

10. Wzmacniacze operacyjne



Wzmacniacz operacyjny (operational amplifier) jest wzmacniaczem prądu stałego¹ o dużym wzmocnieniu napięciowym, wejściu różnicowym (symetrycznym) i wyjściu asymetrycznym²

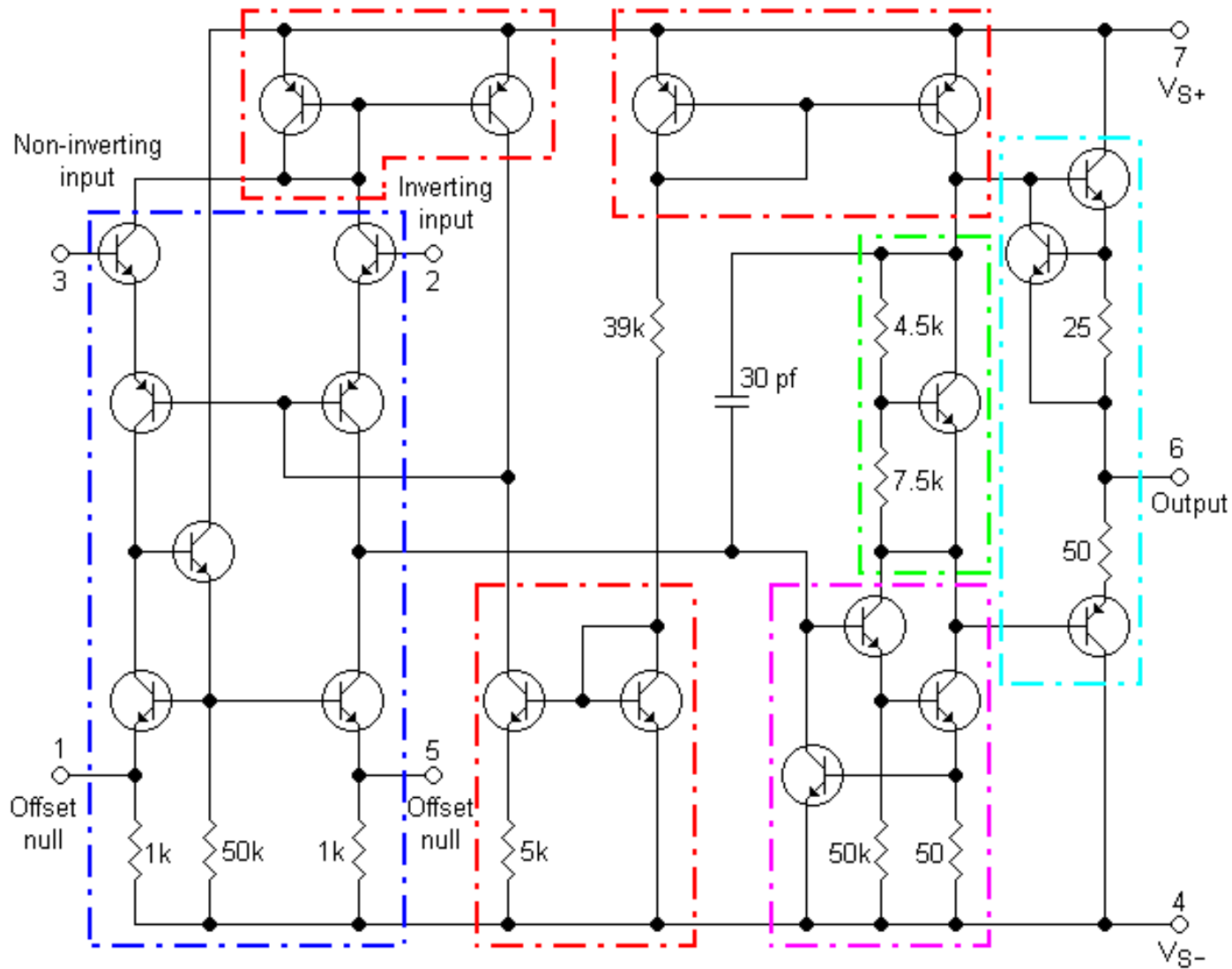
¹ Wzmacniacze prądu stałego to wzmacniacze, których pasmo częstotliwości w dolnym zakresie sięga bardzo niskich częstotliwości łącznie ze składową stałą

² Istnieją wzmacniacze operacyjne o wyjściach symetrycznych, ale nie są one tu omawiane

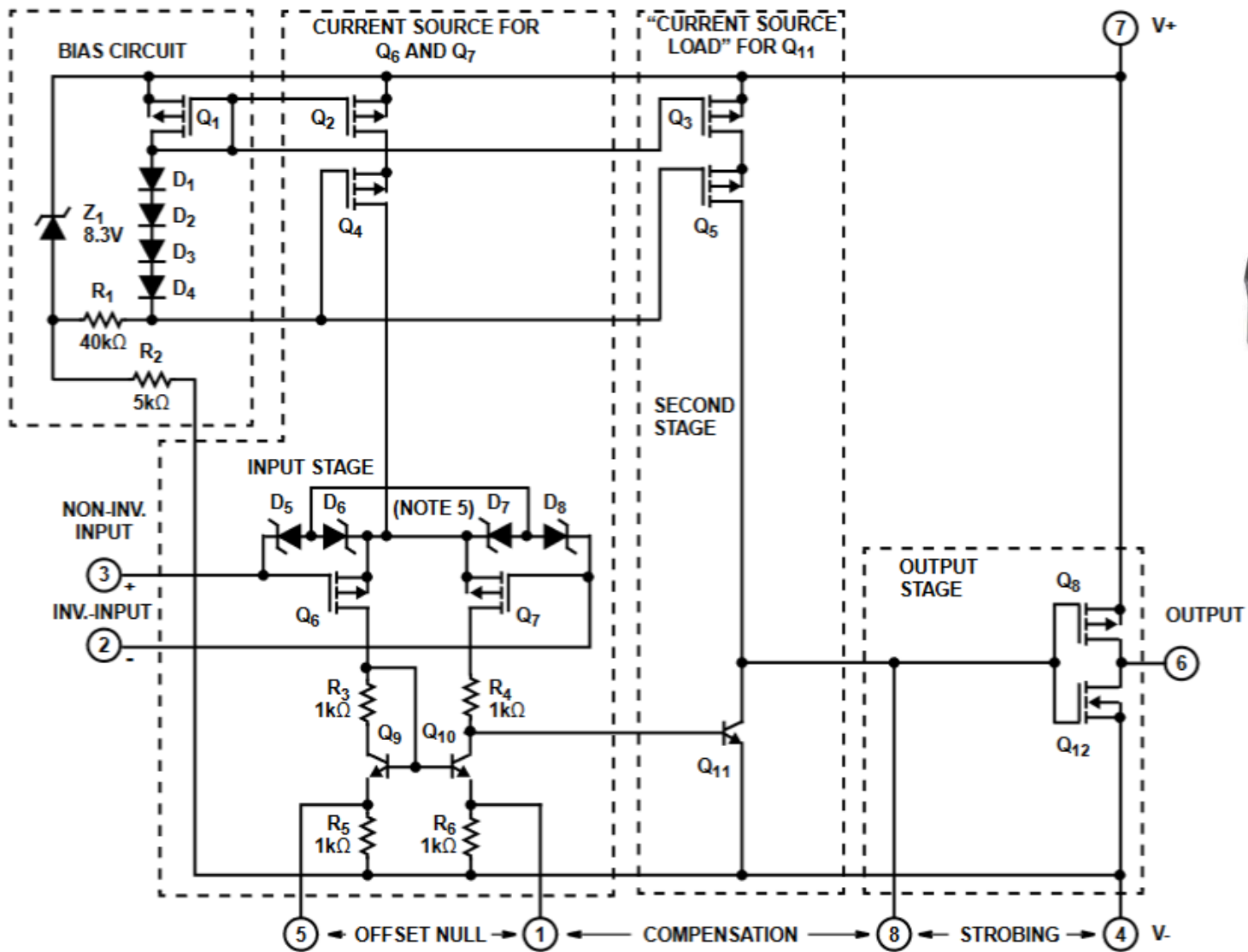
Wzmacniacz operacyjny jest wielostopniowym wzmacniaczem produkowanym w postaci układu scalonego. Konstrukcyjnie jest pomyślany tak, że o jego właściwościach decyduje pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego.

