



AKADEMIA MORSKA W SZCZECINIE

JEDNOSTKA ORGANIZACYJNA:
ZAKŁAD KOMUNIKACYJNYCH TECHNOLOGII MORSKICH

INSTRUKCJA

ELEKTROTECHNIKA I ELEKTRONIKA
Laboratorium
Ćwiczenie nr 9: Wzmacniacz operacyjny

Opracował:	dr inż. Marcin Mąka, dr inż. Piotr Majzner
Zatwierdził:	dr inż. Piotr Majzner
Obowiązuje od: 24. IX 2012	

Spis treści

9.1. Cel i zakres ćwiczenia

9.2. Opis stanowiska laboratoryjnego

9.3. Przebieg ćwiczenia

9.4. Warunki zaliczenia

9.5. Część teoretyczna

9.6. Literatura

9.7. Efekty kształcenia

9. Wzmacniacz operacyjny

9.1. Cel i zakres ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest opanowanie wiedzy z zakresu budowy, parametrów, charakterystyk i zastosowania wzmacniacza operacyjnego.

Zagadnienia

1. Wzmacniacz operacyjny – podstawowe pojęcia.
2. Parametry idealnego wzmacniacza operacyjnego
3. Parametry rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego
4. Wzmacniacz odwracający.
5. Wzmacniacz nieodwracający.
6. Wtórnik
7. Wzmacniacz całkujący.
8. Wzmacniacz różniczkujący.
9. Sumator.
10. Wzmacniacz różnicowy.
11. Komparator.
12. Wzmacniacz logarytmujący.
13. Wzmacniacz potęgujący

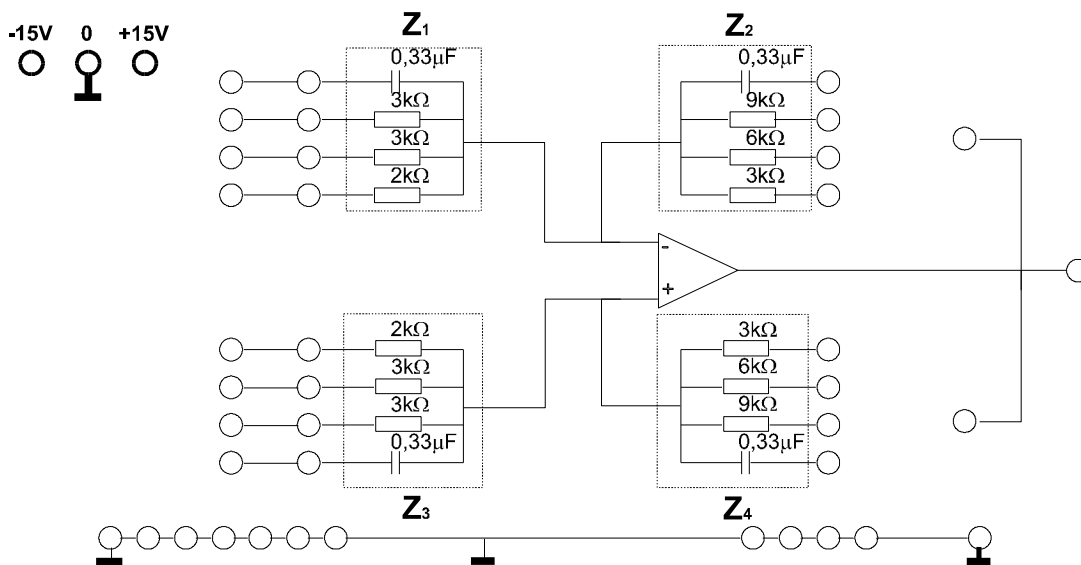
Pytania kontrolne.

1. Co to jest wzmacniacz operacyjny ?
2. Narysuj i omów symbol graficzny wzmacniacza operacyjnego.
3. Podaj parametry idealnego wzmacniacza operacyjnego.
4. Podaj parametry rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego.
5. Wymień zastosowanie wzmacniacza operacyjnego.
6. Narysuj i omów działanie następujących układów :
 - wzmacniacza odwracającego i nieodwracającego,
 - wtórnik,
 - układu całkującego (integratora) i różniczkującego,
 - sumatora dwóch, trzech, wielu sygnałów,
 - układu różnicowego
 - wzmacniacza logarytmującego i potęgującego.

9.2. Opis układu pomiarowego.

Zestaw przyrządów:

- generator funkcyjny GFT 73,
- zasilacz wzmacniaczy operacyjnych,
- oscyloskop dwukanałowy,
- płytka wzmacniacza operacyjnego.



Rys. 9.2.1. Schemat układu badanego.

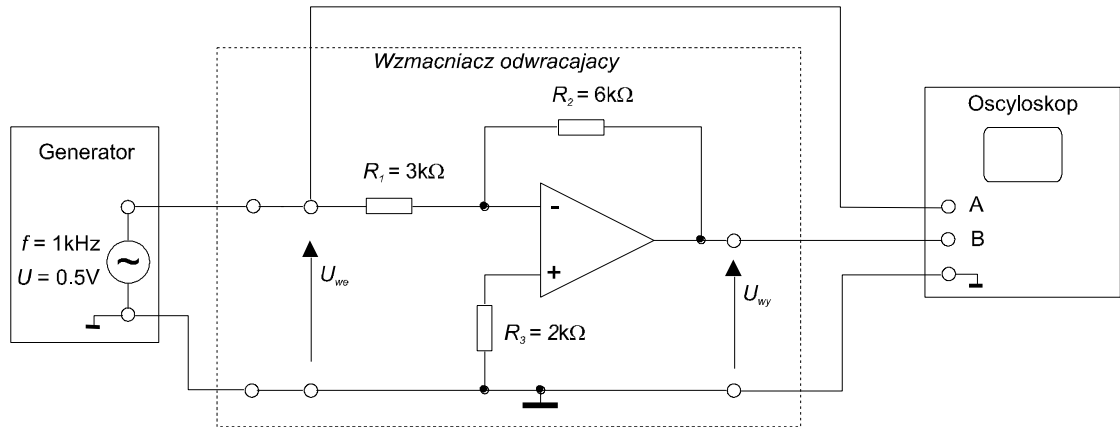
9.3. Wykonanie ćwiczenia

**UWAGA!!! URZADZENIA WŁĄCZYĆ ZA ZGODA PROWADZĄCEGO
WZMACNIACZ ŁĄCZYĆ PRZY WYŁĄCZONYM ZASILANIU I GENERATORZE**

Podłączyć zasilanie układu wzmacniacza operacyjnego (napięcia +15V, masa, -15V).

9.3.1. Badanie wzmacniacza odwracającego fazę

- Połączyć układ pomiarowy z rys. 9.3.1, gdzie $R_1=3\text{ k}\Omega$, $R_2=6\text{ k}\Omega$, $R_3=2\text{ k}\Omega$. Przerysować schemat wzmacniacza odwracającego. Na wejście wzmacniacza podać z generatora sygnał sinusoidalny o amplitudzie $U_{we} = 0.5\text{ V}$ i częstotliwości $f=1\text{ kHz}$.



Rys. 9.3.1. Układ do badania wzmacniacza odwracającego

- Przerysować przebiegi sygnałów wejściowego i wyjściowego. (Zwrócić uwagę na przesunięcie fazowe między sygnałami). Zmierzyć amplitudę napięcia wyjściowego U_{wy} i zapisać do tabeli 9.1. Na podstawie obserwowanych przebiegów policzyć wzmocnienie.

$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$$

- Sprawdzić czy wartość policzonego wzmocnienia jest zbliżona do wartości wzmocnienia układu policzonego ze wzoru:

$$k_u = -\frac{R_2}{R_1}$$

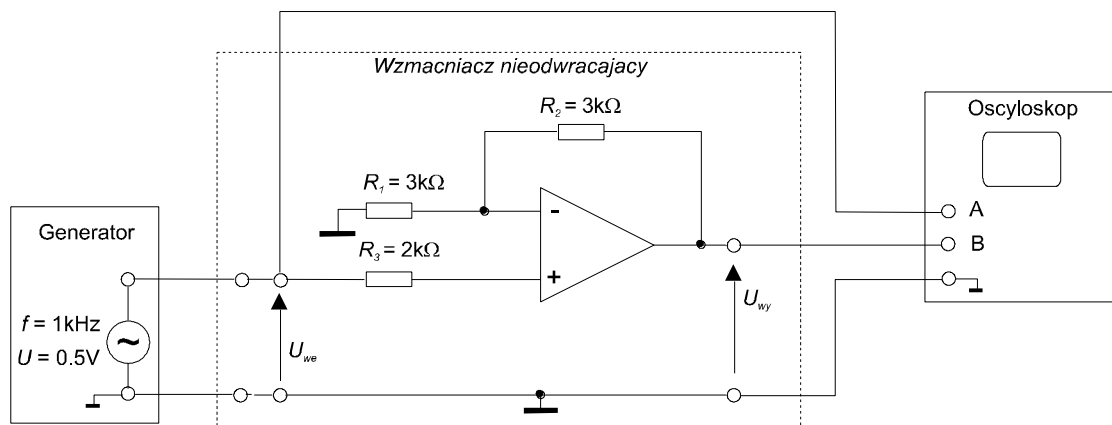
- Zmieniać wartości rezystorów R_1 i R_2 według tabeli 9.1. Rezystor R_3 połączyć o wartości równej równoległemu połączeniu rezystancji R_1 i R_2 (lub połączyć równolegle dwa rezystory o takich samych wartościach jak R_1 i R_2). Podając na wejście wzmacniacza sygnał sinusoidalny o amplitudzie $U_{we} = 0.5\text{ V}$ i częstotliwości $f=1\text{ kHz}$ zmierzyć amplitudy napięć wyjściowych U_{wy} i wpisać wyniki do tabeli.

