

Sprawozdanie 2

Układy elektroniczne - Laboratoria

Temat laboratoriów:

A-3. Konfiguracje wzmacniaczy operacyjnych



WFiIS AGH

18.04.2021

Łukasz Wajda

1. Cel ćwiczenia

Celem ćwiczenia jest zbadanie parametrów wzmacniacza operacyjnego TL062 pracującego w różnych konfiguracjach układowych oraz wyznaczenie stałoprądowych funkcji przenoszenia, amplitudowych charakterystyk częstotliwościowych, niektórych stałoprądowych parametrów wzmacniacza operacyjnego oraz parametrów czasowych wzmacniaczy operacyjnych.

2. Przebieg ćwiczenia

1. Badanie właściwości wtórnika napięciowego. Wyznaczanie wzmocnienia stałoprądowego oraz offsetu wzmacniacza. Wyznaczanie odpowiedzi na skok napięcia o małej i dużej amplitudzie. Porównanie otrzymanych wartości z kartą katalogową. Wyznaczanie charakterystyki częstotliwościowej dla małych sygnałów, częstotliwości granicznej i wzmocnienia dla częstotliwości dążącej do zera.
2. Badanie właściwości wzmacniacza nieodwracającego o wzmocnieniu 11V/V. Wyznaczanie charakterystyki częstotliwościowej, częstotliwości granicznej. Wyliczanie pola wzmocnienia.
3. Modyfikacja układu z pkt. 2, aby uzyskać wzmocnienie 101V/V i określenie tych samych parametrów.
4. Przeprowadzenie pomiarów na wzmacniaczu logarytmicznym. Wyznaczenie jego charakterystyk napięciowych jak i określenie dokładności logarytmowania.

3. Wyniki

Wzmacniacz operacyjny jest aktywnym elementem elektronicznym o symetrycznym wyjściu i asymetrycznym wejściu różnicowym. W zależności, na które wejście zostanie podane napięcie, wzmacniacz może odwracać fazę napięcia wyjściowego względem napięcia wejściowego, lub na wyjście przekazać napięcie o nieodwróconej fazie. Cechą charakterystyczną wzmacniaczy jest praca w pętli sprzężenia zwrotnego, która stabilizuje ich pracę, zwiększa zakres dynamiczny pracy wzmacniacza, poprawia liniowość i poszerza pasmo przenoszenia. Do celów porównawczych wzmacniaczy stosuje się kilka parametrów:.

- Wzmocnienie różnicowe: $k_{UR} = \frac{\partial U_{wy}}{\partial U_R}$
- Wejściowe napięcie niezrównoważenia V_{OS} , jest to napięcie przyłożone na wejściu, dla którego napięcie wyjściowe jest zerowe, dla rzeczywistych wzmacniaczy równe $\mu V - mV$
- Temperaturowy dryf wejściowego napięcia niezrównoważenia: zmiana temperatury powoduje zmianę wejściowego napięcia niezrównoważenia, zwykle rzędu $\frac{\mu V}{^\circ C}$

- Wzmocnienie sygnału wspólnego: niezerowa wartość napięcia na wyjściu, mimo identycznego sygnału na obu wejściach, $k_{US} = \frac{\partial U_{Wy}}{\partial U_S}$. Właściwość opisana jest przez współczynnik tłumienia sygnału wspólnego: $CMRR = \frac{k_{UR}}{k_{US}}$. Dla rzeczywistych wzmacniaczy równe 80 - 120 dB.
- PSRR- odporność wzmacniacza na zmiany napięć zasilających, dla rzeczywistych wzmacniaczy.
- Rezystancja wejściowa: r_R - rezystancja różnicowa: mierzona między wejściami wzmacniacza operacyjnego, r_S - rezystancja wspólna mierzona między masą a jednym z wejść.
- Wejściowy prąd niezrównoważenia: $I_{OS} \in < fA, nA >$ - napięcie wyjściowe zmienia się mimo braku napięcia wejściowego.

Porównanie wzmacniaczy operacyjnych: rzeczywistego i idealnego:

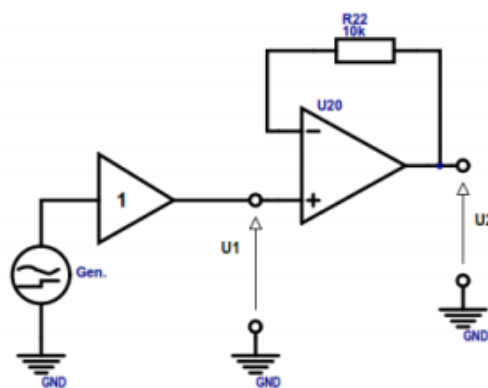
Parametry	Idealny WO	Rzeczywisty WO
wzmocnienie różnicowe:	∞	105 – 107
pasmo przenoszenia:	$0 - \infty$	MHz
napięcie niezrównoważenia:	0	$\mu V - mV$
CMRR:	∞	80 - 120 dB
PSRR:	∞	50 - 120 dB
rezystancja wejściowa:	∞	M Ω
rezystancja wyjściowa:	0	10 - 1000 Ω
I_{OS}	0	fA - nA

Tabela 1. Zestawienie parametrów wzmacniacza rzeczywistego i idealnego,

Slew rate (szybkość narastania) - jest to szybkość zmiany napięcia na jednostkę czasu. Zwykle podawana w $\frac{V}{\mu s}$.

3.1. Badanie wtórnika napięciowego

Pierwszym układem, który poddaliśmy analizie był wtórnik napięciowy. Schemat został przedstawiony na rysunku poniżej:



Rysunek 1. Wtórnik napięciowy.

