

Wydział	Imię i nazwisko		Rok	Grupa	Zespół
WFiIS	1. Michał Rogowski 2. Ihnatsi Yermakovich		II	10	02
PRACOWNIA ELEKTRONICZNA WFiIS AGH	Temat				Nr ćwiczenia
	Wzmacniacze operacyjne				03
Data wykonania	Data oddania	Zwrot do poprawy	Data oddania	Data zaliczenia	OCENA
7.04.2022	21.04.2022				

Wzmacniacze operacyjne

Ćwiczenie nr 03

Michał Rogowski

Ihnatsi Yermakovich

1	Cel ćwiczenia	2
2	Przebieg ćwiczenia	2
2.1	Badanie wtórnika napięciowego	2
2.1.1	Wyznaczenie charakterystyki przenoszenia $U_2 = f(U_1)$ dla napięć stałych	2
2.1.2	Pomiar czasu narastania sygnału na wyjściu wzmacniacza	4
2.1.3	Pomiar szybkości zmian napięcia na wyjściu wzmacniacza	5
2.1.4	Wyznaczenie charakterystyki amplitudowej $K_u=f(f)$	5
2.2	Wzmacniacz o wzmacnieniu 11V/V	6
2.3	Wzmacniacz o wzmacnieniu -10V/V	8
2.4	Wzmacniacz odejmujący o wzmacnieniu 10 V/V	10
2.5	Wzmacniacz sumujący o wzmacnieniach -10 V/V (U_2) i -2 V/V (U_1)	11

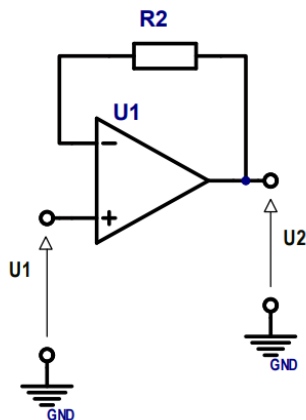
1 Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia było zbadanie parametrów wzmacniacza operacyjnego pracującego w różnych konfiguracjach układowych oraz wyznaczenie amplitudowych charakterystyk częstotliwościowych oraz stałoprądowe funkcję przenoszenia.

2 Przebieg ćwiczenia

W każdej konfiguracji układ był zasilany napięciem symetrycznym $\pm 15V$.

2.1 Badanie wtórnika napięciowego



Rysunek 1: Schemat wtórnika napięciowego

Układ skonfigurowaliśmy jako wtórnik napięciowy tak jak na powyższym schemacie (rys. 1). Do obwodu jego sprzężenia zwrotnego podłączaliśmy rezystor R_2 o rezystancji $10k\Omega$. Sygnał wejściowy $U_1 = 15V$ z generatora podaliśmy bezpośrednio na wejście nieodwracające.

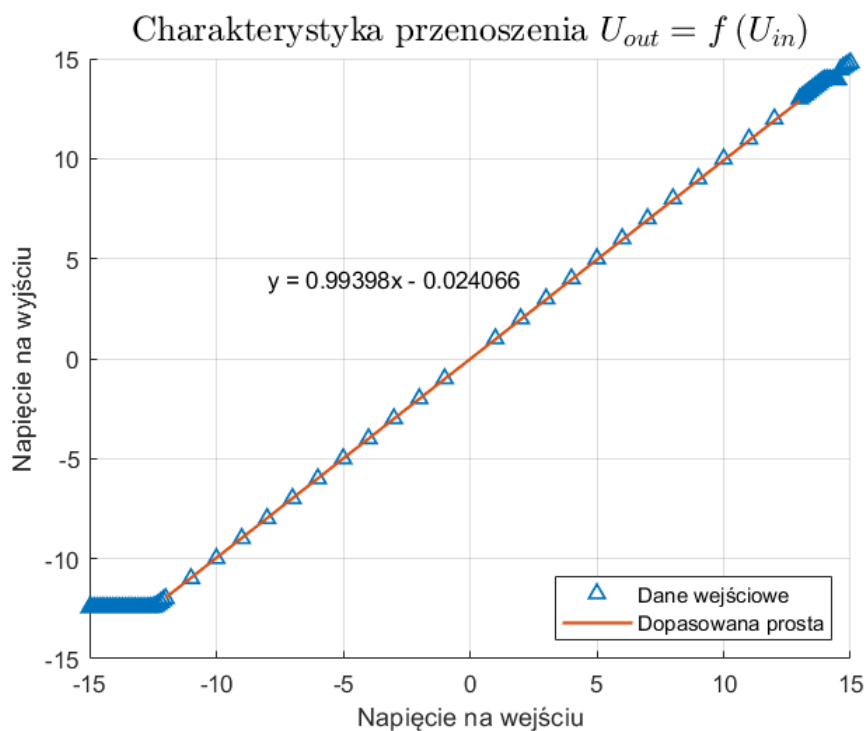
Dla tego układu mieliśmy zrealizować następujące zadania:

2.1.1 Wyznaczenie charakterystyki przenoszenia $U_2 = f(U_1)$ dla napięć stałych

Pomiarów dokonaliśmy zmieniając napięcie wejściowe od $-15V$ do $15V$ z krokiem $1V$ oraz w punktach gdzie wzmacniacz może wejść w obszar nasycenia, czyli od $-15V$ do $-12V$ oraz od $12V$ do $15V$ z krokiem $0.1V$. Wyniki znajdują się w poniższej tabeli.