Tabela 9.1. Badanie wzmacniacza odwracającego.

R_1 [kΩ]	R_2 [kΩ]	$k_u = -\frac{R_2}{R_1}$	U_{we} [V]	U_{wy} [V]	$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$
3	6				
3	3				
3	9				
2	3				
2	6				
2	9				

9.3.2. Badanie wzmacniacza nieodwracającego.

- Połączyć układ pomiarowy z rys. 9.3.2 gdzie $R_1=3\text{ k}\Omega$, $R_2=6\text{ k}\Omega$ $R_3=2\text{ k}\Omega$. Przerysować schemat wzmacniacza nieodwracającego. Na wejście wzmacniacza podać z generatora sygnał sinusoidalny o amplitudzie $U_{we} = 0.5\text{ V}$ i częstotliwości $f = 1\text{ kHz}$.



Rys.9.3.2. Układ do badania wzmacniacza nieodwracającego

- Przerysować przebiegi sygnałów wejściowego i wyjściowego. (Zwrócić uwagę na przesunięcie fazowe między sygnałami). Zmierzyć amplitudę napięcia wyjściowego U_{wy} i zapisać do tabeli 9.2. Na podstawie obserwowanych przebiegów policzyć wzmocnienie:

$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$$

- Sprawdzić czy wartość policzonego wzmocnienia jest zbliżona do wartości wzmocnienia układu policzonego ze wzoru:

$$k_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$$

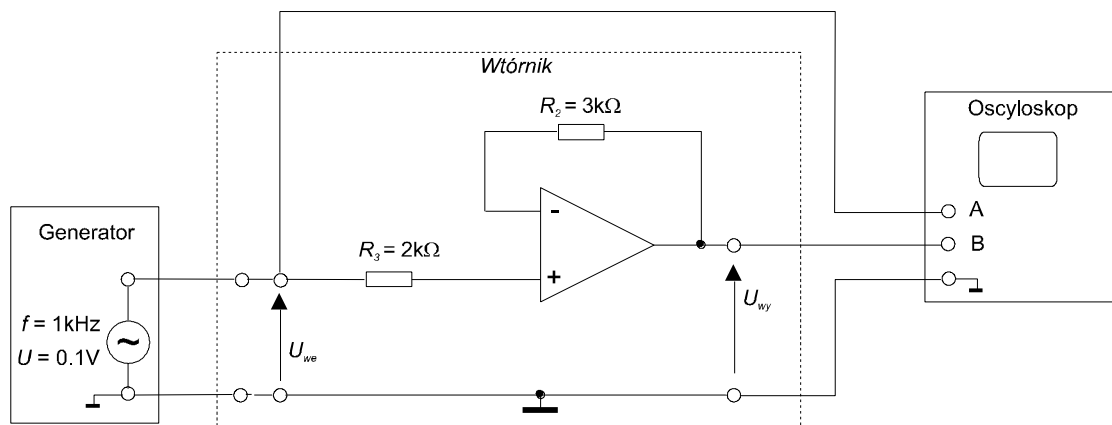
- Zmieniać wartości rezystorów R_1 i R_2 według tabeli 9.2. a R_3 niech zawsze wynosi $2\text{ k}\Omega$. Podając na wejście wzmacniacza sygnał sinusoidalny o amplitudzie $U_{we} = 0.5\text{ V}$ i częstotliwości $f = 1\text{ kHz}$ zmierzamy amplitudy napięć wyjściowych U_{wy} i wpisać wyniki do tabeli.

Tabela 9.2. Badanie wzmacniacza nieodwracającego.

R_1 [kΩ]	R_2 [kΩ]	$k_u = 1 + \frac{R_2}{R_1}$	U_{we} [V]	U_{wy} [V]	$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$
3	6				
3	3				
3	9				
2	3				
2	6				
2	9				

9.3.3. Badanie wtórnika

- Połączyć układ pomiarowy z rys. 9.3.3. gdzie $R_2 = 3\text{ k}\Omega$ i $R_3 = 2\text{ k}\Omega$. Przerysować schemat wtórnika. Na wejście wzmacniacza podać z generatora sygnał sinusoidalny o amplitudzie $U_{we} = 0.1\text{ V}$ i częstotliwości $f = 1\text{ kHz}$.



Rys. 9.3.3. Układ do badania wtórnika

- Przerysować przebiegi sygnałów wejściowego i wyjściowego. Zmierzyć amplitudę napięcia wyjściowego i zapisać do tabeli 9.3. Na podstawie obserwowanych przebiegów policzyć wzmocnienie.

$$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$$

- Sprawdzić czy wartość policzonego wzmocnienia jest zbliżona do wartości wzmocnienia układu policzonego ze wzoru:

$$k_u = \lim_{R_1 \rightarrow \infty} \frac{R_1 + R_2}{R_1}$$

- Zmieniać wartość rezystancji $R_2 = 6\text{ k}\Omega$, $9\text{ k}\Omega$ (zgodnie z tabelą 9.3), przy niezmiennym napięciu wejściowym wynoszącym $U_{we} = 0.1\text{ V}$. Podając na wejście wzmacniacza sygnał sinusoidalny o częstotliwości $f = 1\text{ kHz}$ zmierzyć amplitudy napięć wyjściowych U_{wy} i wpisać wyniki do tabeli.
- Ustawić $R_2 = 3\text{ k}\Omega$. Zmieniać amplitudę napięcia wejściowego $U_{we} = 0.2\text{ V}$, 0.3 V , 0.5 V , (zgodnie z tabelą 9.3.). Zmierzyć amplitudy napięć wyjściowych U_{wy} i wpisać wyniki do tabeli.

Tabela 9.3. Badanie wtórnika

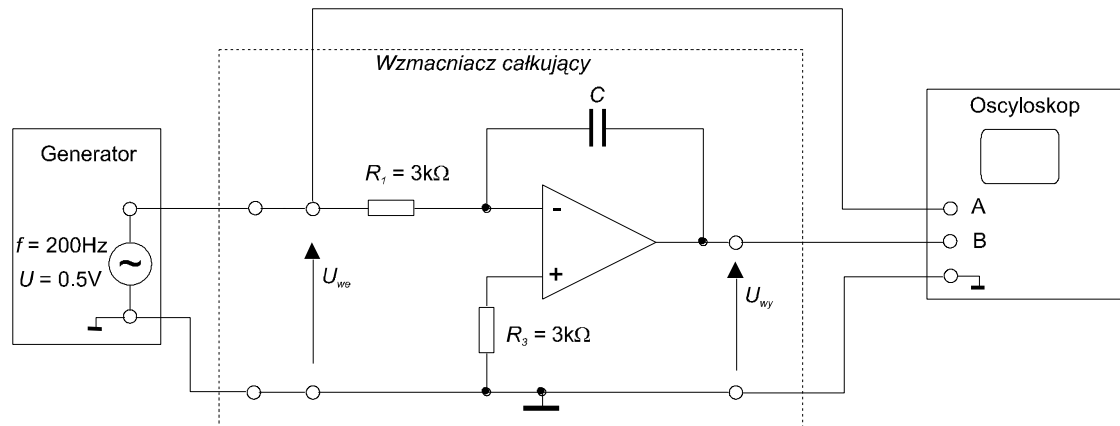
R_2 [kΩ]	$k_u = \lim_{R_1 \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right)$	U_{we} [V]	U_{wy} [V]	$k_u = \frac{U_{wy}}{U_{we}}$
3		0.1		
6		0.1		
9		0.1		
3		0.2		
3		0.3		
3		0.5		

9.3.4. Badanie integratora (układu całkującego).

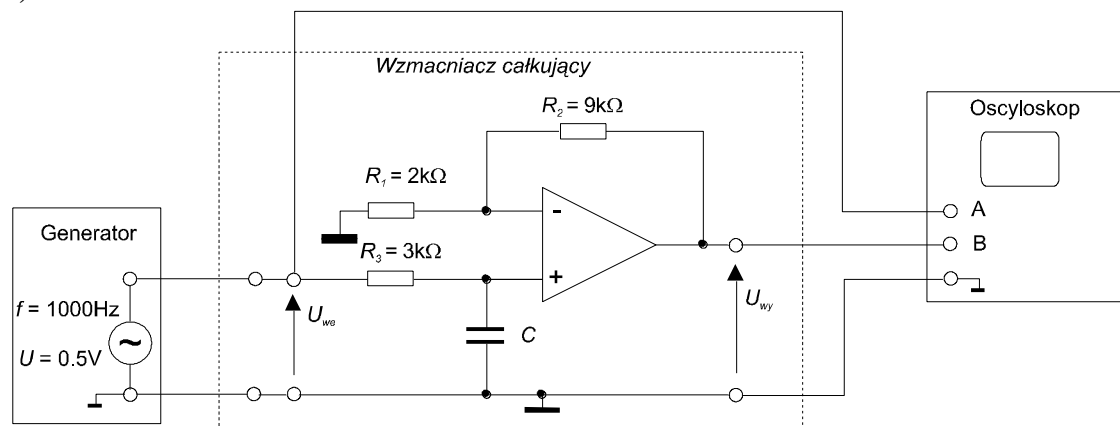
- Połączyć **jeden** z układów pomiarowych z rys. 9.3.4. (według wskazówek prowadzącego). Przerysować schemat układu całkującego. Na wejście integratora podać z generatora sygnał sinusoidalny o amplitudzie $U_{we} = 0.5\text{ V}$ i częstotliwości:

- a) dla układu całkującego zbudowanym na wejściu odwracającym $f = 200\text{ Hz}$,
- b) dla układu całkującego zbudowanym na wejściu nieodwracającym $f = 1000\text{ Hz}$,

a)



b)



Rys. 9.3.4. Układ do badania integratora a) na wejściu odwracającym, b) na wejściu nieodwracającym.