Wzmacniacz operacyjny jest najbardziej rozpowszechnionym układem analogowym i wykorzystywany jest do realizacji szerokiego asortymentu funkcji liniowych i nieliniowych.

Może być wykorzystywany do realizacji operacji matematycznych skąd pochodzi jego nazwa.



wzmacniacz operacyjny μA 741 firmy FAIRCHILD uznany za standard



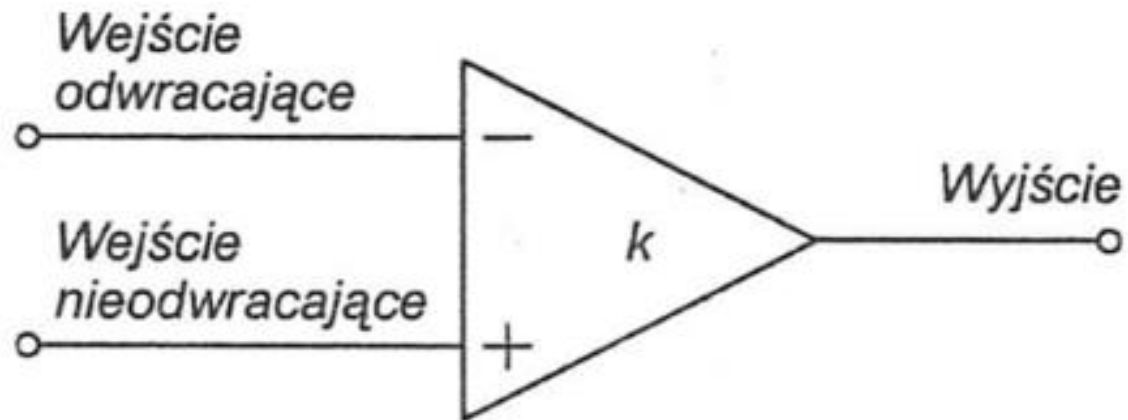
Wzmacniacz operacyjny CA3130

technologia BiMOS łącząca zalety tranzystorów MOS i bipolarnych

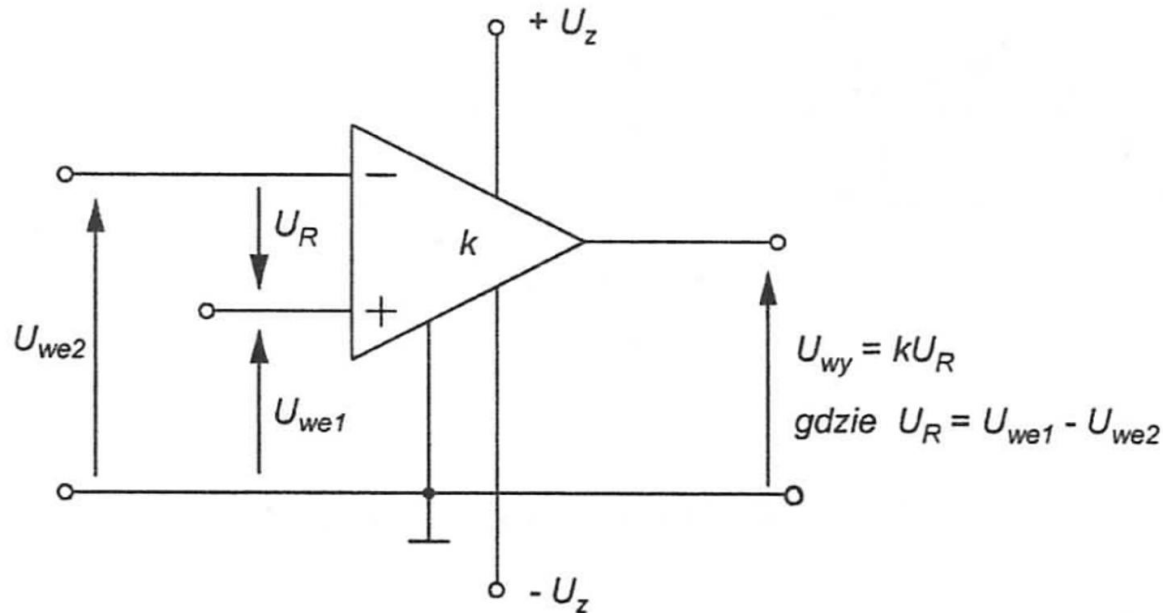
Idealny wzmacniacz operacyjny

Cechy idealnego wzmacniacza operacyjnego:

1. Rezystancja wejściowa jest nieskończenie duża $R_{we} \rightarrow \infty$
2. Rezystancja wyjściowa jest zerowa $R_{wy} \rightarrow 0$
3. Wzmocnienie przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego jest nieskończenie duże $K \rightarrow \infty$
4. Szerokość pasma przenoszonych częstotliwości jest nieskończenie duża $\Delta f \rightarrow \infty$
5. Doskonałe zrównoważenie, to nauczy $U_{wy} = 0 \Leftrightarrow U_{we1} = U_{we2}$
6. Brak dryftu temperaturowego tzn. wzmacniacz zachowuje swe właściwości przy zmianach temperatury



Symbol ogólny wzmacniacza operacyjnego



wzmacniacz operacyjny z zaznaczeniem napięć wejściowych, wyjściowych i doprowadzenia napięcia zasilania

„zwarcie pozorne” we wzmacniaczu operacyjnym

napięcie różnicowe jest określone $U_R = U_{we1} - U_{we2}$

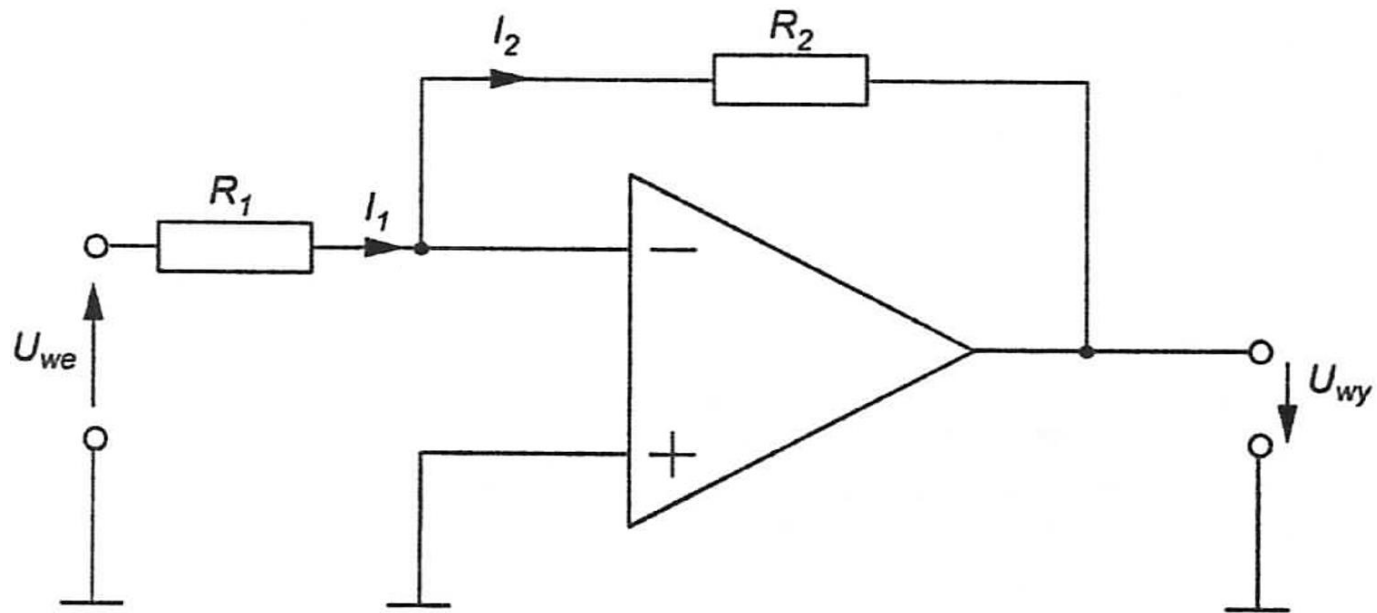
napięcie wyjściowe jest wzmocnieniem napięcia różnicowego

