

sem. V
Grupa I
(pon. 13:15)

Elektroniczna Aparatura Medyczna
Raport z Laboratorium

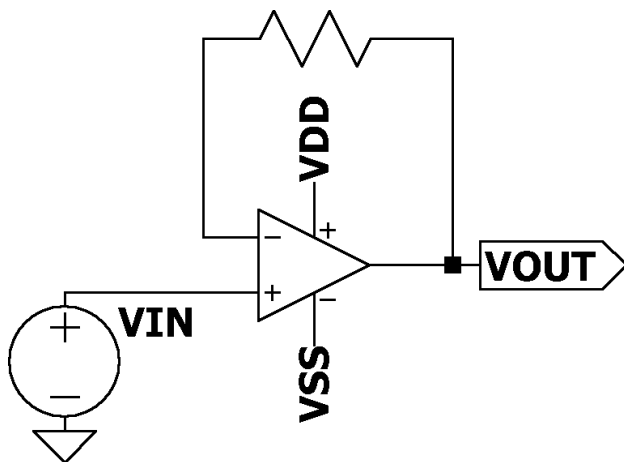
Autorzy:
Krzysztof Domański (419630)
Igor Głowacz (419808)

Wzmacniacze operacyjne w układach LTI (Linear Time-Invariant)

1 Wtórnik napięcia

1.1 Układ wtórnika napięciowego

Testowany układ wtórnika napięciowego przedstawiono na poniższym schemacie. Układ zasilano napięciem symetrycznym $\pm 10V$ z dwóch połączonych szeregowo zasilaczy laboratoryjnych. Napięcia na wejście podawano w odniesieniu do masy (napięcia $0V$).



1.2 Teoretyczne wzmocnienie układu

Układ wtórnika napięciowego na wzmacniaczu operacyjnym wykorzystuje fakt że WO^1 robi wszystko, aby trzymać oba wejścia na tym samym poziomie napięciowym ($V_+ = V_-$),² stąd:

$$V_+ = V_{in} = V_-$$

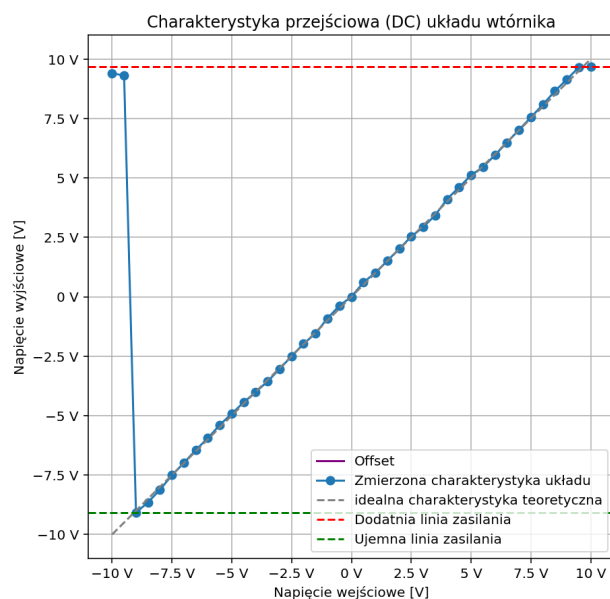
$$V_{out} = V_{in} + I_{in}R_{fb} + V_{os} \simeq V_{in}$$

$$\text{stąd: } \frac{V_{out}}{V_{in}} = 1$$

Układ wtórnika napięciowego jest specjalną odmianą wzmacniacza nieodwracającego, gdzie rezystancja z wejścia odwracającego do masy dąży do nieskończoności, a rezystancja w sprzężeniu zwrotnym ma zazwyczaj mniejszą, skończoną wartość, stąd wzmocnienie jest około równe jedności.

