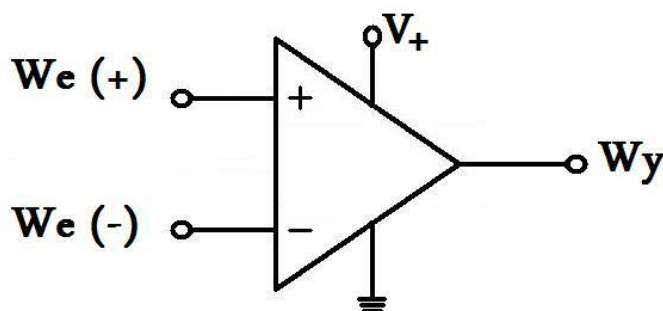


imię i nazwisko	data wykonania	przewodzący ćwiczenia
Krzysztof Czarnowus	10.04.2024 r. grupa 15 (środa, godz. 12.15)	dr Szymon Niedźwiecki
<b>3. Wzmacniacz operacyjny.</b>		

## 1. Wstęp teoretyczny

Wzmacniacz operacyjny jest analogowym układem elektronicznym o różnorodnym zastosowaniu; po zastosowaniu zewnętrznych elementów biernych oraz odpowiednim wykorzystaniu sprzężenia zwrotnego możliwe jest skonstruowanie z jego pomocą sumatorów, filtrów, generatorów czy przerzutników<sup>1</sup>.



**Rys. 1.** Schemat wzmacniacza operacyjnego.  $W_e(+)$  jest wejściem nieodwracającym,  $W_e(-)$  wejściem odwracającym,  $V_+$  zasilaniem,  $W_y$  wyjściem<sup>2</sup>.

Posiada ona dwa wejścia i jedno wyjście. Wejście oznaczone znakiem minusa nazywane jest odwracającym, ponieważ sygnał dostarczony na nie zostaje przesunięty w fazie o  $180^\circ$ , podczas gdy sygnał na wejściu dodatnim, nieodwracającym, jest zgodny z sygnałem wejściowym. Zsumowane napięcie na wyjściu wyrazić można wzorem:

$$U_{wy} = K (U_{(+)} - U_{(-)}) \quad (1)$$

gdzie  $K$  jest wzmocnieniem napięcia charakterystycznym dla danego wzmacniacza,  $U_{wy}$  napięciem wyjścia, natomiast  $U_{(+)}$  i  $U_{(-)}$  napięciami odpowiednio na wejściu nieodwracającym i odwracającym<sup>3</sup>.

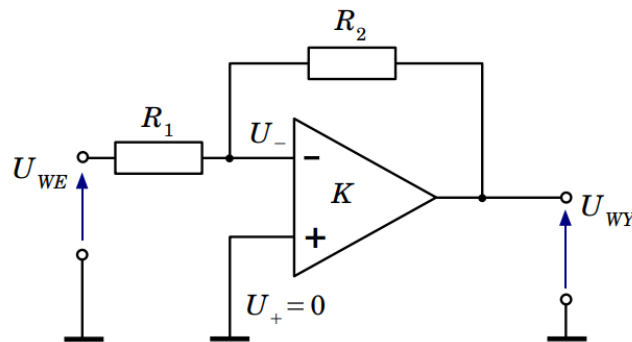
Jedną z podstawowych cech idealnego wzmacniacza operacyjnego jest nieskończenie szerokie pasmo przenoszenia częstotliwości, co oznacza, że powinien on działać poprawnie

przy sygnale o każdym zadanym okresie. W praktyce jednak podczas zwiększania częstotliwości sygnału w okolicach kilkudziesięciu MHz napotyka się granicę pasma przenoszenia, powyżej którego napięcie sygnału wyjściowego, wcześniej o wartości niezależnej od częstotliwości, zaczyna wyraźnie maleć<sup>3</sup>.

Jednym z układów zawierających wzmacniacz operacyjny o ujemnym sprzężeniu zwrotnym jest wzmacniacz odwracający fazę. Jego schemat przedstawiono na rysunku 2. Napięcie wyjściowe wyraża się wzorem:

$$U_{WY} = -\frac{R_2}{R_1} U_{WE} \quad (2)$$

gdzie  $R_1$  oraz  $R_2$  to rezystancje odpowiednich oporników przedstawionych na schemacie. Sygnał wyjściowy tego układu jest odbiciem lustrzanym sygnału wejściowego odpowiednio wzmocnionym – faza jest odwrócona o dokładnie  $180^\circ$ .

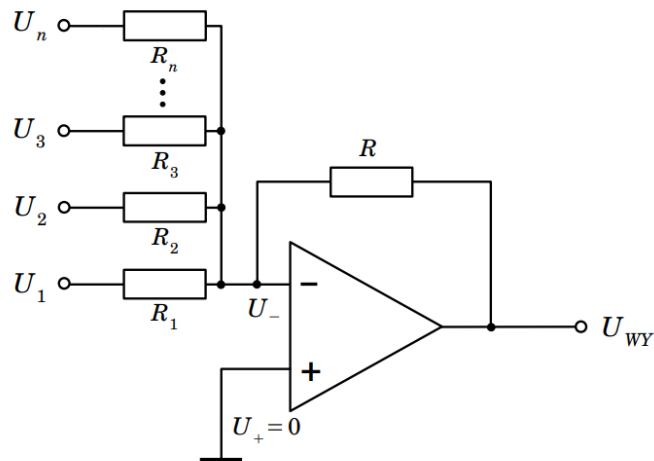


**Rys. 2.** Schemat wzmacniacza odwracającego fazę.  $R_1$  oraz  $R_2$  są opornikami, a wejście nieodwracające wzmacniacza połączone jest z uziemieniem<sup>3</sup>.

Innym układem zawierającym wzmacniacz z ujemnym sprzężeniem zwrotnym jest sumator, przedstawiony na rysunku 3. Posiada on  $n$  sygnałów wejściowych przepuszczonych przez  $n$  oporników oraz dodatkowy opornik o rezystancji  $R$ . Sygnał wyjściowy takiego układu wyraża wzór:

$$U_{WY} = -R \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right) \quad (3)$$

Sumuje on zatem sygnały wejściowe.

