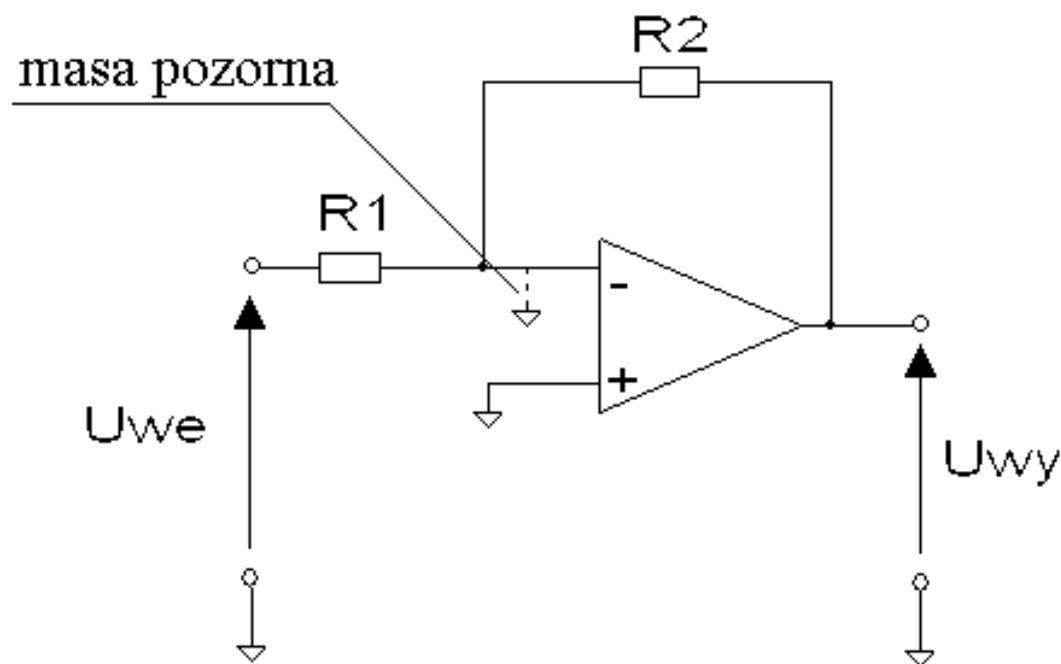




Politechnika Wrocławska

Liniowe zastosowania wzmacniaczy operacyjnych

Wzmacniacz odwracający



Rys.1. Schemat wzmacniacza odwracającego fazę napięcia

Wzmacniacz odwracający

Zjawisko masy pozornej

Dla modelu wzmacniacza idealnego:

$$K_{UR} = \infty$$

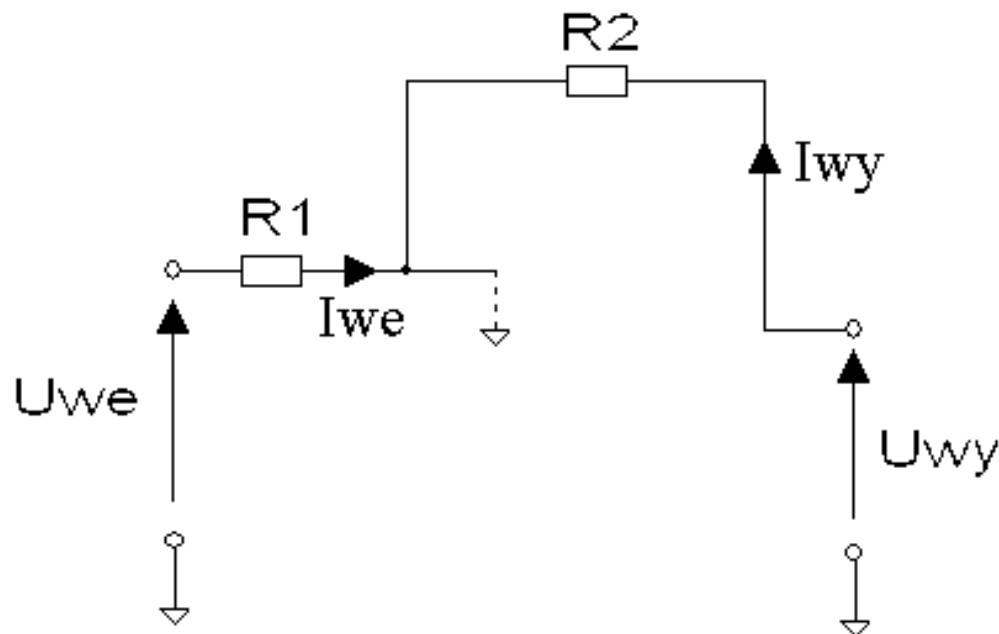
$$r_{wer} = r_{wes} = \infty$$

wtedy:

$$U_{we} = \frac{U_{wy}}{K_{UR}} = \frac{U_{wy}}{\infty} = 0$$

$$I_{we} = \frac{U_{we}}{r_{wer}} = \frac{U_{we}}{\infty} = 0$$

Wzmacniacz odwracający



Rys. 2. Schemat zastępczy wzmacniacza odwracającego pomocny do wyznaczenia wzmocnienia napięciowego układu

Wzmacniacz odwracający

Korzystając ze zjawiska masy pozornej wzmacniacza operacyjnego:

$$I_{we} = \frac{U_{we}}{R_1} \quad ; \quad I_{wy} = \frac{U_{wy}}{R_2} \quad ; \quad I_{we} = -I_{wy}$$
$$\frac{U_{we}}{R_1} = -\frac{U_{wy}}{R_2}$$

Wzmocnienie napięciowe wzmacniacza:

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

Wzmacniacz odwracający

Jeżeli uwzględnimy skończone wzmocnienie wzmacniacza ($K_{UR} \neq \infty$):

$$K_U = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{K_{UR} R_1}}$$

Rezystancja wejściowa układu:

$$R_{we} = R_1 \frac{1}{1 + \left| \frac{K_U}{K_{UR}} \right|} \approx R_1$$

Wzmacniacz odwracający

Rezystancja wyjściowa układu:

$$R_{wy} = R_{wy0} \frac{R_1 + R_2}{R_1(1 + K_{UR}) + R_2} \approx R_{wy0} \left| \frac{K_U}{K_{UR}} \right|$$

R_{wy0} - rezystancja wyjściowa WO

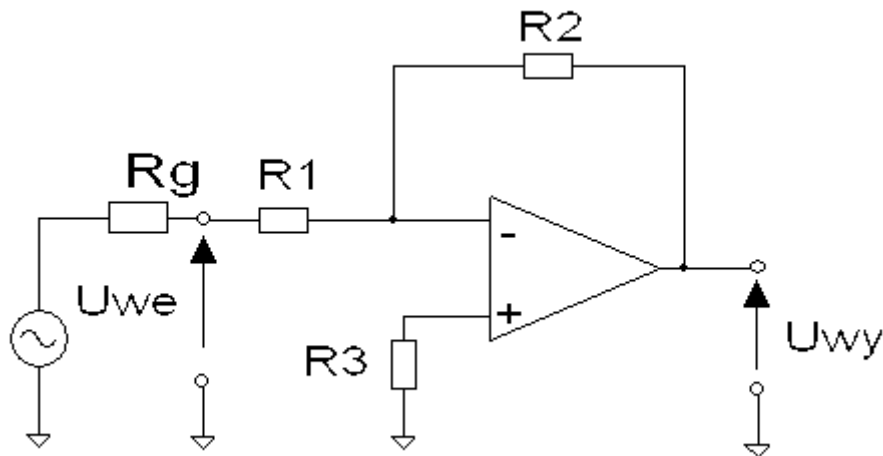
Górna częstotliwość graniczna:

$$f_g = f_{p1} \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} K_{UR} \right)$$

f_{p1} - pasmo WO

Wzmacniacz odwracający

Kompensacja wejściowego prądu polaryzacji

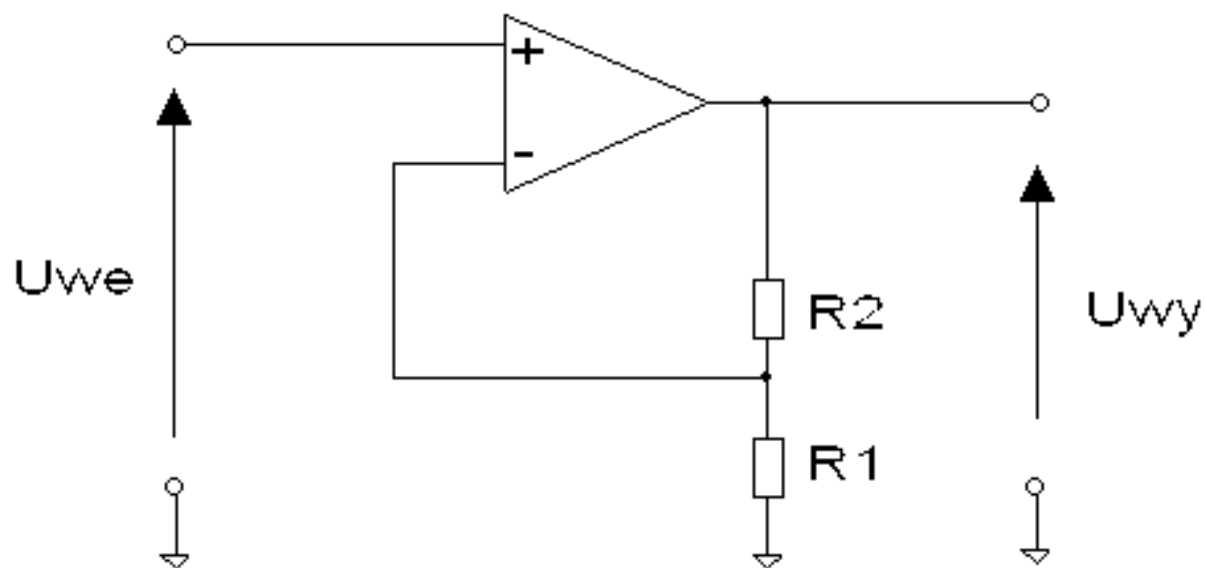


Rys. 3. Zmodyfikowany układ wzmacniacza odwracającego

Rezystor R_3 dany jest zależnością:

$$R_3 = \frac{(R_1 + R_g) R_2}{R_1 + R_g + R_2}$$

Wzmacniacz nieodwracający



Rys. 4. Schemat wzmacniacza nieodwracającego

Wzmacniacz nieodwracający

Wzmocnienie napięciowe układu:

$$K_U = \left(1 + \frac{R_2}{R_1}\right) \frac{1}{1 + \frac{R_1 + R_2}{K_{UR} R_1}} \approx 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Rezystancja wejściowa układu:

$$R_{we} = 2R_{wes}$$

R_{wes} - rezystancja wejściowa sumacyjna WO

Wzmacniacz nieodwracający

Rezystancja wyjściowa wzmacniacza:

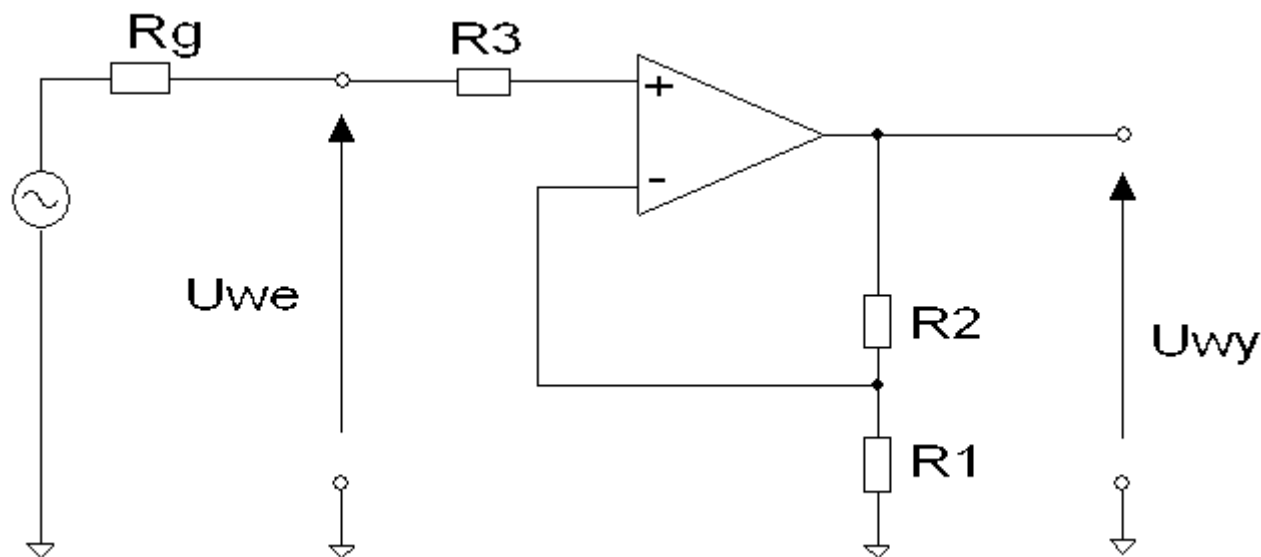
$$R_{wy} = \frac{R_{wy0}}{K_{UR}}$$

Górna częstotliwość graniczna:

$$f_g = f_{p1} \left(1 + \frac{R_1}{R_1 + R_2} K_{UR} \right)$$

Wzmacniacz nieodwracający

Kompensacja wejściowego prądu polaryzacji



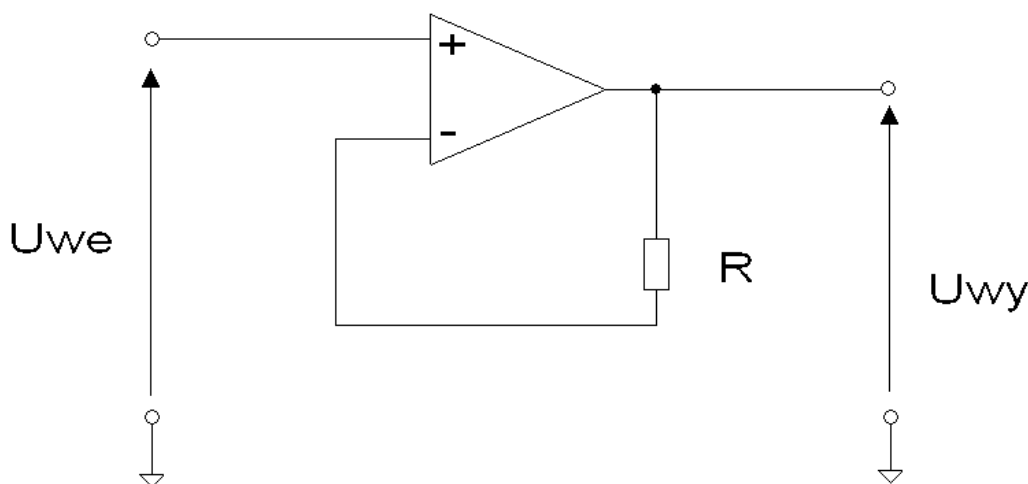
Rys. 5. Zmodyfikowany układ wzmacniacza nieodwracającego

Wzmacniacz nieodwracający

Rezystancja R_3 kompensująca wpływ wejściowego prądu polaryzacji dana jest zależnością:

$$R_3 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} - R_g$$

Wtórnik napięciowy



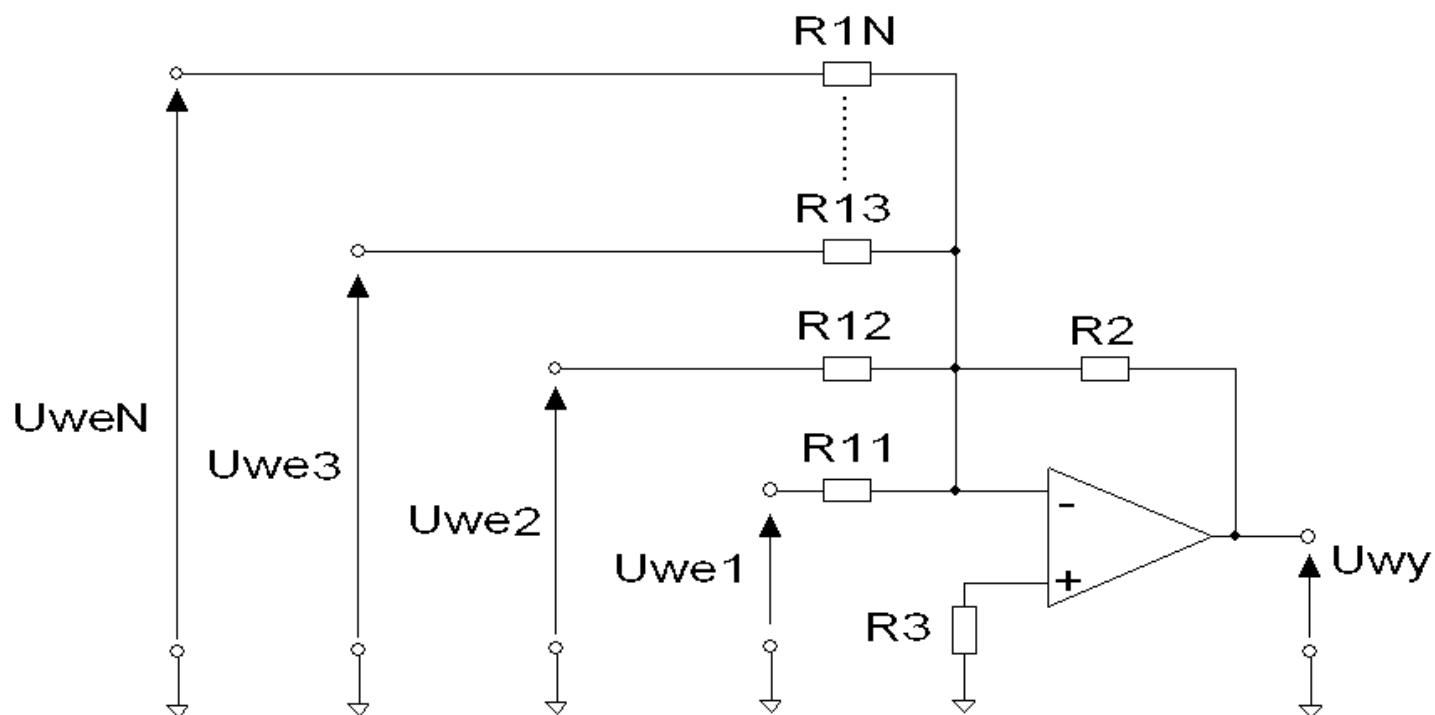
Rys.6. Układ wtórnika napięciowego

Wzmocnienie:

$$K_U = 1$$

Sumatory

Sumator odwracający



Rys. 7. Schemat sumatora odwracającego

Sumatory

Napięcie wyjściowe sumatora:

$$U_{wy} = -R_2 \sum_{k=1}^N \frac{U_{wek}}{R_{1k}} = - \left(U_{we1} \frac{R_2}{R_{11}} + U_{we2} \frac{R_2}{R_{12}} + U_{we3} \frac{R_2}{R_{13}} + \dots + U_{weN} \frac{R_2}{R_{1N}} \right)$$

$$\text{dla: } R_{11} = R_{12} = R_{13} = \dots = R_{1N} = R_1$$

Napięcie wyjściowe przybiera postać:

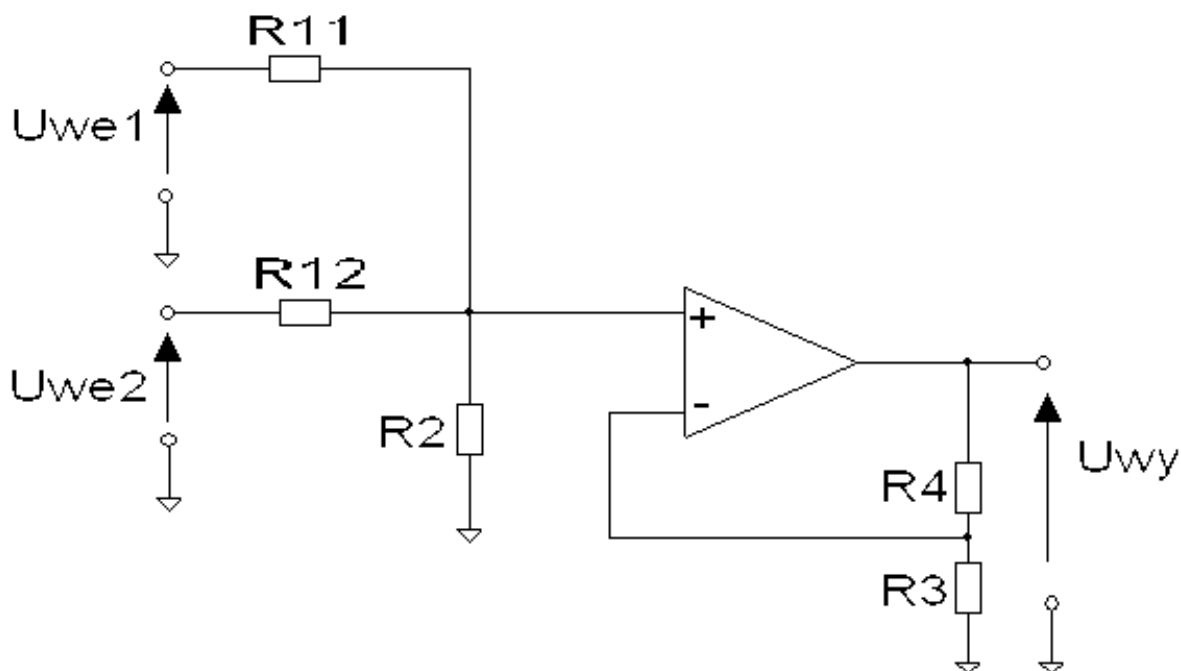
$$U_{wy} = -\frac{R_2}{R_1} (U_{we1} + U_{we2} + U_{we3} + \dots + U_{weN})$$