Tabela 1: Charakterystyka przenoszenia $U_{out} = f(U_{in})$

$V_{wej\text{sc}}$ [V]	$V_{wyj\text{sc}}$ [V]	$V_{wej\text{sc}}$ [V]	$V_{wyj\text{sc}}$ [V]	$V_{wej\text{sc}}$ [V]	$V_{wyj\text{sc}}$ [V]
-15,0	-12,4460	-12,5	-12,4270	9,0	9,0015
-14,9	-12,4460	-12,4	-12,3790	10,0	9,9918
-14,8	-12,4460	-12,3	-12,2890	11,0	10,9912
-14,7	-12,4460	-12,2	-12,1900	12,0	11,9915
-14,6	-12,4460	-12,1	-12,0890	13,0	12,9920
-14,5	-12,4460	-12,0	-11,9900	13,1	13,0920
-14,4	-12,4460	-11,0	-10,9897	13,2	13,1920
-14,3	-12,4460	-10,0	-9,9895	13,3	13,2920
-14,2	-12,4460	-9,0	-8,9889	13,4	13,3920
-14,1	-12,4460	-8,0	-7,9883	13,5	13,4920
-14,0	-12,4460	-7,0	-6,9878	13,6	13,5910
-13,9	-12,4460	-6,0	-5,9977	13,7	13,6910
-13,8	-12,4460	-5,0	-4,9976	13,8	13,7910
-13,7	-12,4460	-4,0	-3,9973	13,9	13,8920
-13,6	-12,4460	-3,0	-2,9977	14,0	13,9430
-13,5	-12,4460	-2,0	-1,9972	14,1	13,9430
-13,4	-12,4460	-1,0	-0,9974	14,2	13,9430
-13,3	-12,4460	1,0	0,9974	14,3	13,9430
-13,2	-12,4460	2,0	1,9997	14,4	13,9420
-13,1	-12,4460	3,0	2,9999	14,5	13,9540
-13,0	-12,4460	4,0	4,0007	14,6	14,4420
-12,9	-12,4460	5,0	5,0010	14,7	14,5500
-12,8	-12,4460	6,0	6,0015	14,8	14,6330
-12,7	-12,4460	7,0	7,0008	14,9	14,7120
-12,6	-12,4420	8,0	8,0010	15,0	14,7900



Rysunek 2: Wyznaczenie charakterystyki przenoszenia na podstawie dopasowanej prostej

Współczynniki dopasowania prostej z powyższego wykresu są wyznaczone ze skutecznością 95%.

Zauważmy, że przy krańcowych wartościach napięcia wejściowego wzmacniacz wchodzi w stan nasycenia, dla pozostałych wartości widzimy, że $\Delta y / \Delta x > 0$. Z równania dopasowanej krzywej wyznaczmy charakterystykę przenoszenia:

$$U_{out} = 0,99398 \cdot U_{in} - 0,024066 \quad (1)$$

Widzimy, że wzmocnienie stałoprądowe wynosi 0,99398 [V/V], co jest blisko 1 [V/V] ($\Delta k = 0,6\%$), co z kolei jest zgodne z oczekiwaniami, bo dla wzmacniacza idealnego pracującego w konfiguracji wtórnika napięciowego wzmocnienie stałoprądowe wynosi 1 [V/V]. Napięcie niezrównoważenia (offset), czyli wartość napięcia U_{in} , dla której U_{out} wynosi 0 obliczymy następująco:

$$U_{in} = \frac{0,024066}{0,99398} \approx 0,0242 \text{ (V)} = 24,2 \text{ (mV)} \quad (2)$$

Bez względu na to, że powyższy wynik jest rzędu kilkunastu miliwoltów, nie wygląda on zbyt wiarygodnie, ponieważ oczekiwana wartość napięcia niezrównoważenia wynosi pomiędzy 2 a 10 miliwoltów.

2.1.2 Pomiar czasu narastania sygnału na wyjściu wzmacniacza

Dokonałiśmy pomiaru czasu narastania na wyjściu (U_2) wzmacniacza podając sygnał U_1 na wejściu o częstotliwości 10kHz, amplitudzie 100mV i o prostokątnym przebiegu.