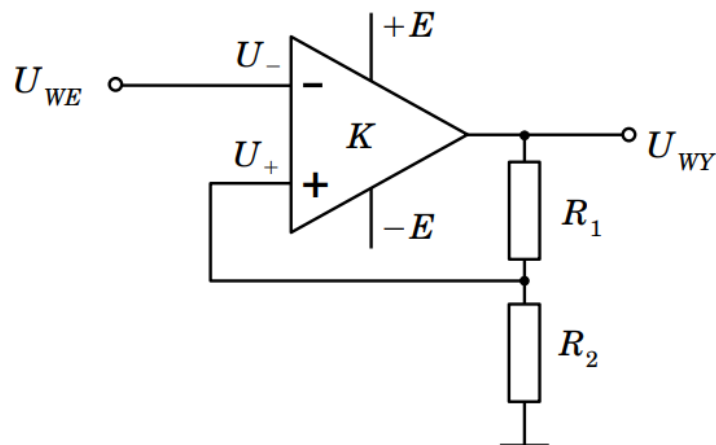


**Rys. 3.** Schemat sumatora złożonego z  $n$  oporników podłączonych w odpowiedni sposób do wejścia odwracającego fazę. Wejście nieodwracające połączone jest z uziemieniem<sup>3</sup>.

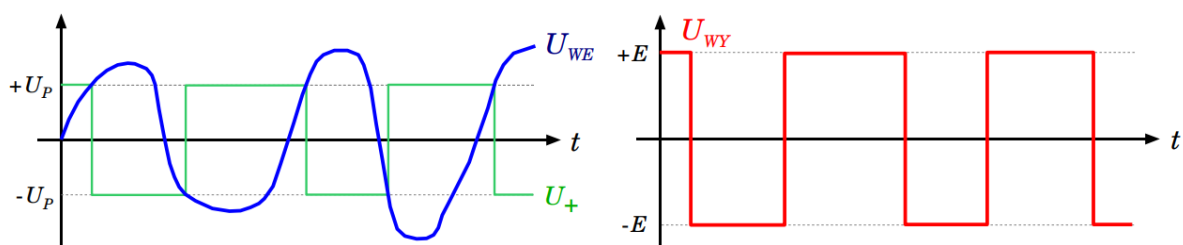
Wzmacniacz z dodatnim sprzężeniem zwrotnym najczęściej stosowany jest do konstruowania różnego rodzaju przerzutników. Jednym z nich jest bistabilny przerzutnik Schmitta. Sprzężenie realizowane jest w nim przez oporowy dzielnik napięcia, a napięcie wyjściowe może przyjąć jeden z dwóch stabilnych stanów – największą dozwoloną dodatnią (+E) oraz ujemną (-E) wartość, limitowane przez napięcie zasilania wzmacniacza. Przejście między stanami może nastąpić jedynie przy wystąpieniu odpowiedniego sygnału przerzutu. Napięcie na wejściu dodatnim zależne jest od wartości napięcia wyjściowego:

$$U_+ = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{WY} \quad (4)$$

Parametr  $U_+$  wyraża jednocześnie wartość tzw. napięcia przerzutu, czyli wartości sygnału wejściowego, przy którym następuje zmiana sygnału wyjściowego, a zatem również jednoczesna zmiana napięcia na wejściu nieodwracającym fazy wzmacniacza oraz wartości samego napięcia przerzutu na taką z odwrotnym znakiem. Na rysunku 4. przedstawiono schemat przerzutnika Schmitta, podczas gdy na rysunku 5 poglądową wizualizację wartości napięcia przerzutu oraz sygnału wyjściowego z układu dla zadanej fali sinusoidalnej.

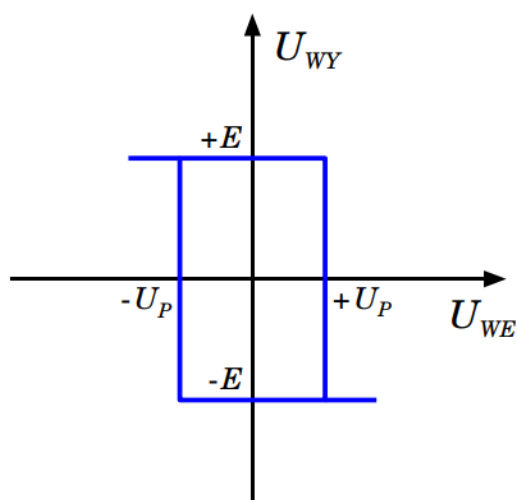


**Rys. 4.** Schemat bistabilnego przerzutnika Schmitta.  $R_1$  oraz  $R_2$  są opornikami realizującymi dzielnik napięcia, natomiast  $+E$  oraz  $-E$  napięciem zasilającym wzmacniacz<sup>3</sup>.



**Rys. 5.** Wizualizacja zależności napięcia przerzutu od sygnału wejściowego (po lewej) oraz uzyskanego sygnału wyjściowego (po prawej) dla zadanego napięcia sinusoidalnego<sup>3</sup>.

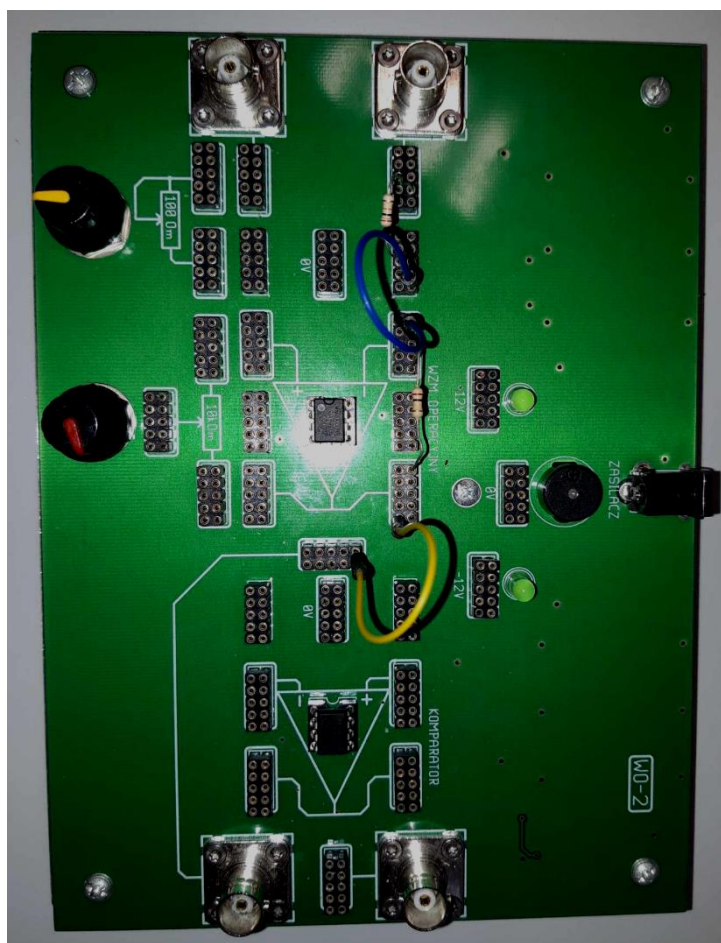
Obserwując sygnał wyjściowy dla takiego układu w trybie X-Y można zaobserwować charakterystyczną pętlę histerezy, z której można odczytać napięcie wyjściowe oraz napięcie przerzutu; sposób odczytu przedstawiono na rysunku 6.



