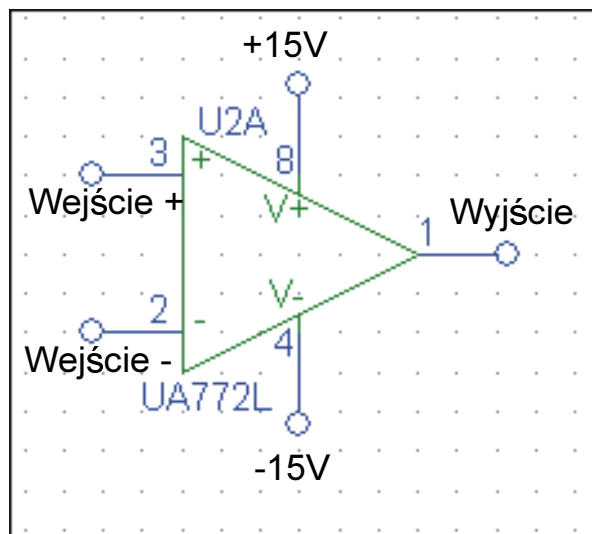


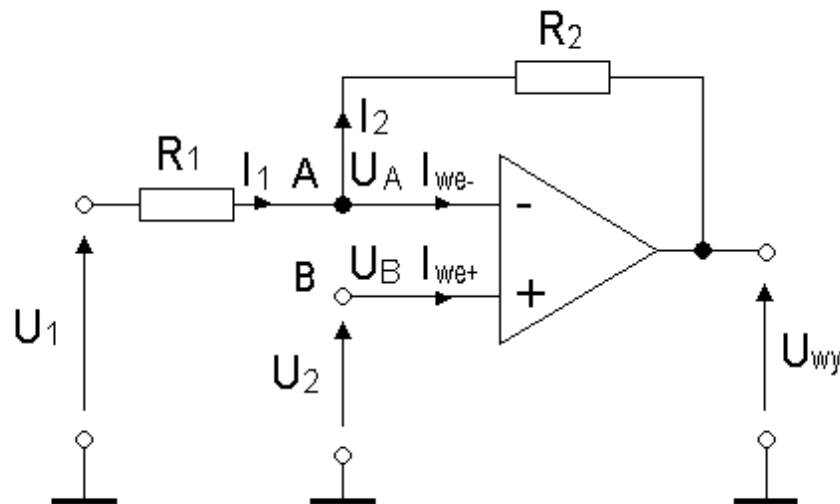
WZMACNIACZ OPERACYJNY



Podstawowe właściwości wzmacniaczy operacyjnych

Rodzaj wzmacniacza	Bipolarny	FET	MOS-FET	Idealny
Rezystancja wejściowa	250k Ω	10 ⁹ Ω	10 ¹² Ω	∞
Rezystancja wyjściowa	50 Ω	100 Ω	100 Ω	0
Napięcie zasilające	$\pm 15V$	$\pm 15V$	$\pm 15V$	$\pm \infty$
Częstotliwość graniczna	7Hz	10Hz	10Hz	∞

UKŁADY PRACY WZMACNIACZY OPERACYJNYCH



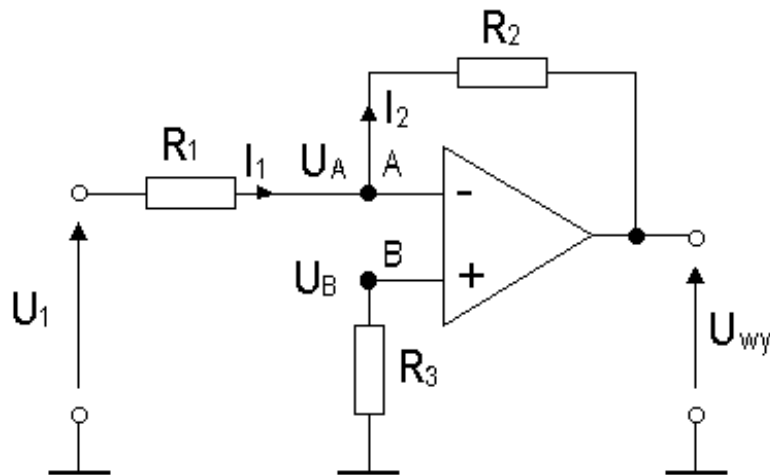
Analizę pracy wzmacniaczy operacyjnych (układów zawierających wzmacniacz operacyjny objęty sprzężeniem zwrotnym) przeprowadza się, stosując następującą procedurę:

1. Zakłada się, że:
 - rezystancja wejściowa wzmacniacza operacyjnego jest nieskończenie duża (wzmacniacz nie pobiera prądów wejściowych),
 - wartości prądów polaryzujących są równe zero:

$$I_{we-} = I_{we+} = 0$$

2. Korzystając z praw Kirchhoffa, układa się równania dla węzłów znajdujących się w układzie (np. dla węzła A i B).
3. Zakłada się, że różnica napięć $\Delta U = U_A - U_B$ jest prawie równa zero, a co za tym idzie $U_A = U_B$
4. Na podstawie otrzymanych równań wyznacza się zależność napięcia wyjściowego w funkcji napięcia wejściowego (ewentualnie napięć wejściowych).