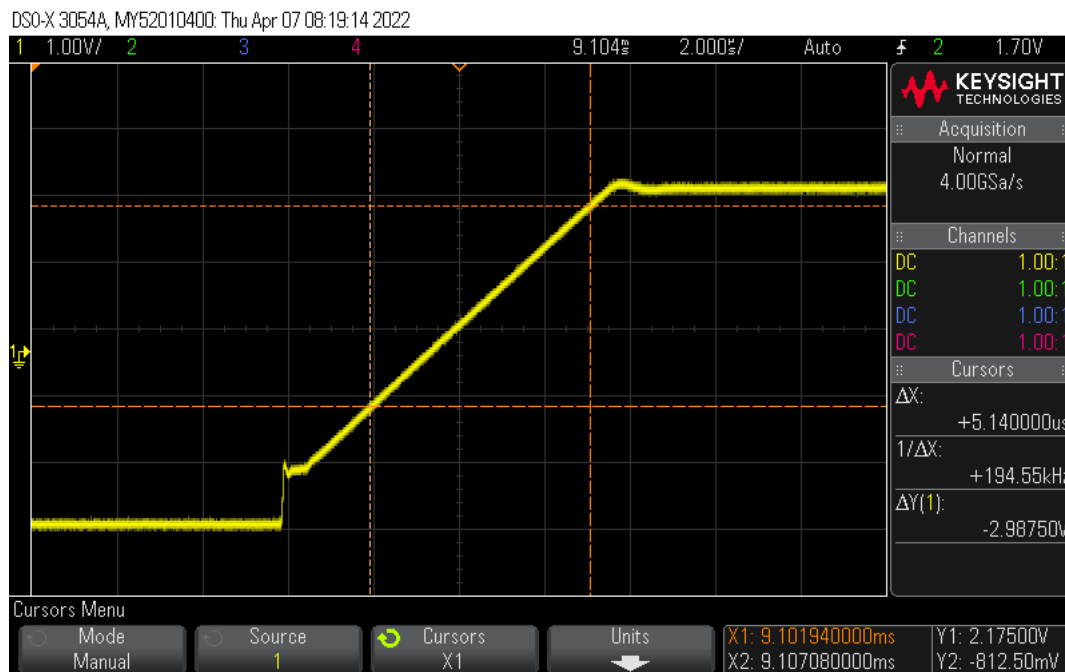


Rysunek 3: Odpowiedź wtórnika na skok napięcia o małej amplitudzie

Czas narastania odczytaliśmy z oscyloskopu (rysunek 2) wyniósł $t_r = 200$ ns. Wartość katalogowa wynosi $t_r = 250$ ns. Wartość uzyskana w doświadczeniu jest podobna do wartości teoretycznej ($\Delta t_r = 50$ ns) co potwierdza skuteczność wykonanego ćwiczenia.

2.1.3 Pomiar szybkości zmian napięcia na wyjściu wzmacniacza

Dokonałszy pomiaru szybkości zmiany napięcia (slew rate) na wyjściu wzmacniacza U_2 podając sygnał U_1 na wejściu o częstotliwości 10kHz, przebiegu prostokątnym i większej amplitudzie 5V. Wybraliśmy dwa punkty na liniowym odcinku zbocza narastającego sygnału wyjściowego i zmierziliśmy ΔV w wybranym odcinku czasu Δt korzystając z oscyloskopu.



Rysunek 4: Odpowiedź wtórnika na skok napięcia o dużej amplitudzie

Zmierzony czas $\Delta t = 5,14 \mu s$ oraz zmiana napięcia $\Delta V = 2,99 V$. Korzystając ze wzoru $SR = \Delta V / \Delta t$ obliczyliśmy maksymalną szybkość zmian napięcia $SR = 0,58 (V/\mu s)$. Teoretyczna minimalna wartość $SR = 0,3 (V/\mu s)$, a typowa wartość $SR = 0,7 (V/\mu s)$. Wartość otrzymana w ćwiczeniu znajduje się pomiędzy powyższymi wartościami, zatem jest zgodna z wartościami katalogowymi.

2.1.4 Wyznaczenie charakterystyki amplitudowej $K_u=f(f)$

Wyznaczyliśmy charakterystykę amplitudową $K_u=f(f)$ podając sygnał U_1 na wejściu o małej amplitudzie 100 mV oraz o przebiegu sinusoidalnym. Dokonałszy serii pomiarów amplitudy sygnału wyjściowego U_2 dla częstotliwości z przedziału od 100 Hz do 6 MHz. Pomiary wzmocnienia znajdują się w tabeli poniżej.

Tabela 2: Amplituda sygnału w zależności od częstotliwości

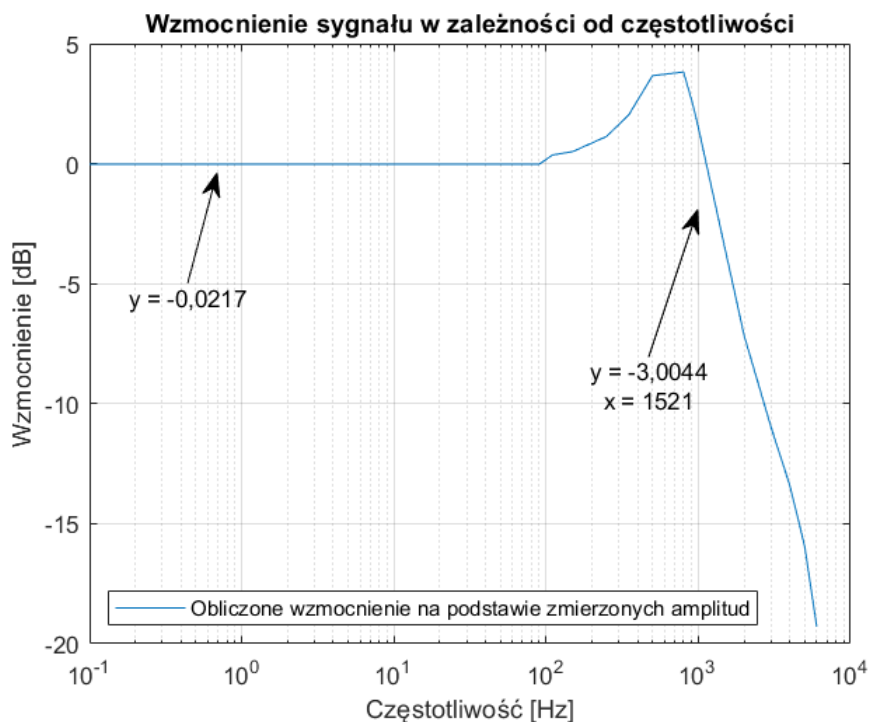
Częst. [kHz]	Amp. [mV]	Wzm. [dB]
0,1	99,75	-0,0217
0,2	99,75	-0,0217
0,3	99,75	-0,0217
90,0	99,75	-0,0217
100,0	102,00	0,1720
110,0	104,25	0,3615
150,0	106,00	0,5061
250,0	114,00	1,1381
350,0	126,50	2,0418
500,0	152,50	3,6654

