

WSTĘP DO ELEKTRONIKI

Część VI

Sprzężenie zwrotne

Wzmacniacz operacyjny

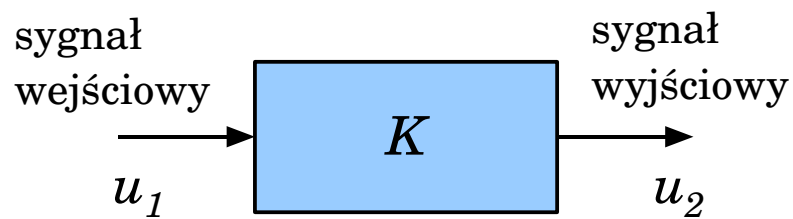
Wzmacniacz operacyjny w układach

z ujemnym i dodatnim sprzężeniem zwrotnym

Sprężenie zwrotne

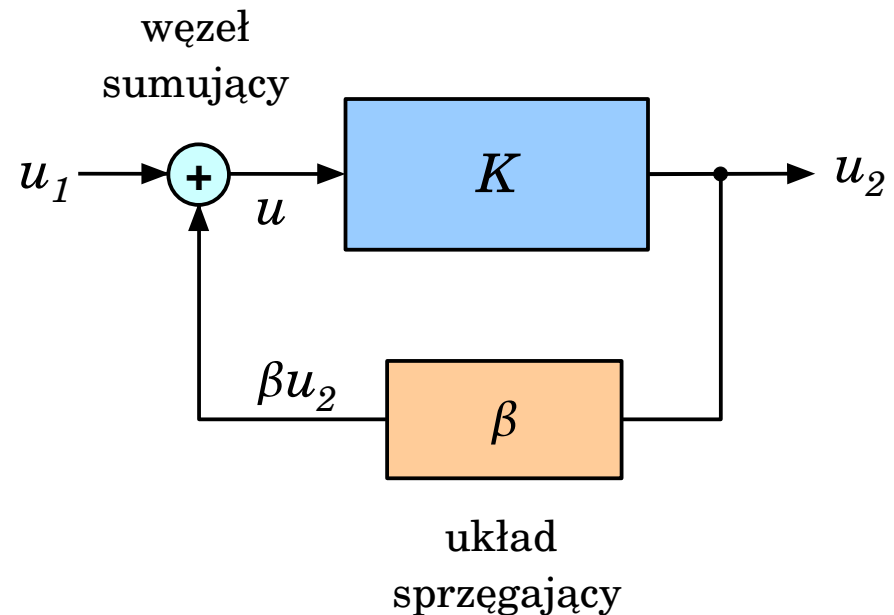
Sprężeniem zwrotnym nazywa się oddziaływanie skutku na przyczynę. Za pomocą sprzężenia zwrotnego można wpływać na własności urządzeń elektronicznych. Podstawowym układem elektronicznym, w którym stosuje się sprzężenie zwrotne jest wzmacniacz. Część sygnału wyjściowego, zwana sygnałem zwrotnym, zostaje skierowana do wejścia układu i zsumowana z sygnałem wejściowym.

Wzmacniacz bez sprzężenia
zwrotnego



$$u_2(t) = Ku_1(t)$$

Wzmacniacz ze sprzężeniem
zwrotnym



Sprężenie zwrotne

Wpływ sprzężenia zwrotnego na pracę wzmacniacza omówimy na przykładzie układu, w którym fazy sygnałów na wejściu i wyjściu wzmacniacza są zgodne (K – rzeczywiste dodatnie), a faza napięcia zwrotnego może być zgodna ($\beta > 0$) lub przeciwna ($\beta < 0$) w porównaniu z fazą napięcia wejściowego.

W węźle sumującym:

$$u = u_1 + \beta u_2$$

Na wyjściu:

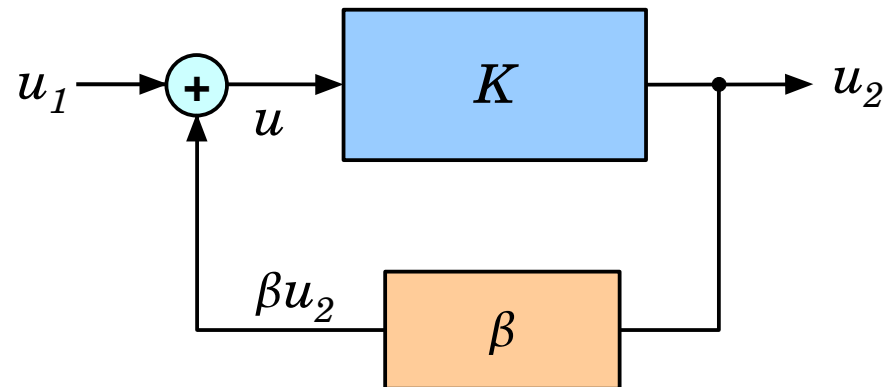
$$u_2 = K u = K (u_1 + \beta u_2)$$

czyli

$$u_2 = \frac{K}{1 - \beta K} u_1$$

Całkowite wzmocnienie układu:

$$K_t = \frac{u_2}{u_1} = \frac{K}{1 - \beta K}$$

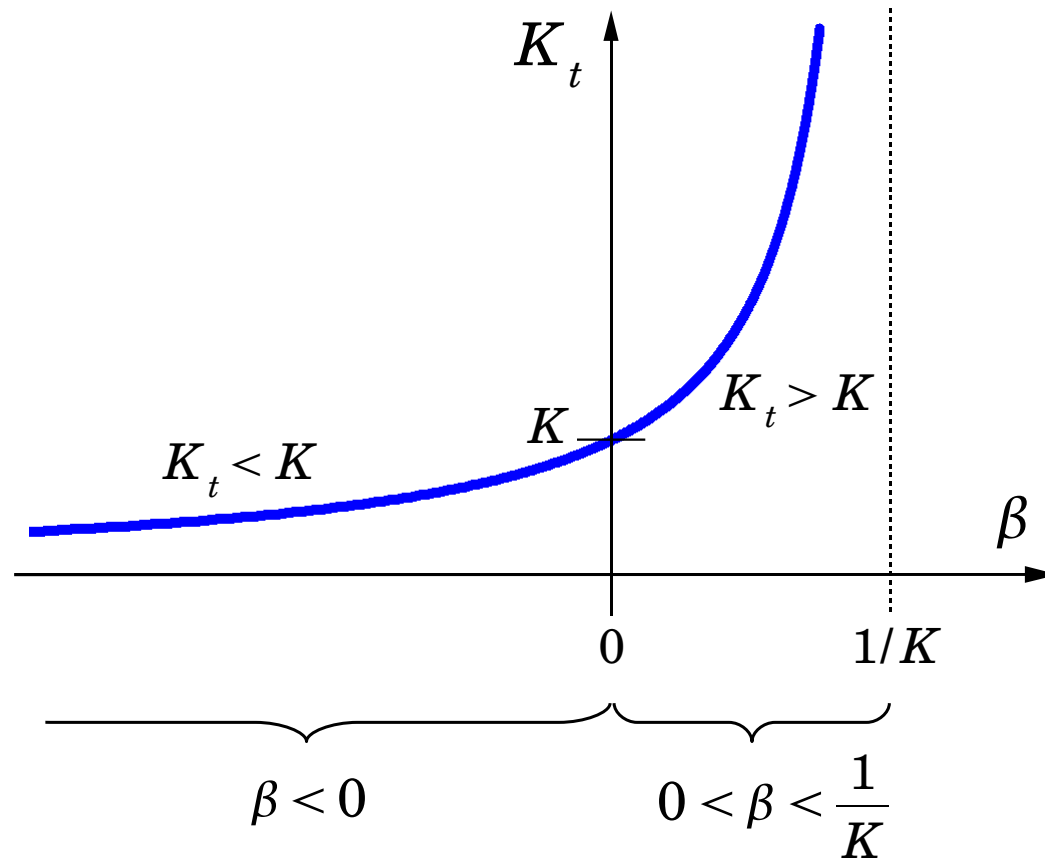


Jeżeli wzmocnienie K jest bardzo duże, tak że $|\beta K| \gg 1$, to wzmocnienie całkowite takiego układu jest określone przez układ sprzęgający i nie zależy od K :

$$K_t \approx -\frac{1}{\beta}$$

Sprężenie zwrotne

$$K_t = \frac{1}{\frac{1}{K} - \beta}$$



Sprężenie zwrotne: **ujemne**

dodatnie

Sprężenie zwrotne

Ujemne sprzężenie zwrotne:

Fazy sygnału wejściowego i sygnału sprzężenia zwrotnego są przeciwne ($\beta < 0$).
Całkowite wzmocnienie układu mniejsze od wzmocnienia samego wzmacniacza.
Duża stabilność pracy układu. Parametry układu ze wzmacniaczem o dużym wzmocnieniu zależą wyłącznie od parametrów układu sprzężenia zwrotnego, a te mogą być bardzo stabilne (układy sprzęgające buduje się często tylko z elementów biernych).