WZMACNIACZ ODWRACAJACY



Podstawowy schemat wzmacniacza odwracającego przedstawiono na rysunku powyżej. Zaznaczono na nim węzły A i B oraz prądy płynące w układzie

$$I_1 = I_2$$

Dla węzła B nie układu się równań, ponieważ prądy polaryzujące są równe zero oraz

$$U_A = U_B = 0.$$

Węzeł B jest dołączony przez rezystor R_3 do masy układu, zatem potencjał w punkcie B jest równy zero - punkt masy pozornej. Równania poszczególnych prądów w układzie są następujące:

$$I_1 = \frac{U_1 - U_A}{R_1} \quad I_2 = \frac{U_A - U_{wy}}{R_2}$$

Ponieważ $I_1 = I_2$

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

zatem wzmocnienie napięciowe układu

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

Znak "-" oznacza odwrócenie fazy napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego. Rezystancja wejściowa układu jest równa R_1 , ponieważ punkt A jest punktem masy pozornej. Rezystancję wyjściową określa się zgodnie z zależnością obowiązującą dla układu ze sprzężeniem zwrotnym napięciowym równoległym. W celu uzyskania kompensacji błędu (napięcia niezrównoważenia) spowodowanego różnymi pod względem wartości prądami polaryzującymi I_{we+} i I_{we-} , wartość rezystancji R_3 powinna być równa wartości rezystancji wynikającej z równoległego połączenia rezystorów R_1 i R_2 . Jeżeli rezystory te będą miały jednakowe rezystancje, to otrzymuje się inwerter (wzmocnienie równe jeden).

WPLYW SKOŃCZONEJ WARTOŚCI WZMOCNIENIA

$$U_{wy} = k (U_B - U_A) = -k U_N$$

$$\frac{U_1 + \frac{U_{wy}}{k}}{R_1} = \frac{-\frac{U_{wy}}{k} - U_{wy}}{R_2}$$

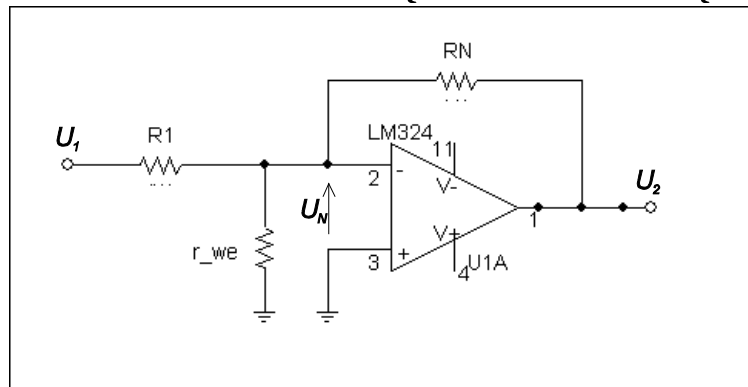
Wygodnie jest podać odwrotność wzmacnienia:

$$-\frac{U_1}{U_{wy}} = \frac{R_1}{R_2} \left(1 + \frac{1}{k}\right) + \frac{1}{k}$$

Dla dużych wartości wzmacnienia k można podać przybliżenie:

$$-\frac{U_1}{U_{wy}} = \frac{R_1}{R_2} \left(1 + \frac{1}{k}\right) + \frac{1}{k} \approx \frac{R_1}{R_2} + \frac{1}{k}$$

WZMACNIACZ ZE SKOŃCZONĄ REZYSTANCJĄ WEJŚCIOWĄ



Rezystancję wejściową wyodrębniono ze wzmacniacza jako r_{we}
 Jeżeli $k \rightarrow \infty$ to: $U_N \rightarrow 0$ i r_{we} nie ma znaczenia.

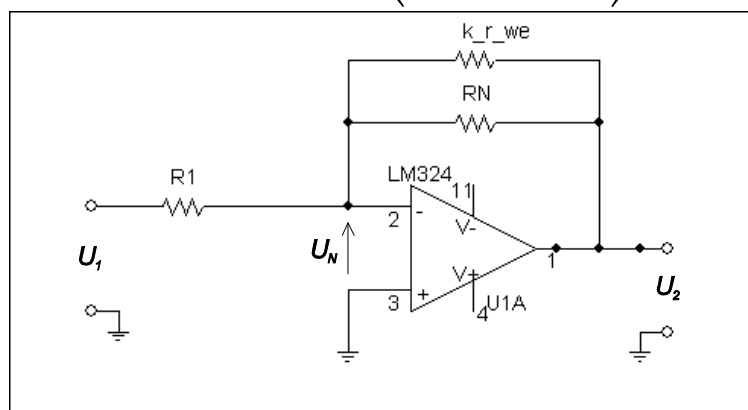
$$U_2 = -k U_N$$

$$\frac{U_1 + \frac{U_2}{k}}{R_1} = \frac{-\frac{U_2}{k}}{r_{we}} - \frac{\frac{U_2}{k} + U_2}{R_N}$$

$$-\frac{U_1}{U_2} = \frac{1}{k} \left(1 + \frac{R_1}{r_{we}} + \frac{R_1}{R_N} \right) + \frac{R_1}{R_N} = \frac{1}{k_U}$$

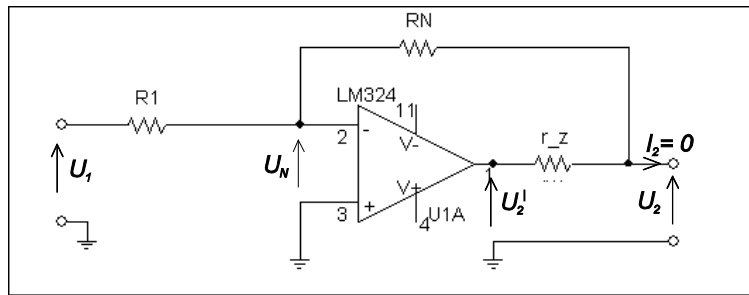
gdy $k \gg 1$:

$$-\frac{1}{k_U} = \frac{R_1}{R_N} + \frac{R_1}{k r_{we}} + \frac{1}{k} = R_1 \left(\frac{1}{R_N} + \frac{1}{k r_{we}} \right) + \frac{1}{k} = \frac{R_1}{R_z} + \frac{1}{k}$$