Częst. [kHz]	Amp. [mV]	Wzm. [dB]
800,0	155,25	3,8206
900,0	136,25	2,6867
950,0	127,25	2,0932
1000,0	119,00	1,5109
2000,0	43,88	-7,1557
3000,0	28,30	-10,9643
4000,0	21,33	-13,4222
5000,0	15,95	-15,9448
6000,0	10,85	-19,2914

Wartość wzmocnienia obliczyliśmy ze wzoru:

$$G = 20 \cdot \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (3)$$

Teraz sporządzimy wykres zależności wzmocnienia od częstotliwości:



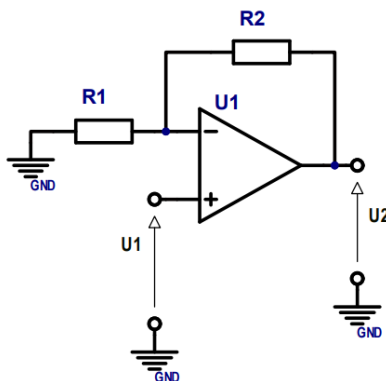
Rysunek 5: Wyznaczenie charakterystyki amplitudowej $K_u=f(f)$

Wzmocnienie dla małych częstotliwości wynosi $k = -0,021 \text{ (dB)} = 0,9975 \text{ (V/V)}$. Częstotliwość graniczna odczytana z wykresu jest w przybliżeniu równa 1521 kHz. Wzmocnienie GBW obliczymy następująco:

$$GBW = k \cdot f_g = 0,9975 \cdot 1521 = 1517,2 \text{ (kHz)} \quad (4)$$

Wartość uzyskana przez nas jest podobna do katalogowej wartości, która wynosi 1,5 MHz, zatem uzyskana przez nas wartość jest wiarygodna.

2.2 Wzmacniacz o wzmocnieniu 11V/V



Rysunek 6: Schemat wzmacniacza nieodwracającego o wzmocnieniu 11V/V

Układ skonfigurowaliśmy jako wzmacniacz nieodwracający tak jak na powyższym schemacie (rys.). Do obwodu jego sprzężenia zwrotnego podłączyliśmy rezystor R_2 o rezystancji $10k\Omega$, a na jego wejściu odwracającym dołączyliśmy rezystor R_1 o rezystancji 10Ω . Sygnał wejściowy U_1 z generatora podaliśmy bezpośrednio na wejście nieodwracające.

Wyznaczyliśmy charakterystykę amplitudową $K_u=f(f)$ podając sygnał U_1 na wejściu o małej amplitudzie 100 mV oraz o przebiegu sinusoidalnym. Zmierzyliśmy jednorazowo amplitudę sygnału wejściowego U_1 , a następnie dokonaliśmy serii pomiarów amplitudy sygnału wyjściowego U_2 dla częstotliwości z przedziału od 100 Hz do 5 MHz. Pomiary wzmocnienia znajdują się w tabeli poniżej.

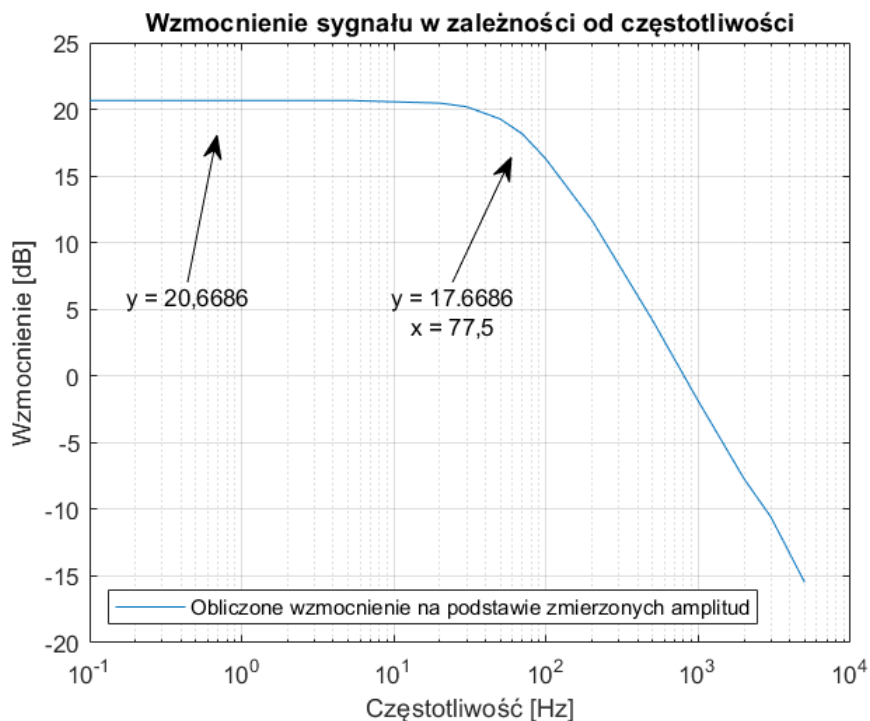
Tabela 3: Amplituda sygnału w zależności od częstotliwości

