

Uniwersytet Warszawski  
Wydział Fizyki

Marysia Nazarczuk

Nr albumu: 417755

# TRANZYSTORY

Streszczenie

Warszawa, Listopad 2024



# Spis treści

<b>1. Wstęp teoretyczny</b>	5
<b>2. Przełącznik tranzystorowy</b>	7
2.1 Wstęp Teoretyczny	7
2.2 Układ Doświadczalny	7
2.3 Przebieg Doświadczenia	7
2.4 Wnioski	8
<b>3. Wyznaczenie wzmocnienia prądowego tranzystora</b>	9
3.1 Wstęp teoretyczny	9
3.2 Układ doświadczalny	9
3.3 Przebieg doświadczenia i wyniki pomiarów	10
3.4 Analiza pomiarów	10
3.5 Wnioski	11
<b>4. Wzmacniacz o wspólnym kolektorze</b>	13
4.1 Model teoretyczny	13
4.2 Układ doświadczalny	13
4.3 Przeprowadzenie doświadczenia	14
4.3.1 Głośnik bez wzmacniacza	14
4.3.2 Głośnik ze wzmacniaczem	15
<b>5. Wzmacniacz o wspólnym emiterze</b>	17
5.1 Model teoretyczny	17
5.2 Układ doświadczalny	17
5.3 Przeprowadzenie doświadczenia i analiza pomiarów	17
5.3.1 Wybór punktu pracy	17
5.3.2 Współczynnik wzmocnienia napięciowego	18
5.3.3 Pasma wzmocnienia	19
5.4 Wnioski	21
<b>6. Podsumowanie</b>	23
<b>7. Dodatek</b>	25
<b>Bibliografia</b>	27



# 1. Wstęp teoretyczny

Tranzystory są kluczowymi elementami w elektronice, pełniącymi dwie podstawowe funkcje: przełączanie oraz wzmacnianie sygnałów elektrycznych. Ich wszechstronność i znaczenie wynikają z możliwości kontrolowania przepływu prądu oraz wzmacniania sygnałów o niewielkiej amplitudzie. Dzięki tym właściwościom tranzystory znajdują zastosowanie w różnorodnych układach elektronicznych, począwszy od prostych wzmacniaczy, aż po skomplikowane systemy cyfrowe.

Tranzystory dzielą się na dwie główne grupy: tranzystory bipolarne (BJT) i tranzystory unipolarne (FET). W ramach tych grup występuje dalszy podział uwzględniający m.in. rodzaj półprzewodnika (np. tranzystory krzemowe lub germanowe), właściwości elektryczne (tranzystory małej i dużej mocy, małej i wielkiej częstotliwości, impulsowe, wysokonapięciowe), a także cechy konstrukcyjno-technologiczne. Dzięki tym zróżnicowanym właściwościom tranzystory mogą być optymalizowane pod kątem konkretnych zastosowań.

Ze względu na funkcję przełączania, tranzystory stanowią fundament współczesnych układów cyfrowych, umożliwiając realizację podstawowych funkcji logicznych. Z tranzystorów buduje się bramki logiczne stosowane w procesorach, kontrolerach i pamięciach półprzewodnikowych, co czyni je nieodzownym elementem każdej technologii cyfrowej.

Jednym z najczęściej stosowanych rodzajów tranzystorów są tranzystory bipolarne (BJT), które charakteryzują się konstrukcją opartą na dwóch złączach p-n. Zbudowane są z trzech warstw półprzewodników o przeciwnym typie przewodnictwa (p-n-p lub n-p-n). Warstwy te są uzyskiwane w monokryształe półprzewodnika, najczęściej krzemu (Si). Dzięki zastosowaniu półprzewodników domieszkowanych, tranzystory bipolarne osiągają wysoką wydajność w układach analogowych i cyfrowych, łącząc wysoką szybkość działania z możliwością pracy w szerokim zakresie częstotliwości i mocy.

W układach wzmacniających, takich jak wzmacniacze o wspólnym emiterze, tranzystory pełnią rolę elementów aktywnych, które wzmacniają sygnały elektryczne. Kluczowym aspektem ich działania jest odpowiednie ustawienie punktu pracy, które pozwala na optymalne wykorzystanie charakterystyki tranzystora. Dzięki temu wzmacniacze z tranzystorami bipolarnymi znajdują szerokie zastosowanie w elektronice użytkowej, telekomunikacji i przemyśle.

Zrozumienie właściwości i zasad działania tranzystorów stanowi podstawę projektowania nowoczesnych urządzeń elektronicznych, zarówno analogowych, jak i cyfrowych.



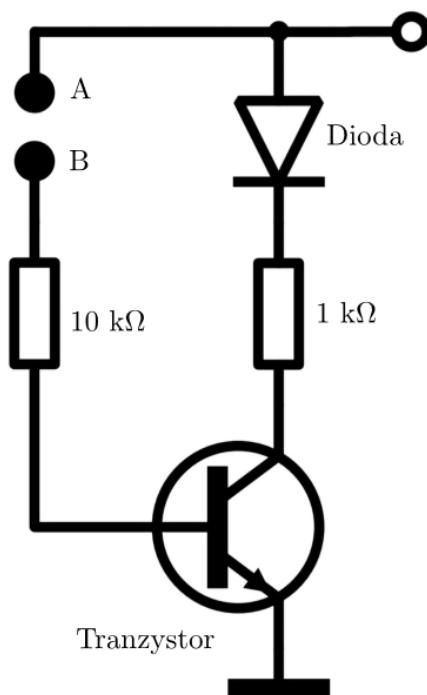
## 2. Przełącznik tranzystorowy

### 2.1. Wstęp Teoretyczny

Tranzystory mogą działać jako przełączniki, kontrolując przepływ prądu między zaciskami kolektora i emitera w oparciu o napięcie przyłożone do zacisku podstawy. Tranzystor może pracować w dwóch stanach: włączonym (przewodzącym) lub wyłączonym (nieprzewodzącym), w zależności od napięcia aplikowanego na jego bazę. Wykorzystanie tranzystorów jako przełączników jest powszechne w układach cyfrowych. Zanim wynaleziono tranzystory, w układach elektronicznych do sterowania prądem używano lamp elektronowych, jednak miały one duże rozmiary i relatywnie wysoki koszt produkcji, dlatego dopiero tranzystory umożliwiły rozwój mikroelektroniki.