Np. $R_1 = 1\text{k}\Omega$, $R_N = 100\text{k}\Omega$, $r_{we} = 100\text{k}\Omega$ $k = 10^4 \Rightarrow k r_{we} = 10^9\Omega$

WPLYW REZYSTANCJI WYJŚCIOWEJ



Jeżeli $k \rightarrow \infty$ to r_z nie ma wpływu na transmitancję k_U

$$-\frac{U_1}{U_2^|} = \frac{1}{k} + \frac{R_1}{R_N + r_z}$$

$$\frac{U_2^| - U_2}{r_z} = \frac{U_2 - U_N}{R_N} \quad \text{zwykle: } U_2^| \gg U_N$$

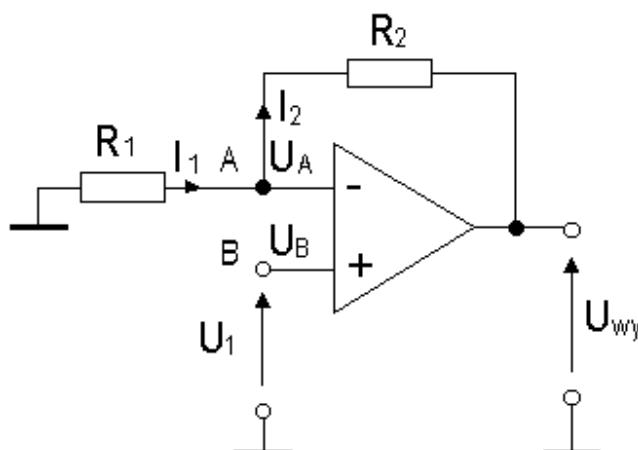
$$U_2^| \cong U_2 \left(\frac{r_z}{R_N} + 1 \right) \quad \frac{U_2^|}{U_2} = \frac{r_z + R_N}{R_N}$$

$$-\frac{U_1}{U_2} = -\frac{U_1}{U_2^|} \frac{U_2^|}{U_2} = \left(\frac{1}{k} + \frac{R_1}{R_N + r_z} \right) \left(\frac{r_z + R_N}{R_N} \right) = \frac{r_z + R_N + k R_1}{k R_N}$$

$$\frac{1}{k_U} = \frac{1}{k} + \frac{R_1 + \frac{r_z}{k}}{R_N} \quad \Rightarrow \text{rezystancja włączona szeregowo z } R_1$$

Np. $k = 10^4$, $r_z = 100\Omega$, $R_1 = 100\text{k}\Omega$ wtedy: $r_z/k = 10^{-2}\Omega \ll R_1$

WZMACNIACZ NIEODWRACAJĄCY



Schemat wzmacniacza nieodwracającego przedstawiono na rysunku powyżej. Sygnał wejściowy jest podawany na wejście nie odwracające wzmacniacza operacyjnego.

$$I_1 = I_2 \quad U_B = U_1 = U_A$$

$$\frac{U_1}{R_1} = \frac{U_{wy} - U_1}{R_2} \quad k_U = \frac{U_{wy}}{U_1} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Napięcia na wejściu odwracającym i wejściu nieodwracającym mają taką samą wartość, zatem rezystancja wejściowa układu jest równa rezystancji wzmacniacza operacyjnego dla sygnału współbieżnego i bardzo duża:

$$R_{we} = \frac{U_1}{I_+} = \frac{U_{wy}}{k_U I_+} = \frac{(U_B - U_A)k}{I_+ k_U} = r_{we} \frac{k}{k_U}$$

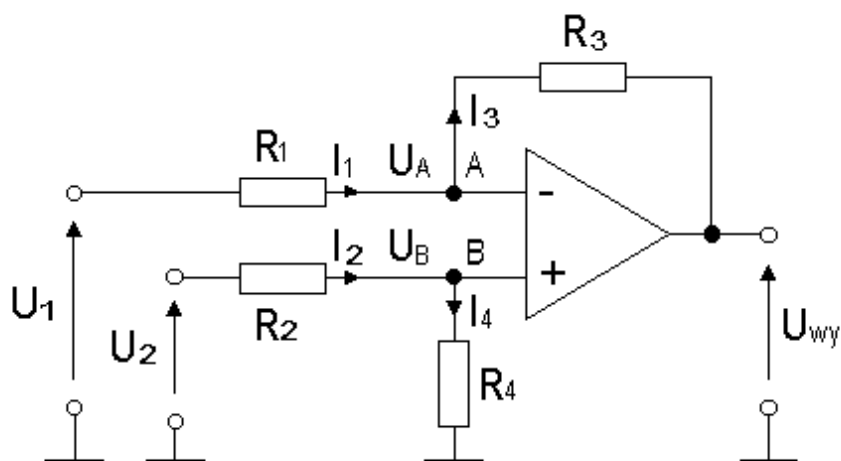
Np. $r_{we} = 100\text{k}\Omega$, $k = 10^5$, $k_U = 100 \Rightarrow R_{we} = 10^8\Omega = 100\text{M}\Omega$.

