

Realizacja regulatorów analogowych za pomocą wzmacniaczy operacyjnych

Podstawowe układy pracy wzmacniacza operacyjnego

Prezentowane schematy podstawowych układów ze wzmacniaczem operacyjnym zostały zaczerpnięte z witryny K.M.Gawrylczyka: <http://www.kmg.ps.pl/to/>

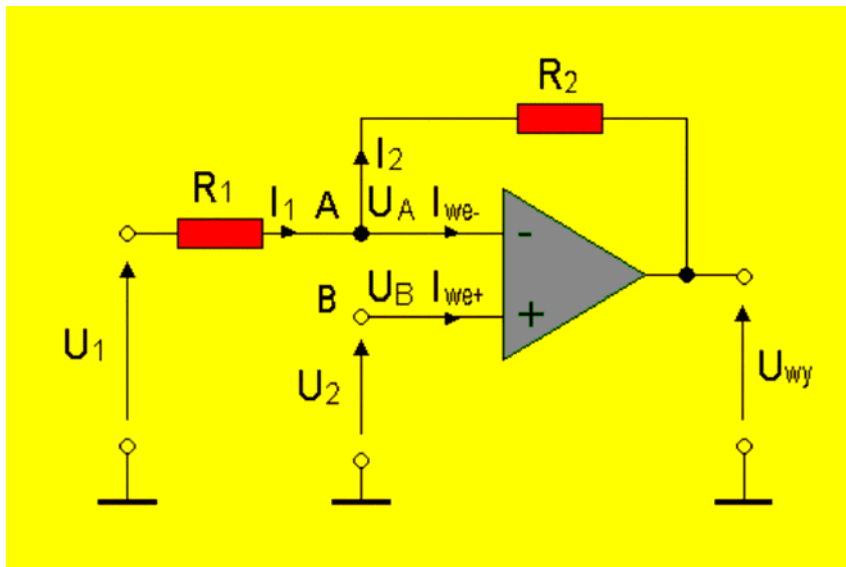
Do podstawowych układów pracy wzmacniacza operacyjnego zalicza się :

- wzmacniacz odwracający,
- wzmacniacz nieodwracający,
- wzmacniacz sumujący,
- wzmacniacz odejmujący,
- wzmacniacz całkujący,
- wzmacniacz różniczkujący,
- wtórnik napięciowy,
- konwerter prąd-napięcie,
- przesuwnik fazy,
- prostownik idealny,
- konwerter o ujemnej impedancji,
- żyrator.

Zasada analizy właściwości układu ze wzmacniaczem operacyjnym

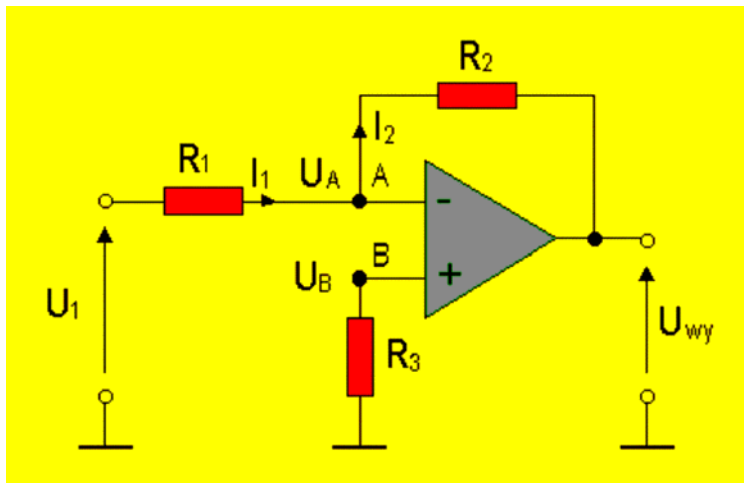
Wyznaczenie transmitancji całego układu (czwórnika) ze wzmacniaczem operacyjnym objętym ujemnym sprzężeniem zwrotnym jest możliwe na podstawie podstawowych praw elektrotechniki (prawa Ohma i praw Kirchhoffa) zapisanych w postaci operatorowej przy założeniu, że wzmacniacz operacyjny posiada następujące właściwości:

1. bardzo duże wzmocnienie w szerokim zakresie częstotliwości,
2. bardzo dużą impedancję wejściową, powodującą, że prąd wejściowy wzmacniacza jest praktycznie równy zero,
3. bardzo małą impedancję wyjściową, powodującą, że prąd wyjściowy w stanach przejściowych może być odpowiednio duży.



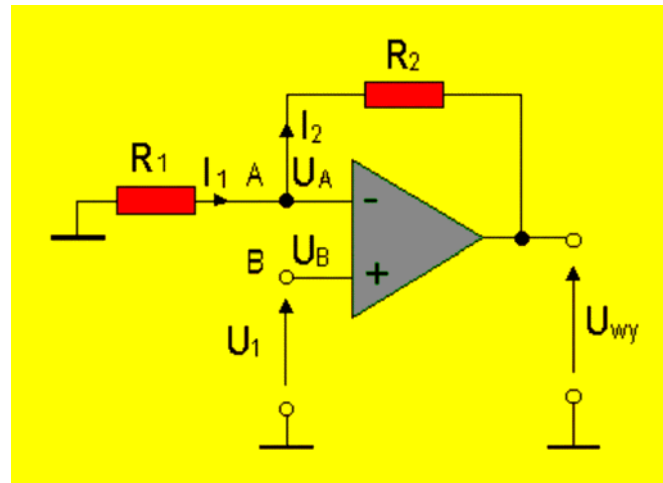
Założenia te powodują, że w stanach aktywnej pracy wzmacniacza, tzn. gdy napięcie wyjściowe nie osiąga wartości ograniczenia wynikającego z istniejących napięć zasilających, napięcia na obu wejściach wzmacniacza oraz sumy prądów dopływających i wypływających w węzłach połączonych z wejściami wzmacniacza pozostają praktycznie równe sobie zarówno w stanach ustalonych jak i stanach dynamicznych.

Wzmacniacz odwracający



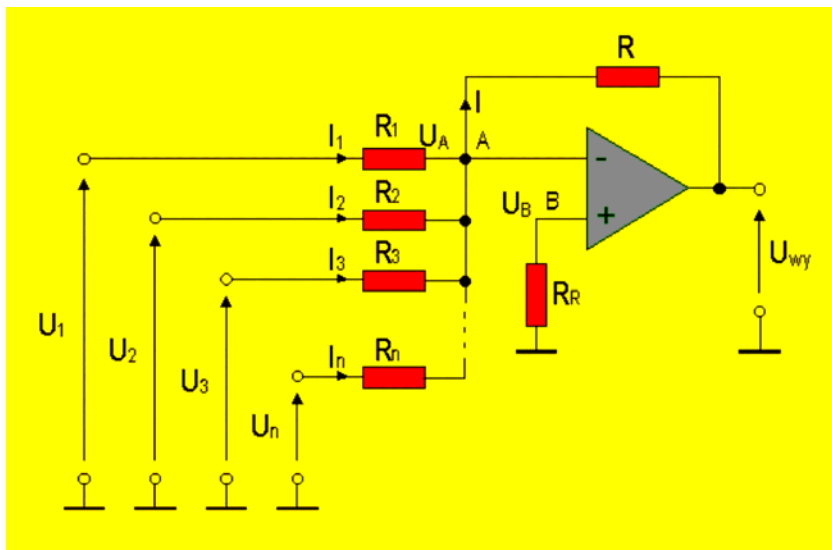
$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_1} = -\frac{R_2}{R_1},$$

Wzmacniacz nieodwracający



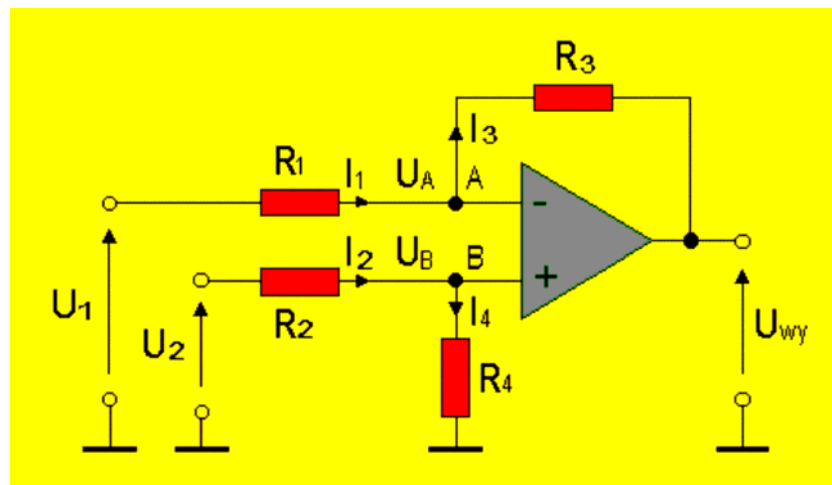
$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}.$$