### 2.2. Układ Doświadczalny

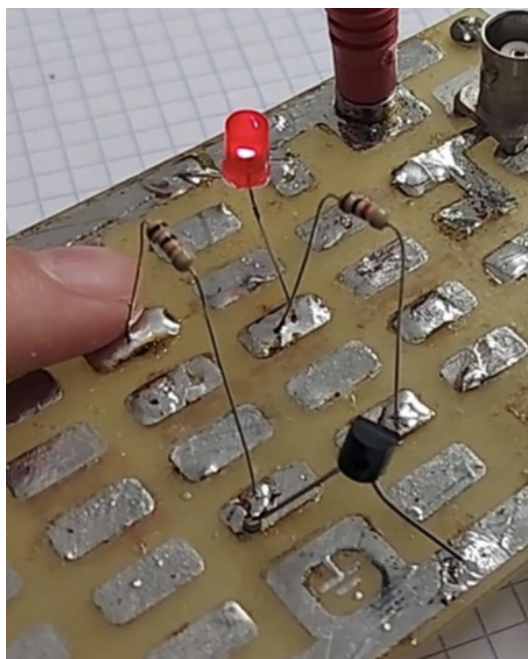
Układ doświadczalny składa się z tranzystora BC639, diody LED oraz dwóch rezystorów  $1\text{ k}\Omega$  oraz  $10\text{ k}\Omega$  połączonych szeregowo. Schemat układu doświadczalnego znajduje się na rysunku 2.1.



Rysunek 2.1: Schemat obwodu elektrycznego.

### 2.3. Przebieg Doświadczenia

Po zbudowaniu układu doświadczalnego, przetestowano jego działanie przykładając palec do punktów A i B. Zaobserwowano świecenie diody gdy obwód był zamknięty.



Rysunek 2.2: Zdjęcie wykonane podczas doświadczenia, na którym po domknięciu obwodu przez palec, można zaobserwować świecenie diody.

## 2.4. Wnioski

Po dotknięciu punktów A i B palcem, tranzystor przechodzi w stan przewodzenia, umożliwiając przepływ prądu przez diodę. Jeśli dioda świeci, oznacza to, że tranzystor działa poprawnie jako przełącznik.

Dotyk palcem powoduje niewielkie napięcie na bazie tranzystora, co wystarcza do jego uruchomienia. Jeśli tranzystor by nie działał, przyczyną mogłaby być niewłaściwa polaryzacja diody lub uszkodzony tranzystor.



# 3. Wyznaczenie wzmocnienia prądowego tranzystora

## 3.1. Wstęp teoretyczny

Wzmocnienie prądowe tranzystora to stosunek prądu kolektora ( $I_C$ ) do prądu bazy ( $I_B$ ) w stanie aktywnym tranzystora. Jest to jeden z podstawowych parametrów tranzystora, który informuje o efektywności tranzystora w amplifikacji prądu. Wzmocnienie prądowe, oznaczane jako  $\beta$ , jest wykorzystywane w wielu układach elektronicznych, takich jak wzmacniacze czy układy logiczne.

Zależność między prądem kolektora i prądem bazy w tranzystorze NPN w stanie aktywnym wyraża się równaniem:

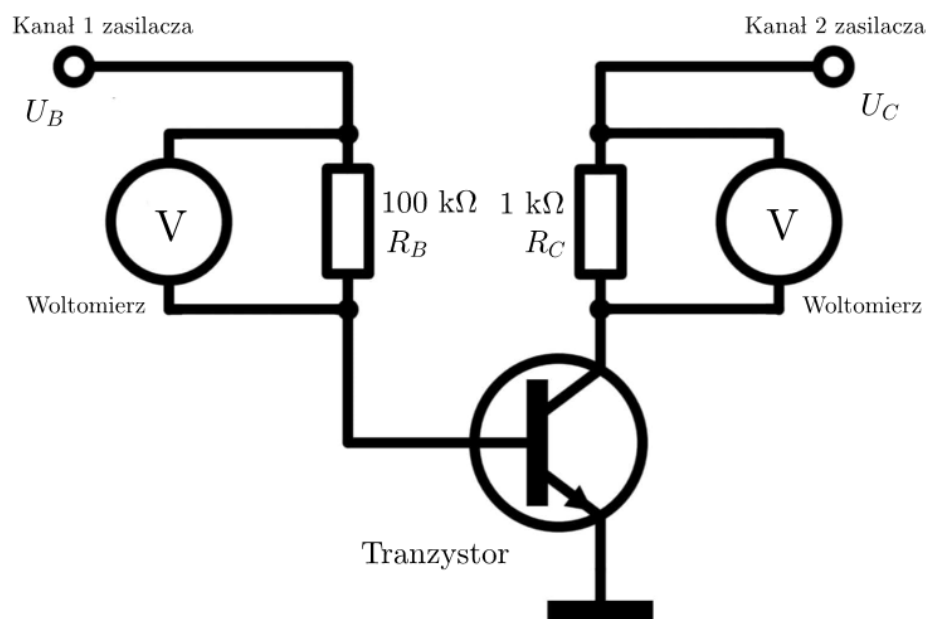
$$I_C = \beta \cdot I_B \quad (3.1)$$

gdzie:

- $I_C$  – prąd kolektora,
- $I_B$  – prąd bazy,
- $\beta$  – współczynnik wzmocnienia prądowego tranzystora.

## 3.2. Układ doświadczalny

Układ jest zbudowany tak, że napięcie  $U_B$  (na bazie) będzie regulowane, co pozwoli na kontrolowanie prądu bazy  $I_B$ . Napięcie  $U_C$  dostarczane przez zasilacz 5 V na kolektorze pozwoli zmierzyć prąd kolektora  $I_C$ . Schemat obwodu znajduje się na rysunku 3.1.