- Przerysować sygnały wejściowy i wyjściowy. Na podstawie obserwowanych przebiegów sprawdzić, czy układ realizuje całkowanie sygnału wejściowego:

$$U_{wy} = \int U_{we}(t) dt$$

- Zmieniać kolejno kształt sygnału wejściowego na:
 - a. prostokątny,
 - b. trójkątny.

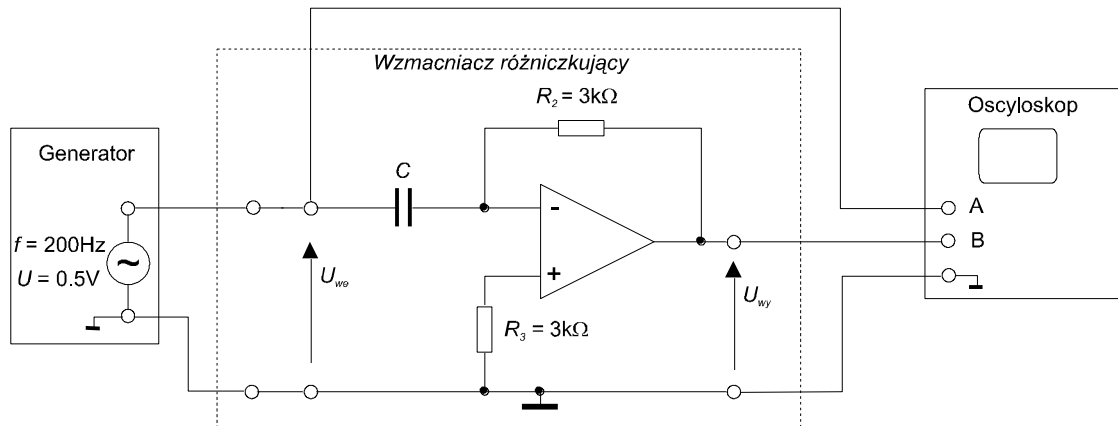
Przerysować sygnały wejściowe i wyjściowe. Na podstawie obserwowanych przebiegów sprawdzić, czy układ realizuje całkowanie sygnału wejściowego.

Wskazówka: jeden okres sygnału prostokątnego i trójkątnego napięcia wejściowego podzielić na dwa odcinki i zapisać w postaci funkcji matematycznej. Następnie porównać z tak samo podzielonymi i zapisanymi sygnałami na wyjściu układu całkującego

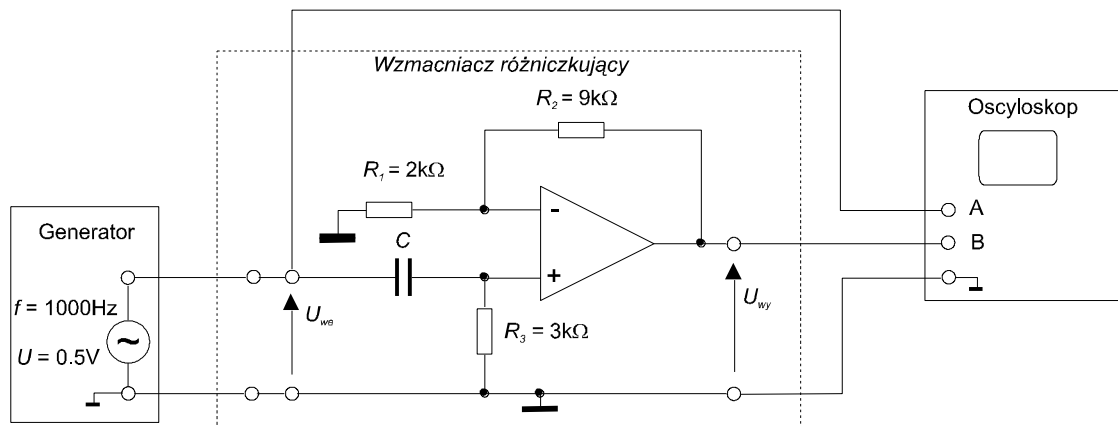
9.3.5. Badanie układu różniczkującego

- Połączyć **jeden** z układów pomiarowych z rys. 9.3.5. (według wskazówek prowadzącego). Przerysować schemat układu różniczkującego. Na wejście układu podać z generatora sygnał sinusoidalny o amplitudzie $U_{we} = 0.5 \text{ V}$ i częstotliwości:
 - dla układu różniczkującego zbudowanym na wejściu odwracającym $f = 200 \text{ Hz}$,
 - dla układu różniczkującego zbudowanym na wejściu nieodwracającym $f = 1000 \text{ Hz}$.

a)



b)



Rys. 9.3.5. Układ do badania układu różniczkującego: a) na wejściu odwracającym, b) na wejściu nieodwracającym.

- Przerysować sygnały wejściowe i wyjściowe. Na podstawie obserwowanych przebiegów sprawdzić, czy układ realizuje różniczkowanie sygnału wejściowego:

$$U_{wy} = \frac{dU_{we}(t)}{dt}$$

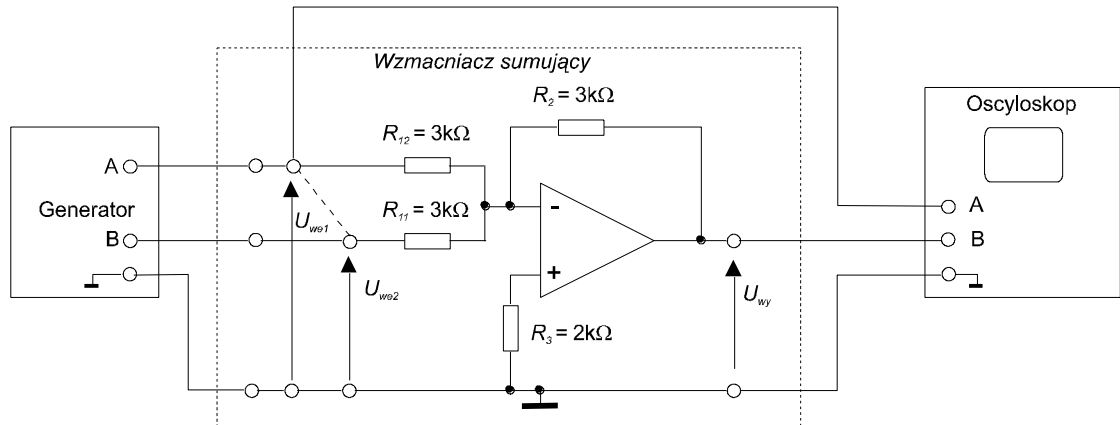
- Zmieniać kolejno kształt sygnału wejściowego na:
 - prostokątny,
 - trójkątny.

Przerysować sygnały wejściowe i wyjściowe. Na podstawie obserwowanych przebiegów sprawdzić, czy układ realizuje różniczkowanie sygnału wejściowego.

Wskazówka: jeden okres sygnału prostokątnego i trójkątnego napięcia wejściowego podzielić na dwa odcinki i zapisać w postaci funkcji matematycznej. Następnie porównać z tak samo podzielonymi i zapisanymi sygnałami na wyjściu układu różniczkującego.

9.3.6. Badanie sumatora.

- Połączyć układ pomiarowy z rys. 9.3.6. gdzie. $R_{11} = R_{12} = 3 \text{ k}\Omega$, $R_2 = 3 \text{ k}\Omega$ $R_3 = 2 \text{ k}\Omega$. Przerysować schemat sumatora. Na wejście układu podać z generatora dwa sygnały sinusoidalne o częstotliwości $f = 1 \text{ kHz}$ i jednakowych amplitudach $U_{we1} = U_{we2} = 0.1 \text{ V}$.



Rys. 9.3.6. Układ do badania sumatora.

- Przerysować przebiegi napięć wejściowych U_{we1} i U_{we2} oraz napięcia wyjściowego U_{wy} . (Zwrócić uwagę na przesunięcie fazowe między sygnałami). Zmierzyć amplitudę napięcia wyjściowego U_{wy} i zapisać do tabeli 9.6. Na podstawie obserwowanych przebiegów policzyć amplitudę napięcia wyjściowego U_{wy} będącego sumą amplitud napięć wejściowych U_{we1} i U_{we2} :

$$U_{wy} = U_{we1} + U_{we2}$$

- Sprawdzić czy wartość policzonego napięcia wyjściowego U_{wy} jest zbliżona do wartości napięcia policzonego ze wzoru:

$$U_{wy} = -R_2 \left(\frac{U_{we1}}{R_{11}} + \frac{U_{we2}}{R_{12}} \right)$$

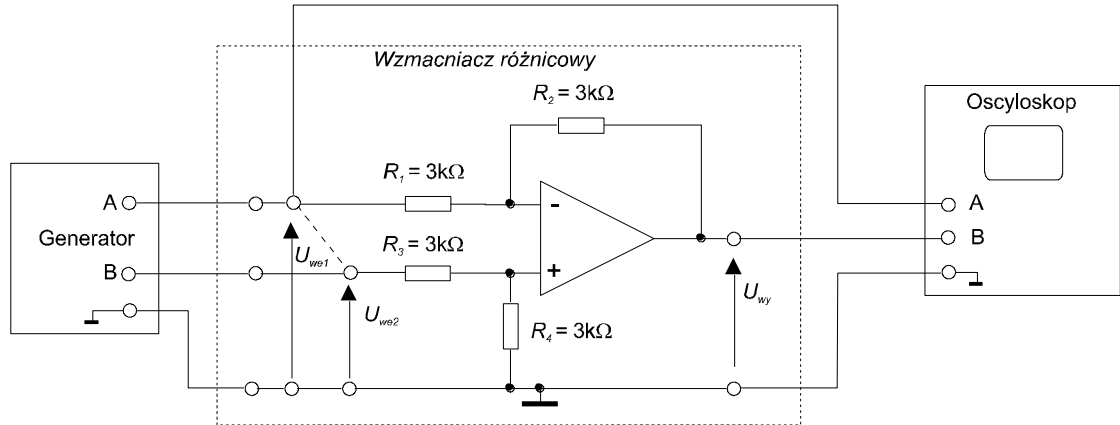
- Zmieniać amplitudy napięć wejściowych U_{we1} i U_{we2} zgodnie z tabelą 9.6. Zmierzyć amplitudy napięć wyjściowych U_{wy} i wpisać wyniki do tabeli.
- Ustawić rezystor $R_2 = 6 \text{ k}\Omega$. Podobnie jak w punkcie poprzednim Zmieniać amplitudy napięć wejściowych U_{we1} i U_{we2} zgodnie z tabelą 9.6. Zmierzyć amplitudy napięć wyjściowych U_{wy} i wpisać wyniki do tabeli.