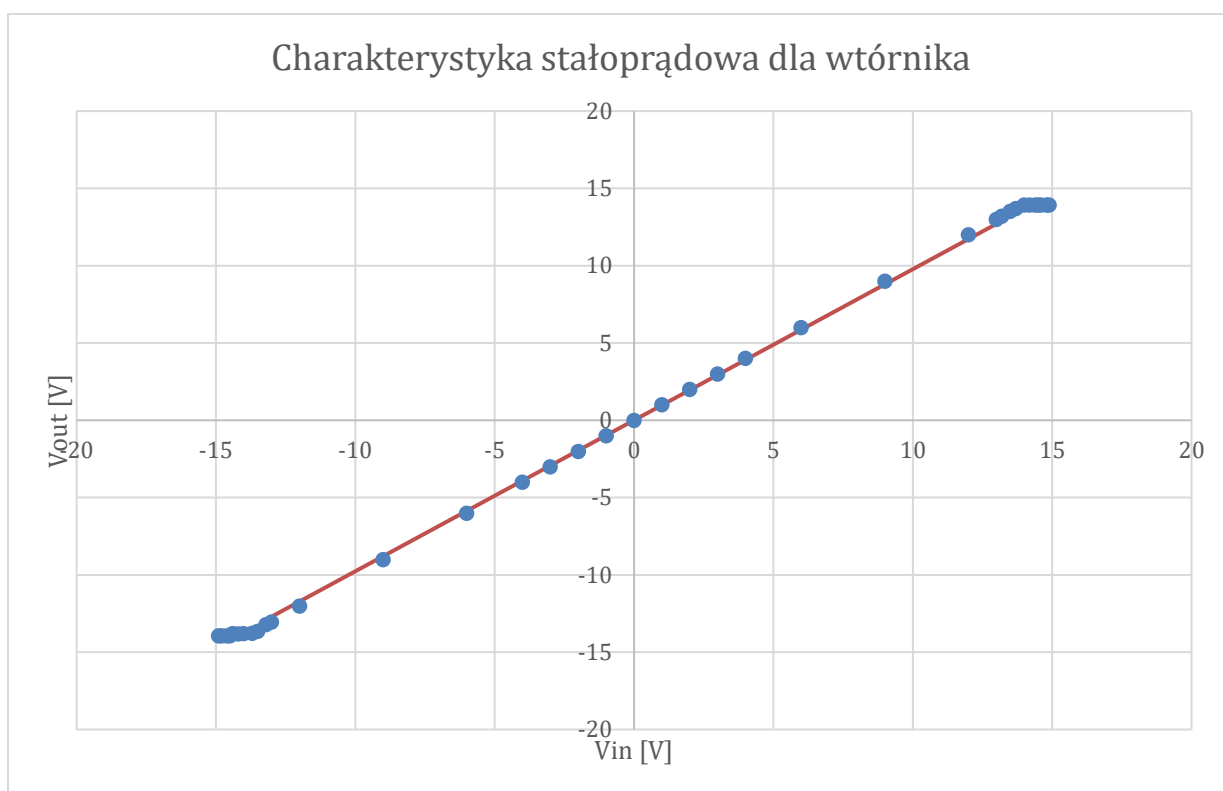
a) wyznaczenie charakterystykę przenoszenia $U_2 = f(U_1)$ dla napięcia stałego oraz znalezienie nachylenia k_u

Naszym zadaniem było doświadczalne wyznaczenie charakterystyki stałoprądowej czyli obliczenie napięcia wyjściowego U_2 (jego obserwacja za pomocą woltomierza lub oscyloskopu) w funkcji stałego napięcia wejściowego U_1 , a poprzez dopasowanie do otrzymanych z doświadczenia punktów prostej, obliczenie wzmocnienia stałoprądowego i offsetu wzmacniacza. Wartość opornika jako sprzężenia zwrotne umieszczonego w układzie została ustawiona na 10 [kΩ], a zakres napięcia U_1 ustalony został na [-15 [V],15 [V]], obliczeń dokonano z krokiem 10 [mV]. Uzyskaliśmy wyniki, zaprezentowane w tabeli 1. oraz na następującym wykresie 1.

Napięcie wejściowe [V]	Napięcie wyjściowe [V]		Napięcie wejściowe[V]	Napięcie wyjściowe[V]
-14,9	-13,932		0	0,00289
-14,8	-13,935		1,0	1,0036
-14,6	-13,935		2,0	2,0035
-14,5	-13,934		3,0	3,0037
-14,4	-13,789		4,0	4,0045
-14,2	-13,811		6,0	6,0052
-14,0	-13,802		9,0	9,0052
-13,7	-13,770		12,0	12,005
-13,5	-13,644		13,0	13,005
-13,2	-13,204		13,2	13,2005
-13,0	-13,038		13,5	13,505
-12,0	-12,005		13,7	13,705

-9,0	-9,0045		14,0	13,935
-6,0	-6,0029		14,2	13,934
-4,0	-4,0032		14,4	13,934
-3,0	-3,0032		14,5	13,934
-2,0	-2,0028		14,6	13,936
-1,0	-1,0036		14,8	13,935
0	0,00289		14,9	13,936

Tabela 2. Charakterystyka przejściowa $U_2 = f(U_1)$



Wykres 1. Fitowanie prostej w celu wyznaczenia wzmocnienia stałoprądowego dla wtórnika

Na wykresie doskonale widać liniowość wtórnika napięciowego. Wraz ze zwiększaniem napięcia na wejściu, wyjściowe napięcie rośnie proporcjonalnie. Zauważalny jest podział na zakres liniowy pracy wzmacniacza i zakres nasycenia, dla którego wartość wyjściowa napięcia nie zmienia się. Jest to spowodowane tym, iż nie można uzyskać na wyjściu napięcia większego niż napięcie zasilania (wynosiło ono 15V). Oczywiście zakres nasycenia zaczyna się dla mniejszej wartości napięcia (nie jest to idealny wzmacniacz). Zakres liniowej pracy wzmacniacza wyznacza przedział $<-13.7[V], 13.7[V]>$. Otrzymane przez nas wyniki są zbliżone z wartościami katalogowymi ($\pm 13.5[V]$), co świadczy o poprawnym wykonaniu ćwiczenia.