1.3 Charakterystyka przejściowa (DC)

Pomiary dla zostały wykonane za pomocą oscyloskopu Rigol DS1102 oraz generatora Rigol DG812. Użyto funkcji **Avg** w sekcji **Measure** oscyloskopu. Na wejście podawano napięcia z zakresu od $-10V$ do $10V$ z krokiem $0.5V$.



Zakres napięć wyjściowych mieścił się w zakresie od $-9.08V$ do $9.67V$. Wyznaczony offset napięciowy dla podanego napięcia $0V$ wynosił $2mV$. Jest to wartość mieszcząca się podanym w nocie katalogowej napięciu niezrównoważenia (Typ. $5mV$ oraz Max $15mV$).

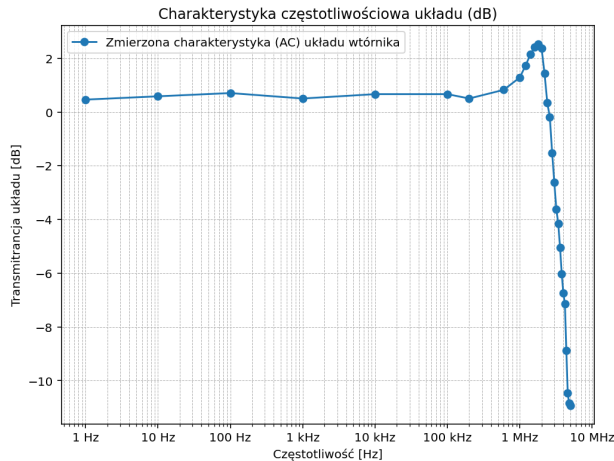
Na charakterystyce przejściowej widoczny jest także efekt inwersji dla dwóch punktów pomiarowych (napięcia wejściowe $-10V$ oraz $-9.5V$). Jest to zgodne z informacjami zawartymi w sekcji **APPLICATION HINTS** na stronie 10 noty katalogowej wzmacniacza TL082: **Exceeding the negative common-mode limit on either input will cause a reversal of the phase to the output and force the amplifier output to the corresponding high or low state.**

¹WO = wzmacniacz operacyjny

²zakładamy, że prąd wpływający do wejść wzmacniacza jest znikomy oraz offset napięciowy wzmacniacza jest do pominięcia

1.4 Charakterystyka częstotliwościowa (AC)

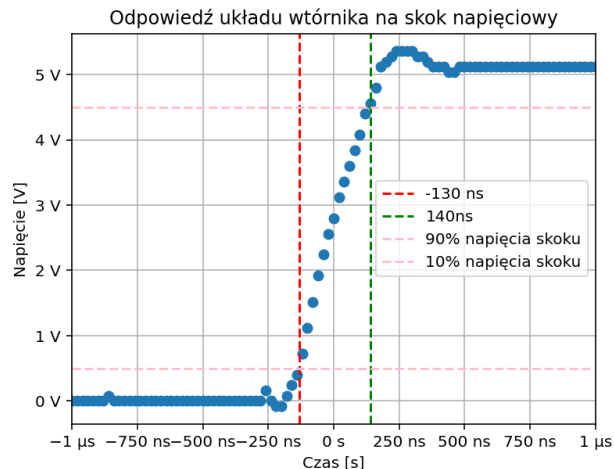
Pomiary dla zostały wykonane za pomocą oscyloskopu Rigol DS1102 oraz generatora Rigol DG812. Na wejście układu podano sygnał sinusoidalny o amplitudzie $2V_{pp}$.



Wzmocnienie utrzymuje się na poziomie około jedności ($\approx 0dB$) aż do częstotliwości granicznej. W częstotliwości granicznej ($\approx 2MHz$) występuje lekki "peaking" co jest oznaką braku stabilności (margines fazy $\leq 45deg$). W nocie katalogowej nie znaleziono informacji o tym czy TL082 jest unity-stable.