Zmniejszają się szумы i zniekształcenia sygnałów.

Zwiększa się górna częstotliwość graniczna (szersze pasmo przenoszenia).

Modyfikacja impedancji wejściowej i wyjściowej.

Dodatnie sprzężenie zwrotne:

Fazy sygnału wejściowego i sygnału sprzężenia zwrotnego są zgodne ($\beta > 0$).

Efektywne wzmocnienie ulega zwiększeniu.

Jeżeli $\beta K \rightarrow 1$ to oczekujemy, że wzmocnienie dążyć będzie do nieskończoności.

W rzeczywistości wzrost wzmocnienia jest ograniczony – sygnał wyjściowy nie może być większy niż napięcie zasilające wzmacniacz. W układach takich dzięki silnemu sprzężeniu następuje generacja drgań co wykorzystywane jest do budowy generatorów.

Układy z $\beta K < 1$ stosuje się rzadko z uwagi na małą stabilność pracy oraz wzrost zniekształceń sygnałów.

Wzmacniacz operacyjny

Wzmacniacz operacyjny jest to wzmacniacz o bardzo dużym wzmacnieniu napięciowym, który posiada dwa wejścia i jedno wyjście.

Jedno z wejść (-) nosi nazwę odwracającego – sygnał wyjściowy jest przesunięty w fazie o 180° względem sygnału przyłożonego do tego wejścia. Drugie wejście (+) nazywa się nieodwracającym – sygnał wyjściowy jest zgodny w fazie z sygnałem podanym na to wejście.

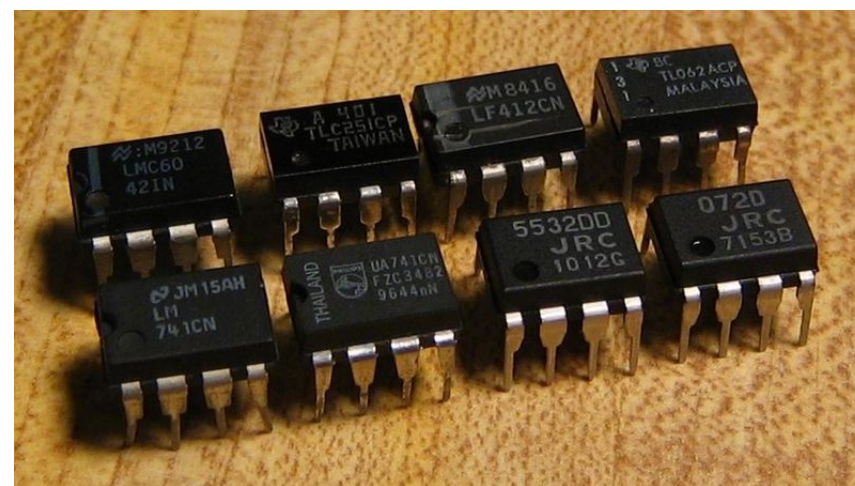
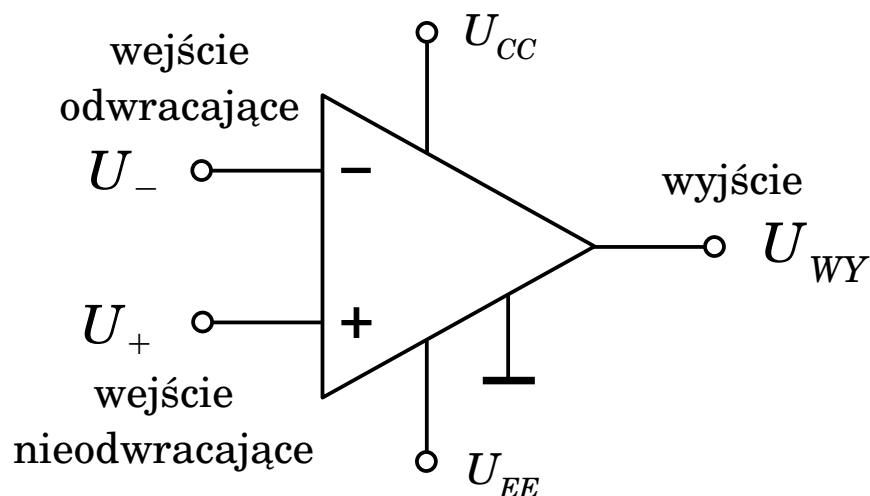
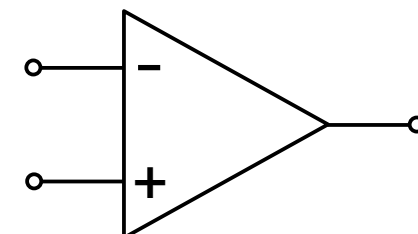
Wzmacniacz operacyjny realizuje funkcję:

$$U_{WY} = K(U_+ - U_-)$$

Wzmacniacz operacyjny jest przeznaczony zwykle do pracy z zewnętrznym obwodem sprzężenia zwrotnego, które decyduje o głównych własnościach całego układu. Wzmacniacz operacyjny jest najbardziej uniwersalnym układem analogowym o bardzo szerokich możliwościach zastosowań. Wzmacniacze operacyjne realizowane są w postaci układów scalonych.

Zasilane są zazwyczaj napięciami symetrycznymi ($U_{CC} = +15\text{ V}$, $U_{EE} = -15\text{ V}$).

Symbol:



Wzmacniacz operacyjny idealny

Własności idealnego wzmacniacza operacyjnego:

nieskończenie duże wzmocnienie napięciowe, $K \rightarrow \infty$,

nieskończenie duża rezystancja wejściowa,

rezystancja wyjściowa równa zero,

nieskończenie szerokie pasmo przenoszenia częstotliwości (od 0 do ∞),

napięcie wyjściowe równe zero przy równych napięciach wejściowych.

Wymienione własności powinny być zachowane niezależnie od temperatury. Założenia te umożliwiają przeprowadzenie bardzo prostej analizy układów wzmacniacza ze sprzężeniem zwrotnym.

Rzeczywisty wzmacniacz operacyjny

Wzmocnienie napięciowe w typowych wzmacniaczach $K = 10^4 - 10^7$,
w specjalistycznych do 10^{10} .

Górna granica pasma przenoszonych częstotliwości kilkadziesiąt MHz.

Impedancja wejściowa $10^4 - 10^{13} \Omega$.

Impedancja wyjściowa kilkadziesiąt Ω .

Maksymalna szybkość narastania napięcia wyjściowego rzędu kilku,
kilkudziesięciu $V/\mu s$.

Napięcie wyjściowe jest ograniczone, zwykle mniejsze o 1 – 2 V od napięcia zasilania.

Parametry wzmacniacza zależą od temperatury.