**Rys. 6.** Pętla histerezy przerzutnika Schmitta<sup>3</sup>.

## 2. Opis ćwiczeń oraz omówienie wyników

W pierwszej części ćwiczenia skonstruowano wzmacniacz odwracający fazę. Do zrealizowania schematu przedstawionego na rysunku 2 użyto oporników o  $R_1 = 19,98 \text{ k}\Omega$  oraz  $R_2 = 198,7 \text{ k}\Omega$ , zatem wzmocnienie tego układu wyniosło stosunek tych dwóch wartości:



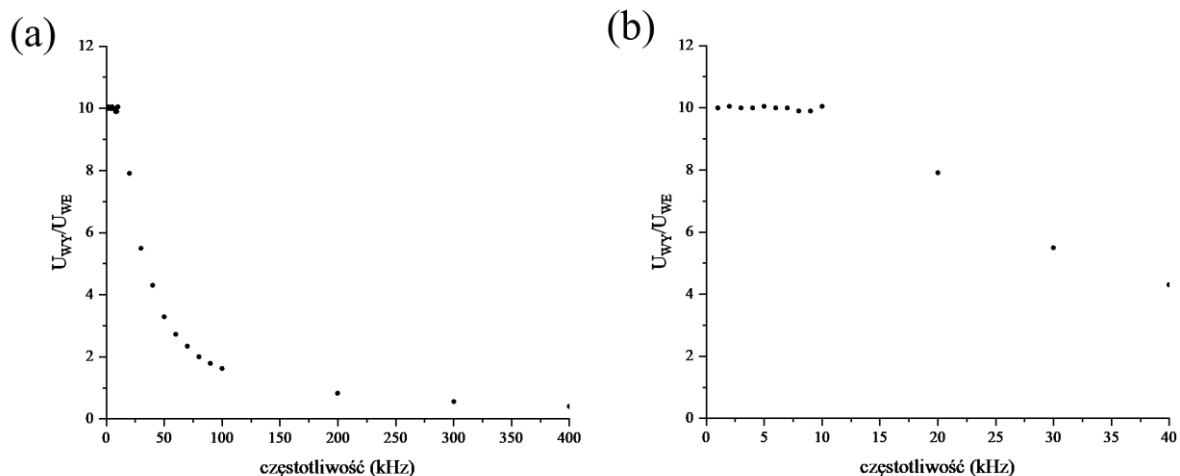
9,94.

**Rys. 7.** Płytką realizującą wzmacniacz odwracający fazę.

Na rysunku 7. przedstawiono płytkę realizującą zadany układ. Zdjęto jego charakterystykę częstotliwościową, zadając na wejście sygnał sinusoidalny o amplitudzie 2 V i zmieniając częstotliwość w zakresie od 1 do 400 kHz, aby zaobserwować przekroczenie granicy pasma przenoszenia. Na rysunku 8. przedstawiono charakterystykę częstotliwościową wzmacniacza odwracającego fazę, natomiast na rysunku 9. jego charakterystykę fazową. Wszystkie wartości zmierzone za pomocą wbudowanych funkcji oscyloskopu przedstawiono w tabeli 1, natomiast zarejestrowane obrazy załączono na końcu sprawozdania.

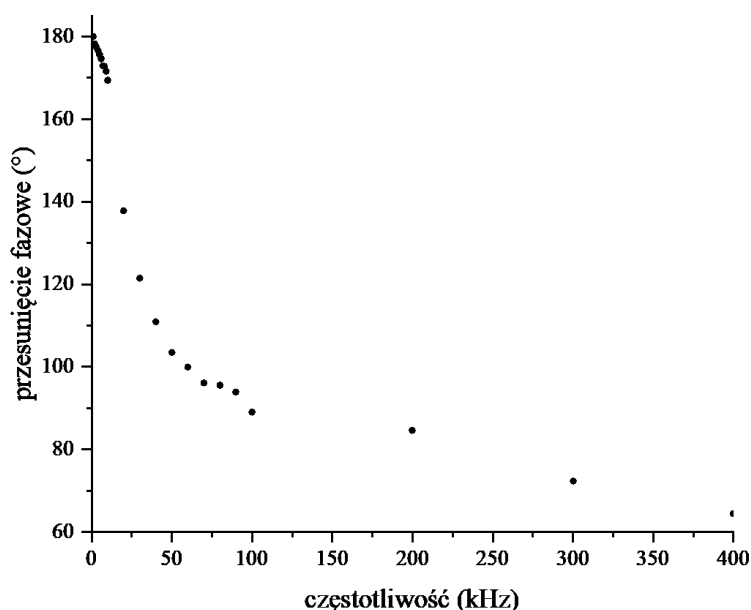
**Tabela 1.** Wartości odczytane z oscyloskopu podczas przeprowadzania analizy częstotliwościowej oraz fazowej wzmacniacza odwracającego fazę.

częstotliwość [kHz]	napięcie wejściowe [V]	napięcie wyjściowe [V]	stosunek napięć $U_{WY}/U_{WE}$	przesunięcie fazowe
1,000	1,98	19,8	10,00	180
1,999	1,97	19,8	10,05	178,2
2,995	1,98	19,8	10,00	177,4
3,999	1,98	19,8	10,00	176,6
4,998	1,97	19,8	10,05	175,6
5,997	1,98	19,8	10,00	174,6
7,002	1,98	19,8	10,00	172,9
7,995	2,00	19,8	9,90	172,8
9,004	2,00	19,8	9,90	171,6
10,01	1,97	19,8	10,05	169,4
20,00	2,01	15,9	7,91	137,8
29,98	2,02	11,1	5,50	121,5
39,97	2,02	8,69	4,30	110,9
50,01	1,99	6,54	3,29	103,5
59,95	2,02	5,50	2,72	99,95
69,96	2,02	4,73	2,34	96,13
79,99	2,02	4,04	2,00	95,56
89,89	2,02	3,61	1,79	93,88
99,98	2,02	3,28	1,62	89,04
199,8	2,01	1,66	0,83	84,64
300,2	2,01	1,12	0,56	72,36
399,9	2,02	0,811	0,40	64,45



**Rys. 8.** Pełna charakterystyka częstotliwościowa wzmacniacza odwracającego fazę (a)

wraz z przybliżeniem obszaru, w którym wykres przestaje być liniowy (b).

