipolarnymi

Wada:

- przy tych samych prądach polaryzacji wzmacniacz zbudowany na tranzystorach polowych ma dużo mniejsze wzmocnienie różnicowe ze względu na małą wartość  $g_m$ .

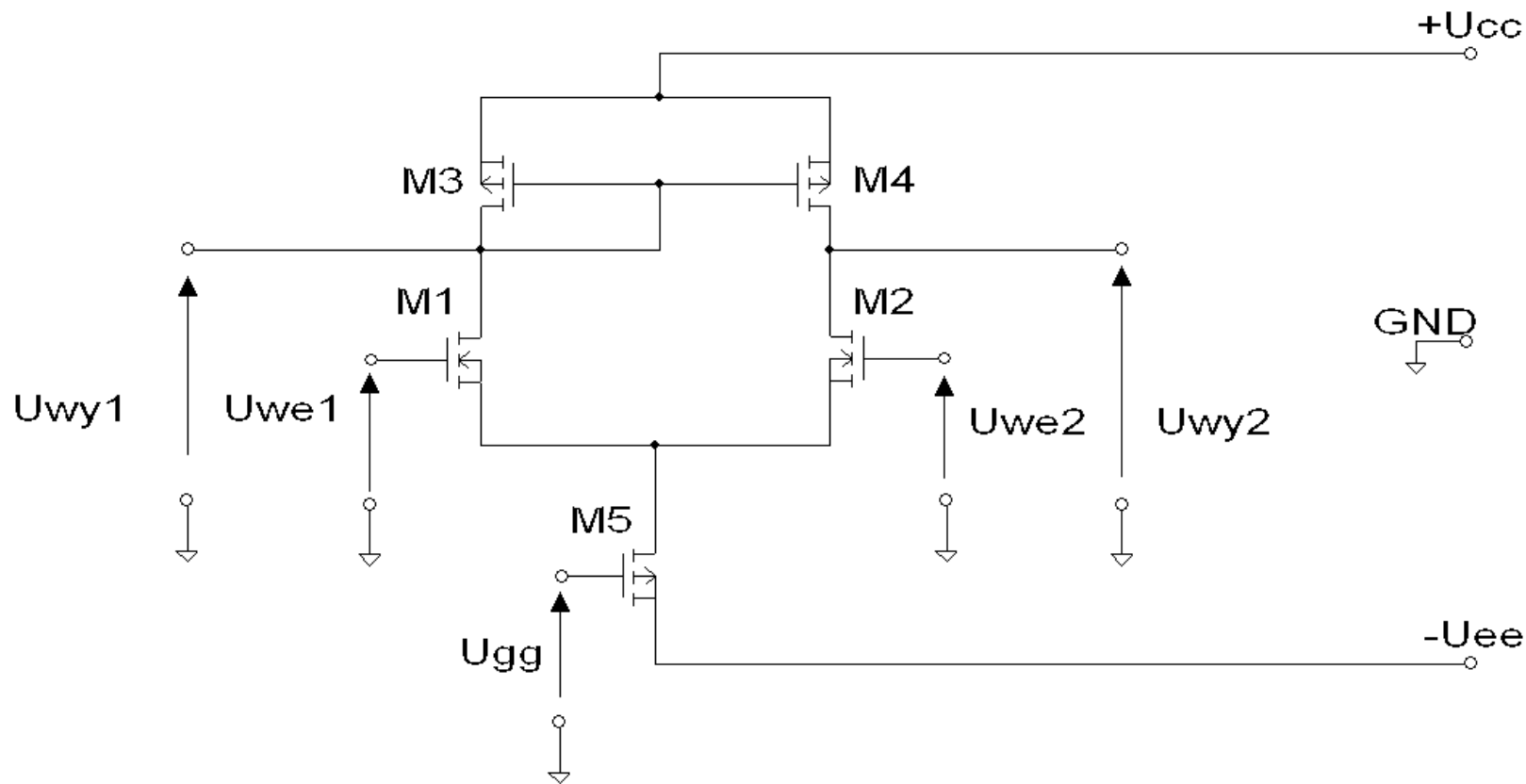


# Wzmacniacz różnicowy zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów MOSFET

W strukturach scalonych wykorzystuje się bardzo często wzmacniacze różnicowe zrealizowane kompleksowo z wykorzystaniem tranzystorów typu MOS. Typowe rozwiązanie.



# Wzmacniacz różnicowy zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów MOSFET



Rys.18. Wzmacniacz różnicowy zbudowany na tranzystorach typu MOS

# Wzmacniacz różnicowy zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów MOSFET

Prąd źródła prądowego zależy od napięcia  $U_{gg}$  (charakterystyka przejściowa tranzystora).

Wzmocnienie różnicowe:

$$K_{UR} = -\frac{1}{2} \left( g_{m1} + \frac{g_{m1} g_{m4}}{g_{ds1} + g_{m3} + g_{ds3}} \right) \left( \frac{1}{g_{ds2} + g_{ds4}} \right)$$

przy pełnej symetrii tranzystorów  $M_3$  i  $M_4$  wyrażenie upraszcza się do postaci:

$$K_{UR} = -\frac{g_{m1}}{g_{ds2} + g_{ds4}}$$

# Wzmacniacz różnicowy zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów MOSFET

Wzmocnienie sumacyjne:

$$K_{US} = - \frac{g_{m1} r_{ds3}}{1 + 2g_{m1} r_{ds5}}$$

$$r_{ds3} = (g_{ds3})^{-1} \quad r_{ds5} = (g_{ds5})^{-1}$$

Współczynnik CMRR:

$$CMRR = \frac{g_{ds3} (1 + 2g_{m1} r_{ds3})}{g_{ds2} + g_{ds4}}$$

$g_{ds1} \div g_{ds5}$  - konduktancje dren-źródło w modelach małosygnałowych tranzystorów M1 ÷ M5.

