

Ćwiczenie 28

ZASTOSOWANIA WZMACNIACZY OPERACYJNYCH

1. Cel ćwiczenia

Celem niniejszego ćwiczenia jest prezentacja pewnych wybranych zastosowań wzmacniaczy operacyjnych, powszechnie używanych we współczesnych elektronicznych układach analogowych.

Wzmacniacze operacyjne stosuje się obecnie we wszystkich nowoczesnych układach elektronicznych. Gwałtowny wzrost zainteresowania wzmacniaczami operacyjnymi nastąpił po wprowadzeniu w latach siedemdziesiątych do produkcji masowej, monolitycznych układów scalonych o bardzo dobrych właściwościach i niskiej cenie.

Różnorodność funkcji realizowanych przy użyciu współczesnych wzmacniaczy operacyjnych jest, praktycznie biorąc, nieograniczona. Oprócz typowych funkcji dla zastosowań wzmacniacza operacyjnego w komputerach analogowych (podstawowe operacje arytmetyczne oraz logarytmowanie, całkowanie i różniczkowanie) należy wymienić inne zastosowania tego układu, np.:

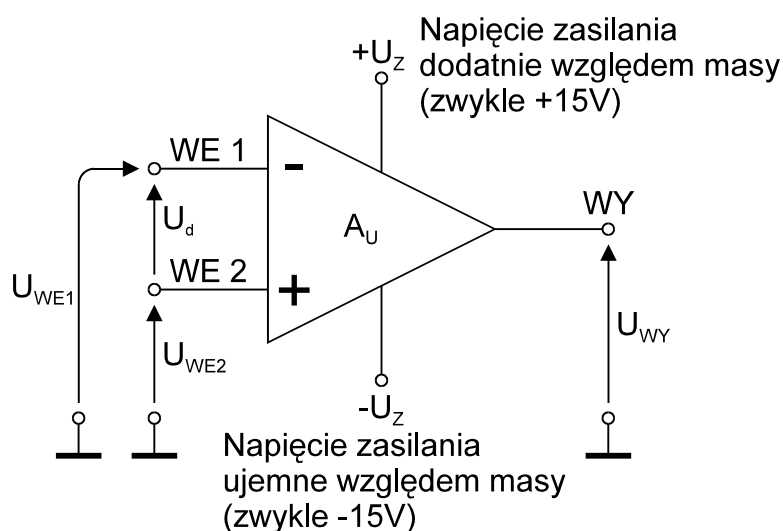
- ograniczniki napięciowe,
- układy porównujące (komparatory),
- prostowniki liniowe,
- przetworniki analogowo-cyfrowe i cyfrowo-analogowe,
- generatory przebiegów prostokątnych, trójkątnych i sinusoidalnych,
- filtry aktywne.

2. Wprowadzenie do wzmacniaczy operacyjnych

2.1 Wiadomości wstępne

Wzmacniacz operacyjny jest wzmacniaczem charakteryzującym się bardzo dużym wzmocnieniem i przeznaczonym z reguły do pracy w układzie z zewnętrznym obwodem ujemnego sprzężenia zwrotnego. Właściwości tego obwodu decydują w głównej mierze o właściwościach całego układu.

Większość wzmacniaczy operacyjnych ma **symetryczne (różnicowe) wejścia i niesymetryczne wyjście**. Na rys.2.1 pokazano powszechnie stosowany symbol takiego wzmacniacza.



Rys. 2.1. Symbol wzmacniacza operacyjnego.

- Zacisk WE1 oznaczony „-” nasi nazwę **wejścia odwracającego**, ponieważ sygnał wyjściowy jest odwrócony w fazie o 180° względem sygnału przyłożonego do tego wejścia.
- Zacisk WE2 oznaczony „+” jest **wejściem nieodwracającym**, ponieważ sygnał wyjściowy jest w fazie z sygnałem doprowadzonym do tego wejścia.

Wzmacniacz operacyjny może pracować w układzie o **wejściu niesymetrycznym**, jeżeli sygnał wejściowy poda się na jedno z dwóch wejść WE1 lub WE2 (sygnał przyłączony jest pomiędzy zaciskiem wejściowym, a masą przy drugim zacisku dołączonym do masy). W układzie o **wejściu symetrycznym** sygnał wejściowy doprowadza się między wejścia WE1 i WE2 wzmacniacza. Sygnał taki nazywa się **sygnałem różnicowym**.

Napięcie wyjściowe jest proporcjonalne do wartości sygnału różnicowego, czyli do różnicy napięć wejściowych zgodnie z zależnością:

$$U_{WY} = A_U (U_{WE1} - U_{WE2}) = A_U \cdot U_d$$

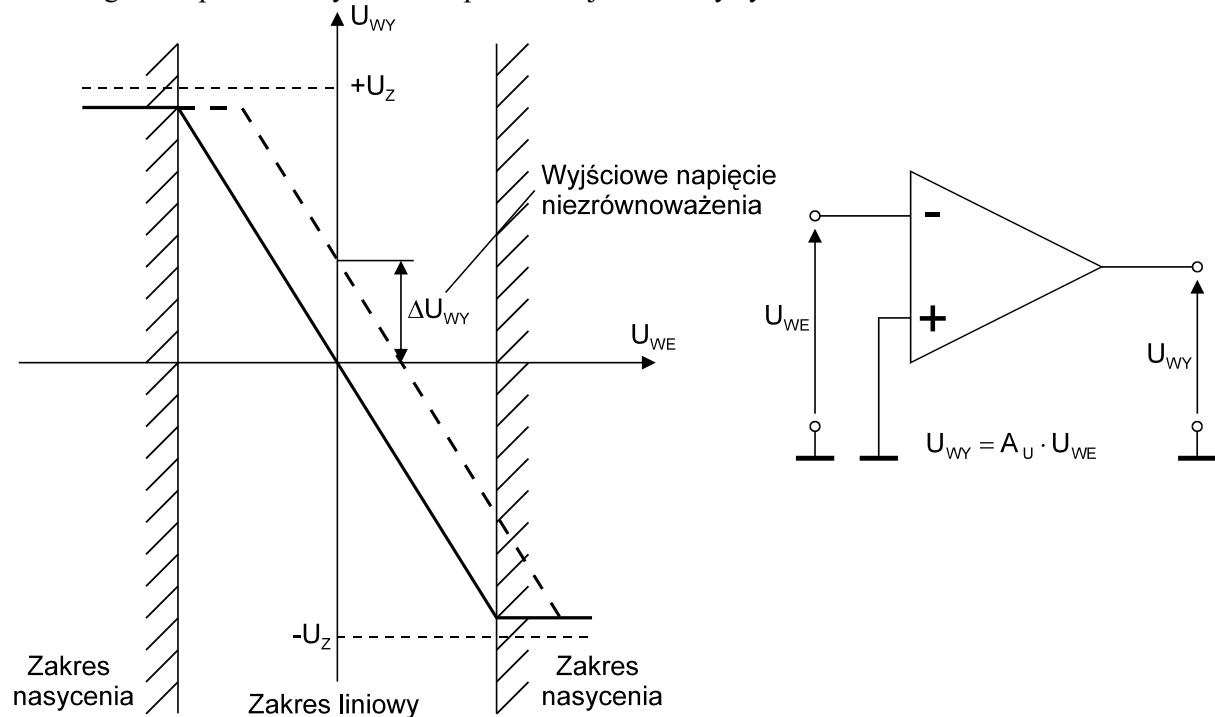
gdzie:

- U_{WE1}, U_{WE2} - napięcia wejściowe,
- U_{WY} - napięcie wyjściowe,
- U_d - różnicowe napięcie wejściowe,
- A_U - wzmacnienie napięciowe wzmacniacza z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego (**wzmocnienie różnicowe**).

Ważną właściwością wzmacniacza operacyjnego, (dalej skrótowo oznaczanego WO) jest to, że **sygnał na wyjściu powinien być równy zero, gdy na obu wejściach występują jednakowe sygnały względem masy**. Jednakowy sygnał podany na oba wejścia jest nazywany **sygnałem wspólnym (współbieżnym)**. Mówi się, że WO tłumi sygnał wspólny.

2.2. Charakterystyka przenoszenia

Na rys. 2.2. przedstawiono **charakterystykę przenoszenia** WO z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego oraz podstawowy układ do pomiaru tej charakterystyki.



Rys. 2.2. Charakterystyka przenoszenia wzmacniacza operacyjnego.