Skończone wzmocnienie wzmacniacza operacyjnego:

$$U_A = \frac{R_1}{R_N + R_1} U_2 \quad U_B - U_A = \frac{U_2}{k} = U_1 - U_A = U_1 - \frac{R_1}{R_N + R_1} U_{wy}$$

$$\frac{1}{k_U} = \frac{U_1}{U_{wy}} = \frac{1}{k} + \frac{R_1}{R_1 + R_N} \text{ podobnie jak dla wzm. odwracającego}$$

WZMACNIACZ ODEJMUJĄCY



Schemat wzmacniacza odejmującego (nazywanego często wzmacniaczem różnicowym) pokazano powyżej. Realizuje on odejmowanie napięć wejściowych w odpowiednim stosunku zależnym od wartości rezystorów znajdujących się w układzie. Analizę pracy tego wzmacniacza przeprowadza się w podobny sposób jak poprzednio:

$$U_A = U_B \quad I_1 = I_3 ; \quad I_2 = I_4$$

$$\frac{U_1 - U_A}{R_1} = \frac{U_A - U_{wy}}{R_2} \quad \text{stad} \quad U_A = \frac{U_{wy} R_1 + U_1 R_3}{R_1 + R_3}$$

$$\frac{U_2 - U_B}{R_2} = \frac{U_B}{R_4} \quad \text{stad} \quad U_B = \frac{U_2 R_4}{R_2 + R_4}$$

Po przekształceniu wzorów otrzymuje się

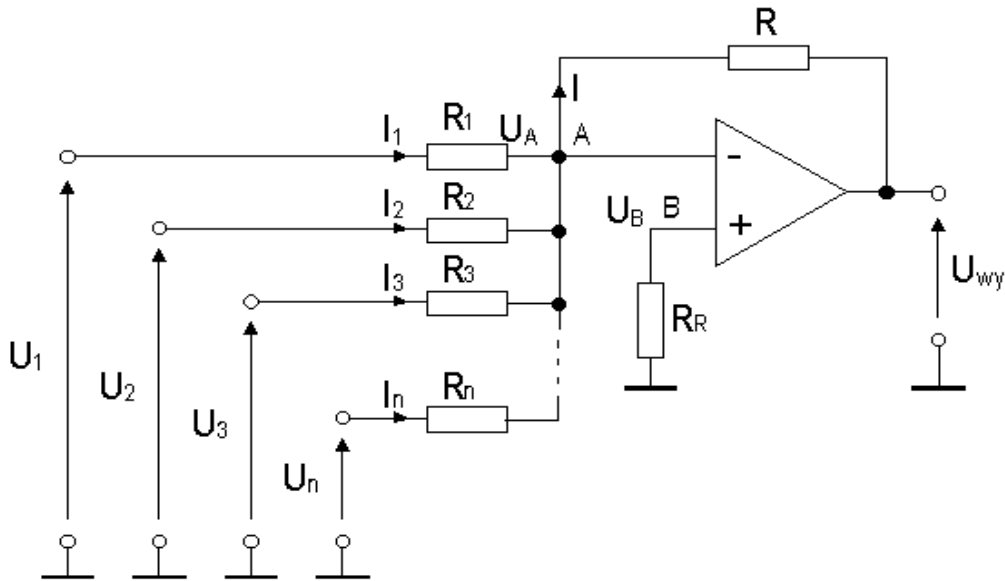
$$U_{wy} = -\frac{R_3}{R_1} U_1 + \frac{(R_1 + R_3) R_4}{(R_2 + R_4) R_1} U_2$$

Jeżeli będzie spełniony warunek

$$\frac{R_3}{R_1} = \frac{R_4}{R_2} \quad \text{to} \quad U_{wy} = -\frac{R_3}{R_1} (U_2 - U_1)$$

$R_{we-} = R_1 + R_3$, $R_{we+} = R_2 + R_4$. Kompensacja: $R_1 \parallel R_3 = R_2 \parallel R_4$.

WZMACNIACZ SUMUJĄCY



Oprócz odejmowania napięć wzmacniacz operacyjny może wykonywać również ich dodawanie (rysunek powyżej):

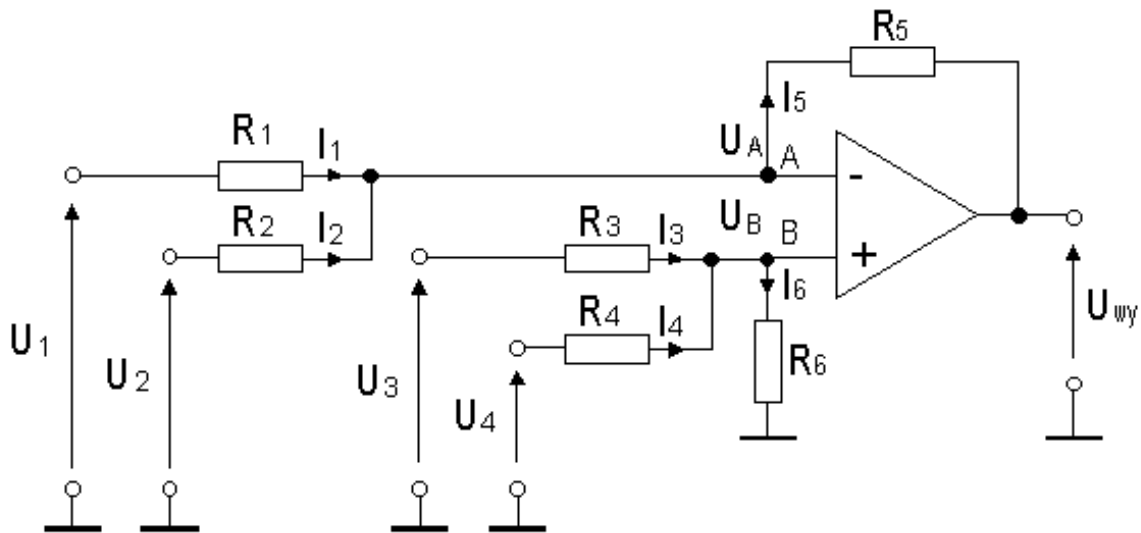
$$U_A = U_B = 0 ; \quad I_1 + I_2 + \dots + I_n = I$$

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

Rezystancja wejściowa: $R_{we} = R_1$ - dla sygnału U_1 ,
 $R_{we} = R_2$ - dla sygnału U_2 itd.