1.5 Slew Rate

Pomiar SR został wykonany za pomocą oscyloskopu Rigol DS1102 oraz generatora Rigol DG812. Dane zapisano w postaci pliku .csv na pendrive. Obliczenia wykonano na podstawie uzyskanych danych oraz porównano z dokumentacją.



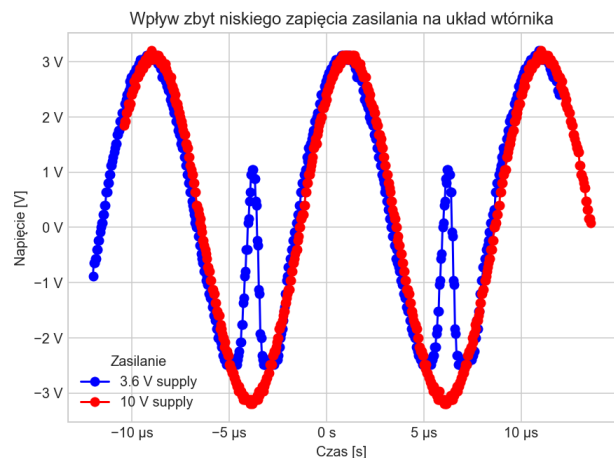
Obliczenia SR na podstawie wyliczonych danych:

$$\begin{aligned} SR &= \frac{\Delta V}{\Delta t} = \frac{5V - 0V}{270ns} \\ &= \frac{5}{270} * 10^9 \frac{V}{s} \\ &\approx 0.1851 * 10^8 \frac{V}{s} \\ &= 18.51 * \frac{V}{10^{-6} * s} = 18.51 \frac{V}{\mu s} \end{aligned}$$

Układ odpowiedział zgodnie z założeniami na podany skok napięciowy. Na powyższym wykresie napięcia od czasu widoczny jest lekki undershoot/overshoot. Wyliczona wartość SR ($18.51 \frac{V}{\mu s}$) jest zbliżona do wartości typowej³ ($13 \frac{V}{\mu s}$). Niedokładność lub ewentualne zawyżenie może wynikać z niedokładności pomiaru momentów, gdy napięcie uzyskało 10% lub 90% wartości napięcia końcowego (samo zbocze zawiera tylko 23 próbki).

1.6 Wpływ zmiany napięcia zasilania na sygnał

Pomiary zostały wykonane za pomocą oscyloskopu Rigol DS1102 oraz generatora Rigol DG812. Dane zapisano w postaci dwóch plików .csv na pendrive. Pomiary wykonano dla napięć zasilania $\pm 10V$ oraz $\pm 3.6V$.

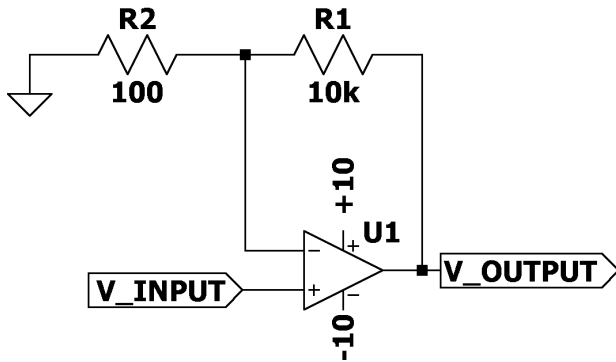


³SR - Slew Rate $V_{ss} = 15V$, $T_a = 25C$, Min: 8, Typ: $13 V/\mu s$

2 Wzmacniacz nieodwracający

2.1 Układ wzmacniacza nieodwracającego

Testowany układ wzmacniacza nieodwracającego przedstawiono na poniższym schemacie. Układ zasilano napięciem symetrycznym $\pm 10V$ z dwóch połączonych szeregowo zasilaczy laboratoryjnych. Napięcia na wejście podawano w odniesieniu do masy (napięcia $0V$).



