

Układy oparte o wzmacniacze operacyjne			
Julita Wójcik Jakub Szczypek	13 IV 2022	Środa, 08.00	5A

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia było zapoznanie się z układami liniowymi i nieliniowymi wzmacniaczy opartymi o wzmacniacze operacyjne poprzez dokonanie pomiaru charakterystyk amplitudowych oraz charakterystyk przejściowych.

2. Przebieg ćwiczenia

2.1. Przygotowanie stanowiska do zajęć

Skomplementowano odpowiedni zestaw laboratoryjny. Ustawiono zasilacze w tryb „Series” w celu połączenia szeregowo kanałów. Na obydwóch kanałach ustawiono napięcie na 10 V oraz ograniczenie prądowe na 0.04 A.

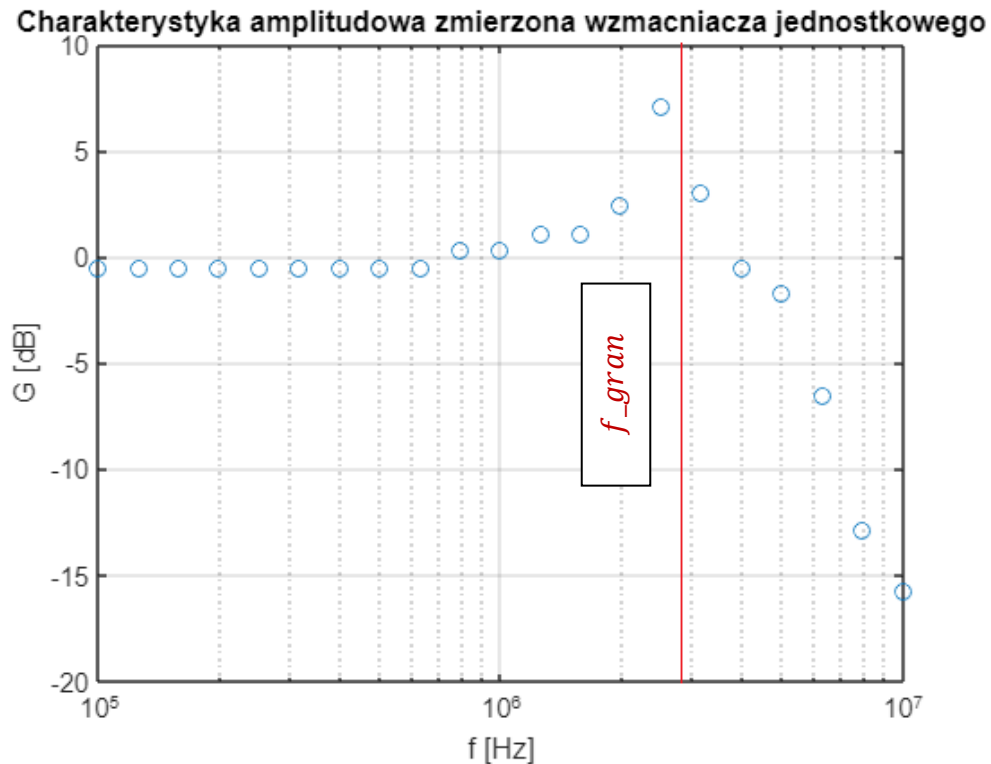
2.2. Wzmacniacz o wzmacnieniu jednostkowym

Zmontowano układ wzmacniacza o wzmacnieniu jednostkowym. Ustawiono na generatorze funkcyjnym sygnał sinusoidalny o napięciu V_{pp} równym 1, częstotliwość sygnału f równą na 100 kHz, offset na 0V. Dokonano pomiaru amplitud sygnału wejściowego i wyjściowego dla różnych częstotliwości sygnału, zmieniając je od 100 kHz do 10 MHz. Wartości amplitud, wraz obliczonym wzmacnieniem G wyznaczonym w V/V od dB zamieszczono w Tabeli 1.

Tabela 1. – Zmierzone wartości amplitud i obliczone wartości wzmacnienia G dla wzmacniacza jednostkowego

f (Hz)	100	126	158	199	251	316	398	501	631	794	1
Vpp wejścia [V]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Vpp wyjścia [V]	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1,1	1,1
G[V/V]	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	0,943	1,038	1,038
G[dB]	-0,506	-0,506	-0,506	-0,506	-0,506	-0,506	-0,506	-0,506	-0,506	0,322	0,322
f (Hz)	1,26	1,58	1,99	2,51	3,16	3,98	5,01	6,31	7,94	10	
Vpp wejścia [V]	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	
Vpp wyjścia [V]	1,2	1,2	1,4	2,4	1,5	1	0,87	0,5	0,24	0,172	
G[V/V]	1,132	1,132	1,321	2,264	1,415	0,943	0,821	0,472	0,226	0,162	
G[dB]	1,078	1,078	2,416	7,098	3,016	-0,506	-1,716	-6,527	-12,902	-15,796	

Wykreślono charakterystykę amplitudową na podstawie powyższych pomiarów. Zaznaczono częstotliwość graniczną – spadek o 3 dB. Charakterystykę przedstawiono na Wykresie 1.