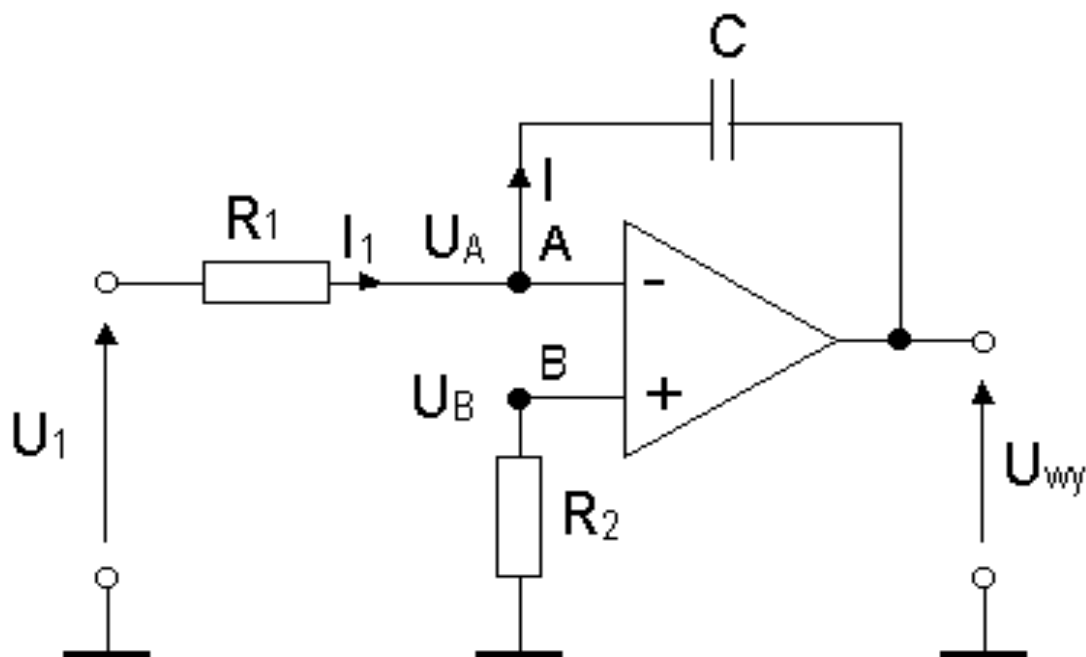
Wartość rezystancji R_R powinna być równa rezystancji wynikającej z równoległego połączenia rezystorów:

R_1, R_2, \dots, R_n i R .



W wyniku połączenia wzmacniaczy różnicowego i sumującego otrzymuje się układ realizujący jednocześnie sumowanie i odejmowanie napięć (rysunek powyżej). W celu uniknięcia błędów, należy pamiętać, aby rezystancje "widziane" między wejściem wzmacniacza operacyjnego a masą były jednakowe dla obu wejść wzmacniacza operacyjnego.

WZMACNIACZ CAŁKUJĄCY (INTEGRATOR)



Integrator otrzymuje się przez włączenie kondensatora C w obwód sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego.

$$I(t) = C \frac{dU_{wy}}{dt} = \frac{U_1}{R_1}$$

Napięcie wyjściowe można wyznaczyć przez scałkowanie

$$U_{wy}(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_1(t) dt + U_0$$

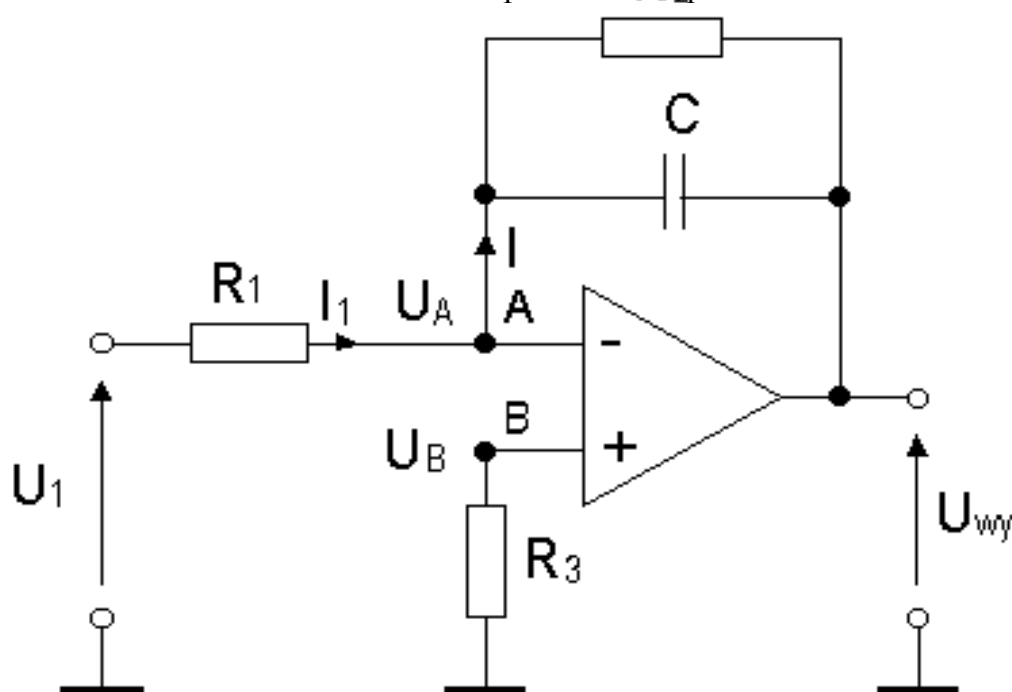
gdzie U_0 stanowi wartość napięcia na kondensatorze w chwili początkowej $t = 0$.