Tabela 9.6. Badanie sumatora

$R_{11}=R_{12}$ [kΩ]	R_2 [kΩ]	U_{we1} [V]	U_{we2} [V]	U_{wy} [V]	$U_{wy} = -R_2 \left(\frac{U_{we1}}{R_{11}} + \frac{U_{we2}}{R_{12}} \right)$
3	3	0.1	0.1		
3	3	0.1	0.2		
3	3	0.2	0.2		
3	6	0.1	0.1		
3	6	0.1	0.2		
3	6	0.2	0.2		

9.3.7. Badanie układu różnicowego.

- Połączyć układ pomiarowy z rys. 9.3.7. gdzie. $R_1 = R_2 = R_3 = R_4 = 3\text{ k}\Omega$. Przerysować schemat układu różnicowego. Na wejście układu podać z generatora dwa sygnały sinusoidalne o częstotliwości $f = 1\text{ kHz}$ i amplitudach $U_{we1} = 0.1\text{ V}$ i $U_{we2} = 0.2\text{ V}$.



Rys. 9.3.7. Układ do badania układu różnicowego.

- Przerysować przebiegi napięć wejściowych U_{we1} i U_{we2} oraz napięcia wyjściowego U_{wy} . (Zwrócić uwagę na przesunięcie fazowe między sygnałami). Zmierzyć amplitudę napięcia wyjściowego U_{wy} i zapisać do tabeli 9.7. Na podstawie obserwowanych przebiegów policzyć amplitudę napięcia wyjściowego U_{wy} będącego różnicą amplitud napięć wejściowych U_{we2} i U_{we1} :

$$U_{wy} = U_{we2} - U_{we1}$$

- Sprawdzić czy wartość policzonego napięcia wyjściowego U_{wy} jest zbliżona do wartości napięcia policzonego ze wzoru:

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

- Zmieniać amplitudy napięć wejściowych U_{we1} i U_{we2} zgodnie z tabelą 9.7. Zmierzyć amplitudy napięć wyjściowych U_{wy} i wpisać wyniki do tabeli.
- Ustawić rezystor $R_2 = R_4 = 6\text{ k}\Omega$. Podobnie jak w punkcie poprzednim zmieniać amplitudy napięć wejściowych U_{we1} i U_{we2} zgodnie z tabelą 9.7. Zmierzyć amplitudy napięć wyjściowych U_{wy} i wpisać wyniki do tabeli.

Tabela 9.7. Badanie układu różnicowego.

$R_1 = R_3$ [kΩ]	$R_2 = R_4$ [kΩ]	U_{we2} [V]	U_{we1} [V]	U_{wy} [V]	$U_{wy} = \frac{R_2}{R_1} (U_{we2} - U_{we1})$
3	3	0.2	0.1		
3	3	0.2	0.2		
3	3	0.2	0.3		
3	6	0.2	0.1		
3	6	0.2	0.2		
3	6	0.2	0.3		

9.4. Warunki zaliczenia ćwiczenia

Warunkiem zaliczenia ćwiczenia jest:

- napisanie z wynikiem pozytywnym krótkiego sprawdzianu na początku zajęć;
- wykonanie ćwiczenia;
- sporządzenie sprawozdania według instrukcji zawartej poniżej;
- obrona sprawozdania na następnych zajęciach;
- potwierdzenie opanowania zakresu ćwiczenia na ostatnich zajęciach zaliczeniowych;

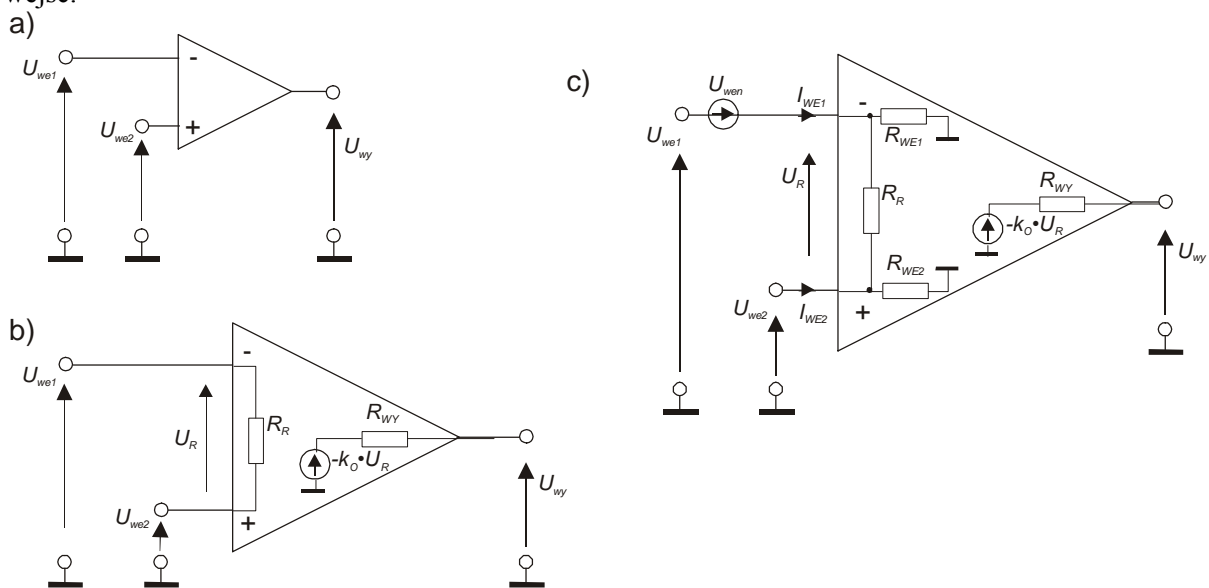
W sprawozdaniu należy zamieścić:

- schematy wszystkich przebadanych układów wzmacniacza operacyjnego.
- uzupełnioną kartę pomiarową.
- sygnały wejściowe jakie były dołączone do układów badanych oraz sygnały zaobserwowane na wyjściach tych układów,
- policzone wzmocnienia według podanych wzorów oraz policzone wzmocnienia na podstawie przerysowanych przebiegów,
- matematyczne uzasadnienia całkowania i różniczkowania sygnałów,
- własne wnioski i spostrzeżenia.

9.5.1. Podstawy działania

Nazwa wzmacniacz operacyjny dotyczyła początkowo układów wzmacniających stosowanych w elektronicznych maszynach analogowych do wykonywania operacji matematycznych takich jak dodawanie, odejmowanie, całkowanie i różniczkowanie sygnałów elektrycznych. Dzięki swemu uniwersalnemu zastosowaniu, jest obecnie podstawowym, najbardziej rozpowszechnionym analogowym układem scalonym. Wzrost zainteresowania wzmacniaczami operacyjnymi nastąpił po wprowadzeniu do produkcji wzmacniaczy w postaci wytwarzanych masowo monolitycznych układów scalonych o bardzo dobrych właściwościach, niewielkich rozmiarach i niskiej cenie (w 2000 r. detaliczny koszt jednego układu kształtował się na poziomie 1 zł).

Obecnie pojęcie wzmacniacz operacyjny oznacza wzmacniacz charakteryzujący się bardzo dużym wzmocnieniem napięciowym, i przeznaczony z reguły do pracy z zewnętrznym obwodem ujemnego sprzężenia zwrotnego. To właśnie właściwości sprzężeń zwrotnych decydują w głównej mierze o właściwościach całego układu. W najprostszym przypadku sprzężenie zwrotne to doprowadzenie sygnału przez szeregowo włączoną rezystancję lub bezpośrednio z wyjścia na jedno z wejść.



Rys. 9.5.1. Wzmacniacz operacyjny a) symbol graficzny, b) najprostszy schemat zastępczy, c) schemat zastępczy.

Wzmacniacz operacyjny ma symetryczne (różnicowe) wejście i niesymetryczne wyjście (rys.9.5.1.a). Wejście oznaczone plusem „+” nosi nazwę *wejścia nieodwracającego* (nieinwersyjnego), a wejście oznaczone minusem „-” nosi nazwę *wejścia odwracającego* (inwersyjnego). Jeżeli do wejścia odwracającego „-” doprowadzone będzie napięcie sinusoidalne, to przesunięcie fazowe między sygnałami wejściowym U_{WE1} i wyjściowym U_{WY} będzie wynosić 180° , to znaczy sygnał na wyjściu będzie „odwrócony” w stosunku do sygnału wejściowego. Przy doprowadzeniu tego samego napięcia do wejścia nieodwracającego „+” przesunięcie fazowe między sygnałami wyniesie 0, to znaczy sygnały wejściowy U_{WE2} i wyjściowy U_{WY} będą „zgodne” w fazie.