Wzmacniacz operacyjny w układach z ujemnym sprzężeniem zwrotnym

Wzmacniacz odwracający fazę

Wzmacniacz sumujący (sumator napięć)

Wzmacniacz nieodwracający fazy

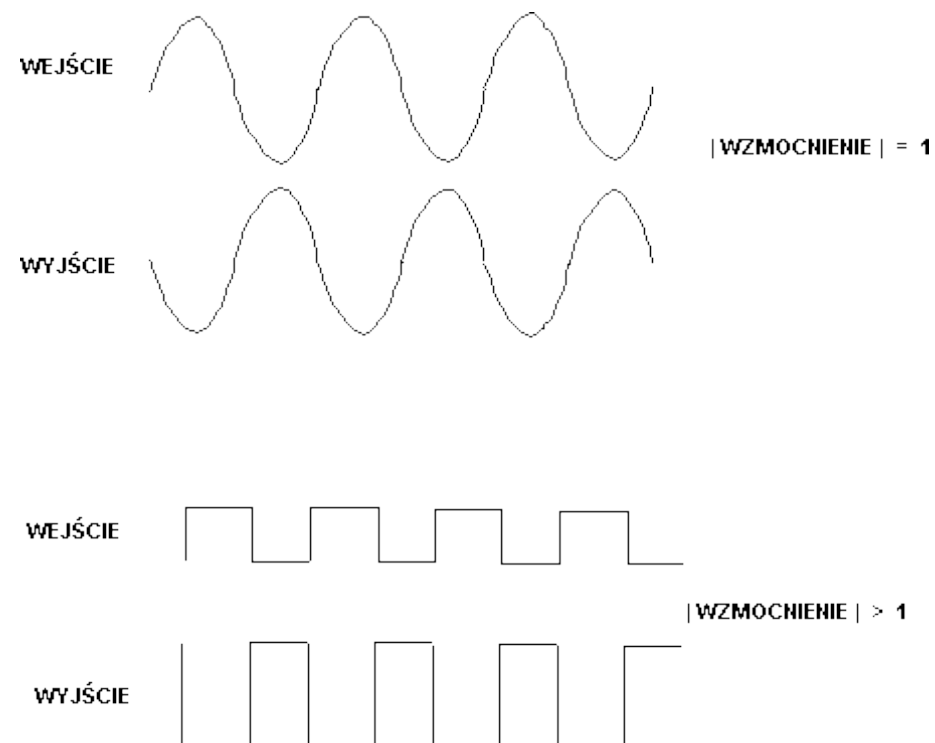
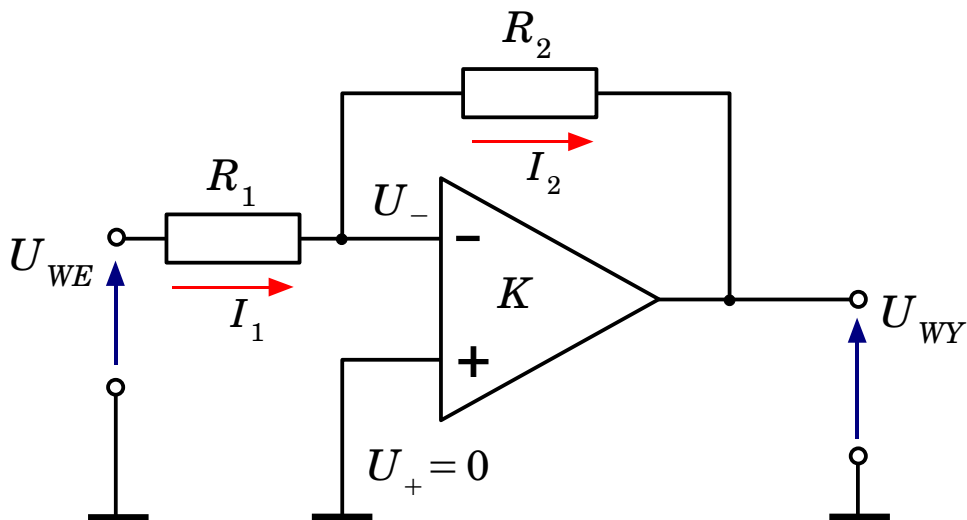
Wtórnik napięciowy

Konwerter prąd – napięcie

Wzmacniacz różnicowy

Wzmacniacz całkujący i różniczkujący

Wzmacniacz odwracający fazę



$$I_1 = \frac{U_{WE} - U_-}{R_1} \quad I_2 = \frac{U_- - U_{WY}}{R_2}$$

Z założenia o nieskończonej rezystancji wejściowej wynika, że cały prąd wejściowy płynący przez rezystor R_1 płynie również przez rezystor R_2 , a więc $I_1 = I_2$. Stąd

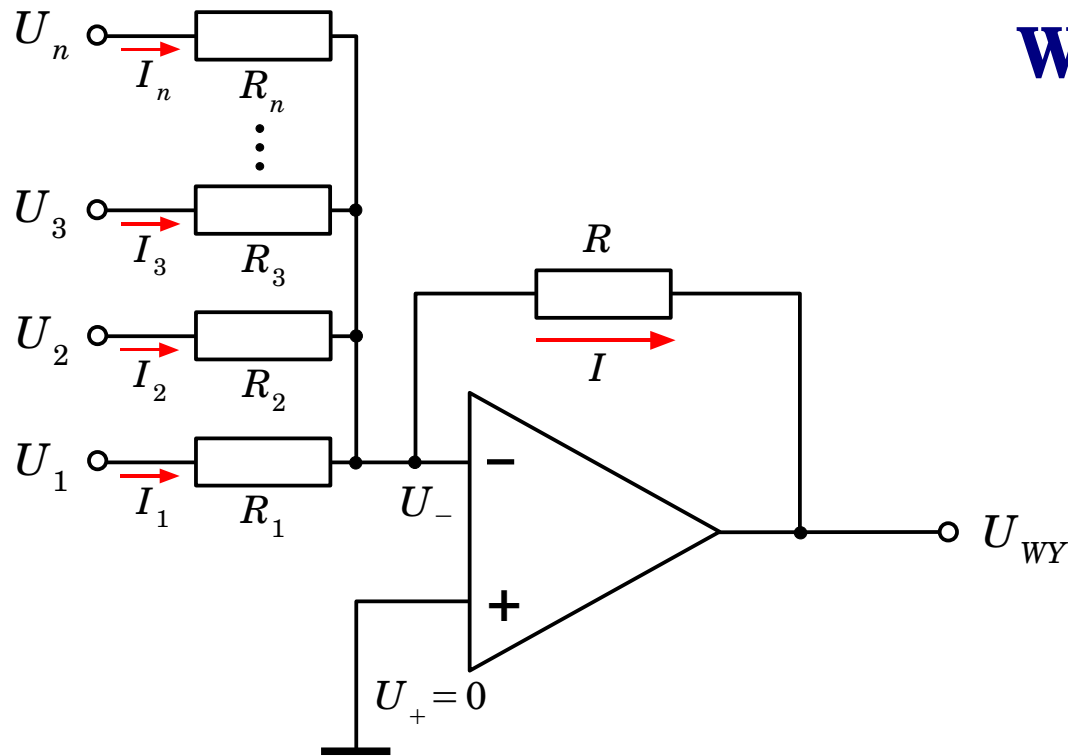
$$\frac{U_{WE} - U_-}{R_1} = \frac{U_- - U_{WY}}{R_2}$$

Założenie o nieskończenie dużym wzmacnieniu napięciowym K pozwala stwierdzić, że skończonej wartości napięcia na wyjściu odpowiada $U_+ - U_- \simeq 0$ czyli $U_- = U_+ = 0$. W rezultacie:

$$U_{WY} = -\frac{R_2}{R_1} U_{WE}$$

Rezystancja wejściowa: $R_{WE} = \frac{U_{WE}}{I_{WE}} = \frac{U_{WE}}{I_1} = R_1$

Wzmacniacz sumujący (sumator napięć)



$$\begin{cases} I_1 + I_2 + I_3 + \dots + I_n = I \\ U_- = U_+ = 0 \end{cases}$$



$$\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \dots + \frac{U_n}{R_n} = -\frac{U_{WY}}{R}$$

$$U_{WY} = -R \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \frac{U_3}{R_3} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right)$$