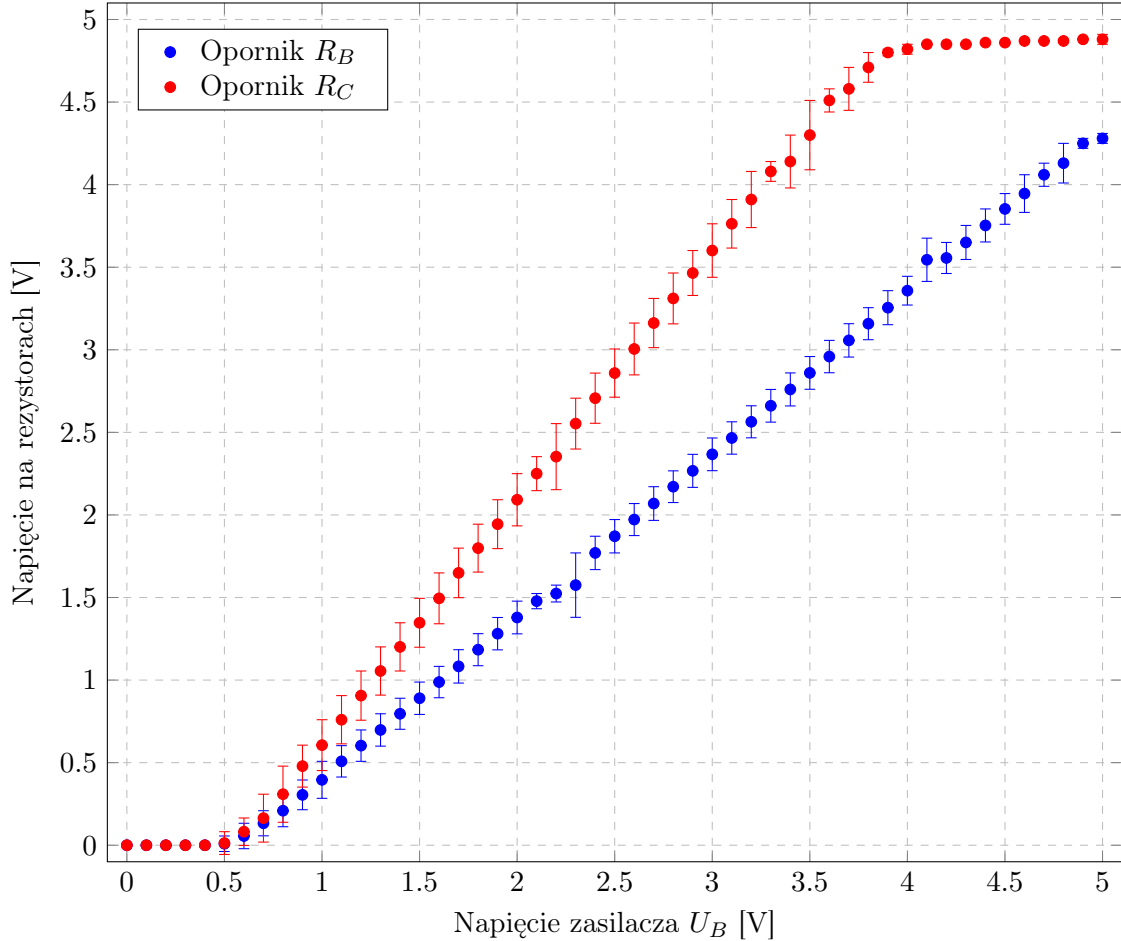


Rysunek 3.1: Schemat obwodu elektrycznego.

### 3.3. Przebieg doświadczenia i wyniki pomiarów

Pomiary napięcia na rezystorach  $R_B$  oraz  $R_C$  zostały wykonane dla zakresu napięć  $U_B$  od 0 do 5 V. Wartość  $U_C$  była stała i wynosiła 5 V. Nagrano film w trakcie którego za pomocą pokrętła zmieniano napięcia na zasilaczu.

Szczytano dane z filmu co 0.1 V. Zebrane dane zostały przedstawione na rysunku 3.2 jako zależność napięcia na rezystorach od napięcia na zasilaczu.



Rysunek 3.2: Zależność napięcia na rezystorach  $R_B$  i  $R_C$  od napięcia na zasilaczu  $U_B$ .

Za pomocą omomierza zmierzono dokładne wartości rezystancji oporników. Wynosiły one

$$R_B = (99.8 \pm 0.1) \text{ k}\Omega \quad (3.2)$$

oraz

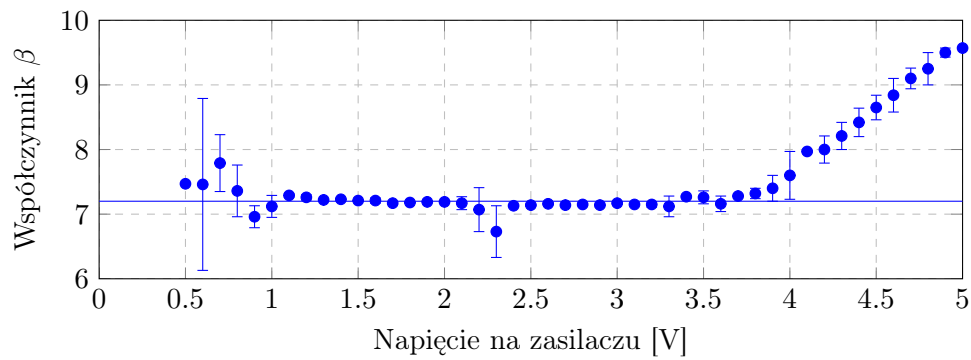
$$R_C = (0.99 \pm 0.01) \text{ k}\Omega \quad (3.3)$$

### 3.4. Analiza pomiarów

Korzystając z zależności 3.1 wyliczono współczynnik  $\beta$  dla poszczególnych napięć na rezystorach

$$\beta = \frac{V_{R_B}}{V_{R_C}} \cdot \frac{R_B}{R_C} \quad (3.4)$$

Wyniki zostały umieszczone na wykresie 3.3. Dla napięć mniejszych niż 0.5 V na zasilaczu wartość wyświetlanych napięć na woltomierzach była równa zero. Zatem dla tych danych nie zamieszczono na wykresie.



Rysunek 3.3: Zależność współczynnika

Z wykresu 3.2 odczytano zależność liniową dla opornika  $R_B$  dla napięć na zasilaczu z zakresu (0.5, 4.8) V, zaś dla opornika  $R_C$  dla napięć z zakresu (0.5, 3.7) V. Stąd do wyznaczenia średniej wartości  $\beta$ , z wykresu 3.3 wzięto wartości z zakresu (0.5, 3.7) V. Uzyskano

$$\beta = 7.20 \pm 0.13 \quad (3.5)$$

### 3.5. Wnioski

Przeprowadzone doświadczenie pozwoliło na wyznaczenie współczynnika wzmocnienia prądowego tranzystora  $\beta$ , który okazał się stabilny w większości zakresu badanych napięć.

Uzyskane wyniki pokazują, że jedną z funkcją tranzystorów jest wzmacnianie sygnałów.