Częst. [kHz]	Amp. [mV]	Wzm. [dB]	Częst. [kHz]	Amp. [mV]	Wzm. [dB]
0,1	1080,000	20,6685	70,0	807,500	18,1429
0,2	1080,000	20,6685	100,0	650,000	16,2583
0,5	1080,000	20,6685	200,0	383,750	11,6810
1,0	1080,000	20,6685	500,0	161,875	4,1836
5,0	1080,000	20,6685	1000,0	80,500	-1,8841
20,0	1055,000	20,4650	2000,0	41,125	-7,7179
30,0	1023,000	20,1975	3000,0	29,575	-10,5815
50,0	920,000	19,2758	5000,0	16,825	-15,4809

Wartość wzmocnienia obliczyliśmy ze wzoru:

$$G = 20 \cdot \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (5)$$

Teraz sporządzimy wykres zależności wzmocnienia od częstotliwości:



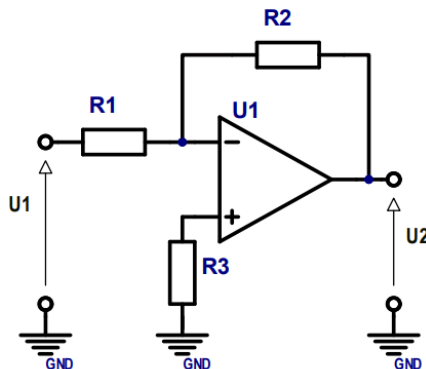
Rysunek 7: Wyznaczenie charakterystyki amplitudowej $K_u=f(f)$

Wzmocnienie dla małych częstotliwości wynosi $k = 20,669 \text{ (dB)} = 10,8 \text{ (V/V)}$. Otrzymana wartość wzmocnienia zgadza się z wartością teoretyczną wzmocnienia dla tego układu ($k = 11 \text{ V/V}$) bo $\Delta k = 1,82\%$. Częstotliwość graniczna odczytana z wykresu jest w przybliżeniu równa $77,5 \text{ kHz}$. Wzmocnienie GBW obliczymy następująco:

$$GBW = k \cdot f_g = 10,8 \cdot 77,5 = 837 \text{ (kHz)} \quad (6)$$

Pole wzmocnienia wynosi 837 kHz , jest to wartość zdecydowanie mniejsza od wartości katalogowej $1,5 \text{ MHz}$, natomiast otrzymana wartość jest większa od wartości katalogowej minimalnej 437 kHz .

2.3 Wzmacniacz o wzmocnieniu -10V/V



Rysunek 8: Schemat wzmacniacza odwracającego o wzmocnieniu -10V/V

Układ skonfigurowaliśmy jako wzmacniacz nieodwracający tak jak na powyższym schemacie (rys. 8). Do obwodu jego sprzężenia zwrotnego podłączyliśmy rezystor R_2 o rezystancji $10 \text{ k}\Omega$, a na jego wejściu odwracającym dołączyliśmy rezystor R_1 o rezystancji $1 \text{ k}\Omega$. Wejście nieodwracające podłączyliśmy do masy za pomocą rezystora R_3 o rezystancji $\sim 0,9 \text{ k}\Omega$. Sygnał wejściowy U_1 z generatora podaliśmy bezpośrednio na R_1 .

Wyznaczyliśmy charakterystykę amplitudową $K_u = f(f)$ podając sygnał U_1 na wejściu o małej amplitudzie 100 mV oraz o przebiegu sinusoidalnym. Zmierzyliśmy jednorazowo amplitudę sygnału wejściowego U_1 , a następnie dokonaliśmy serii pomiarów amplitudy sygnału wyjściowego U_2 dla częstotliwości z przedziału od 100 Hz do 2 MHz . Pomiarzy wzmocnienia znajdują się w tabeli poniżej.