Na tej charakterystyce można wyróżnić 3 zakresy pracy WO: zakres pracy liniowej i 2 zakresy nasycenia. W zakresie pracy liniowej napięcie wyjściowe jest określone wzorem:

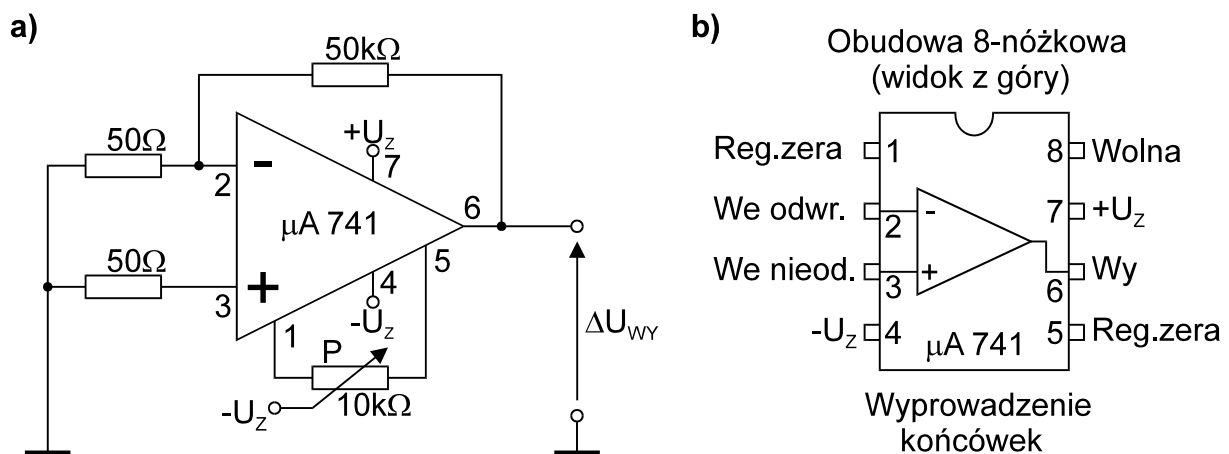
$$U_{WY} = A_U \cdot U_{WE}$$

W zakresie nasycenia napięcie wyjściowe przyjmuje dodatnią, albo ujemną wartość napięcia nasycenia, które jest zwykle mniejsze co do wartości bezwzględnej, o 1 do 2V od napięcia zasilania. Zakres liniowości WO pracującego bez sprzężenia zwrotnego jest bardzo mały. Przykładowo, gdy WO ma napięcie nasycenia rzędu $\pm 10V$, a wzmacnienie A_U wynosi $100000V/V$, wówczas zakres liniowości napięcia wejściowego znajduje się w przedziale $\pm 0,1mV$.

Po przekroczeniu zakresu liniowości WO przechodzi do stanu nasycenia. Napięcie wyjściowe WO powinno być równe zero przy zerowej różnicy napięć wejściowych ($U_{WE}=0$).

W rzeczywistości występuje w tej sytuacji pewne napięcie, nazywane **wyjściowym napięciem nierównoważenia**.

Na rys. 2.2. linią przerywaną przedstawiono charakterystykę przenoszenia dla przypadku, gdy wyjściowe napięcie nierównoważenia jest większe od zera ($\Delta U_{WY} > 0$). Nowoczesne WO posiadają możliwość prostej kompensacji wyjściowego napięcia nierównoważenia poprzez doprowadzenie do wejścia różnicowego, odpowiedniej wartości napięcia - takiej, aby uzyskać zerową wartość napięcia na wyjściu. W praktyce, kompensacja ta odbywa się za pomocą potencjometru P dołączonego do specjalnie wyprowadzonych końcówek wzmacniacza, jak to pokazano na rys. 2.3.



Rys. 2.3. Kompensacja (równoważenie, zerowanie) napięcia nierównoważenia WO μA 741 (a) i rozmieszczenie jego końcówek (b)

2.3. Wzmacniacz operacyjny idealny

W analizie pracy WO z różnymi rodzajami sprzężeń zwrotnych korzysta się często z jego wyidealizowanego modelu jakim jest **WO idealny**.

W tab. 2.1. przedstawiono podstawowe parametry jakimi powinien charakteryzować się wzmacniacz idealny w zestawieniu z parametrami masowo produkowanego i najpowszechniej stosowanego wzmacniacza μA 741 firmy FAIRCHILD (odpowiednik polski ULY 7741N) oraz z typowymi przedziałami wartości parametrów obecnie używanych WO.

Tab. 2.1.

		Wzmacniacz idealny	μA 741	Inne WO
Wzmocnienie różnicowe A_U	V/V	$\rightarrow \infty$	10^5	$10^4 \dots 10^7$
Rezystancja wejściowa różnicowa R_{ID}	M Ω	$\rightarrow \infty$	1	$0,05 \dots 10^4$
Rezystancja wyjściowa R_O	Ω	$\rightarrow 0$	75	50...200
Częstotliwość graniczna f_T	MHz	$\rightarrow \infty$	1	1...100

gdzie:

- RÓŻNICOWE WZMOCNIENIE NAPIĘCIOWE. A_U - stosunek napięcia wyjściowego do różnicowego napięcia na wejściu przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego,
- WEJŚCIOWA REZYSTANCJA RÓŻNICOWA R_{ID} - rezystancja występująca między wejściowymi zaciskami WO,
- REZYSTANCJA WYJŚCIOWA R_O - rezystancja występująca między zaciskiem wyjściowym a masą we wzmacniaczu zrównoważonym z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego,
- CZĘSTOTLIWOŚĆ GRANICZNA f_T (PASMO WZMOCNIENIA JEDNOSTKOWEGO) - największa częstotliwość, przy której wzmocnienie różnicowe jest równe wzmocnieniu maksymalnemu (wzmocnieniu dla prądu stałego).

Z danych zawartych w tabl. 2.1. wynika, że właściwości idealnego WO stanowią pewną granicę teoretyczną, do której zbliżają się parametry powszechnie konstruowanych WO.

3. Podstawowe układy pracy wzmacniaczy operacyjnych

3.1. Wstęp

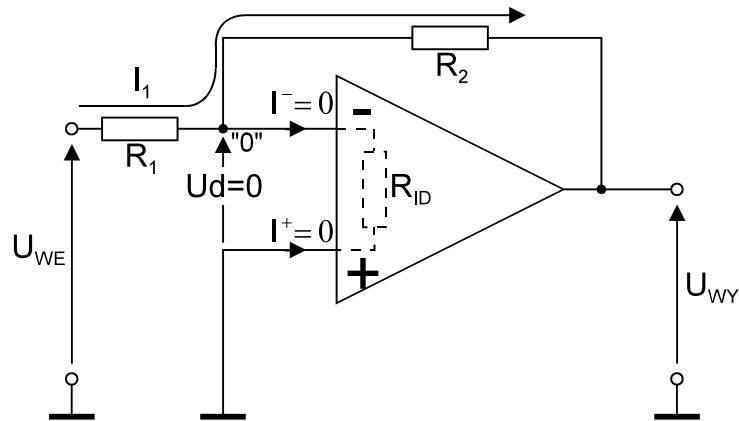
WO mogą pracować w wielu różnych konfiguracjach układowych. Najprostszą możliwością jest zastosowanie układu z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego. W tym przypadku WO pracuje jako komparator napięcia, to znaczy już przy niewielkich wartościach różnicowego napięcia wejściowego wchodzi, zależnie od znaku tego napięcia, w jeden z dwóch stanów nasycenia.

Jego praca jest w tym układzie bardzo niestabilna.

WO są stosowane przede wszystkim w układach z zewnętrznym ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Sprzężenie to polepsza właściwości wzmacniacza - zmniejsza nieliniowość charakterystyk i nierównoważenie, poszerza pasmo, poprawia stałość parametrów i umożliwia dobór wzmocnienia. Poniżej omówiono kilka podstawowych układów pracy WO przy założeniu, że jego właściwości są **idealne**.

3.2. 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.

Przyjmując $A_U \rightarrow \infty$ 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 $R_{ID} \rightarrow \infty$ można łatwo zauważyć, że do wejść WO nie wpływają żadne prądy ($I^- = 0$ oraz $I^+ = 0$) 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 $R_1 = \text{const}$) można uzyskać wymagane wzmocnienie.