Wykres 1. – Charakterystyka amplitudowa zmierzona wzmacniacza jednostkowego

2.3. Wzmacniacz nieodwracający fazę

Zmontowano układ wzmacniacza nieodwracającego fazy. Obliczono wartości rezystorów R_a i R_b tak aby wzmocnienie wzmacniacza wyniosło 3.13 V/V. Wybrano:

$$R_a = R_{35} = 1000 \quad R_b = R_{34} = 2200$$

Do obliczeń posłużono się wzorem $K = \frac{R_a + R_b}{R_b} = \frac{1000 + 2200}{1000} = 3.2$

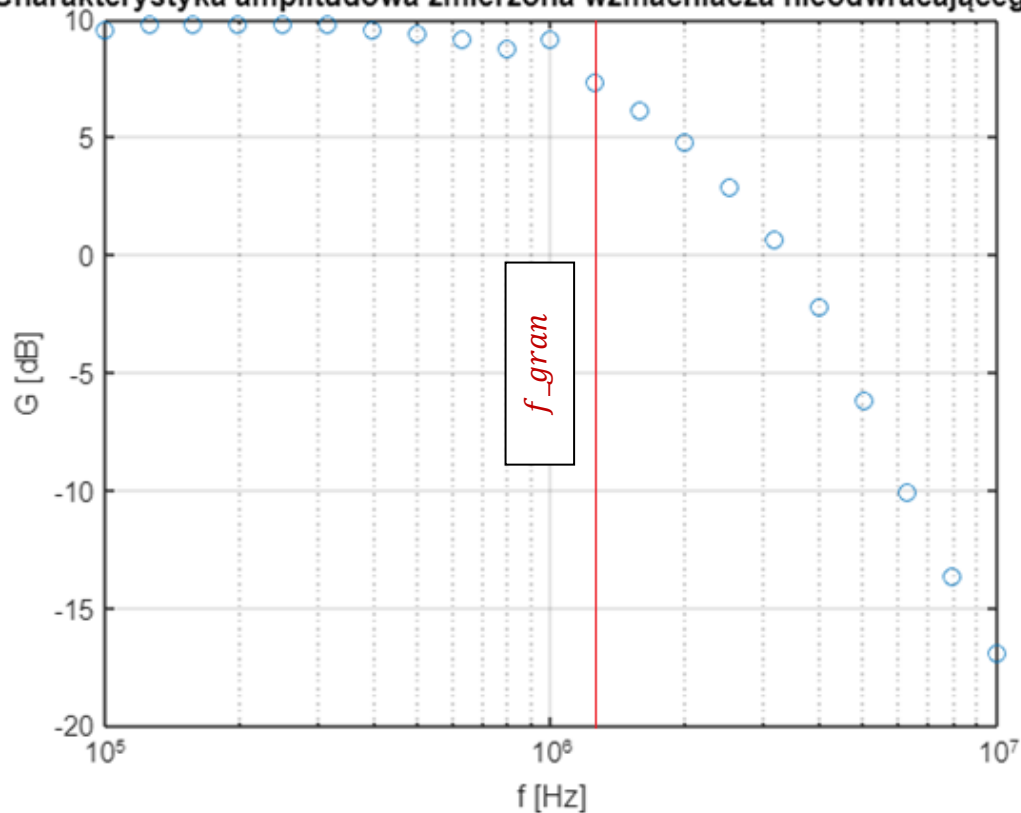
Dokonano pomiaru amplitud sygnału wejściowego i wyjściowego oraz pomiaru fazy dla różnych częstotliwości sygnału, zmieniając je od 100 kHz do 10 MHz. Wartości amplitud, fazy wraz obliczonym wzmocnieniem G wyznaczonym w V/V od dB zamieszczono w Tabeli 2.

Tabela 2. – Zmierzone wartości amplitud, przesunięcia fazowego i obliczone wartości wzmacnienia G dla wzmacniacza nieodwracającego fazę

f [kHz]	100	126	158	199	251	316	398	501	631	794	1000
Vpp wejścia	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06
Vpp wyjścia	3,2	3,28	3,28	3,28	3,28	3,28	3,2	3,12	3,04	2,92	2,72
Przesunięcie fazowe [deg]	7	7	9	11	16	18	22	30	38	45	57
G[V/V]	3,019	3,094	3,094	3,094	3,094	3,094	3,019	2,943	2,868	2,755	2,566
G[dB]	9,597	9,811	9,811	9,811	9,811	9,811	9,597	9,377	9,151	8,802	8,185
f [kHz]	1260	1580	1990	2510	3160	3980	5010	6310	7940	10000	
Vpp wejścia	1,06	1,06	1,06	1,06	1,04	1,06	1,06	1,06	1,06	1,06	
Vpp wyjścia	2,48	2,16	1,84	1,48	1,12	0,82	0,52	0,332	0,22	0,152	
Przesunięcie fazowe [deg]	70	87	106	124	153	183	204	224	-244	261	
G[V/V]	2,34	2,038	1,736	1,396	1,077	0,774	0,491	0,313	0,208	0,143	
G[dB]	7,383	6,183	4,79	2,899	0,644	-2,23	-6,186	-10,083	-13,658	-16,869	