# Wzmacniacz różnicowy zbudowany z wykorzystaniem tranzystorów MOSFET

Rezystancje wejściowe wzmacniacza:

$$r_{wer} = r_{wes} \approx \infty$$

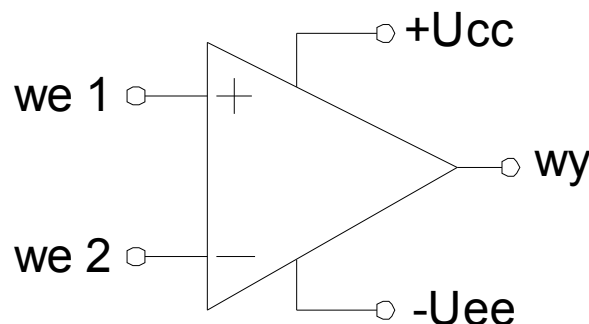
Rezystancja wyjściowa wzmacniacza:

$$r_{wy} = \frac{1}{g_{ds2} + g_{ds4}}$$

# Wzmacniacze operacyjne

Wzmacniacz operacyjny jest wzmacniaczem prądu stałego o dużym wzmocnieniu napięciowym (różnicowym).

Wzmacniacz ten posiada wejście symetryczne (różnicowe) oraz wyjście niesymetryczne. Zdarzają się także konstrukcje z wyjściem symetrycznym (różnicowym).

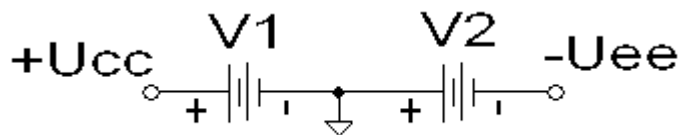


Rys 19. Symbol wzmacniacza operacyjnego

# Wzmacniacze operacyjne

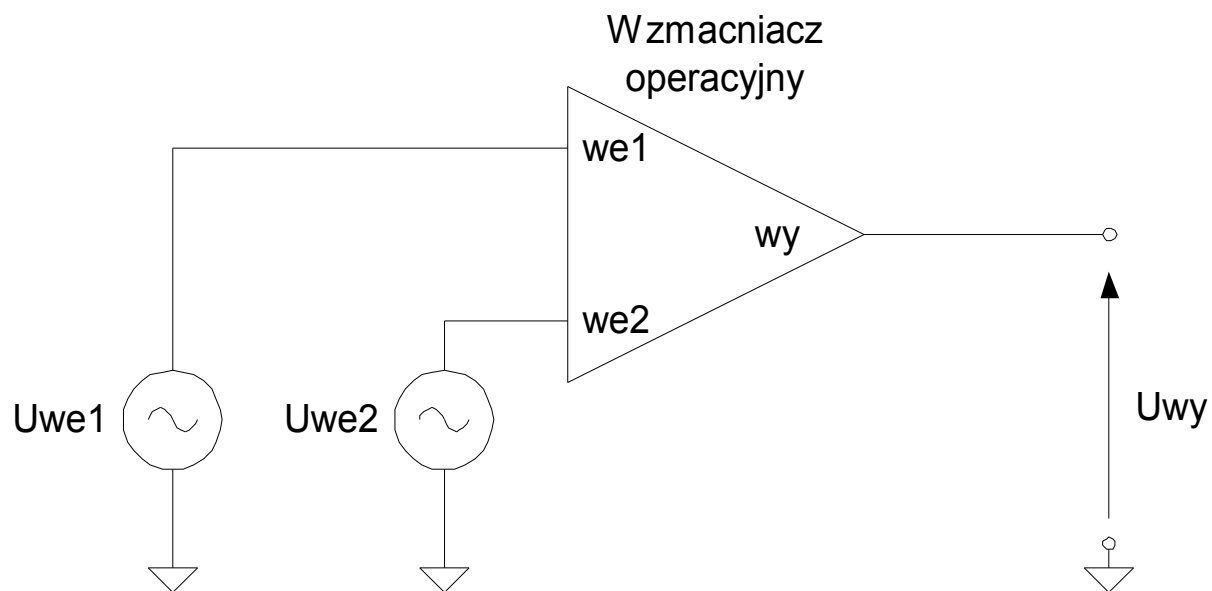
Opis wyprowadzeń wzmacniacza operacyjnego (WO):

- we1 (+) – wejście nieodwracające fazy napięcia
- we2 (-) – wejście odwracające fazę napięcia
- wy – wyjście niesymetryczne
- (+U<sub>cc</sub>) – dodatnie napięcie zasilania wzmacniacza
- (-U<sub>ee</sub>) – ujemne napięcie zasilania wzmacniacza