Tabela 4: Amplituda sygnału w zależności od częstotliwości

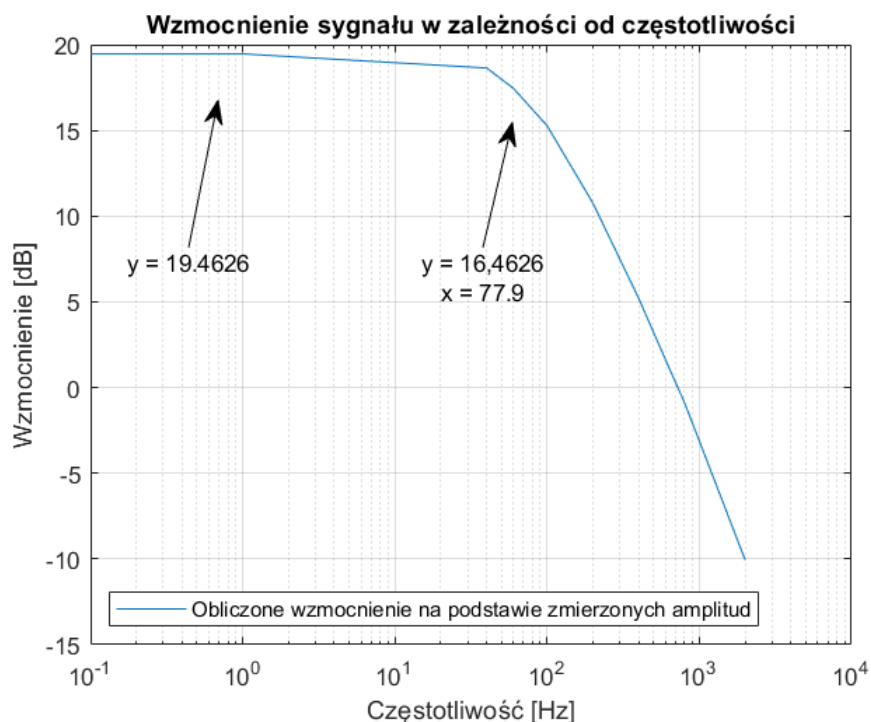
Częst. [kHz]	Amp. [mV]	Wzm. [dB]
0,1	940,000	19,4626
1,0	940,000	19,4626
40,0	855,000	18,6393
60,0	746,250	17,4577
100,0	580,000	15,2686
200,0	345,000	10,7564

Częst. [kHz]	Amp. [mV]	Wzm. [dB]
400,0	181,875	5,1955
600,0	120,500	1,6197
800,0	90,250	-0,8911
1000,0	69,875	-3,1136
2000,0	31,425	-10,0545

Wartość wzmocnienia obliczyliśmy ze wzoru:

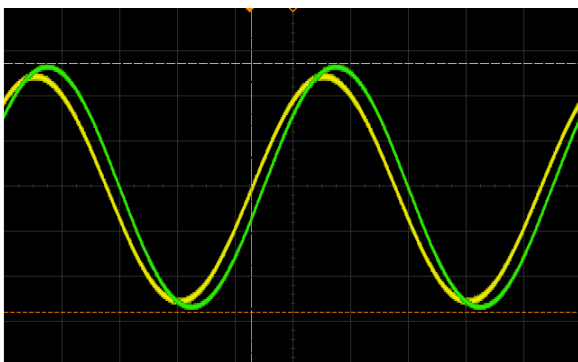
$$G = 20 \cdot \log \frac{V_{out}}{V_{in}} \quad (7)$$

Teraz sporządzimy wykres zależności wzmocnienia od częstotliwości:

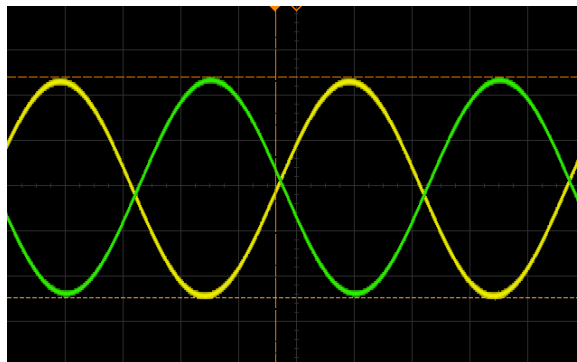


Rysunek 9: Wyznaczenie charakterystyki amplitudowej $K_u=f(f)$

Wzmocnienie dla małych częstotliwości wynosi $k = 19,46 \text{ (dB)} = 9,4 \text{ (V/V)}$. Ze względu na to, że mierzymy amplitudę, a nie wartość rzeczywistą otrzymaliśmy wzmocnienie powyżej 0. Ale przyjrzyjmy się wykresom z oscyloskopu:



Rysunek 10: Konfiguracja nieodwracająca



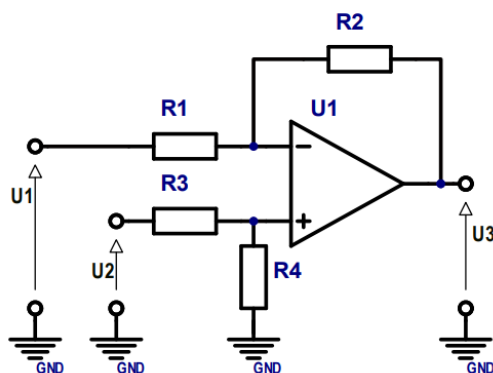
Rysunek 11: Konfiguracja odwracająca

Widzimy, że sygnał na wyjściu przy odwracającej konfiguracji wzmacniacza jest pomnożony przez -1 razy wzmocnienie. Więc otrzymane przez nas wzmocnienie wynosi $k = -9,4 \text{ (V/V)}$. Otrzymana wartość wzmocnienia zgadza się z wartością teoretyczną wzmocnienia dla tego układu ($k = -10 \text{ V/V}$) bo $\Delta k = 6\%$. Częstotliwość graniczna odczytana z wykresu jest w przybliżeniu równa 77,9 kHz. Wzmocnienie GBW obliczymy następująco:

$$GBW = k \cdot f_g = 9,4 \cdot 77,9 = 732,2 \text{ (kHz)} \quad (8)$$

Pole wzmocnienia wynosi 732,2 kHz, jest to wartość zdecydowanie mniejsza od wartości katalogowej 1,5 MHz, natomiast otrzymana wartość jest większa od wartości katalogowej minimalnej 437 kHz.