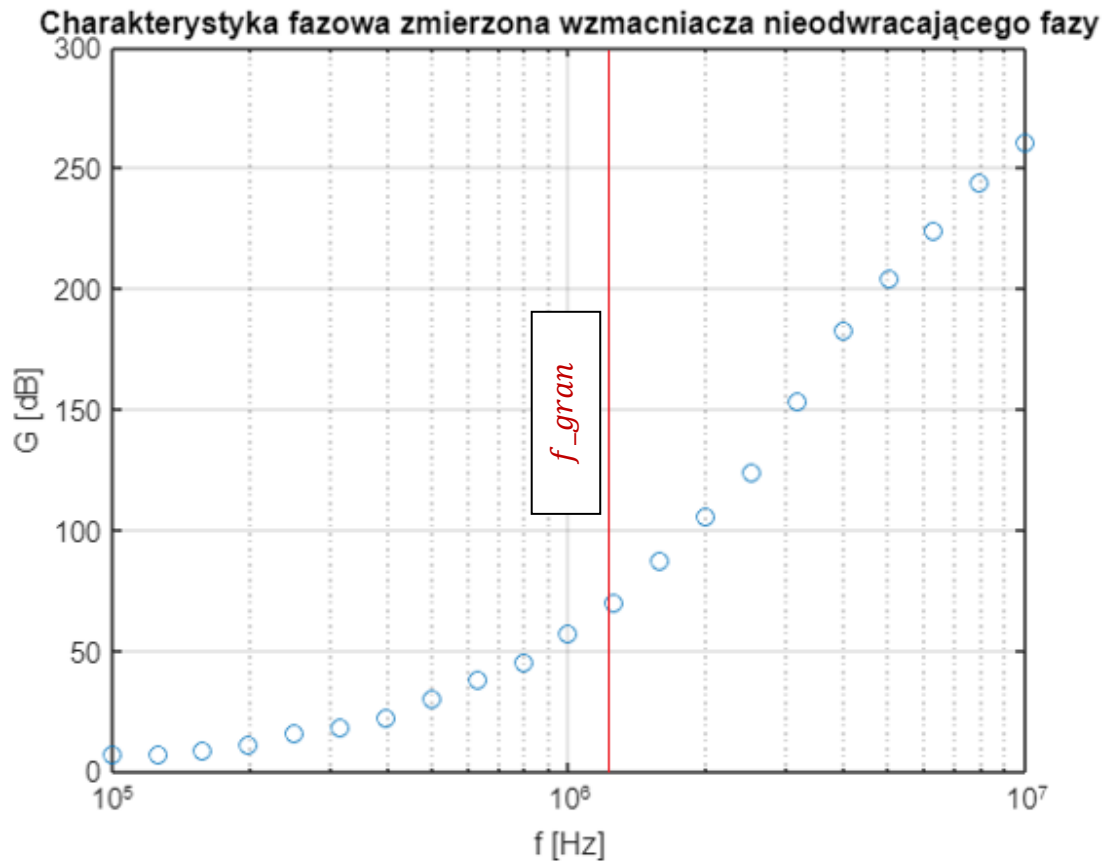
Wykreślono charakterystykę amplitudową na podstawie powyższych pomiarów. Zaznaczono częstotliwość graniczną – spadek o 3 dB. Charakterystykę przedstawiono na Wykresie 2.

Charakterystyka amplitudowa zmierzona wzmacniacza nieodwracającego fazy



Wykres 2 . Charakterystyka amplitudowa zmierzona wzmacniacza nieodwracającego fazy.

Wykreślono charakterystykę fazową. Zaznaczono częstotliwość graniczną. Charakterystykę fazową przedstawiono na Wykresie 3.



Wykres 3 . Charakterystyka fazowa zmierzona wzmacniacza nieodwracającego fazy.

2.4. Wzmacniacz odwracający fazę

Zmontowano układ wzmacniacza odwracającego fazę. Obliczono wartości rezystorów R_a i R_b tak aby wzmocnienie wzmacniacza wyniosło -2.12 V/V. Wybrano:

$$R_a = R_{35} = 1000 \quad R_b = R_{34} = 2200$$

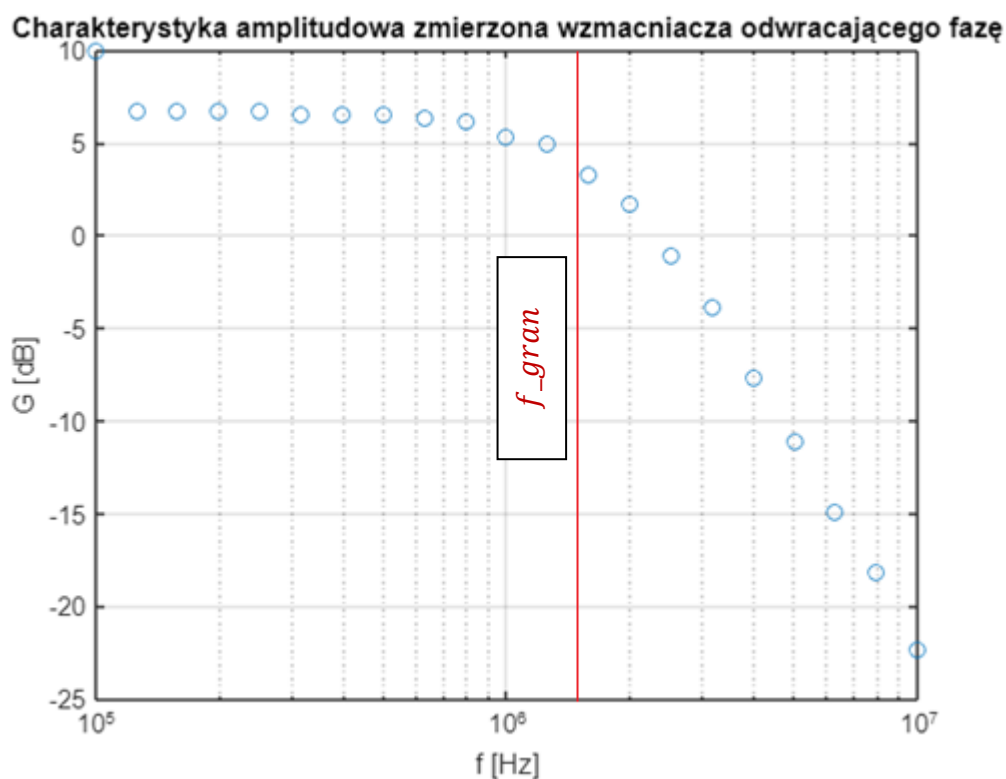
Do obliczeń posłużono się wzorem $K = -\frac{R_a}{R_b} = -\frac{2200}{1000} = -2.2$

Dokonano pomiaru amplitud sygnału wejściowego i wyjściowego oraz pomiaru fazy dla różnych częstotliwości sygnału, zmieniając je od 100 kHz do 10 MHz. Wartości amplitud, fazy wraz obliczonym wzmocnieniem G wyznaczonym w V/V od dB zamieszczono w Tabeli 3.