Napięcie będące różnicą napięć wejściowych U_{WE1} i U_{WE2} nazywamy *napięciem różnicowym*. U_R . Napięcie na wyjściu wzmacniacza jest wprost proporcjonalne do wartości napięcia różnicowego czyli do różnicy napięć wejściowych zgodnie z zależnością:

$$U_{WY} = k_o \cdot (U_{WE2} - U_{WE1}) = k_o \cdot U_R \quad (9.5.1)$$

gdzie:

- U_{WE2} , - napięcia wejściowe dołączone do wejścia nieodwracającego „+”
- U_{WE1} , - napięcia wejściowe dołączone do wejścia odwracającego „-”
- U_R - napięcie różnicowe,

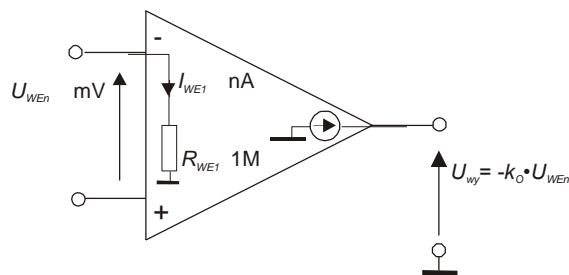
- k_O - wzmacnienie napięciowe wzmacniacza operacyjnego,
- U_{WY} - napięcie wyjściowe wzmacniacza operacyjnego.

9.5.2. Parametry idealnego wzmacniacza operacyjnego.

Idealny wzmacniacz operacyjny powinien charakteryzować się następującymi właściwościami:

- nieskończenie dużym wzmacnieniem przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego ($k_O \rightarrow \infty$),
- nieskończenie szerokim pasmem przenoszenia częstotliwości,
- nieskończenie dużą rezystancją (impedancją) wejściową, zarówno między wejściami odwracającym i nieodwracającym ($R_R \rightarrow \infty$) jak i między każdym z wejść a masą ($R_{WE1} \rightarrow \infty$, $R_{WE2} \rightarrow \infty$),
- rezystancją (impedancją) wyjściową równą zero ($R_{WY} = 0$),
- napięciem wyjściowym równym zero przy równości napięć wejściowych ($U_{WY} = 0$, przy $U_{WE1} = U_{WE2}$),
- nieskończenie dużym dopuszczalnym prądem wyjściowym ($I_{WYmax} \rightarrow \infty$),
- zerowymi prądami wejściowymi ($I_{WE1max} = 0$, $I_{WE2max} = 0$), zwanymi także wejściowymi prądami polaryzacji,
- wzmacnieniem idealnie różnicowym, tzn. nieskończenie dużym współczynnikiem sygnału tłumienia sygnału wspólnego (nieróżnicowego), ($WTSN \rightarrow \infty$),
- zachowaniem powyższych właściwości przy zmianach temperatury.

Wyjaśnić należy pojęcie *współczynnika tłumienia sygnału wspólnego* (zwanym także *nieróżnicowym*). Otóż założmy, że wzmacniacz operacyjny posiada na przykład na wejściu nieodwracającym dużą rezystancję R_{WE} o wartości ok. 1 M Ω .



Rys. 9.5.2. Ilustracja wpływu napięcia niezrównoważenia.

Stopnie wejściowe wzmacniaczy operacyjnych zbudowane są na tranzystorach, których prądy zerowe, tzn. takie które pojawiają się pomimo braku jakiegokolwiek doprowadzonego sygnału, są bardzo małe o wartości rzędu kilku nanoamperów. Na wejściu wzmacniacza pojawi się napięcie zwane napięciem *niezrównoważenia* U_{WEn} o wartości równej iloczynowi rezystancji wejściowej R_{WE} i wejściowego prądu polaryzacji I_{WE} (prądu zerowego wzmacniacza operacyjnego). Wartość tego napięcia wyniesie ok. 0.001V.

$$U_{WEn} = I_{WE} \cdot R_{WE} \approx 0.001 V \quad (9.5.2)$$

o niewielkie napięcie w wielu wypadkach może nakładać się na użyteczny sygnał podawany na wejście układu wzmacniającego. Dodatkowo wzmacnione przez wzmacnienie napięciowe k_O wzmacniacza operacyjnego może „zafalszować” wartość napięcia wyjściowego. Zauważmy, że takie wzmacnione napięcie niezrównoważenia $k_O U_{WEn}$ pojawić się może na wyjściu także, gdy do obu wejść wzmacniacza operacyjnego podamy ten sam sygnał. Zgodnie ze wzorem 9.5.1 napięcie na wyjściu powinno być wtedy równe zero, w praktyce jednak pojawia się niewielkie napięcie. Z tego też powodu we wzmacniaczach operacyjnych buduje się specjalne układy tłumiące efekt działania napięcia

niezrównoważenia. Skuteczność tych tłumiących układów określa się *współczynnikiem tłumienia sygnału nieróżnicowego (współbieżnego)* - WTSN.

We współcześnie produkowanych wzmacniaczach WTSN jest na tyle duży, że w wielu układach pracy możemy pominąć wpływ niezrównoważenia. Jednak przy projektowaniu układów o wysokiej dokładności (np. wzmacniacze pomiarowe małych sygnałów) należy o nim pamiętać.

Chcąc dokonać analizy wielu układów pracy wzmacniacza należy zastosować dwie proste reguły:

1. **Po pierwsze, prąd wejściowy obu wejść jest równy zeru, dzięki zbliżonej do nieskończoności rezystancji wejściowej wzmacniacza ($R_{WE1}, R_{WE2}, R_R \rightarrow \infty$).**
2. **Po drugie, ujemne sprzężenie zwrotne będzie zawsze utrzymywać różnicę napięć $U_R = U_{WE2} - U_{WE1}$ bliską zeru, ponieważ przy bardzo dużym wzmocnieniu k_U na wyjściu wzmacniacza powinno być skończone napięcie wyjściowe U_{WY}**

9.5.3. Parametry rzeczywistego wzmacniacza operacyjnego.

Podczas analizy działania podstawowych układów wzmacniacza operacyjnego przyjmuje się założenia, że właściwości wzmacniacza są idealne. Taka idealizacja jest bardzo użyteczna, gdyż pozwala dokonać uproszczonej analizy działania układów obciążonej stosunkowo niewielkim błędem. Przy analizie bardziej dokładnej trzeba jednak wziąć pod uwagę ograniczenia wynikające z właściwości stosowanego w praktyce rzeczywistego, nieidealnego wzmacniacza operacyjnego.

Podstawowymi parametrami wzmacniacza rzeczywistego są:

- 1) Wzmocnienie napięciowe różnicowe z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego k_O ;
- 2) Rezystancja (impedancja) wejściowa różnicowa R_R (Z_R);
- 3) Rezystancje (impedancje) wejściowe (rezystancja pomiędzy wejściem „-” a masą, oraz między wejściem „+” a masą) R_{WE1} i R_{WE2} , (Z_{WE1} i Z_{WE2});
- 4) Rezystancja (impedancja) wyjściowa R_{WY} (Z_{WY});
- 5) Wejściowe napięcie niezrównoważenia U_{WEN} , wejściowy prąd niezrównoważenia, wejściowe prądy polaryzacji, ich dryft czasowy i temperaturowy;
- 6) Współczynnik tłumienia sygnału nieróżnicowego (współbieżnego) WTSN;
- 7) Parametry graniczne:
 - maksymalne napięcie wejściowe U_{WEmax} ,
 - maksymalne różnicowe napięcie wejściowe U_{Rmax} ,
 - maksymalne napięcie wyjściowe U_{WYmax} ;
 - maksymalny prąd wyjściowy I_{WYmax} ;
- 8) Napięcie U_Z i moc P_Z zasilania;
- 9) Szerokość pasma przenoszenia f_g ;
- 10) Parametry impulsowe wzmacniacza (czas narastania t_n , szybkość narastania S , przeregulowanie δ_{ii});

Jednym z najpopularniejszych wzmacniaczy operacyjnych jest wzmacniacz o symbolu μA 741. W tabeli 9.5.1 podane niektóre jego parametry.

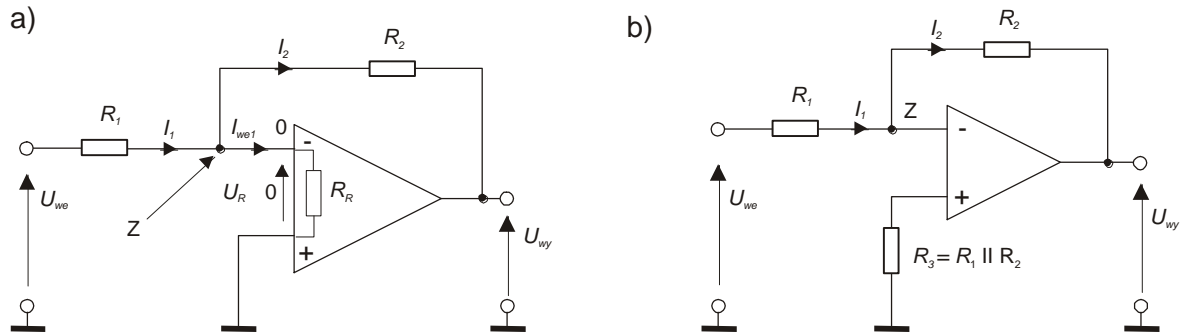
Tabela 9.5.1 Parametry wzmacniacza operacyjnego μA 741

Nazwa	Symbol	Wartość
Wzmocnienie napięciowe z otwartą pętlą sprzężenia zwrotnego	k_O	$2 \cdot 10^5$ [V/V]
Współczynnik tłumienia sygnału nieróżnicowego	WTSN	90 [dB]
Rezystancja wejściowa różnicowa	R_R	2 [M Ω]
Rezystancja wyjściowa	R_{WY}	75 [Ω]
Wejściowe napięcie niezrównoważenia	U_{WEN}	1 [mV]
Wejściowy prąd niezrównoważenia	I_{WEN}	20 [nA]
Współczynnik temperaturowy U_{WEN}	A	7 [μ V/K]
Maksymalne napięcie wejściowe	U_{WEmax}	± 15 [V]
Maksymalne różnicowe napięcie wejściowe	U_{Rmax}	± 30 [V]
Maksymalne napięcie wyjściowe	U_{WYmax}	± 14 [V]
Częstotliwość graniczna	f_g	1 [MHz]
Napięcie zasilania	U_Z	± 15 [V]

Moc zasilania	P_Z	45 [mW]
---------------	-------	---------

9.5.4. Wzmacniacz odwracający.

Układ wzmacniacza odwracającego pokazano na rys. 9.5.3. W układzie zastosowano ujemne sprzężenie zwrotne poprzez podanie przez rezystancję R_2 napięcia z wyjścia na wejście odwracające.