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

Rezystancja wejściowa wzmacniacza odwracającego:

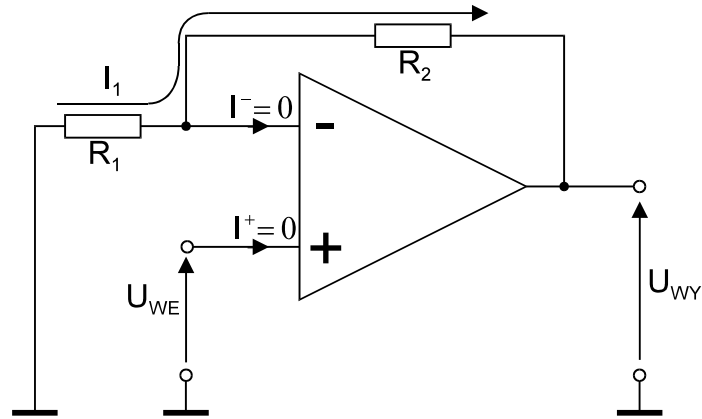
$$R_I = \frac{U_{WE}}{I_1} = R_1$$

Ponieważ rezystancja R_1 jest niewielka to również R_I 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.

3.3. 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:

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

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:

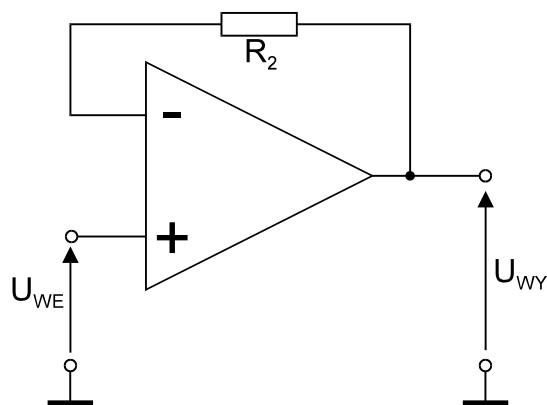
$$R_I = \frac{U_{WE}}{I^+}$$

Ponieważ $I^+ \rightarrow 0$ to $R_I \rightarrow \infty$, w praktyce rezystancja R_I 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 .

3.4. 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 wzmocnienie wzmacniacza nieodwracającego $R_1 = \infty$ otrzymujemy:

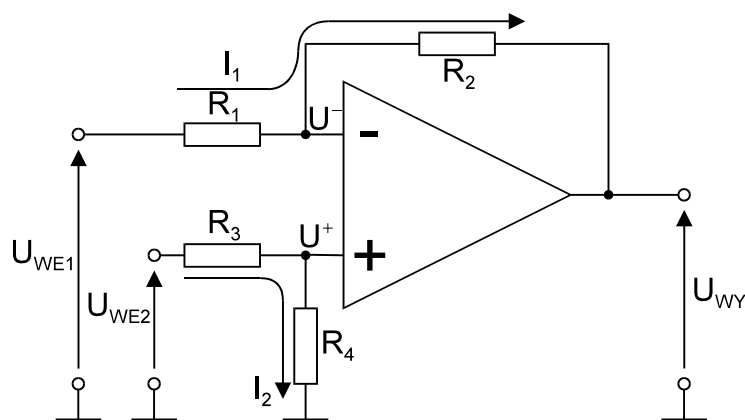
$$A_{uf} = \frac{U_{wy}}{U_{we}} = 1$$

Wtórnik napięciowy ma wzmocnienie równe 1 oraz charakteryzuje się bardzo dużą rezystancją wejściową i małą rezystancją wyjściową. Z tego powodu nadaje się doskonale do zastosowań 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.

3.5. 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:

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

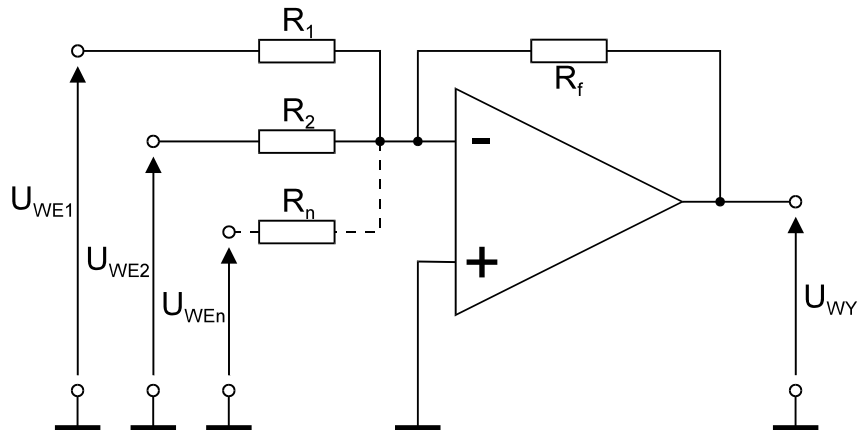
Wtedy napięcie wyjściowe:

$$U_{WY} = \frac{R_2}{R_1} (U_{WE2} - U_{WE1})$$

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 współbieżny ($U_{WE1} = U_{WE2}$) jest tłumiony.

3.6. 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.

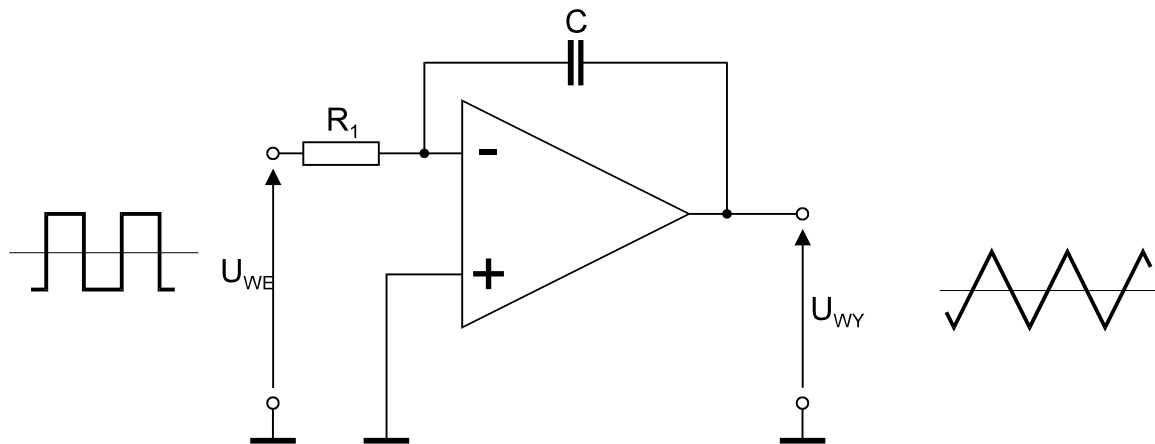
Jeżeli $R_1=R_2=\dots=R_n=R_f$ to:

$$U_{WY} = -(U_{WE1} + U_{WE2} + \dots + U_{WE_n})$$

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

3.7. Wzmacniacz całkujący (integrator)

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



Rys.3.6. Wzmacniacz całkujący

$$U_{WY} = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_{WE} \cdot dt$$

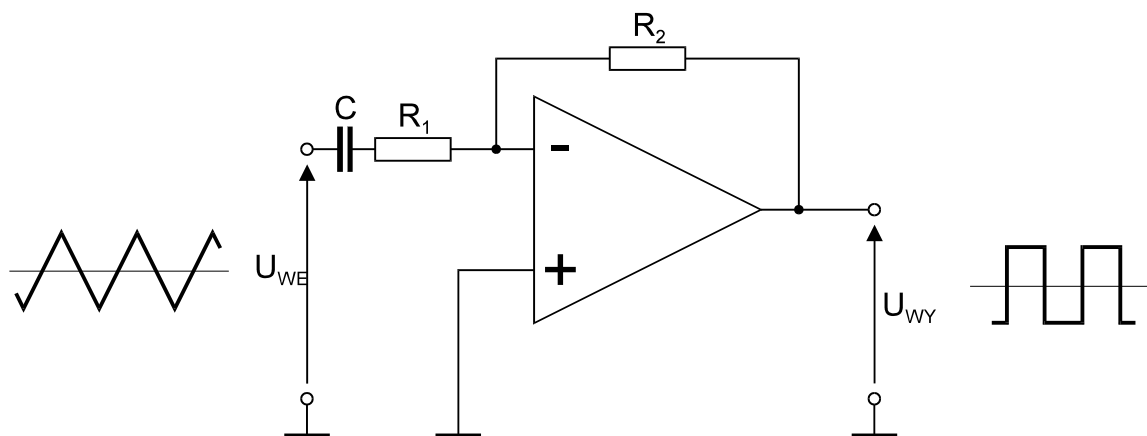
gdzie $R_1 \cdot C = \tau$ jest stałą czasową całkowania.

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.

3.8. Wzmacniacz różniczkujący

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



Rys. 3.7. Wzmacniacz różniczkujący

$$U_{WY} = -R_2 C \cdot \frac{dU_{WE}}{dt}$$

gdzie $R_2 C = \tau$ jest stałą czasową różniczkowania.