Rys. 20. Układ zasilania wzmacniacza operacyjnego

# Wzmacniacze operacyjne



Rys. 21. Wzmacniacz operacyjny sterowany różnicowo

# Wzmacniacze operacyjne

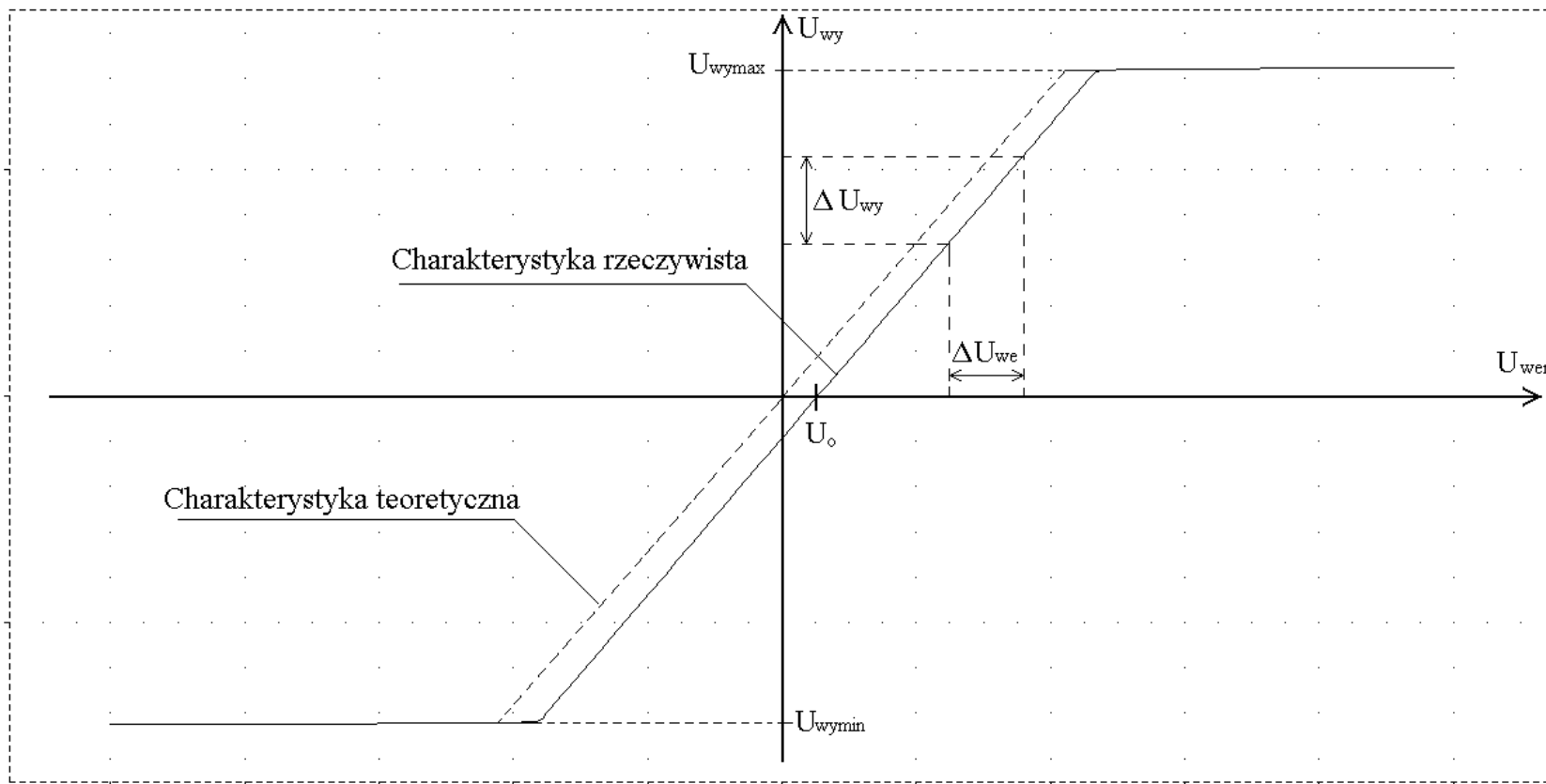
## Parametry wzmacniaczy operacyjnych

Wzmocnienie napięciowe różnicowe nazywane wzmocnieniem z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego:

$$K_{UR} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{wer}} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta(U_{we1} - U_{we2})} = \begin{cases} \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{we1}}, U_{we2} = const \\ -\frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{we2}}, U_{we1} = const \end{cases}$$



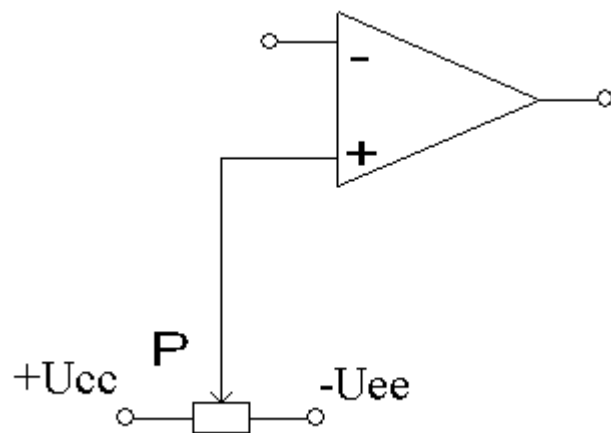
# Wzmacniacze operacyjne



Rys. 22. Charakterystyka przejściowa wzmacniacza operacyjnego

# Wzmacniacze operacyjne

Wejściowe napięcie niezrównoważenia  $U_0$  (ang. input offset voltage). Rząd - kilku miliwoltów.



Rys.23. Sposób kompensacji wejściowego napięcia niezrównoważenia

Wiele wzmacniaczy ma dodatkowe wyprowadzenia do kompensacji wejściowego napięcia niezrównoważenia

# Wzmacniacze operacyjne

Wejściowe napięcie niezrównoważenia – funkcja temperatury, czasu i napięcia zasilania:

$$dU_0(\vartheta, t, U_{cc}, U_{ee}) = \frac{\partial U_0}{\partial \vartheta} d\vartheta + \frac{\partial U_0}{\partial t} dt + \frac{\partial U_0}{\partial U_{cc}} dU_{cc} + \frac{\partial U_0}{\partial U_{ee}} dU_{ee}$$