Rys. 9.5.3. Wzmacniacz odwracający a) układ podstawowy, b) układ praktyczny.

Przyjmijmy, że wzmocnienie napięciowe wzmacniacza z otartą pętlą ma wartość nieskończenie dużą ($k_O \rightarrow \infty$), wejściowe prądy polaryzujące są równe zero oraz wejściowa rezystancja różnicowa R_R jest bardzo duża. Przy tych założeniach łatwo zauważyć, że wejściowe napięcie różnicowe U_R jest bliskie zero, gdyż:

$$U_R = \frac{U_{WY}}{k_O} \rightarrow 0 \quad (9.5.3)$$

gdy $k_O \rightarrow \infty$. Potencjał elektryczny w punkcie Z jest zatem w przybliżeniu równy potencjałowi na wyjściu nieodwracającym „+”, do którego podłączono masę, czyli potencjał 0V. Dlatego punkt Z także posiada potencjał w przybliżeniu równy 0V. Punkt Z jest często nazywany punktem „masy pozornej”. Ponieważ zakładamy, że wejściowe prądy wzmacniacza są równe zero prąd płynący przez rezystor R_1 cały przepływa przez R_2 , czyli

$$I_2 = I_1 \quad (9.5.4)$$

Przy uwzględnieniu, że potencjał punktu Z równa się zero z prawa Kirchhoffa otrzymuje się zależność:

$$U_{WE} = I_1 \cdot R_1, \quad U_{WY} = -I_2 \cdot R_2 \quad (9.5.5)$$

Z wzoru 9.5.4 i 9.5.5 otrzymujemy wzmocnienie całego układu wzmacniacza odwracającego:

W przypadku gdy dobierzemy $R_2 = R_1$ otrzymujemy wzmacniacz który powtarza sygnał na

$$k_U = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (9.5.6)$$

wyjściu ale odwrócony w fazie o 180 stopni.

W ogólnym przypadku gdy zamiast rezystancji R_1 i R_2 użyjemy impedancji Z_1 i Z_2 otrzymujemy:

$$k_U = -\frac{Z_2}{Z_1} \quad (9.5.7)$$

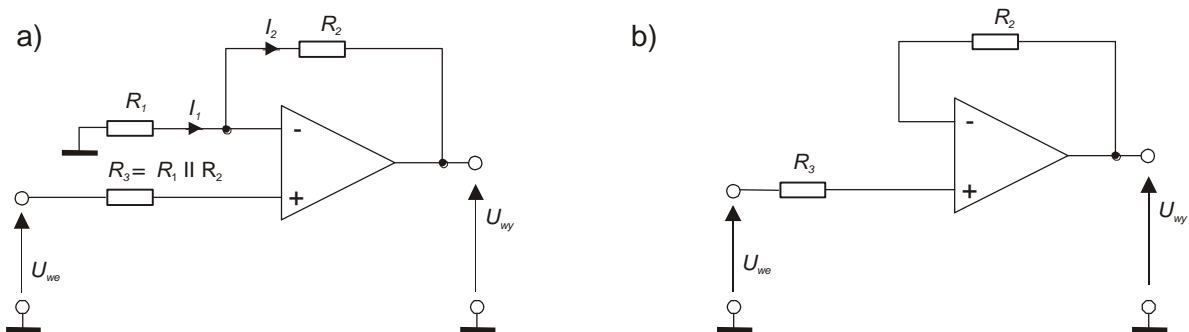
Do tej pory rozpatrywaliśmy przypadek, gdy wejście nieodwracające „+” podłączono bezpośrednio do masy. Jednak w praktyce między wejściem „+” a masą podłącza się rezystancję R_3 , co poprawia znacznie stabilność wzmacniacza. Wartość rezystora R_3 w rzeczywistych warunkach dobiera się równą rezystancji połączenia równoległego R_1 i R_2

$$R_3 = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} \quad (9.5.8)$$

Uzyskuje się wówczas najlepszą kompensację błędów spowodowanego napięciem nierównoważenia oraz błędów spowodowanego niezerowymi prądami wejściowymi wzmacniacza. Ze względu na bardzo małą wartość tego prądu, włączenie rezystancji R_3 nie ma znaczącego wpływu na parametry całego układu wzmacniającego i wzór na wzmocnienie pozostaje bez zmian.

9.5.5. Wzmacniacz nieodwracający.

W układzie wzmacniacza nieodwracającego (rys 9.5.4.a.) sygnał wejściowy jest doprowadzony do wejścia nieodwracającego przez dzielnik napięcia R_1 i R_2 doprowadzone jest napięcie wyjściowe, realizując tym samym ujemne sprzężenie zwrotne. Także w tym przypadku w celu częściowego skompensowania napięcia nierównoważenia i wejściowych prądów polaryzacji, rezystancja R_3 powinna być o wartości równej rezystancji połączenia równoległego R_1 i R_2



Rys 9.5.4. a) Wzmacniacz nieodwracający, b) Wtórnik.

Podobnie jak przy analizie poprzedniego układu przyjmujemy, że U_R jest w przybliżeniu równe zero, wejściowe prądy wzmacniacza są również równe zero oraz wzmocnienie napięciowe k_U jest nieskończenie duże. W układzie nie ma punktu masy pozornej, napięcie na wejściu „+” i „-” jest w przybliżeniu równe napięciu wejściowemu U_{WE} . Z prawa Kirchhoffa otrzymujemy:

$$U_{WE} = I_1 \cdot R_1 \quad (9.5.9)$$

$$U_{WE} = I_2 \cdot R_2 + U_{WY}$$

W przypadku wzmacniacza idealnego prądy I_1 i I_2 są sobie równe. Po przekształceniach

$$k_U = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} = \frac{R_2 + R_1}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (9.5.10)$$

otrzymujemy wzór na wzmocnienie napięciowe wzmacniacza nieodwracającego:

Wartość wzmocnienia zależy tylko od stosunku rezystancji w układzie sprzężenia zwrotnego i jest zawsze równa lub większa od jedności.

9.5.6. Wtórnik napięciowy.

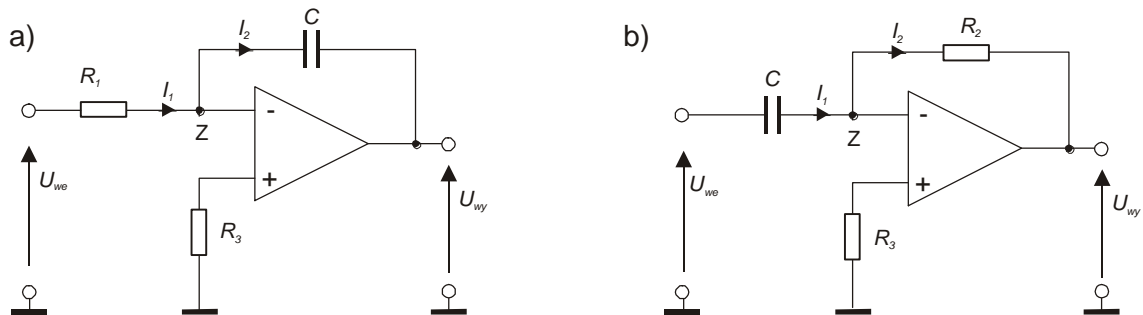
Rozważmy co się stanie gdy w układzie wzmacniacza nieodwracającego odłączymy rezystancję R_1 , czyli gdy jej wartość dążyć będzie do nieskończoności ($R_1 \rightarrow \infty$). Wzmocnienie takiego układu wynosić będzie:

$$k_U = \lim_{R_1 \rightarrow \infty} \left(1 + \frac{R_2}{R_1} \right) = 1 \quad (9.5.11)$$

Otrzymujemy układ, który dokładnie powtarza sygnał wejściowy, stąd też jego nazwa (rys 9.4.b.) Wtórnik napięciowy posiada bardzo dużą rezystancję wejściową zbliżoną do rezystancji wzmacniacza operacyjnego i bardzo małą rezystancję wyjściową k_U razy mniejsza niż rezystancja wyjściowa wzmacniacza operacyjnego. Wtórnik stosuje się w układach gdzie zależy nam na odseparowaniu źródła sygnału od układu, gdzie sygnał ten jest wykorzystywany.

9.5.7. Wzmacniacz całkujący (integrator).

Gdy we wzmacniaczu odwracającym zastąpimy rezystancję R_2 kondensatorem C otrzymamy układ zwany układem całkującym inaczej integratorem rys 9.5.5.a.



Rys. 9.5.5. Wzmacniacz a) całkujący (integrator), b) różniczkujący.