Korzystając z zapisu symbolicznego:

$$Z_1 = R_1 \quad Z_2 = -\frac{1}{j\omega C}$$

można określić wzmacnienie układu

$$k_U = -\frac{Z_2}{Z_1} = -\frac{1}{j\omega R_1 C}$$



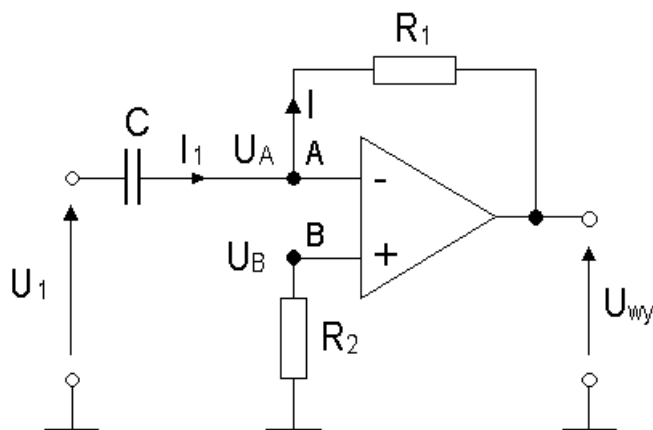
Wzmocnienie integratora zależy od częstotliwości sygnału. Jeżeli powyższy układ zostanie zmodyfikowany przez dołączenie rezystora R_2 równolegle do kondensatora C , to nastąpi ograniczenie wzmacnienia dla małych częstotliwości - otrzymuje się człon inercyjny. Wzmocnienie tego układu oblicza się ze wzoru

$$k_U = -\frac{R_2}{R_1} \frac{1}{1 + j\omega R_2 C}$$

Dopiero powyżej dolnej częstotliwości granicznej $f_d = \frac{1}{2\pi R_2 C}$

wzmacniacz ten działa jak **integrator**.

Wzmacniacz różniczkujący



Wzmacniacz różniczkujący uzyskuje się przez zastąpienie rezystora, włączonego na wejściu odwracającym wzmacniacza operacyjnego, kondensatorem C (rysunek powyżej). Wzmocnienie napięciowe takiego układu

$$k_U = -\frac{Z_1}{Z_2} \quad \text{gdzie} \quad \begin{aligned} Z_2 &= R_1 \\ Z_1 &= \frac{1}{j\omega C} \end{aligned}$$

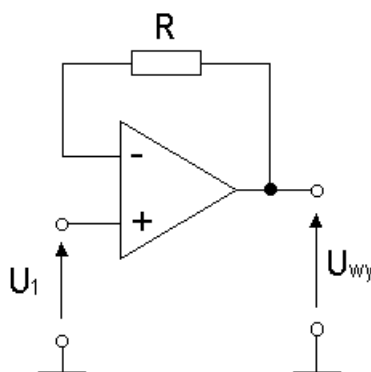
$$\text{stąd:} \quad k_U = -j\omega R_1 C$$

Zależność napięcia wyjściowego od napięcia wejściowego w funkcji czasu jest wyrażona wzorem

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

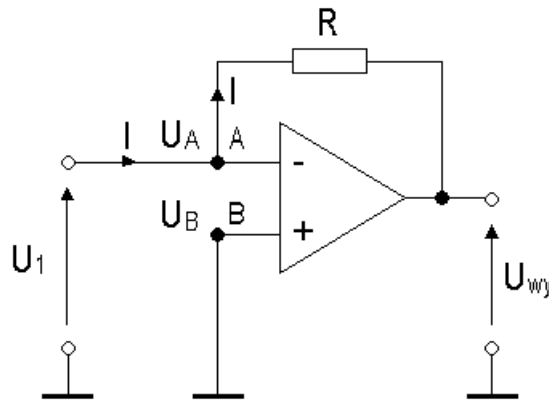
Z powyższego równania wynika, że układ wykonuje operację różniczkowania - stąd jego nazwa. Wzmacniacz różniczkujący ma wiele wad, m.in. jest wrażliwy na szumy sygnału o wielkiej częstotliwości oraz ma skłonność do oscylacji.

Wtórnik napięciowy



Wtórnik napięciowy uzyskuje się ze wzmacniacza nieodwracającego przy zastosowaniu rezystora R_1 o bardzo dużej wartości (R_1 dąży do nieskończoności). Wartość rezystancji R powinna być równa wartości rezystancji źródła sygnału wejściowego. Taki układ charakteryzuje się bardzo dużą rezystancją wejściową (rezystancja dla sygnału współbieżnego) i małą rezystancją wyjściową (k_{uo} razy mniejszą od rezystancji wyjściowej wzmacniacza operacyjnego z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego).

Konwerter prąd - napięcie

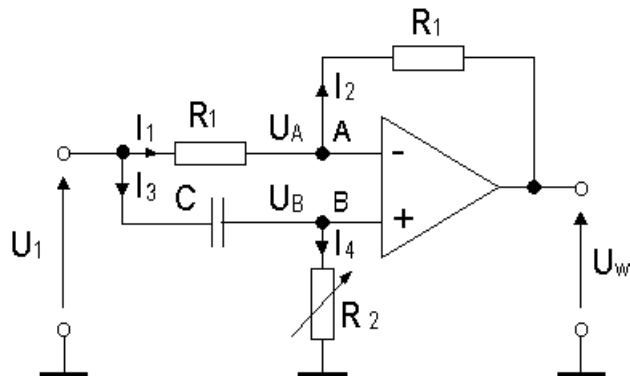


Układ, który przetwarza sygnał prądowy na sygnał napięciowy jest nazywany konwerterem prąd - napięcie:

$$U_{wy} = -I R$$

Układ ten charakteryzuje się małą rezystancją wejściową. Może on współpracować tylko ze źródłami prądowymi (o dużej rezystancji wewnętrznej), ponieważ jego wejście stanowi masę pozorną. Wartość prądu wejściowego I nie zależy wówczas od parametrów układu konwertera, ale od źródła sygnału wejściowego.