## 4. Wzmacniacz o wspólnym kolektorze

### 4.1. Model teoretyczny

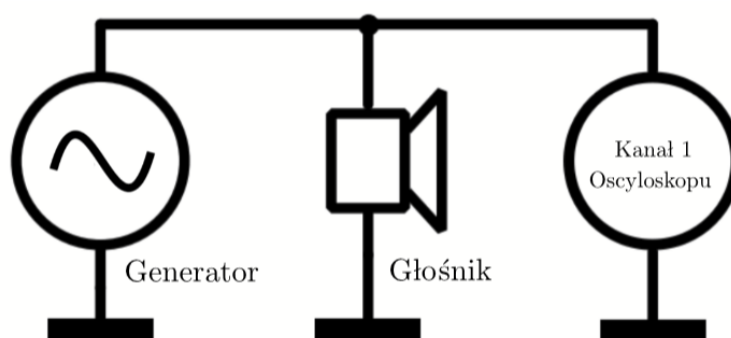
Wzmacniacz o wspólnym kolektorze (wtórnik emiterowy) to układ charakteryzujący się dużą impedancją wejściową i niską impedancją wyjściową. Kluczową cechą wzmacniacza tego typu jest wzmocnienie napięciowe bliskie jedności, co czyni go idealnym buforem impedancyjnym. Tranzystor w układzie o wspólnym kolektorze działa jako element aktywny, wzmacniając prąd sygnału wejściowego, co umożliwia skuteczne sterowanie obciążeniami o niskiej impedancji, takimi jak głośniki.

W układzie tym punkt pracy tranzystora zależy od napięcia polaryzującego bazę, które można regulować za pomocą potencjometru. Odpowiednie ustawienie punktu pracy pozwala na zminimalizowanie zniekształceń sygnału wyjściowego i maksymalizację zakresu liniowego działania układu. Wzmacniacz o wspólnym kolektorze nie wzmacnia napięcia, ale poprawia wydajność prądową, umożliwiając efektywne przenoszenie mocy do obciążenia.

### 4.2. Układ doświadczalny

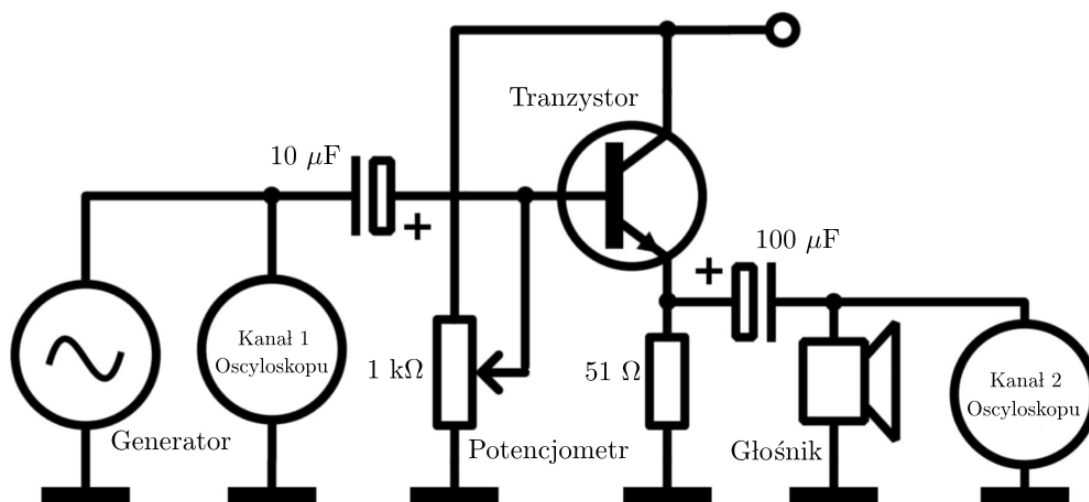
Do przeprowadzenia doświadczenia zbudowano dwa układy:

- **Głośnik bez wzmacniacza:** Głośnik podłączony bezpośrednio do generatora sygnałowego i oscyloskopu. Schemat znajduje się na rysunku 4.1. Generator skonfigurowano na sygnał sinusoidalny o częstotliwości 500 Hz i amplitudzie 1 Vpp.



Rysunek 4.1: Schemat układu doświadczalnego.

- **Głośnik ze wzmacniaczem:** Wzmacniacz o wspólnym kolektorze z głośnikiem podłączonym do jego wyjścia. Schemat znajduje się na rysunku 4.2. Generator skonfigurowano na sygnał sinusoidalny o częstotliwości 500 Hz i amplitudzie 1 Vpp. Oscyloskop wykorzystano do monitorowania sygnału napięciowego na głośniku. Układ wzmacniacza zbudowano z tranzystora NPN, rezystora emiterowego i potencjometru pozwalającego regulować napięcie polaryzujące bazę tranzystora. Schematy układów pokazano na rysunku poniżej (dołączony w raporcie).



Rysunek 4.2: Schemat obwodu elektrycznego.

## 4.3. Przeprowadzenie doświadczenia

### 4.3.1. Głośnik bez wzmacniacza

Początkowo zmierzono amplitudę napięcia na głośniku, który był podłączony do generatora i oscyloskopu (rys. 4.1). Otrzymano

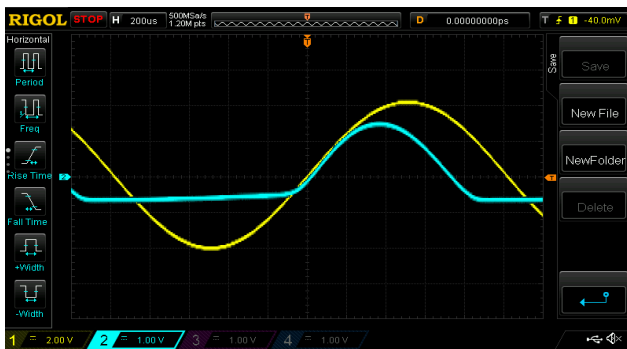
$$U_{\text{głośnik}} = (84.0 \pm 0.5) \text{ mV} \quad (4.1)$$



Rysunek 4.3: Zdjęcie ekranu oscyloskopu dla układu 4.1.

Dźwięk wydobywający się z głośnika był ledwo słyszalny.