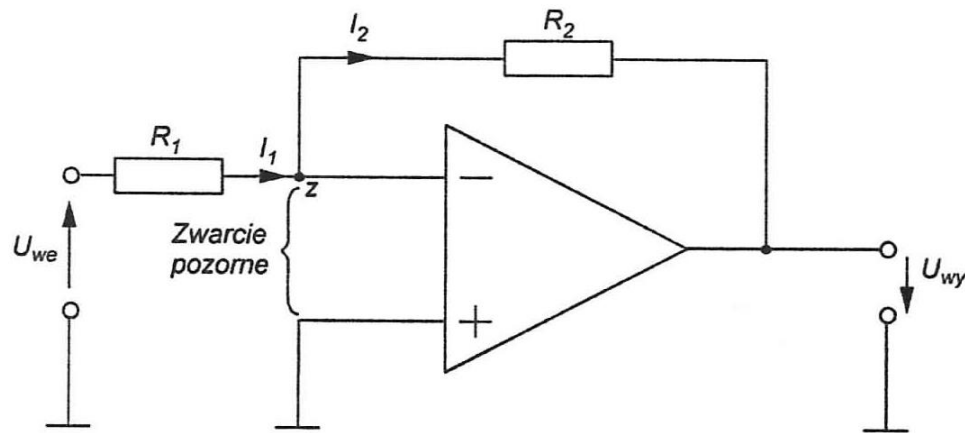
$$U_{wy} = k (U_{we1} - U_{we2}) = k U_R$$

zatem $U_R = \frac{U_{wy}}{k}$ jeśli $k \rightarrow \infty$ to $U_R \rightarrow 0$

między wejściami wzmacniacza operacyjnego występuje „zwarcie pozorne”

Wzmacniacz odwracający





Rezystancja wejściowa wzmacniacza idealnego $R_{we} \rightarrow \infty$ to do wejść wzmacniacza nie płyną żadne prądy. Zatem prąd $I_1 = I_2$ bo prąd nie wpływa do wzmacniacza w węźle „z”

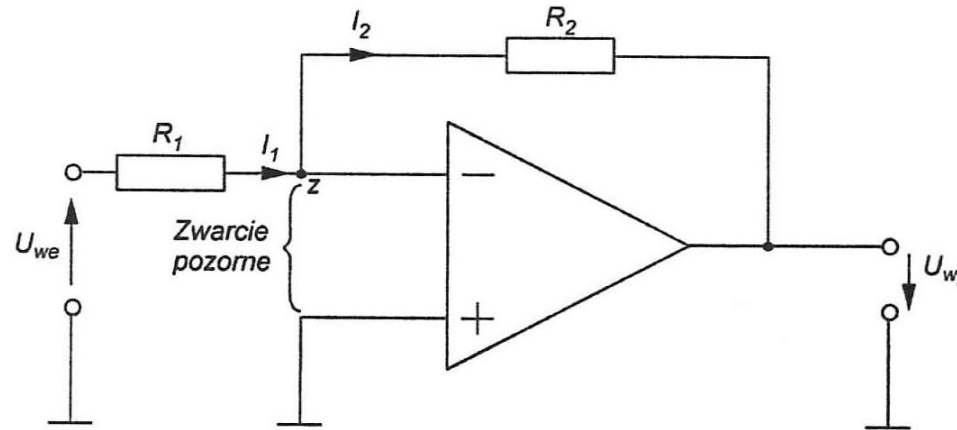
Punkt "z" jest punktem "zwarcia pozornego". Zwarcie jest pozorne dlatego, że prąd wejściowy nie przepływa przez nie kierując się w całości do rezystora R_2 .

Napięcie różnicowe dąży do zera zatem potencjał wejścia "+" jest identyczny jak wejścia "-".

Można mówić o zwarciu z uwagi na brak różnicy potencjałów.

Rezystancja wejściowa wzmacniacza odwracającego równa jest R_1

obliczanie wzmocnienia napięciowego



Można zapisać:

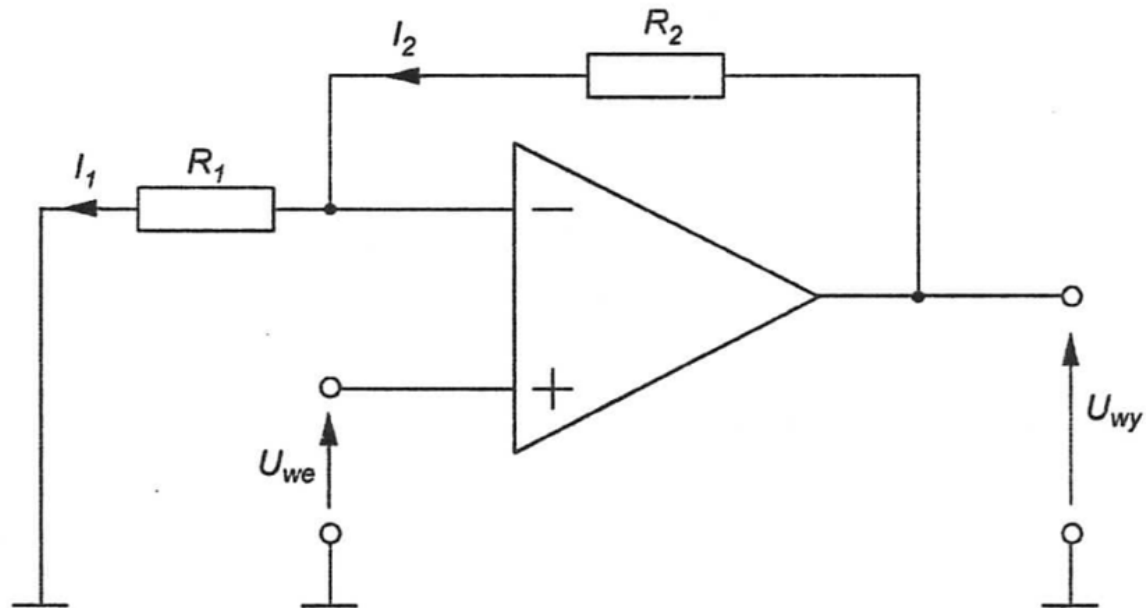
$$\begin{cases} I_1 = I_2 \\ U_{we} = R_1 I_1 \\ U_{wy} = R_2 I_2 \end{cases}$$

