

Uniwersytet Warszawski  
Wydział Fizyki

Marysia Nazarczuk

Nr albumu: 417755

# WZMACNIACZ OPERACYJNY

## Streszczenie

W trakcie eksperymentu zapoznano się z działaniem wzmacniaczy operacyjnych oraz zastosowano je w różnych układach: wzmacniaczu odwracającym, układzie całkującym, układzie różniczkującym oraz aktywnym filtrze pasmowym. Przeprowadzono pomiar współczynnika wzmocnienia dla wzmacniacza odwracającego, uzyskując wartość  $A_v = 11.7 \pm 0.3$ . Dla układów całkującego i różniczkującego sprawdzono ich poprawność działania, analizując sygnały wyjściowe dla różnych sygnałów wejściowych: prostokątnego, trójkątnego i sinusoidalnego. Na koniec zbudowano aktywny filtr pasmowy, którego działanie wykazywało podobieństwo do filtra RLC.

Warszawa, Luty 2025



# Spis treści

<b>1. Wprowadzenie</b>	5
<b>2. Wzmacniacz odwracający</b>	7
2.1 Schemat obwodu	7
2.2 Współczynnik wzmocnienia napięciowego	7
2.2.1 Efekt nasycenia	8
2.2.2 Wyznaczenie współczynnika wzmocnienia napięciowego	9
<b>3. Układ całkujący</b>	11
3.1 Schemat obwodu	11
3.2 Badanie odpowiedzi układu na różne sygnały	11
3.2.1 Sygnał prostokątny	11
3.2.2 Sygnał sinusoidalny	12
3.2.3 Sygnał trójkątny	13
3.2.4 Podsumowanie	13
3.3 Rola rezystora 10 k $\Omega$	13
<b>4. Układ różniczkujący</b>	15
4.1 Schemat obwodu	15
4.2 Badanie odpowiedzi układu na różne sygnały	15
4.2.1 Sygnał trójkątny	15
4.2.2 Sygnał sinusoidalny	16
4.2.3 Sygnał prostokątny	17
4.2.4 Podsumowanie	17
<b>5. Aktywny filtr pasmowy</b>	19
5.1 Schemat obwodu	19
5.2 Transmitacja aktywnego filtra pasmowego	19
<b>6. Podsumowanie</b>	21
<b>7. Dodatek</b>	23
<b>Bibliografia</b>	25

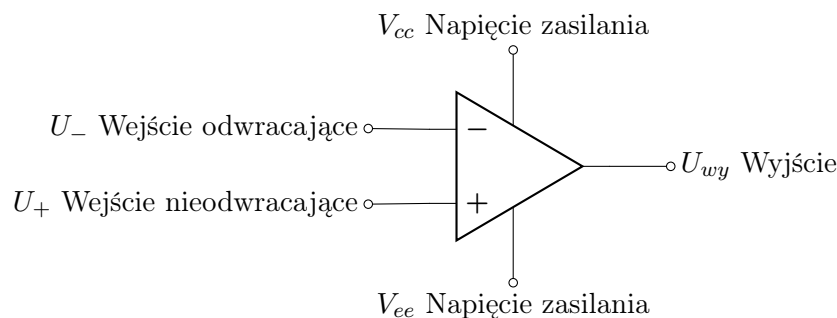


# 1. Wprowadzenie

Wzmacniacze operacyjne to jedne z najważniejszych elementów współczesnej elektroniki analogowej, wykorzystywane w różnorodnych zastosowaniach, takich jak wzmacnianie sygnałów, filtrowanie, kształtowanie impulsów czy realizacja operacji matematycznych na sygnałach. Są to elektroniczne elementy scalone, które posiadają dwa wejścia – odwracające (–) i nieodwracające (+) – oraz jedno wyjście. Napięcie wyjściowe wzmacniacza operacyjnego wyraża się wzorem:

$$U_{wy} = a(U_+ - U_-) \quad (1.1)$$

gdzie  $a$  to wzmocnienie wzmacniacza. W idealnym przypadku przyjmuje ono nieskończoną wartość, jednak rzeczywiste wzmacniacze operacyjne charakteryzują się bardzo dużym, lecz skończonym współczynnikiem wzmocnienia (często przekraczającym 100 dB). Do poprawnej pracy wymagają one zasilania prądem stałym, co realizowane jest poprzez dedykowane piny układu scalonego. Na rysunku 1.1 przedstawiono schematycznie wyprowadzenia dla wzmacniaczy operacyjnych.



Rysunek 1.1: Schemat wyprowadzeń wzmacniacza operacyjnego.

Idealny wzmacniacz charakteryzuje się nieskończenie dużym różnicowym wzmocnieniem napięciowym, nieskończenie dużą impedancją wejściową oraz zerową impedancją wyjściową, a także własności te są niezależne od temperatury. Parametry rzeczywistego wzmacniacza nie spełniają tych założeń. Przez wzgląd na to, że wzmacniacze scalone stanowią bloki z dostępnymi tylko zaciskami zewnętrznymi, ich właściwości są opisywane charakterystykami i parametrami dotyczącymi wejścia i wyjścia.

Pomimo dużych współczynników wzmocnienia, wzmacniacze operacyjne rzadko pracują w układach otwartej pętli ze względu na niestabilność sygnału. W praktyce stosuje się je w konfiguracjach ze sprzężeniem zwrotnym, co pozwala na precyzyjne kontrolowanie parametrów pracy układu. Właśnie takie układy były przedmiotem badań w niniejszym doświadczeniu, w którym przeanalizowano różne konfiguracje wzmacniaczy operacyjnych: wzmacniacz odwracający, układ całkujący, układ różniczkujący oraz aktywny filtr pasmowy.