W celu wyznaczenia wzmocnienia wzmacniacza, dopasowano prostą do punktów pomiarowych o następującym równaniu:

$$U_{OUT} = 0,9768U_{IN} + 0,0047 \quad (1)$$

Zatem wzmocnienie wzmacniacza: $k \approx 1$, co jest zgodne z teorią.

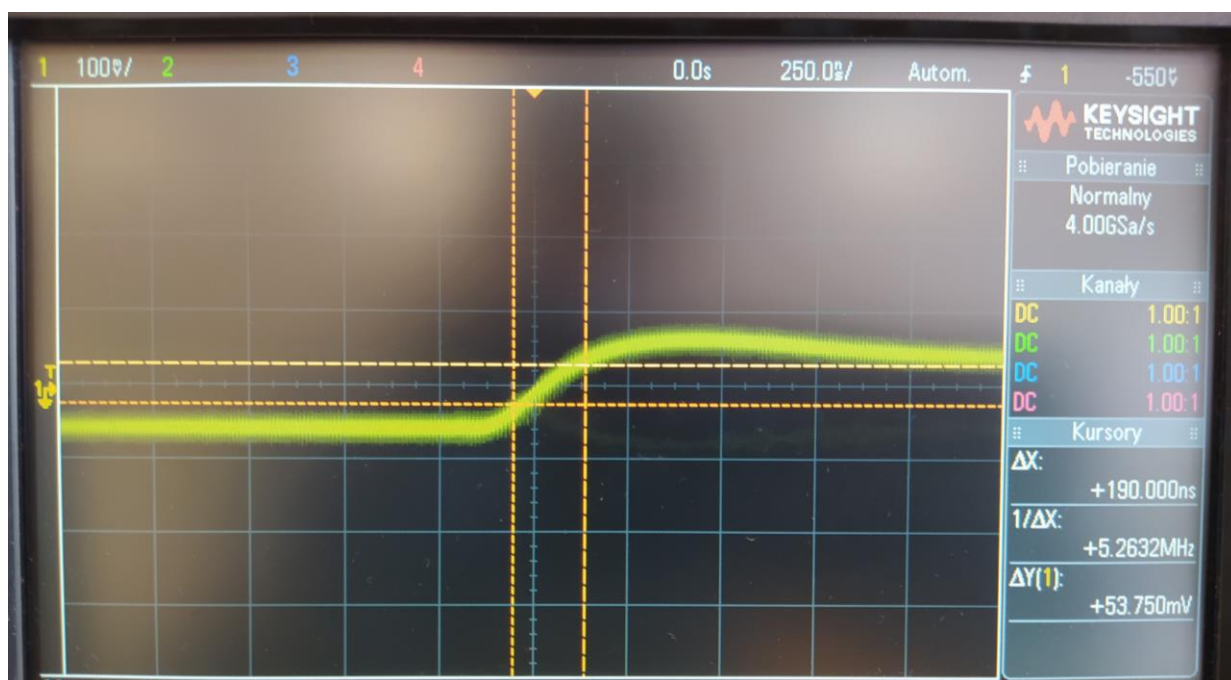
Natomiast offset wzmacniacza (wartość napięcia wejściowego, jakie należy dostarczyć do wzmacniacza, by na wyjściu otrzymać wartość zero) jest równy:

$$\frac{b}{a} = \frac{0,0047}{0,9768} \approx 0,0048 \text{ [V]} \approx 4,8 \text{ [mV]} \quad (2)$$

Zgodnie z kartą katalogową maksymalny offset naszego urządzenia jest określony na wartość 6 [mV] (dla temperatury urządzenia 25°C). Różnice w wynikach mogą być spowodowane różnicą temperatur oraz niepewnościami przy dopasowaniu prostej do punktów pomiarowych. Jednak wartość mieści się w przedziale offsetu naszego wzmacniacza, co świadczy o poprawności otrzymanych wyników.

b) Znalezienie odpowiedzi napięcia U2 przy sygnale wejściowym U1 w postaci skoku napięcia dla sygnału małego (amplituda 0.1[V]) oraz czasu narastania.

Przy sygnale wejściowym $U = 100\text{mV}$, $f = 10\text{kHz}$ płynącym z generatora odpowiedź na skok ukształtowała się następująco:



Rysunek 2 : Odpowiedź wtórnika na skok napięcia o małej amplitudzie.

Zmierzony czas narastania odpowiedzi wyniósł 190[ns]. Wartość teoretyczna, która jest podana w dokumentacji wzmacniacza wynosi 200[ns], nasz wynik możemy zatem uznać

za umiarkowanie dobry, niepewnością może być obarczone wyznaczenie zakresu w którym mierzymy czas narastania (10% do 90% wartości $U_{max} - U_{min}$).

c) Znalezienie odpowiedzi napięcia U2 przy sygnale wejściowym U1 postaci skok napięcia dla sygnału dużego (amplituda 5[V]) oraz szybkości zmiany napięcia na wyjściu.

Aby wyznaczyć szybkość zmian na wyjściu posłużymy się współczynnikiem slew-rate (SR). Aby go wyznaczyć, zmierzylśmy przyrost napięcia w zakresie od 10% do 90% wartości $U_{max} - U_{min}$ oraz czas w którym ten przyrost występuje. Na wejście podano sygnał o dużej amplitudzie $A = 5$ [V pp] oraz częstotliwości $f = 10$ [kHz]. Odpowiedź wtórника zaprezentowano na poniższym wykresie.