Tabela 3. – Zmierzone wartości amplitud, przesunięcia fazowego i obliczone wartości wzmocnienia G dla wzmacniacza odwracającego fazy

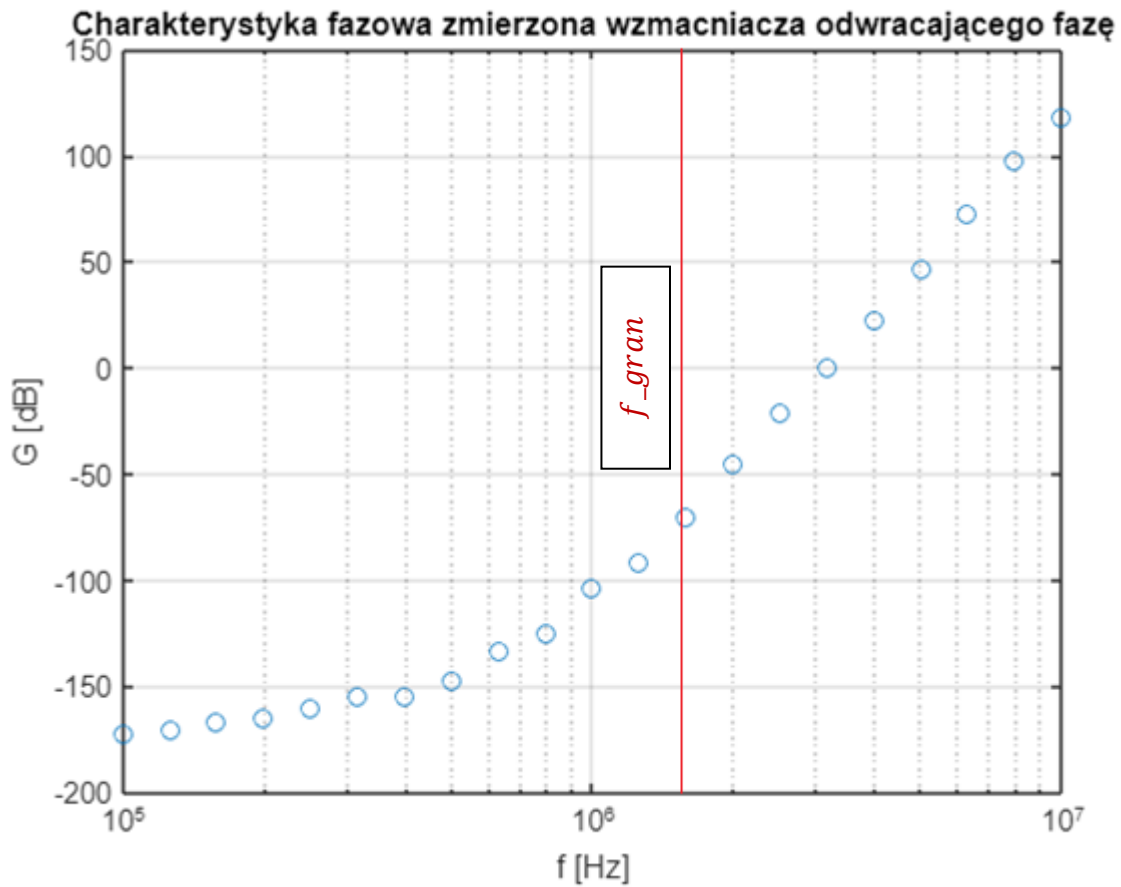
f [kHz]	100	126	158	199	251	316	398	501	631	794	1000
Vpp wejścia	1	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,02	1,06
Vpp wyjścia	2,8	2,2	2,2	2,2	2,2	2,16	2,16	2,16	2,12	2,08	1,95
Przesunięcie fazowe [deg]	-172	-170	-167	-165	-160	-155	-155	-147	-133	-125	-104
G[V/V]	2,8	2,157	2,157	2,157	2,157	2,118	2,118	2,118	2,078	2,039	1,84
G[dB]	8,943	6,676	6,676	6,676	6,676	6,517	6,517	6,517	6,355	6,189	5,295
f [kHz]	1260	1580	1990	2510	3160	3980	5010	6310	7940	10000	
Vpp wejścia	1,02	1,04	1,02	1,02	1	1	0,98	0,96	0,94	0,94	
Vpp wyjścia	1,8	1,52	1,24	0,9	0,64	0,416	0,272	0,172	0,116	0,072	
Przesunięcie fazowe [deg]	-92	-70	-45	-21	0	23	47	73	-98	118	
G[V/V]	1,765	1,462	1,216	0,882	0,64	0,416	0,2776	0,1792	0,1234	0,0766	
G[dB]	4,933	3,296	1,696	-1,087	-3,876	-7,618	-11,133	-14,935	-18,173	-22,316	

Wykreślono charakterystykę amplitudową na podstawie powyższych pomiarów. Zaznaczono częstotliwość graniczną – spadek o 3 dB. Charakterystykę przedstawiono na Wykresie 4.



Wykres 4 . Charakterystyka amplitudowa zmierzona wzmacniacza odwracającego fazę.

Wykreślono charakterystykę fazową. Zaznaczono częstotliwość graniczną. Charakterystykę przedstawiono na Wykresie 5.



Wykres 5. Charakterystyka fazowa zmierzona wzmacniacza nieodwracającego fazę.