2.2 Teoretyczne wzmocnienie układu

Układ wzmacniacza nieodwracającego na wzmacniaczu operacyjnym wykorzystuje fakt że WO "próbuję trzymać" oba wejścia (odwracające i nieodwracające) na tym samym potencjale, stąd: $V_{in} = V_+ = V_-$. Dokładne obliczenia wzmocnienia napięciowego przedstawiono poniżej:

$$V_{in} = V_+ = V_-$$

$$V_{R_2} = V_- = I_{R_2} * R_2 \quad \text{stąd: } I_{R_2} = \frac{V_{in}}{R_2}$$

$$I_{R_1} = I_{R_2}$$

$$V_{R_1} = I_{R_1} * R_1$$

$$V_{out} = V_{R_2} + V_{R_1} = V_{in} + I_{R_1} * R_1 = V_{in} + \frac{V_{in}}{R_2} * R_1$$

$$= V_{in} * \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) \quad \text{stąd:}$$

$$\frac{V_{out}}{V_{in}} = 1 + \frac{R_1}{R_2} = 1 + \frac{10k}{100} = 101 \approx 100 \left[\frac{V}{V}\right] = 40dB$$

Wzmocnienie napięciowe dane jest przez stosunek dwóch rezystorów w sumie z jednością. W powyższych obliczeniach nie wzięto pod uwagę skończonego pasma wzmocnienia dla WO. Na szczęście WO posiada parametr GBW (gain-bandwidth ratio), który łatwo pozwala nam oszacować pasmo dla danego ustawionego przez stosunek rezystorów wzmocnienia.

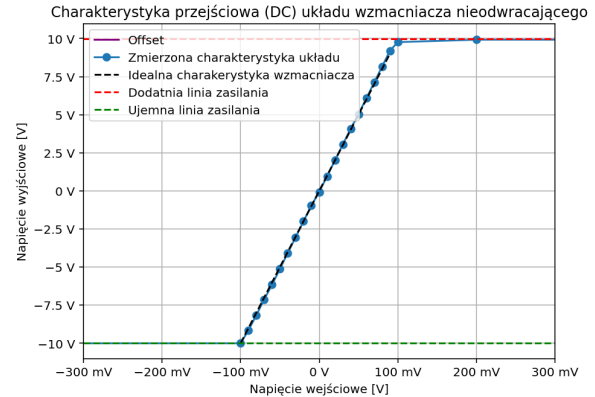
$$GBW = Gain * BW = \left(1 + \frac{R_1}{R_2}\right) * BW = const$$

$$BW = \frac{GBW}{Gain} = \frac{4MHz}{101 \frac{V}{V}} \approx 40kHz$$

Występuje tak zwana wymiana pasma na wzmocnienie.

2.3 Charakterystyka przejściowa (DC)

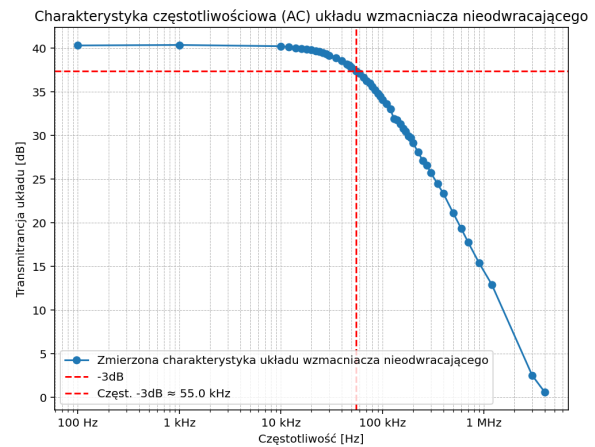
Pomiary dla zostały wykonane za pomocą oscyloskopu Rigol DS1102 oraz generatora Rigol DG812. Na wejście układu podano napięcia stałe co $100mV$, a w interesującej nas części charakterystyki (od $-100mV$ do $100mV$) krok zmniejszono do $10mV$.