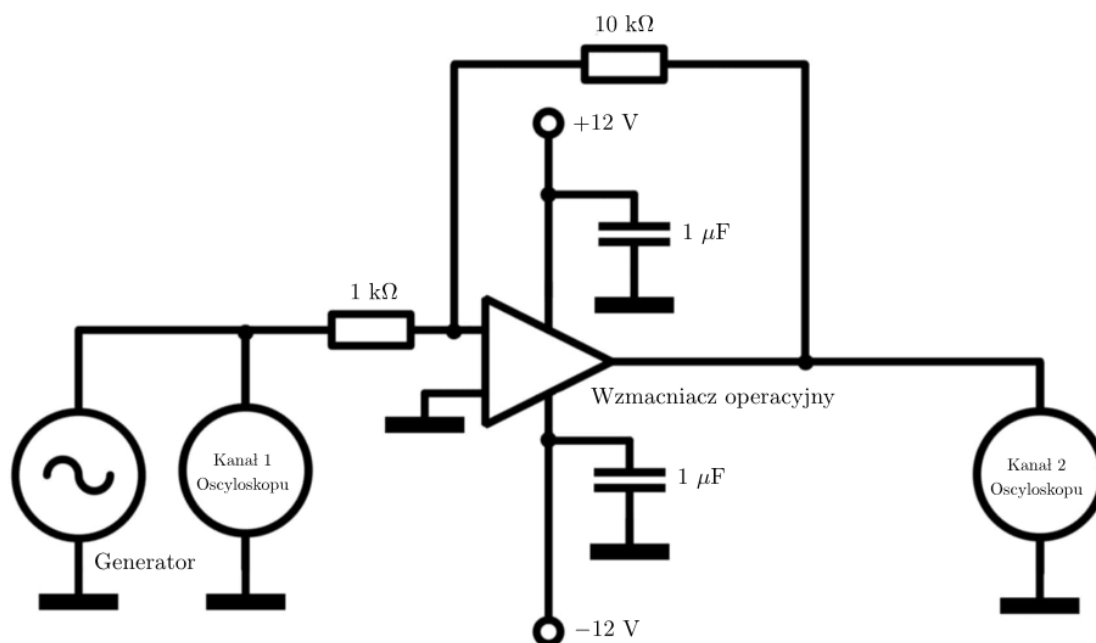
Celem niniejszego raportu jest szczegółowe omówienie zasad działania wzmacniaczy operacyjnych, ich podstawowych konfiguracji oraz praktycznych zastosowań. Przedstawione zostaną również kluczowe parametry tych układów oraz wpływ sprzężenia zwrotnego na ich właściwości.



## 2. Wzmacniacz odwracający

### 2.1. Schemat obwodu

Skonstruowano układ wzmacniacza odwracającego, w którym wykorzystano wzmacniacz operacyjny. Aby uzyskać wzmocnienie, wystarczą jedynie dwa rezystory oraz odpowiednio podłączony układ scalony wzmacniacza operacyjnego. Kondensatory o pojemności  $1\ \mu\text{F}$ , umieszczone między zasilaniem a masą, zapobiegają samoczynnym oscylacjom wzmacniacza, które mogłyby wystąpić na skutek dodatnich sprzężeń zwrotnych w układzie. Schemat budowy obwodu znajduje się na rysunku 2.1.



Rysunek 2.1: Schemat obwodu wzmacniacza odwracającego.

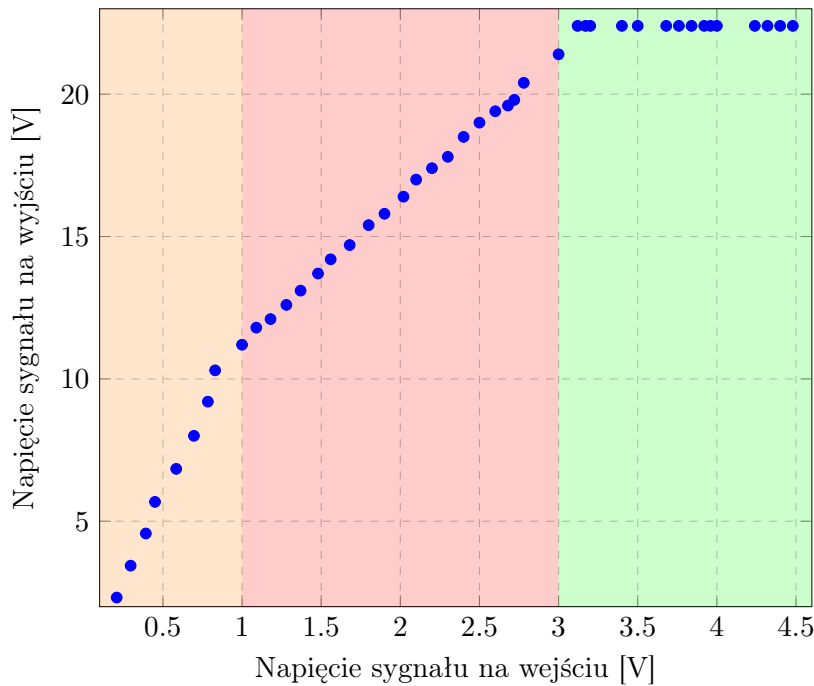
Wzmacniacz operacyjny pracujący w trybie otwartej pętli może znacząco wzmacniać napięcie, lecz jego działanie jest niestabilne. Aby zapewnić stabilność pracy układu, zastosowano ujemne sprzężenie zwrotne, które polega na połączeniu wyjścia wzmacniacza z jego wejściem odwracającym. Dzięki temu napięcie wyjściowe jest przesunięte w fazie o 180 stopni względem napięcia wejściowego, co oznacza, że polaryzacja sygnału ulega odwróceniu.