2.5. Charakterystyka przejściowa wzmacniacza odwracającego fazę o wzmocnieniu -2.2

Dokonano pomiaru charakterystyki przejściowej wzmacniacza odwracającego fazę. Zmieniając napięcie stałe w zakresie od -6V do 6V z krokiem co 0.5 V, odczytywano V_{pp} wejścia od V_{pp} wyjścia. Dane zestawiono w Tabeli 4

Tabela 4. Zmierzone wartości amplitud przy zmianie natężenia dla wzmacniacza odwracającego fazę.

I [A]	-6	-5,5	-5	-4,5	4	-3,5	-3	-2,5	-2	-1,5	-1	-0,5
V _{pp} wejścia	-5,77	-5,17	-4,78	-4,31	-3,75	-3,22	-2,03	-2,33	-1,84	-1,41	-0,933	-0,478
V _{pp} wyjścia	8,2	8,21	7,79	8,64	2	7,16	6,07	-5,05	4,02	3,05	2	1,06
I [A]	0,5	1	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	5,5	6
V _{pp} wejścia	0,48	0,933	1,36	1,88	2,32	2,84	3,22	3,75	4,23	4,73	5,47	5,74
V _{pp} wyjścia	-1,06	-2	-3,05	-4,06	-5,04	-6,07	-6,92	-7,82	-7,84	-8,62	-7,73	-7,71

Wykreślono charakterystykę przejściową na podstawie powyższych pomiarów. Charakterystykę przedstawiono na Wykresie 6.



Wykres 6. Charakterystyka przejściowa wzmacniacza odwracającego fazę o wzmacnieniu 2.2

Z charakterystyki możliwe jest oszacowanie wzmacnienia – jest to iloraz napięcia wyjściowego i wejściowego. Charakterystyka przejściowa analogicznego wzmacniacza, ale o wzmacnieniu 2.2 była rosnącą prostą -o takim samym nachyleniu, ale ze znakiem minus.

Po przekroczeniu zakresu liniowości wzmacniacz operacyjny przechodzi do stanu nasycenia. Napięcie wyjściowe wzmacniacza powinno być równe zero przy zerowej różnicy napięć wejściowych ($U_{WE}=0$). W rzeczywistości występuje w tej sytuacji pewne napięcie, nazywane wyjściowym napięciem niezrównoważenia.

2.6. Układ super diody

Zamontowano układ super diody z wykorzystaniem rezystorów danych dla stanowiska nr 3 –

$$R_a = 10\text{ k}\Omega \quad R_b = 4.7\text{ k}\Omega \quad R_c = 10\text{ k}\Omega$$

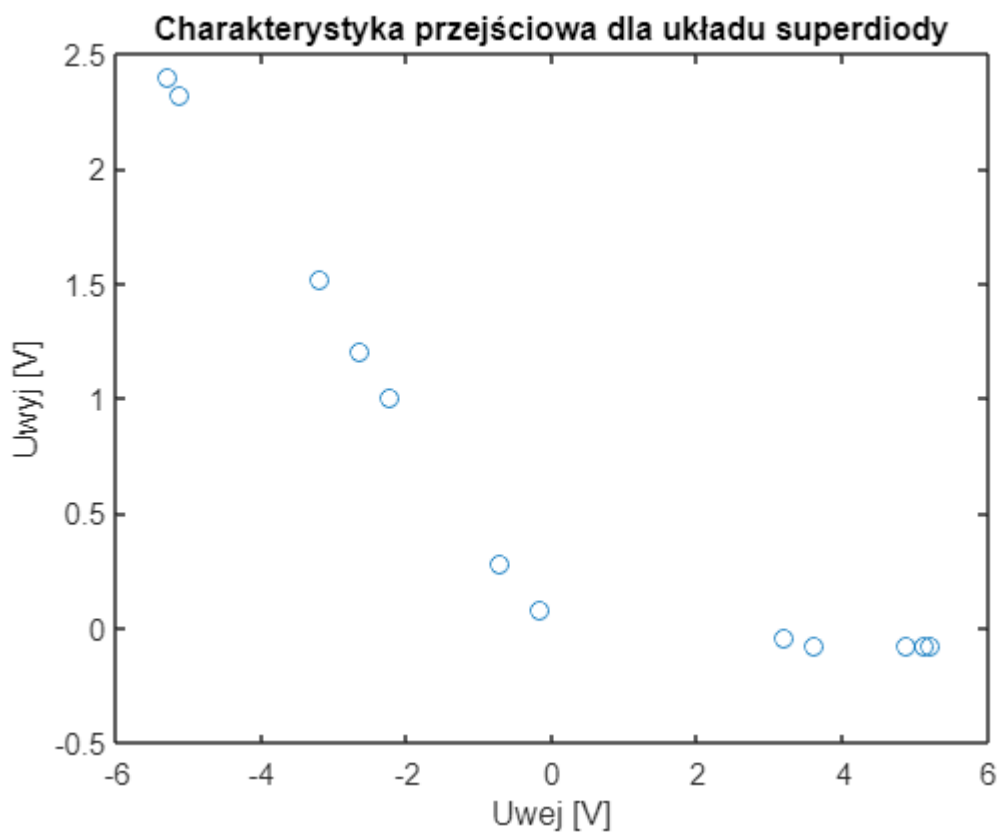
Teoretyczne wzmocnienie dla ujemnych wartości napięcia policzono ze wzoru

$$k = -\frac{R_b}{R_a} = -0.47$$

Dokonano pomiaru charakterystyki przejściowej wzmacniacza odwracającego fazę, zadając na wejście napięcie stałe o wartości od -6V do 6V. Reprezentatywne punkty pomiarowe zamieszczono w Tabeli 5. Charakterystykę przedstawiono na Wykresie 6.