Rezystor R_3 minimalizujący wpływ wejściowych prądów polaryzacji dany jest zależnością:

$$R_3 = R_2 \parallel R_{11} \parallel R_{12} \parallel R_{13} \parallel \dots \parallel R_{1N}$$

Sumatory

Sumator nieodwracający



Rys. 8. Schemat sumatora nieodwracającego

Sumatory

Napięcie wyjściowe układu:

$$U_{wy} = U_{we1} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \frac{R_2 \parallel R_{12}}{R_{11} + R_2 \parallel R_{12}} + U_{we2} \left(1 + \frac{R_4}{R_3} \right) \frac{R_2 \parallel R_{11}}{R_{12} + R_2 \parallel R_{11}}$$

dla: $R_{11} = R_{12} = R_1$ i $R_4 = 2R_3$

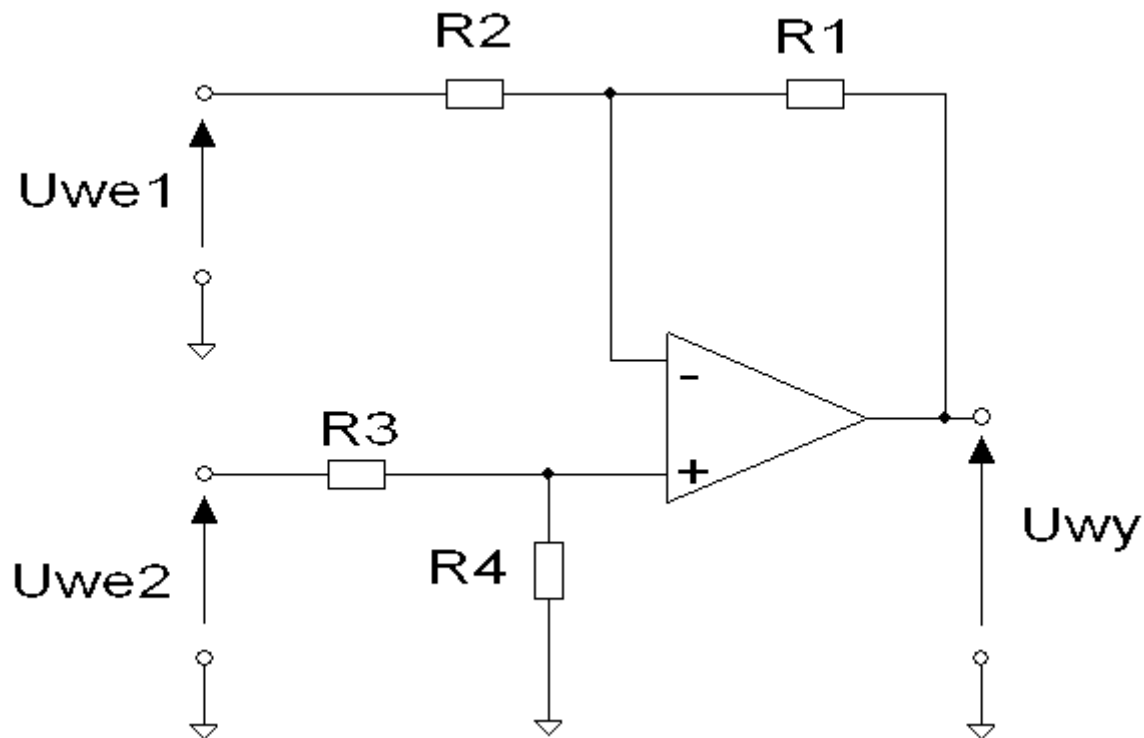
$$U_{wy} = U_{we1} + U_{we2}$$

Wejściowe prądy polaryzacji są zminimalizowane, gdy:

$$R_{11} \parallel R_{12} \parallel R_2 = R_3 \parallel R_4$$

Wzmacniacze różnicowe oparte o W0

Układ podstawowy



Rys. 9. Wzmacniacz różnicowy o wyjściu niesymetrycznym

Wzmacniacze różnicowe oparte o WO

Napięcie wyjściowe układu wynosi:

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

Gdy spełnione są warunki: $R_1 = R_3$ i $R_2 = R_4$

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

Wpływ wejściowego prądu polaryzacji jest zminimalizowany gdy:

$$R_1 \parallel R_2 = R_3 \parallel R_4$$

Wzmacniacze różnicowe oparte o WO

Rezystancje wejściowe układu wynoszą odpowiednio:

- dla wejścia pierwszego:

$$R_{we1} = R_1$$

- dla wejścia drugiego:

$$R_{we2} = R_3 + R_4$$

Współczynnik CMRR = ∞ dla wzmacniacza symetrycznego.

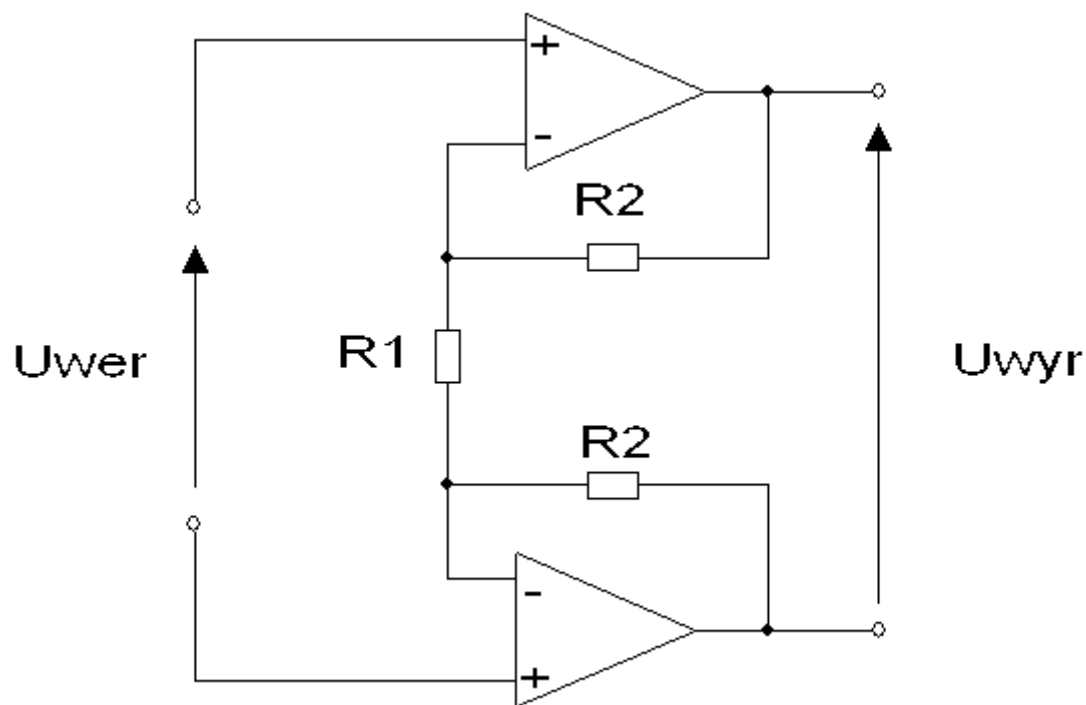
Jego wartość spada gdy wzmacniacz traci symetrię, tzn. zależy on wtedy od tolerancji użytych we wzmacniaczu rezystorów.

Górna częstotliwość graniczna:

$$f_g = f_{p1} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} K_{UR} \right)$$

Wzmacniacze różnicowe oparte o W0

Wzmacniacz o wyjściu symetrycznym



Rys.10. Wzmacniacz różnicowy z wyjściem symetrycznym

Wzmacniacze różnicowe oparte o WO

Napięcie wyjściowe wzmacniacza:

$$U_{wyr} = \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) U_{wer}$$

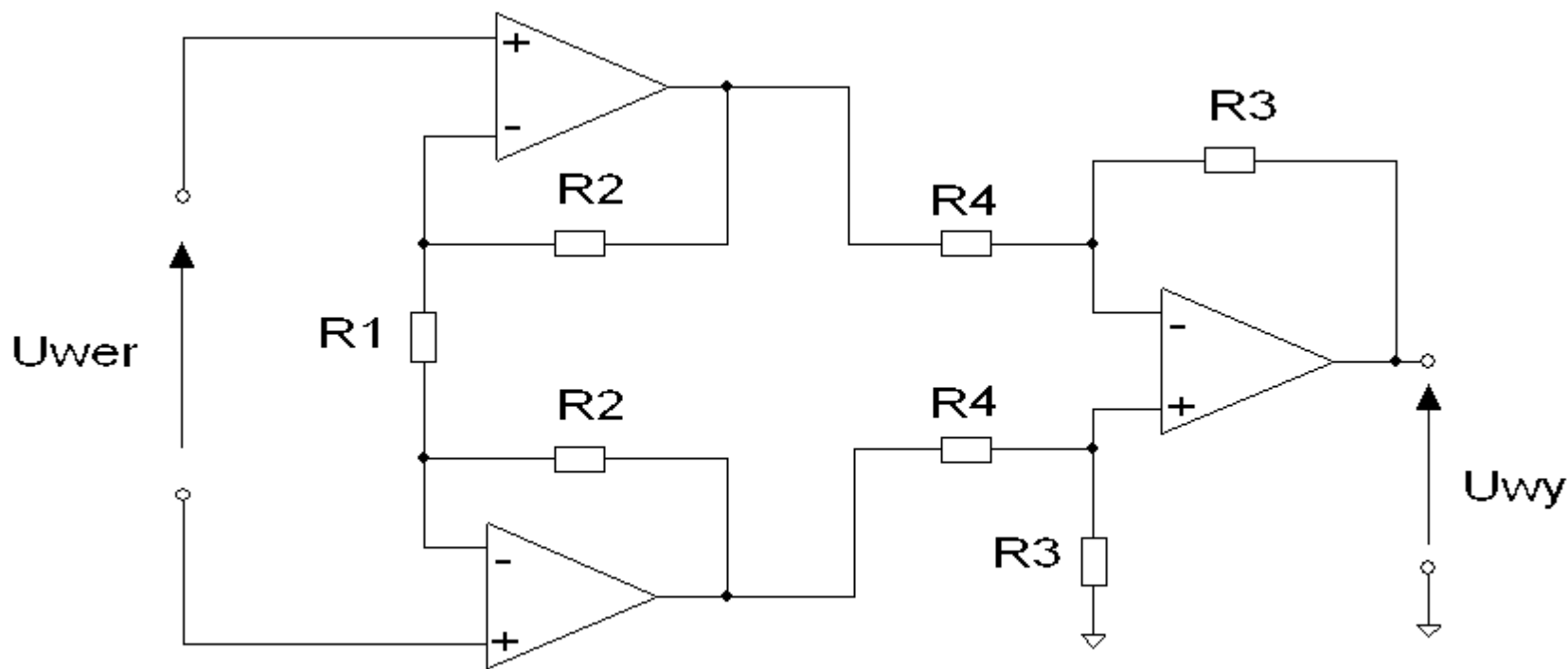
Rezystancja wejściowa jest bardzo duża i wynosi ona w przybliżeniu:

$$R_{we} = 2R_{wer}$$

gdzie R_{wer} jest rezystancją wejściową różnicową wzmacniacza operacyjnego.