### 4.3.2. Głośnik ze wzmacniaczem



Blisko masy



jakiś podpis



LED czerwona

Rysunek 4.7: Charakterystykę prądowo-napięciową dla różnych rodzajów diod





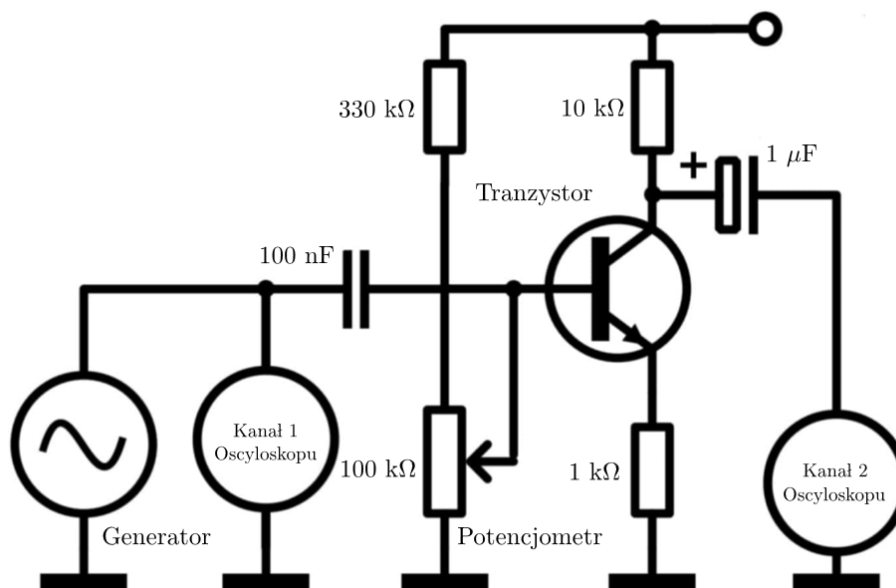
## 5. Wzmacniacz o wspólnym emiterze

### 5.1. Model teoretyczny

Wzmacniacz o wspólnym emiterze jest jednym z najprostszych i najczęściej używanych układów wzmacniających w elektronice. W układzie tym tranzystor działa jako element aktywny, a jego zadaniem jest wzmocnienie sygnału wejściowego, który jest podawany na bazę tranzystora. Wzmacniacz o wspólnym emiterze charakteryzuje się dużym wzmocnieniem napięciowym, jednak jego działanie jest uzależnione od odpowiedniego ustawienia punktu pracy oraz właściwego doboru parametrów obwodu. Wzmacniacz ten wymaga ustalenia odpowiedniego punktu pracy, w którym tranzystor pracuje w zakresie aktywnym, a amplituda sygnału wyjściowego jest maksymalna.

### 5.2. Układ doświadczalny

Zbudowano układ wzmacniacza o wspólnym emiterze, jak pokazano na poniższym rysunku 5.1. Układ zbudowano z tranzystora NPN, rezystora kolektorowego, rezystora emiterowego oraz potencjometru, który umożliwia ustawienie napięcia polaryzującego bazę tranzystora. Sygnał wejściowy generowany był przez generator sygnałowy, a napięcie wyjściowe było monitorowane za pomocą oscyloskopu.



Rysunek 5.1: Schemat obwodu elektrycznego.

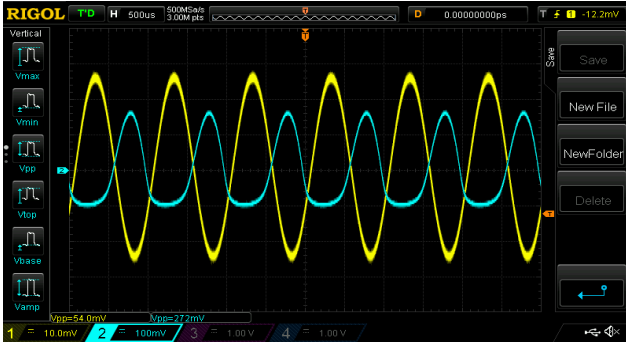
### 5.3. Przeprowadzenie doświadczenia i analiza pomiarów

#### 5.3.1. Wybór punktu pracy

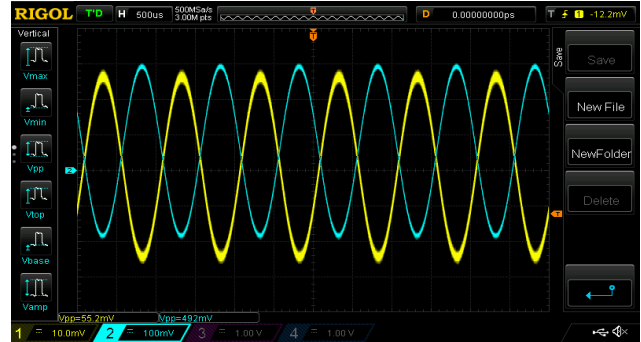
Punktem pracy wzmacniacza jest położenie potencjometru, które zapewnia maksymalny zakres zmiany napięcia wyjściowego. Aby ustalić punkt pracy, ustawiono generator na częstotliwość 1 kHz z amplitudą 50 mV, a następnie stopniowo zwiększano napięcie polaryzujące bazę tranzystora. Obserwowano kształt sygnału wyjściowego, który zmieniał się w zależności od ustawienia potencjometru. Zbadano sygnał dla trzech różnych wartości oporu potencjometru. W zależności od danej wartości oporu, dźwięk z głośnika miał różne natężenie.

W początkowej fazie, przy niższym napięciu polaryzującym, przebieg wyjściowy był mocno zdeformowany (rys. 5.2), z widocznymi zniekształceniami wynikającymi z pracy tranzystora w zakresie nasycenia.

Wraz ze wzrostem napięcia na bazie, przebieg stawał się coraz bardziej symetryczny i zbliżał się do sinusoidalnego kształtu (rys. 5.3). Ostatecznie, przy odpowiednim ustawieniu potencjometru, napięcie kolektorowe tranzystora osiągnęło wartość bliską połowie napięcia zasilania – 5 V, co zapewniło optymalny punkt pracy. Zaobserwowano, że natężenie dźwięku z głośnika odpowiadało amplitudzie sygnału wyjściowego.