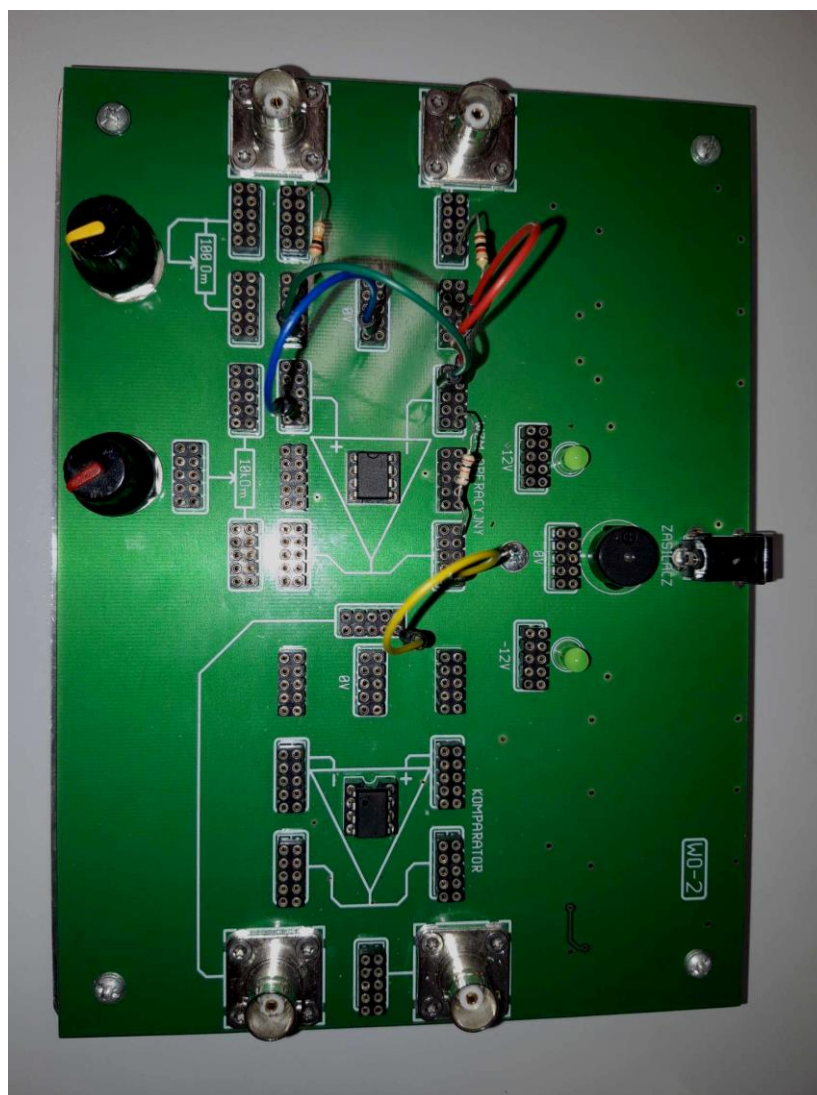


**Rys. 9.** Charakterystyka fazowa wzmacniacza odwracającego fazę.

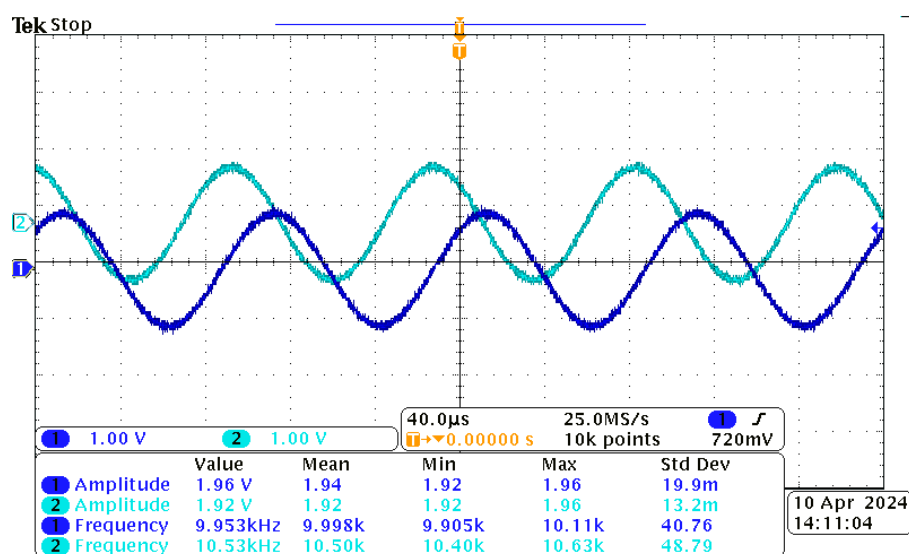
Na rysunku 8 można zauważyć, że zgodnie z oczekiwaniami wzmocnienie o początkowo stałej wartości zbliżonej do 10 po przekroczeniu pewnej granicy zaczyna gwałtownie spadać, aż w końcu ok. 200 kHz stosunek sygnału wyjściowego do wejściowego maleje poniżej jedności. Punkty doświadczalne zostały dobrane w taki sposób, że ciężko określić dokładną wartość granicy pasma przenoszenia – znajduje się ona przy wartości kilkunastu kHz.

Wykres charakterystyki fazowej wzmacniacza odwracającego fazę pokazuje natomiast, że odwrócenie fazy o dokładnie  $180^\circ$  następuje tylko przy nieskończenie niskich częstotliwościach. Nawet zmiany pomiędzy 1 a 10 kHz zauważalnie zmniejsza się wartość przesunięcia, z drugiej jednak strony jest ono wyraźne nawet dla wartości, w których wzmacniacz zaczyna osłabiać sygnał, powyżej 200 kHz.

W dalszej części ćwiczenia skonstruowano sumator o dwóch wejściach przedstawiony na rysunku 10. Na oba podano identyczne fale sinusoidalne o amplitudzie 2 V oraz zadanych częstotliwościach 1000 kHz oraz 1050 kHz. Wartości  $R_1$  oraz  $R_2$  wynosiły odpowiednio 19,98 k $\Omega$  oraz 19,97 k $\Omega$ , podczas gdy  $R_f = 198,7$  k $\Omega$ . Osobne fale przedstawiono na rysunku 11, podczas gdy sygnał zsumowany po przejściu przez układ na rysunku 12. Za pomocą kursorów zbadano częstotliwość dudnień i częstotliwość wypadkową, otrzymując odpowiednio wartości 500 Hz oraz 1020 kHz, a więc różnicę i średnią tych dwóch częstotliwości – co jest zgodne z oczekiwaniami.