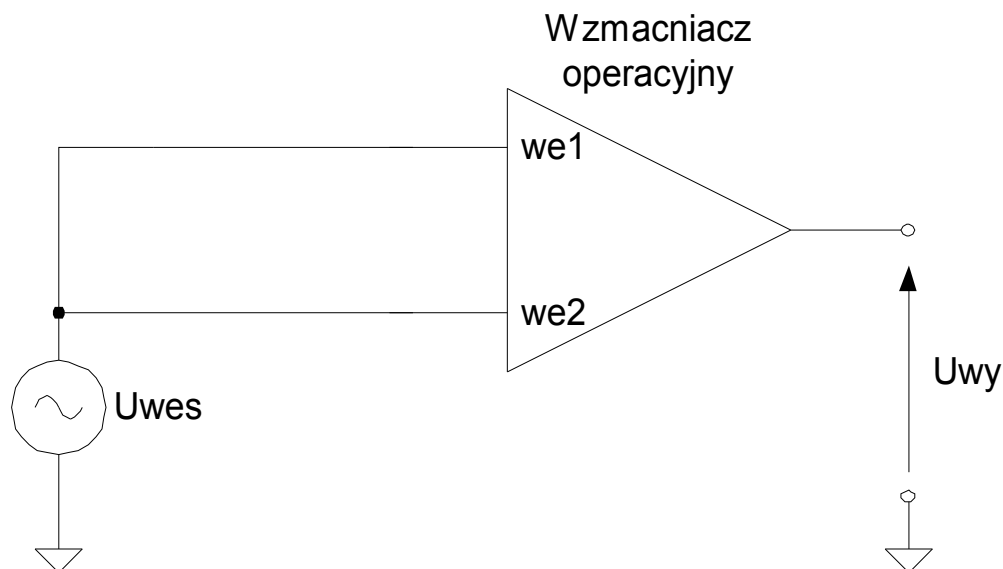
$$\frac{\partial U_0}{\partial \vartheta} \quad - \text{współczynnik temperaturowy} - 3 \dots 10 \mu\text{V/K}$$

$$\frac{\partial U_0}{\partial t} \quad - \text{współczynnik czasowy} - \text{kilka } \mu\text{V na miesiąc}$$

$$\frac{\partial U_0}{\partial U_{cc}}, \frac{\partial U_0}{\partial U_{ee}} \quad - \text{współczynnik napięć zasilania} - 10 \dots 100 \mu\text{V/V}$$

# Wzmacniacze operacyjne

## Sterowanie sygnałem wspólnym



Rys. 24. Wzmacniacz operacyjny sterowany sygnałem wspólnym

Wzmocnienie sumacyjne wzmacniacza operacyjnego:

$$K_{US} = \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta U_{wes}}$$

# Wzmacniacze operacyjne

Wzmocnienie  $K_{US}$  wzrasta wraz ze wzrostem wejściowego napięcia wspólnego. Jest ono ograniczone maksymalnym dopuszczalnym napięciem wejściowym (wspólnym). Jest ono mniejsze o około 2 V od napięć zasilających:

$$|U_{wes \max}| \approx U_{zas} - 2V$$

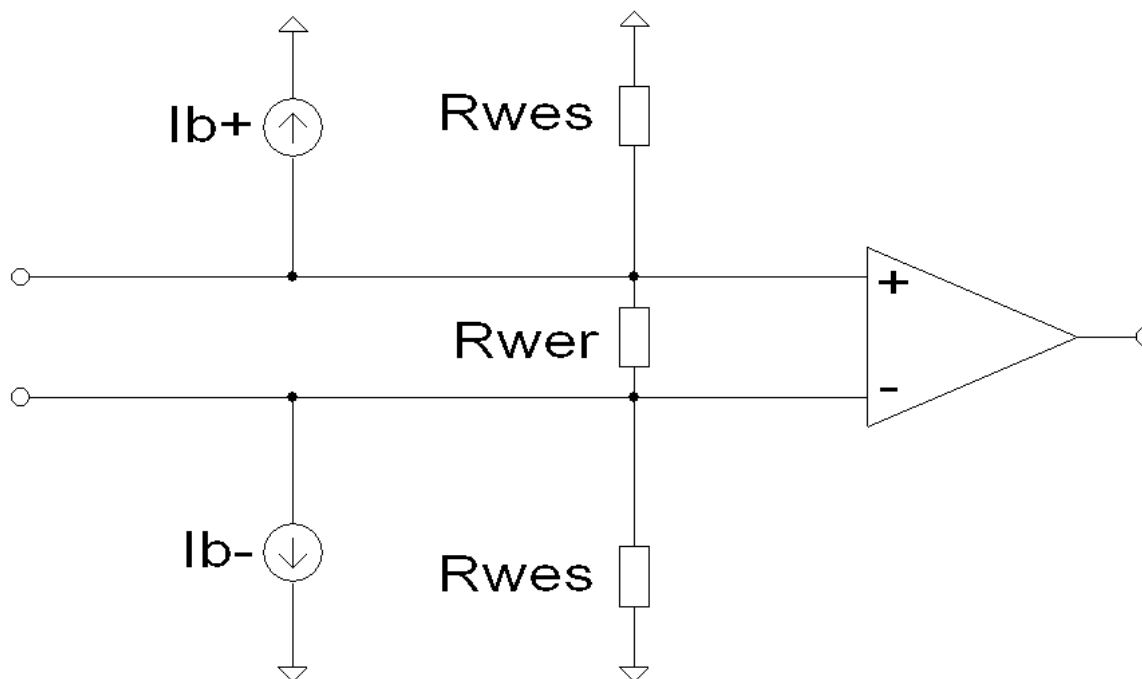
$$U_{zas} = |U_{cc}| = |U_{dd}|$$

Współczynnik tłumienia sygnału wspólnego CMRR:

$$CMRR = \frac{K_{UR}}{K_{US}}$$

# Wzmacniacze operacyjne

Rezystancja wejściowa wzmacniacza operacyjnego



Rys. 25. wzmacniacz operacyjny i jego rezystancje wejściowe

# Wzmacniacze operacyjne

Dla wzmacniaczy zbudowanych na tranzystorach bipolarnych

$R_{\text{wer}}$  jest rzędu  $M\Omega$ ,  $R_{\text{wes}}$  jest rzędu  $G\Omega$ .