### 2.2. Współczynnik wzmocnienia napięciowego

Współczynnik wzmocnienia napięciowego określa stosunek napięcia wyjściowego do napięcia wejściowego w zakresie pracy liniowej wzmacniacza.

$$A_v = \frac{U_{wy}}{U_{we}} \quad (2.1)$$

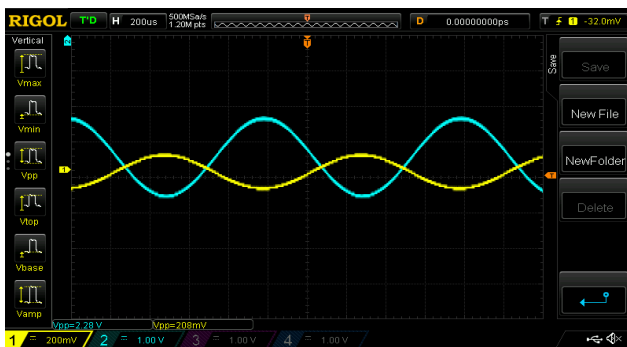
Aby dokonać pomiarów, na wejście układu podano sygnał sinusoidalny z generatora, umożliwiającą regulację amplitudy, a sygnał wejściowy podłączono do pierwszego kanału oscyloskopu. Drugi kanał oscyloskopu posłużył do obserwacji sygnału wyjściowego. Pomiarów wykonano dla amplitud sygnału wejściowego w zakresie 0.2 V – 4.5 V (peak-to-peak), a na podstawie uzyskanych wartości sporządzono wykres zależności napięcia wyjściowego od wejściowego (rys. 2.2).



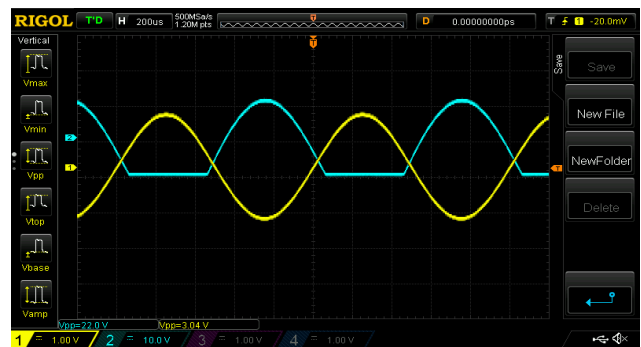
Rysunek 2.2: Zależność napięcia sygnału na wyjściu od napięcia sygnału na wejściu.

### 2.2.1. Efekt nasycenia

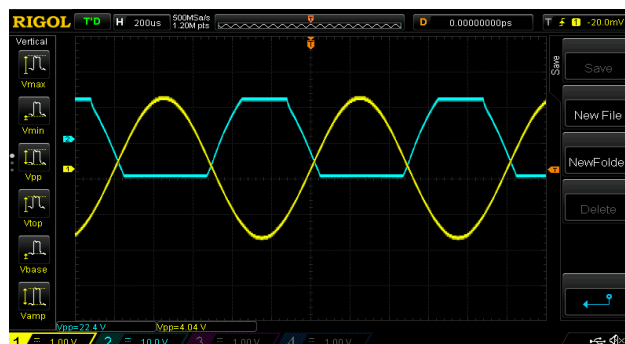
Analizując wykres 2.2 można zauważyć trzy przedziały, dla których wykres jest liniowy, jednak współczynniki nachylenia są różne: 0.2 V – 1 V (pomarańczowy), 1 V – 3 V (czerwony) oraz 3 V – 4.5 V (zielony). Jest to związane z wypłaszczeniem wyjściowego sygnału sinusoidalnego, co możemy zaobserwować na zrzutach z ekranu oscyloskopu na rysunku 2.6. Jest to tak zwany efekt nasycenia.



Napięcie wejściowe z przedziału 0.2 – 1 V



Napięcie wejściowe z przedziału 1 – 3 V



Napięcie wejściowe z przedziału 3 – 4.5 V

Rysunek 2.6: Zrzuty z ekranu oscyloskopu dla różnych napięć wejściowych.



Na podstawie analizy wyników pomiarów, możemy opisać zachowanie wzmacniacza w trzech przedziałach amplitudy napięcia wejściowego  $U_{we}$ , uwzględniając efekt nasycenia.

1. **Przedział 0.2 V – 1 V:** W tym zakresie napięcia wejściowego, wzmacniacz działa w pełni liniowo. Sygnał wyjściowy jest sinusoidalny, a nachylenie wykresu charakterystyki amplitudowej jest największe. Oznacza to, że wzmacniacz zachowuje najwyższe wzmocnienie i sygnał wyjściowy jest proporcjonalny do sygnału wejściowego, co jest zgodne z oczekiwaniami. Wzmocnienie w tym przedziale jest stabilne i wzmacniacz działa w swoim zakresie liniowym.
2. **Przedział 1 V – 3 V:** W tym zakresie, sygnał wyjściowy jest nadal sinusoidalny, ale obcięty z dołu. Oznacza to, że wzmacniacz zaczyna osiągać swoje ograniczenie w dolnej części sinusoidy, co skutkuje obcinaniem dolnej części sygnału wyjściowego. Chociaż wykres pozostaje sinusoidalny, sygnał wyjściowy nie jest już w pełni proporcjonalny do sygnału wejściowego, ponieważ dolna część sygnału nie jest w stanie zmieścić się w granicach napięcia wyjściowego wzmacniacza. Wzmocnienie w tym przedziale jest mniejsze niż w pierwszym i nachylenie wykresu maleje.
3. **Przedział 3 V – 4.5 V:** W tym przedziale nachylenie wykresu wynosi 0, co oznacza, że sygnał wyjściowy przestaje rosnąć pomimo dalszego wzrostu napięcia wejściowego. Sygnał wyjściowy staje się płaski, co jest klasycznym objawem pełnego nasycenia wzmacniacza. Obcięcie sygnału zarówno z góry, jak i z dołu, wskazuje na to, że wzmacniacz osiągnął swoje granice i nie jest w stanie odwzorować dalszego wzrostu sygnału wejściowego. Wzmocnienie w tym zakresie wynosi 0, a sygnał jest całkowicie zniekształcony.

Efekt nasycenia w tym przypadku polega na tym, że wzmacniacz nie jest w stanie odwzorować sygnału wejściowego poza pewnym zakresem, co prowadzi do zniekształcenia sygnału i obcięcia jego amplitudy.