Rysunek 3 : Odpowiedź wtórника na skok napięcia o dużej amplitudzie.

Amplituda wyjściowa: $\Delta V = 4,0875$ [V],

Czas narastania: $\Delta t = 1,88$ [μ s].

Współczynnik SR wyznaczamy jako stosunek:

$$\frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{4,0875}{1,88} = 2,17 \left[\frac{V}{\mu s} \right] \quad (3)$$

Otrzymana wartość zgadza się z dokumentacją wzmacniacza, teoretycznie bowiem minimalna wartość slew rate wynosi 1.5[V], a typowa 3.5[V].

d) Wyznaczenie amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej $k_u \approx f(f)$ dla małych sygnałów, oraz znalezienie częstotliwości granicznej i wzmocnienie.

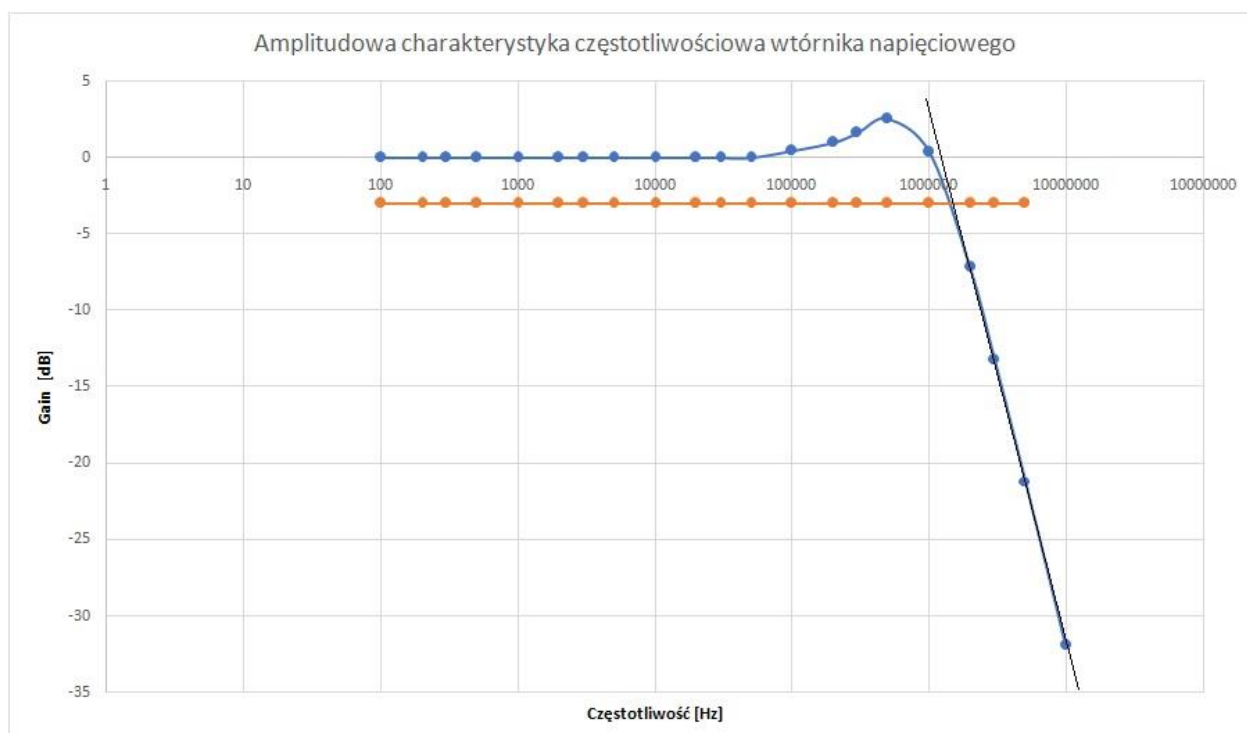
Ostatnim zadaniem związanym z wtórnikami napięciowym było wyznaczenie amplitudowej charakterystyki częstotliwościowej dla małych sygnałów. Aby tego dokonać, na wejściu podaliśmy przebieg sinusoidalny o amplitudzie 100 [mV]. Następnie zbadaliśmy amplitudy sygnału wejściowego przy różnych wartościach częstotliwości. Otrzymane wyniki zamieściliśmy w poniższej tabeli.

Częstotliwość f [Hz]	Napięcie [mV]
100	100,1
200	100,1
300	100,1
500	100,1
1k	100,1
2k	100,1
3k	100,1
5k	100,1
10k	100,1
20k	100,1
30k	100,1
50k	100,1
100k	105,625
200k	112,46
300k	120,45
500k	134,27
1M	104,25
2M	43,84
3M	21,745
5M	8,76
10M	2,54

Tabela 3. Zależność napięcia na wyjściu wtórника dla różnych częstotliwości sygnału

Mając dane utworzyliśmy wykres, gdzie oś X to logarytmiczna skala częstotliwości, a oś Y to wzmacnienie liczone w [dB] zgodnie z poniższym wzorem:

$$k_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{WY}}{U_{WE}} \right) \quad (4)$$



Wykres 2. Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa wtórnika napięciowego dla małego sygnału (amplituda wejściowa wynosi 100 [mV]). Przyjęto logarytmiczną skalę osi f . Linia żółta- linia trendu -3 dB. Linia niebieska- charakterystyka.