Wzmacniacz sumujący



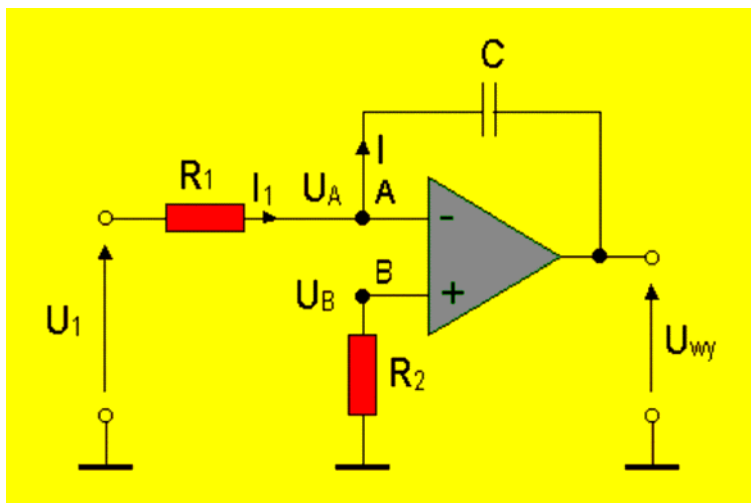
$$U_{wy} = -R \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right).$$

Wzmacniacz odejmujący



$$U_{wy} = -\frac{R_3}{R_1} U_1 + \frac{(R_1 + R_3) R_4}{(R_2 + R_4) R_1} U_2.$$

Wzmacniacz całkujący



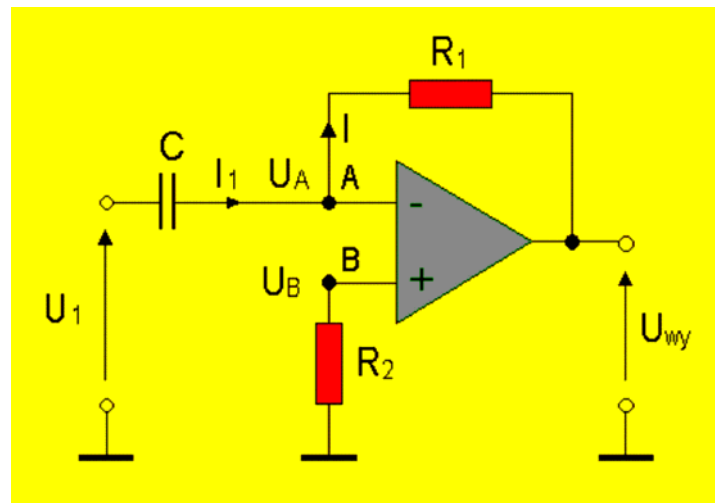
$$u_{wy}(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int u_1(t) dt + U_0,$$

$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_1(s)} = -\frac{Z_2(s)}{Z_1(s)}$$

$$Z_1(s) = R_1, \quad Z_2(s) = \frac{1}{sC}$$

$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_1(s)} = -\frac{1}{R_1 C s}$$

Wzmacniacz różniczkujący

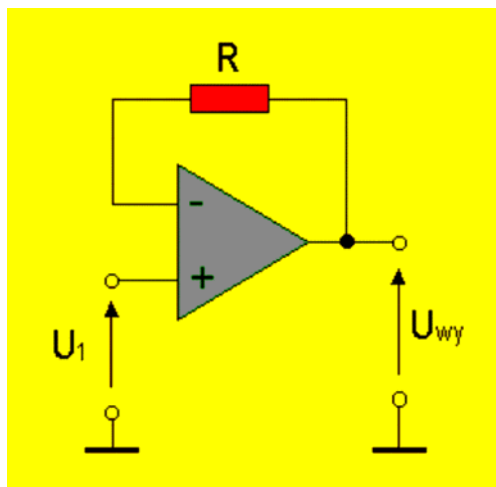


$$U_{wy}(t) = -R_1 C \frac{dU_1(t)}{dt}$$

$$Z_1(s) = \frac{1}{sC}, \quad Z_2(s) = R_1$$

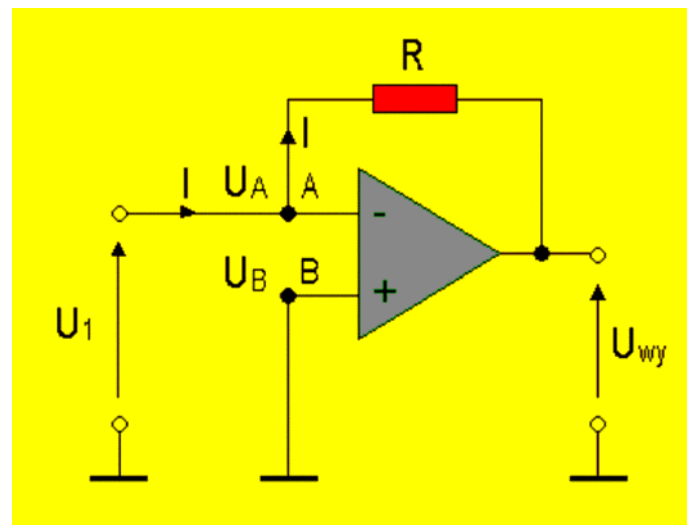
$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_1(s)} = -R_1 C s$$

Wtórnik napięciowy



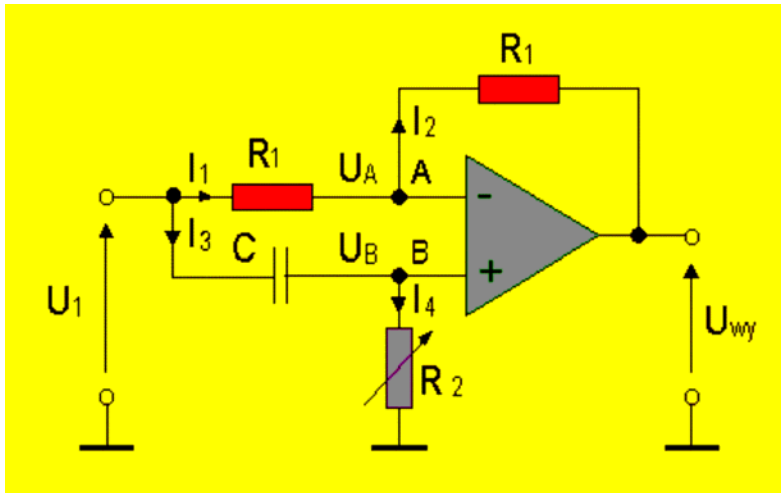
$$U_{wy} = U_1$$

Konwerter prąd-napięcie



$$U_{wy} = -RI$$

Przesuwnik fazy



$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_1(s)} = -\frac{1 - R_2Cs}{1 + R_2Cs}, \quad G(j\omega) = -\frac{1 - j\omega R_2C}{1 + j\omega R_2C}$$

$$|G(j\omega)| = \frac{\sqrt{1 + (\omega R_2C)^2}}{\sqrt{1 + (\omega R_2C)^2}} = 1$$

$$\arg G(j\omega) = 180^\circ - 2\arctg(\omega R_2C)$$

Gdy $\omega = \text{const.}$

$$0 < R_2 < \infty$$

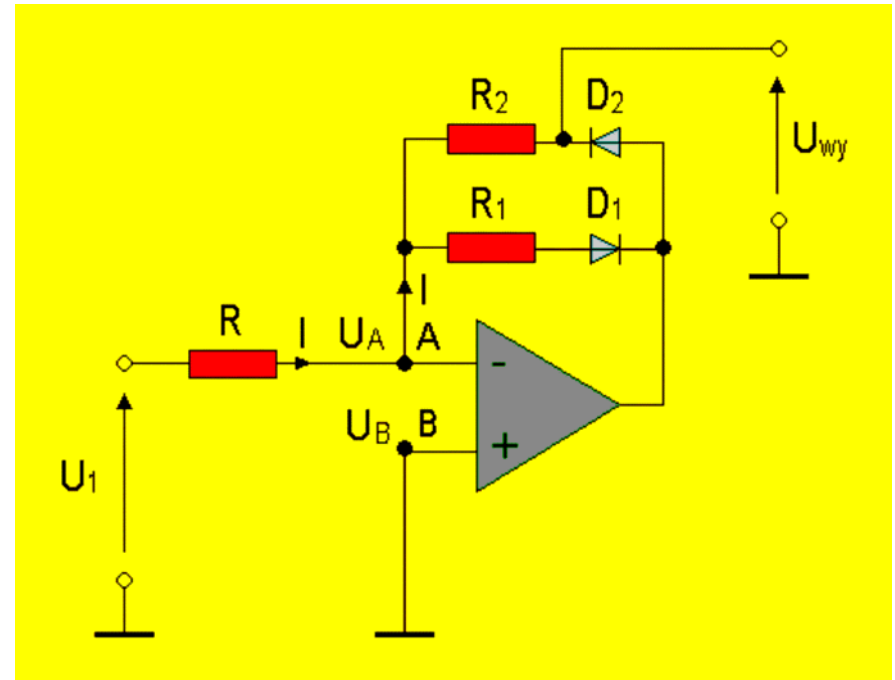
$$180^\circ > \arg G(j\omega) > 0^\circ$$