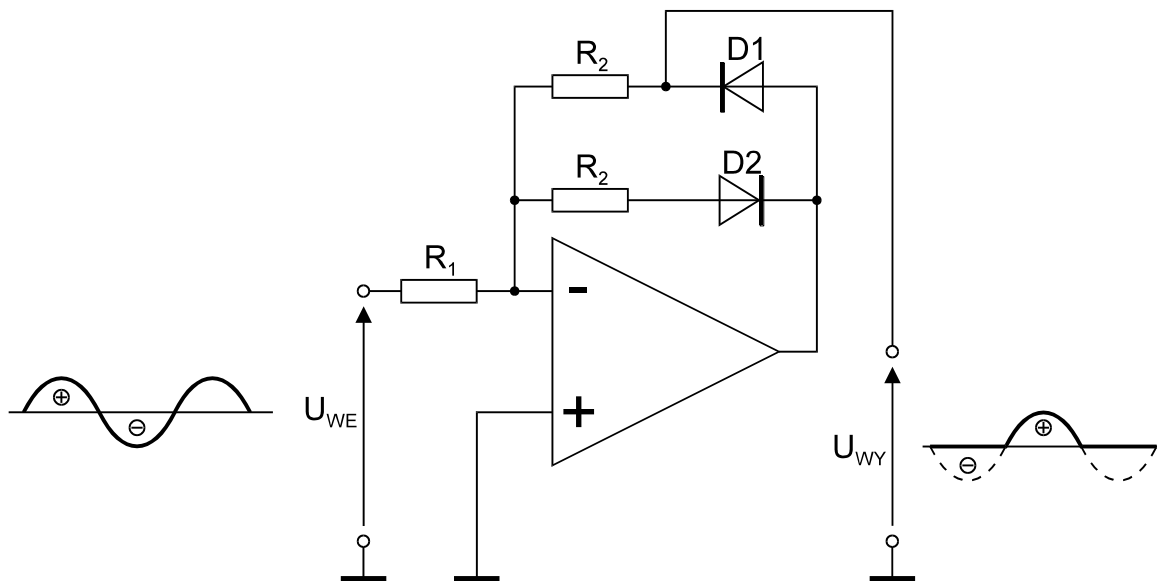
Na rys. 3.7. pokazano przebieg prostokątny sygnału wyjściowego, który jest pochodną wejściowego przebiegu trójkątnego. Odpowiednio dobrany rezystor R_1 włącza się w celu poprawienia stabilności wzmacniacza. Z tego samego powodu w niektórych układach istnieje też konieczność włączenia dodatkowego kondensatora w obwodzie sprzężenia zwrotnego (równoległe do rezystora R_2).

4. Inne zastosowania wzmacniaczy operacyjnych

4.1. Prostownik liniowy

Zastosowanie diod półprzewodnikowych w konwencjonalnych układach prostowniczych w zakresie małych sygnałów jest ograniczone. Jest to spowodowane bardzo dużą nieliniowością tych elementów przy bardzo małych napięciach. Np. dla diod krzemowych przy napięciach mniejszych od około 0,7V praktycznie niemożliwe jest przewodzenie prądu.

Dużą liniowość przetwarzania napięcia zmiennego na stałe, osiąga się przez umieszczenie diod w obwodzie sprzężenia zwrotnego, co powoduje, że diody przewodzą nawet przy bardzo małej wartości napięcia wejściowego. Jednopołówkowy prostownik liniowy przedstawiono na rys. 4.1.



Rys. 4.1. Prostownik liniowy jednopołówkowy

Diody D1 i D2 są odcięte jeżeli napięcie na wyjściu WO jest $< |0,7V|$, Wzmocnienie układu określone jest wtedy przez wzmocnienie różnicowe WO (otwarte sprzężenie zwrotne).

Zamknięcie pętli sprzężenia zwrotnego następuje przy napięciu na wyjściu WO $> |0,7V|$.

Strefie odcięcia diod D1 i D2 odpowiada bardzo mały zakres napięcia wejściowego (przy WO, dla którego $A_U = 100\,000\text{ V/V}$ zakres napięć wejściowych, przy których diody są odcięte wynosi $\pm 0,7V : 100\,000\text{ V/V} = \pm 6\mu V$). Tak mały zakres napięć wejściowych nieprostowanych praktycznie nie ma żadnego wpływu na dokładność przetwarzania napięcia zmiennego na stałe.

Dla wejściowych napięć dodatnich $> +6\mu V$ dioda D2 przewodzi, zatem dioda D1 jest odcięta. Napięcie U_{wy} jest równe zero. Dioda D2 służy do zabezpieczenia WO przed wejściem w nasycenie i związanemu z tym opóźnieniu czasowemu.

Przy wejściowych napięciach ujemnych $< -6\mu V$ dioda D1 przewodzi, zaś dioda D2 jest odcięta. Napięcie wyjściowe układu jest równe:

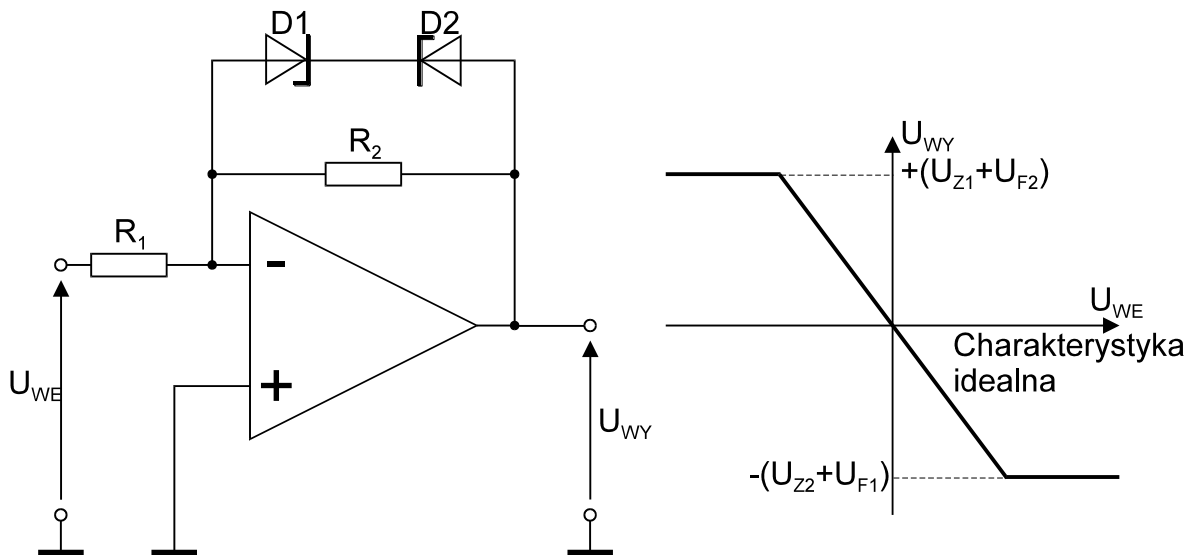
$$U_{wy} = -\frac{R_2}{R_1} U_{we}$$

W przypadku, gdy $R_1=R_2$ wzmocnienie układu równa się -1 i ujemna połówka napięcia wejściowego jest powtarzana na wyjściu jako dodatnia.

4.2. Ogranicznik napięcia

Ogranicznik napięcia jest układem zawierającym w pętli ujemnego sprzężenia zwrotnego elementy nieliniowe (diody prostownicze lub diody Zenera).

Zadaniem ograniczników napięcia jest kształtowanie przebiegu wejściowego polegające na niesymetrycznym lub symetrycznym ograniczeniu przebiegu - od góry lub od dołu albo obustronnie. W układzie WO ograniczenie może zapobiegać wchodzeniu wzmacniacza w nasycenie wywołującemu opóźnienia czasowe. Konieczność ograniczenia napięcia powstaje też przy współpracy wzmacniaczy z układami cyfrowymi. Ogranicznik napięcia z diodami Zenera w pętli sprzężenia zwrotnego jest przedstawiony na rys. 4.2.