Na podstawie wykresu (2) możemy wyznaczyć charakterystyczne wartości. Nachylenie w naszym przypadku wynosi $-31.56 \left[\frac{dB}{dec} \right]$. Częstotliwość graniczną wyznaczamy w wyniku przecięcia się linii trendu o wartości -3 [dB] oraz krzywą nachylenia, tak więc otrzymujemy $f_g = 1,4456 \text{ [MHz]}$. Wzmocnienie dla małych częstotliwości jest równe:

$$k_u = \frac{100,1 \text{ mV}}{100 \text{ mV}} \approx 1,001 \left[\frac{V}{V} \right] \quad (5)$$

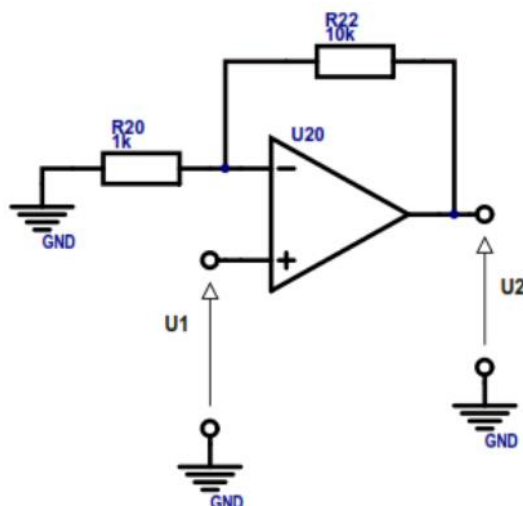
Jak widać wzmocnienie jest identyczne z tym obliczonym w podpunkcie a). Aby sprawdzić czy nasza częstotliwość graniczna wyliczona poprawnie należy policzyć GBW (Gain-Bandwidth Product). Wartość odczytana z tablic wynosi $GBW_{teor} = 1 \text{ [MHz]}$. Aby wyliczyć f_{g_teor} , należy GBW podzielić przez k . W ten sposób otrzymujemy $f_{g_teor} = 1 \text{ [MHz]}$. Nasza wartość jest przybliżona do wartości teoretycznej, co świadczy o poprawnym wykonaniu ćwiczenia. Następnie wyliczamy wartość pola wzmocnienia zgodnie z poniższym wzorem:

$$GBW = k_u \cdot f_g = 1,001 \cdot 1,4456 = 1,4470 \text{ [MHz]}. \quad (6)$$

Obliczona wartości jest podobna do teoretycznej, więc zadanie wykonano poprawnie.

3.2. Badanie wzmacniacza o wzmocnieniu 11V/V

Kolejna część doświadczenia obejmowała badanie wzmacniacza nieodwracającego.



Rysunek 4. Wzmacniacz nieodwracający o wzmocnieniu 11[V/V].

Zgodnie z teorią wzmocnienie takiego układu oblicza się następująco:

$$k = \frac{R_{20} + R_{22}}{R_{20}} \quad (7)$$

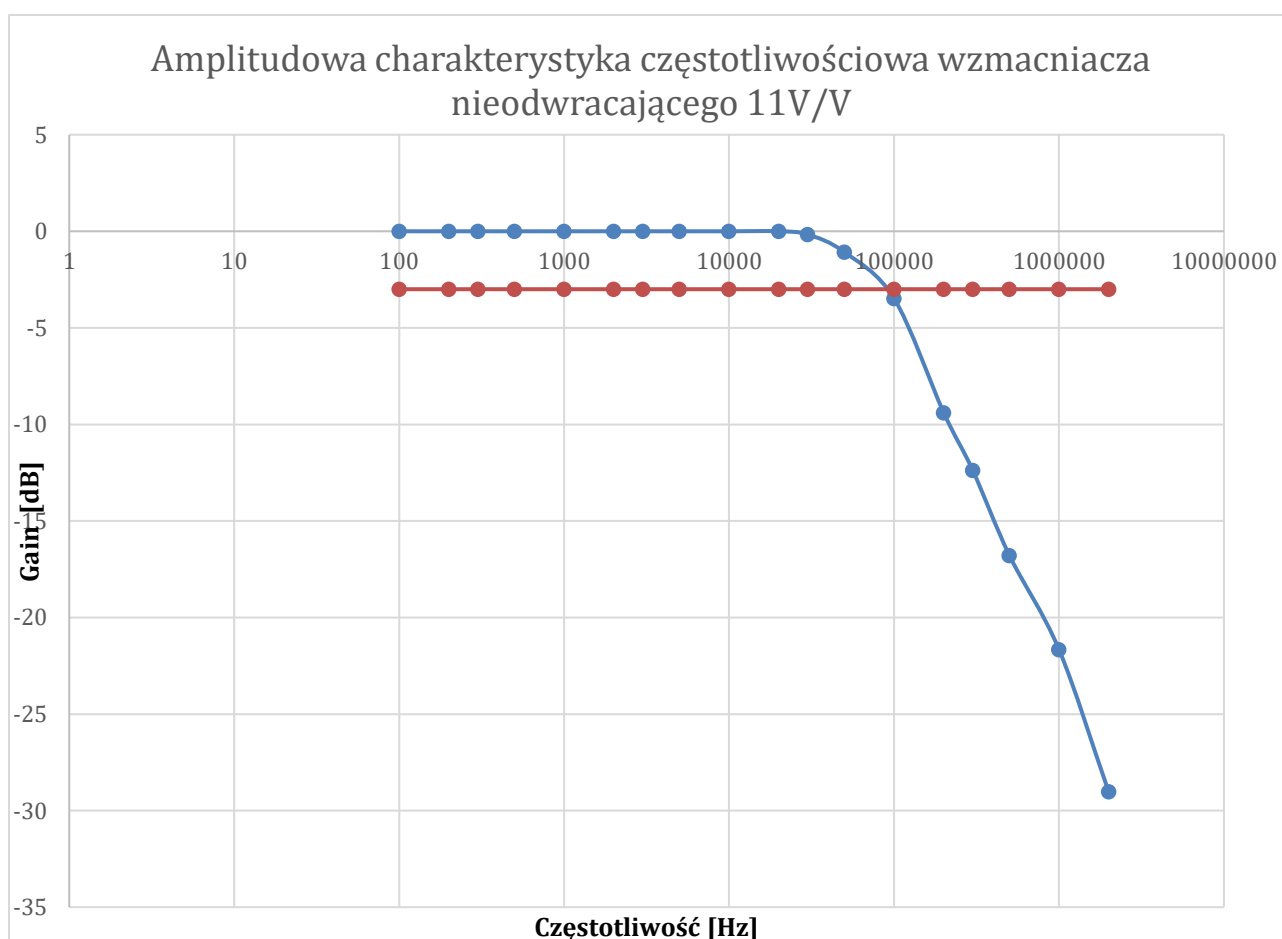
Nasz układ zasililiśmy przebiegiem sinusoidalnym o amplitudzie 100 [mV] Vpp. W dalszej kolejności zmienialiśmy częstotliwość sygnału wejściowego i obserwowaliśmy zmiany amplitudy sygnału na wyjściu. Otrzymane wyniki zamieściliśmy w poniższej tabeli:

Częstotliwość f [Hz]	Napięcie [mV]
100	1,095
200	1,095
300	1,095
500	1,095
1k	1,095
2k	1,095
3k	1,095
5k	1,095
10k	1,095
20k	0,99375
30k	0,8875

50k	0,61425
100k	0,34125
200k	0,2375
300k	0,0825
500k	0,065
1M	0,051875
2M	0,04375

Tabela 4. Zależność napięcia na wyjściu wzmacniacza nieodwracającego dla różnych częstotliwości sygnału

Z zamieszczonych wyników utworzono wykres:



Wykres 3. Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza nieodwracającego dla małego sygnału (amplituda wejściowa wynosi 100 [mV]). Przyjęto logarytmiczną skalę osi f . Linia czerwona- linia trendu -3 dB. Linia niebieska charakterystyka.

Na podstawie analizy otrzymanych danych (przecięcia się linii trendu -3dB z krzywą nachylenia) wyznaczona została wartość częstotliwości granicznej: $f_g = 90,11$ [kHz]. Wzmocnienie dla małych częstotliwości jest równe:

$$k_u = \frac{1,095 \text{ V}}{0,100 \text{ V}} = 10,95 \left[\frac{\text{V}}{\text{V}} \right] \approx 11 \left[\frac{\text{V}}{\text{V}} \right] \quad (8)$$

W porównaniu z podpunktem a) wartość ta jest 11 razy większa. Aby dowieść poprawności wykonanych obliczeń, na podstawie częstotliwości granicznej i wzmocnienia dla częstotliwości dążącej do zera, obliczyliśmy GBW (Gain-Bandwidth Product). Jego wartość wynosiła (zgodnie ze wzorem (6)) $GBW = 0,99121 \approx 1$ [MHz]. Wartość katalogowa tego parametru wynosi 1 [MHz], błąd względny obliczeń jest równy 0,88%. Na tej podstawie stwierdza się poprawność pomiarów.

3.3. Badanie wzmacniacza o wzmocnieniu 101V/V

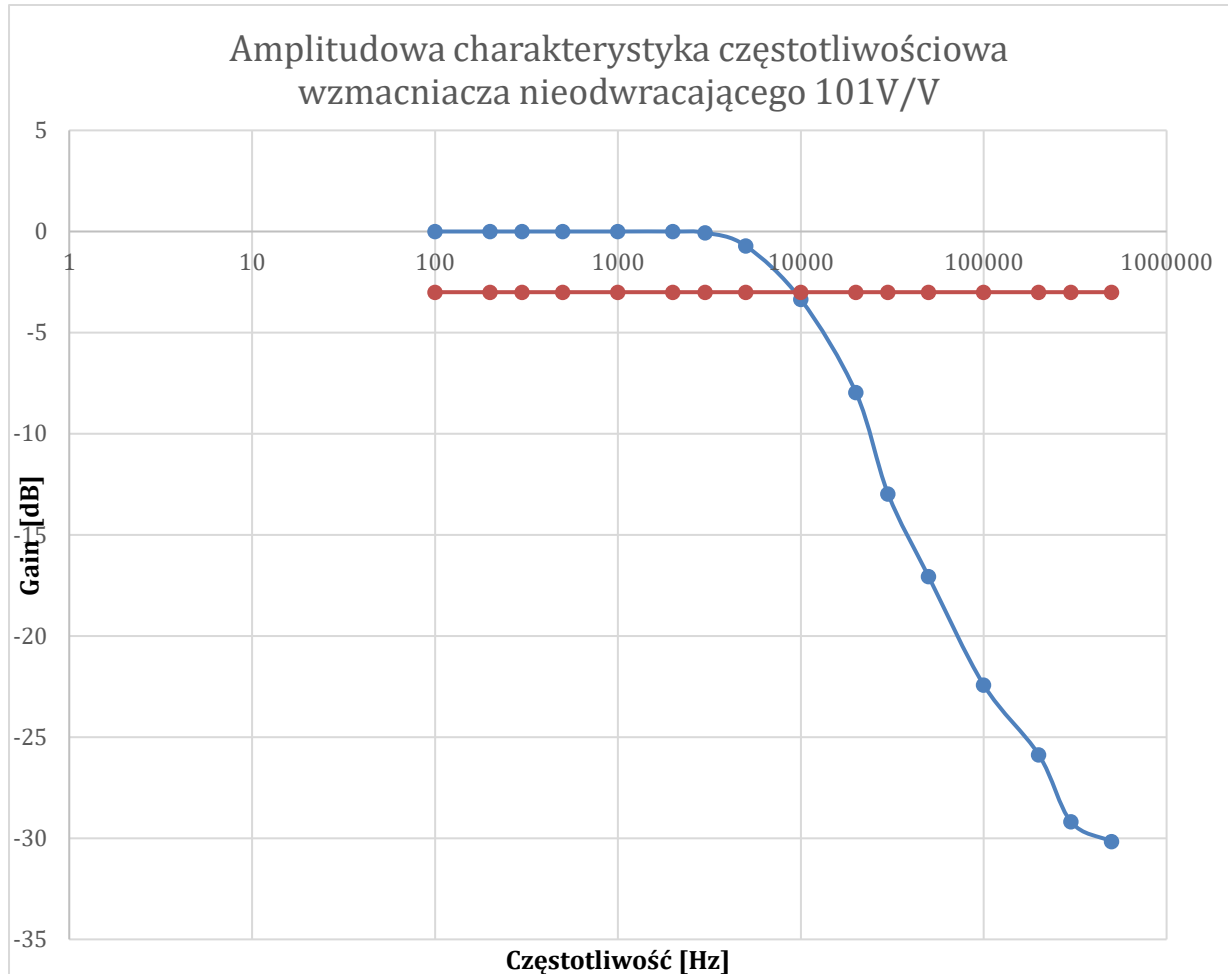
W stosunku do poprzedniego ćwiczenia zmianie uległ jeden rezystor (dokładnie R22 zamieniono na R23 o oporze elektrycznym 100kΩ), przez co wzmocnienie układu osiągnęło poziom 101V/V. Układ zasilono przebiegiem sinusoidalnym o małej amplitudzie 20mV_{pp}.