Gdy $R_2 = \text{const.}$

$$0 < \omega < \infty$$

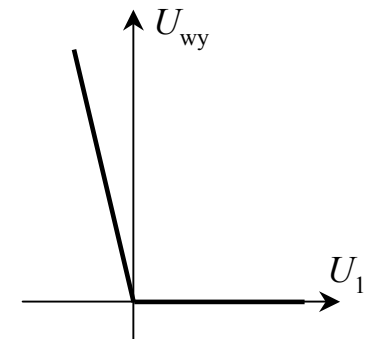
$$180^\circ > \arg G(j\omega) > 0^\circ$$

Prostownik idealny

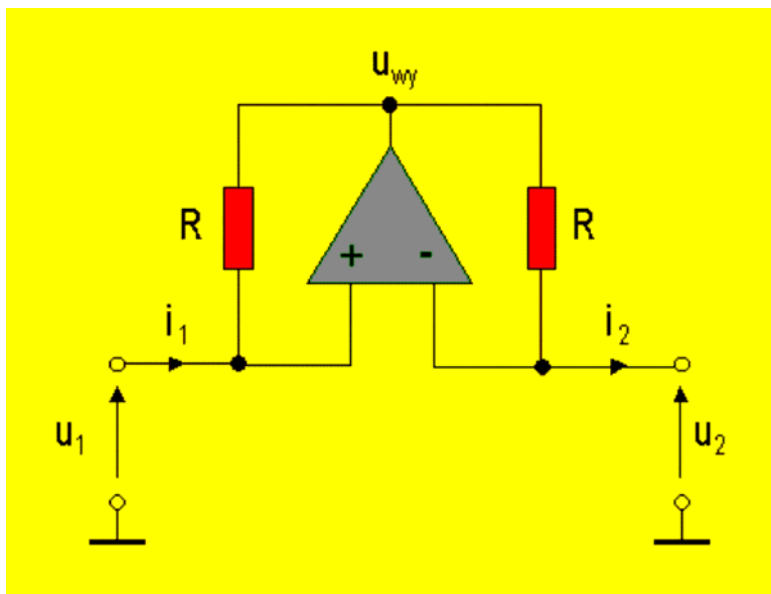


$$U_{wy} = \begin{cases} -\frac{R_2}{R}U_1 & \text{gdy } U_1 < 0 \\ 0 & \text{gdy } U_1 > 0 \end{cases}$$

W tym układzie, spadki napięcia na diodach w kierunku przewodzenia nie odgrywają roli.



Konwerter o ujemnej impedancji



Jeżeli oznaczyć:

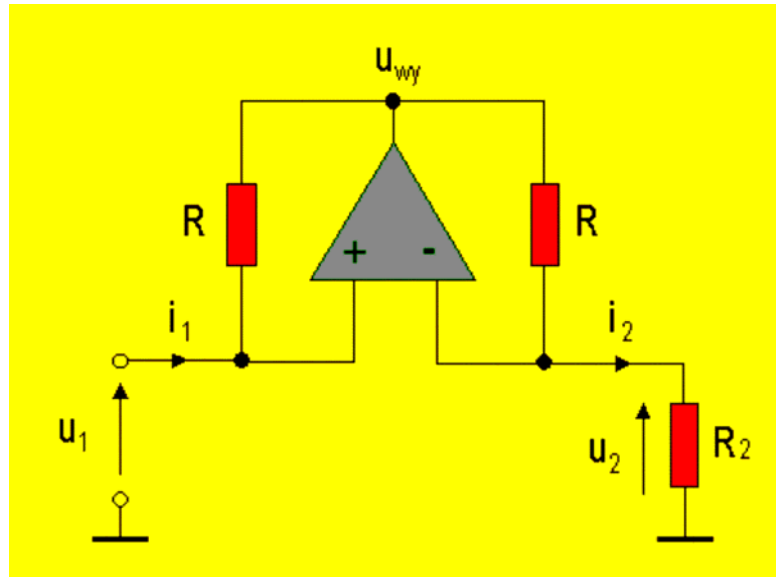
$$Z_1(s) = \frac{u_1(s)}{i_1(s)}, \quad Z_2(s) = \frac{u_2(s)}{i_2(s)}$$

to dzięki wzmacniaczowi:

$$Z_1(s) = -Z_2(s)$$

Warunkiem poprawnej pracy układu (warunkiem stabilności) jest zachowanie odpowiedniej polaryzacji przy podłączaniu wejść wzmacniacza. W podanym wyżej przykładzie źródło zewnętrzne dołączone do wrót 1 musi być źródłem napięciowym o rezystancji wewnętrznej $< R_2$.

W przeciwnym razie trzeba zamienić miejscami wejścia wzmacniacza.



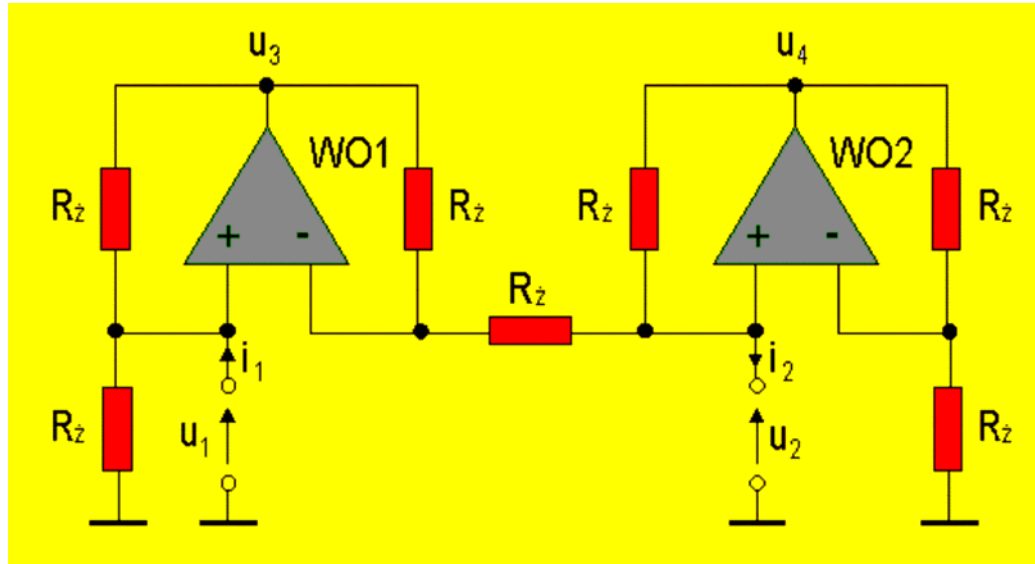
Po umieszczeniu we wrotach 2 zwykłego rezystora:

$$u_2 = R_2 i_2$$

wrota 1 są widziane jako rezystancja ujemna:

$$u_1 = -R_2 i_1$$

Żyrator



Z bilansu prądów w węzłach na wejściach wzmacniaczy:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{u_3 - u_1}{R_z} - \frac{u_1}{R_z} + i_1 = 0 \\ \frac{u_3 - u_1}{R_z} + \frac{u_2 - u_1}{R_z} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow -\frac{u_2}{R_z} + i_1 = 0 \Rightarrow i_1 = \frac{u_2}{R_z}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{u_4 - u_2}{R_z} - \frac{u_2 - u_1}{R_z} - i_2 = 0 \\ \frac{u_4 - u_2}{R_z} - \frac{u_2}{R_z} = 0 \end{array} \right\} \Rightarrow \frac{u_1}{R_z} - i_2 = 0 \Rightarrow i_2 = \frac{u_1}{R_z}$$

Jeżeli oznaczyć:

$$Z_1(s) = \frac{u_1(s)}{i_1(s)}, \quad Z_2(s) = \frac{u_2(s)}{i_2(s)}$$

to dzięki takiemu połączeniu obu wzmacniaczy:

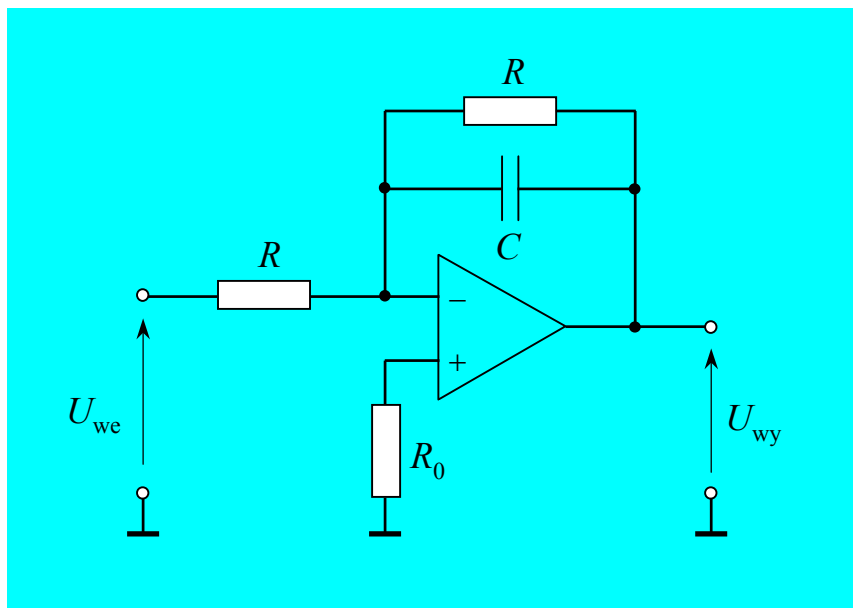
$$Z_1(s) = R_z^2 \frac{1}{Z_2(s)}$$

Inne układy ze wzmacniaczami operacyjnymi

Przy wykorzystaniu podstawowych schematów pracy wzmacniaczy operacyjnych lub ich modyfikacji można zbudować m.in. następujące układy:

- filtr dolnoprzepustowy pierwszego rzędu,
- filtr dolnoprzepustowy drugiego rzędu,
- układy wartości bezwzględnej,
- komparatory (z histerezą i bez histerezy),
- ograniczniki napięcia wyjściowego,
- elementy o nieliniowym wzmocnieniu,
- generator rampy,
- regulator PID z aktywnym ograniczeniem wyjścia,
- regulator PI (odwracający i nieodwracający),
- regulator PD (odwracający i nieodwracający).

Filtr dolnoprzepustowy pierwszego rzędu

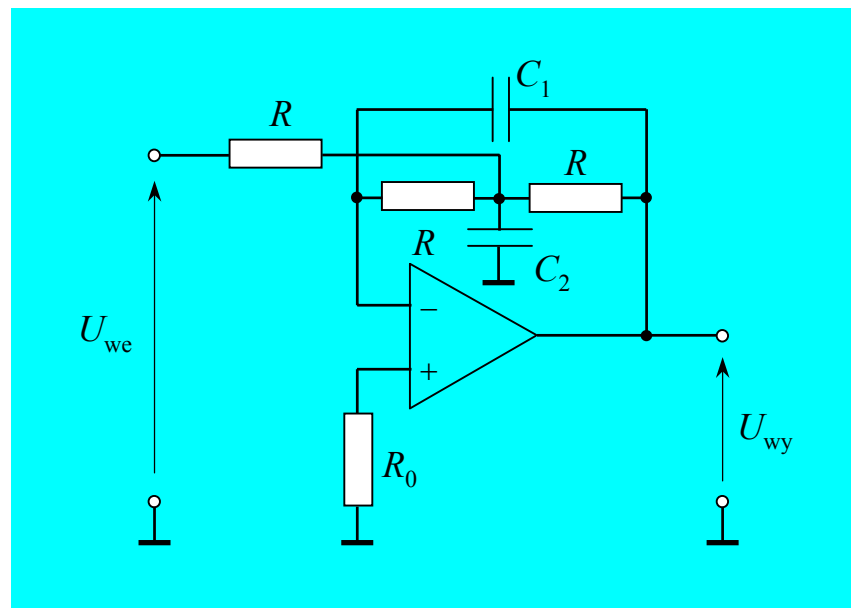


$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = \frac{-1}{Ts + 1}$$

gdzie:

$$T = RC$$

Filtr dolnoprzepustowy drugiego rzędu



$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = \frac{-1}{T_1 T_2 s^2 + 3T_1 s + 1}$$

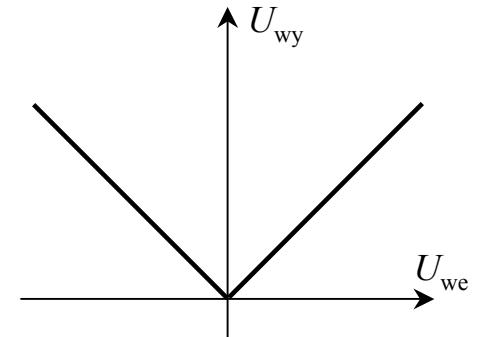
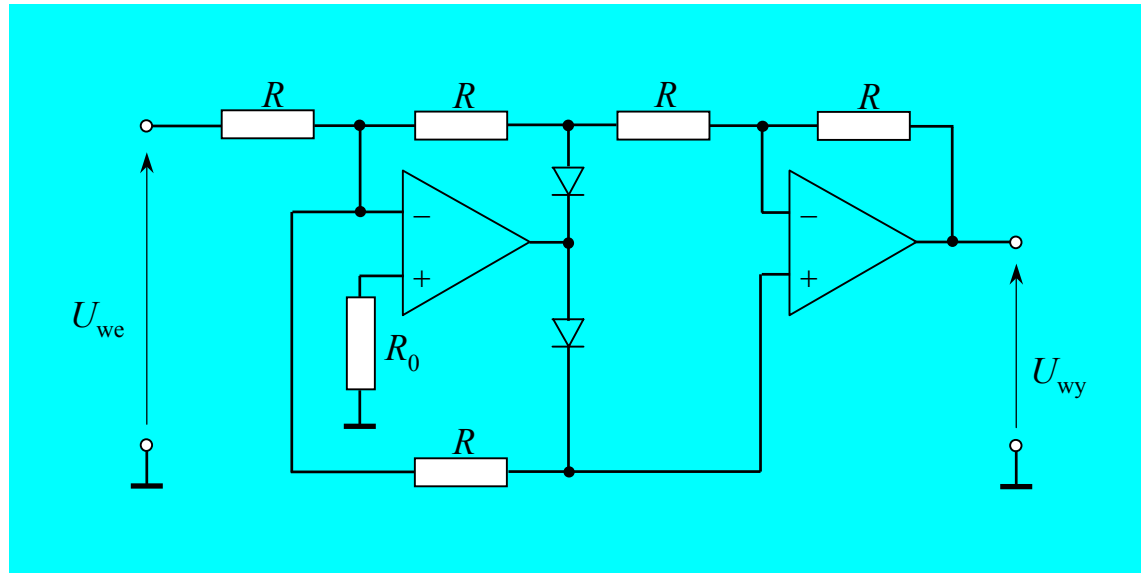
gdzie:

$$T_1 = RC_1, \quad T_2 = RC_2$$

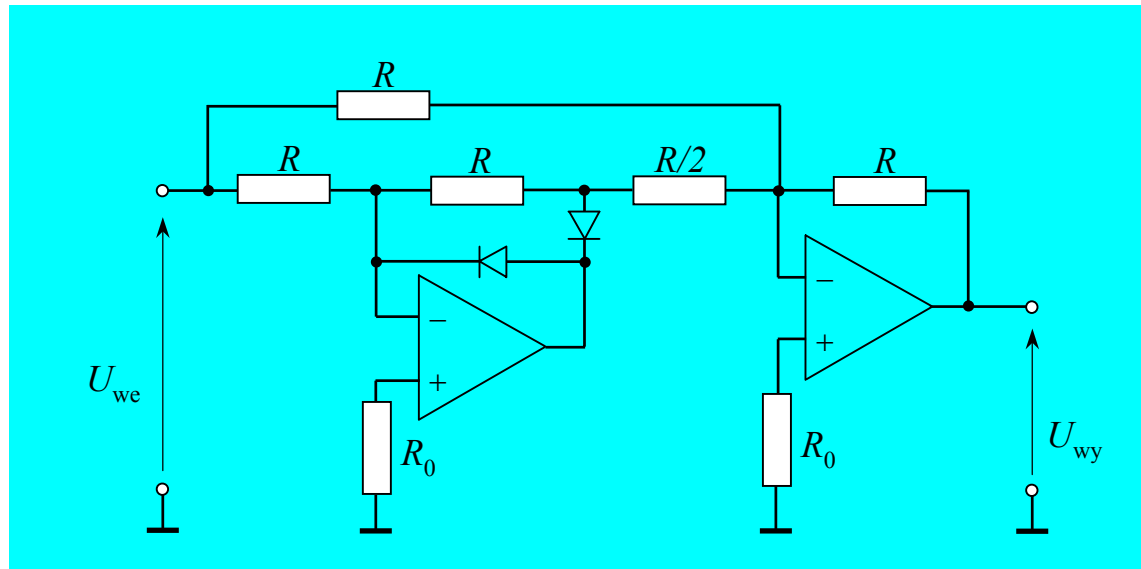
Warunek krytycznej aperiodyczności:

$$C_1 = \frac{4}{9} C_2$$

Układy wartości bezwzględnej



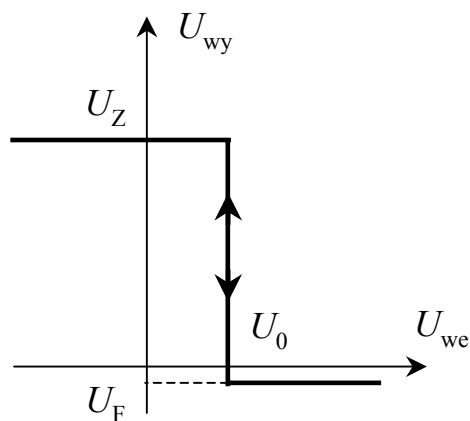
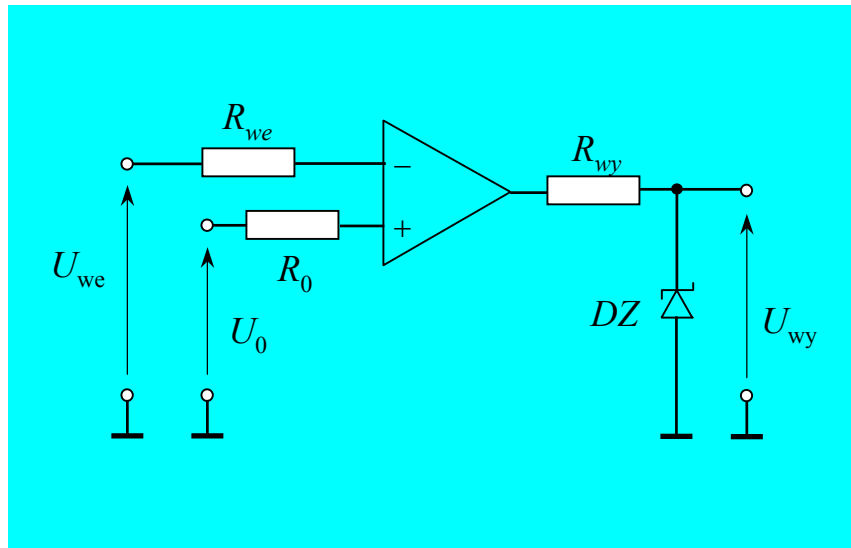
$$U_{wy} = |U_{we}|$$



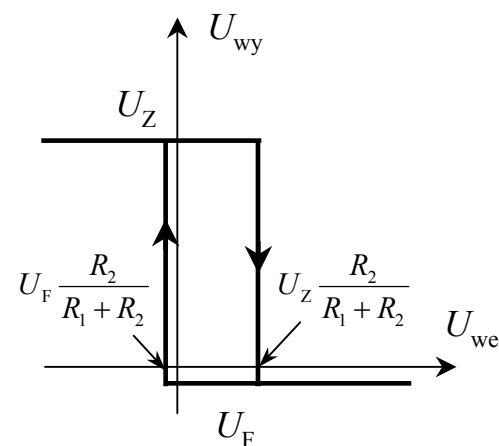
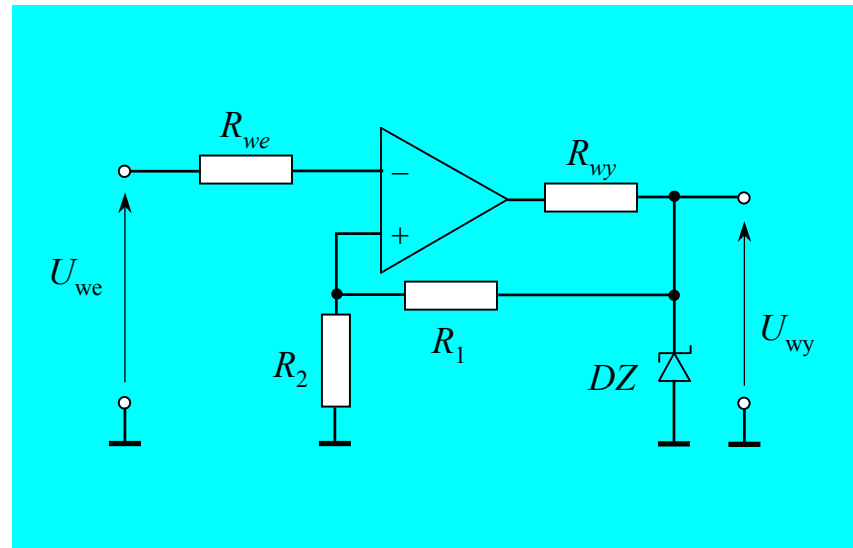
Zmiana kierunku włączenia obu diod w każdym z podanych układów powoduje odwrócenie znaku napięcia wyjściowego

$$U_{wy} = -|U_{we}|$$

Komparator bez histerezy

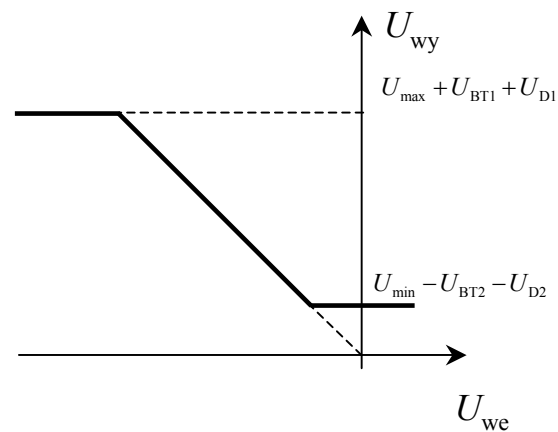
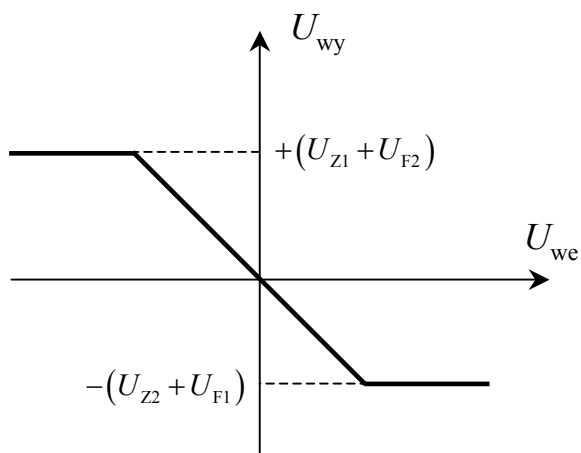
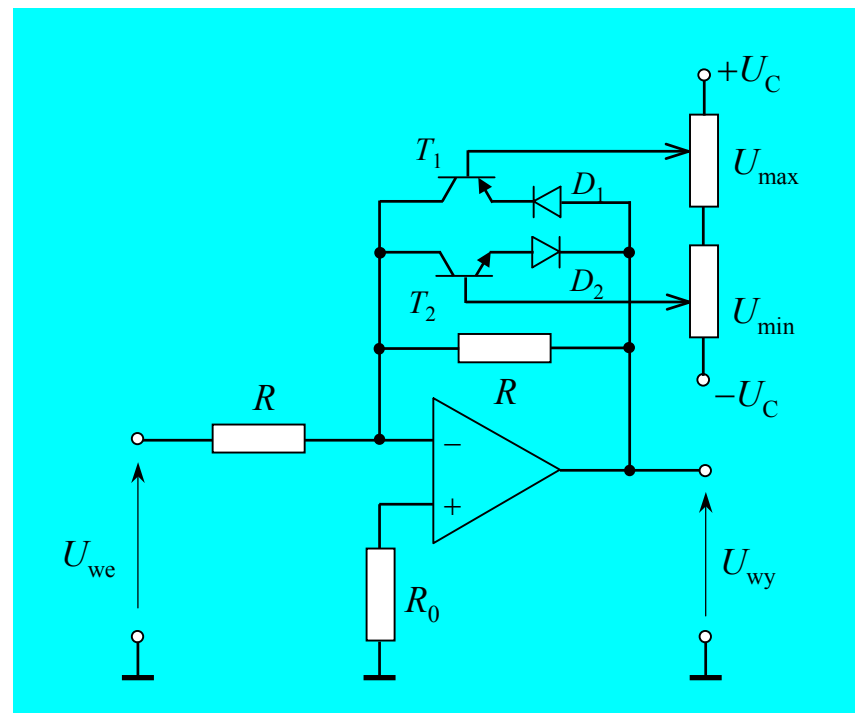
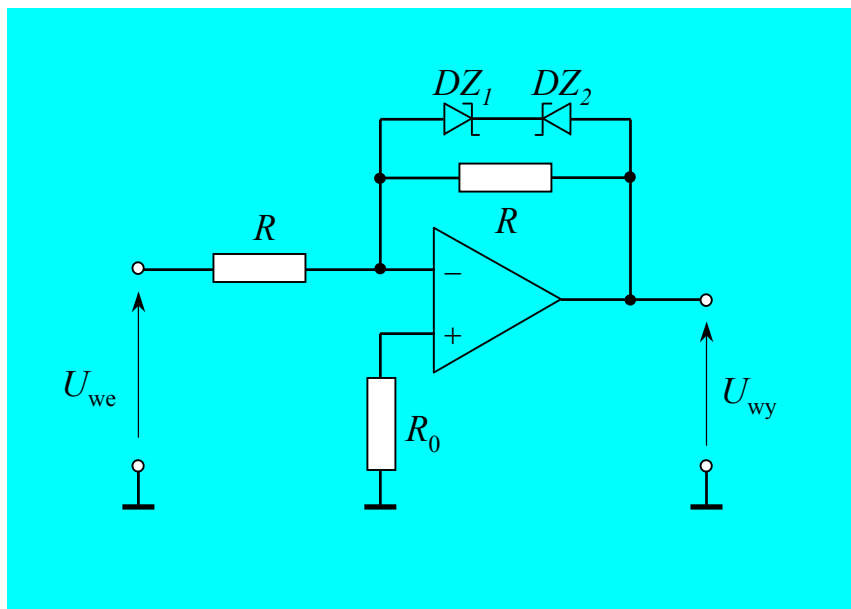