Po rozwiązaniu

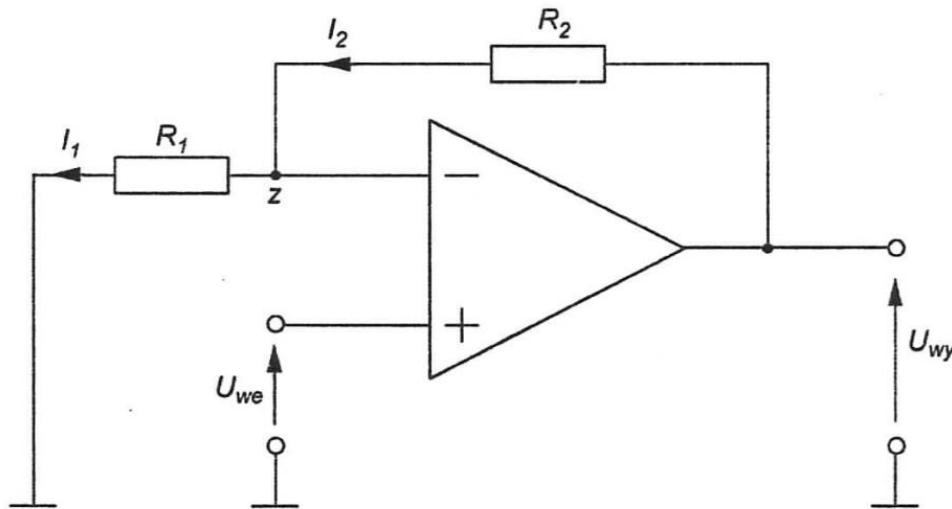
współczynnik wzmocnienia napięciowego:

$$k_u = -\frac{U_{wy}}{U_{we}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

Wzmacniacz nieodwracający



obliczanie wzmacnienia napięciowego



z – „zwarcie pozorne”

Rezystancja wejściowa układu wzmacniacza nieodwracającego jest bardzo duża i dla wzmacniacza idealnego równa nieskończoności

Można zapisać:

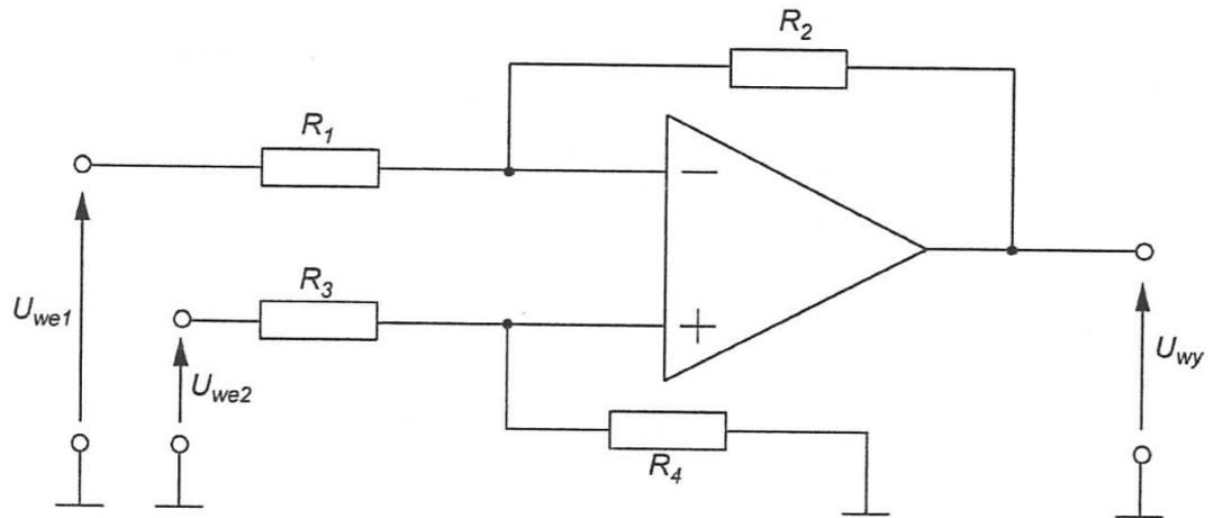
$$\begin{cases} I_1 = I_2 \\ U_{we} = R_1 I_1 \\ U_{wy} - U_{we} = R_2 I_2 \end{cases}$$

Po rozwiązaniu

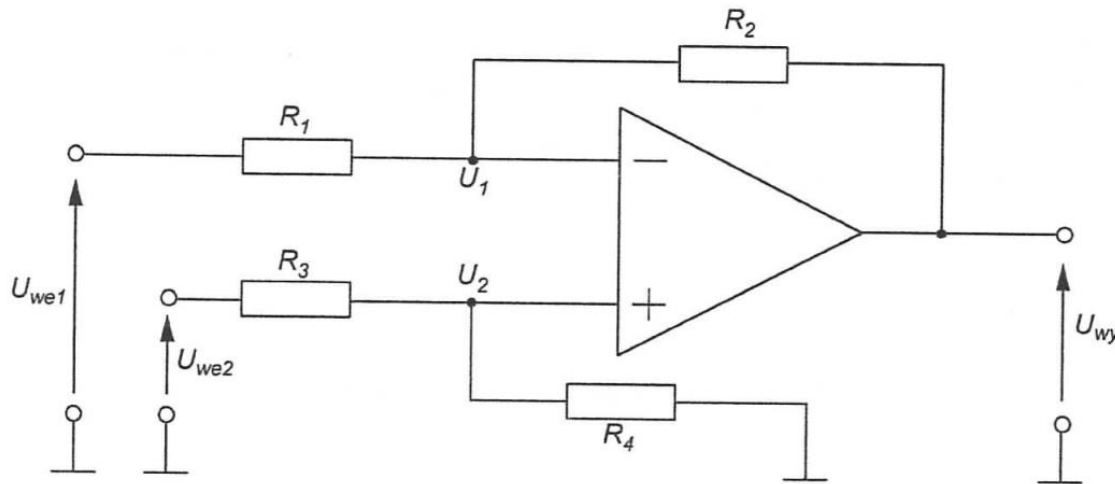
współczynnik wzmacnienia napięciowego:

$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Wzmacniacz różnicowy



obliczanie zależności na napięcie wyjściowe



Rezystancja wejściowa dla wejścia odwracającego wynosi R_1 a dla nieodwracającego $R_3 + R_4$

Po rozwiązaniu

dzielnik napięciowy
$$U_2 = U_{we2} \frac{R_4}{R_3 + R_4}$$

równość prądów
$$\frac{U_{we1} - U_1}{R_1} = \frac{U_1 - U_{wy}}{R_2}$$

$$U_{wy} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right) \frac{R_4}{R_1} U_{we2} - \frac{R_2}{R_1} U_{we1}$$