2.4 Wzmacniacz odejmujący o wzmacnieniu 10 V/V



Rysunek 12: Schemat wzmacniacza odejmującego o wzmacnieniu 10V/V

Układ skonfigurowaliśmy jako wzmacniacz odejmujący tak jak na powyższym schemacie (rys. 12). Do obwodu jego sprzężenia zwrotnego podłączyliśmy rezystor R_2 o rezystancji 10 k Ω oraz R_1 o rezystancji 1 k Ω , a do wejścia nieodwracającego podłączyliśmy dzielnik złożony z rezystorów R_3 o rezystancji 1 k Ω oraz R_4 o rezystancji 10 k Ω . Sygnał wejściowy U_1 podaliśmy na R_1 , a sygnał U_2 podaliśmy na R_3 .

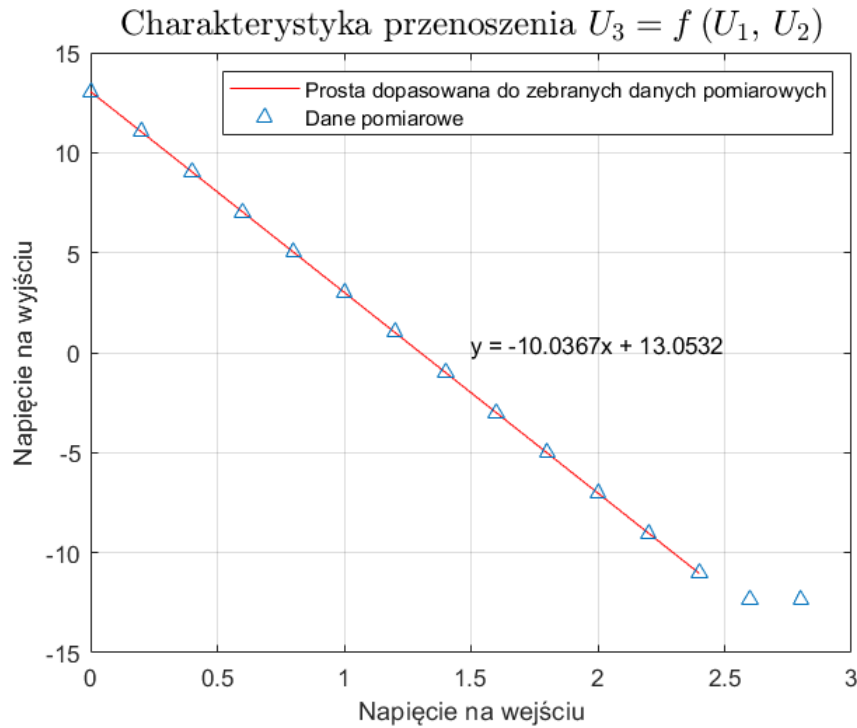
Wyzaczyliśmy charakterystykę przenoszenia $U_3 = f(U_1, U_2)$ dla napięć stałych. Napięcie wejściowe U_2 było stałe i było równe 1,3 V, zmienialiśmy tylko napięcie U_1 od 0 do 2,8 V z krokiem 0,2 V. Pomiary napięcia wyjściowego U_3 znajdują się w tabeli poniżej.

Tabela 5: Amplituda sygnału na wyjściu w zależności od U_1

Amp. U_1 [V]	Amp. U_3 [V]
0,0	13,0560
0,2	11,0500
0,4	9,0420
0,6	7,0280
0,8	5,0201
1,0	3,0144
1,2	1,0050
1,4	-1,0010

Amp. U_1 [V]	Amp. U_3 [V]
1,6	-3,0090
1,8	-5,0103
2,0	-7,0191
2,2	-9,0249
2,4	-11,0320
2,6	-12,3200
2,8	-12,3380

Teraz zwizualizujemy powyższe dane na wykresie i dopasujemy prostą do wyników, kiedy wzmacniacz jeszcze nie jest w zakresie nasycenia:



Rysunek 13: Wyznaczenie charakterystyki przenoszenia $U_3 = f(U_1, U_2)$

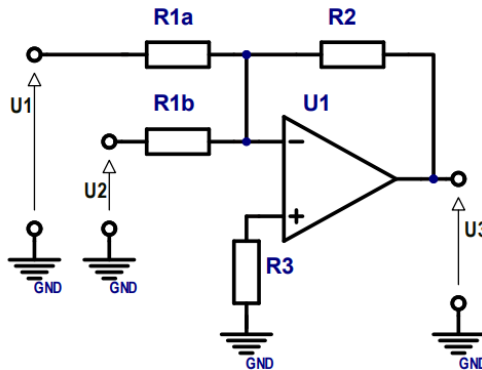
Współczynniki dopasowania prostej z powyższego wykresu są wyznaczone ze skutecznością 95%.