Układ w praktyce działa tak jak zakładano w teoretycznych rozważaniach. Wzmocnienie układu wynosi ≈ 101 .

2.4 Charakterystyka częstotliwościowa (AC)

Pomiary dla zostały wykonane za pomocą oscyloskopu Rigol DS1102 oraz generatora Rigol DG812. Na wejście układu podano przebieg sinusoidalny o amplitudzie $V = 60mV_{pp}$.



Układ spełnia założenia teoretyczne - następuje wymiana wzmocnienia na pasmo według wzoru:

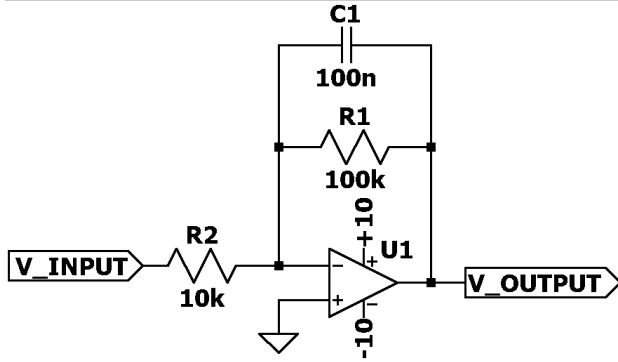
$$Gain * BW = 101 \left[\frac{V}{V}\right] * 55[kHz] = 5555kHz \approx 5.6MHz$$

$$GBW_{datasheet} = 4MHz$$

GBW z noty katalogowej oraz iloraz wzmocnienia oraz pasma są zbliżone. Różnica może wynikać z niedokładności podanego parametry GBW. W notce katalogowej nie podane zostały wartości maksymalna ani minimalna, podano tylko wartość typową.

3 Filtr dolnoprzepustowy (układ całkujący) oparty o wzmacniacz odwracający

3.1 Układ całkujący na wzmacniaczu operacyjnym



Układ wzmacniacza odwracającego na wzmacniaczu operacyjnym wykorzystuje fakt że WO na wejściu odwracającym trzyma punkt "masy pozornej", stąd: $V_- = 0V$. Dodatkowo w pętlę sprzężenia wpięty został kondensator który powoduje dolnoprzepustowe/całkujące zachowanie układu.

3.2 Teoretyczne wzmocnienie układu

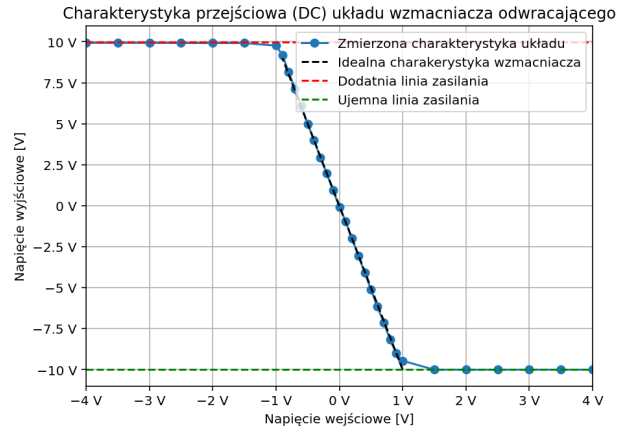
Dokładne obliczenia wzmocnienia napięciowego oraz analiza lokacji biegunów przedstawiona została poniżej:

$$\begin{aligned}
 I_{R_2} &= \frac{R_2}{V_{in}} \\
 I_f &= I_{R_2} \\
 I_f &= \frac{R_1 \parallel \frac{1}{sC_1}}{-V_{out}} = \frac{\frac{R_1}{1+sR_1C_1}}{-V_{out}} \\
 \frac{R_2}{V_{in}} &= \frac{\frac{R_1}{1+sR_1C_1}}{-V_{out}} \\
 \frac{V_{out}}{V_{in}} &= \frac{\frac{R_1}{1+sR_1C_1}}{-R_2} = -\frac{R_1}{R_2} * \left(\frac{1}{1+sR_1C_1} \right) \approx \\
 (\text{for DC}) &\approx -\frac{R_1}{R_2} = -10 \frac{V}{V} \\
 &= 20\text{dB}
 \end{aligned}$$