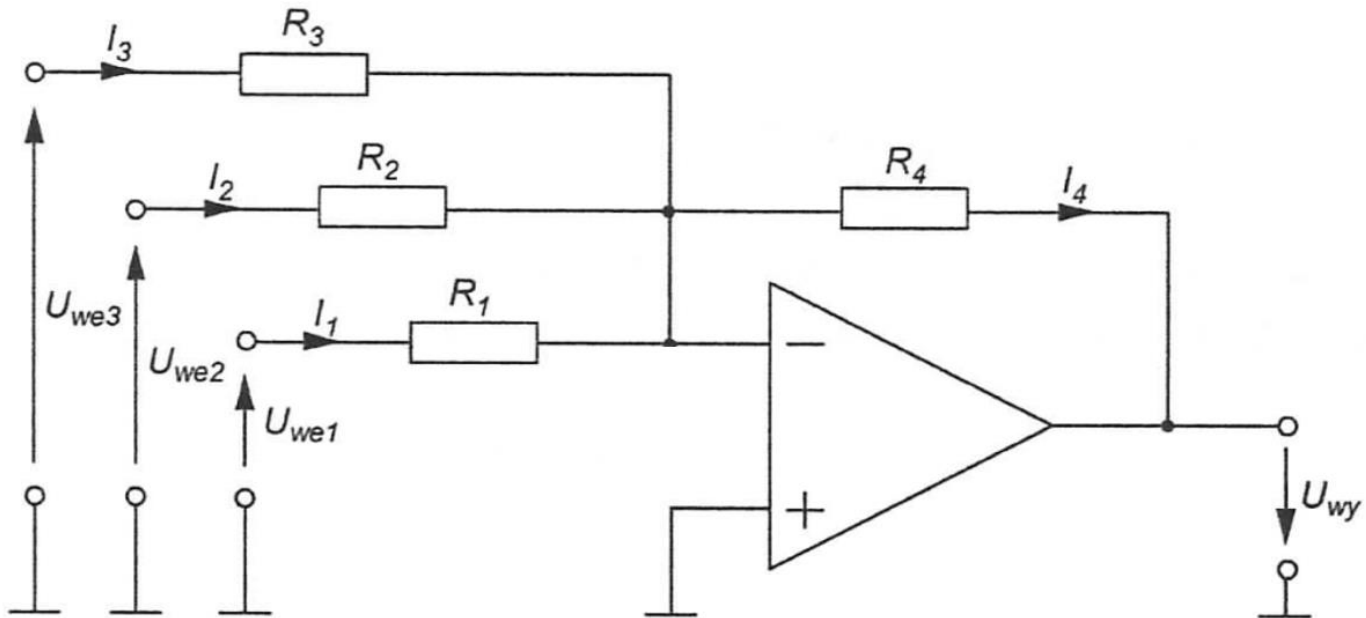
uwzględniając: $(R_1/R_2) = (R_4/R_3)$

zwarcie pozorne
$$U_1 = U_2$$

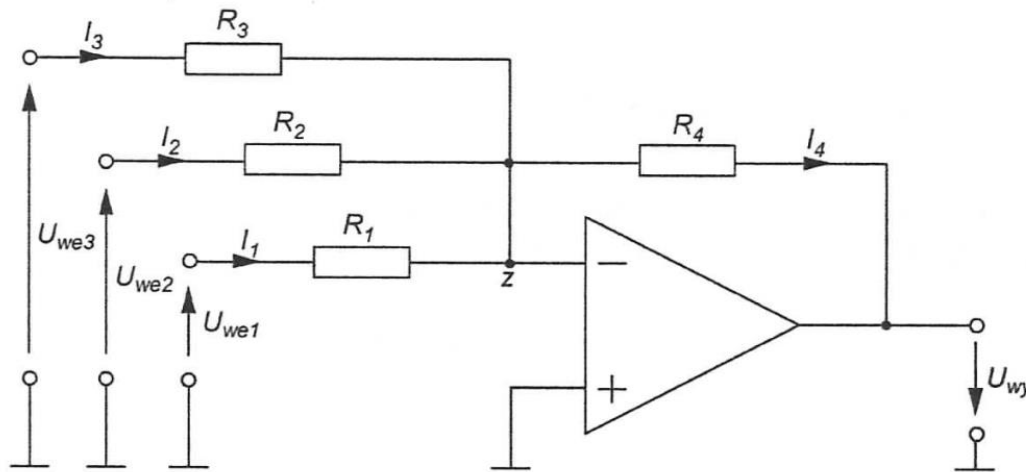
mamy:

$$U_{wy} = \frac{R_2}{R_1} (U_{we2} - U_{we1})$$

Wzmacniacz sumujący



obliczanie zależności na napięcie wyjściowe



Rezystancje
wejściowe układu
widziane z każdego
z wejść wynoszą
odpowiednio R_1 ,
 R_2 , R_3

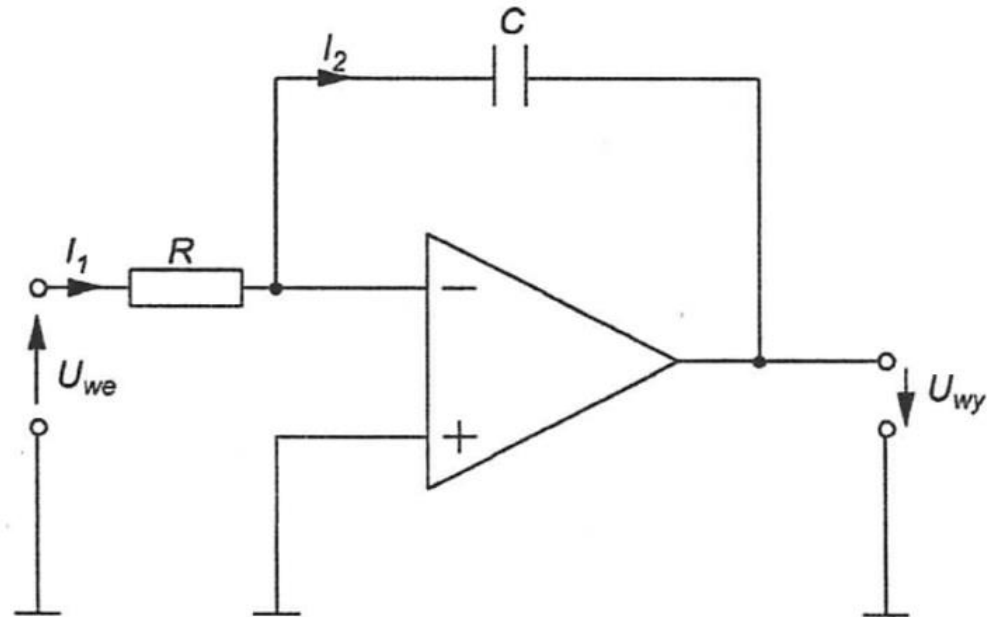
Po rozwiązaniu

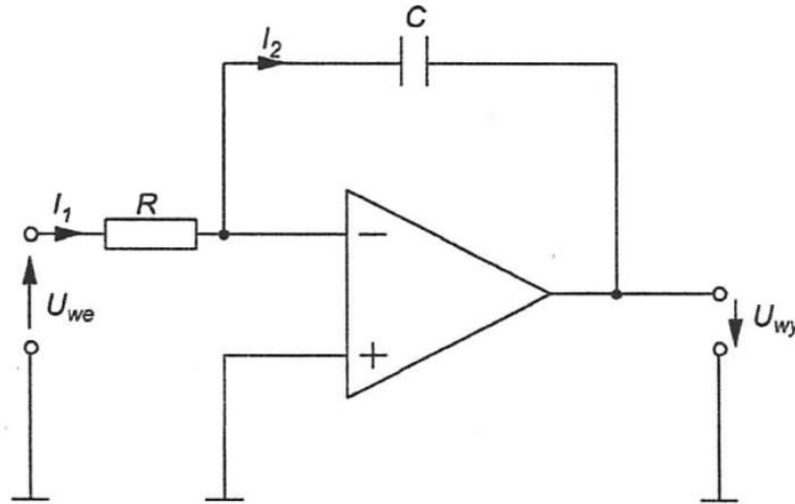
$$U_{wy} = -R_4 \left(\frac{U_{we1}}{R_1} + \frac{U_{we2}}{R_2} + \frac{U_{we3}}{R_3} \right)$$

uwzględniając: $R_1=R_2=R_3=R_4$

$$U_{wy} = -(U_{we1} + U_{we2} + U_{we3})$$

Wzmacniacz całkujący (integrator)





$$I_1 = \frac{U_{we}}{R} \quad \text{i} \quad I_2 = -C \frac{dU_{wy}}{dt} \quad \frac{dU_{wy}(t)}{dt} = -\frac{1}{RC} U_{we}(t)$$