Rys. 4.2. Ogranicznik napięcia

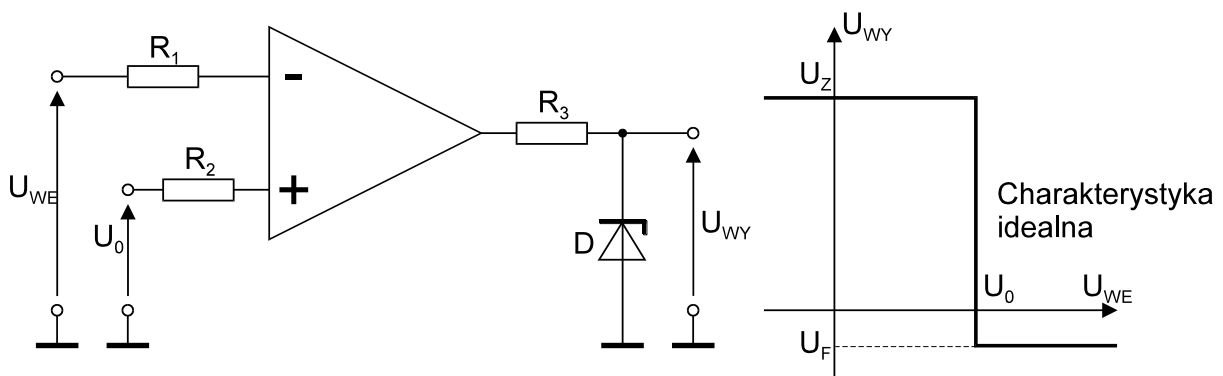
W układzie następuje obustronne ograniczenie przebiegu wejściowego do wartości $(U_Z + U_F)$, przy czym U_Z jest napięciem Zenera diod D1 lub D2, a U_F - ich napięciem w kierunku przewodzenia. W zakresie napięć, w którym diody D1 i D2 nie przewodzą i żadna z nich nie pracuje w obszarze Zenera, układ działa jak wzmacniacz o wzmocnieniu:

$$A_{uf} = -\frac{R_2}{R_1}$$

4.3. Komparator

Funkcja komparatora (układu porównującego) polega na porównaniu wejściowego sygnału analogowego U_{WE} z sygnałem odniesienia U_0 . Na wyjściu układu uzyskuje się rezultat porównania w postaci dwustanowego sygnału logicznego zawierającego informację o znaku różnicy sygnału wejściowego i sygnału odniesienia. Układ porównujący jest więc elementarnym jednobitowym **przetwornikiem analogowo - cyfrowym** i stanowi pośrednie ogniwo między układami analogowymi i cyfrowymi.

Wśród komparatorów rozróżnia się **dyskryminatory progowe** (napięcie odniesienia $U_0 \neq 0$) oraz **detektory przejścia przez zero** ($U_0 = 0$). Na rys. 4.3. przedstawiono różnicowy układ dyskryminatora progowego.



Rys. 4.3. Komparator (dyskryminator progowy)

Napięcie wyjściowe w tym układzie jest równe napięciu Zenera U_Z jeśli $U_{WE} < U_0$ lub napięciu U_F diody Zenera spolaryzowanej w kierunku przewodzenia (około $-0,7V$) jeśli $U_{WE} > U_0$.

Dla zmniejszenia błędu spowodowanego napięciem niezrównoważenia należy dobrać $R_1 = R_2$.

Rezystor R_3 służy do ograniczania prądu diody Zenera D . Poprzez dobranie diody Zenera ustala się poziomy napięcia wyjściowego odpowiednie do współpracy z bramkami logicznymi różnych typów.

Między wejściami WO może wystąpić dość duże napięcie wynikające z różnicy napięć wejściowego i odniesienia. Ten fakt trzeba uwzględnić przy doborze typu wzmacniacza o odpowiednio dużym dopuszczalnym wejściowym napięciu różnicowym.

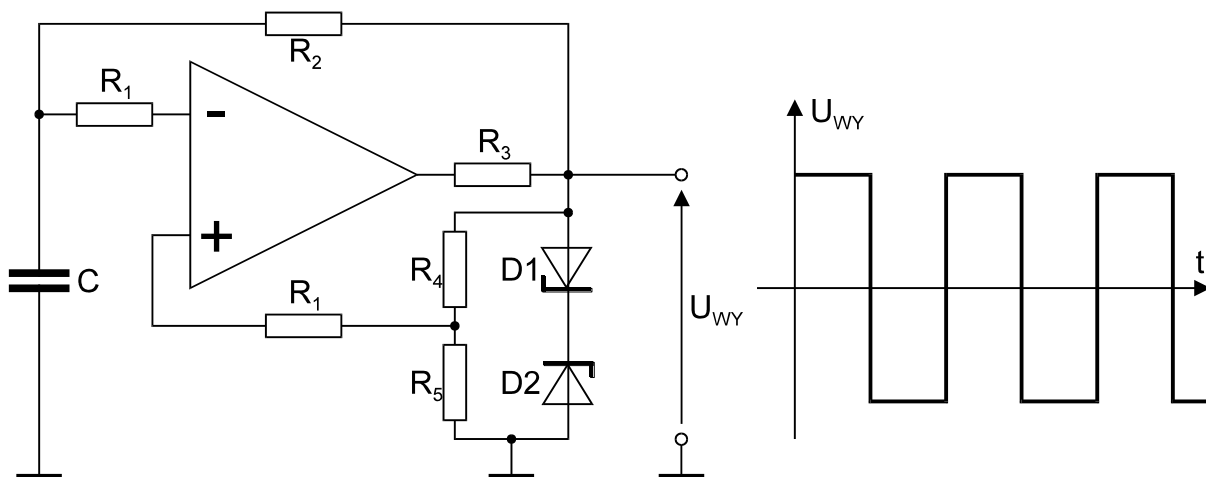
Podany na rys. 4.3. układ dyskryminatora progowego może również pracować jako **detektor przejścia przez zero**, jeżeli rezystor R_2 jest dołączony do masy ($U_0 = 0$).

Sygnal wyjściowy zmienia stan za każdym razem, gdy wartość analogowego sygnału wejściowego przekracza poziom zerowy.

Detektory przejścia przez zero znajdują szerokie zastosowanie w różnych systemach badania i obróbki sygnałów analogowych.

4.4. Generator przebiegu prostokątnego

Dotychczas omówione zastosowania WO obejmowały układy z ujemnym sprzężeniem zwrotnym. Ważną dziedziną wykorzystania wzmacniaczy są też generatory przebiegów, będące układami ze **sprężeniem dodatnim**. Przykład prostego rozwiązania generatora impulsów prostokątnych przy użyciu jednego WO podano na rys. 4.4.



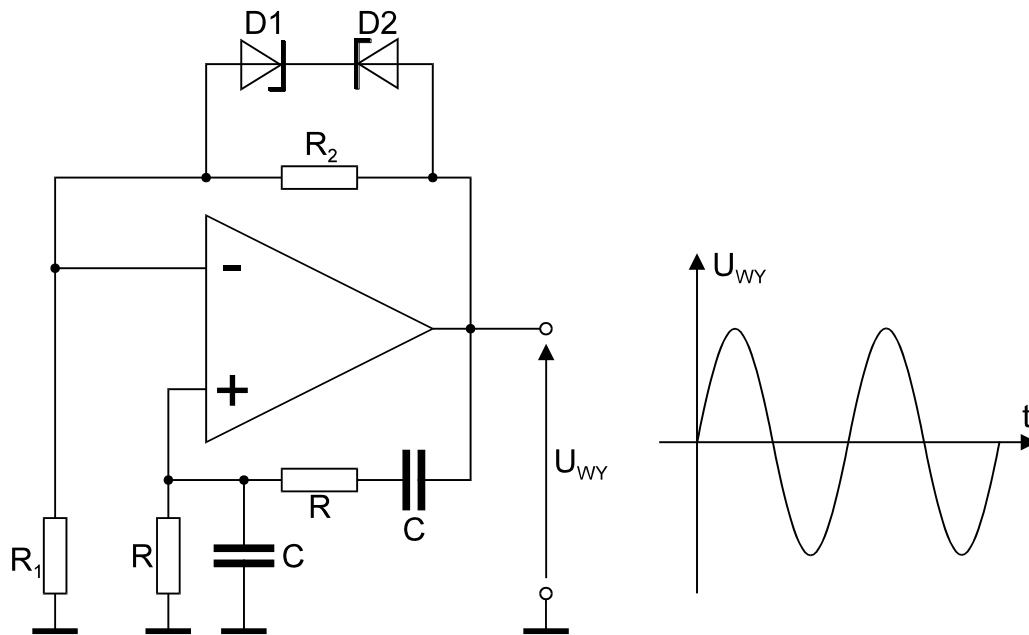
Rys. 4.4. Generator przebiegu prostokątnego.

Napięcie otrzymane na wyjściu jest ograniczone przez diody Zenera $D1$ i $D2$. Elementy R_2 i C tworzą układ całkujący, który decyduje o częstotliwości generatora. Regulację częstotliwości najlepiej jest przeprowadzić zmieniając wartość rezystora R_2 .

4.5. Generator przebiegu sinusoidalnego

Do najprostszych i najczęściej stosowanych generatorów sinusoidalnych o ustalonej częstotliwości należy układ z tzw. mostkiem Wiena.

