

Stanisław Chlebek | www.echlebek.pl

PODSTAWY ELEKTRONIKI I TECHNIKI CYFROWEJ

opracowanie zagadnieo

dwiczenie 2

Badanie wzmacniaczy operacyjnych

POLITECHNIKA KRAKOWSKA



Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej

Kierunek informatyka

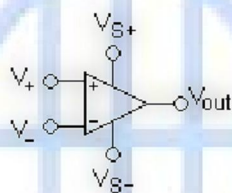
Stanisław Chlebek | www.echlebek.pl

1. Co to jest wzmacniacz operacyjny, parametry idealnego i rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego.

Wzmacniacz operacyjny to wielostopniowy, wzmacniacz różnicowy prądu stałego, charakteryzujący się bardzo dużym różnicowym wzmocnieniem napięciowym rzędu stu kilkudziesięciu decybeli i przeznaczony zwykle do pracy z zewnętrznym obwodem sprzężenia zwrotnego, który decyduje o głównych właściwościach całego układu.

Wzmacniacz operacyjny jest najbardziej rozpowszechnionym analogowym układem elektronicznym, realizowanym obecnie w postaci monolitycznych układów scalonych. Wielka uniwersalność, przy jednoczesnym wykorzystaniu istotnych właściwości układów scalonych, daje możliwość stosowania go w rozmaitych układach, urządzeniach i systemach elektronicznych, zapewniając masową produkcję, niską cenę i bardzo dobre parametry użytkowe.

Ogólny symbol wzmacniacza operacyjnego z uwzględnieniem linii zasilających przedstawiony jest poniżej.



Wzmacniacz idealny

Idealny wzmacniacz charakteryzuje się:

- nieskończenie dużym różnicowym wzmocnieniem napięciowym:

$$A_u = \frac{U_o}{U_+ - U_-} = \frac{U_o}{U_d} \rightarrow \infty$$

- zerowym wejściowym napięciem niezrównoważenia
- nieskończenie dużą impedancją wejściową,
- zerową impedancją wyjściową,
- nieskończenie szerokim pasmem przenoszonych częstotliwości,
- nieskończenie dużym zakresem dynamicznym sygnału.

Stanisław Chlebek | www.echlebek.pl

Wzmacniacz rzeczywisty

Parametry rzeczywistego wzmacniacza odbiegają od tych założeń, i tak:

- wzmocnienie napięciowe sygnału różnicowego **nie jest nieskończenie wielkie**, choć bardzo duże i wynosi

$$A_u \approx 10^5 \div 10^7 \frac{V}{V} \approx 100 \div 140 \text{dB} \quad [*_{\mu A741} - 2 \times 10^5 \text{ V/V}];$$

- wzmocnienie wejściowego napięcia niezrównoważenia **nie jest równe zero**; podaje się współczynnik tłumienia sygnału wspólnego CMRR (Common Mode Rejection Ratio), który w decybelach określa o ile mniejsze jest wzmocnienie sygnału wspólnego od wzmocnienia różnicowego (rzędu 80-140dB $*_{\mu A741} - 90 \text{ dB}$);
- impedancja wejściowa **nie jest nieskończenie wielka**, choć bardzo duża - rzędu megaomów $*_{\mu A741} - 2 \text{ M}\Omega$; wzmacniacz stanowi niewielkie obciążenie dla źródła sygnału (prądy wejściowe są rzędu nanomperów lub nawet pikoamperów $*_{\mu A741} - 20 \text{ nA}$);
- impedancja wyjściowa **nie jest równa zero** (rzędu kilkuset omów $*_{\mu A741} - 75 \Omega$);
- pasmo przenoszenia sygnałów **nie jest nieograniczone**, powyżej częstotliwości granicznej wzmocnienie zaczyna spadać $*_{\mu A741} - 1 \text{ MHz}$];
- wejścia wzmacniacza **nie są idealnie symetryczne**, ze względu na ich asymetrię definiuje się tzw. *wejściowe napięcie niezrównoważenia* - jest to napięcie różnicowe (od 1 mikrowolta do kilku miliwoltów $*_{\mu A741} - 1 \text{ mV}$), jakie trzeba podać na wejścia, aby napięcie wyjściowe było równe zero