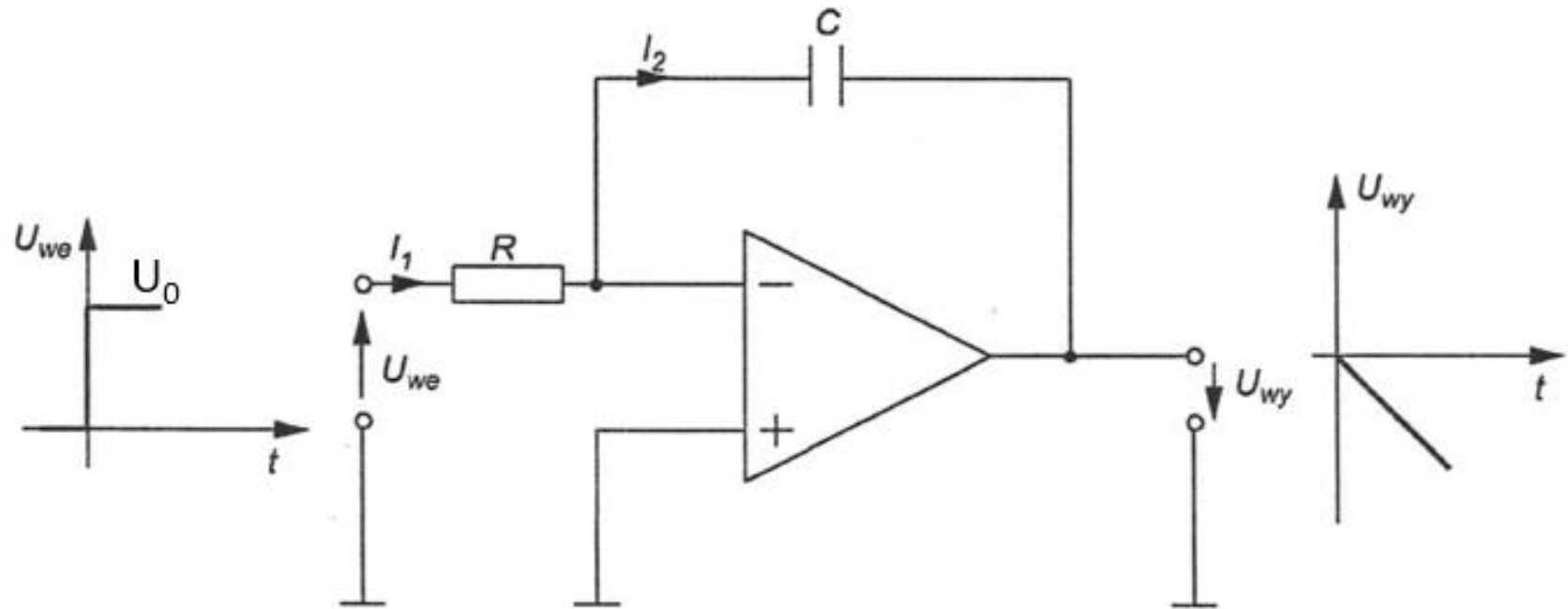
uwzględniając, że $I_1 = I_2$ mamy

$$\frac{U_{we}}{R} = -C \frac{dU_{wy}}{dt}$$

$$U_{wy}(t) = -\frac{1}{\tau} \int_0^t U_{we}(t) dt$$

gdzie: $\tau = RC$

napięcie na
wyjściu
jest całką
napięcia
wejściowego



funkcja skoku jednostkowego

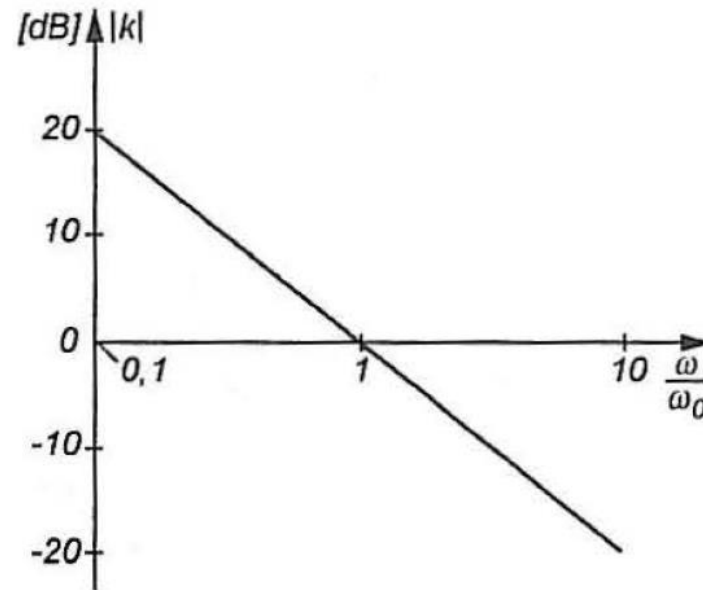
$$U_{we} = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0 \\ U_0 & \text{dla } t \geq 0 \end{cases}$$