Podstawowy układ tego rodzaju przedstawiono na rys. 4.5.



Rys. 4.5. Generator przebiegu sinusoidalnego

Diody Zenera D1 i D2 ograniczają i stabilizują amplitudę oscylacji. W pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego są umieszczone elementy RC mostka Wienera. Elementy te decydują o częstotliwości generatora.

4.6. Filtry aktywne RC

4.6.1. Wstęp

Filtry budowane z zastosowaniem WO nazywane są **filtrami aktywnymi**.

Filtr aktywny jest zespołem **elementów pasywnych RC** i **elementów aktywnych** (wzmacniających), najczęściej wzmacniaczy operacyjnych.

Właściwości wzmacniaczy, w tym również i filtrów opisują charakterystyki częstotliwościowe. Podstawową jest charakterystyka amplitudowa, która określa zależność modułu wzmocnienia od częstotliwości. Dwie wartości częstotliwości, przy których wzmocnienie zmniejsza się do określonej wartości są nazywane częstotliwościami granicznymi: dolną f_L i górną f_H i one wyznaczają pasmo przenoszenia. We wzmacniaczach jako typowe przyjęto zmniejszenie wzmocnienia do wartości $\frac{1}{\sqrt{2}} \approx 0,707$ co w mierze logarytmicznej odpowiada 3dB.

Zadaniem **filtrów przepustowych** jest przenoszenie sygnałów o częstotliwościach leżących w **pasmie przenoszenia**, a tłumienie sygnałów o częstotliwościach leżących poza tym pasmem.

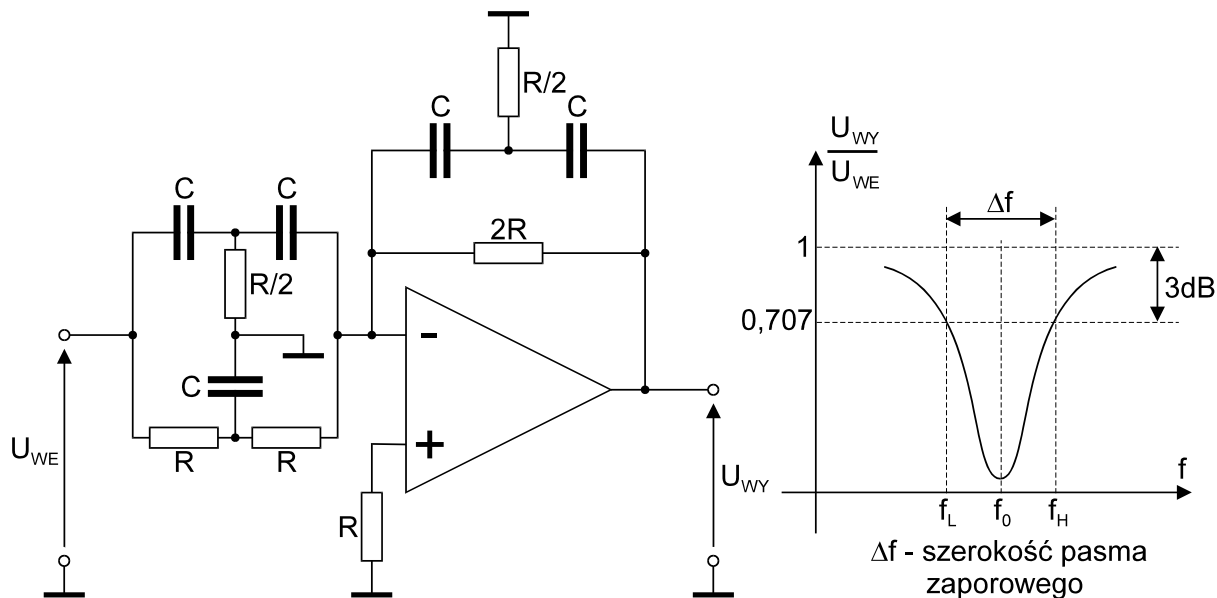
Filtry zaporowe spełniają funkcję odwrotną, tłumią sygnały o częstotliwościach leżących w **pasmie zaporowym**, a przenoszą wszystkie inne sygnały o częstotliwościach leżących poza pasmem zaporowym.

Filtry aktywne, w porównaniu z filtrami pasywnymi RLC, wyróżniają się wieloma zaletami, np.. dużą stabilnością pracy, dokładnością, łatwością przestrajania częstotliwości, brakiem tłumienia sygnału użytecznego a nawet możliwością jego wzmacniania, eliminacją elementów indukcyjnych (L) kosztownych i niewygodnych za względu na duże gabaryty. Filtry aktywne RC mogą pracować w szerokim zakresie częstotliwości - od tysięcznych części herca do kilkudziesięciu, a nawet do kilkuset kiloherców. Górna częstotliwość pracy filtru jest ograniczona pasmem przenoszenia WO.

4.6.2. Filtr zaporowy

Filtry zaporowe (środkowozaporowe) są stosowane do tłumienia sygnałów zakłócających o częstotliwościach leżących w paśmie użytecznym. Mogą być stosowane np. do eliminacji przydzwiku o częstotliwości sieci.

Jedną z wielu możliwych realizacji filtra zaporowego przedstawia rys. 4.6.



Rys. 4.6. Filtr zaporowy

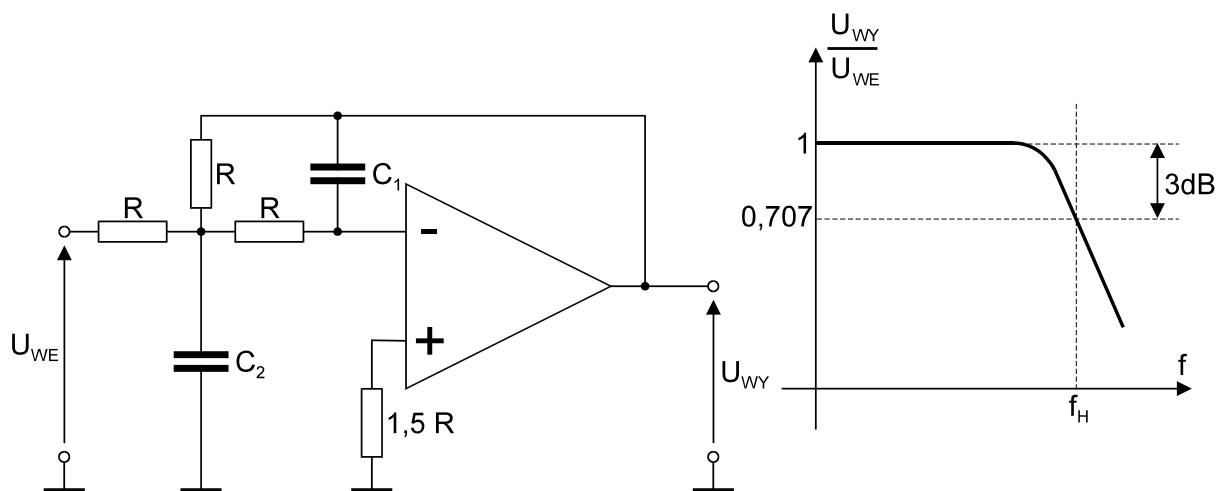
Częstotliwość, przy której występuje maksymalne tłumienie sygnału, jest **częstotliwością środkową (lub zerową) f_0** . Dla filtra przedstawionego na rys. 4.6.:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC}, A_{uf} = -1$$

gdzie A_{uf} jest **wzmocnieniem układu w paśmie przepustowym**.