### 2.2.2. Wyznaczenie współczynnika wzmocnienia napięciowego

W zakresie dla którego wzmacniacz działa w pełni liniowo wyznaczono współczynnik wzmocnienia napięciowego. Otrzymano

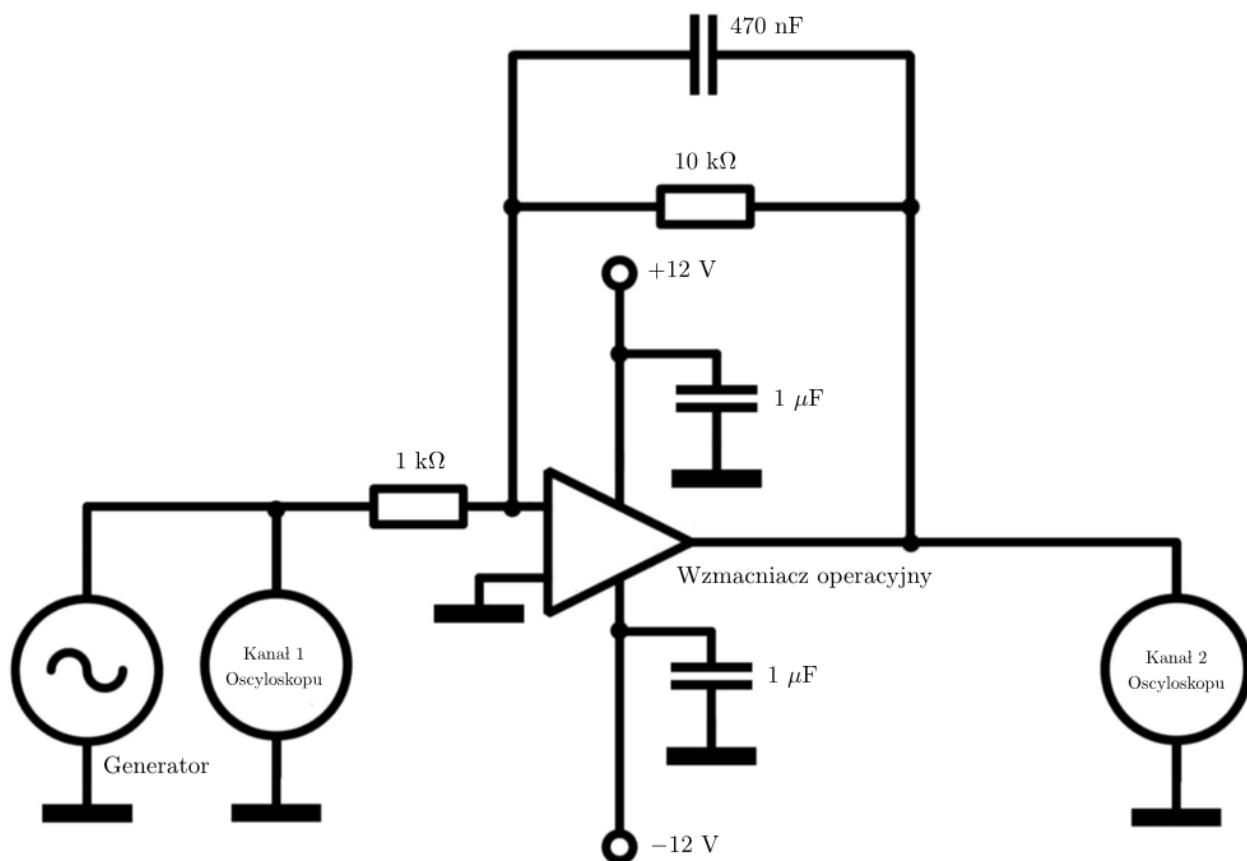
$$A_v = 11.7 \pm 0.3 \quad (2.2)$$



## 3. Układ całkujący

### 3.1. Schemat obwodu

Skonstruowano układ całkujący. Jest to rozbudowa układu odwracającego, poprzez dodanie równolegle kondensatora 470 nF do opornika 10 k $\Omega$ . Schemat obwodu znajduje się na rysunku 3.1.



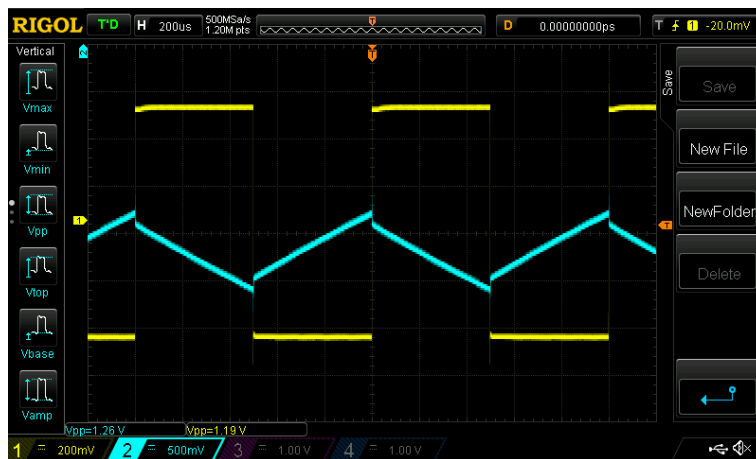
Rysunek 3.1: Schemat układu całkującego sygnał wejściowy.

### 3.2. Badanie odpowiedzi układu na różne sygnały

Następnie przeprowadzono testy działania układu poprzez analizę sygnałów wyjściowych (drugi kanał oscyloskopu) przy różnych sygnałach wejściowych: prostokątnym, trójkątnym oraz sinusoidalnym, które były monitorowane na pierwszym kanale oscyloskopu.