W poniższej tabeli przedstawiono wyniki:

Częstotliwość f [Hz]	Napięcie [mV]
100	2,01465
200	2,01465
300	2,01465
500	2,01465
1k	2,01465
2k	2,01465
3k	2,00034
5k	1,85625
10k	1,36875
20k	0,80625
30k	0,4525
50k	0,2825
100k	0,1525
200k	0,1025
300k	0,07
500k	0,0625
1M	2,01465
2M	2,01465

Tabela 5. Zależność napięcia na wyjściu wzmacniacza nieodwracającego dla różnych częstotliwości sygnału

Charakterystyka częstotliwościowa uległa zmianie i obecnie przedstawia się tak:



Wykres 4. Amplitudowa charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza nieodwracającego dla małego sygnału (amplituda wejściowa wynosi 20 [mV]). Przyjęto logarytmiczną skalę osi f . Linia czerwona- linia trendu -3 dB. Linia niebieska charakterystyka.

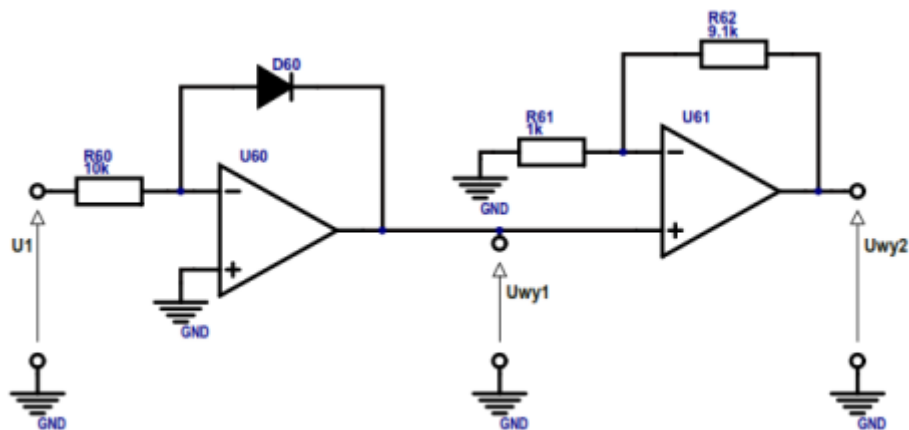
W tym przypadku częstotliwość graniczna jest równa $f_g=9,3245$ [kHz]. Wzmocnienie dla częstotliwości dążącej do zera wynosi:

$$k_{dB} = 20 \log_{10} \left(\frac{U_{WY}}{U_{WE}} \right) \approx 40,0634 \text{ [dB]} \Rightarrow k_u = \frac{U_{WY}}{U_{WE}} \approx 100,73 \left[\frac{V}{V} \right] \quad (9)$$

Pole wzmocnienia (licząc zgodnie ze wzorem (6)) wynosi obecnie 0,93928 [MHz]. Mimo ponad 10-krotnego wzrostu wzmocnienia (w porównaniu do punktu 3.2) pole wzmocnienia nie uległo zmianie. Zgodnie z teorią pole wzmocnienia nie zależy od poziomu wzmocnienia i jest to wartość charakterystyczna dla wzmacniacza operacyjnego, co pokazują wyniki ćwiczenia.