Rysunek 5.2: Niskie napięcie kolektorowe

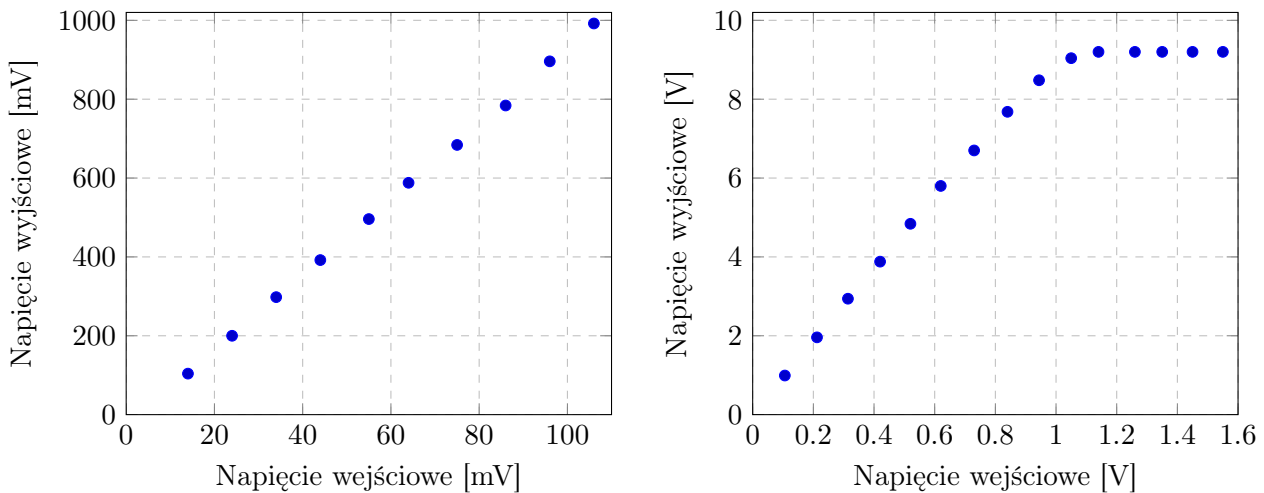


Rysunek 5.3: Połowa napięcia zasilania

### 5.3.2. Współczynnik wzmocnienia napięciowego

Po ustaleniu punktu pracy, zmieniano amplitudę sygnału wejściowego, aby zbadać wzmocnienie napięciowe układu. Sygnał wejściowy o częstotliwości 1 kHz o zmiennej amplitudzie był podawany na wejście wzmacniacza, a amplituda napięcia wyjściowego była mierzona za pomocą oscyloskopu.

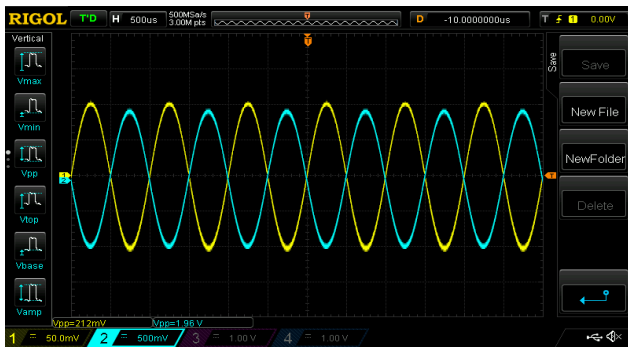
Wyniki pomiarów przedstawiono na wykresie 5.4.



Rysunek 5.4: Wykres zależności napięcia wyjściowego od napięcia wejściowego.

Zależność amplitudy napięcia wyjściowego od amplitudy napięcia wejściowego wykazuje liniowy charakter, co potwierdza, że wzmacniacz działa w zakresie wzmocnienia liniowego. Współczynnik wzmocnienia napięciowego został obliczony jako stosunek amplitudy napięcia wyjściowego do amplitudy napięcia wejściowego. Obliczono go na wartość:

$$\frac{U_{\text{wyjściowe}}}{U_{\text{wejściowe}}} = 9.0 \pm 1.3 \quad (5.1)$$



Rysunek 5.5: Napięcie wejściowe 212 mV

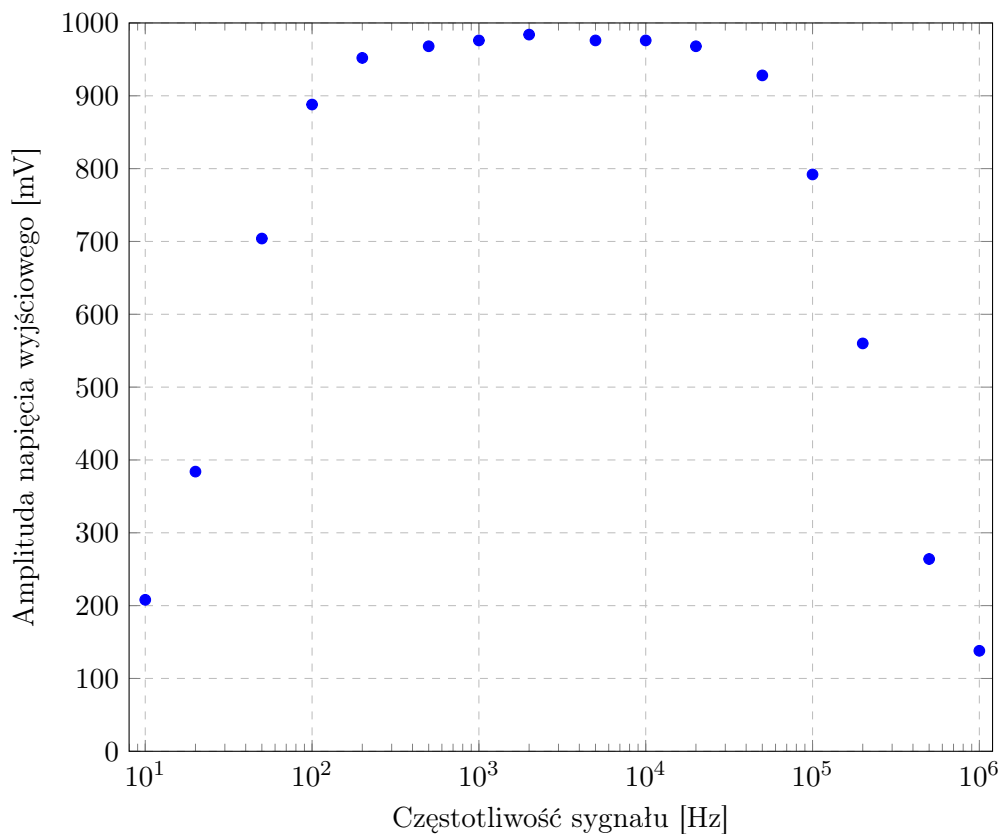


Rysunek 5.6: Napięcie wejściowe 1260 mV

Dla dużych wartości napięcia wejściowego (większych niż 1100 mV), wykres napięcia wyjściowego zaczął się wypłaszczać (rys. 5.6).

### 5.3.3. Pasma wzmacnienia

Aby zbadać pasmo wzmacnienia, zmieniano częstotliwość sygnału wejściowego w zakresie od 10 Hz do 1 MHz, przy amplitudzie 100 mV. Wykonano pomiary dla różnych częstotliwości, a wyniki przedstawiono na wykresie 5.7.