Komparator z histerezą

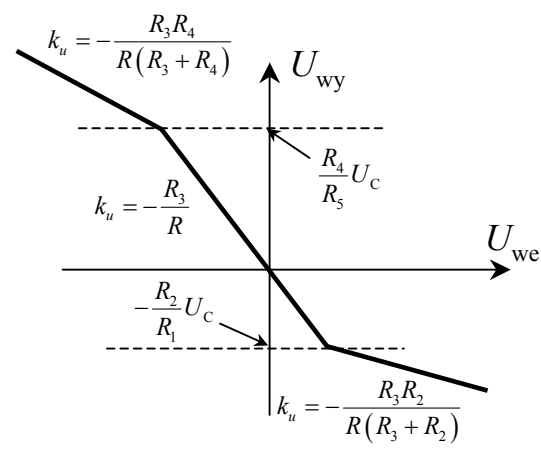
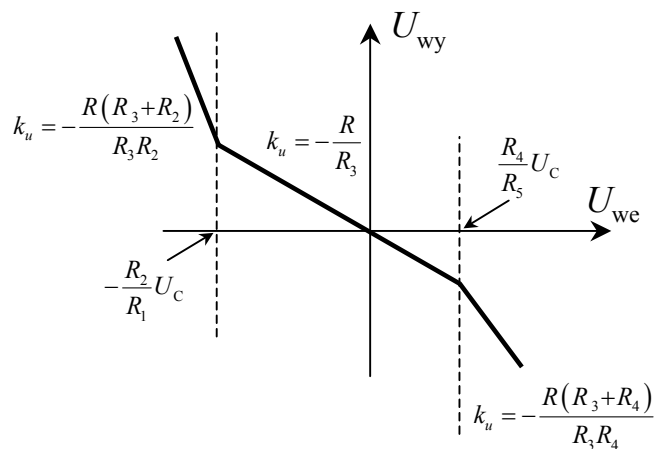
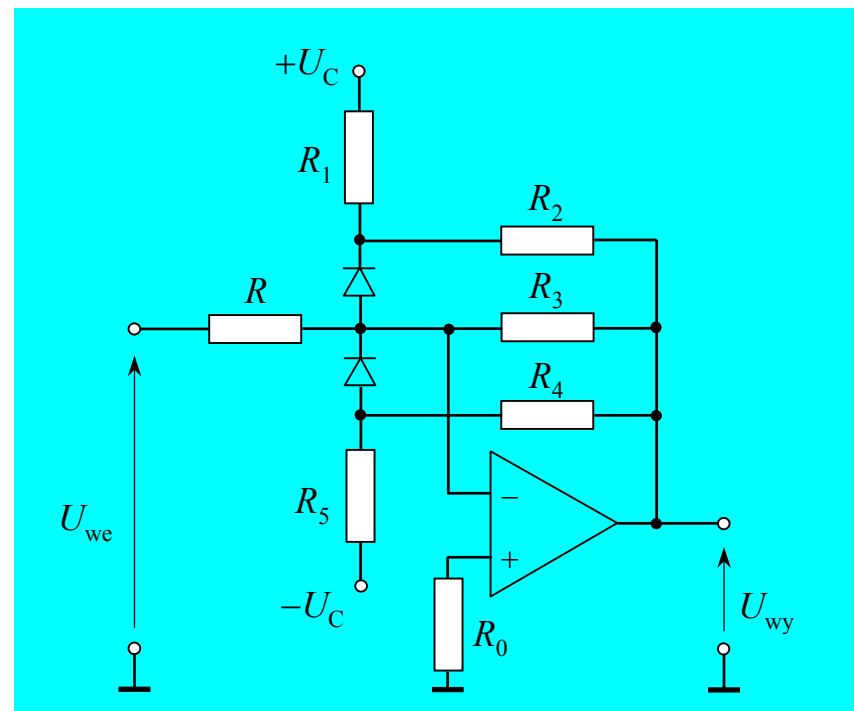
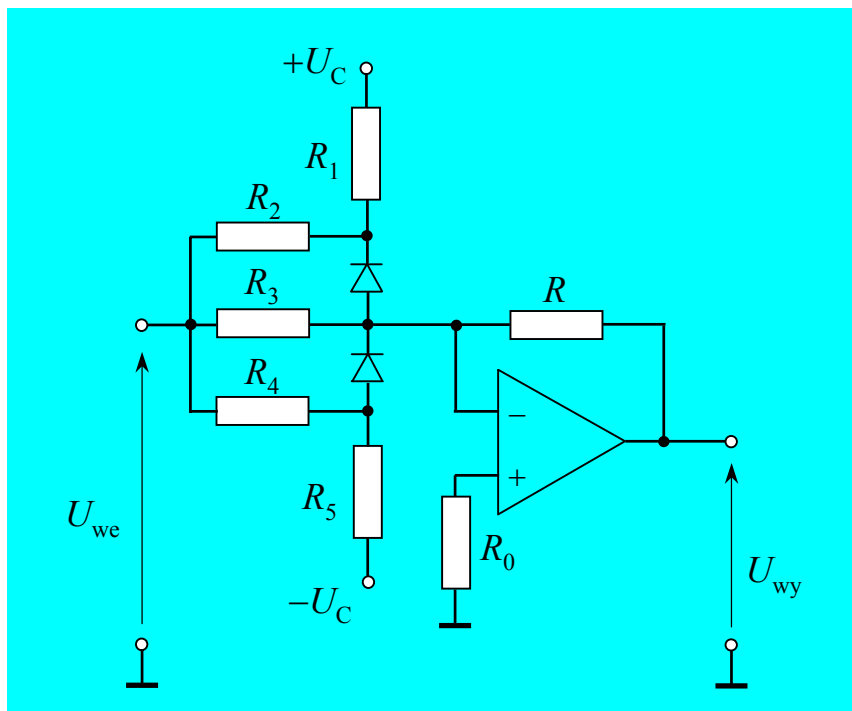


U_Z – napięcie diody Zenera w kierunku zaporowym,
 U_F – napięcie diody Zenera w kierunku przewodzenia.