4.6.3. Filtr dolnoprzepustowy

Przykład dolnoprzepustowego filtra z wielokrotnym sprzężeniem zwrotnym przedstawiono na rys. 4.7



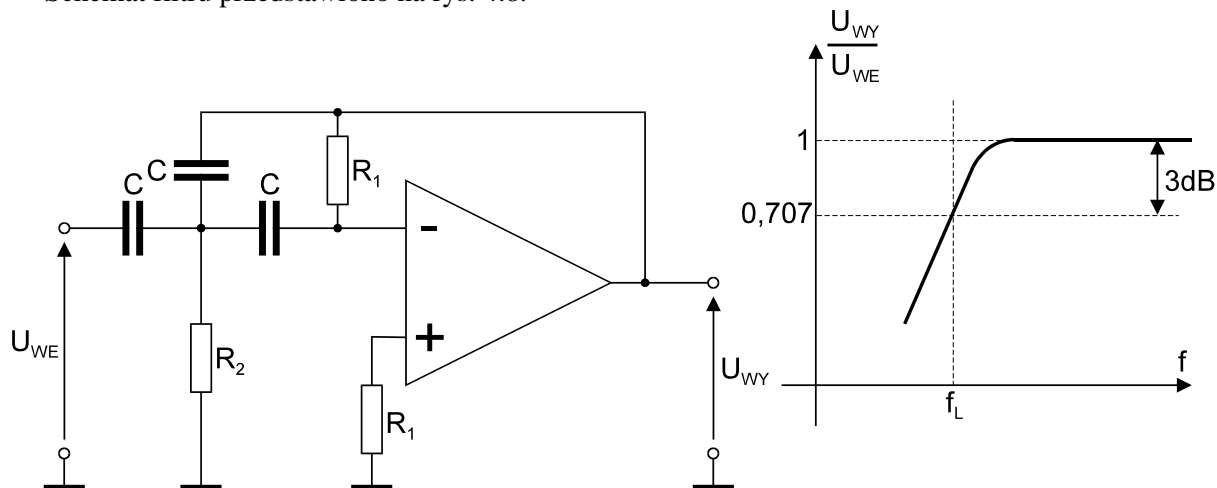
Rys. 4.7. Filtr dolnoprzepustowy

W filtrze tym:

$$f_H = \frac{1}{2\pi R \sqrt{C_1 C_2}}, A_{uf} = -1$$

4.6.4. Filtr górnoprzepustowy

Schemat filtru przedstawiono na rys. 4.8.



Rys. 4.8. Filtr górnoprzepustowy

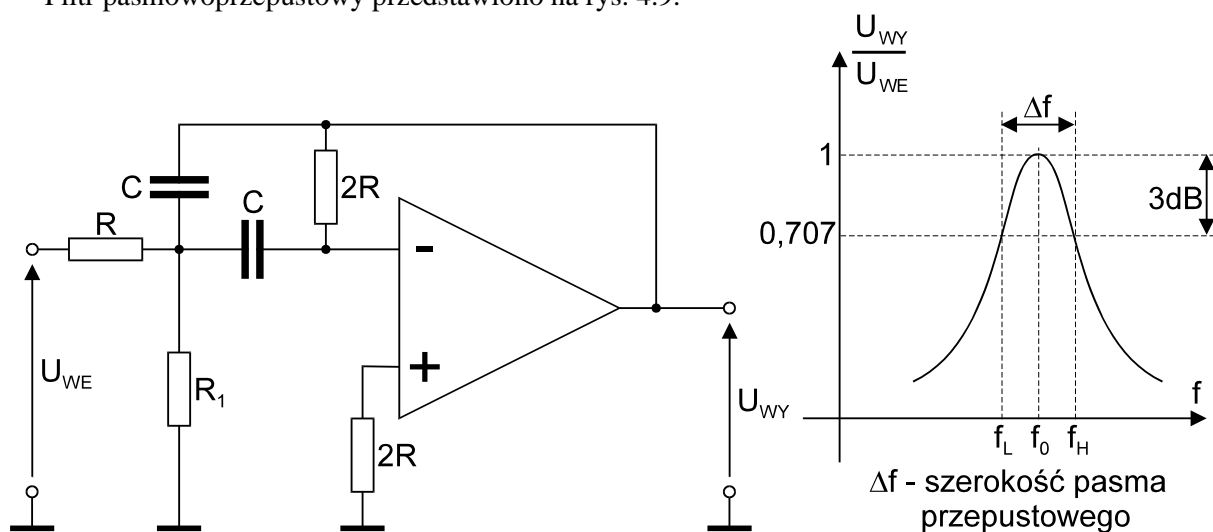
W filtrze tym:

$$f_L = \frac{1}{2\pi C \sqrt{R_1 R_2}}, A_{uf} = -1$$

4.6.5. Filtr pasmowoprzepustowy

Filtry pasmowoprzepustowe (środkowoprzepustowe) są stosowane głównie w takich przypadkach, w których z sygnałów o jednej częstotliwości, lub występujących w wąskim pasmie częstotliwości, należy usunąć towarzyszące im szumy lub zakłócenia o częstotliwościach zbliżonych do częstotliwości sygnału.

Filtr pasmowoprzepustowy przedstawiono na rys. 4.9.



Rys. 4.9. Filtr pasmowoprzepustowy

W filtrze tym:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi RC \sqrt{\frac{2R_1}{R + R_1}}}, \quad A_{uf} = -1$$

5. Program badań laboratoryjnych

W laboratorium Elektrotechniki i Elektroniki przygotowano wszystkie układy z WO w postaci połączonego urządzenia. Wszelkie dołączenia, regulacje i pomiary, dokonuje się za pomocą przycisków, pokręteł i woltomierzy zamontowanych na płycie czołowej urządzenia. Jedynymi elementami przyłączanymi z zewnątrz są oscyloskopy i generator.

5.1. Równoważenie wzmacniacza

Układ badany jak na rys. 2.3.

Dołączyć woltomierz do zacisków WY i regulując potencjometrem P sprowadzić wskazanie woltomierza do zera. W trakcie trwania ćwiczenia **nie należy** przestawiać położenia potencjometru P, gdyż wyzerowany WO jest następnie włączany do wszystkich innych układów.

Po zrównoważeniu WO, odłączyć układ kompensacji odpowiednim przyciskiem na płycie czołowej.

5.2. Wzmacniacz odwracający

Układ badany jak na rys. 3.1.

A. Dołączyć napięcie U_{WE} o polaryzacji „+” albo „-”. Dołączyć woltomierz do zacisków WY i zadając U_{WE} pomierzyć wartość U_{WY} dla poszczególnych wzmocnień wzmacniacza. Wyniki zanotować w tabeli. Na podstawie wyników pomiarów określić rzeczywiste wzmocnienie A_{ufr} wzmacniacza (jako wartość średnią z pomiarów).

$A_{uf}=10$		$A_{uf}=20$		$A_{uf}=100$	
U_{WE}	U_{WY}	U_{WE}	U_{WY}	U_{WE}	U_{WY}
V	V	V	V	V	V
0,5		0,25		0,05	
1,0		0,40		0,10	
$A_{ufr}=\dots$		$A_{ufr}=\dots$		$A_{ufr}=\dots$	

$$A_{ufr} = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$$

B. Dla wzmocnienia $A_{uf}=10$ określić charakterystykę $U_{WY}=f(U_{WE})$ w całym zakresie pracy wzmacniacza. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli.

$A_{uf}=10$	U_{we}	V	-1,5	-1,4	-1,2	-1,0	-0,6	-0,2	+0,2	+0,6	+1,0	+1,2	+1,4	+1,5
	U_{wy}	V												

Na podstawie charakterystyki określić wartość napięcia U_{WY} , przy której wzmacniacz wchodzi w nasycenie

$$+U_{WYsat}=\dots$$

$$-U_{WYsat}=\dots$$

5.3. Wzmacniacz nieodwracający

Układ badany jak na rys. 3.2.

Podobnie jak w p. 5.2.A (pomierzyć napięcie U_{wy} i określić rzeczywiste wzmocnienie A_{ufr} (jako wartość średnią z pomiarów)). Wyniki zanotować w tabeli.

$A_{uf}=10$		$A_{uf}=20$		$A_{uf}=100$	
U_{WE}	U_{WY}	U_{WE}	U_{WY}	U_{WE}	U_{WY}
V	V	V	V	V	V
0,5		0,25		0,05	
1,0		0,40		0,10	
$A_{ufr}=....$		$A_{ufr}=....$		$A_{ufr}=....$	

5.4. Wtórnik napięciowy

Układ badany jak na rys. 3.3.

Dołączyć napięcie U_{WE} o polaryzacji „+” albo „-”. Dołączyć woltomierz do zacisków WY. Sprawdzić działanie wtórnika zadając napięcie U_{WE} i dokonując pomiaru U_{WY} . Wyniki zanotować w tabeli.

U_{WE}	V	2	4	6	8	10
U_{WY}	V					

5.5. Wzmacniacz różnicowy

Układ badany jak na rys. 3.4.

Sprawdzić działanie wzmacniacza zadając różne wartości napięć U_{WE1} i U_{WE2} oraz mierząc U_{WY} . Porównać jeden z otrzymanych wyników z wartością otrzymaną w wyniku obliczenia według zależności teoretycznej opisującej wzmacniacz. Określić A_{uf} układu. Wyniki zanotować w tabeli.

U_{WE1}	V	+5	+5	-5	+5
U_{WE2}	V	+2	-2	+2	+5
U_{WY}	V				

$A_{uf} =$

$U_{WY} = A_{uf} (U_{WE2} - U_{WE1}) = ...$

5.6. Wzmacniacz sumujący

Układ badany jak na rys. 3.5.