Wzmacniacze różnicowe oparte o W0

Precyzyjny wzmacniacz różnicowy (wzmacniacz pomiarowy)



Rys. 11. Schemat wzmacniacza pomiarowego

Wzmacniacze różnicowe oparte o WO

Napięcie wyjściowe układu:

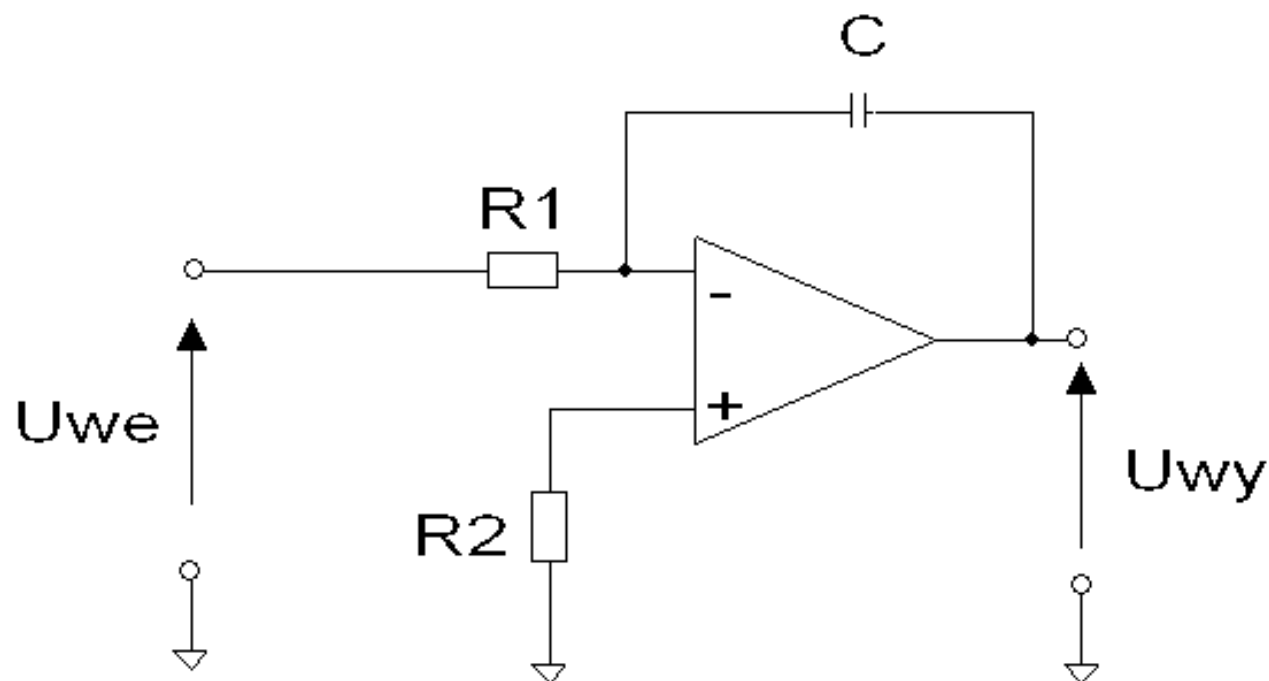
$$U_{wy} = \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) \frac{R_4}{R_3} U_{wer}$$

Rezystancja wejściowa jest bardzo duża i wynosi ona w przybliżeniu:

$$R_{we} = 2R_{wer}$$

Regulacja wzmocnienia układu odbywa się zazwyczaj przez zmianę wartości rezystora R_1 .

Integrator (wzmacniacz całkujący)



Rys. 12. Schemat wzmacniacza całkującego (integratorze Millera)

Integrator

Analiza w dziedzinie czasu

Napięcie wyjściowe układu:

$$U_{wy} = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_{we}(t) dt + U_0$$

gdzie U_0 jest warunkiem początkowym dla $t = 0$:

$$U_0 = U_{wy}(t = 0) = \frac{Q_0}{C}$$

a Q_0 jest ładunkiem zgromadzonym w kondensatorze C w czasie $t = 0$.

Integrator

Ostatecznie napięcie wyjściowe dane jest równaniem:

$$U_{wy} = -\frac{U_{we}}{R_1 C} t + U_0$$

Napięcie wyjściowe jest liniową funkcją czasu.

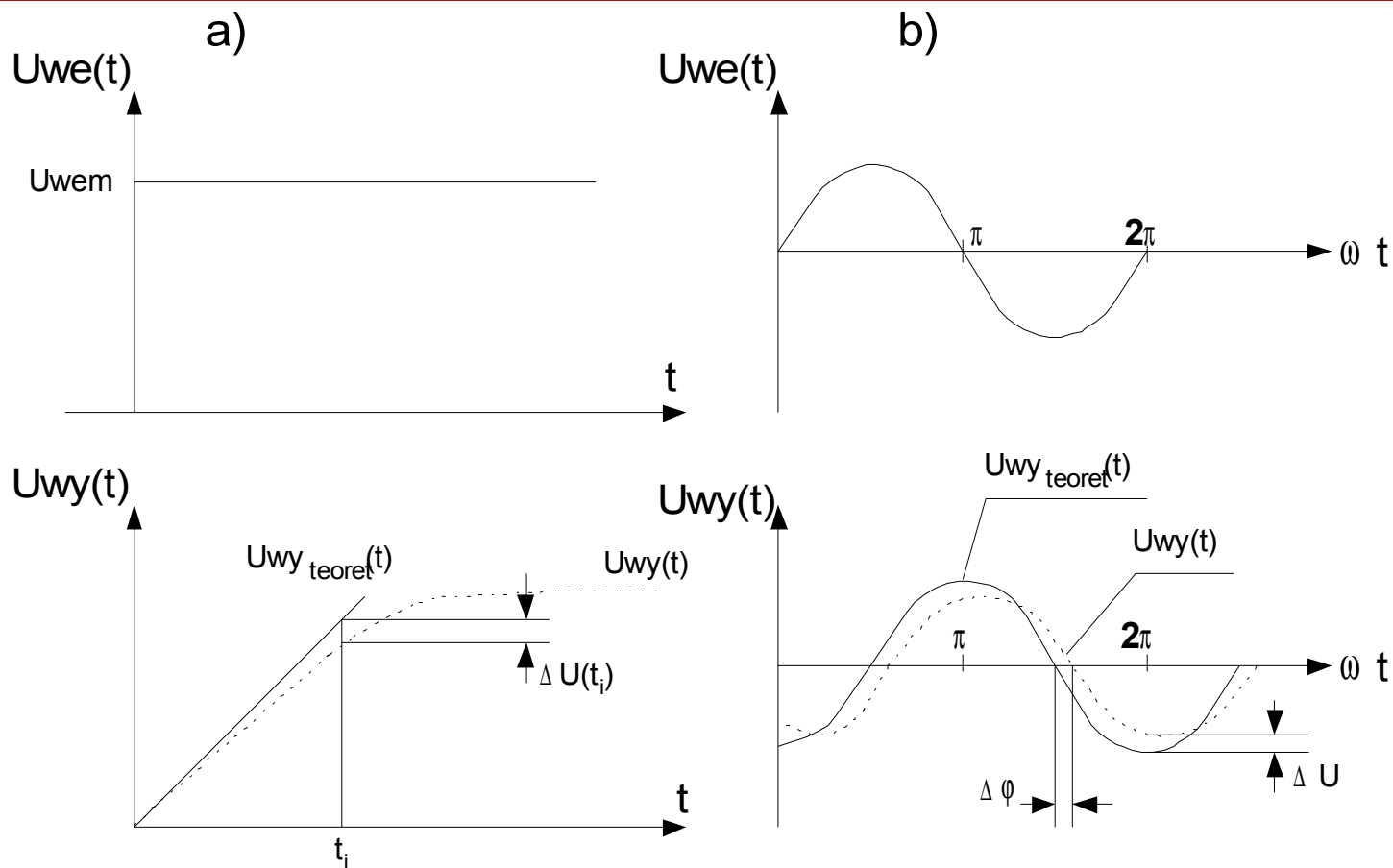
Dla pobudzenia kosinusoidalnego:

$$U_{wy} = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_{wem} \cos(\omega t) dt + U_0 = -\frac{U_{wem}}{\omega R_1 C} \sin(\omega t) + U_0$$

gdzie U_{wem} jest amplitudą napięcia wejściowego.

Rezystor R_2 jest równy sumie rezystorów R_1 i R_g – minimalizacja wpływu wejściowych prądów polaryzacji.