Przy założeniu idealnych właściwości wzmacniacza operacyjnego punkt Z jest punktem masy pozornej i napięcie na kondensatorze jest równe odwróconemu napięciu wyjściowemu. Prąd I_2 w kondensatorze jest wyrażony wzorem:

$$I_2(t) = C \cdot \frac{d(-U_{WY})}{dt} \quad (9.5.12)$$

Prąd I_1 płynący przez rezystor R_1 wynosi:

$$I_1 = \frac{U_{WE}}{R_1} \quad (9.5.13)$$

Z równości prądów $I_1 = I_2$ wynika, że

$$C \cdot \frac{d(-U_{WY})}{dt} = \frac{U_{WE}}{R_1} \quad (9.5.14)$$

Całkując obie strony powyższego równania uzyskuje się zależność napięcia na wyjściu integratora od wartości sygnału wejściowego:

$$U_{WY}(t) = -\frac{1}{R_1 C} \int_0^t U_{WE}(t) dt + U_{WY}(0) \quad (9.5.15)$$

gdzie $U_{WY}(0)$ jest początkowym napięciem na kondensatorze C w chwili początkowej $t = 0$. Jak wynika z powyższego wzoru układ realizuje całkowanie sygnału wejściowego.

9.5.8. Wzmacniacz różniczkujący.

Gdy we wzmacniaczu odwracającym zastąpimy rezystancję R_1 kondensatorem C otrzymamy układ zwany układem różniczkującym rys. 9.5.b. Prąd I_1 płynący przez kondensator wyrażony jest wzorem:

$$I_1(t) = C \cdot \frac{dU_{WE}}{dt} \quad (9.5.16)$$

Z równości prądów $I_1 = I_2$ wynika, że

$$C \cdot \frac{dU_{WE}}{dt} = \frac{-U_{WY}}{R_2} \quad (9.5.17)$$

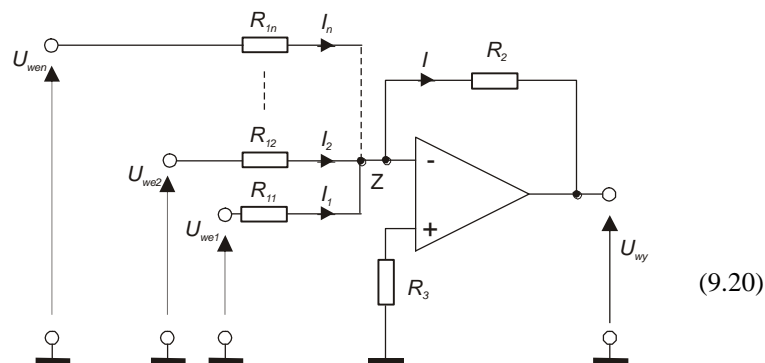
Po prostych przekształceniach otrzymujemy:

$$U_{WY} = -R_2 C \frac{dU_{WE}}{dt} \quad (9.5.18)$$

Z powyższego wzoru wynika, że układ realizuje różniczkowanie sygnału wejściowego.

9.5.9. Wzmacniacz sumujący.

Za pomocą wzmacniacza operacyjnego można łatwo realizować sumowanie napięć wielu sygnałów za pomocą układu z rys 9.5.6



Rys. 9.5.6. Wzmacniacz sumujący.

Do wejścia odwracającego doprowadza się różne sygnały $U_{WE1} \div U_{WE_n}$ poprzez rezystancje $R_1 \div R_n$. Punkt Z jest punktem masy pozornej. Zakładając, że wejściowe prądy wzmacniacza operacyjnego są pomijalnie małe w stosunku do prądów $I_1 \div I_n$, prąd przepływający przez rezystancje R_2 jest równy sumie prądów $I_1 \div I_n$:

$$I = I_1 + I_2 + \dots + I_n \quad (9.5.19)$$

Ponieważ potencjał punktu Z jest równy zero każdy z prądów wejściowych wyraża się wzorem:

$$I_k = \frac{U_k}{R_{1k}} \quad (9.5.20)$$

Po podobnych przekształceniach jak przy analizie wzmacniacza odwracającego otrzymujemy wzór na napięcie wyjściowe:

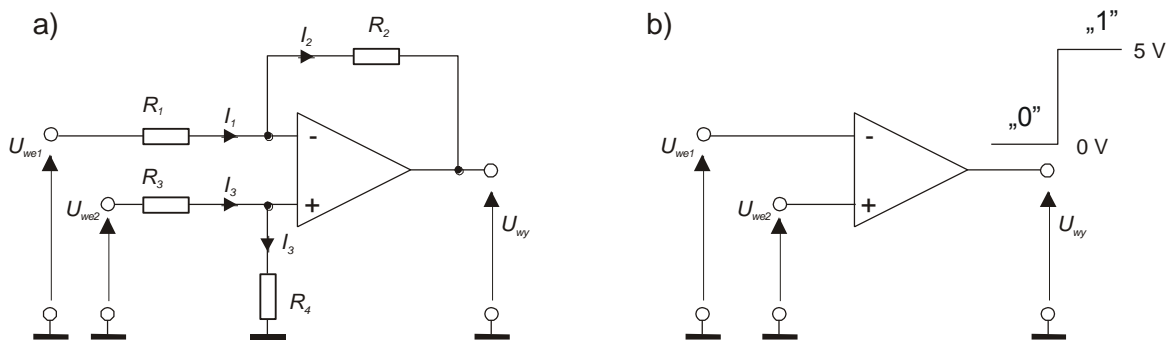
$$U_{WY} = -R_2 \left(\frac{U_{WE1}}{R_{11}} + \frac{U_{WE2}}{R_{112}} + \dots + \frac{U_{WE_n}}{R_{1ln}} \right) \quad (9.5.21)$$

Oczywiście gdy zastosujemy rezystancje $R_1 \div R_n$ o tych samych wartościach równych R_1 otrzymamy wprost sumowanie napięć.

$$U_{WY} = -\frac{R_2}{R_1} (U_{WE1} + U_{WE2} + \dots + U_{WE_n}) \quad (9.5.22)$$

9.5.10. Wzmacniacz różnicowy.

Na rys 9.5.7.a. przedstawiono układ zwany wzmacniaczem różnicowym.



Rys. 9.5.7 a) Wzmacniacz różnicowy b) komparator.

Przyjmując, że wzmacniacz operacyjny charakteryzuje się idealnymi właściwościami i oznaczając przez U_+ i U_- napięcia na wejściu odwracającym i nieodwracającym, możemy zapisać bilans prądów:

$$I_1 = \frac{U_{WE2} - U_-}{R_1}, \quad I_3 = \frac{U_{WE1} - U_+}{R_3}, \quad (9.5.23)$$

$$I_2 = \frac{U_{WY} - U_-}{R_2}, \quad I_3 = \frac{U_+}{R_4}$$

Po przekształceniach otrzymujemy:

$$U_{WY} = \left(\frac{R_1 + R_2}{R_3 + R_4} \right) \cdot \frac{R_4}{R_1} \cdot U_{WE1} - \frac{R_2}{R_1} U_{WE2} \quad (9.5.24)$$

Gdy tak dobierzemy rezystancje aby spełniony był warunek:

$$\frac{R_2}{R_1} = \frac{R_4}{R_3} \quad (9.5.25)$$

to otrzymujemy:

$$U_{WY} = \frac{R_2}{R_1} \cdot (U_{WE1} - U_{WE2}) \quad (9.5.26)$$

Wzmacniacz ten realizuje odejmowanie sygnałów.

Szczególnym przypadkiem wzmacniacza różnicowego jest komparator rys. 9.5.7.b. Wzmacniacz nie posiada ujemnego sprzężenia zwrotnego. Napięcie wejściowe U_{WE1} doprowadzone jest bezpośrednio do wejścia odwracającego „-”. Do wejścia nieodwracającego doprowadzone jest regulowane napięcie wzorcowe U_{WE2} . Na wyjściu wzmacniacza operacyjnego pojawi się napięcie U_{WY} wynoszące:

$$U_{WY} = k_o \cdot (U_{WE2} - U_{WE1}) \quad (9.5.27)$$

Jeżeli założymy, że wzmocnienie wzmacniacza operacyjnego przy otwartej pętli sprzężenia zwrotnego dąży do nieskończoności $k_o \rightarrow \infty$, to na wyjściu wzmacniacza otrzymamy:

W praktyce nigdy nie otrzymamy napięcia nieskończenie wielkiego. W przypadku komparatorów

$$U_{WY} = \infty \quad \text{dla} \quad U_{WE2} > U_{WE1}$$

$$U_{WY} = -\infty \quad \text{dla} \quad U_{WE2} < U_{WE1} \quad (9.5.28)$$

skrajnymi napięciami są ściśle określone napięcia na przykład 5V odpowiadające ∞ oraz 0V

odpowiadające $-\infty$. Jeżeli dodatkowo oznaczymy poziom 0V jako stan logiczny „0” oraz poziom 5V jako stan logiczny „1”, to zauważymy, że komparator realizuje funkcję logiczną:

- jeżeli napięcie U_{WE1} jest większe od napięcia wzorcowego U_{WE2} ($U_{WE1} > U_{WE2}$) to mamy „0”,
- jeżeli napięcie U_{WE1} jest mniejsze od napięcia wzorcowego U_{WE2} ($U_{WE1} < U_{WE2}$) to mamy „1”.

Komparator wykrywa „wyjście” napięcia wejściowego U_{WE1} poza ustalony zakres (ustalony napięciem U_{WE2}). Stanowi jeden z pomostów łączących elektronikę analogową z cyfrową.

Zastosowania komparatorów są bardzo różnorodne. Są one używane w obwodach wejściowych woltomierzy cyfrowych. Stanowią podstawowy element przetworników analogowo-cyfrowych i układów analizujących amplitudy impulsów.