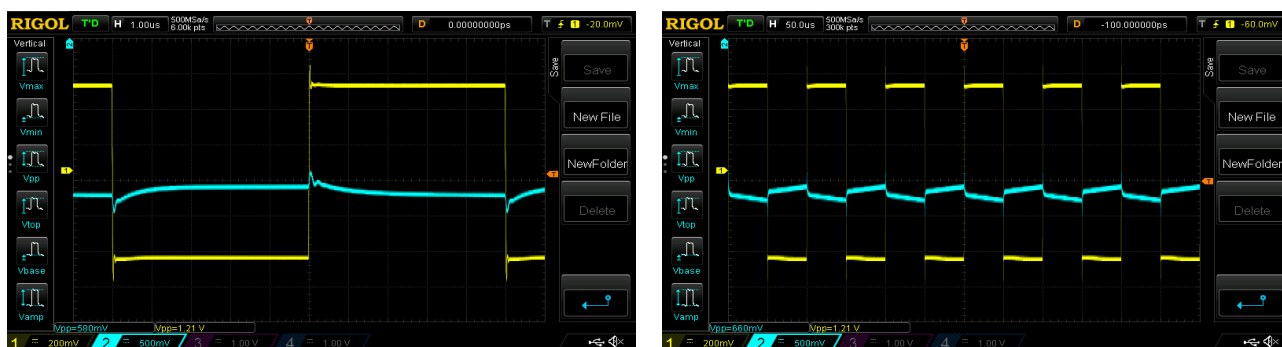
#### 3.2.1. Sygnał prostokątny

Na początku zweryfikowano poprawność działania układu, podając sygnały o częstotliwości 1 kHz i amplitudzie około 1  $V_{pp}$ . Zaobserwowano, że sygnał prostokątny na wejściu został przekształcony na sygnał trójkątny.



Rysunek 3.2: Zrzut ekranu oscyloskopu dla sygnału prostokątnego na wejściu.

Dodatkowo przeanalizowano graniczne warunki działania układu. Stwierdzono, że przy częstotliwości 100 kHz pojawiają się efekty związane ze zmianą polaryzacji sygnału. Oscyloskop zarejestrował gwałtowne skoki napięcia w miejscach załamania sygnału trójkątnego. Na rysunku 3.3 znajdują się zrzuty z ekranu oscyloskopu dla dużych częstotliwości. W granicach prawostronnych widać wyraźne zakrzywienie sygnału, spowodowane najprawdopodobniej tym, że sygnał prostokątny nie był idealnie stały.



Rysunek 3.3: Zrzut ekranu oscyloskopu dla sygnału prostokątnego na wejściu dla dużych częstotliwości.

### 3.2.2. Sygnał sinusoidalny

Sygnał sinusoidalny pozostał sinusoidalny (rys. 3.4), lecz z przesunięciem fazowym (cosinus).



Rysunek 3.4: Zrzut ekranu oscyloskopu dla sygnału sinusoidalnego na wejściu.

### 3.2.3. Sygnał trójkątny

Sygnał trójkątny przyjął kształt paraboliczny (rys. 3.5).



Rysunek 3.5: Zrzut ekranu oscyloskopu dla sygnału trójkątnego na wejściu.

### 3.2.4. Podsumowanie

Każdy z tych przypadków potwierdził prawidłowe działanie układu, spełniającego funkcję całkującą wobec sygnału wejściowego.

## 3.3. Rola rezystora 10 k $\Omega$

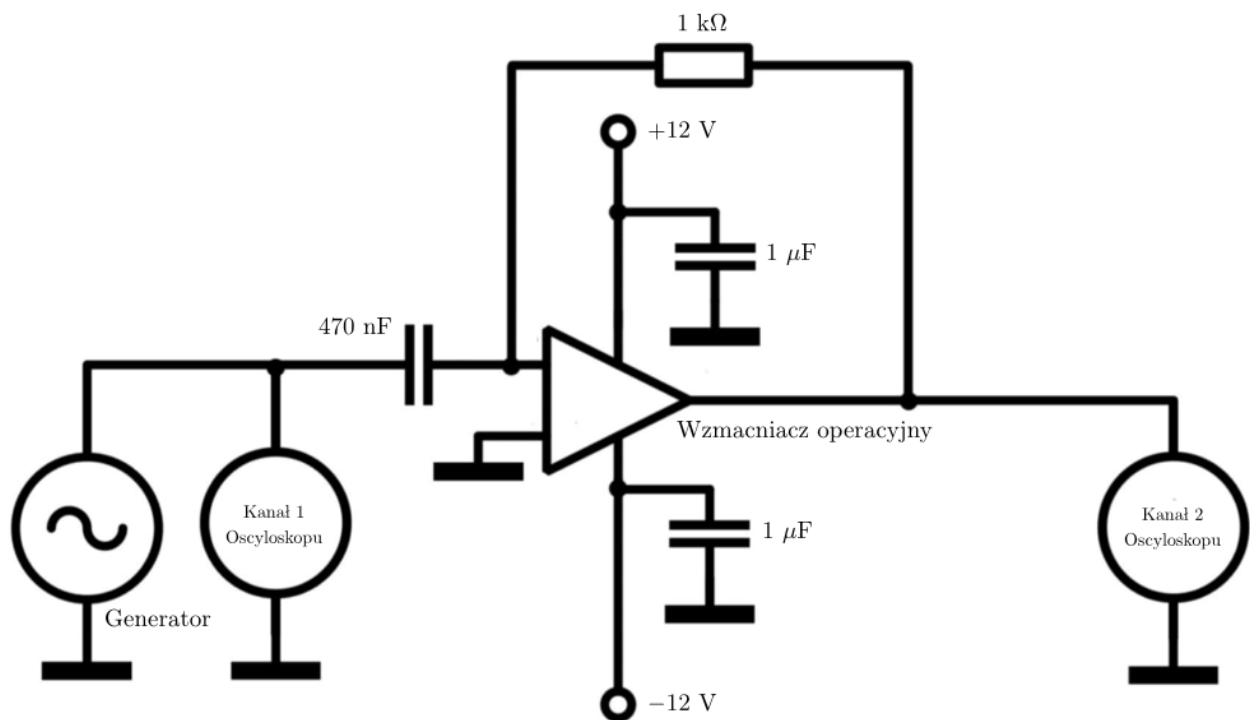
Rezystor o wartości 10 k $\Omega$  został pozostawiony w układzie, ponieważ pełni istotną rolę w stabilizacji działania wzmacniacza operacyjnego. Gdyby został całkowicie usunięty i zastąpiony samym kondensatorem, układ stałby się *idealnym całkującym wzmacniaczem*, jednak prowadziłoby to do problemów związanych z nasyceniem wzmacniacza operacyjnego.