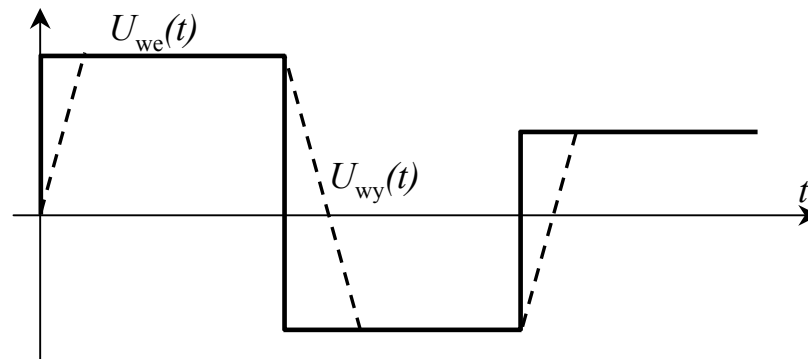
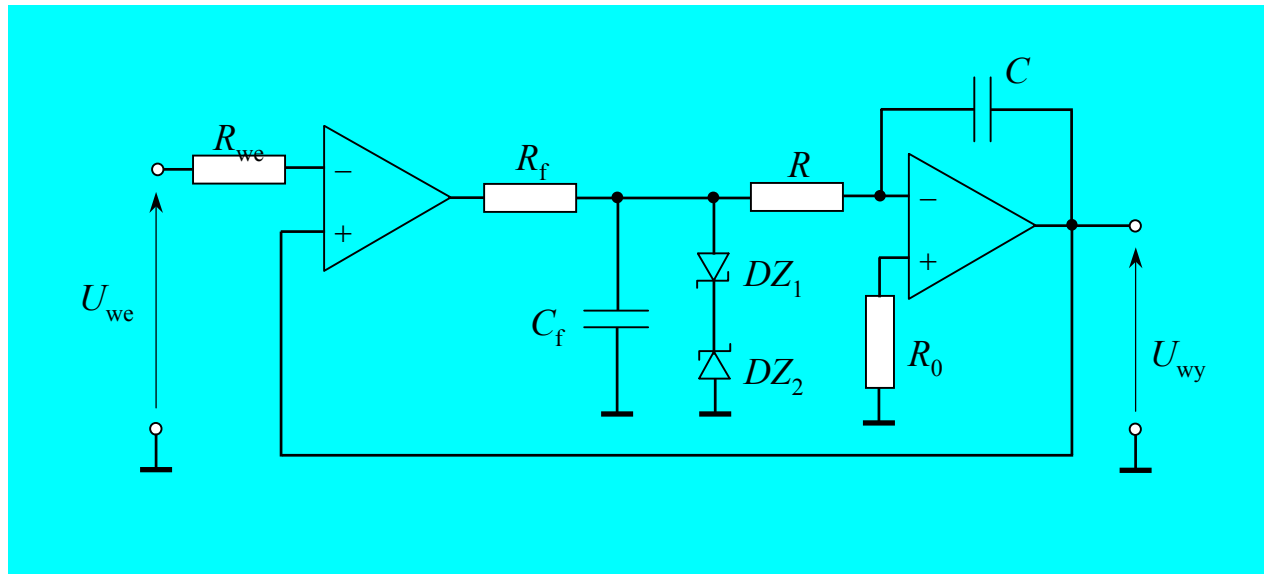
Ograniczniki napięcia wyjściowego



Elementy o nieliniowym wzmacnieniu

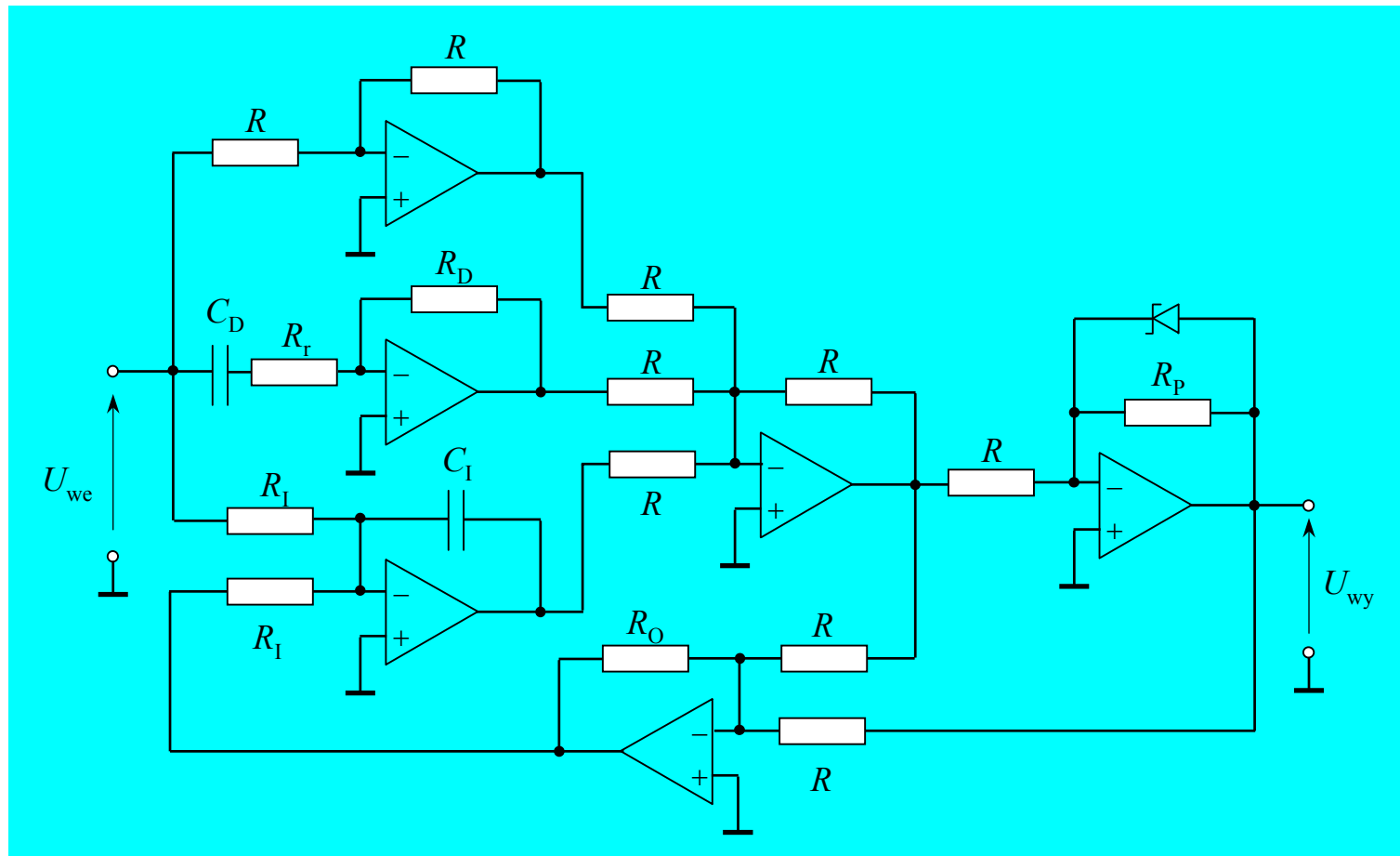


Generator rampy



RC – stała czasowa całkowania integratora,
 DZ_1 i DZ_2 - dwie jednakowe diody Zenera,
 $R_f C_f$ – stała czasowa filtru komparatora.

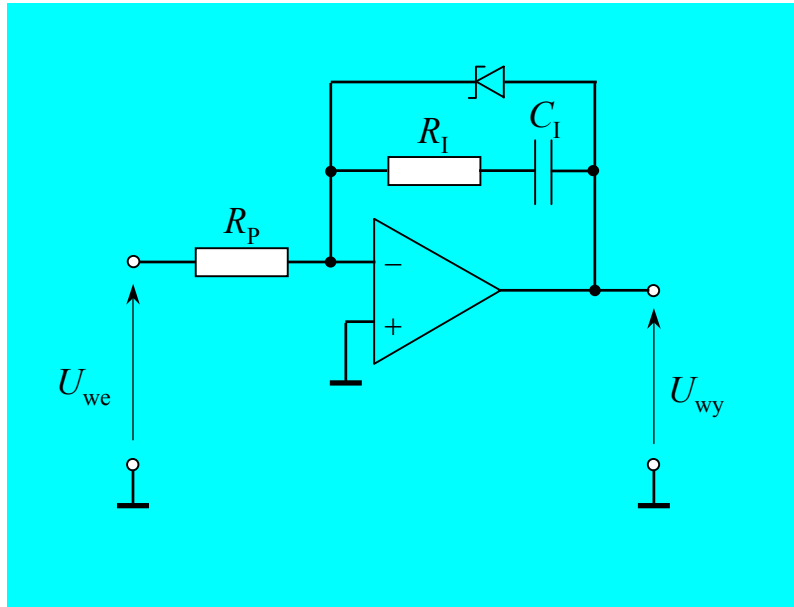
Regulator PID z aktywnym ograniczeniem wyjścia