3.4. Wzmacniacz logarytmiczny

Ostatnie ćwiczenie polegało na badaniu wzmacniacza logarytmicznego. Jego budowa została przedstawiona na poniższym schemacie:



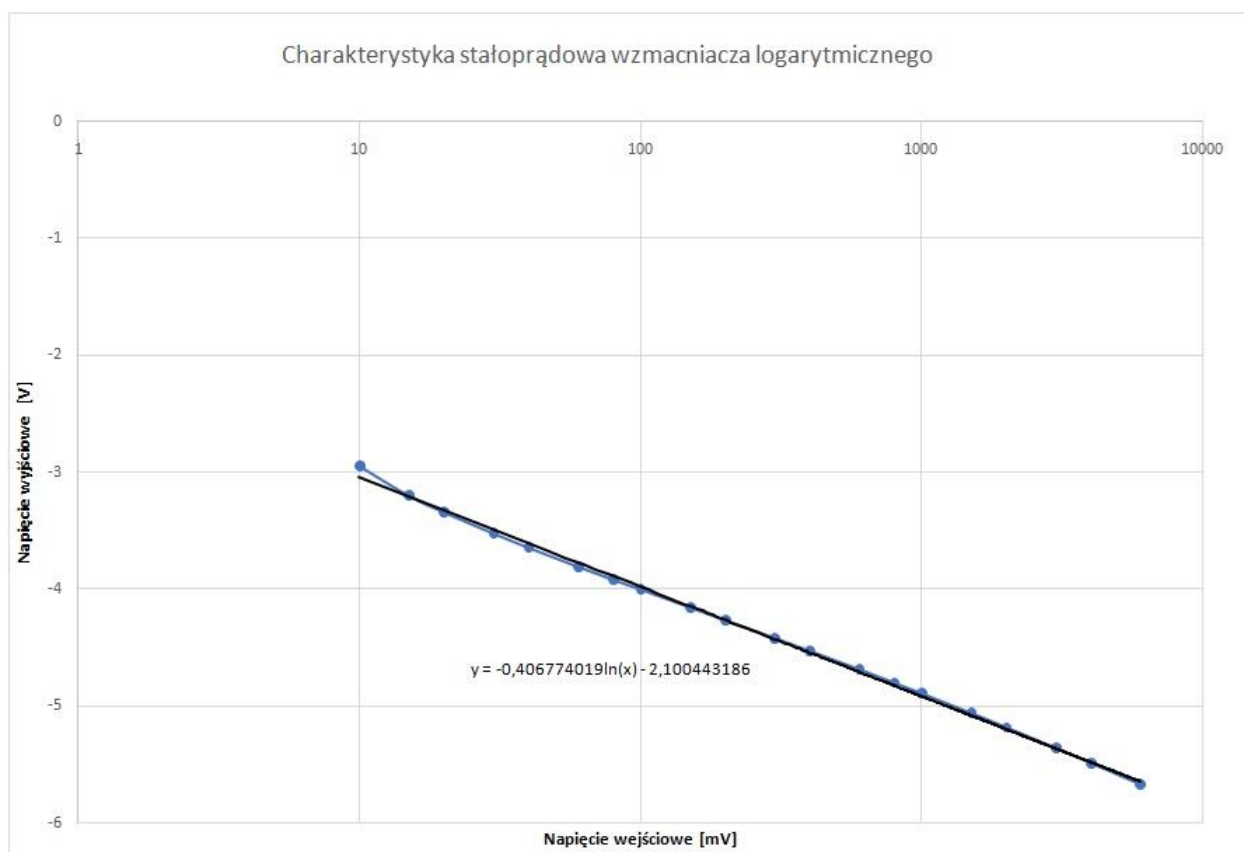
Rysunek 5. Wzmacniacz logarytmiczny.

Na jego wejście podłączono precyzyjny zasilacz laboratoryjny napięcia stałego i zmieniano napięcie wejściowe od 10mV do 6V z krokiem kilku punktów na dekadę. Zebrane dane wyjściowe za pomocą woltomierza przedstawiono w poniższej tabeli:

Napięcie wejściowe U_1 [mV]	Napięcie wyjściowe U_2 [V]
10	-2,9388
15	-3,1941
20	-3,3357
30	-3,5166
40	-3,639
60	-3,802
80	-3,9137
100	-3,9962
150	-4,1512
200	-4,26
300	-4,4139
400	-4,5239
600	-4,6819

800	-4,7964
1000	-4,887
1500	-5,0552
2000	-5,1778
3000	-5,3552
4000	-5,4835
6000	-5,6667

Tabela 6. Zależność napięcia na wyjściu wzmacniacza nieodwracającego dla różnych częstotliwości sygnału



Wykres 5. Charakterystyka $U_{wy2} = f(U_1)$ dla napięcia wejściowego w skali logarytmicznej i dofitowana krzywa wraz z równaniem.

Na powyższym wykresie widać logarytmiczną charakterystykę odpowiedzi wzmacniacza na sygnał wejściowy. Wzór funkcji na napięcie wyjściowe na podstawie danych dla naszego wzmacniacza:

$$U_{out} = \left(-0,406774019 \ln \left(\frac{U_{in}}{1[mV]} \right) - 2,100443186 \right) [V] \quad (10)$$

Niepewność współczynnika a: $u(a) = 0,0055[V]$.

Niepewność współczynnika b: $u(b) = 0,0140[V]$.

Dokładność logarytmowania oszacowano wyliczając pierwiastek błędu średniokwadratowego. Błąd średniokwadratowy wyliczono ze wzoru:

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - y(x_i))^2 = 9,32028 * 10^{-4} \text{ [V}^2\text{]} \quad (11)$$

gdzie: n - liczba punktów, y_i - wartości zmierzone, $y(x_i)$ - wartości wyznaczone przy pomocy dopasowanej krzywej.

Pierwiastek błędu średniokwadratowego wynosi zatem:

$$\text{RMSE} = \sqrt{\text{MSE}} = 3,0529 * 10^{-2} \text{ [V]} \quad (12)$$

W takich warunkach funkcja logarytmiczna jest linią prostą przez co można stwierdzić dużą dokładność logarytmowania. Wartość RMSE świadczy o bardzo dużej dokładności. Ćwiczenie zostało wykonane poprawnie.