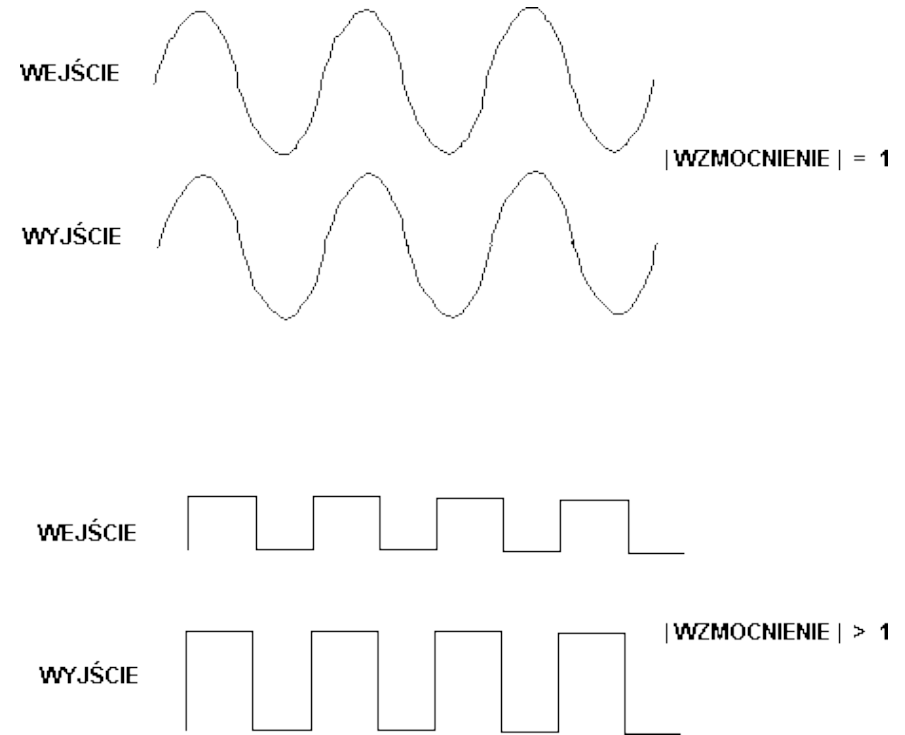
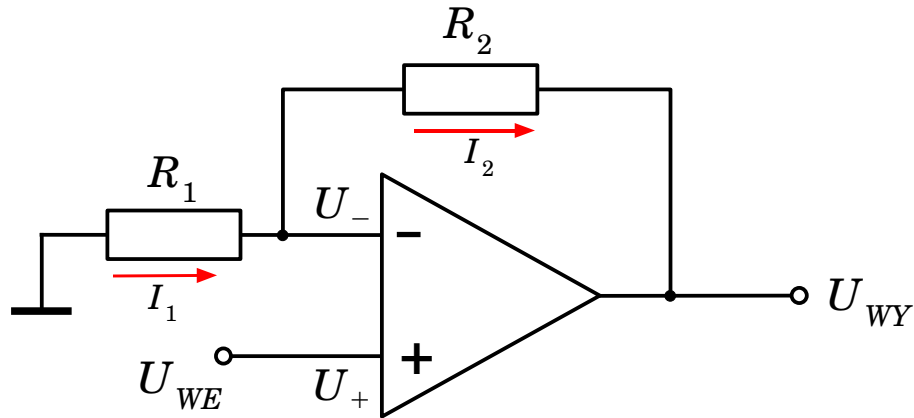
W szczególności, gdy:

$$R_1 = R_2 = R_3 = \dots = R_n = R$$



$$U_{WY} = -(U_1 + U_2 + U_3 + \dots + U_n)$$

Wzmacniacz nieodwracający fazy



$$\begin{cases} I_1 = I_2 \\ U_- = U_+ = U_{WE} \end{cases}$$



$$\frac{0 - U_-}{R_1} = \frac{U_- - U_{WY}}{R_2}$$

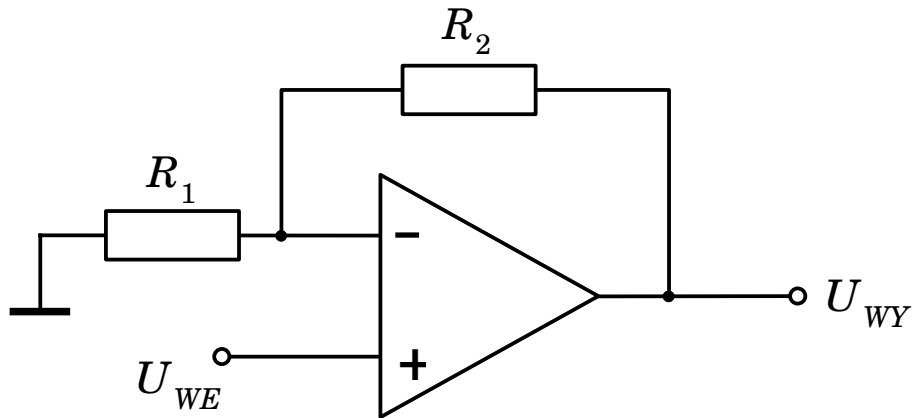
$$U_{WY} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{WE}$$

Rezystancja wejściowa:

Ponieważ wejście sygnału jest dołączone bezpośrednio do wzmacniacza operacyjnego to rezystancja wejściowa jest nieskończenie duża (dokładniej – rezystancja wejściowa układu jest równa iloczynowi wejściowej rezystancji różnicowej wzmacniacza operacyjnego pomnożonej przez współczynnik sprzężenia zwrotnego).

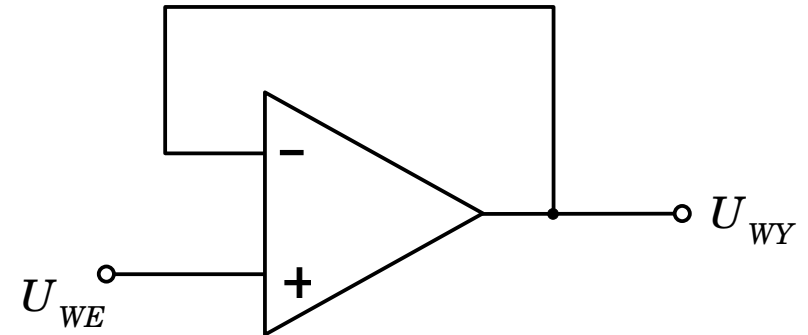
Wtórnik napięciowy

Przypadek wzmacniacza nieodwracającego fazy gdy $R_1 = \infty$ oraz $R_2 = 0$



$$U_{WY} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_{WE}$$

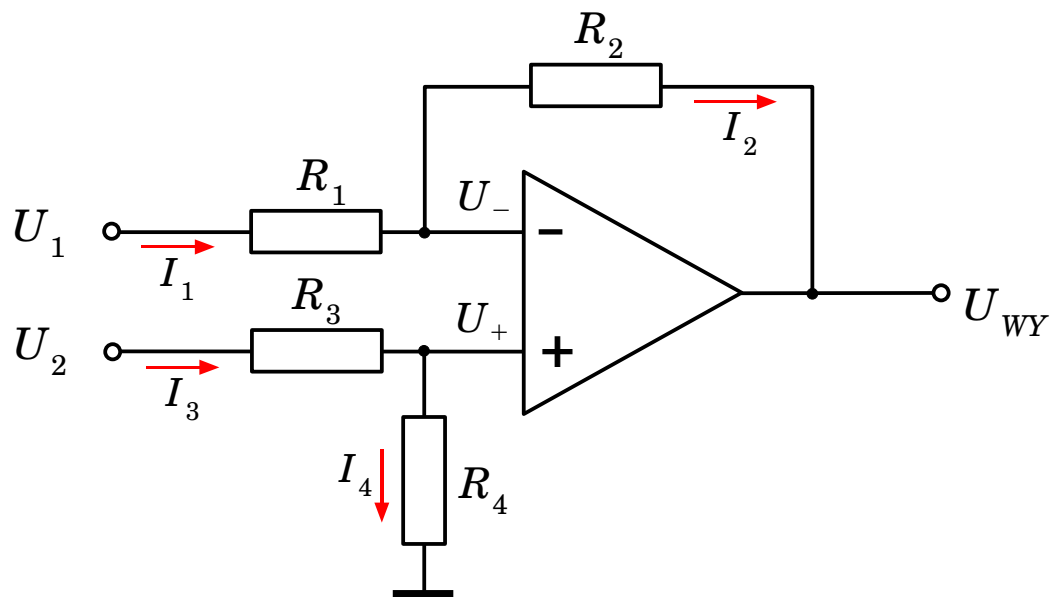
$$R_1 = \infty$$
$$R_2 = 0$$



$$U_{WY} = U_{WE}$$

Wtórnik napięciowy charakteryzuje się dużą rezystancją (impedancją) wejściową, a małą rezystancją wyjściową. Dzięki temu stosowany jest często jako układ separujący, ponieważ jego dołączenie nie obciąża układu badanego.