$$U_{wy}(t) = -\frac{1}{\tau} \int_0^t U_{we}(t) dt$$

$$U_{wy} = -U_0 \frac{t}{\tau}$$

Dla przebiegów sinusoidalnych integrator jest aktywnym filtrem dolnoprzepustowym

wzmocnienie
(tłumienie)
w decybelach



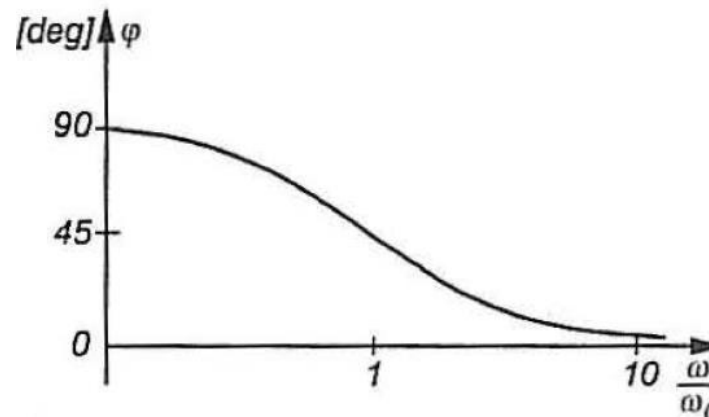
charakterystyki amplitudowa

$$|k| = \frac{\omega_0}{\omega} = \frac{1}{(\omega/\omega_0)}$$

$$\omega = 2 \pi f$$

$$\omega_0 = 1 / R C$$

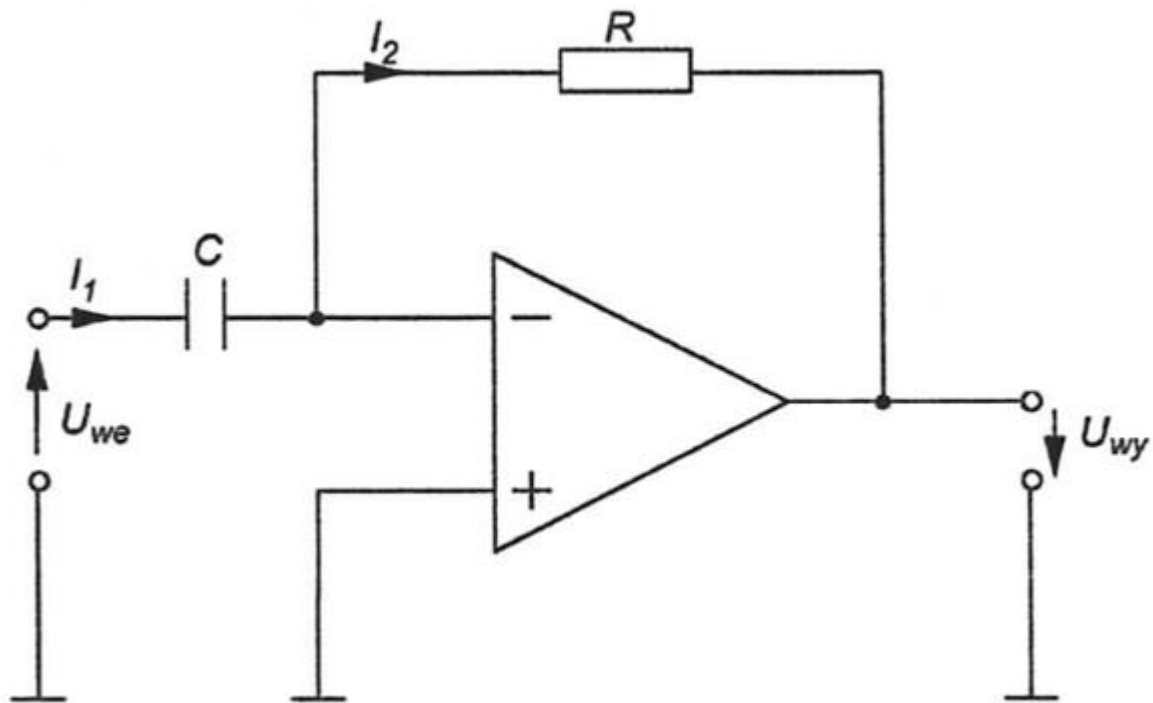
stopnie
przesunięcia
fazowego



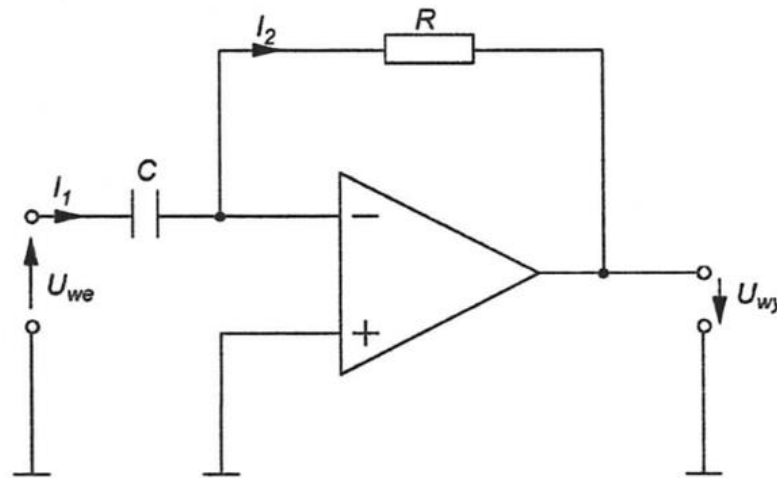
charakterystyki fazowa

$$\varphi(\omega) = \text{arctg} \frac{1}{(\omega/\omega_0)}$$

Wzmacniacz różniczkujący



obliczanie zależności na napięcie wyjściowe



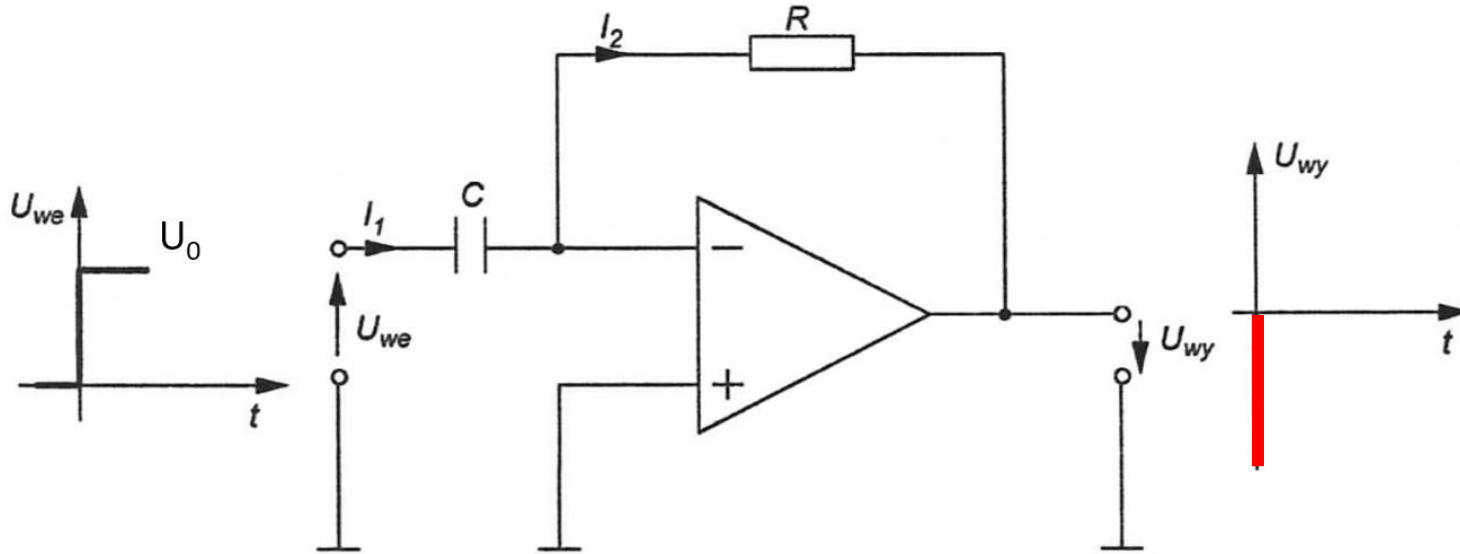
$$I_1 = C \frac{dU_{we}(t)}{dt}$$

uwzględniając, że $I_1 = I_2$ mamy

$$I_2 = -\frac{U_{wy}}{R_2}$$

$$U_{wy}(t) = -RC \frac{dU_{we}}{dt}$$

Napięcie wyjściowe
jest pochodną
napięcia
wejściowego



funkcja skoku jednostkowego

$$U_{we} = \begin{cases} 0 & \text{dla } t < 0 \\ U_0 & \text{dla } t \geq 0 \end{cases}$$

pochodną skoku jednostkowego jest delta Diraca

$$\delta(t) = \begin{cases} \infty & \text{dla } t = 0 \\ 0 & \text{dla } t \neq 0 \end{cases}$$

$$U_{wy}(t) = -RC \frac{dU_{we}}{dt}$$

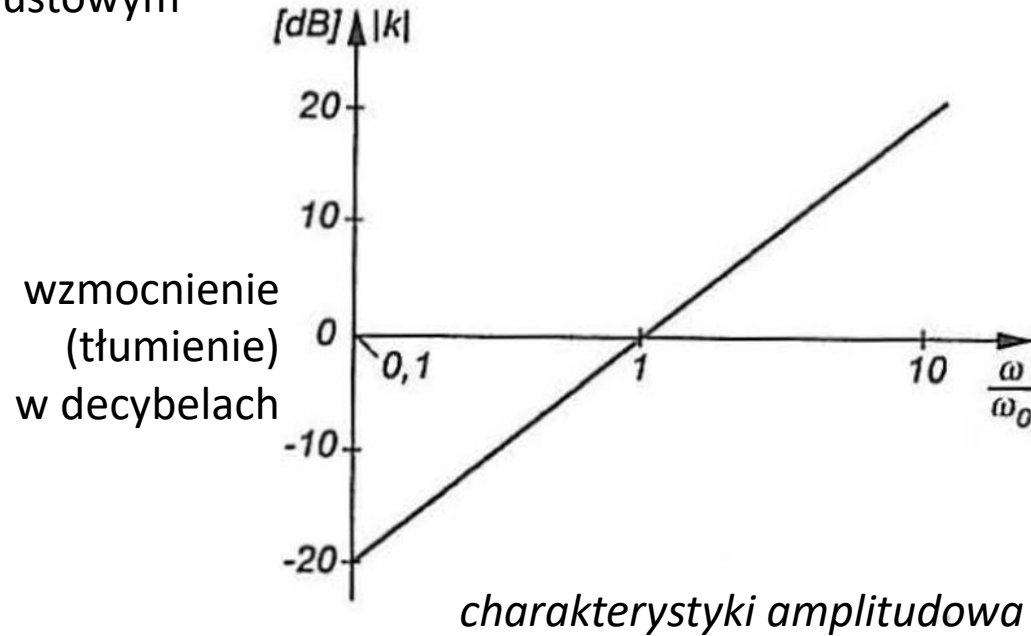
Dla skokowej zmiany napięcia na wejściu dla $t < 0$ i $t > 0$ pochodna stałej wynosi zero zatem na wyjściu wzmacniacza nie ma sygnału.

Natomiast dla $t=0$ ma miejsce skokowy wzrost napięcia wejściowego z wartości $U_{we}=0$ do wartości $U_{we}=U_0$.

Wzmacniacz różniczkujący wyczuwa tę zmianę i reaguje w postaci impulsu szpilkowego na wyjściu.

Następuje tu detekcją zbocza skokowej zmiany napięcia wejściowego.