Integrator



Rys. 13. Błędy całkowania przy pobudzeniu: a) skokiem jednostkowym, b) napięciem sinusoidalnym

Integrator

Błąd amplitudy całkowania dla pobudzenia skokiem napięcia:

$$\delta(t_i) = \frac{U_{wyteoret}(t_i) - U_{wy}(t_i)}{U_{wyteoret}(t_i)} 100\% = \frac{\Delta U(t_i)}{U_{wyteoret}(t_i)} 100\%$$

gdzie:

$U_{wyteoret}(t)$ - teoretyczna odpowiedź układu całkującego

$U_{wy}(t)$ – rzeczywista odpowiedź integratora

Dla pobudzenia sinusoidalnego błąd amplitudy:

$$\delta = \frac{U_{wyteoret} - U_{wym}}{U_{wyteoret}} 100\% = \frac{\Delta U}{U_{wyteoret}} 100\%$$

Błąd fazy:

$$\Delta\varphi = \arg[U_{wyteoret}(t)] - \arg[U_{wy}(t)]$$

Integrator

Analiza w dziedzinie częstotliwości

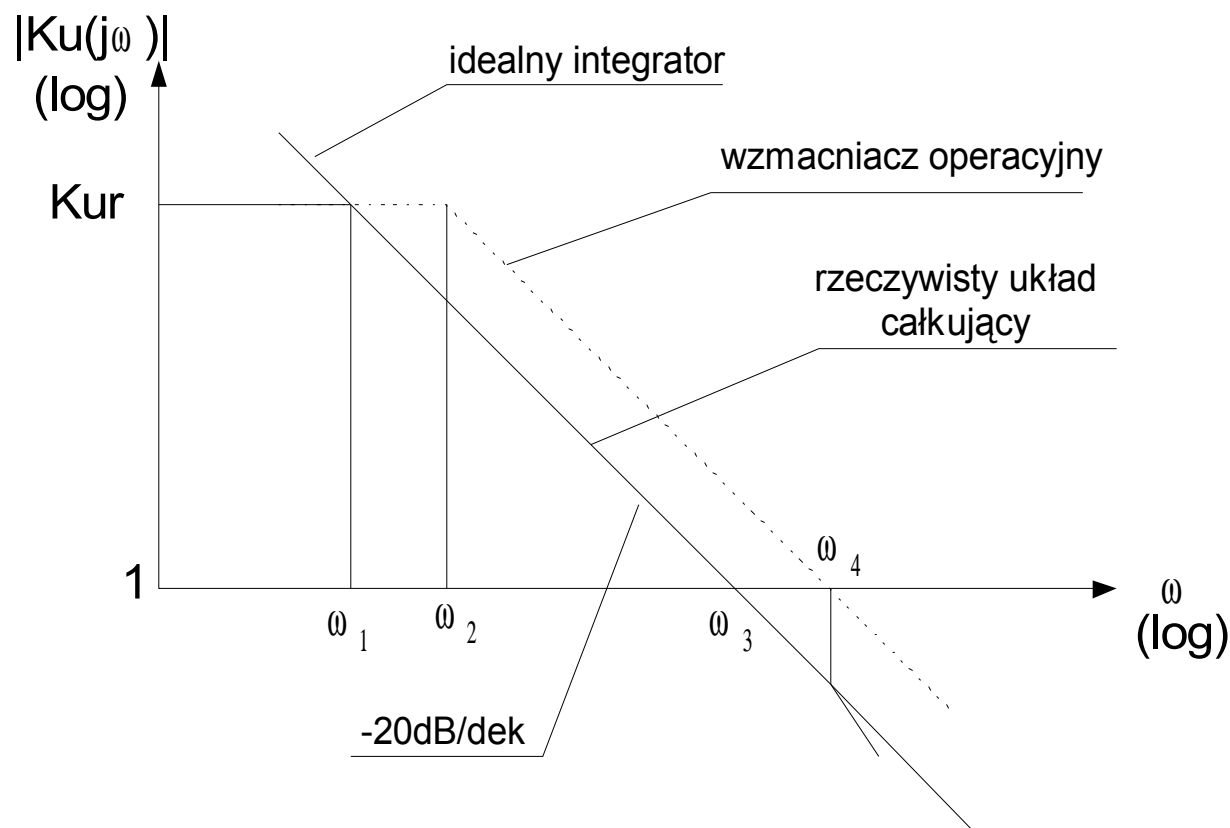
Wzmocnienie napięciowe układu przy założeniu modelu idealnego wzmacniacza operacyjnego:

$$K_U(s = j\omega) = -\frac{1}{sR_1C}$$

Jeżeli uwzględnimy skończone wzmocnienie i skończoną częstotliwość górną wzmacniacza operacyjnego:

$$K_U(s) = \frac{-K_{UR}}{\left(1 + \frac{s}{s_1}\right)\left(1 + \frac{s}{s_2}\right)}$$

Integrator



Rys. 14. Charakterystyka częstotliwościowa integratora

Integrator

Poszczególne pulsacje wynoszą:

$$\omega_1 = -s_1 = \frac{1}{K_{UR} R_1 C}$$

$$\omega_2 = 2\pi f_{p1}$$

$$\omega_3 = \frac{1}{R_1 C}$$

$$\omega_4 = -s_2 = 2\pi K_{UR} f_{p1}$$

Integrator

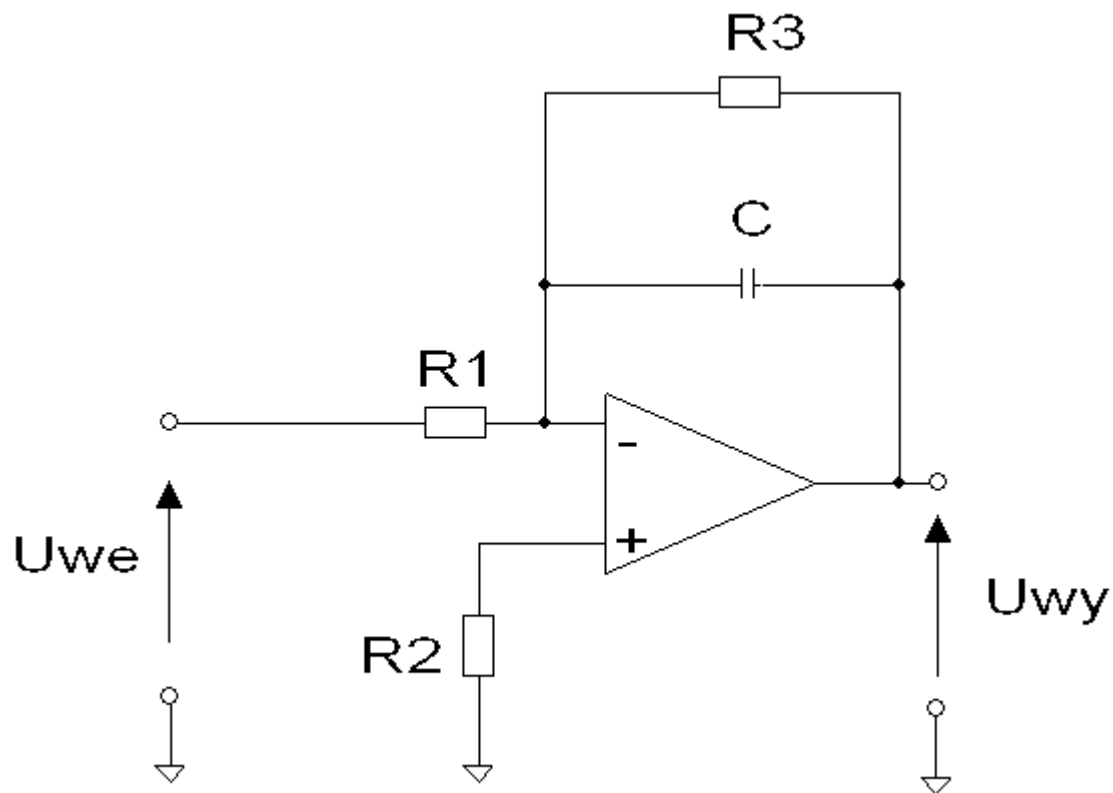
Zakres poprawnego całkowania w dziedzinie częstotliwości:

$$\omega_{\min} = \frac{1}{K_{UR} R_1 C} \ll \omega \ll 2\pi K_{UR} f_{p1} = \omega_{\max}$$

Zakres poprawnego całkowania w dziedzinie czasu:

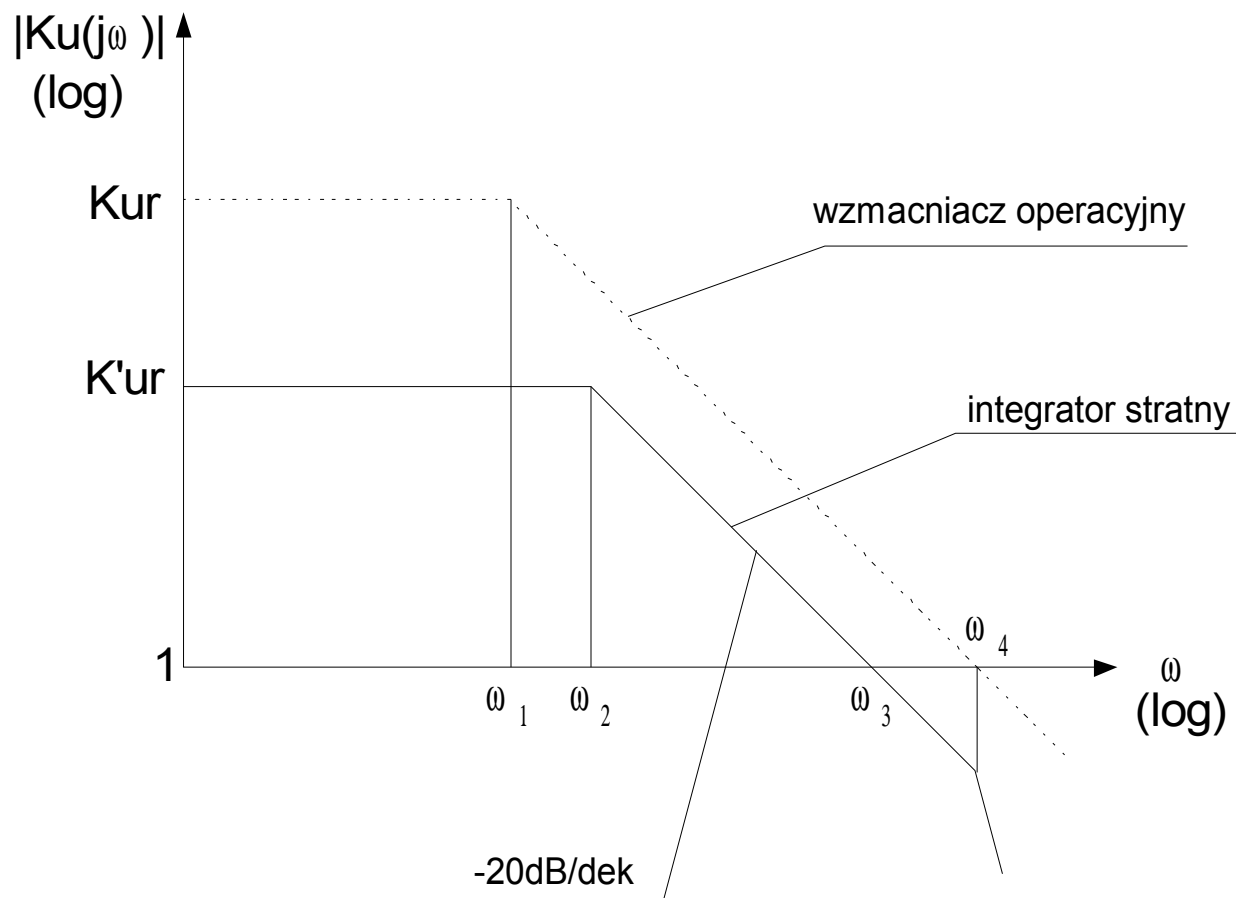
$$t_{i\min} = \frac{1}{f_{p1} K_{UR}} \ll t_i \ll 2\pi R_1 C K_{UR} = t_{i\max}$$