## 4. Układ różniczkujący

### 4.1. Schemat obwodu

Skonstruowano układ różniczkujący. Schemat obwodu znajduje się na rysunku 4.1.



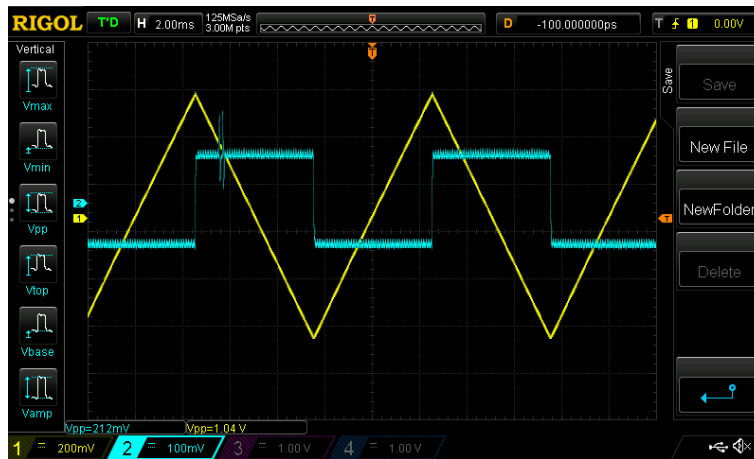
Rysunek 4.1: Schemat układu różniczkującego sygnał wejściowy.

### 4.2. Badanie odpowiedzi układu na różne sygnały

Przeprowadzono testy działania układu poprzez analizę sygnałów wyjściowych (drugi kanał oscyloskopu) przy różnych sygnałach wejściowych: prostokątnym, trójkątnym oraz sinusoidalnym, które były monitorowane na pierwszym kanale oscyloskopu.

#### 4.2.1. Sygnał trójkątny

Na początku zweryfikowano poprawność działania układu, podając sygnały o częstotliwości 100 Hz i amplitudzie około  $1 V_{pp}$ . Zaobserwowano, że sygnał trójkątny na wejściu został przekształcony na sygnał prostokątny.



Rysunek 4.2: Zrzut ekranu oscyloskopu dla sygnału trójkątnego na wejściu.

Dodatkowo przeanalizowano graniczne warunki działania układu. Stwierdzono, że przy częstotliwości 10 kHz pojawiają się efekty związane ze zmianą polaryzacji sygnału. Wejściowy sygnał trójkątny zaczął przypominać kształtem sygnał sinusoidalny i w konsekwencji prostokątny sygnał wejściowy zaczął przypominać kawałkami sygnał sinusoidalny (z przesunięciem fazowym).



Rysunek 4.3: Zrzut ekranu oscyloskopu dla sygnału trójkątnego na wejściu dla dużych częstotliwości.

#### 4.2.2. Sygnał sinusoidalny

Sygnał sinusoidalny pozostał sinusoidalny (rys. 4.4), lecz z przesunięciem fazowym (cosinus).

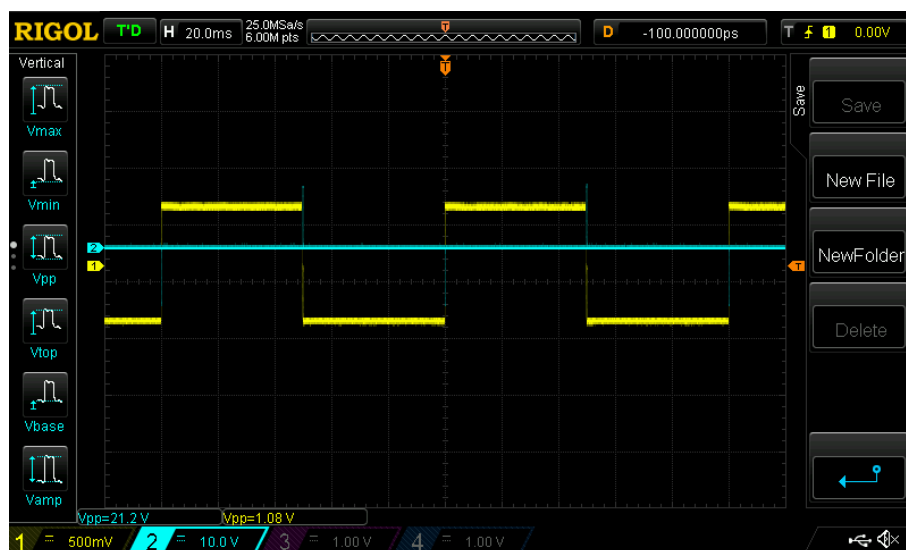


Rysunek 4.4: Zrzut ekranu oscyloskopu dla sygnału sinusoidalnego na wejściu.



### 4.2.3. Sygnał prostokątny

Sygnał prostokątny został przekształcony na sygnał stały (rys. 4.5).



Rysunek 4.5: Zrzut ekranu oscyloskopu dla sygnału trójkątnego na wejściu.