Tabela 5. Reprezentatywne punkty pomiarowe

Uwej	-3,2	3,2	5,12	-0,16	-5,12	-2,64	3,6	4,88	-0,728	-5,28	-2,24	5,2
Uwyj	1,52	-0,04	--0,08	0,08	2,32	1,2	-0,08	-0,08	0,28	2,4	1,00	-0,08



Wzmocnienie obliczone na podstawie wybranych punktów pomiarowych:

$$\begin{aligned} U_{wej} = -3,2, U_{wyj} = 1,52 &\rightarrow k = 0,48 \\ U_{wej} = -2,64, U_{wyj} = 1,2 &\rightarrow k = 0,46 \end{aligned}$$

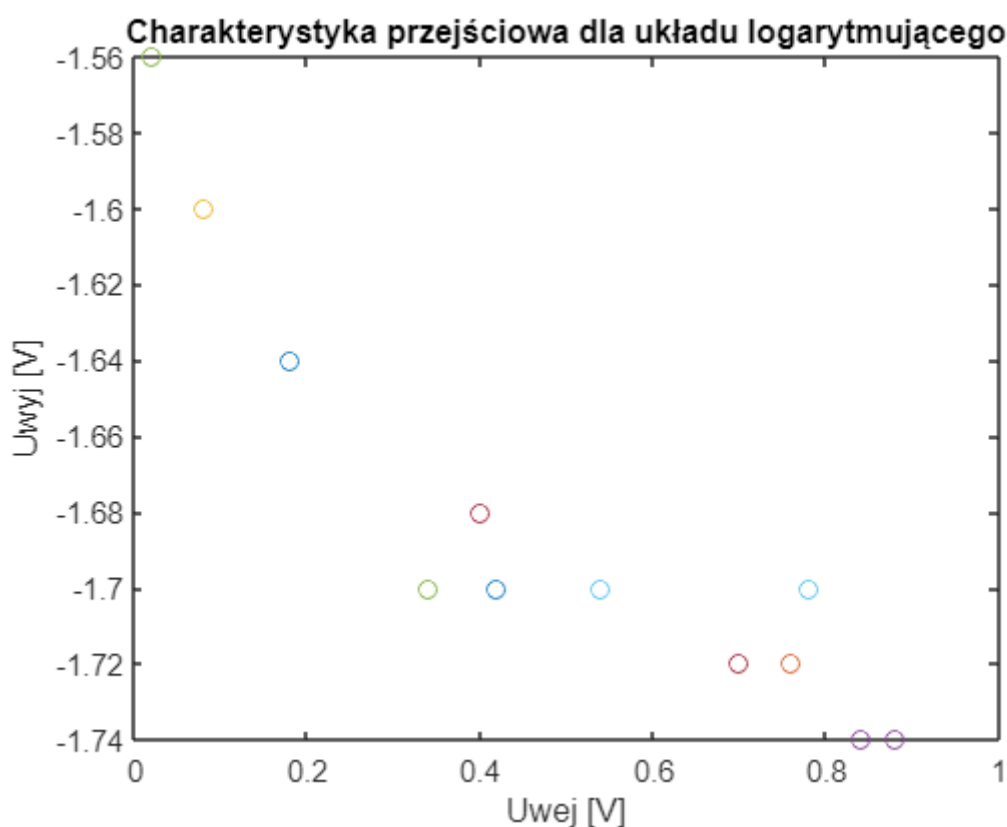
Obliczone wzmocnienie jest zbliżone do wartości teoretycznej.

2.7. Układ logarytmujący

Zmontowano układ logarytmujący – przyjęto wartości rezystorów $R_a = 10k\Omega$ i $R_b = 10k\Omega$.
Dokonano pomiaru charakterystyki przejściowej dla nieujemnych wartości napięcia wejściowego.
Reprezentatywne punkty pomiarowe zamieszczono w Tabeli 6. Charakterystykę przedstawiono na Wykresie 7.

Tabela 6. Reprezentatywne punkty pomiarowe

Uwej	0,84	0,02	0,78	0,4	0,42	0,76	0,08	0,88	0,34	0,54	0,7	0,18
Uwyj	-1,74	-1,56	-1,7	-1,687	-1,7	-1,72	-1,6	-1,74	-1,70	-1,7	-1,72	-1,76



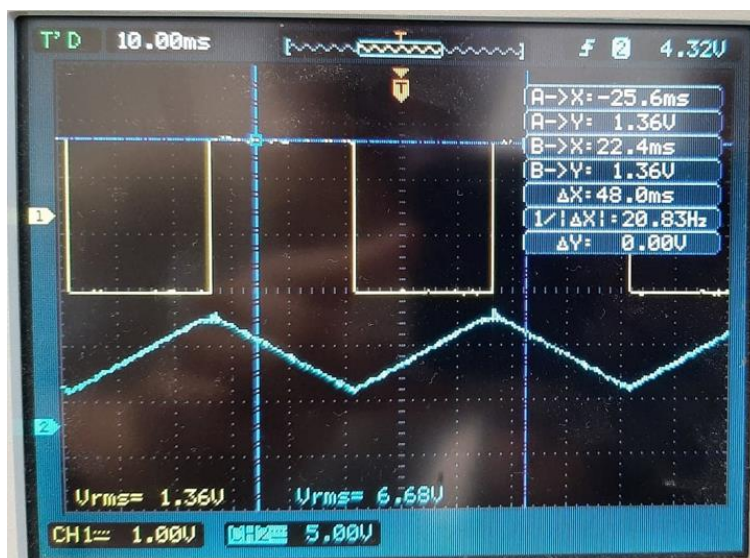
Wykres 7. Charakterystyka przejściowa układu logarytmującego

„Kształt” charakterystyk jest zgodny z charakterystyką zamieszczoną w skrypcie dr inż. Mariusza Pauluka, umieszczonego na Upelu.