Integrator



Rys.15. Schemat integratora stratnego

Integrator



Rys. 16. Charakterystyka częstotliwościowa integratora stratnego

Integrator

Poszczególne pulsacje wynoszą:

$$\omega_1 = 2\pi f_{p1}$$

$$\omega_2 = \frac{1}{R_3 C}$$

$$\omega_3 = \frac{1}{R_1 C}$$

$$\omega_4 = 2\pi K_{UR} f_{p1}$$

Integrator

Zakres poprawnego całkowania integratora stratnego w dziedzinie częstotliwości:

$$\omega_{\min} = \frac{1}{R_3 C} \ll \omega \ll 2\pi K_{UR} f_{p1} = \omega_{\max}$$

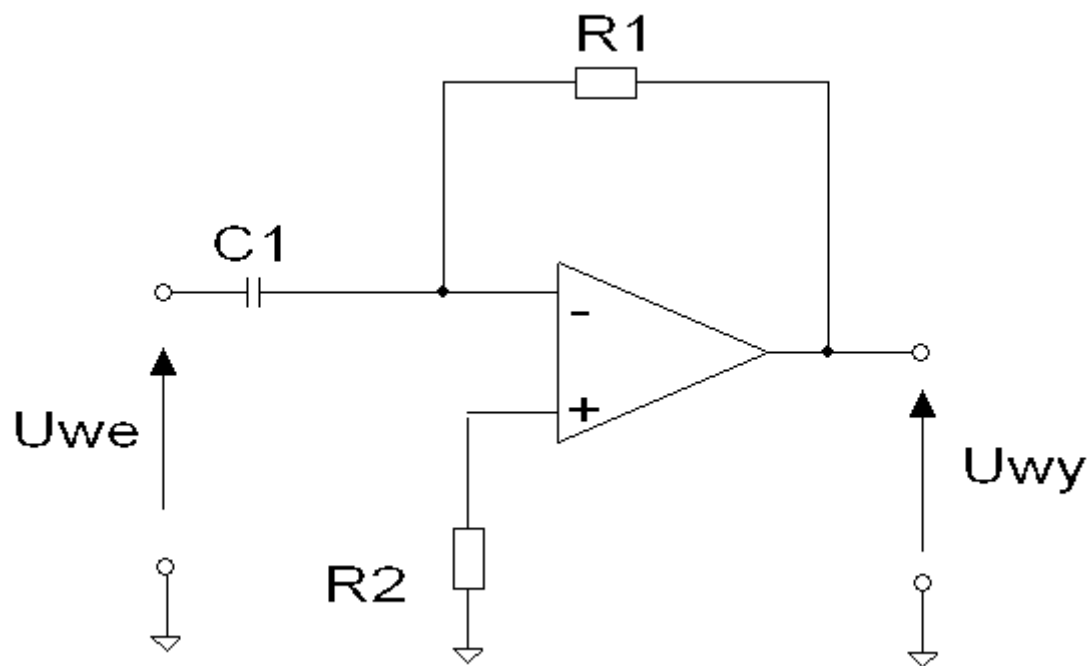
Zakres poprawnego całkowania integratora stratnego w dziedzinie czasu:

$$t_{i\min} = \frac{1}{K_{UR} f_{p1}} \ll t_1 \ll 2\pi R_3 C = t_{i\max}$$

Rezystor R_2 minimalizujący wpływ wejściowych prądów polaryzacji dany jest zależnością:

$$R_2 = \frac{(R_g + R_1) R_3}{R_g + R_1 + R_3}$$

Wzmacniacz różniczkujący



Rys.17. Układ wzmacniacza różniczkującego

Wzmacniacz różniczkujący

Analiza w dziedzinie czasu

Napięcie wyjściowe układu:

$$U_{wy}(t) = -R_1 C \frac{dU_{we}(t)}{dt}$$

Np. dla wejściowego napięcia sinusoidalnego:

$$U_{we}(t) = U_{wem} \sin(\omega t)$$

Napięcie wyjściowe wzmacniacza różniczkującego jest równe:

$$U_{wy}(t) = -\omega R_1 C U_{wem} \sin(\omega t)$$

Wzmacniacz różniczkujący

Błędy różniczkowania - interpretacja graficzna błędów różniczkowania jest podobna do interpretacji błędów całkowania.

Analiza w dziedzinie częstotliwości

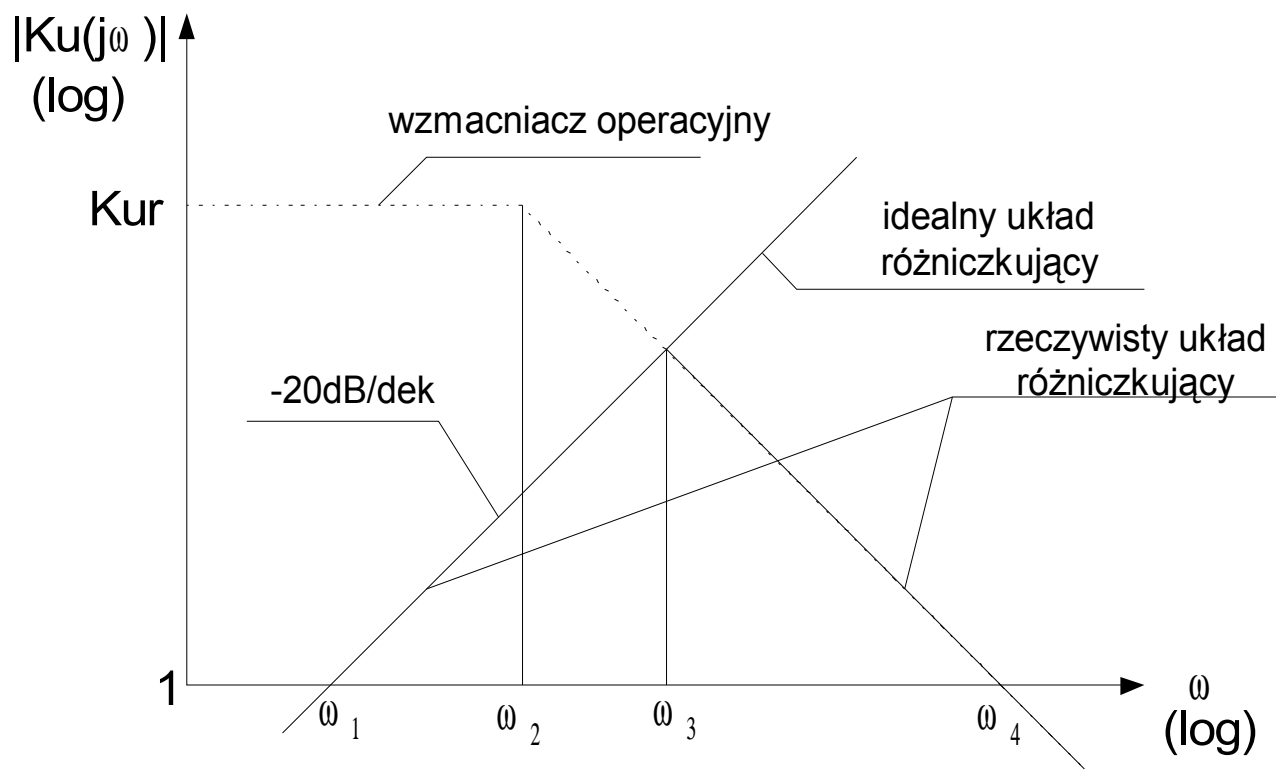
Wzmocnienie napięciowe układu przy założeniu modelu idealnego wzmacniacza operacyjnego:

$$K_U(s) = -sR_1C$$

Jeżeli uwzględnimy skończone wzmocnienie i skończoną częstotliwość górną wzmacniacza operacyjnego:

$$K_U(s) = -s \frac{K_{UR} \omega_{p1} \omega_{p2}}{s^2 + s(\omega_{p1} + \omega_d) + (K_{UR} + 1) \omega_{p1} \omega_d}$$

Wzmacniacz różniczkujący



Rys. 18. Charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza różniczkującego

Wzmacniacz różniczkujący

Poszczególne pulsacje wynoszą:

$$\omega_1 = \omega_d = \frac{1}{R_1 C}$$

$$\omega_2 = \omega_{p1} = 2\pi f_{p1}$$

$$\omega_3 = \omega_{\max} = \sqrt{\frac{2\pi K_{UR} f_{p1}}{R_1 C}}$$

$$\omega_4 = K_{UR} \omega_2$$

Warunek poprawnego różniczkowania:

$$\omega \ll \omega_{\max}$$

Wzmacniacz różniczkujący

Rezystor R_2 powinien być równy wartości rezystora R_1 .