Wzmocnienie układu w niskich częstotliwościach dany jest przez stosunek rezystorów R_1 oraz R_2 ze znakiem minus. Układ posiada także jeden biegun w $\omega_{LP} = -\frac{1}{R_1C_1}$. Jest to wzmacniacz z filtrem dolnoprzepustowym o częstotliwości granicznej danej przez rezystor R_1 oraz kondensator C_1 .

3.3 Charakterystyka przejściowa (DC)

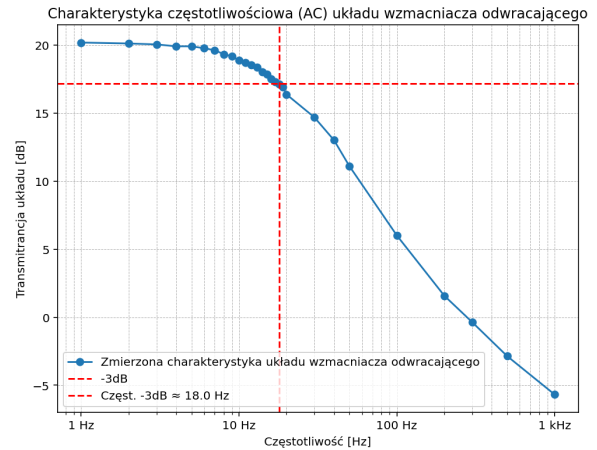
Pomiary dla zostały wykonane za pomocą oscyloskopu Rigol DS1102 oraz generatora Rigol DG812. Na wejście układu podano napięcia stałe co $500mV$, a w interesującej nas części charakterystyki (od $-1V$ do $1V$) krok zmniejszono do $100mV$.



Wejściowy offset napięciowy zmierzono na poziomie $80mV$.

3.4 Charakterystyka częstotliwościowa (AC)

Pomiary dla zostały wykonane za pomocą oscyloskopu Rigol DS1102 oraz generatora Rigol DG812. Na wejście układu podano przebieg sinusoidalny o amplitudzie $V = 60mV_{pp}$.



Podana charakterystyka zgadza się z założeniami teoretycznymi. Wzmocnienie układu w niskich częstotliwościach wynosi $20\text{dB} = 10$ co jest stosunkiem użytych rezystorów $R_1 = 100k\Omega$ oraz $R_2 = 10k\Omega$. Układ działa jak filtr dolnoprzepustowy dla częstotliwości -3dB : $f_g = 18\text{Hz}$. Teoretyczna częstotliwość graniczna została obliczona poniżej:

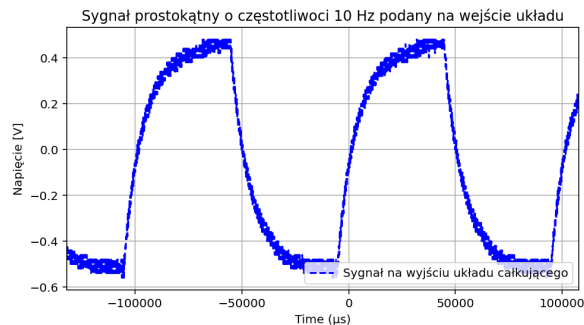
$$f_{gT} = \frac{1}{2\pi R_1 C_1} = \frac{1}{2\pi * 100k * 100n} \approx 15.91\text{Hz}$$

Wszelkie rozbieżności pomiędzy wyznaczoną teoretyczną częstotliwością graniczną a pomiarami mogą wynikać z niedokładności użytych komponentów. Pomimo tego wartości zmierzone a teoretycznie nie odbiegają od siebie w znaczącym stopniu.