Wzmacniacz różnicowy



$$I_1 = I_2$$

$$I_3 = I_4$$

$$U_- = U_+ = I_4 R_4$$



$$U_1 = I_1 R_1 + U_- = I_1 R_1 + I_4 R_4$$

$$U_2 = I_3 R_3 + I_4 R_4$$

$$U_{WY} = U_- - I_2 R_2 = I_4 R_4 - I_2 R_2$$



$$U_{WY} = -\frac{R_2}{R_1} U_1 + \frac{R_4}{R_3 + R_4} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1} U_2$$

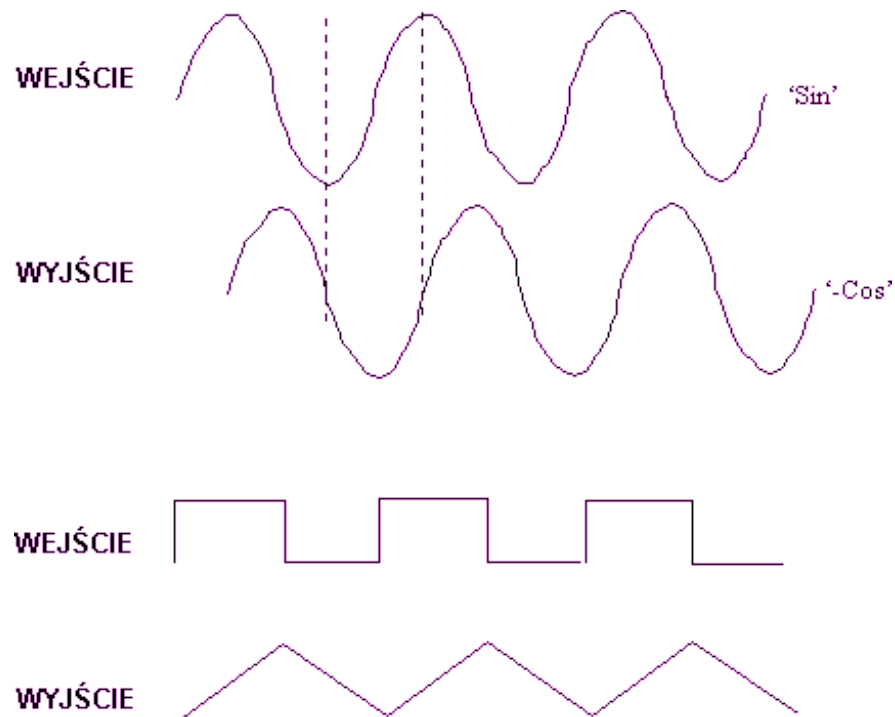
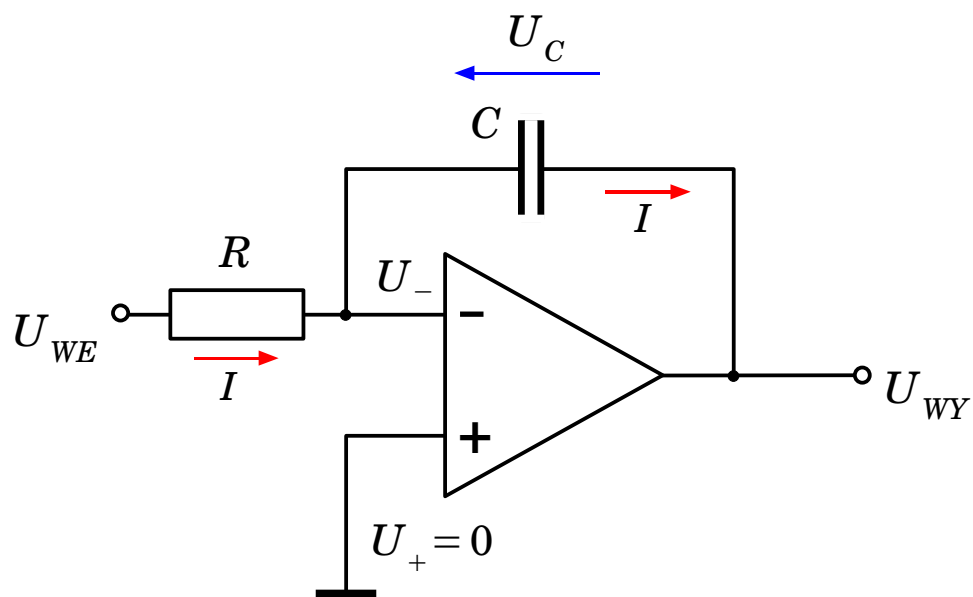
W przypadku gdy

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



$$U_{WY} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1)$$

Wzmacniacz całkujący



$$I(t) = \frac{U_{WE}(t)}{R} = \frac{dQ_C(t)}{dt} = C \frac{dU_C(t)}{dt} = -C \frac{dU_{WY}(t)}{dt}$$

$$U_{WE}(t) = -RC \frac{dU_{WY}(t)}{dt}$$

$$U_{WY}(t) = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_{WE}(t') dt' + U_0$$

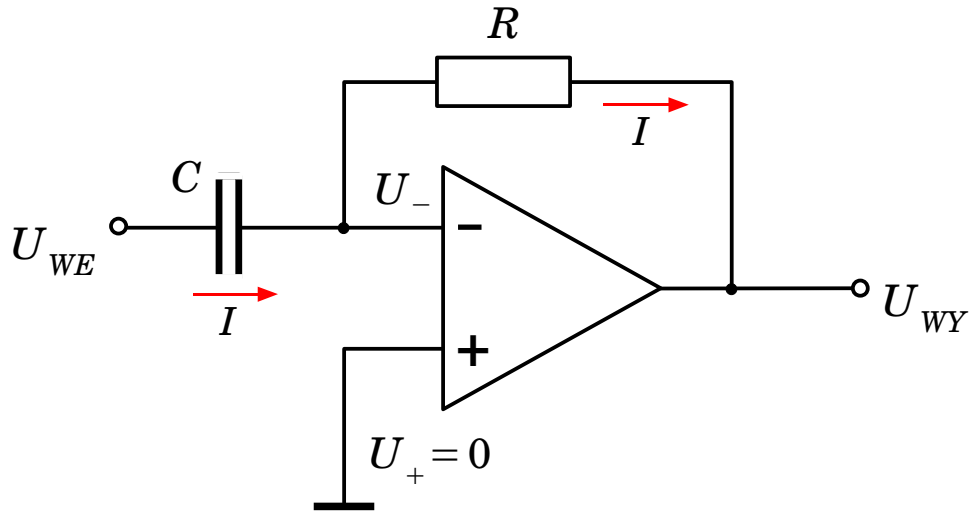
$$U_0 = U_{WY}(t=0)$$

W przypadku gdy:

$$\left| \begin{array}{l} U_{WE}(t) = \text{const} \\ U_0 = 0 \end{array} \right. \Rightarrow U_{WY}(t) = -\frac{U_{WE}}{RC} t$$

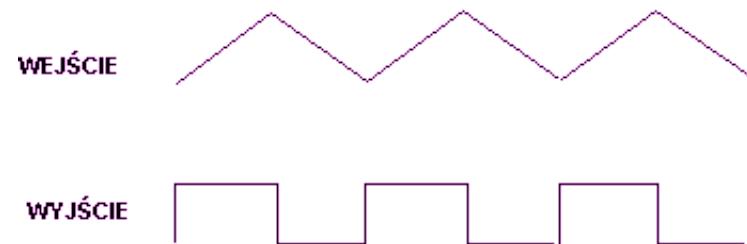
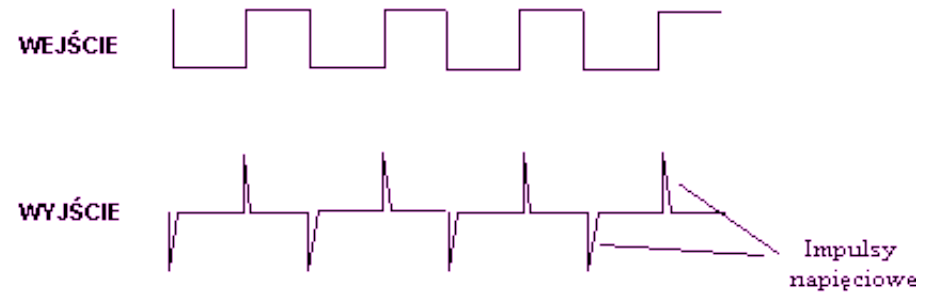
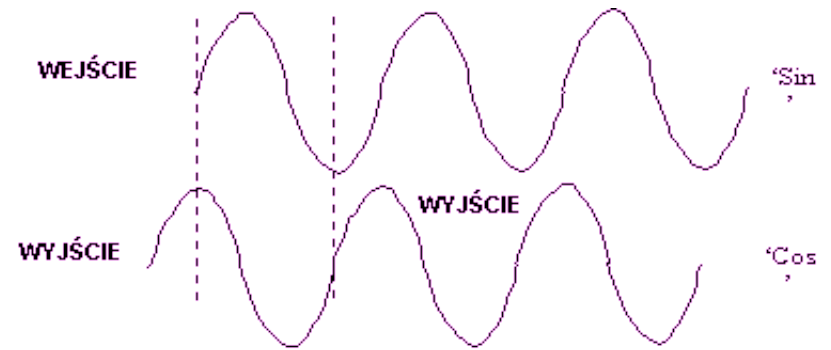
Liniowa zmiana napięcia
w czasie