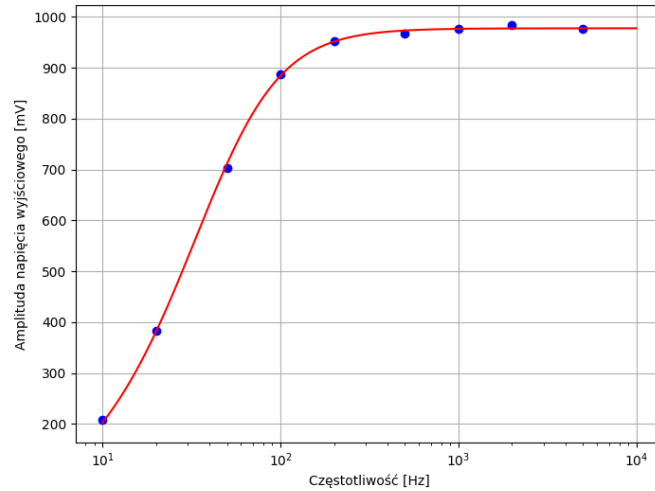
Rysunek 5.7: Wykres zależności amplitudy napięcia wyjściowego od częstotliwości sygnału.

Wzmacniacz wykazuje typowe dla układu o wspólnym emiterze pasmo przenoszenia, które zmienia się z częstotliwością. Na wykresie 5.7 widoczny jest spadek wzmacnienia dla wyższych częstotliwości, co jest charakterystyczne dla układów wzmacniających z ograniczoną szerokością pasma.

Zaobserwowano, że dla małych wartości (do 5000 Hz), narastanie charakterystyki częstotliwościowej da się wyjaśnić oddziaływaniem wejściowego filtra górnoprzepustowego, czyli opisać funkcją 5.2.

$$T(\omega) = \frac{T_{max}}{\sqrt{1 + \frac{1}{(\omega RC)^2}}} \quad (5.2)$$

Przy założeniu, że filtr ten jest o pojemności sprzęgającej  $C = 100$  nF, dopasowano zależność 5.2 do danych pomiarowych. Wykres dopasowania znajduje się na rysunku 5.8.



Rysunek 5.8: Dopasowanie zależności 5.2 do danych pomiarowych.

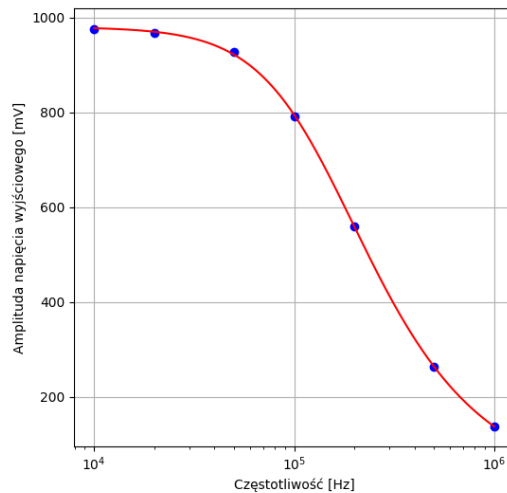
Dopasowanie funkcji pozwoliło oszacować rezystancję wejściową na

$$R = (33.74 \pm 0.35) \text{ k}\Omega \quad (5.3)$$

Zaobserwowano, że dla większych wartości (od 10000 Hz), narastanie charakterystyki częstotliwościowej da się wyjaśnić oddziaływaniem wejściowego filtra dolnoprzepustowego, czyli opisać funkcją 5.4.

$$T(\omega) = \frac{T_{max}}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (5.4)$$

Przy założeniu, że filtr ten jest o pojemności sprzęgającej  $C = 100$  nF, dopasowano zależność 5.4 do danych pomiarowych. Wykres dopasowania znajduje się na rysunku 5.9.



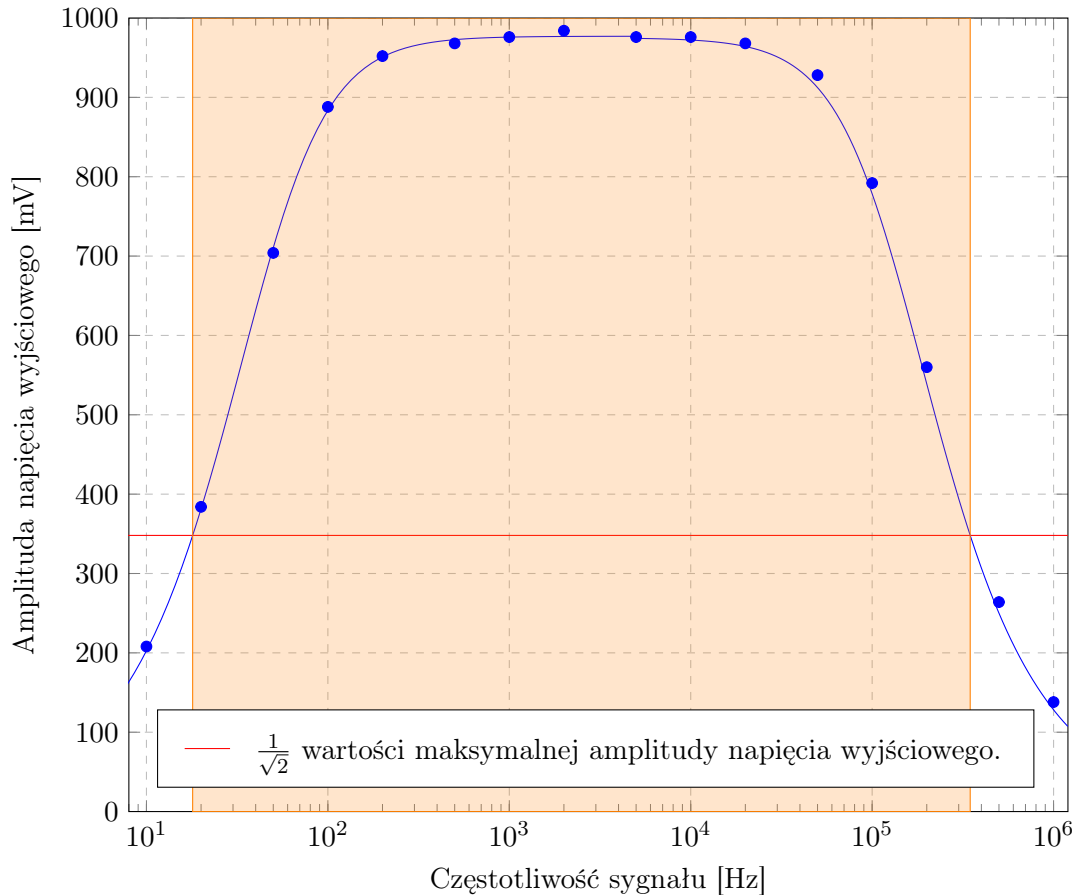
Rysunek 5.9: Dopasowanie zależności 5.4 do danych pomiarowych.