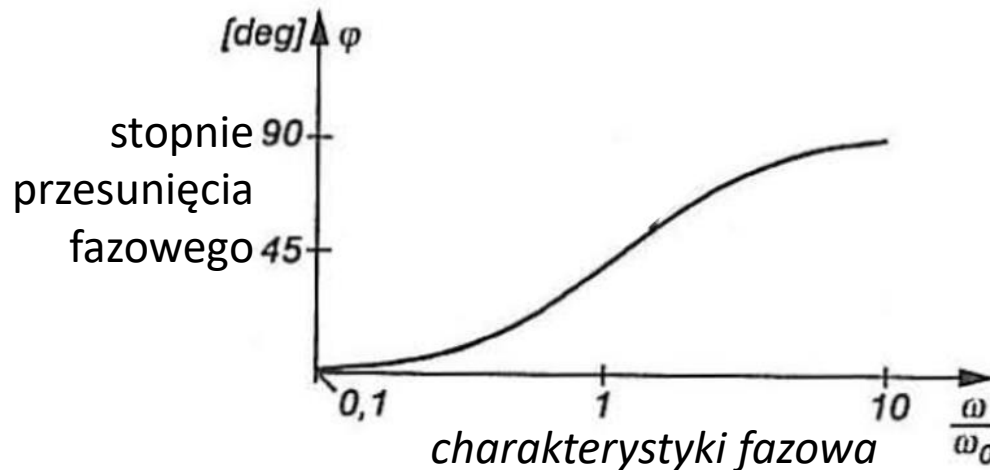
Dla przebiegów sinusoidalnych wzmacniacz różniczkujący jest aktywnym filtrem górnoprzepustowym



$$|k| = \frac{\omega}{\omega_0}$$

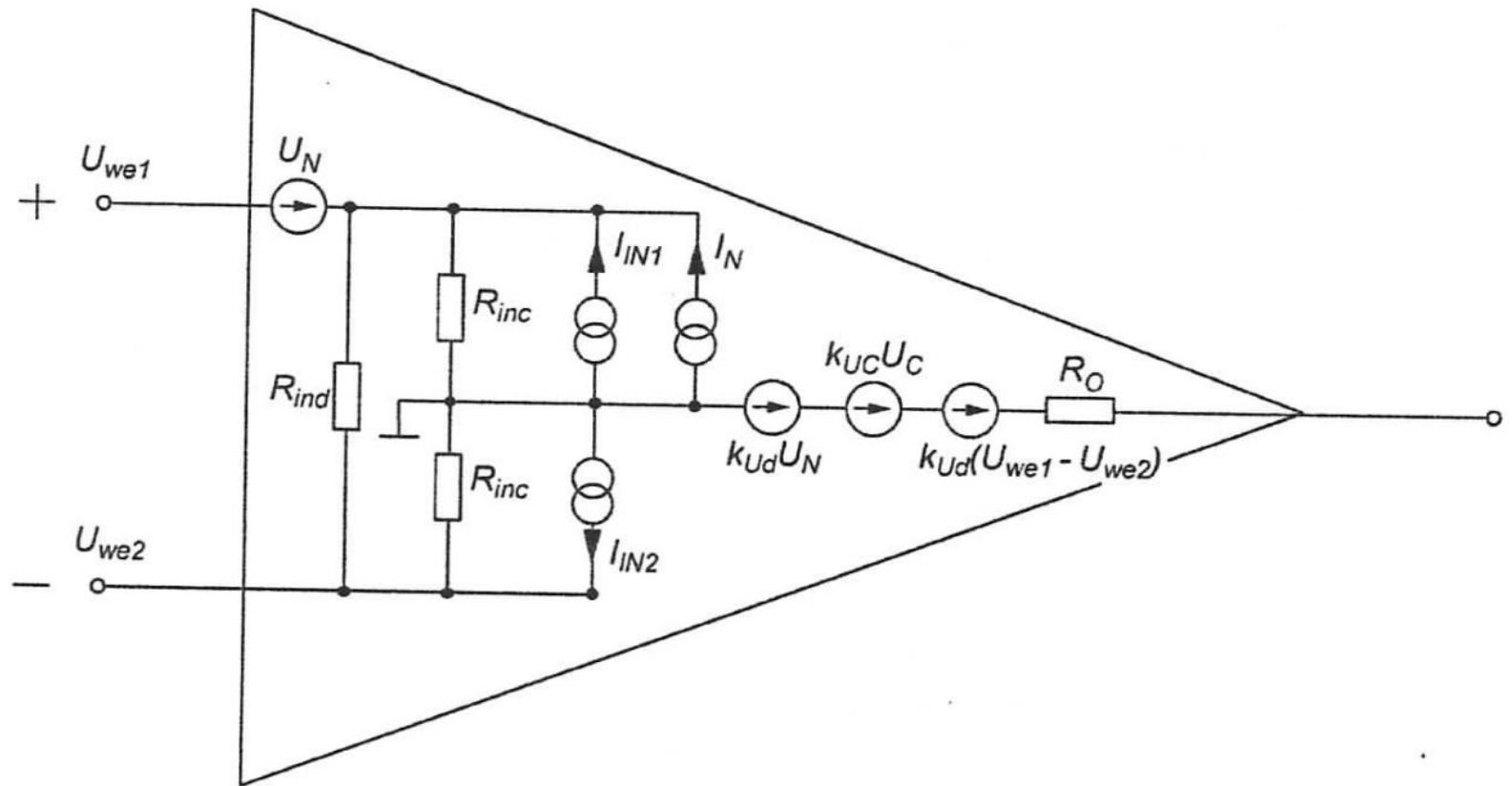
$$\omega = 2 \pi f$$

$$\omega_0 = 1 / R C$$



$$\varphi(\omega) = -\arctg \frac{\omega}{\omega_0}$$

Rzeczywisty wzmacniacz operacyjny



Schemat zastępczy rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego

Rzeczywisty wzmacniacz operacyjny nie spełnia całkowicie kryteriów idealnego wzmacniacza operacyjnego

Wzmocnienie sygnały różnicowego (wzmocnienie w otwartej pętli) k_{ud} ma wartości w granicach $10^4 - 10^7$

Istnieje niepożądane wzmocnienie k_{uc} dla sygnału wspólnego.

Charakteryzuje je współczynnik tłumienia sygnału wspólnego

CMRR (*comon mode rejection ratio*). Dla małych częstotliwości

jest duży (60-100 dB tłumienia), ale dla większych częstotliwości

szybko maleje.

Rezystancja wejściowa dla sygnału różnicowego R_{ind} (lub R_{in})

wynosi w układach bipolarnych zwykle 0,2 - 3 M Ω w a w

unipolarnych jest rzędu G Ω .

Rezystancja wejściowa dla sygnału wspólnego R_{inc} jest

większa i wynosi ok. $10^{12}\Omega$

Rezystancja wyjściowa wzmacniacza R_0 ma wartości skończone

rzędu 50 – 100 Ω

Problem: pojawianie się napięcia na wyjściu wzmacniacza operacyjnego nawet przy braku zewnętrznego sygnału sterującego. Trzeba to równoważyć.

Stąd: U_N napięcie nie zrównoważenia, I_N prąd niezrównoważenia.

Wpływu skończonej wartości szerokości pasma przenoszonych częstotliwości przez wzmacniacz.

Celem zapewnienia stabilności pracy wzmacniacze operacyjne mają wewnętrzną kompensację częstotliwościową.

Zmniejszana jest częstotliwości graniczna, aby transmitancja całego wzmacniacza określana była funkcją jednobiegunową.

Jednobiegunowa funkcja wzmocnienia - funkcja wzmocnienia mająca jedno miejsce zerowe mianownika.

Generalnie:

przy projektowaniu układu z zastosowaniem konkretnego typu wzmacniacza operacyjnego trzeba oszacować jego odstępstwo od założeń idealizujących i ewentualnie dopiero wtedy uwzględnić je w obliczeniach projektowych.

10. Wzmacniacze operacyjne



KONIEC