2. Napięcie niezrównoważenia, częstotliwość graniczna, CMRR,

Różnicowe wzmocnienie napięciowe

Różnicowe wzmocnienie napięciowe jest to stosunek zmiany napięcia wyjściowego do zmiany różnicowego napięcia wejściowego:

$$A_u = \frac{\Delta U_o}{\Delta(U_+ - U_-)} = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_d}$$

Wejściowe napięcie niezrównoważenia

W idealnym wzmacniaczu operacyjnym jeżeli na obu wejściach jest napięcie równe 0, to na wyjściu też powinno być napięcie równe 0. Ale w rzeczywistych wzmacniaczach tak nie jest.

Wejściowym napięciem odniesienia określa się napięcie między wejściami wzmacniacza, gdy na wyjściu panuje napięcie równe 0.

$$A_c = \frac{\Delta U_o}{\Delta U_i}$$

Stanisław Chlebek | www.echlebek.pl

Wyjściowe napięcie niezrównoważenia

Napięcie na wyjściu wzmacniacza, gdy na obu wejściach napięcie jest równe zero.

Współczynnik tłumienia sygnału wspólnego(CMRR)

W miejsce wzmacnienia sygnału wspólnego często podawany jest współczynnik tłumienia sygnału wspólnego (ang. Common Mode Rejection Ratio, CMRR), który lepiej określa własności wzmacniacza. Określa go wzór:

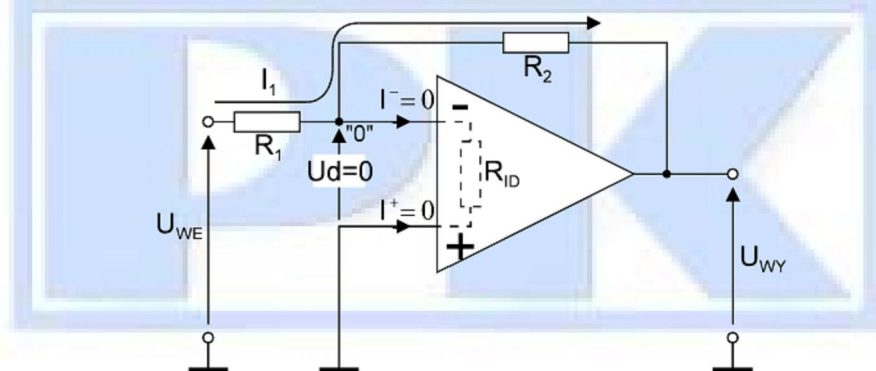
$$CMRR = \frac{A_u}{A_c}$$

Współczynnik CMRR wyrażany jest zazwyczaj w decybelach.

3. Wyprowadzid zależność $U_{wy}=f(U_{we})$ dla układów: nieodwracającego, odwracającego, całkującego, różniczkującego, sumatora.

3.1 Wzmacniacz odwracający

Wzmacniacz odwracający stanowi taki układ włączenia WO w którym sygnał wejściowy jest podany na wejście odwracające - rys. 3.1.



Rys. 3.1. Wzmacniacz odwracający.

Stanisław Chlebek | www.echlebek.pl

Przyjmując $A_U=0$ otrzymujemy:

$$U_d = \frac{U_{WY}}{A_U} \rightarrow 0$$

a to oznacza, że potencjał punktu „0” jest w przybliżeniu równy potencjałowi na wejściu nieodwracającym, a więc jest bliski potencjałowi masy. Z tego powodu punkt „0” jest nazywany punktem „masy pozornej”.

Przyjmując R_{ID} można łatwo zauważyć, że do wejść WO nie wpływają żadne prądy ($I_{WY}^+=0$ oraz $I_{WE}^+=0$) a zatem prąd w rezystorze R_1 jest równy prądowi w rezystorze R_2 (na rys. 3.1. oznaczony jako I_1).

Biorąc pod uwagę powyższe dwa spostrzeżenia możemy napisać:

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

a stąd **wzmocnienie napięciowe wzmacniacza odwracającego (wzmocnienie układu ze sprzężeniem zwrotnym)** wynosi:

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

Dobierając rezystancję R_2 (najczęściej $R_1=const$) można uzyskać wymagane wzmocnienie.