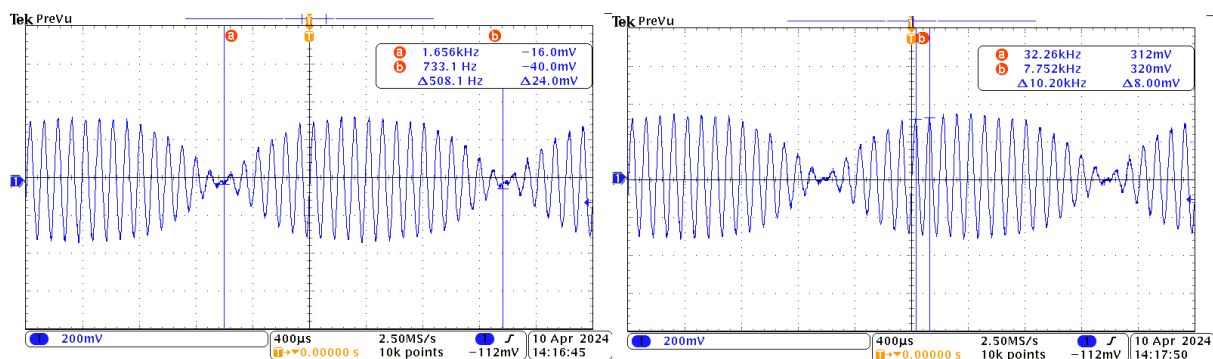


Rys. 10. Płytką realizującą sumator napięć.



Rys. 11. Obraz z oscyloskopu pokazujący podane na dwa wejścia niezależne sygnały sinusoidalne.

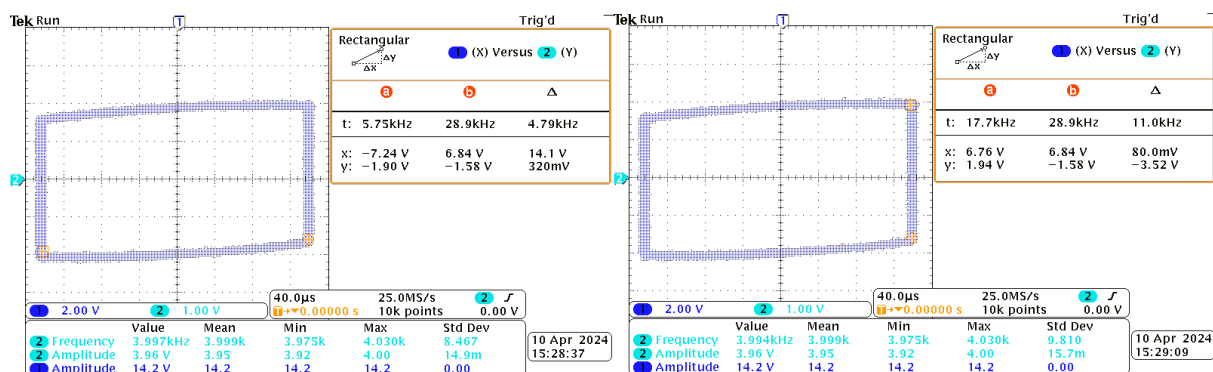




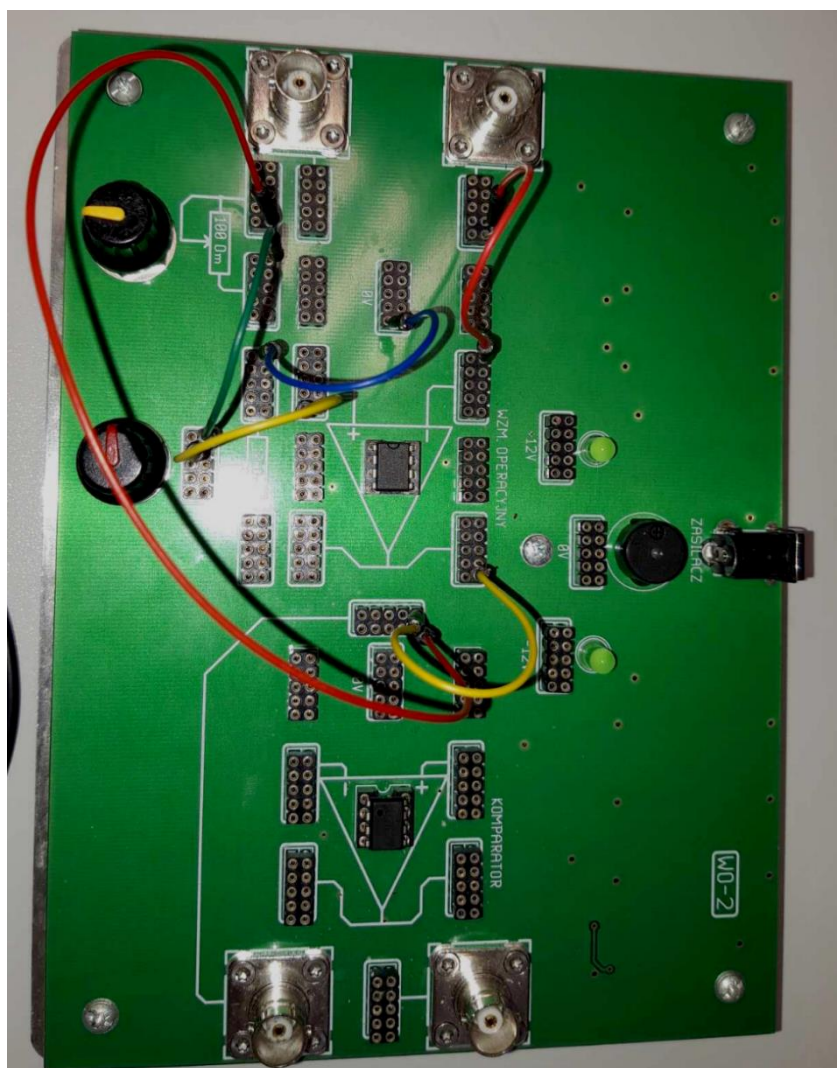
**Rys. 12.** Obrazy z oscyloskopu pokazujące dudnienia otrzymane w wyniku zsumowania sygnałów wraz z kursorami, za pomocą których wyznaczono odpowiednie częstotliwości.