Sprawdzić działanie wzmacniacza zadając różne wartości napięć U_{WE1} i U_{WE2} oraz mierząc U_{WY} . Wyniki zanotować w tabeli.

U_{WE1}	V	+5	+5	-5	+5
U_{WE2}	V	+2	-2	+2	+5
U_{WY}	V				

5.7. Wzmacniacz całkujący

Układ badany jak na rys. 3.6.

Na wejście układu przyłączyć generator i nastawić przebieg prostokątny o amplitudzie $U_{WE_{max}}=1V$ i częstotliwości 50Hz. Sprawdzić działanie układu obserwując przebieg wyjściowy. Określić amplitudę sygnału wyjściowego $U_{WY_{max}}$. Obserwacji i pomiarów dokonać za pomocą oscyloskopu. Określić $|A_{uf}|$ układu.

$$U_{WY_{max}} = \dots \quad |A_{uf}| = \dots$$

5.8. Wzmacniacz różniczkujący

Układ badany jak na rys. 3.7.

Na wejście układu przyłączyć generator i nastawić przebieg trójkątny o amplitudzie $U_{WE_{max}}=1V$ i częstotliwości 50Hz. Sprawdzić działanie układu obserwując przebieg wyjściowy. Określić amplitudę sygnału wyjściowego $U_{WY_{max}}$. Obserwacji i pomiarów dokonać za pomocą oscyloskopu. Określić $|A_{uf}|$ układu.

$$U_{WY_{max}} = \dots \quad |A_{uf}| = \dots$$

5.9. Prostownik liniowy

Układ badany jak na rys. 4.1.

Na wejście układu przyłączyć generator i nastawić przebieg sinusoidalny o częstotliwości 50Hz regulując amplitudę napięcia $U_{WE_{max}}$. Sprawdzić działanie układu obserwując przebieg wyjściowy. Określić amplitudy sygnału wyjściowego $U_{WY_{max}}$. Obserwacji i pomiarów dokonać za pomocą oscyloskopu. Określić $|A_{uf}|$ układu. Wyniki zanotować w tabeli.

$U_{WE_{max}}$	mV	50	100	200
$U_{WY_{max}}$	mV			

$$|A_{uf}| = \dots$$

5.10. Ogranicznik napięcia

Układ badany jak na rys 4.2.

Dołączyć napięcie U_{WE} . Dołączyć woltomierz do zacisków WY. Regulując napięcie U_{WE} o obydwu polaryzacjach „+” i „-” pomierzyć U_{WY} - określając w ten sposób charakterystykę $U_{WY}=f(U_{WE})$ układu. Określić A_{uf} układu. Wyniki zanotować w tabeli.

U_{we}	V	-2,0	-1,0	-0,5	-0,3	-0,2	-0,1	+0,1	+0,2	+0,3	+0,5	+1,0	+2,0
U_{wy}	V												

$$A_{uf} = \dots$$

Na podstawie charakterystyki określić wartości napięć Zenera U_{Z1} , U_{Z2} diod D1 i D2. Założyć, że spadek napięcia na przewodzącej diodzie wynosi $U_{F1}=U_{F2}=0,7V$.

$$U_{Z1} = \dots$$

$$U_{Z2} = \dots$$

5.11. Komparator

Układ badany jak na rys. 4.3.

Dołączyć napięcie U_{WE} . Dołączyć napięcie odniesienia U_0 . Dołączyć woltomierz do zacisków WY. Nastawić wartość napięcia odniesienia (np. $U_0=+2V$). Regulować napięcie U_{WE} w zakresie: $U_{WE}<U_0...U_{WE}=U_0...U_{WE}>U_0$, dokonując pomiarów napięcia U_{WY} . Pomierzyć napięcie U_{WE} , przy którym zmienia się stan wyjścia - określając w ten sposób charakterystykę układu $U_{WY}=f(U_{WE})$. Na podstawie charakterystyki określić wartość napięcia Zenera U_Z diody D oraz jej napięcie w kierunku przewodzenia U_F .

$$U_0=+2V$$

U_{WE}	V	-1,0	0	+1,0	+1,9	+2,0	+2,1	+3,0	+4,0
U_{WY}	V								

$$U_Z=...$$

$$U_F=...$$

5.12. Generator przebiegu prostokątnego

Układ badany jak na rys. 4.4.

Dołączyć oscyloskop do zacisków WY. Określić częstotliwość oraz amplitudę sygnału wyjściowego.

$$U_{WYmax} =$$

$$f =$$

5.13. Generator przebiegu sinusoidalnego

Układ badany jak na rys. 4.5.

Dołączyć oscyloskop do zacisków WY. Określić częstotliwość i amplitudę sygnału wyjściowego.

$$U_{WYmax} =$$

$$f =$$

5.14. Filtr zaporowy

Układ badany jak na rys. 4.6.

Dołączyć generator do zacisków WE. Nastawić przebieg sinusoidalny o amplitudzie $U_{WEmax}=1V$.

Regulować częstotliwość napięcia wejściowego. Mierzyć amplitudę napięcia wyjściowego U_{WYmax} .

Pomiary wykonać za pomocą oscyloskopu - określając w ten sposób częstotliwościową

charakterystykę przenoszenia filtru - $\frac{U_{WYmax}}{U_{WEmax}} = F(f)$. Wyniki zanotować w tabeli.

$$U_{WEmax}=1V$$

f	kHz	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
U_{WYmax}	V											
$\frac{U_{WYmax}}{U_{WEmax}}$	-											

Na podstawie charakterystyki określić $|A_{uf}|$ układu, częstotliwość środkową f_0 , częstotliwość dolną f_L , częstotliwość górną f_H oraz szerokość pasma zaporowego Δf .

$$|A_{uf}| = \dots$$

$$f_0 = \dots$$

$$f_L = \dots$$

$$f_H = \dots$$

$$\Delta f = \dots$$

5.15. Filtr dolnoprzepustowy

Układ badany jak na rys. 4.7.

Wykonać czynności analogiczne jak w p. 5.14.

Wyznaczyć charakterystykę przenoszenia filtru - $\frac{U_{WYmax}}{U_{WEmax}} = F(f)$. Wyniki pomiarów zanotować w tabeli.

$$U_{WEmax}=1V$$

f	kHz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U_{WYmax}	V											
$\frac{U_{WYmax}}{U_{WEmax}}$	-											

Na podstawie charakterystyki określić $|A_{uf}|$ układu oraz częstotliwość górną f_H .

$$|A_{uf}| = \dots$$

$$f_H = \dots$$

5.16. Filtr górnoprzepustowy

Układ badany jak na rys. 4.8.

Wykonać czynności jak w p. 5.14. Wyznaczyć charakterystykę przenoszenia filtru - $\frac{U_{WYmax}}{U_{WEmax}} = F(f)$.

Wyniki pomiarów zanotować w tabeli.

$$U_{WEmax}=1V$$

f	kHz	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
U_{WYmax}	V											
$\frac{U_{WYmax}}{U_{WEmax}}$	-											

Na podstawie charakterystyki określić $|A_{uf}|$ układu oraz częstotliwość dolną f_L .

$$|A_{uf}| = \dots$$

$$f_L = \dots$$

5.17. Filtr pasmowoprzepustowy

Układ badany jak na rys. 4.9.

Wykonać czynności jak w p. 5.14. Wyznaczyć charakterystykę przenoszenia filtra - $\frac{U_{WYmax}}{U_{WEmax}} = F(f)$.

Wyniki pomiarów zanotować w tabeli.

$$U_{WEmax}=1V$$

f	kHz	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	1,1
U_{WYmax}	V											
$\frac{U_{WYmax}}{U_{WEmax}}$	-											

Na podstawie charakterystyki określić $|A_{uf}|$ układu, częstotliwość środkową f_0 , częstotliwość dolną f_L , częstotliwość górną f_H oraz szerokość pasma przepustowego Δf .

$$|A_{uf}| = \dots$$

$$f_0 = \dots$$

$$f_L = \dots$$

$$f_H = \dots$$

$$\Delta f = \dots$$

L I T E R A T U R A

1. Nadachowski N., Kulka Z. : Analogowe układy scalone. Warszawa, WKiŁ 1979
2. Kulka Z., Nadachowski M. : Wzmacniacze operacyjne i ich zastosowanie cz.2 realizacje praktyczne. Warszawa, WNT 1982.
3. Sonta S., Kotlewski H. : Układy scalone liniowe i ich zastosowanie. Warszawa, WNT 1977.
4. Rusek M., Ćwirko R., Marciniak W. : Przewodnik po elektronice. Warszawa, WNT 1986.
5. Horowitz P., Hill W. : Sztuka elektroniki, cz. 1 i 2. Warszawa WKiŁ 1996.