W przypadku gdy $R_1=R_2$ otrzymuje się inwerter o wzmocnieniu 1.

Stanisław Chlebek | www.echlebek.pl

Rezystancja wejściowa wzmacniacza odwracającego:

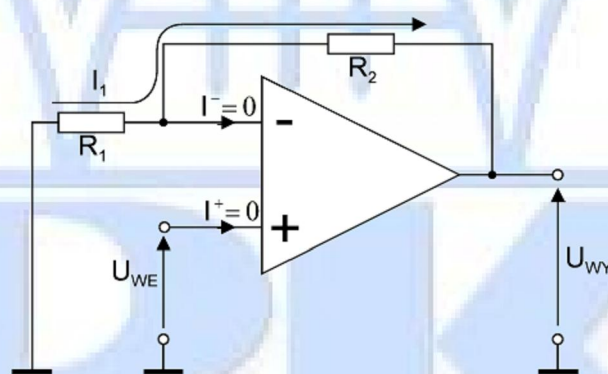
$$R_1 = \frac{U_{WE}}{I_1} = R_1$$

Ponieważ rezystancja R_1 jest niewielka to również I_1 jest niewielka.

W praktyce często włącza się pomiędzy masę a wejście „+” **dodatkowy rezystor** o wartości równej rezystancji połączenia równoległego R_1 i R_2 , gdyż w tym przypadku uzyskuje się najlepszą kompensację błędu spowodowanego napięciem niezrównoważenia.

3.2 Wzmacniacz nieodwracający

W układzie wzmacniacza nieodwracającego sygnał wejściowy jest doprowadzany do wejścia nieodwracającego - rys. 3.2.



Rys. 3.2. Wzmacniacz nieodwracający

Przyjmując założenie, że WO jest idealny i przeprowadzając rozumowanie jak w p.3.2 otrzymujemy:

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

Stanisław Chlebek | www.echlebek.pl

a stąd wzmacnienie napięciowe układu:

$$A_{uf} = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

Warto zauważyć, że w tym układzie w przeciwieństwie do wzmacniacza odwracającego, nie jest możliwe uzyskanie wzmacnienia 1.

Rezystancja wejściowa wzmacniacza nieodwracającego:

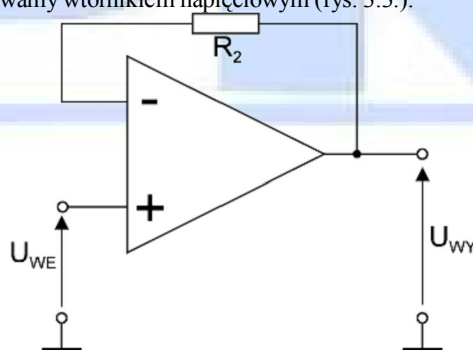
$$R_1 = \frac{U_{WE}}{I^+}$$

w praktyce rezystancja R_1 jest bardzo duża.

Z tych samych powodów, jakie opisane są w p.3.2 w praktycznym układzie włącza się w obwód wejścia „+” rezystor o wartości równej rezystancji połączenia równoległego R_1 i R_2 .

3.3 Wtórnik napięciowy

Jeżeli we wzmacniaczu nieodwracającym z rys. 3.2. wartość rezystora R_1 jest nieskończenie duża, to otrzymuje się układ ze 100-procentowym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Taki układ nazywamy wtórnikiem napięciowym (rys. 3.3.).