Nawet bez odczytu amplitudy dudnień można zauważyć, że otrzymano wartość mniejszą niż spodziewana. Zgodnie ze wzorem 3 przy identycznych sygnałach wejściowych oraz rezystancjach oporników połączonych bezpośrednio z wejściami, powinno się otrzymać sygnał o zsumowanym i zwiększonym dziesięciokrotnie napięciu. Dla zadanych wartości i tak nie byłoby to możliwe ze względu na ograniczenie maksymalnego wzmocnienia do wartości napięcia zasilania wzmacniacza, z rysunku 12 można jednak metodą „na oko” dostrzec, że amplituda przyjmuje wartość ok. 1,2-1,5 V, zatem znacznie niższą niż teoretyczna. Możliwe, że jest to wynikiem błędu podczas przeprowadzania doświadczenia – niepoprawnie ustawiono wartość oporu na generatorze funkcji na zbyt niską.

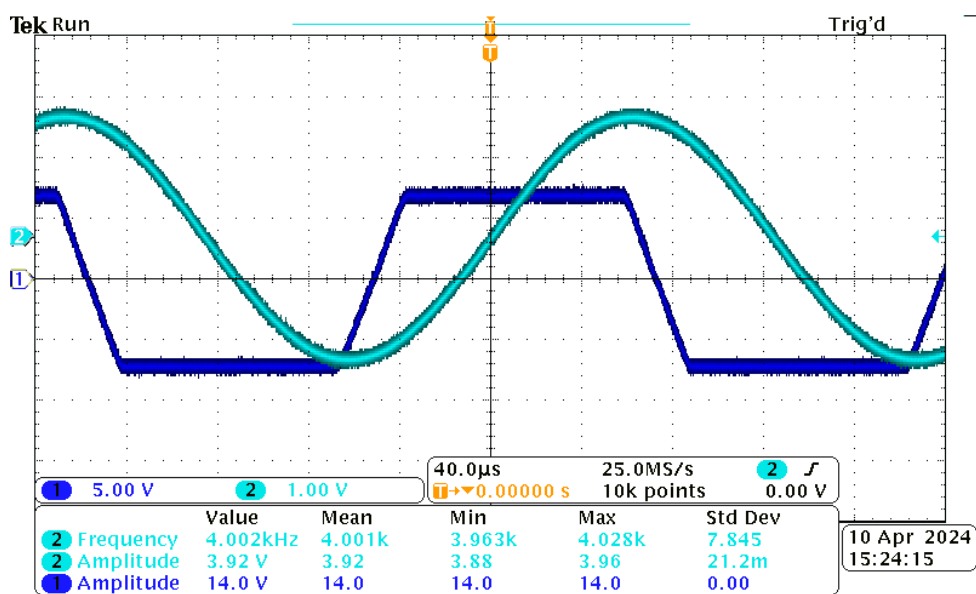
W ostatniej wykonanej części zadania skonstruowano przerzutnik Schmitta, przedstawiony na rysunku 14. Do skonstruowania dzielnika napięcia użyto wbudowanych w płytkę oporników, ustawiając wartości ich rezystancji na 93,8  $\Omega$  oraz 263,3  $\Omega$ . Na wejście zadano sygnał sinusoidalny o amplitudzie 4 V. Efekt działania układu przedstawiono na rysunku 15, podczas gdy obraz z oscyloskopu w trybie X-Y zilustrowano na rysunku 13.



**Rys. 13.** Obraz z oscyloskopu w trybie X-Y dla wejściowego sygnału sinusoidalnego przetworzonego przez przerzutnik Schmitta wraz z zaznaczonymi za pomocą kursorów odpowiednimi wartościami, służącymi do wyznaczenia napięcia przerzutu oraz amplitudy wyjścia.



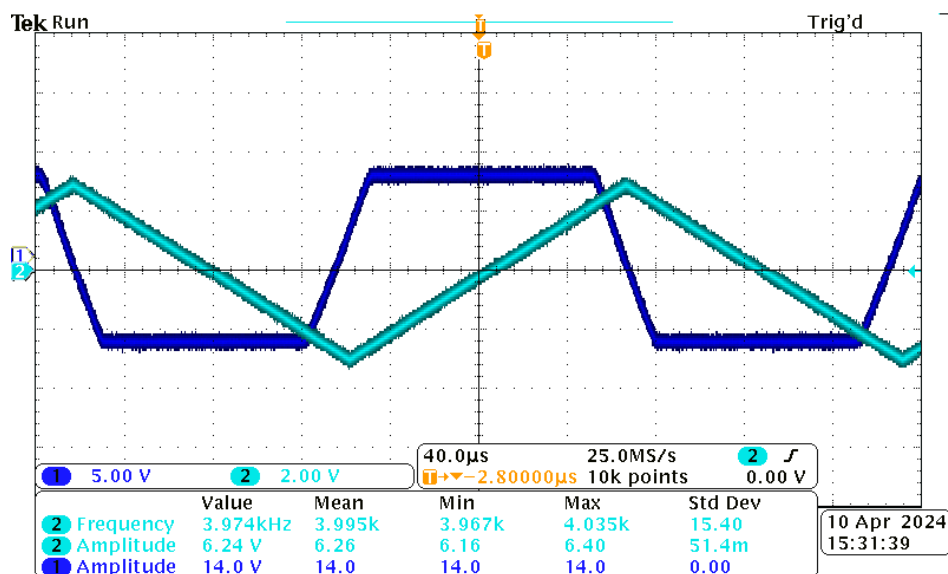
Rys. 14. Płytką realizującą przerzutnik Schmitta.



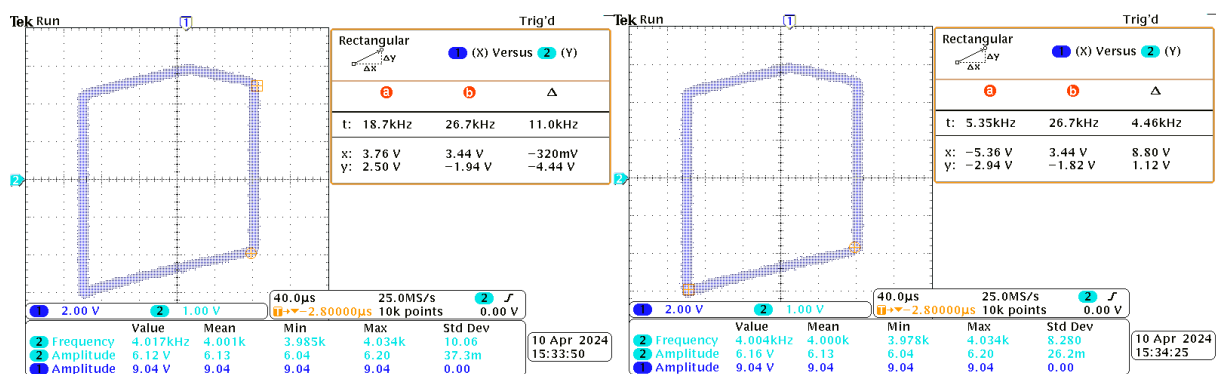
Rys. 15. Obraz z oscyloskopu przedstawiający wejściowy sygnał sinusoidalny oraz sygnał przetworzony przez przerzutnik Schmitta.