Wzmacniacz różniczkujący

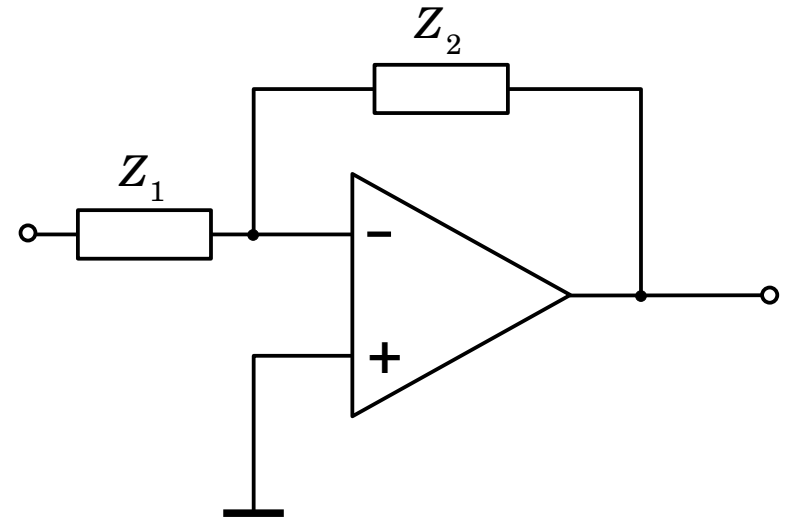
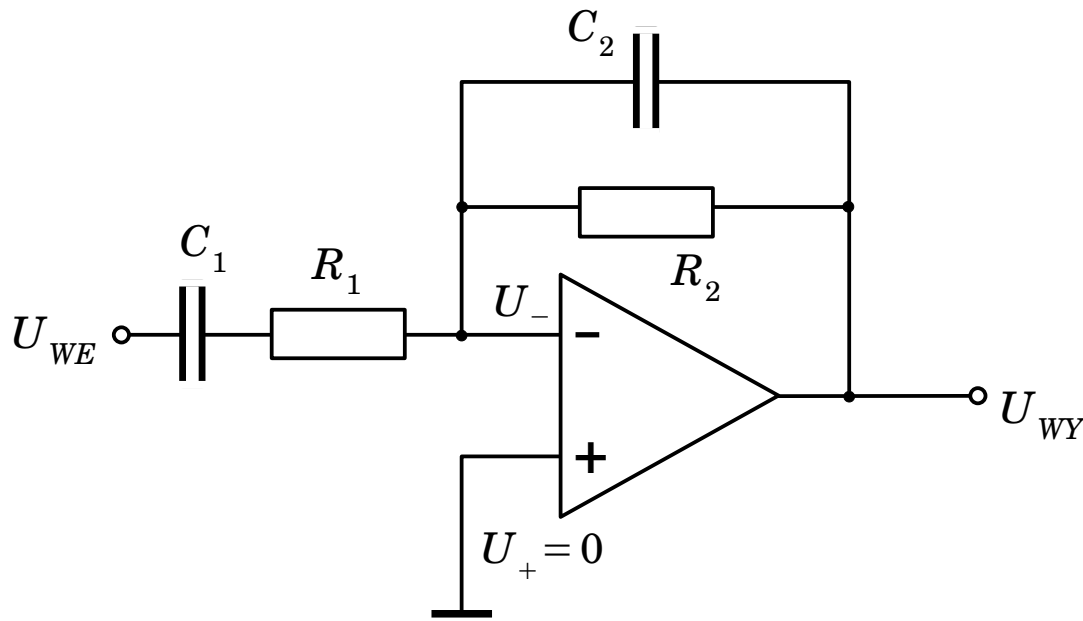


$$U_{WY} = -RI = -R \frac{dQ_C}{dt} = -RC \frac{dU_{WE}}{dt}$$

$$U_{WY}(t) = -RC \frac{dU_{WE}(t)}{dt}$$



Wzmacniacz różniczkująco-całkujący



Jest to rodzaj wzmacniacza odwracającego, w którym rezystancje zastąpione są impedancjami Z_1, Z_2 , gdzie Z_1 jest impedancją szeregowego połączenia C_1 oraz R_1 , natomiast Z_2 jest impedancją równoległego połączenia C_2 oraz R_2 . Wynika stąd, że dla sygnałów sinusoidalnych funkcja przejścia:

$$T(\omega) = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} = - \frac{Z_2}{Z_1}$$

gdzie $Z_1 = R_1 + \frac{1}{j\omega C_1}$ oraz $\frac{1}{Z_2} = \frac{1}{R_2} + j\omega C_2$

Wzmacniacz różniczkująco - całkujący

$$T(\omega) = -\frac{Z_2}{Z_1} = \dots = -\frac{j\frac{\omega}{\omega_0}}{\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_1}\right)\left(1 + j\frac{\omega}{\omega_2}\right)}$$

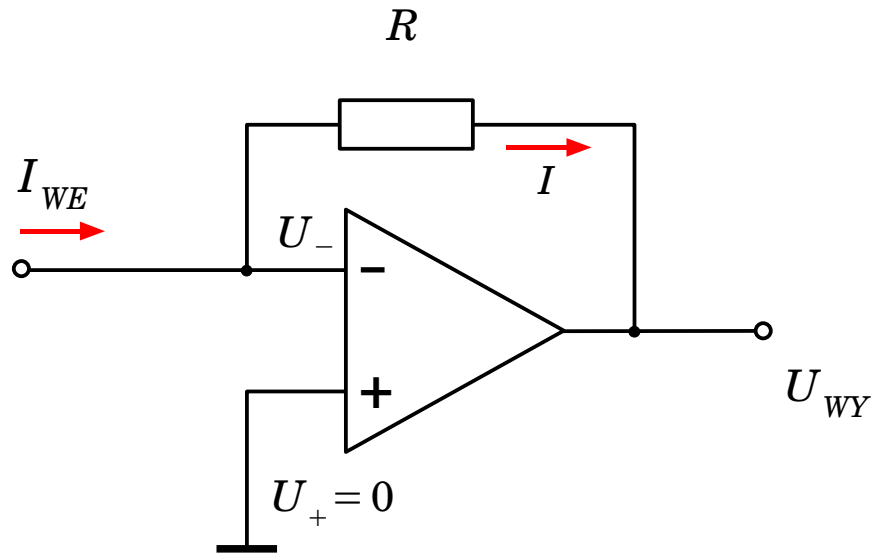
gdzie: $\omega_0 = \frac{1}{R_2 C_1}$, $\omega_1 = \frac{1}{R_1 C_1}$, $\omega_2 = \frac{1}{R_2 C_2}$

Charakterystyka amplitudowa:

$$|T(\omega)| = \sqrt{T T^*} = \frac{\omega}{\omega_0} \frac{1}{\sqrt{\left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_1}\right)^2\right)\left(1 + \left(\frac{\omega}{\omega_2}\right)^2\right)}}$$

Układ posiada charakterystykę filtra środkowoprzepustowego z częstotliwościami granicznymi ω_1 , ω_2 .

Konwerter prąd-napięcie



$$\left| \begin{array}{l} I = I_{WE} \\ U_- = U_+ = 0 \end{array} \right. \longrightarrow \boxed{U_{WY} = -RI_{WE}}$$

Napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do natężenia prądu wejściowego.

Układ ten pozwala w szczególności na uproszczenie pomiarów mikroprądów, np. dla $I_{WE} \simeq 1 \mu\text{A}$, stosując opornik $R = 1 \text{ M}\Omega$, uzyskuje się łatwo mierzalne napięcie $U_{WY} \simeq 1 \text{ V}$.

Wzmacniacz operacyjny z dodatnim sprzężeniem zwrotnym

Przerzutniki

Przerzutniki są to układy elektroniczne wytwarzające prostokątne przebiegi napięciowe w wyniku szybkich procesów przełączania (przerzutów) pomiędzy różnymi stanami. W przerzutnikach dwustanowych wyróżnić można dwie fazy odpowiadające niskiemu i wysokiemu poziomowi napięcia wyjściowego. Główne rodzaje:

Przerzutniki bistabile – dwa stany stabilne. Dla wymuszenia przejścia z jednego stanu do drugiego konieczne jest doprowadzenie zewnętrznego sygnału wyzwającego.