Rys. 3.3. Wtórnik napięciowy

Przyjmując we wzorze na wzmacnienie wzmacniacza nieodwracającego $R_1 = \infty$ otrzymujemy:

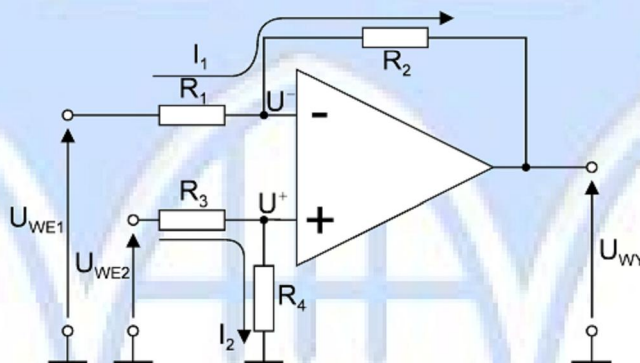
$$A_{uf} = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = 1$$

Wtórnik napięciowy ma wzmocnienie równe 1 oraz charakteryzuje się bardzo dużą rezystancją wejściową i małą rezystancją wyjściową. Z tego powodu nadaje się doskonale do zastosowania jako bufor separujący układy elektroniczne (np. w układzie próbkującym z pamięcią).

W praktyce wartość rezystancji R_2 należy dobrać równą rezystancji wewnętrznej źródła sygnału wejściowego.

3.4. Wzmacniacz różnicowy

Na rys. 3.4. przedstawiono schemat wzmacniacza różnicowego.



Rys. 3.4. Wzmacniacz różnicowy

Przyjmując, jak poprzednio, że WO jest idealny oraz oznaczając przez U^+ oraz U^- napięcia na wejściach WO w stosunku do masy, możemy napisać równania:

$$\frac{U_{WE2} - U^+}{R_3} = \frac{U^+}{R_4}, \quad \frac{U_{WE1} - U^-}{R_1} = \frac{U^- - U_{WY}}{R_2}$$

Przekształcając powyższe równania i podstawiając

$$U^- = U^+$$

uzyskuje się wyrażenie na wartość napięcia wyjściowego:

$$U_{WY} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right) \frac{R_4}{R_1} \cdot U_{WE2} - \frac{R_2}{R_1} U_{WE1}$$

W większości przypadków we wzmacniaczu różnicowym stosuje się wartości rezystorów spełniające warunek:

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

Wtedy napięcie wyjściowe:

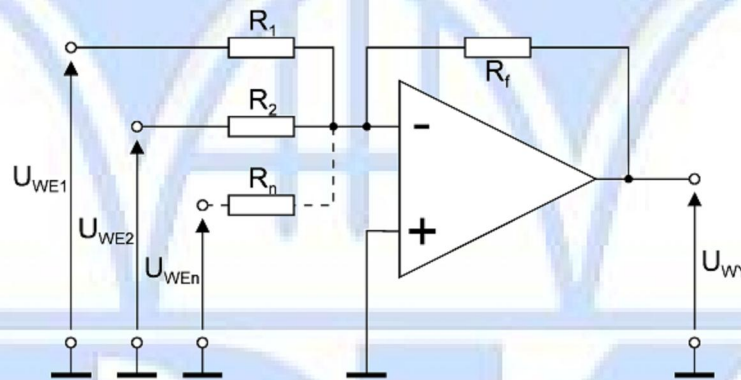
$$U_{wy} = \frac{R_2}{R_1} (U_{we2} - U_{we1})$$

Jeżeli dodatkowo $\frac{R_2}{R_1} = 1$, wtedy $U_{wy} = U_{we2} - U_{we1}$, czyli możemy stwierdzić, że

wzmacniacz różnicowy wzmacnia różnicę sygnałów wejściowych, natomiast sygnał wspólny ($U_{we1}=U_{we2}$) jest tłumiony.

3.5 Wzmacniacz sumujący

Za pomocą WO można łatwo realizować sumowanie napięć stosując układ pokazany na rys. 3.5.



Rys. 3.5. Wzmacniacz sumujący

$$U_{wy} = -R_f \left(\frac{U_{we1}}{R_1} + \frac{U_{we2}}{R_2} + \dots + \frac{U_{wen}}{R_n} \right)$$

Stosując różne wartości rezystorów R_1, R_2, \dots, R_n uzyskuje się różne wzmocnienia sygnałów dla poszczególnych wejść, czyli realizuje się dodatkowo funkcję mnożenia sygnałów wejściowych przez odpowiednie stałe.