Dopasowanie funkcji pozwoliło oszacować rezystancję wejściową na

$$R = (11.51 \pm 0.14) \, \Omega \quad (5.5)$$

Na podstawie pomiarów można obliczyć pasmo wzmocnienia, czyli zakres częstotliwości, w którym wzmocnienie napięciowe nie spada poniżej  $\frac{1}{\sqrt{2}}$  wartości maksymalnej. Skoro napięcie wejściowe jest stale równe 10 V, to jest to równoważne ze znalezieniem zakresu częstotliwości, w którym amplituda napięcia wyjściowego nie spada poniżej  $\frac{1}{2}$  wartości maksymalnej (czyli około 384 mV).

W celu dokładnego określenia pasma wzmocnienia wyznaczono punkty przecięcia dopasowanych funkcji charakterystyk częstotliwościowych 5.2 i 5.4 z prostą reprezentującą poziom  $T = 384$  (rys. 5.10).



Rysunek 5.10: Wykres zależności amplitudy napięcia wyjściowego od częstotliwości sygnału.

Określono, że pasmo wzmocnienia wynosi od  $(17.98 \pm 0.14)$  Hz do  $(347.11 \pm 0.11)$  kHz

## 5.4. Wnioski

Przeprowadzone doświadczenie pozwoliło na zbadanie charakterystyki wzmacniacza o wspólnym emiterze, obejmując wybór punktu pracy, określenie współczynnika wzmocnienia napięciowego oraz wyznaczenie pasma wzmocnienia.

1. **Wybór punktu pracy:** Obserwacje wskazały, że punkt pracy wzmacniacza musi być precyzyjnie ustawiony, aby zapewnić optymalne działanie układu. Przy zbyt niskim napięciu polaryzującym bazę, tranzystor działa w zakresie nasycenia, co prowadzi do zniekształceń sygnału wyjściowego. Z kolei przy zbyt wysokim napięciu polaryzującym występuje odcięcie sygnału. Punkt pracy, w którym napięcie kolektorowe wynosiło połowę napięcia zasilania, zapewnił maksymalny zakres liniowego wzmocnienia sygnału.

2. **Współczynnik wzmocnienia napięciowego:** Wzmacniacz charakteryzuje się dużym wzmocnieniem napięciowym wynoszącym do  $9.0 \pm 1.3$ . W badanym zakresie amplitudy napięcia wejściowego układ działał liniowo, co potwierdza stabilność i skuteczność wzmacniacza w podstawowych zastosowaniach. Liniowa zależność amplitudy napięcia wyjściowego od napięcia wejściowego potwierdza poprawne działanie w zakresie aktywnym tranzystora.
3. **Pasmo wzmocnienia:** Badanie zależności amplitudy napięcia wyjściowego od częstotliwości sygnału wejściowego wykazało, że pasmo wzmocnienia wzmacniacza wynosi w przybliżeniu od 18 Hz do 350 kHz. Spadek wzmocnienia dla wyższych częstotliwości wynika z ograniczeń związanych z pojemnością pasożytniczą tranzystora oraz elementów sprzęgających w obwodzie. Narastanie charakterystyki wzmocnienia dla małych częstotliwości jest zgodne z teorią filtrów górnoprzepustowych, zaś opadanie charakterystyki jest zgodne z teorią filtrów dolnoprzepustowych.

Wyniki potwierdzają, że wzmacniacz o wspólnym emiterze jest układem o dużym wzmocnieniu napięciowym, ale jego parametry są silnie zależne od prawidłowego wyboru punktu pracy i częstotliwości sygnału wejściowego. Otrzymane pasmo wzmocnienia oraz liniowe wzmocnienie w zakresie roboczym wskazują, że układ nadaje się do zastosowań w obwodach analogowych, gdzie wymagane są zarówno dobre właściwości wzmacniające, jak i szerokie pasmo pracy. Jednak ograniczenia dla wyższych częstotliwości wymagają zastosowania tranzystorów o wyższych parametrach lub zmiany elementów sprzęgających w celu poprawy wydajności.

## 6. Podsumowanie





## 7. Dodatek

W dodatku zostały umieszczone dwa programy w pythonie, które posłużyły do narysowania wykresu amplitudy napięcia wejściowego w zależności od częstotliwości sygnału.

### Filtr górnoprzepustowy

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

# Definicja funkcji do dopasowania
def fit_function(f, Tmax, R):
    C = 10**(-7)
    return Tmax / (np.sqrt(1 + (1 / (2 * np.pi * f * R * C))**2))

# Dane
x_data = np.array([10, 20, 50, 100, 200, 500, 1000, 2000, 5000])
y_data = np.array([208, 384, 704, 888, 952, 968, 976, 984, 976])

# Dopasowanie krzywej do danych
popt, pcov = curve_fit(fit_function, x_data, y_data, p0=[1000, 1000])

# Parametry dopasowane
Tmax_opt, R_opt = popo
fit_errors = np.sqrt(np.diag(pcov))

# Wygenerowanie danych do wykresu
x_fit = np.logspace(1, 4, 500)
y_fit = fit_function(x_fit, Tmax_opt, R_opt)

# Wykres
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(x_data, y_data, 'o', color="blue")
plt.plot(x_fit, y_fit, '-', color="red")
plt.xscale('log')
plt.grid(True)
plt.show()

# Wyniki dopasowania
Tmax_opt, R_opt, fit_errors
```

### Filtr dolnoprzepustowy

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

# Definicja funkcji do dopasowania
def fit_function(f, Tmax, R):
    C = 10**(-7)
    return Tmax / (np.sqrt(1 + (2 * np.pi * f * R * C)**2))
```

```

# Dane
x_data = np.array([10000, 20000, 50000, 100000, 200000, 500000, 1000000])
y_data = np.array([976, 968, 928, 792, 560, 264, 138])

# Dopasowanie krzywej do danych
popt, pcov = curve_fit(fit_function, x_data, y_data, p0=[1000, 1000])

# Parametry dopasowane
Tmax_opt, R_opt = pop
fit_errors = np.sqrt(np.diag(pcov))

# Wygenerowanie danych do wykresu
x_fit = np.logspace(4, 6, 500)
y_fit = fit_function(x_fit, Tmax_opt, R_opt)

# Wykres
plt.figure(figsize=(8, 6))
plt.plot(x_data, y_data, 'o', color="blue")
plt.plot(x_fit, y_fit, '-', color="red")
plt.xscale('log')
plt.grid(True)
plt.show()

# Wyniki dopasowania
Tmax_opt , R_opt , fit_errors

```

# Bibliografia