9.5.11. Inne zastosowania wzmacniacza operacyjnego.

Trudno wymienić wszystkie możliwe zastosowania wzmacniacza operacyjnego. Poza już wymienionymi warto wspomnieć:

Wzmacniacz logarytmujący. Jeżeli w układzie wzmacniacza odwracającego zastąpimy rezystancję R_2 elementem, którego charakterystyka prądowo napięciowa jest w postaci funkcji eksponencjalnej to otrzymamy wzmacniacz logarytmujący. Najprostszym elementem realizującym tę funkcję jest tranzystor. Na wyjściu pojawia się napięcie proporcjonalne do zlogarytmowanego napięcia wejściowego ($U_{WY} \cong \ln U_{WE}$).

Wzmacniacz wykładniczy (potęgowy). Zastępując Rezystancję R_1 tranzystorem we wzmacniaczu odwracającym otrzymujemy wzmacniacz potęgujący. Zamieniając tranzystor miejscami otrzymujemy układ o charakterystyce odwrotnej w stosunku do wzmacniacza logarytmującego ($U_{WY} \cong \exp U_{WE}$).

Filtry aktywne. W układzie wzmacniacza odwracającego zastępując rezystancje R_1 i R_2 odpowiednio skonstruowanymi układami rezystancji i pojemności otrzymać możemy filtry o bardzo dobrych właściwościach. Charakteryzują się one bardzo dobrą selektywnością oraz dodatkowo mogą wzmacniać sygnał przefiltrowany.

Generatory. Stosując dodatnie sprzężenie zwrotne możemy spowodować samoistne generowanie różnych przebiegów, od sinusoidalnych do złożonych przebiegów dowolnego typu.

Przetworniki prąd-napięcie. W układzie wzmacniacza odwracającego sygnał prądowy I_{WE} doprowadza się bezpośrednio na wejście „-”. Na wyjściu otrzymujemy napięcie wprost proporcjonalne do wpływającego prądu. $U_{WY} = -I_{WE}R_2$.

Przetworniki napięcie-prąd. W układzie wzmacniacza odwracającego wyjście układu znajduje się na rezystancji R_2 . Prąd płynący na przez rezystor R_2 wynosi $I_{WY} = -U_{WE}/R_1$.

Układy przekształcające. Stosując w układzie wzmacniacza odwracającego lub nieodwracającego zamiast rezystancji $R_1 \div R_4$ elementy nieliniowe (diody różnego typu, nieliniowe rezystancje) możemy realizować dowolne przekształcanie sygnałów wejściowych.

9.6 Literatura

1. Rusek M., Pasierbiński J., *Elementy i układy elektroniczne w pytaniach i odpowiedziach*, WNT 1997.
2. Koziej E., Sochoń B., *Elektrotechnika i elektronika*, Warszawa 1986.
3. Przeździecki F., *Elektrotechnika i elektronika*, Warszawa, PWN 1985.
4. *Elektrotechnika i elektronika dla nieelektryków*, Praca zbiorowa, WNT 2006.
5. Jaczewski J., Opolski A., Stolz J., *Podstawy elektroniki i energoelektroniki*, WNT 1981.
6. Pilawski M., *Podstawy elektrotechniki*, WSiP 1982.
7. Rusek A., *Podstawy elektroniki*, WSiP 1989.
8. Stacewicz T., Kotlicki A., *Elektronika w laboratorium naukowym*, PWN 1994.

9.7 Efekty kształcenia

Metody i kryteria oceny				
EK1	Ma podstawową wiedzę w zakresie pojęć, praw z zakresu elektrotechniki i elektroniki.			
Metody oceny	egzamin pisemny, egzamin ustny, sprawdziany i prace kontrolne w semestrze.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5
<u>Kryterium 1</u> Wiedza w zakresie pojęć elektrotechniki i elektroniki.	Brak lub niewystarczająca podstawowa wiedza w zakresie pojęć i definicji związanych z tematem.	Opanowana podstawowa wiedza w zakresie pojęć i definicji związanych z tematem.	Zna i potrafi scharakteryzować/o mówić podstawowe pojęcia i definicje Zna i potrafi scharakteryzować/o mówić podstawowe i rozszerzone pojęcia, definicje.	Zna i potrafi przeanalizować pojęcia i definicje oraz wskazać możliwości ich wykorzystania w technice morskiej Biegłe zna i potrafi przeanalizować oraz wskazać możliwości wykorzystania w technice morskiej.
<u>Kryterium 2</u> Wiedzę w zakresie praw elektrotechniki i elektroniki.	Brak lub niewystarczająca podstawowa wiedza w zakresie praw związanych z tematem.	Opanowana podstawowa wiedza w zakresie praw związanych z tematem.	Zna i potrafi scharakteryzować/o mówić podstawowe prawa Zna i potrafi scharakteryzować/o mówić podstawowe i rozszerzone prawa.	Zna i potrafi przeanalizować prawa oraz wskazać możliwości ich wykorzystania w technice morskiej Biegłe zna i potrafi przeanalizować oraz wskazać możliwości wykorzystania w technice morskiej.
EK2	Posiada umiejętność wykorzystania podstawowych praw elektrotechniki i elektroniki do analizy rachunkowej podstawowych elementów i obwodów elektronicznych.			
Metody oceny	zaliczenie ćwiczeń, laboratoriów/ symulatorów, sprawozdanie/ raport.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5
<u>Kryterium 1</u> Umiejętność wykorzystania podstawowych praw elektrotechniki i elektroniki do analizy rachunkowej podstawowych elementów i obwodów elektronicznych.	Brak lub niewystarczająca podstawowa wiedza w zakresie wykorzystania pojęć, definicji i praw związanych z tematem.	Opanowana podstawowa wiedza w zakresie wykorzystania pojęć, definicji i praw związanych z tematem.	Zna i potrafi wykorzystać podstawowe pojęcia, definicje i prawa do analizy podstawowych obwodów Zna i potrafi wykorzystać podstawowe i pochodne pojęcia, definicje i prawa do analizy podstawowych obwodów w technice morskiej.	Zna i potrafi wykorzystać podstawowe i pochodne pojęcia, definicje i prawa oraz wzajemne zależności między nimi w technice morskiej Biegłe zna i potrafi przeanalizować oraz wskazać możliwości wykorzystania w technice morskiej.
EK3	Ma podstawową wiedzę teoretyczną w zakresie struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów elektrycznych.			
Metody oceny	egzamin pisemny, egzamin ustny, sprawdziany i prace kontrolne w semestrze.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5

<u>Kryterium 1</u> Podstawowa wiedza teoretyczna w zakresie struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów elektrycznych.	Brak lub niewystarczająca podstawowa wiedza w zakresie struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów.	Opanowana podstawowa wiedza w zakresie struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów.	Zna i potrafi scharakteryzować/omówić podstawowe pojęcia z zakresu struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów Zna i potrafi scharakteryzować/omówić podstawowe i rozszerzone pojęcia z zakresu struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów występujących w technice morskiej.	Zna i potrafi przeanalizować pojęcia z zakresu struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów występujących w technice morskiej Biegłe zna i potrafi przeanalizować pojęcia z zakresu struktury, przetwarzania, transmisji i pomiarów sygnałów występujących w technice morskiej.
EK4	Posiada umiejętności pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów elektrycznych.			
Metody oceny	zaliczenie ćwiczeń, laboratoriów/ symulatorów, sprawozdanie/ raport.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5
<u>Kryterium 1</u> Umiejętności pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów elektrycznych.	Brak lub niewystarczające podstawowe umiejętności w zakresie pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów.	Opanowane podstawowe umiejętności w zakresie pomiarów i analizy sygnałów.	Opanowane podstawowe umiejętności w zakresie pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów Opanowane w stopniu dobrym podstawowe umiejętności w zakresie pomiarów, analizy i przetwarzania sygnałów występujących w technice morskiej.	Opanowane w stopniu bardzo dobrym podstawowe umiejętności w zakresie pomiarów, analizy i przetwarzania podstawowych sygnałów występujących w technice morskiej Biegłe zna i potrafi przeanalizować pojęcia z zakresu pomiarów, analizy i przetwarzania złożonych sygnałów występujących w technice morskiej.
EK5	Ma podstawową wiedzę w zakresie zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń elektronicznych.			
Metody oceny	egzamin pisemny, egzamin ustny, sprawdziany i prace kontrolne w semestrze.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5

<u>Kryterium 1</u> Wiedza w zakresie zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń elektronicznych.	Brak lub niewystarczająca podstawowa wiedza w zakresie zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń.	Opanowana podstawowa wiedza w zakresie zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń.	Zna i potrafi scharakteryzować/omówić podstawowe i rozszerzone pojęcia z zakresu zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń.	Zna i potrafi przeanalizować pojęcia z zakresu zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń Biegłe zna i potrafi przeanalizować pojęcia z zakresu zasad działania, budowy, eksploatacji podstawowych obwodów i urządzeń występujących w technice morskiej.
EK6	Posiada umiejętność analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń elektronicznych.			
Metody oceny	zaliczenie ćwiczeń, laboratoriów/ symulatorów, sprawozdanie/ raport.			
Kryteria/ Ocena	2	3	3,5 - 4	4,5 - 5
<u>Kryterium 1</u> Umiejętność analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń elektronicznych.	Brak lub niewystarczające podstawowe umiejętności w zakresie analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk.	Opanowane podstawowe umiejętności w zakresie analizy działania i pomiaru parametrów podstawowych obwodów i urządzeń.	Opanowane podstawowe umiejętności w zakresie analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń Opanowane w stopniu dobrym podstawowe umiejętności w zakresie analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń.	Opanowane w stopniu bardzo dobrym analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń Biegłe opanowane umiejętności w zakresie analizy działania, pomiaru parametrów oraz wyznaczania charakterystyk podstawowych obwodów i urządzeń występujących w technice morskiej.