Zauważmy, że przy krańcowych wartościach napięcia wejściowego wzmacniacz wchodzi w stan nasycenia, dla pozostałych wartości widzimy, że $\Delta y / \Delta x < 0$. Z równania dopasowanej krzywej wyznaczmy charakterystykę przenoszenia:

$$U_{out} = -10.0367 \cdot U_1 + 13.0532 \quad (9)$$

Widzimy, że wzmocnienie stałoprądowe wynosi -10.0388 [V/V], co jest blisko -10 [V/V] ($\Delta k = 0,4\%$), co z kolei jest zgodne z oczekiwaniami dla wzmacniacza idealnego pracującego w powyżej opisanej konfiguracji.

2.5 Wzmacniacz sumujący o wzmocnieniach -10 V/V (U_2) i -2 V/V (U_1)



Rysunek 14: Schemat wzmacniacza sumującego wzmocnieniu -10 V/V

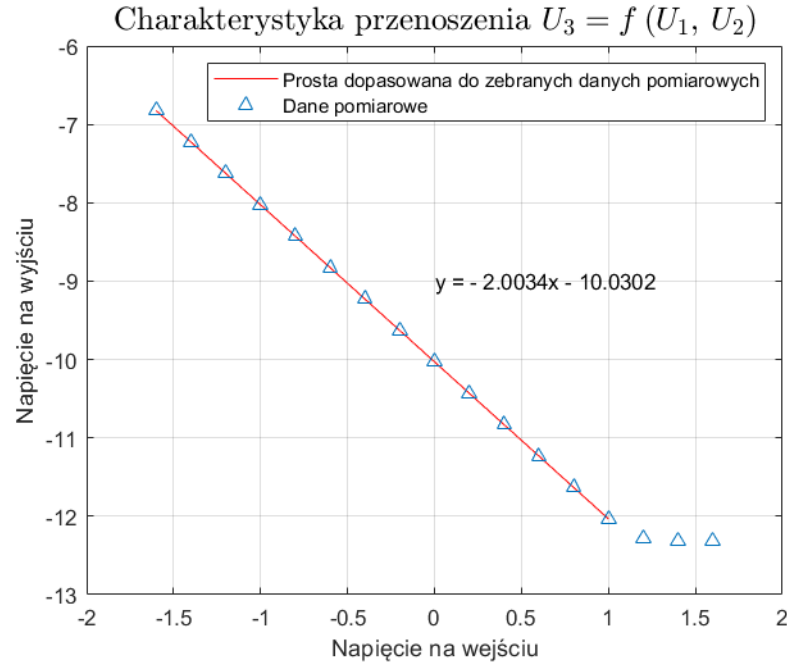
Układ skonfigurowaliśmy jako wzmacniacz sumujący tak jak na powyższym schemacie (rys. 14). Do obwodu jego sprzężenia zwrotnego podłączyliśmy rezystor R_2 o rezystancji 10 k Ω oraz R_{1a} o rezystancji

5 k Ω i R_{1b} o rezystancji 1 k Ω . Wejście nieodwarcające podłączyliśmy do masy za pomocą R_3 . Sygnał wejściowy U_1 podaliśmy na R_{1a} , a sygnał U_2 na R_{1b} .

Wyznaczyliśmy charakterystykę przenoszenia $U_3 = f(U_1, U_2)$ dla napięć stałych. Napięcie wejściowe U_2 było stałe i było równe 1 V, zmienialiśmy tylko napięcie U_1 od -1,6 V do 1,6 V z krokiem 0,2 V. Pomiar napięcia wyjściowego U_3 znajdują się w tabeli poniżej.

Tabela 6: Amplituda sygnału na wyjściu w zależności od U_1

Amp. U_1 [V]	Amp. U_3 [V]	Amp. U_1 [V]	Amp. U_3 [V]
-1,6	-6,8228	0,2	-10,4280
-1,4	-7,2242	0,4	-10,8290
-1,2	-7,6258	0,6	-11,2320
-1,0	-8,0273	0,8	-11,6330
-0,8	-8,4290	1,0	-12,0350
-0,6	-8,8308	1,2	-12,2850
-0,4	-9,2322	1,4	-12,3170
-0,2	-9,6337	1,6	-12,3200
0,0	-10,0260		



Rysunek 15: Wyznaczenie charakterystyki przenoszenia $U_3 = f(U_1, U_2)$

Współczynniki dopasowania prostej z powyższego wykresu są wyznaczone ze skutecznością 95%.

Zauważmy, że przy krańcowych wartościach napięcia wejściowego wzmacniacz wchodzi w stan nasycenia, dla pozostałych wartości widzimy, że $\Delta y / \Delta x < 0$. Z równania dopasowanej krzywej wyznaczmy charakterystykę przenoszenia:

$$U_{out} = -2.0034 \cdot U_1 - 10.0302 \quad (10)$$

Widzimy, że wzmocnienie stałoprądowe dla U_2 wynosi -10.0302 [V/V], co jest blisko -10 [V/V] ($\Delta k = 0,37\%$), natomiast wzmocnienie stałoprądowe dla U_1 wynosi -2.0034 [V/V], co jest blisko -2 [V/V] ($\Delta k = 0,17\%$), co z kolei jest zgodne z oczekiwaniami dla wzmacniacza idealnego pracującego w powyżej opisanej konfiguracji.