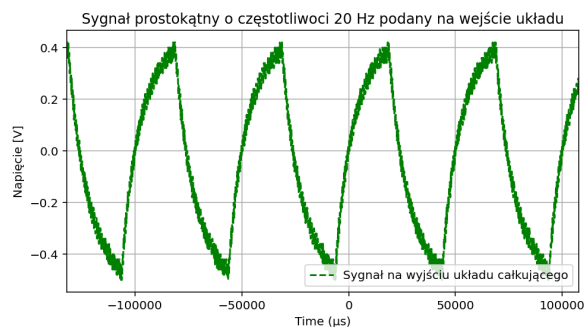
3.5 Przykładowe przebiegi

Na wejście układu podano sygnał prostokątny o amplitudzie $100mV_{pp}$ o częstotliwości:

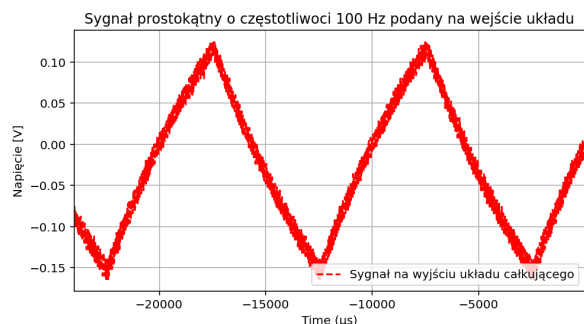
a) niższej niż częstotliwość graniczna filtra: 10 Hz



b) nieco wyższej niż częstotliwość graniczna filtra: 20 Hz



c) dużo większej niż częstotliwość filtra: 100 Hz



Układ całkujący wykorzystuje fakt, iż dla stałych czasowych $\tau \gg \tau_{RC}$ ładowanie oraz rozładowywanie kondensatora przypomina całkowanie danego przebiegu. W miarę zmniejszania się częstotliwości sygnału do częstotliwości granicznej (danej przez R oraz C wpięte w pętlę sprzężenia zwrotnego) widać iż podawany na wejście przebieg prostokątny przypomina ładowanie oraz rozładowywanie kondensatora, zamiast matematyczną operację całkowania.

3.6 Wnioski z ćwiczenia

3.6.1 Wtórnik napięcia

W pierwszej części laboratorium zweryfikowano teoretyczne rozważania, dotyczące układu wtórnika, przeprowadzono analizę charakterystyki przejściowej (DC), częstotliwościowej (AC), dokonano pomiarów parametru "Slew Rate" oraz zmierzono wpływ napięcia zasilania na sygnał - zaobserwowano efekt inwersji związany z przekroczeniem limitu napięcia typu common na wejściach.

Nasze rozważania teoretyczne/symulacje zgadzają się z wynikami uzyskanymi podczas pomiarów. Symulacje wykonane zostały w programie LTspice po odpowiednim skonfigurowaniu modelu *UniversalOpamp2* aby zgadzał się z parametrami wzmacniacza TL082 z noty katalogowej.

3.6.2 Wzmacniacz nieodwracający

W tej części ćwiczenia przeprowadzono analizę teoretyczną dla układu wzmacniacza nieodwracającego o wzmocnieniu 100 (40dB). Wyznaczono charakterystyki DC oraz AC. Zaobserwowano wymianę wzmocnienia an pasmo.

3.6.3 Filtr dolnoprzepustowy oparty o wzmacniacz odwracający

W ostatniej części ćwiczenia przeprowadzono analizę teoretyczną dla filtra dolnoprzepustowego I-rzędu o wzmocnieniu 10 oraz częstotliwości granicznej 18Hz. Wyznaczono charakterystyki DC oraz AC. Zauważono, że układ całkuje przebiegi wejściowe dla częstotliwości znacznie wyższych od częstotliwości granicznej filtra.