Dla wzmacniaczy operacyjnych z wejściem różnicowym opartym na tranzystorach polowych obie rezystancje przyjmują jeszcze większe wartości porównując do wzmacniaczy zbudowanych z tranzystorów bipolarnych.

Wejściowy prąd polaryzacji:

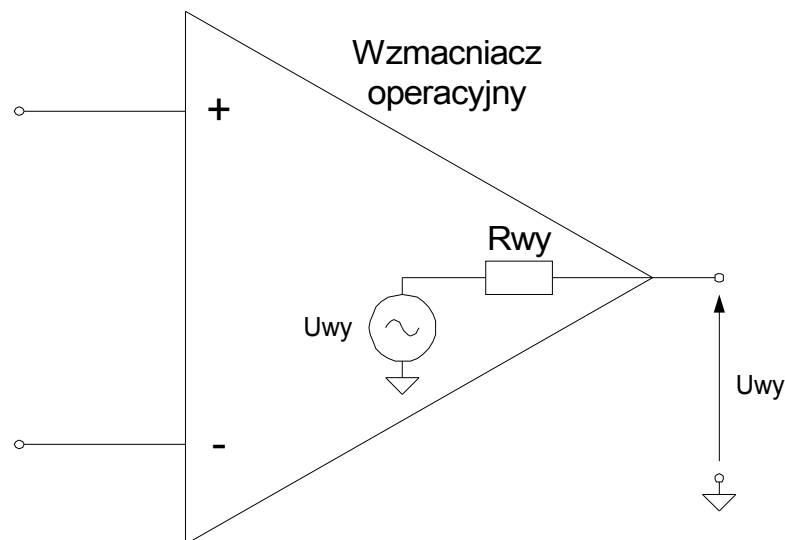
$$I_B = \frac{1}{2}(I_{b+} + I_{b-})$$

Wejściowy prąd niezrównoważenia:

$$I_0 = |I_{b+} - I_{b-}|$$

# Wzmacniacze operacyjne

## Rezystancja wyjściowa



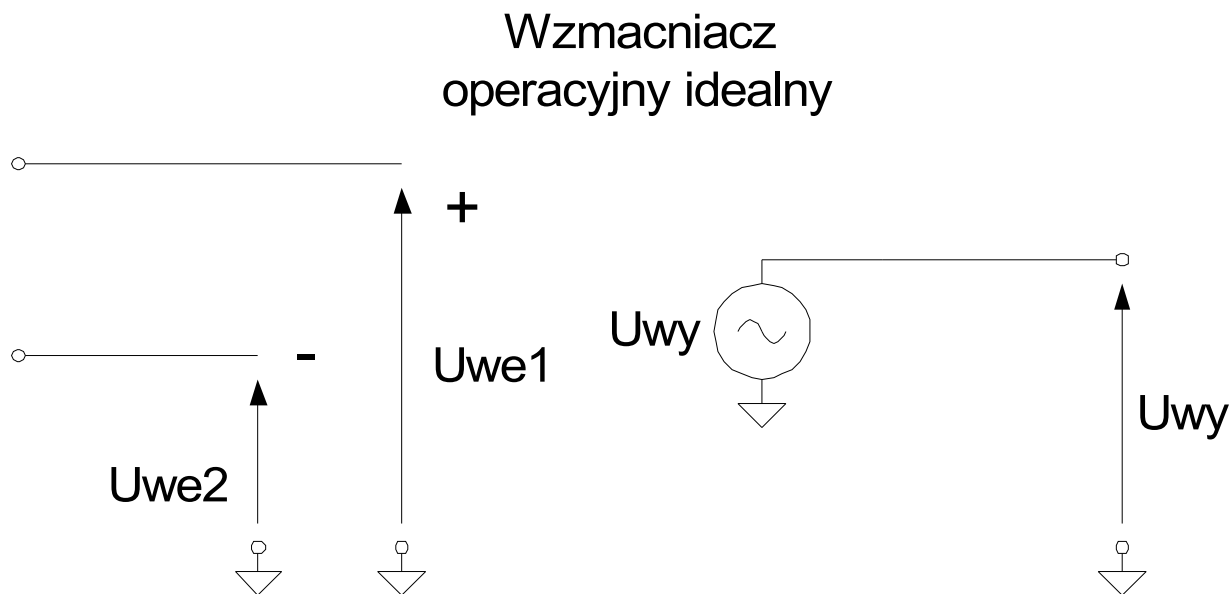
Rys. 26. wzmacniacz operacyjny i jego rezystancja wyjściowa

Rząd wielkości – od kilku do kilkudziesięciu  $\Omega$ .



# Wzmacniacze operacyjne

## Budowa wzmacniacza operacyjnego



Rys. 27. Budowa wzmacniacza operacyjnego idealnego

# Wzmacniacze operacyjne

Dla modelu idealnego wzmacniacza operacyjnego przyjmujemy następujące parametry:

$$K_{UR} = \infty$$

$$K_{US} = 0$$

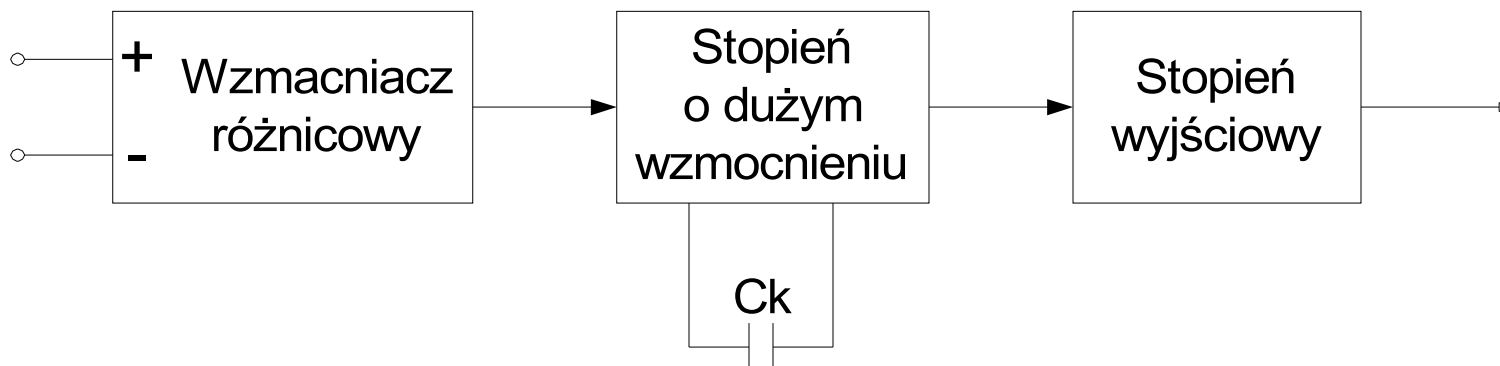
$$CMRR = \infty$$

$$R_{wer} = R_{wes} = \infty$$

Model ten jest bardzo często używany przy wyznaczaniu parametrów układów, w których pracują wzmacniacze operacyjne

# Wzmacniacze operacyjne

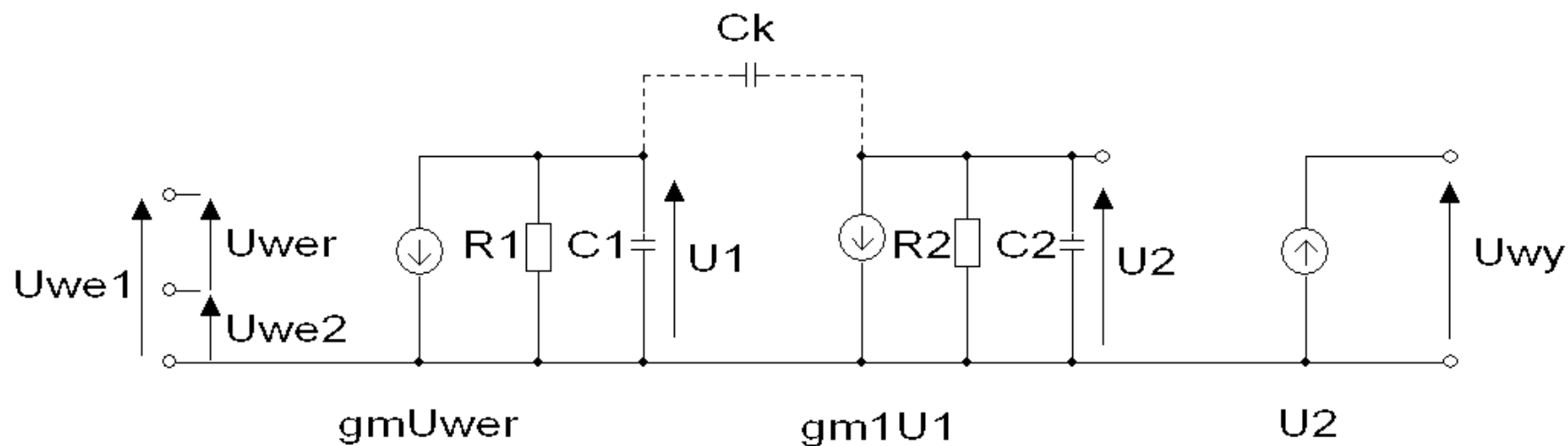
## Wzmacniacz operacyjny rzeczywisty



Rys. 28. Schemat blokowy rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego

# Wzmacniacze operacyjne

## Analiza wzmacniacza operacyjnego w funkcji częstotliwości – kompensacja częstotliwościowa

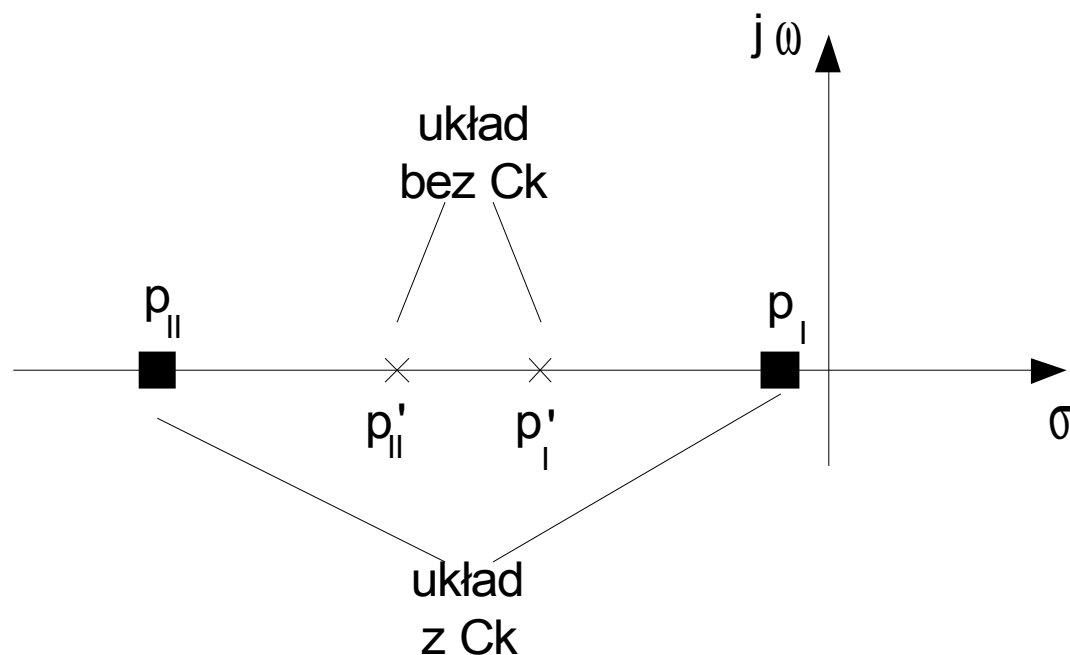


Rys. 29. Schemat zastępczy wzmacniacza operacyjnego

# Wzmacniacze operacyjne

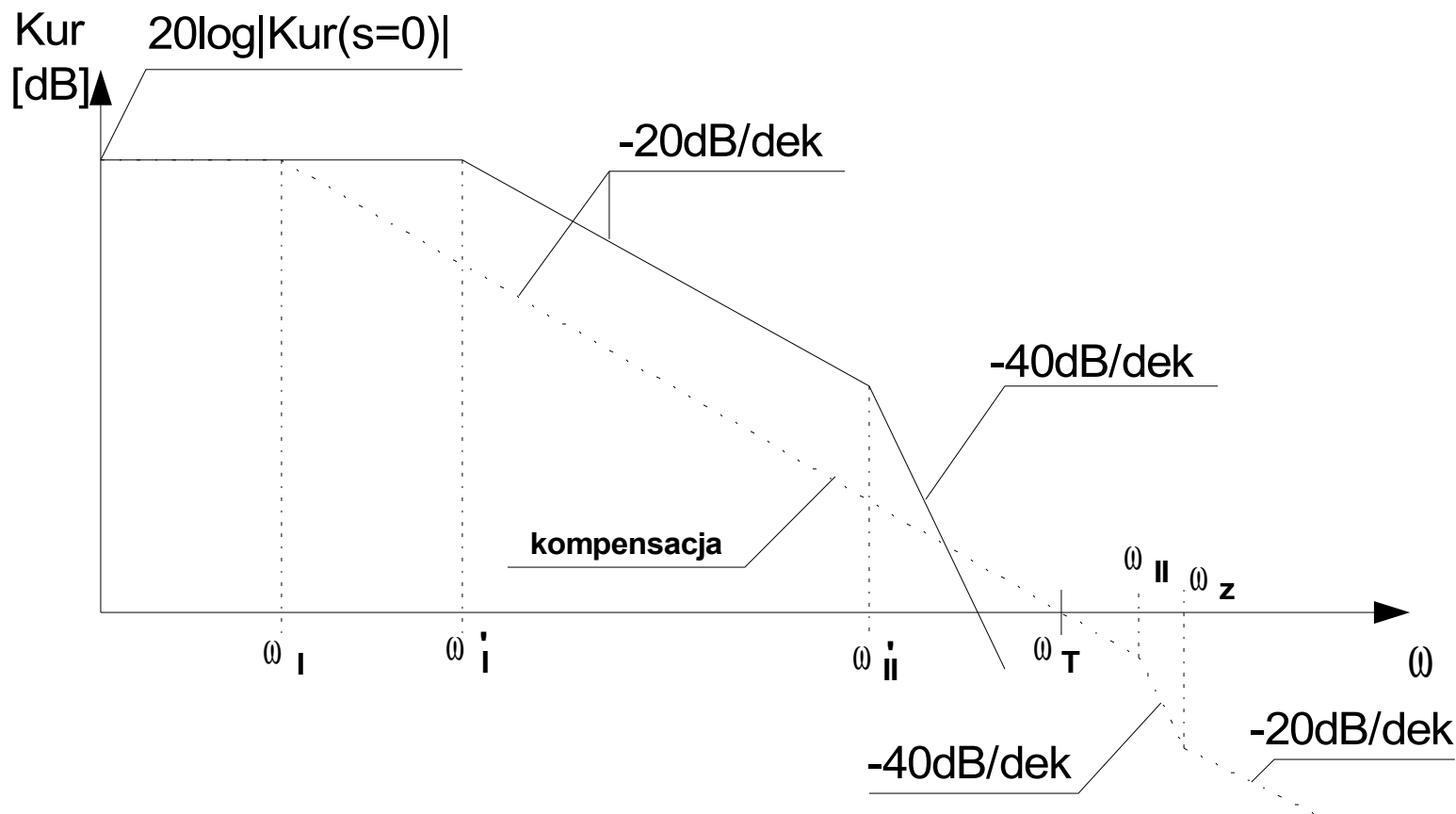
Transmitancja wzmacniacza bez kondensatora kompensującego  $C_k$ :

$$\frac{U_{wy}(s)}{U_{wer}(s)} = -\frac{K_{UR}(s=0)\omega'_1\omega'_2}{(s+\omega'_1)(s+\omega'_2)}; \omega'_1 = -p'_1 = \frac{1}{R_1C_1}; \omega'_2 = -p'_2 = \frac{1}{R_2C_2}; s = j\omega$$



Rys. 30.  
Rozmieszczenie  
biegunów  
transmitancji WO  
bez i z  
kompensacją  
częstotliwościową

# Wzmacniacze operacyjne



Rys. 31. Charakterystyki częstotliwościowe wzmacniacza operacyjnego przed i po kompensacji

# Wzmacniacze operacyjne

Transmitancja skompensowanego biegunem dominującym ( $C_K$ ) wzmacniacza operacyjnego dana jest zależnością:

$$\frac{U_{wyr}(s)}{U_{wer}(s)} = - \frac{K_{UR}(s=0) \left[ 1 - \left( \frac{sC_K}{g_{m1}} \right) \right]}{1 + s[R_1(C_1 + C_2) + R_2(C_1 + C_2) + g_{m1}R_1R_2C_K] + s^2R_1R_2[C_1C_2 + C_K(C_1 + C_2)]}$$

$$\omega_I = -p_I = -\frac{1}{g_{m1}R_1R_2C_K} \quad \omega_{II} = -p_{II} = -\frac{-g_{m2}C_K}{C_1C_2 + C_2C_K + C_1C_K}$$

$$\omega_z = \frac{g_{m1}}{C_K}$$

# Wzmacniacze operacyjne

Prawidłowa kompensacja:

$$\omega_T \leq \omega_H$$

Wtedy margines fazy nie jest mniejszy niż  $45^\circ$ .