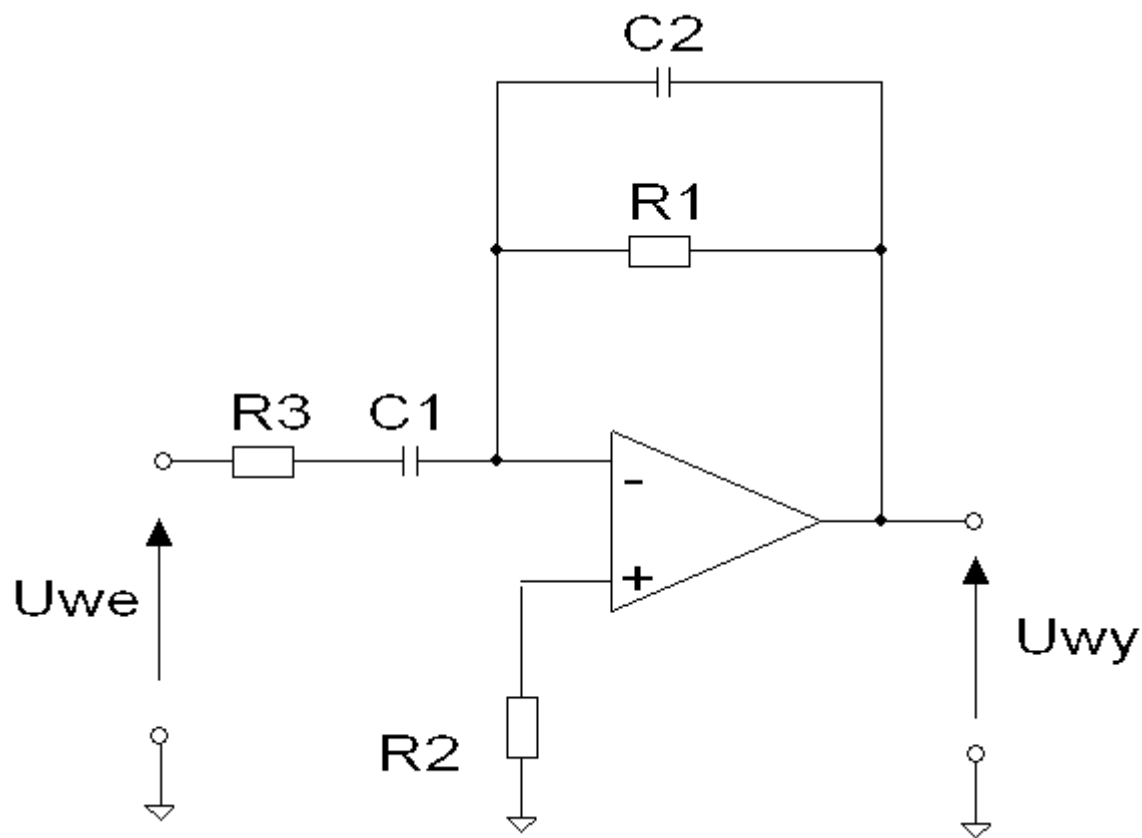
Zastosowania: głównie automatyka – regulatory D, PD
PID.

Wady układu:

- długie czasy narastania
- skłonność do oscylacji
- mała impedancja wejściowa dla w. cz.
- duże wyjściowe napięcie szumów

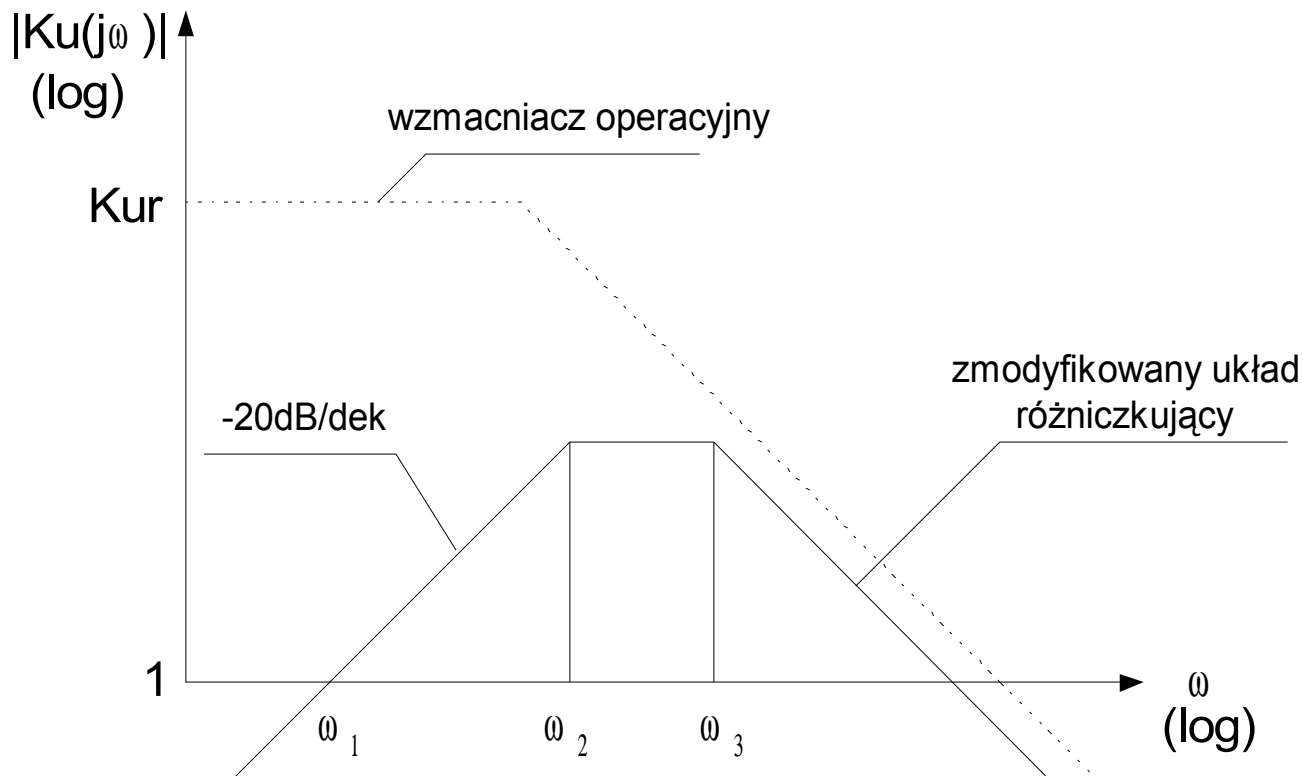
Dlatego bardzo często stosuje się zmodyfikowaną strukturę wzmacniacza różniczkującego.

Wzmacniacz różniczkujący



Rys.19. Układ zmodyfikowanego wzmacniacza różniczkującego

Wzmacniacz różniczkujący



Rys. 20. Charakterystyka częstotliwościowa zmodyfikowanego wzmacniacza różniczkującego

Wzmacniacz różniczkujący

Poszczególne pulsacje wynoszą:

$$\omega_1 = \frac{1}{R_1 C_1}$$

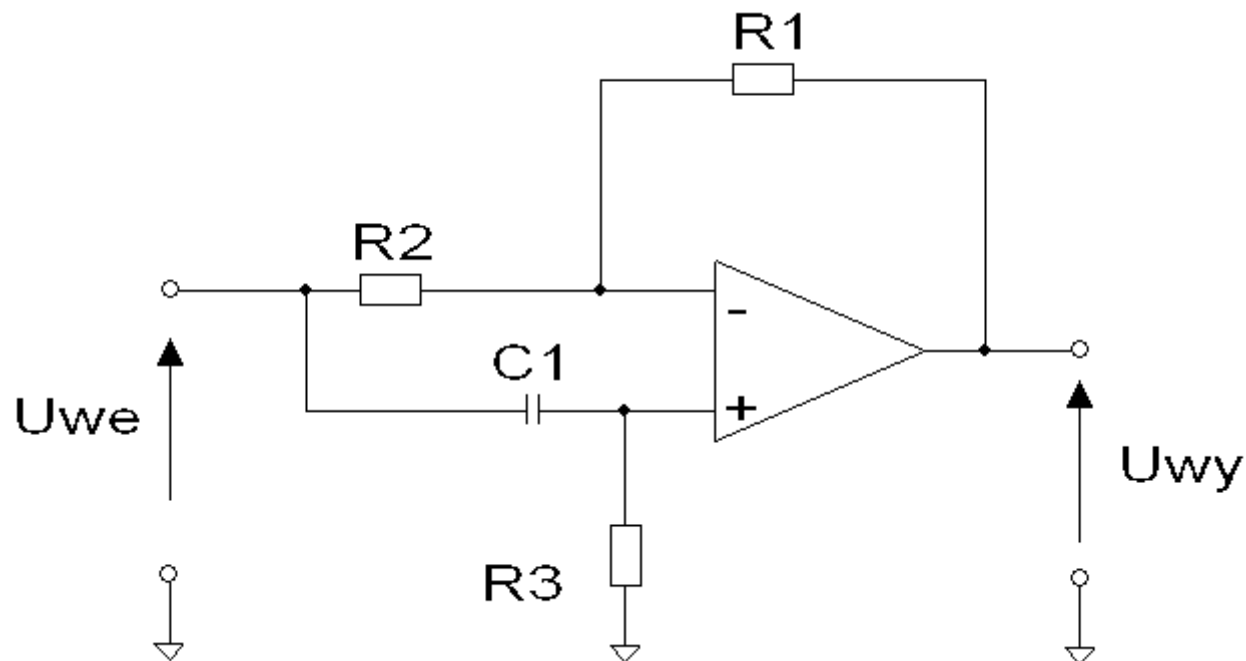
$$\omega_2 = \frac{1}{(R_3 + R_g) C_1}$$

$$\omega_3 = \frac{1}{R_1 C_2}$$

Warunek poprawnego całkowania:

$$\omega \ll \omega_2$$

Przesuwnik fazy



Rys. 21. Schemat regulowanego przesuwника fazy zbudowanego z wykorzystaniem WO

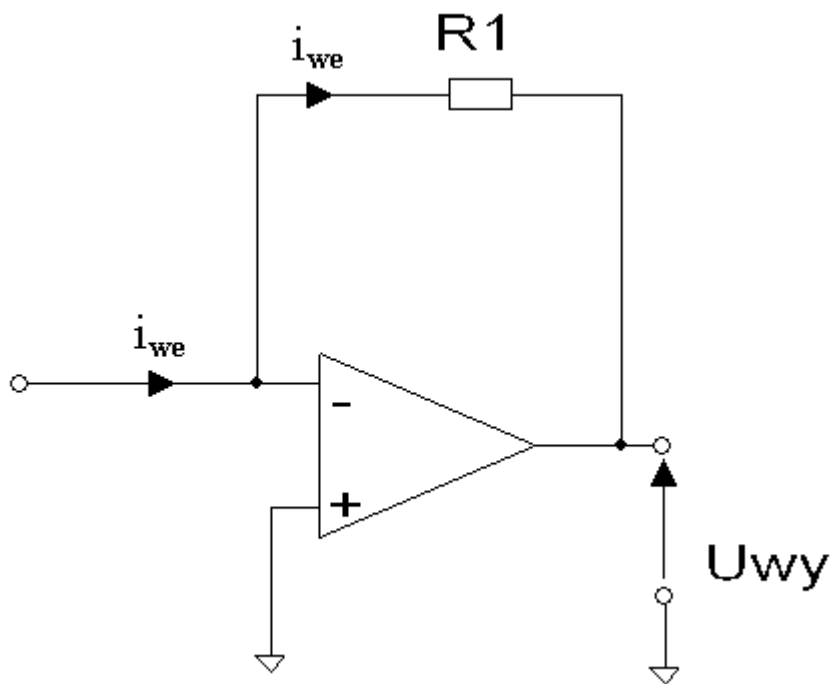
Przesuwnik fazy

Transmitancja napięciowa układu:

$$\frac{U_{wy}}{U_{we}} = -\frac{1 - sC_1R_3}{1 + sC_1R_3}$$

Dla zmian wartości rezystancji R_3 od 0 do ∞ można regulować przesunięcie fazowe od 180° do 0° .