Przesuwnik fazy



Układ przesuwający fazę napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego nazywa się przesuwnikiem fazy

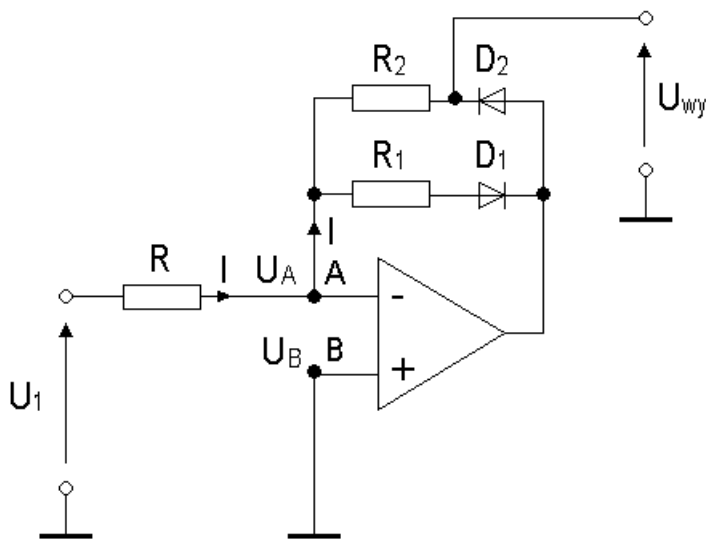
$$U_{wy} = \frac{1 - j\omega CR_2}{1 + j\omega CR_2} U_1 \quad |U_{wy}| = |U_1|$$

Jeżeli amplituda sygnału wejściowego będzie stała, a zmieni się jedynie jego częstotliwość, to amplituda sygnału wyjściowego będzie również stała, zmieni się natomiast przesunięcie fazy sygnału wyjściowego względem sygnału wejściowego.

Układ ten w swej istocie jest odpowiednikiem wzmacniacza odejmującego, w którym do obu wejść jest doprowadzone jedno napięcie. W wyniku zamiany rezystora na kondensator, na wejście nieodwracające wzmacniacza jest podawany sygnał wejściowy przesunięty w fazie. Zmieniając wartość rezystancji R_2 (rezystor regulowany) od 0 do nieskończoności (przy stałej częstotliwości napięcia wejściowego), uzyskuje się w układzie przesunięcie fazowe od -180° do -360° .

Jeżeli rezystancja $R_2 = 0$, to wejście nieodwracające jest podłączone do masy - jego potencjał jest równy zero (kondensator wówczas nie odgrywa istotnej roli w działaniu układu). Schemat układu sprowadza się wtedy do postaci przedstawionej na rysunku obok, czyli do schematu wzmacniacza odwracającego o wzmocnieniu $k_u = -1$ i przesunięciu fazowym wynoszącym -180° . Jeżeli rezystancja R_2 równa nieskończoności, to napięcie podawane na wejście nieodwracające jest równe napięciu wejściowemu. Schemat układu sprowadza się wówczas do postaci przedstawionej na rysunku obok. Przy bardzo dużym wzmocnieniu napięciowym wzmacniacza operacyjnego (k_u dąży do nieskończoności) napięcie na wejściu nie odwracającym jest w przybliżeniu równe napięciu na wejściu odwracającym $U_- = U_+ = U_{we}$. Spadek napięcia na rezystorze R_1 (wywołany przepływem prądu I) wynosi zero. Wartość prądu wejściowego $I = \Delta U/R = 0$. Różnica napięć między wejściem odwracającym a wyjściem układu $U_- = U_{wy} = 0$. Wynika z tego, że $U_{wy} = U_{we}$. Układ jest wówczas wtórnikiem napięciowym, a jego przesunięcie fazowe wynosi 0° .

Prostownik idealny



Prostownik idealny jest przykładem zastosowania elementów nieliniowych w obwodzie ujemnego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego. Elementy te (diody) pełnią w tym układzie funkcje przełączników. Dla napięcia wejściowego o wartości dodatniej, ujemne sprzężenie zwrotne zamyka się przez rezystor R_1 i diodę D_1 (dioda D_1 jest w stanie

przewodzenia). Napięcie na wejściu odwracającym jest równe napięciu na wejściu nieodwracającym ($U_A = U_B = 0$). Przez rezystor R_2 nie płynie prąd, ponieważ dioda D_2 jest w stanie zatkania. Stąd napięcie wyjściowe $U_D = U_A = 0$.

Dla napięcia wejściowego o wartości ujemnej, pętla ujemnego sprzężenia zwrotnego zamyka się przez rezystor R_2 i diodę D_2 (dioda D_2 jest w stanie przewodzenia, dioda D_1 w stanie zatkania).

Napięcie $U_A = U_B = 0$. Prąd wejściowy $I = U_1/R$ płynie przez rezystor R_2 .

$$U_{D_2} = -IR_2 = -U_1 \frac{R_2}{R}, \text{ gdzie } U_{D_2} \text{ jest napięciem przewodzenia}$$

diody D_2 . U_1 jest wówczas wzmacniane k_u razy, przy czym

$$k_U = -\frac{R_2}{R}$$

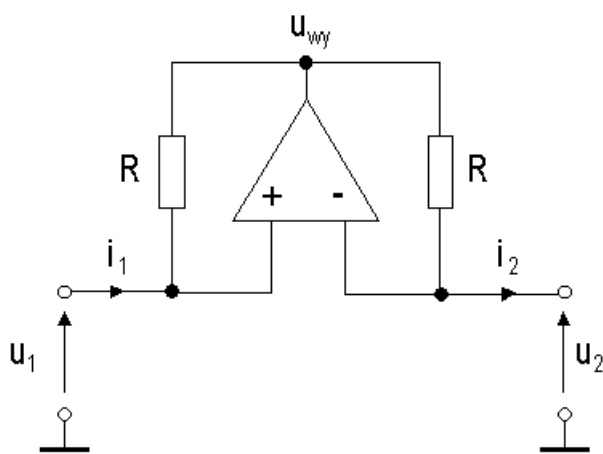
Prąd płynie przez rezystory R i R_2 oraz diodę D_2 . Jeśli $R_2 = R$ i przez rezystory płynie taki sam prąd, to $U_{wy} = -U_1$ ($k_u = -1$). Należy podkreślić, że napięcie na wyjściu wzmacniacza operacyjnego ma cały czas kształt zbliżony do kształtu napięcia wejściowego (diody, dzięki wzmacniaczowi operacyjnemu, przewodzą nawet przy bardzo małych wartościach napięcia wejściowego). Gdy napięcie U_1 ma wartość dodatnią, wówczas