### 4.2.4. Podsumowanie

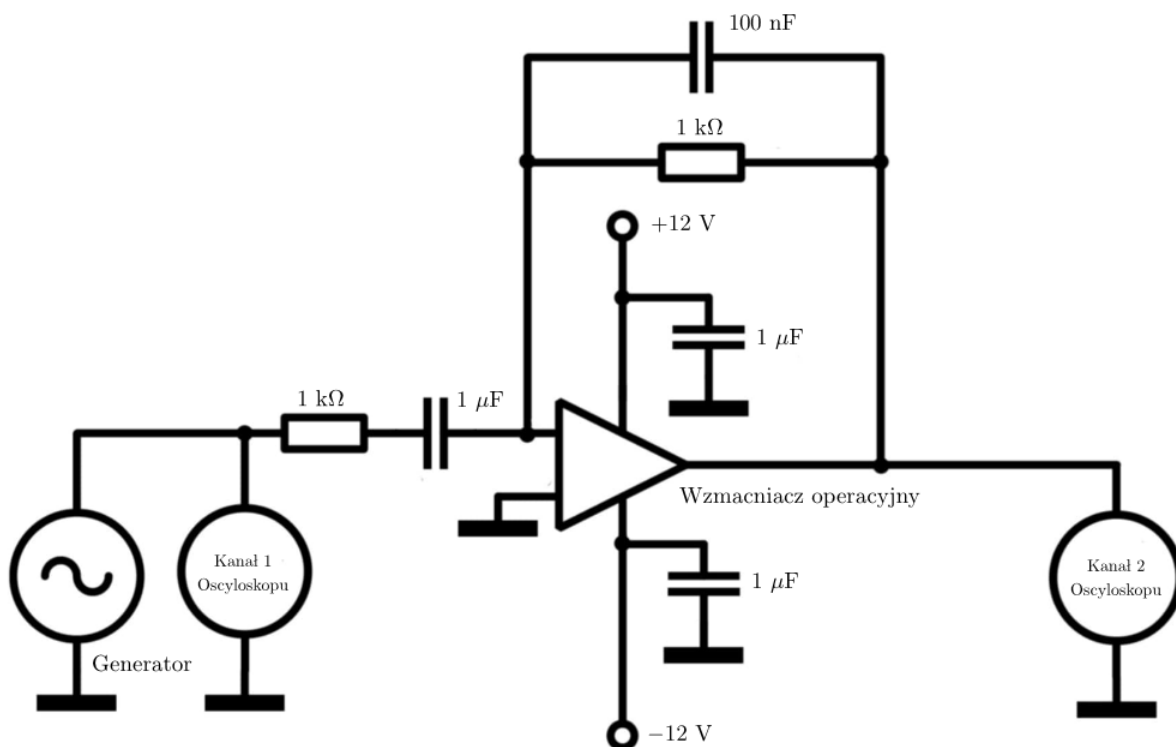
Każdy z tych przypadków potwierdził prawidłowe działanie układu, spełniającego funkcję różniczkującą wobec sygnału wejściowego.



## 5. Aktywny filtr pasmowy

### 5.1. Schemat obwodu

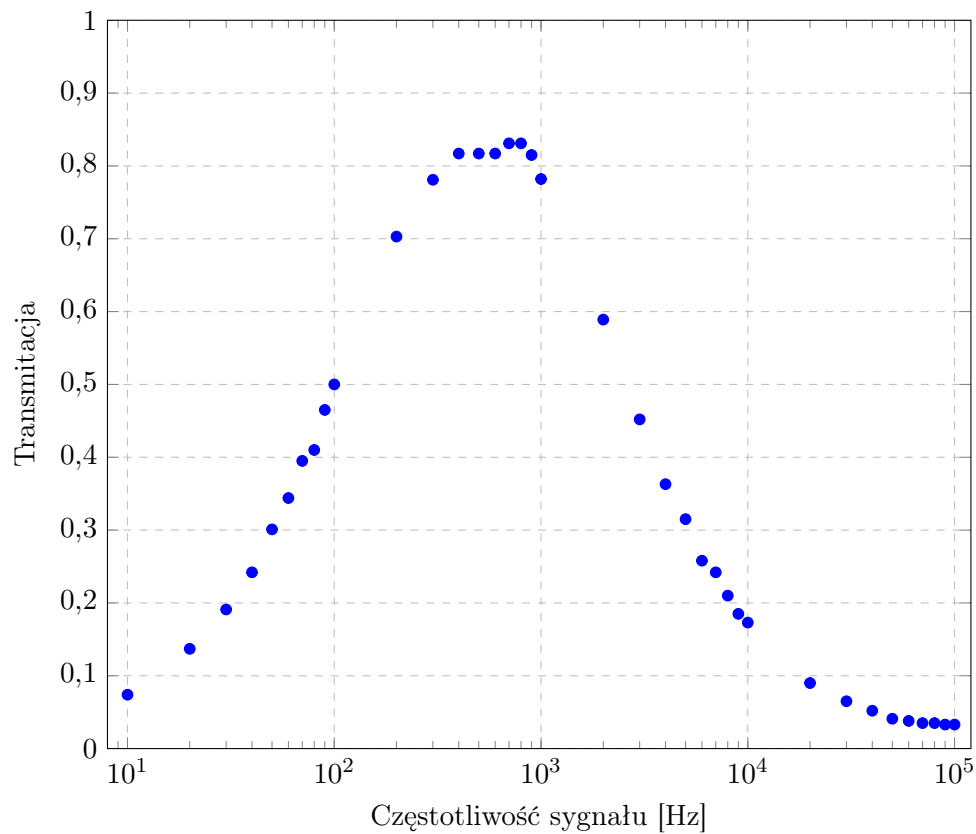
Skonstruowano filtr pasmowy z użyciem wzmacniacza. Do jego budowy zastosowano oporniki o jednokowej wartości  $1\text{ k}\Omega$  oraz kondensatory o nominalnych pojemnościach  $1\text{ }\mu\text{F}$  i  $100\text{ nF}$ . Takie zestawienie komponentów pozwoliło na uzyskanie obwodu selektywnie przepuszczającego sygnały sinusoidalne z określonego przedziału częstotliwości. Schemat układu został przedstawiony na rysunku 5.1.



Rysunek 5.1: Schemat aktywnego filtra pasmowego.