Amplitudę sygnału wyjściowego odczytano dwoma metodami – za pomocą wbudowanych funkcji oscyloskopu, otrzymując wartość 14,2 V, a także za pomocą kursorów w trybie X-Y, odczytując napięcie równe 14,08 V. Do wzoru 4 podstawiono pierwszą z tych wartości, jako bardziej dokładną, otrzymując teoretyczną wartość napięcia przerzutu równą 3,73 V. Porównując ją z odczytanym z rysunku 13 napięciem przerzutu widocznym na pętli histerezy wynoszącym 3,52 V można zauważyć, że wartości te nieznacznie się od siebie różnią; możliwe, że wynika to ze złego miejsca odczytania dolnej wartości napięcia, tj. prawego dolnego rogu pętli. Ma ona kształt odbiegający od idealnego spodziewanego prostokąta, w związku z czym wykonanie odczytu z lewego dolnego rogu prawdopodobnie przyczyniłoby się do zwiększenia odczytanej wartości napięcia przerzutu i zbliżenia jej do teoretycznej wartości oczekiwanej.

Analogiczne zabiegi przeprowadzono dla wejściowego sygnału trójkątnego o amplitudzie 6,26 V. Obraz sygnału wejściowego i wyjściowego nałożone na siebie przedstawiono na rysunku 16, podczas gdy zarejestrowaną w trybie X-Y pętlę histerezy na rysunku 17.



**Rys. 16.** Obraz z oscyloskopu przedstawiający wejściowy sygnał trójkątny oraz sygnał przetworzony przez przerzutnik Schmitta.



**Rys. 17.** Obraz z oscyloskopu w trybie X-Y dla wejściowego sygnału trójkątnego przetworzonego przez przerzutnik Schmitta wraz z zaznaczonymi za pomocą kursorów odpowiednimi wartościami, służącymi do wyznaczenia napięcia przerzutu oraz amplitudy wyjścia.

Podczas mierzenia za pomocą kursorów odpowiednich wartości na pętli histerezy niepoprawnie użyto kursorów, odczytując wartości z prawego górnego rogu pętli zamiast z zauważalnego na środku maksimum, w związku z czym ciężkie jest dokładne określenie empirycznie wyznaczonego napięcia przerzutu – jest ono nieznacznie większe od 5,44 V, a więc różnicy wartości y kursorów w prawym górnym oraz lewym dolnym rogu. Teoretyczne napięcie przerzutu obliczone za pomocą wzoru 4 wynosi 3,73 V, a więc znacznie mniejsze od otrzymanej empirycznie wartości; jest ona również większa od napięcia przerzutu dla fali sinusoidalnej, chociaż dla obu fal korzystano z tego samego przerzutnika. Napięcie wyjściowe wynosi natomiast ok. 8 V, a więc mniej niż dla sygnału sinusoidalnego.

Kształt pętli histerezy, a więc zależność sygnału wyjściowego od wejściowego, zgodnie z oczekiwaniami jest różna dla fali sinusoidalnej i trójkątnej. Pętla dla fali trójkątnej jest również wbrew oczekiwaniom zauważalnie niesymetryczna. Może to wynikać z działania na prądzie o wyraźnie wyższej amplitudzie niż zadana w ćwiczeniu.

### 3. Podsumowanie

W trakcie wykonanego ćwiczenia przetestowano niewielką część zastosowań wzmacniacza operacyjnego. Zaobserwowano, że nie realizuje on cech idealnego wzmacniacza, m.in. mając skończenie szerokie pasmo przenoszenia częstotliwości czy maksymalne wzmocnienie napięcia ograniczone przez napięcie zasilania.

Przez pierwszą część doświadczenia rezystancja generatora funkcyjnego ustawiona była na nieprawidłową, zbyt niską wartość – nie zaobserwowano tego podczas badania wzmacniacza odwracającego fazę, otrzymując zestaw parametrów zgodny z oczekiwaniami, natomiast podczas badania dudnień otrzymanych w wyniku działania sumatora zaobserwowano wyraźnie