Wadą układów logarytmujących jest silna zależność napięcia wyjściowego od temperatury, co znacznie ogranicza możliwość stosowania go.

2.8. Układ całkujący

Zestawiono układ całkujący. Dobrano parametry $R_a = 4,7k\Omega$ $R_b = 10k\Omega$ $C = 1\mu F$
Na wejście układu podano sygnał prostokątny o amplitudzie 1V i częstotliwości 20 Hz.
Zaobserwowano wyświetlenia oscyloskopu, które przedstawiono na Rysunku 1.



Rysunek 1. Zdjęcie sygnałów wejściowego i wyjściowego z oscyloskopu

Idealny układ całkujący odpowiada na sygnał wejściowy $u(t)$ sygnałem $y(t)$ według zależności $y(t) = \int_{-\infty}^t u(\tau) d\tau$. Odpowiedzią idealnego układu całkującego na wartość stałą jest funkcja liniowo zmienna, co można zaobserwować na powyższym przebiegu. Jeśli podamy na wejście integratora stale zmieniający się sygnał wejściowy, taki jak fala prostokątna, wówczas kondensator będzie ładować i rozładowywać się w odpowiedzi na zmiany sygnału wejściowego. Powoduje to, że sygnał wyjściowy ma kształt trójkątny, na którego kształt ma wpływ stała czasowa RC.

2.9. Porównanie charakterystyk amplitudowych pasywnego i aktywnego filtra II rzędu

Zmontowano aktywny filtr pasmowoprzepustowy. Wartości rezystorów i kondensatorów dobrano tak samo, jak podczas wykonywania ćwiczenia Filtry pasywne II rzędu. Podczas ćwiczenia laboratoryjnego korzystano z płytki nr 3

$$R_{zad1} = 3k\Omega \quad C_{zad1} = 10 nF$$

$$R_{zad2} = 8k\Omega \quad C_{zad2} = 1 nF$$

$$R_{zmierz1} = 2,8 k\Omega \quad C_{zmierz1} = 10,43 nF$$

$$R_{zmierz2} = 8,1 k\Omega \quad C_{zmierz2} = 1,05 nF$$

$$f_{gzad1} = \frac{1}{2\pi R_{zad1} C_{zad1}} = 5305,165 Hz \quad f_{gzad2} = \frac{1}{2\pi R_{zad2} C_{zad2}} = 19894,369 Hz$$

$$f_{gzmierz1} = \frac{1}{2\pi R_{zmierz1} C_{zmierz1}} = 5449,765 Hz \quad f_{gzmierz2} = \frac{1}{2\pi R_{zmierz2} C_{zmierz2}} = 18713,103 Hz$$

$$f_{makszad} = \sqrt{f_{gzad1} * f_{gzad2}} = 10273,408 Hz$$

$$f_{makszmierz} = \sqrt{f_{gzmierz1} * f_{gzmierz2}} = 10098,614 Hz$$

Dla filtra pasywnego z poprzedniego zadania:

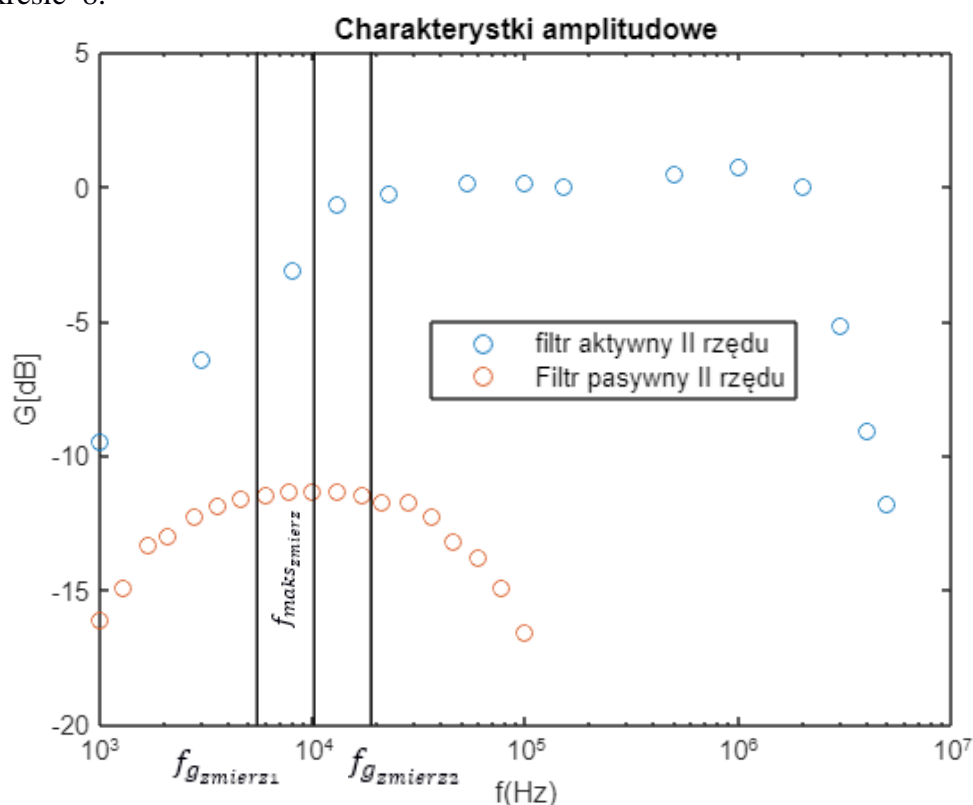
$$f_{gzmierz1} = \frac{1}{2\pi R_{zmierz1} C_{zmierz1}} = 4739,395 Hz \quad f_{gzmierz2} = \frac{1}{2\pi R_{zmierz2} C_{zmierz2}} = 18880,934 Hz$$

Dokonano pomiaru amplitud sygnału wejściowego i wyjściowego oraz pomiaru fazy dla różnych częstotliwości sygnału. Niestety, w trakcie zajęć zdecydowano na rozszerzenie zakresu częstotliwości – pasmo pojawiało się powyżej 100 kHz. Pomiary przedstawiono w Tabeli 7.