Dla skompensowanego wzmacniacza:

$$\omega_T = \frac{g_m}{C_K}$$



# Wzmacniacze operacyjne

**Szybkość narastania napięcia wyjściowego SR (ang. slew rate)**

Definicja:

$$SR = \frac{du_{wy}(t)}{dt} \approx \frac{\Delta U_{wy}}{\Delta t} \quad [\text{V/s}]$$

Dla wzmacniacza bipolarnego:

$$SR = 2\phi_T \omega_T$$

Dla wzmacniacza z wejściem zbudowanym z tranzystorów unipolarnych:

$$SR = (U_{GS} - U_T) \omega_T$$

# Wzmacniacze operacyjne

Rodzaje wzmacniaczy operacyjnych:

- uniwersalne (np. uA741, LF356, LM324, OP 421, TL 054)
- precyzyjne (np. TLE 2227, LT 1125, OP 470, MAX 427)
- małe napięcie niezrównoważenia (np. LT 1028, AD 708)
- nisko szumne (np. LT 1028, AD 797, MAX 414, LM 837)
- mały prąd wejściowy (np. AD 549, OPA 128, LMC 6001)
- mały pobór prądu (np. MAX 419, OP 490, LTC 1047)
- niskie napięcie zasilania (np. LM 10, OP 490, MAX 479)
- wysokie napięcie wyjściowe (np. LM 343, PA 41)

# Wzmacniacze operacyjne

Rodzaje wzmacniaczy operacyjnych:

- duży prąd wyjściowy (np. L 465, OPA 541, OPA 512)
- szerokopasmowe, konwencjonalne (np. EL 2444, AD 602, AD 604, CLC 424)
- szerokopasmowe, transimpedancyjne (np. EL 2020, LT 1206, AD 9617)
- transkonduktancyjne
- o napięciu wyjściowym równym w przybliżeniu napięciu zasilania (ang. rail to rail)
- z wejściem zbudowanym z tranzystorów FET (np. TL 051)



# Wzmacniacze operacyjne

Parametr	Symbol	uA 741	TL 051 (FET)	OP177 (dokładny)	EL2038 (szybki)
Wzmocnienie różnicowe	$K_{UR}$ [V/V]	$10^5$	$2 \cdot 10^5$	$10^7$	$2 \cdot 10^4$
Współczynnik CMRR	CMRR	$3 \cdot 10^4$	$2 \cdot 10^4$	$10^7$	$3 \cdot 10^4$
Rezystancja wejściowa różnicowa	$R_{wer}$ [Ω]	$10^6$	$10^{12}$	$5 \cdot 10^7$	$10^4$
Rezystancja wejściowa wspólna	$R_{wes}$ [Ω]	$10^9$	$10^{14}$	$2 \cdot 10^{11}$	$10^7$
Wejściowe napięcie niezrównow.	$U_0$ [mV]	1	0.5	0.01	0.5
Temp. wsp. Zmian napięcia niezrównow.	$dU_0/dT$ [μV/K]	6	10	0.1	20



# Wzmacniacze operacyjne

Parametr	Symbol	uA 741	TL 051 (FET)	OP177 (dokładny)	EL2038 (szybki)
Maksymalne napięcie wspólne	$ U_{wesmaxz} $ [V]	13	14.5	13	12
Maksymalne napięcie wyjściowe	$ U_{wymax} $ [V]	13	13	14	12
Maksymalny prąd wyjściowy	$I_{wymax}$ [mA]	20	20	20	50
Rezystancja wyjściowa	$R_{wy}$ [Ω]	75	100	60	30
Prąd zasilania	$I_z$ [mA]	1.7	1.4	1.6	13
Częstotliwość graniczna (-3dB)	$f_g$ [Hz]	10	30	0.06	50000



# Wzmacniacze operacyjne

Parametr	Symbol	uA 741	TL 051 (FET)	OP177 (dokładny)	EL2038 (szybki)
Pole wzmocnienia	$f_T$ [MHz]	1	3	0.6	1000
Maksymalna szybkość zmian $U_{wy}$	SR [V/μs]	0.6	18	0.3	1000
Szerokość pasma przenoszenia mocy	$f_p$ [kHz]	10	290	5	16000

# Wzmacniacze prądu stałego - najważniejsze zagadnienia

Wzmacniacz różnicowy (WR):

2. Rodzaje WR
3. Charakterystyki stałoprądowe i częstotliwościowe WR
4. Liniowość WR
5. Zastosowanie źródeł prądowych w WR
6. Wejściowe: prąd i napięcie niezrównoważenia WR
7. Zalety i wady WR zbudowanych z tranzystorów polowych
8. Wzmacniacze różnicowe w strukturach scalonych

# Wzmacniacze prądu stałego - najważniejsze zagadnienia

Wzmacniacz operacyjny (WO):

2. Podstawowe parametry i charakterystyki WO
3. Model idealnego WO
4. Budowa WO
5. Charakterystyki częstotliwościowe WO. Kompensacja biegunem dominującym
6. Szybkość zmian napięcia wyjściowego WO
7. Rodzaje WO