Przetwornik prąd - napięcie (I/U)

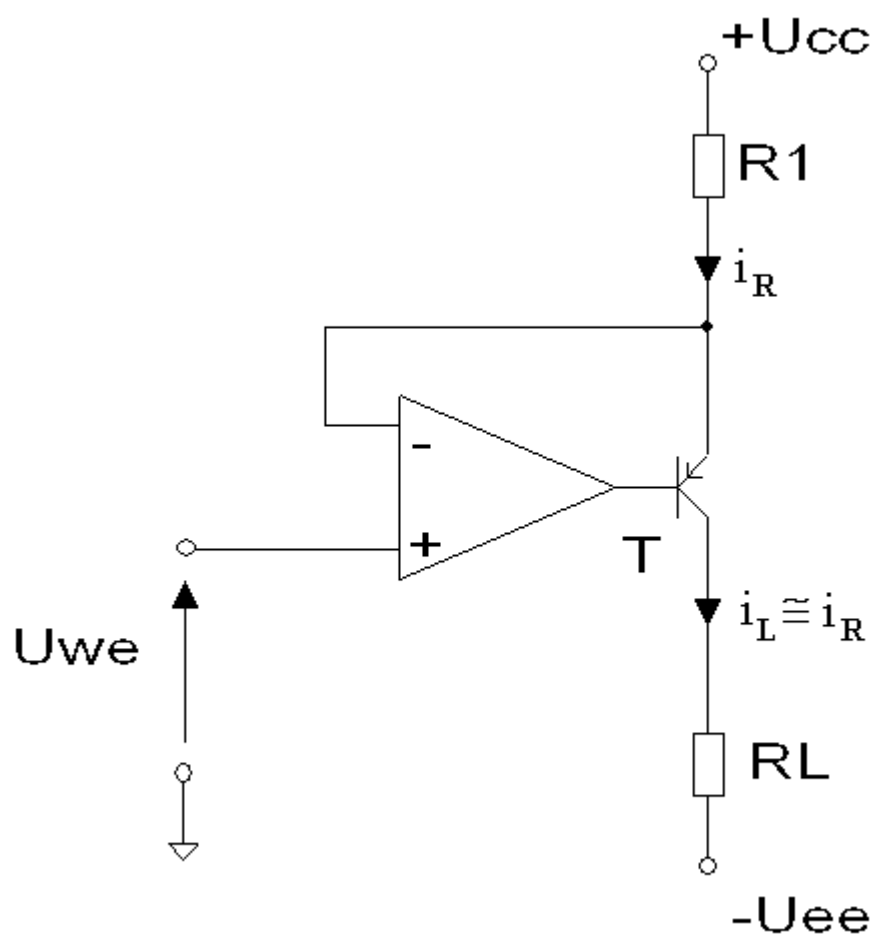


Napięcie wyjściowe układu:

$$U_{wy} = -I_{we} R_1$$

Rys. 22. Schemat przetwornika I/U
(prąd – napięcie)

Przetwornik napięcie-prąd (U/I)

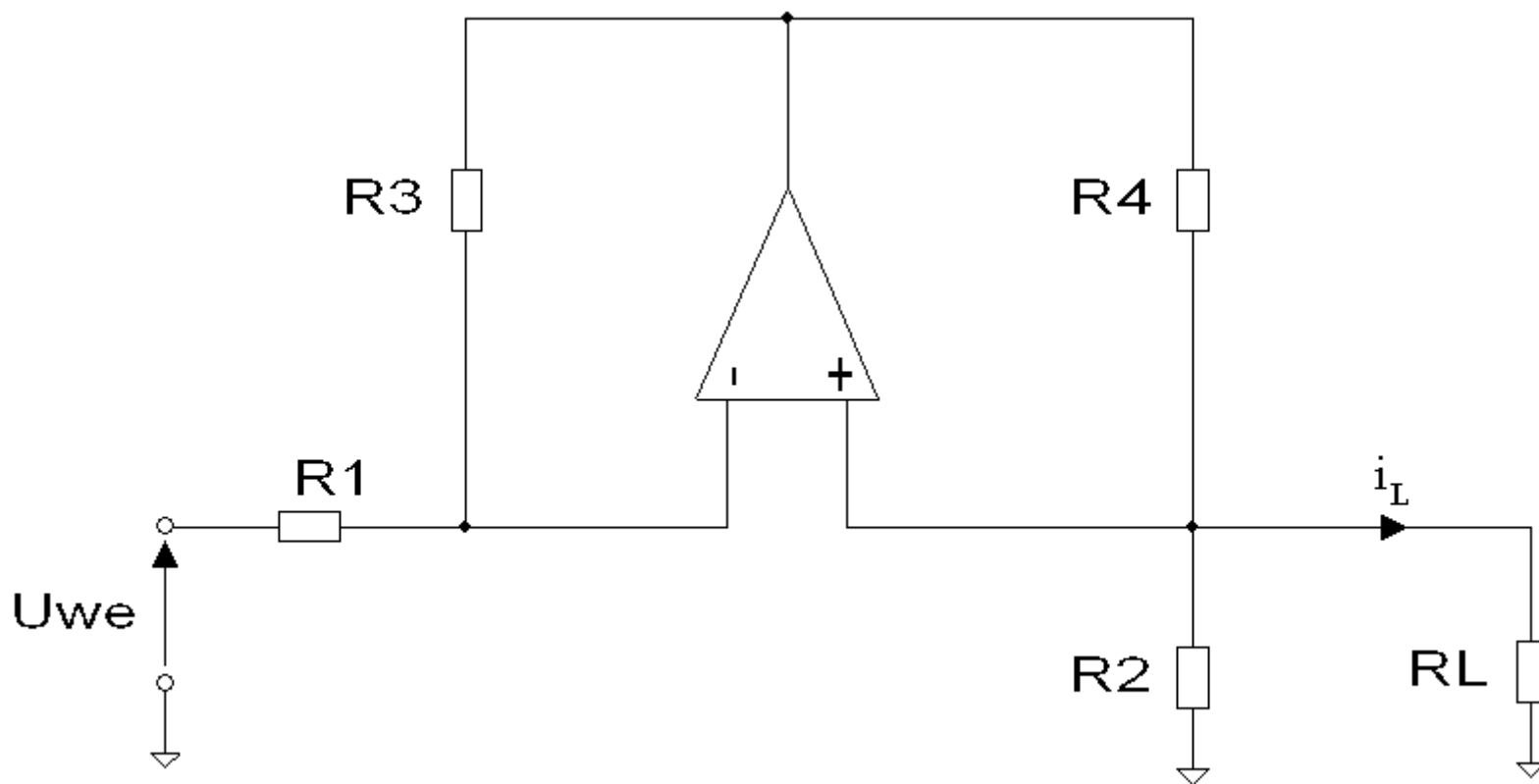


Prąd wyjściowy:

$$I_L = \frac{U_{cc} - U_{we}}{R_1}$$

Rys. 22. Schemat przetwornika napięcie prąd z wykorzystaniem tranzystora bipolarnego

Przetwornik napięcie-prąd (U/I)



Rys. 23. Przetwornik napięcie – prąd z uziemionym obciążeniem

Przetwornik napięcie-prąd (U/I)

Jeżeli spełniony jest warunek:

$$\frac{R_4}{R_2} = \frac{R_3}{R_1}$$

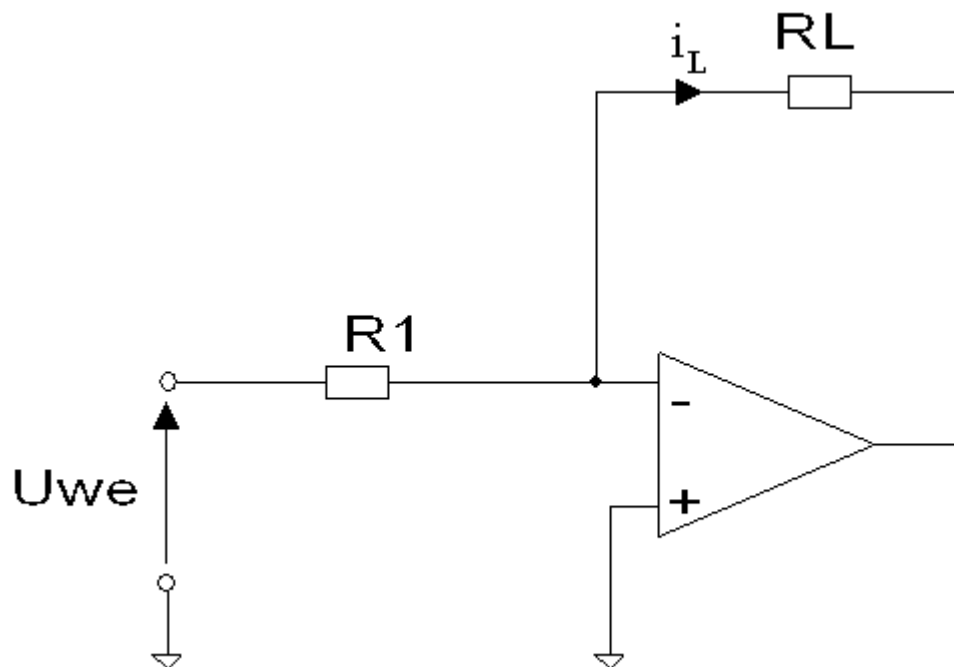
rezystancja wyjściowa układu jest nieskończenie wielka (ale istnieje tolerancja!!!) i prąd wyjściowy jest dany zależnością:

$$I_L = -\frac{U_{we}}{R_2}$$

Zazwyczaj:

$$R_1 = R_2 = R_3 = R_4$$

Przetwornik napięcie-prąd (U/I)



Prąd obciążenia:

$$I_L = \frac{U_{we}}{R_1}$$

Rys. 24. Przetwornik napięcie – prąd
z nieziemionym obciążeniem

Linowe zastosowania wzmacniaczy operacyjnych - najważniejsze zagadnienia

1. Wzmacniacz odwracający. Masa pozorna.
2. Wzmacniacz nieodwracający i wtórnik napięcia.
3. Kompensacja wejściowych: prądu i napięcia niezrównoważenia.
4. Sumatory zbudowane w oparciu o WO.
5. Wzmacniacze różnicowe zbudowane w oparciu o WO.
Wzmacniacz pomiarowy
6. Wzmacniacz całkujący: układy podstawowy i stratny.
7. Wzmacniacz różniczkujący: układy podstawowy i zmodyfikowany.



Liniowe zastosowania wzmacniaczy operacyjnych - najważniejsze zagadnienia

8. Przesuwnik fazy zbudowany z WO.
9. Przetworniki prąd-napięcie (I/U) i napięcie-prąd (U/I) zbudowane w oparciu o WO.