Tabela 7. Zmierzone wartości aktywnego filtra pasmowoprzepustowego

f [kHz]	3	13	23	53	100	150
V pp wejścia [V]	2,840	2,800	2,800	2,800	2,800	2,840
V pp wyjścia [V]	1,360	2,600	2,720	2,840	2,840	2,840
stosunek [V/V]	0,479	0,929	0,971	1,014	1,014	1,000
wzmocnienie [dB]	-6,396	-0,644	-0,252	0,123	0,123	0,000
przes. fazowe [deg]	58	22	13	7	3	0
f [kHz]	500	1000	2000	3000	4000	5000
V pp wejścia [V]	2,800	2,840	2,800	2,760	2,720	2,640
V pp wyjścia [V]	2,960	3,080	2,800	1,520	0,960	0,680
stosunek [V/V]	1,057	1,085	1,000	0,551	0,353	0,258
wzmocnienie [dB]	0,483	0,705	0,000	-5,181	-9,046	-11,782
przes. fazowe [deg]	-7	-25	-160	-225	-245	-260

Porównanie charakterystyk filtra pasywnego i aktywnego II rzędu przedstawiono na Wykresie 8.

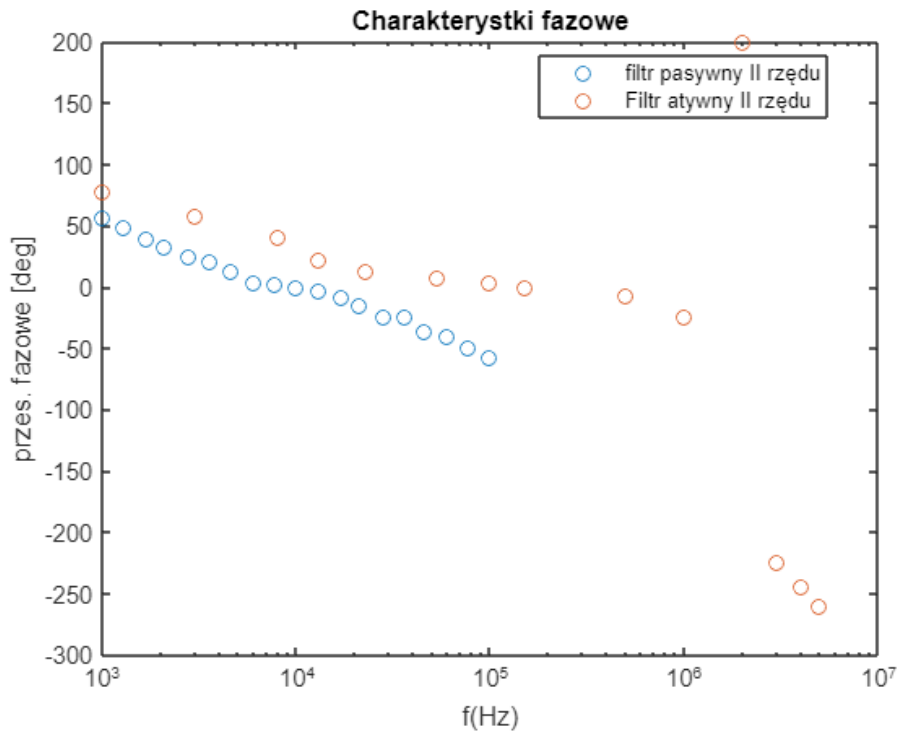


Wykres 8. Porównanie charakterystyk amplitudowych filtra aktywnego i pasywnego II rzędu

Charakterystyki zachowując odpowiedni 'kształt', ale różnią się wartościami wzmocnienia – powodem różnicy może być błąd w obwodzie – nieprawidłowy dobór rezystorów na płycie

Laboratoryjnej. Częstotliwości graniczne rachunkowo wyliczone dla filtru aktywnego są bliskie tym dla filtru pasywnego, ale nie pasują do widocznego przebiegu. 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

Porównano charakterystykę fazową zmierzoną dla aktywnego i pasywnego filtra pasmowoprzepustowego. Charakterystyki przedstawiono na Wykresie 9.



Wykres 9. Porównanie charakterystyk fazowych filtru aktywnego i pasywnego II rzędu

Ponownie charakterystyki wykazują zbliżony kształt, ale ich wartości są różne – prawdopodobnie wynikają z błędnego obwodu dla filtru aktywnego II rzędu

3. Wnioski

Ćwiczenie pozwoliło gruntownie zapoznać się z budową, charakterystykami i właściwościami układów opartych o wzmacniacze operacyjne. Utrwalono poprawne łączenie układów na płycie laboratoryjnej oraz zapoznano się z nowymi funkcjami oscyloskopu, jak importowanie danych. Ogólny przebieg charakterystyk (kształt, monotoniczność) spełniła oczekiwania. W układzie superdiody potwierdzeniem poprawności zadania było wyliczenie wzmocnienia. Najmniej dokładnie udało się wyrysować charakterystykę amplitudową filtru aktywnego II rzędu – z powodu błędu ludzkiego przy montowaniu obwodu.