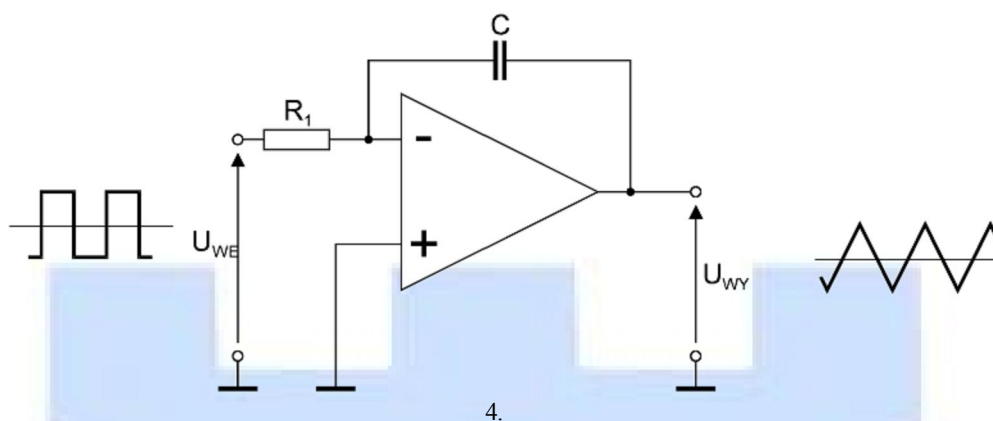
Jeżeli $R_1=R_2=\dots=R_n=R_f$ to:

$$U_{wy} = -(U_{we1} + U_{we2} + \dots + U_{wen})$$

W praktyce między zacisk wejściowy „+” a masę włącza się rezystor o wartości równej rezystancji połączonych równolegle rezystorów $R_1, R_2, \dots, R_n, R_f$.

3.6 Wzmacniacz całkujący (integrator)

Układ włączenia WO wykonujący funkcję całkowania przedstawiono na rys. 3.6.



Rys.3.6. Wzmacniacz całkujący

$$5. \quad U_{wy} = -\frac{1}{R \cdot C} \int_0^T U_{we} \cdot dt$$

6.

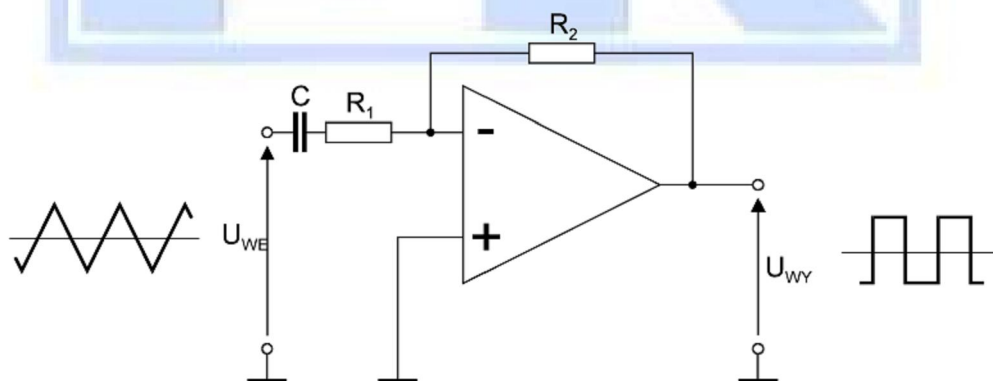
gdzie $R \cdot C = \tau$ jest stałą czasową całkowania.

Należy zauważyć, że układy całkujące pracują prawidłowo, gdy zmiany sygnału wyjściowego zachodzą z częstotliwością mniejszą niż $1/\tau$.

Na rys. 3.6. pokazano przebieg trójkątny sygnału wyjściowego, który jest całką wejściowego przebiegu prostokątnego. Praktyczne układy integratorów są zwykle znacznie bardziej rozbudowane, zawierają bowiem dodatkowe elementy ustalające początkowe warunki pracy (zwierające kondensator C) oraz kompensujące błędy.

3.7 Wzmacniacz różniczkujący

Jeżeli w układzie wzmacniacza odwracającego rezystor wejściowy zastąpić kondensatorem C, otrzymuje się układ różniczkujący (rys. 3.7.).



Rys. 3.7. Wzmacniacz różniczkujący