### 5.2. Transmitacja aktywnego filtra pasmowego

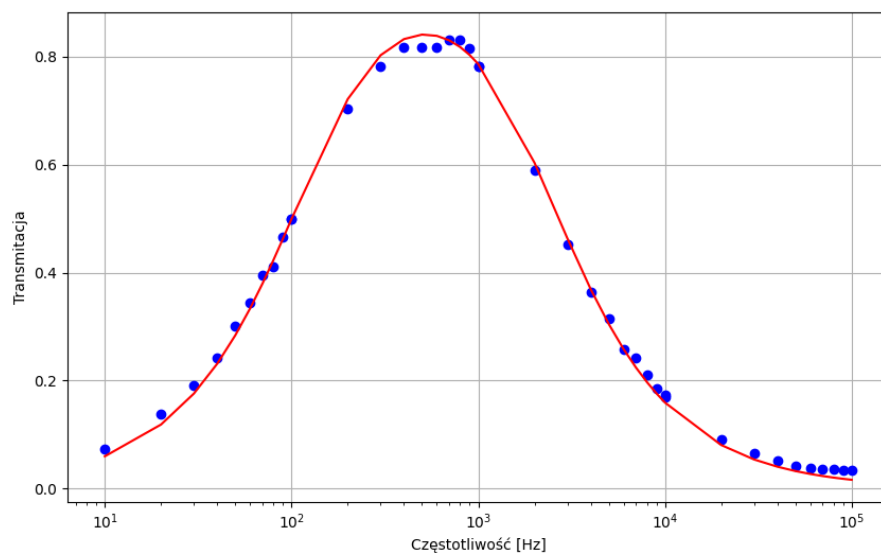
Zbadano zależność transmitancji filtra od częstotliwości sinusoidalnego sygnału wejściowego w zakresie  $10\text{ Hz} - 100\text{ kHz}$ . Analizowano amplitudę napięcia wyjściowego w zależności od częstotliwości napięcia sinusoidalnego podawanego na wejście przy ustalonej amplitudzie  $5\text{ V}$ . Uzyskane wyniki zilustrowano na rysunku 5.2.



Rysunek 5.2: Wykres zależności amplitudy napięcia wyjściowego od częstotliwości sygnału.

Podczas eksperymentu nie stwierdzono wzrostu napięcia ponad wartość napięcia wejściowego, co jest zgodne z teoretycznymi przewidywaniami. Wynika to z faktu, że podłączone rezystory mają identyczne wartości rezystancji.

Zaobserwowano podobieństwo do charakterystyki filtra RLC, więc dopasowano taką do zebranych danych (rys. 5.3).



Rysunek 5.3: Dopasowanie charakterystyki filtra RLC

Wyznaczone parametry filtra RLC:  $R = 5.62 \text{ k}\Omega$ ,  $L = 5.53 \cdot 10^{-1} \text{ H}$ ,  $C = 1.69 \cdot 10^{-7} \text{ F}$ .

## 6. Podsumowanie

Podczas ćwiczenia zbadano kilka układów wykorzystujących wzmacniacze operacyjne, w tym wzmacniacz odwracający, układ różniczkujący, układ całkujący oraz aktywny filtr pasmowy.

W przypadku wzmacniacza odwracającego uzyskano współczynnik wzmocnienia równy  $A_v = 11.7 \pm 0.3$ . Wynik ten potwierdził poprawność działania i wysoką dokładność zbudowanego układu, gdyż wartość teoretyczna wynosi 10.2. Dodatkowo zaobserwowano i omówiono efekt nasycenia.

Układy całkujący i różniczkujący również funkcjonowały zgodnie z oczekiwaniami, co zostało potwierdzone analizą odpowiedzi na różne sygnały wejściowe.

Aktywny filtr pasmowy, przepuszczając sygnały sinusoidalne tylko w określonym paśmie częstotliwości, również spełniał wymagania teoretyczne. Wykres transmitancji filtra wskazał charakterystykę podobną do filtra RLC



## 7. Dodatek

W dodatku został umieszczony program w pythonie, który posłużył do narysowania wykresu Transmisji w zależności od częstotliwości.

```
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from scipy.optimize import curve_fit

# Dane wejsciowe
x_values = np.array([10, 20, 30, 40, 50, 60, 70, 80, 90,
                    100, 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900,
                    1000, 2000, 3000, 4000, 5000, 6000, 7000, 8000, 9000,
                    10000, 20000, 30000, 40000, 50000, 60000, 70000,
                    80000, 90000, 100000])

y_values = np.array([0.074, 0.137, 0.191, 0.242, 0.301, 0.344, 0.395,
                    0.410, 0.465, 0.500, 0.500, 0.703, 0.781, 0.817, 0.817,
                    0.817, 0.831, 0.831, 0.815, 0.782, 0.782, 0.589, 0.452,
                    0.363, 0.315, 0.258, 0.242, 0.210, 0.185, 0.169, 0.173,
                    0.090, 0.065, 0.052, 0.041, 0.038, 0.035, 0.035, 0.033, 0.033])

# Funkcja transmitancji filtra RLC z definicji
def rlc_filter(f, R, L, C):
    omega = 2 * np.pi * f # Pulsacja
    Rp = 0 # Zalozmy, ze nie ma dodatkowego oporu
    return R / np.sqrt((R + Rp)**2 + (omega * L - 1 / (omega * C))**2)

# Dopasowanie modelu do danych
popt, _ = curve_fit(rlc_filter, x_values, y_values, p0=[1000, 1e-3, 1e-7])

# Wyznaczone parametry
R_fit, L_fit, C_fit = pop

# Oblicz dane dla dopasowanego modelu
y_fit = rlc_filter(x_values, *popt)

# Rysowanie wykresu
plt.figure(figsize=(10, 6))
plt.plot(x_values, y_values, 'bo')
plt.plot(x_values, y_fit, 'r-')
plt.xscale('log')
plt.grid(True)
plt.show()
```





# Bibliografia

- [1] Piotr Fita. Notatki do wykładu 4. z Pracowni elektronicznej R. FUW
- [2] Piotr Fita. Instrukcja do zadania "Wzmacniacz operacyjny". 2023-2024 FUW
- [3] P. Horowitz, W. Hill, "Sztuka elektroniki"