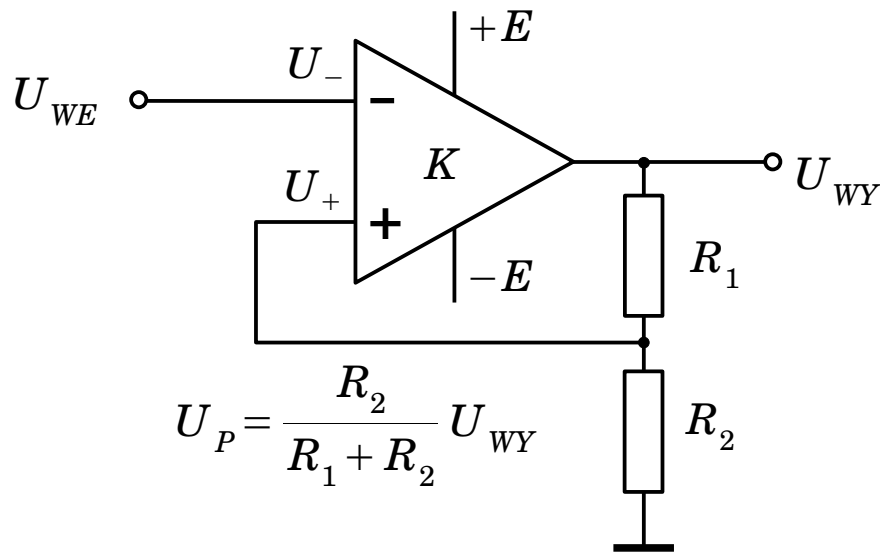
Przerzutniki monostabilne – jeden stan stabilny. Zewnętrzny sygnał wyzwający powoduje przejście do drugiego stanu, który jest stanem niestabilnym. Po pewnym czasie układ samoczynnie powraca do stanu stabilnego.

Przerzutniki astabilne – brak stanów stabilnych. Następują samoczynne przerzuty pomiędzy dwoma stanami bez udziału sygnału zewnętrznego. Układ jest generatorem przebiegów prostokątnych.

Przerzutnik bistabilny

/ Przerzutnik dwustanowy /

/ Przerzutnik Schmitta /



$$U_{WY} = K(U_+ - U_-)$$

$$U_- = U_{WE}$$

$$U_+ = U_P$$

W omawianym przerzutniku dodatnie sprzężenie zwrotne realizowane jest przez oporowy dzielnik napięcia. Napięcie wyjściowe przyjmuje wartości: maksymalną $(+E)$ lub minimalną $(-E)$, które określone są przez napięcia zasilania wzmacniacza operacyjnego $+E$, $-E$.

Jeżeli $U_- < U_+$ to $U_{WY} = +E$.

Jeżeli $U_- > U_+$ to $U_{WY} = -E$.

Gdy na wyjściu napięcie wynosi $+E$, to stan ten utrzymuje się jako stan stabilny gdy $U_- < U_+$ czyli

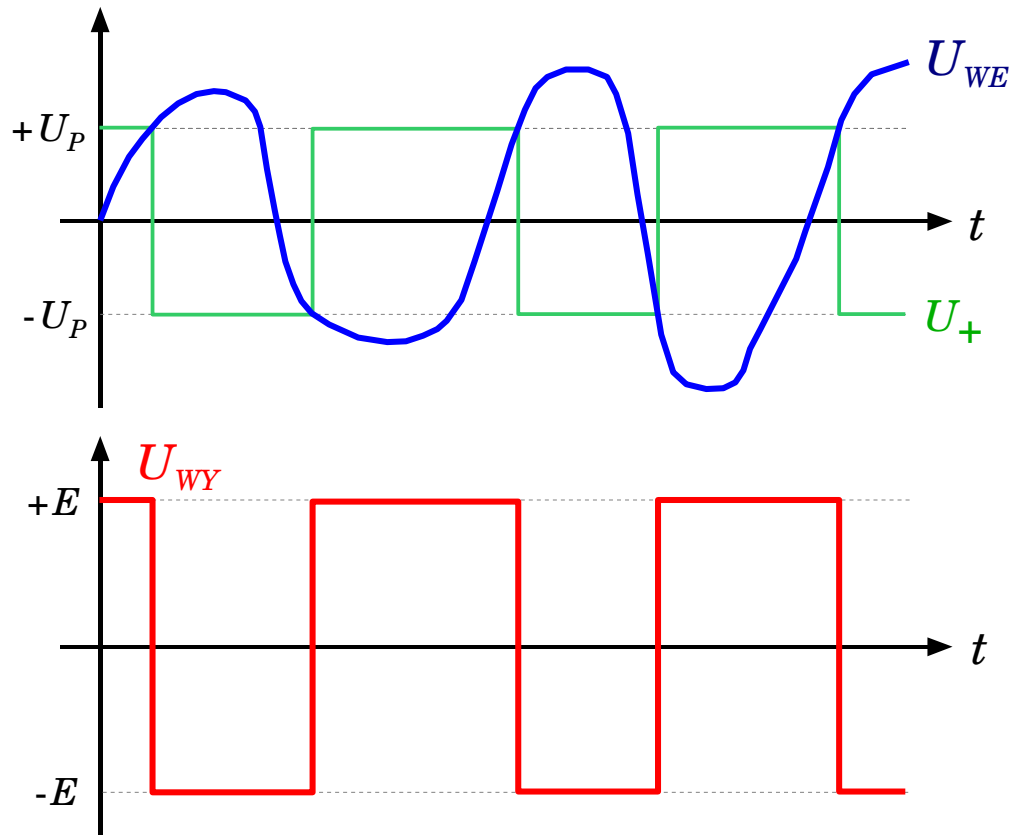
$$U_{WE} < U_+ = U_P = \frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

Wzrost napięcia wejściowego powyżej tej wartości U_P spowoduje przerzut napięcia na wyjściu z $+E$ na $-E$. Jednocześnie z tą zmianą zmienia się U_P , które od tego momentu wynosi

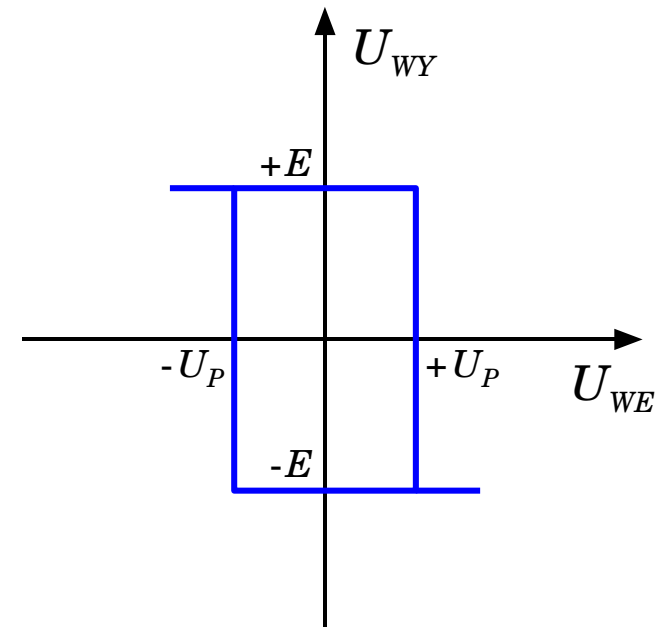
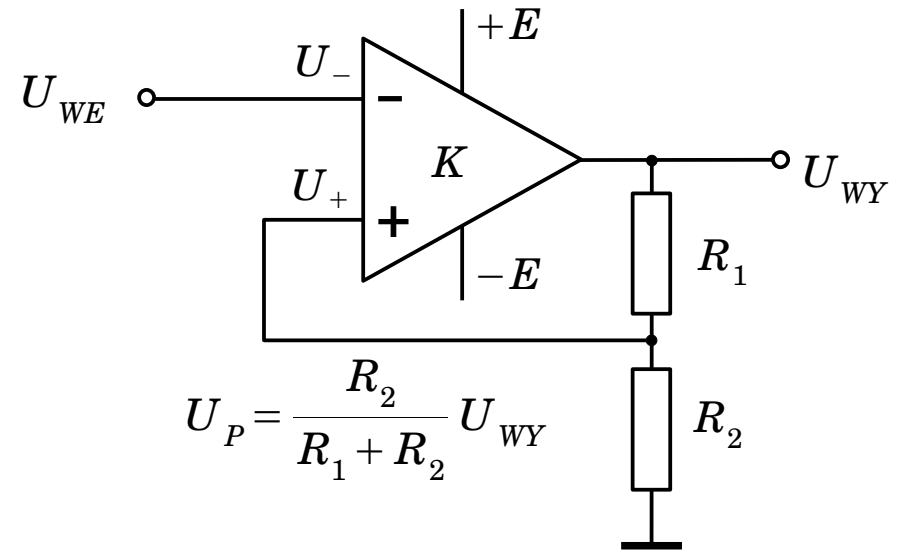
$$U_+ = U_P = -\frac{R_2}{R_1 + R_2} E$$

Stan z napięciem wyjściowym $-E$ pozostanie stabilny tak długo dopóki U_{WE} będzie większe od aktualnej wartości napięcia U_P .