$$U_{wy} = -U_1 \frac{R}{R_1} - U_{D_1} \text{ a gdy } U_1 < 0 \quad U_{wy} = -U_1 \frac{R_2}{R} + U_{D_2}$$

gdzie U_{D_1} jest napięciem przewodzenia diody D_1 .

Konwerter ujemnoimpedancyjny

Jeżeli mamy dwójnik, w którym przyłożone z zewnątrz napięcie U i płynący przezeń prąd mają przeciwne znaki, czyli iloraz $U/i < 0$, to taki dwójnik ma rezystancję ujemną. Rezystancje ujemne można realizować w zasadzie tylko za pomocą układów aktywnych, zwanych konwerterami ujemnoimpedancyjnymi NIC. Wyróżnia się dwa typy: UNIC, zmieniający biegunowość napięcia przy nie zmienionym prądzie i INIC, który zmienia zwrot prądu przy nie zmienionym napięciu. W idealnym przypadku równania opisujące konwerter INIC mają postać:



$U_1 = U_2$ oraz $i_1 = -i_2$. Równania te można zrealizować za pomocą źródła napięcia sterowanego napięciem i źródła prądu sterowanego prądem. Obie te funkcje może jednak pełnić pojedynczy wzmacniacz operacyjny.

Schemat układu przedstawiony jest obok. W idealnym wzmacniaczu operacyjnym $U_P = U_N$, czyli zgodnie z wymaganiami $U_1 = U_2$. Napięcie wyjściowe wzmacniacza operacyjnego przyjmuje wartość $U_{wy} = U_2 + i_2 R$. Wskutek tego do wrót 1 wpływa wymagany prąd

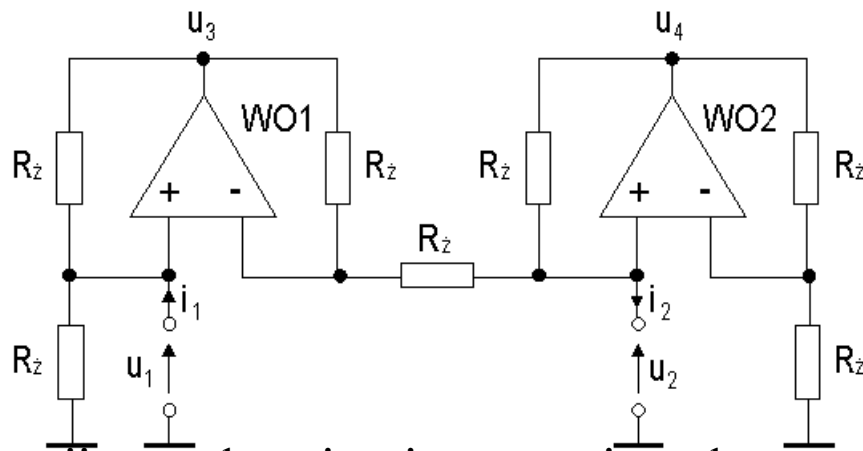
$$i_1 = \frac{U_2 - U_{wy}}{R} = -i_2$$

W powyższym wyprowadzeniu założono, że układ jest stabilny. Układ jest stabilny, jeżeli napięcie dodatniego sprzężenia zwrotnego jest mniejsze od napięcia sprzężenia ujemnego, czyli gdy $R_1 < R_2$, gdzie R_1 , R_2 są rezystancjami wewnętrznymi dołączonych układów do wrót 1 i 2.

Żyrator

Żyrator jest układem przetwarzającym, który umożliwia przekształcenie dowolnej impedancji w impedancję do niej dualną, a więc np. pojemności w indukcyjność. W przypadku idealnym równania opisujące zachowanie się żyratora mają postać :

$$i_1 = \frac{1}{R_z} U_2 \quad , \quad i_2 = \frac{1}{R_z} U_1$$



W realizacji przedstawionej powyżej wykorzystano dwa wzmacniacze operacyjne tworzące konwertery INIC. W celu wyznaczenia równań opisujących układ zastosujemy pierwsze prawo Kirchhoffa do wejść P i N wzmacniaczy WO1 i WO2:

- węzeł P1: $(U_3 - U_1)/R_z - U_1/R_z + i_1 = 0$
- węzeł N1: $(U_3 - U_1)/R_z - (U_1 - U_2)/R_z = 0$
- węzeł P2: $(U_4 - U_2)/R_z - (U_2 - U_1)/R_z - i_2 = 0$
- węzeł N2: $(U_4 - U_2)/R_z - U_2/R_z = 0$

Po eliminacji u_3 i u_4 otrzymamy równania opisujące żyrator.

Następuje więc inwersja impedancji:

$$Z_1 = R_z^2 / Z_2$$

Jeżeli obciążymy żyrator pojemnością C_2 , to po drugiej stronie otrzymamy impedancję

$$Z_1 = R_z^2 j \omega C_2,$$

czyli po prostu impedancję indukcyjną cewki o wartości

$$L_1 = R_z^2 C_2 .$$