$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = -\frac{R_p}{R} \left(1 + \frac{1}{R_I C_I s} + \frac{R_D C_D s}{1 + R_I C_D s} \right)$$

$$-U_{DZ} < U_{wy}(t) < +U_F$$

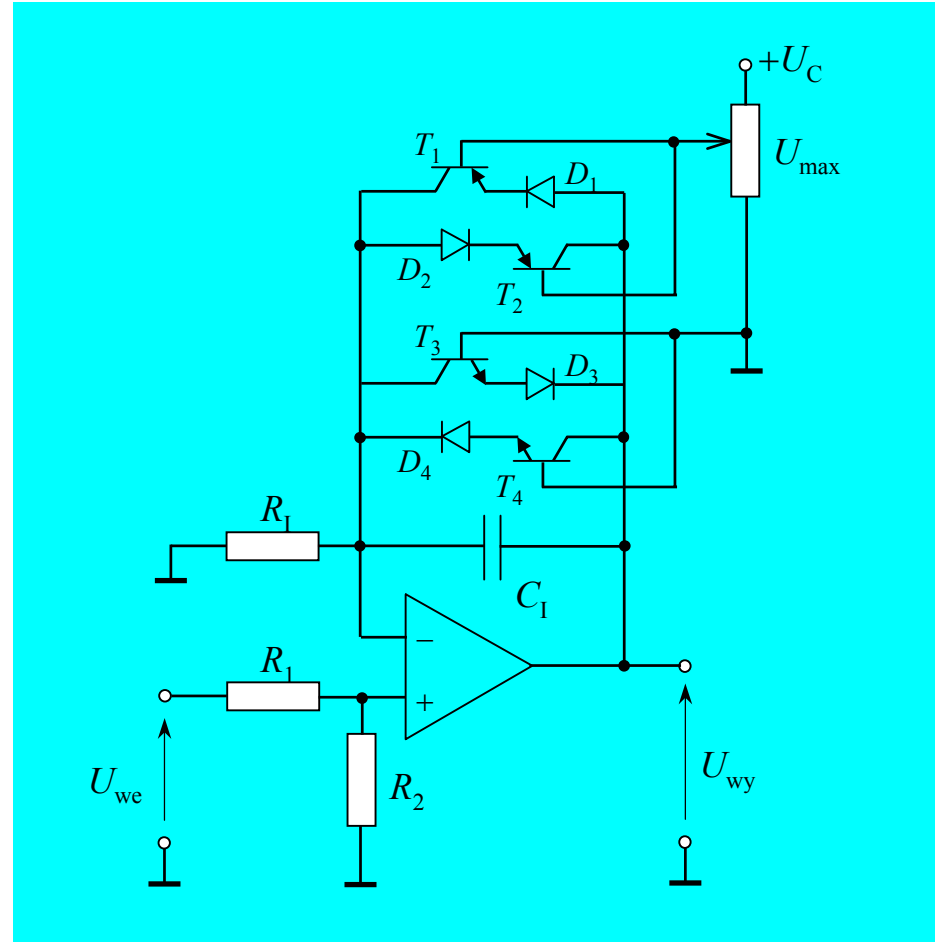
Regulator PI odwracający



$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = -\frac{R_I}{R_p} \left(1 + \frac{1}{R_I C_I s} \right)$$

$$-U_{DZ} < U_{wy}(t) < +U_F$$

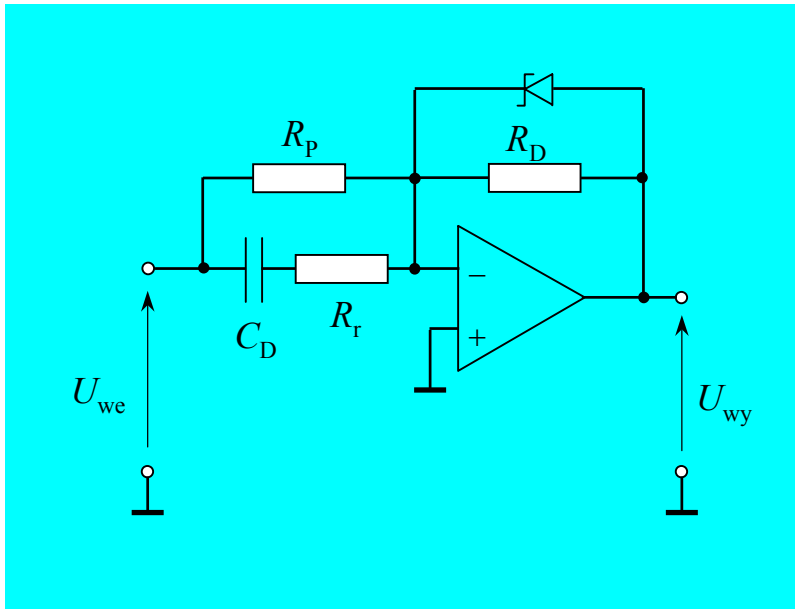
Regulator PI nieodwracający



$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 + \frac{1}{R_I C_I s} \right)$$

$$0 - U_{BT} - U_D < U_{wy}(t) < U_{max} + U_{BT} + U_D$$

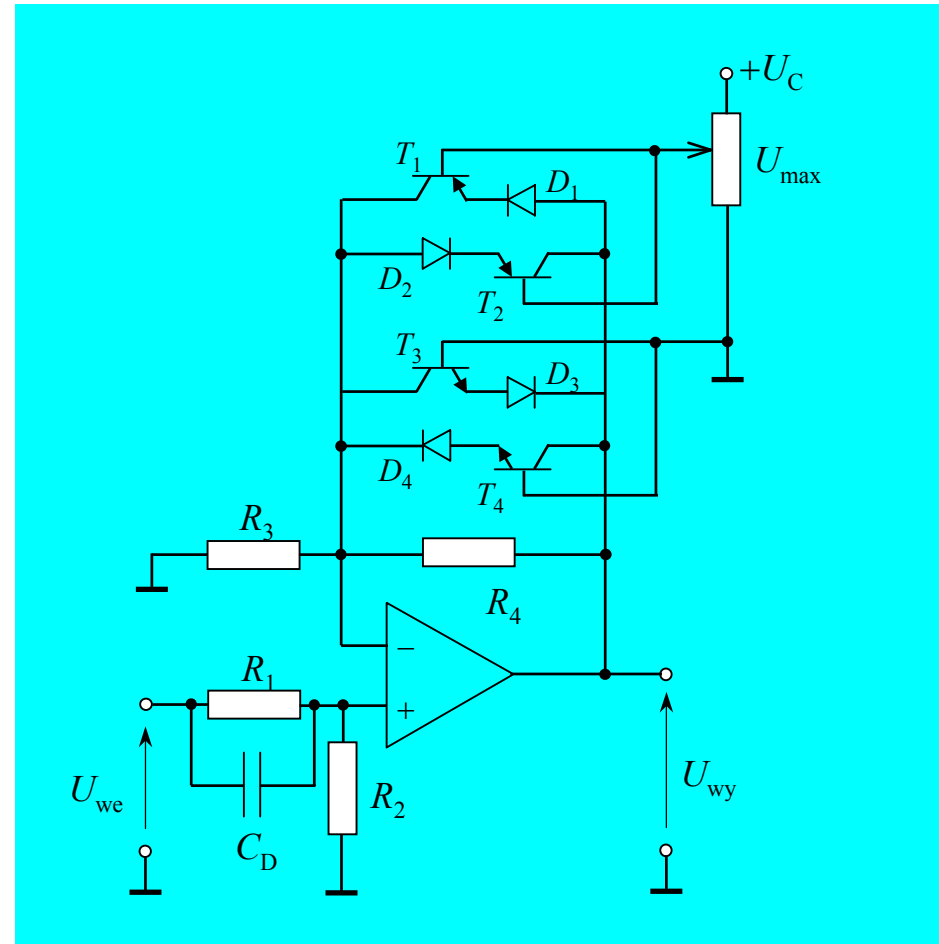
Regulator PD odwracający



$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = -\frac{R_D}{R_p} \frac{1}{(1 + R_r C_D s)} [1 + (R_r + R_p) C_D s]$$

$$-U_{DZ} < U_{wy}(t) < +U_F$$

Regulator PD nieodwracający



$$G(s) = \frac{U_{wy}(s)}{U_{we}(s)} = \frac{R_2 (R_3 + R_4)}{(R_1 + R_2) R_3} \frac{1}{\left(1 + \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C_D s\right)} (1 + R_1 C_D s)$$

$$0 - U_{BT} - U_D < U_{wy}(t) < U_{max} + U_{BT} + U_D$$