Przerzutnik bistabilny

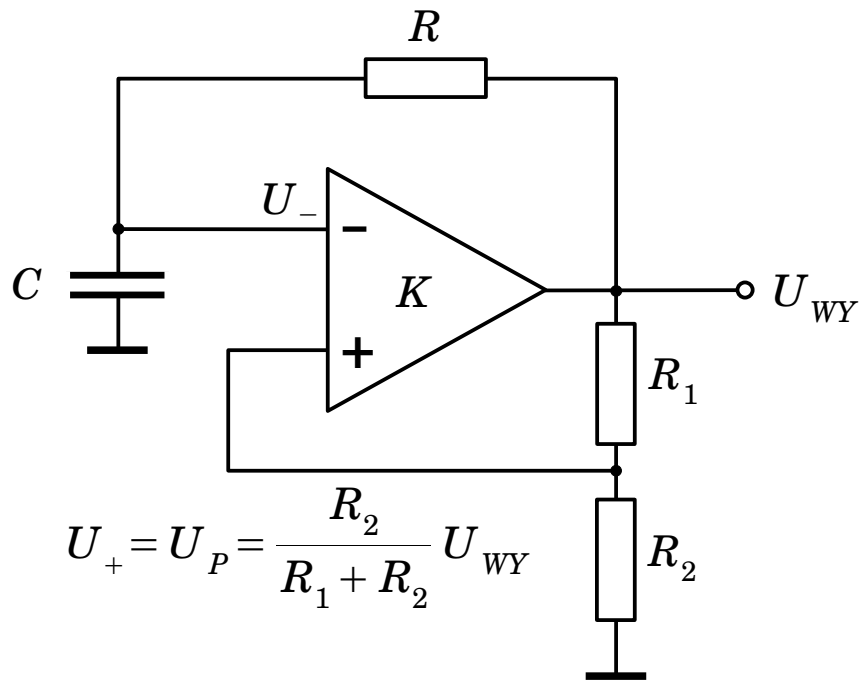


Reakcja układu bistabilnego na zadany przebieg napięcia wejściowego

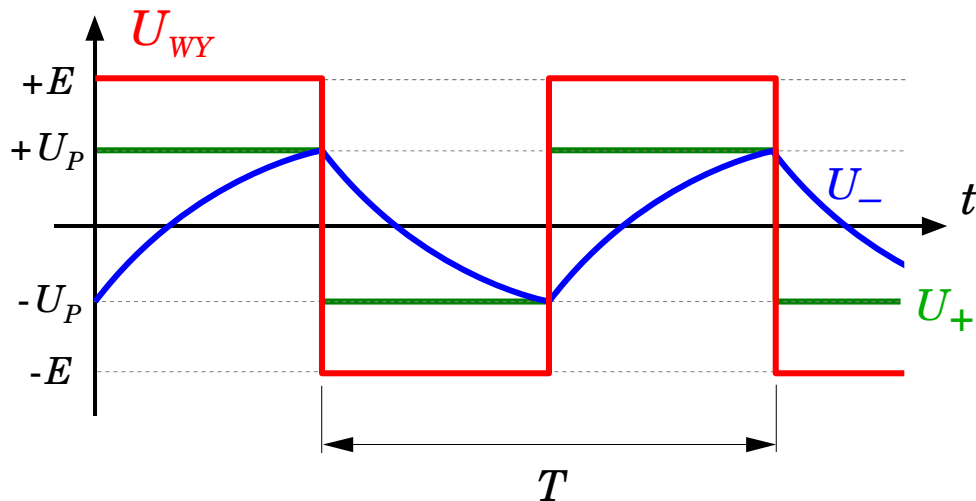


Pętla histerezy dla układu bistabilnego

Przerzutnik astabilny



Jeżeli na wejściu układu będziemy ładować (rozładowywać) kondensator przez prąd przepływający przez opornik R to uzyskamy układ, w którym następować będą cykliczne przejścia pomiędzy stanami $+E$ i $-E$ na wyjściu (układ generuje falę prostokątną o amplitudzie E). Zmiana napięcia wyjściowego z $+E$ na $-E$ następuje gdy rosnące napięcie ładującego się kondensatora osiągnie aktualne napięcie przerzutu czyli $+U_P$. Następna zmiana z $-E$ na $+E$ nastąpi gdy malejące napięcie na rozładowującym się kondensatorze spadnie do aktualnego napięcia przerzutu czyli $-U_P$. Można pokazać, że okres drgań układu wynosi:



$$T = 2RC \ln \frac{1+\gamma}{1-\gamma}$$

gdzie
$$\gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

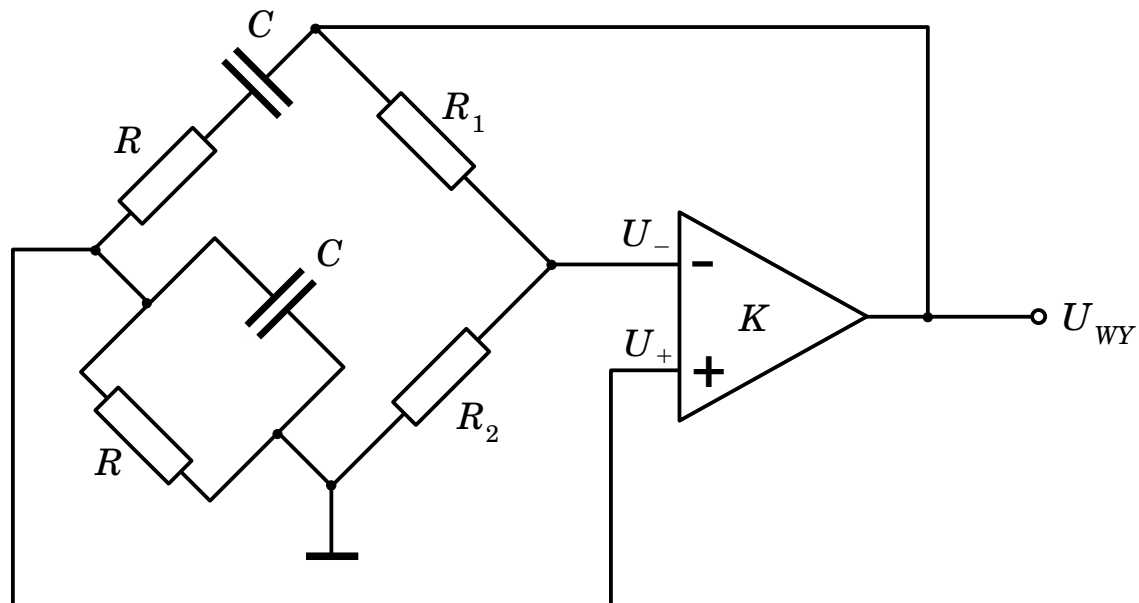
Generatory

Generatory są układami wytwarzającymi zmienne przebiegi elektryczne bez konieczności doprowadzenia z zewnątrz sygnału pobudzającego.

Jednym z rodzajów generatorów są generatory przebiegów sinusoidalnych.

Przykładem takiego generatora, zbudowanego na bazie wzmacniacza operacyjnego, jest generator z mostkiem Wiena. Generację drgań umożliwia odpowiednio silne dodatnie sprzężenie zwrotne $\beta \simeq 1/K$. Dla uzyskania generacji przebiegów sinusoidalnych wymagamy również, aby dla generowanej przez układ częstotliwości całkowite przesunięcie fazowe wprowadzone podczas przenoszenia sygnału przez wzmacniacz i układ sprzężenia zwrotnego wynosiło zero lub całkowitą wielokrotność 2π .

Generator z mostkiem Wienia



Warunkiem generacji fali sinusoidalnej przez układ jest, aby rezystancje spełniały zależność:

$$R_1 = 2R_2$$

Generowana jest wtedy fala o częstotliwości:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC}$$