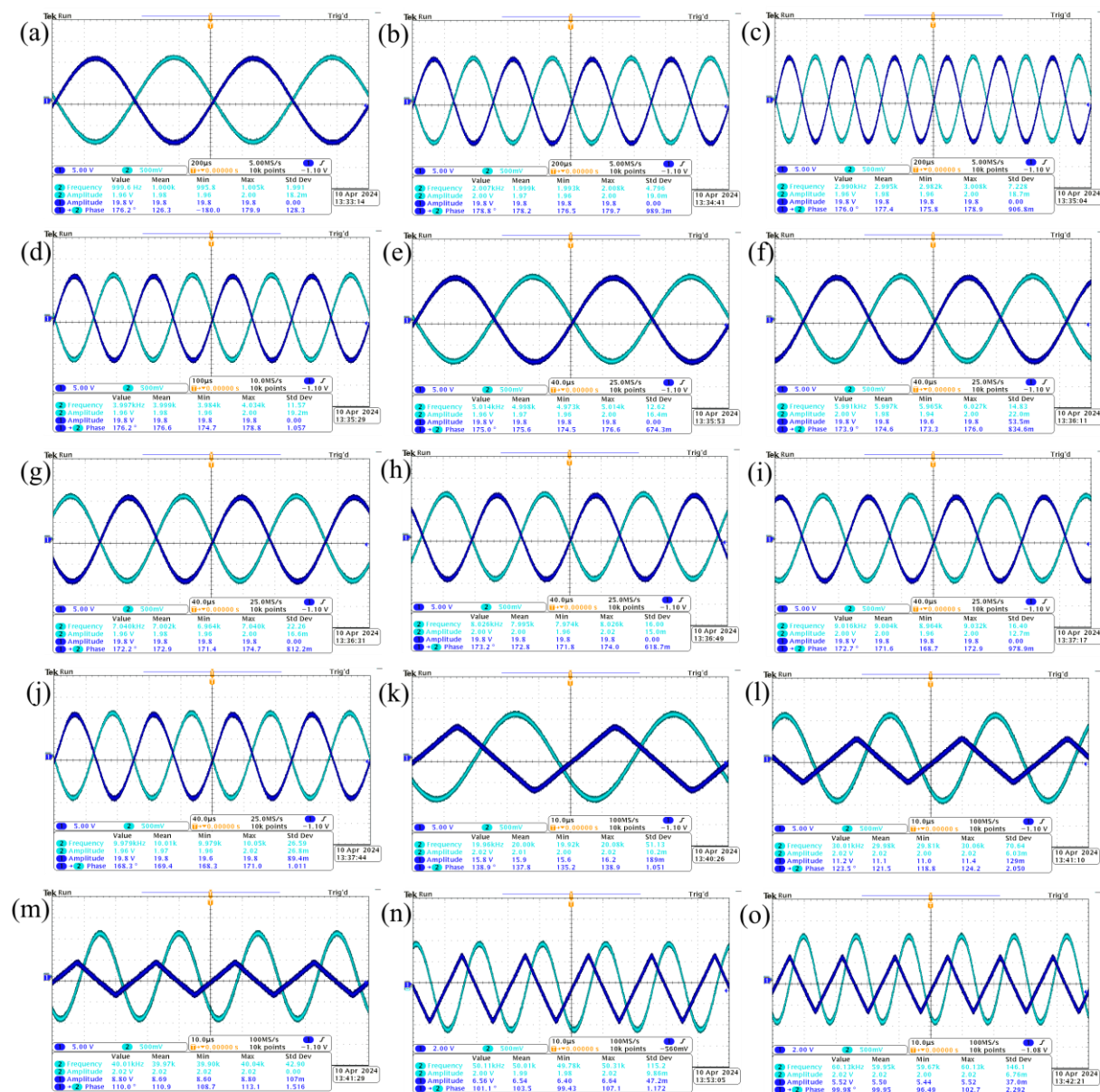
zaniżoną amplitudę sygnału wyjściowego – w rzeczywistości przy ustawionych tak wysokich napięciach wejściowych po dodatkowym wzmocnieniu powinna ona wykraczać poza maksymalny zakres wzmocnienia sygnałów.

Zbadano również bistabilny przerzutnik Schmitta, znajdując napięcie przerzutu bliskie maksymalnej wartości osiąganey przez sygnał wejściowy – wystarczająco niskie jednak, aby zaobserwować zjawisko przerzutu między dwoma stabilnymi stanami.

#### **4. Źródła**

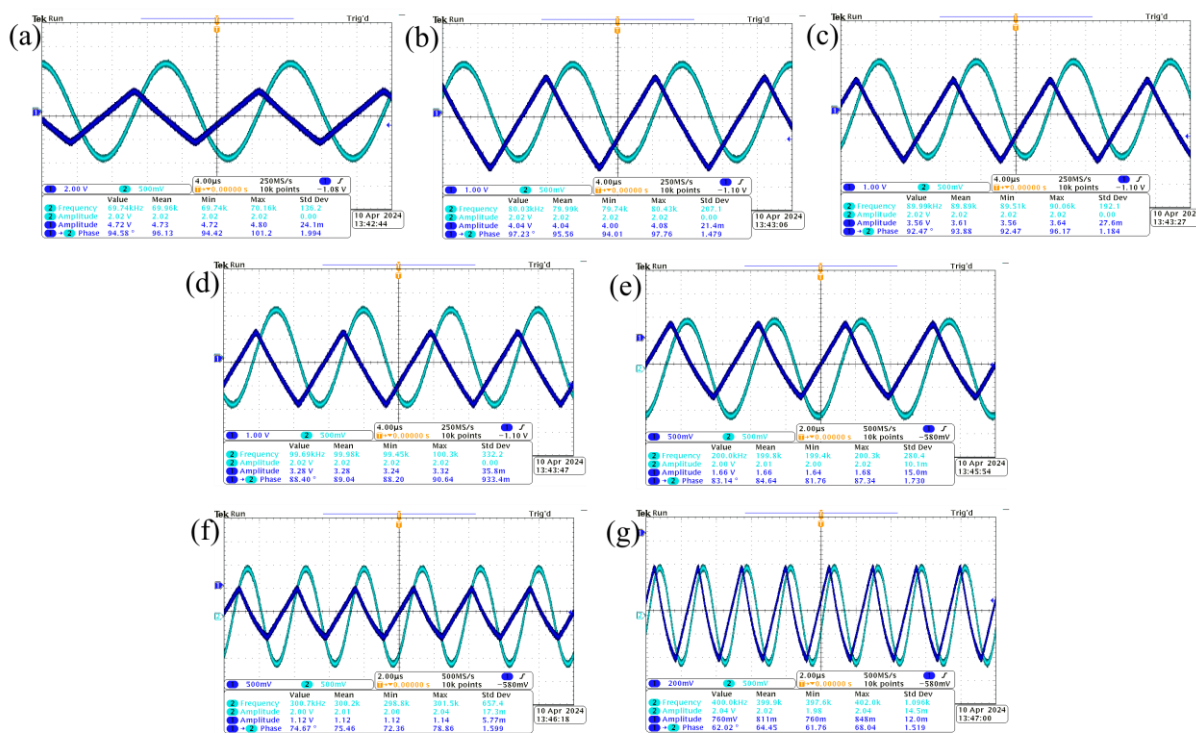
- [1] [https://home.agh.edu.pl/~ggora/PE/lab11\\_12/WzmacniaczOperacyjny\\_Wstep.pdf](https://home.agh.edu.pl/~ggora/PE/lab11_12/WzmacniaczOperacyjny_Wstep.pdf) (data dostępu: 19.04.2024 r.)
- [2] <https://www.robotyka.net.pl/wzmacniacze-operacyjne-cz-3/> (data dostępu: 19.04.2024 r.)
- [3] [https://zefir24.if.uj.edu.pl/pracownia\\_el/jb\\_w6.pdf](https://zefir24.if.uj.edu.pl/pracownia_el/jb_w6.pdf) (data dostępu: 19.04.2024 r.)

## 5. Skan notatek oraz niewykorzystane obrazy



**Rys. S1.** Obrazy służące odczytaniu odpowiednich wartości podczas wykonywania charakterystyki fazowej i amplitudowej wzmacniacza odwracającego fazę. Zestawienie sygnału wejściowego i wyjściowego o zadanych częstotliwościach: (a) 1 kHz, (b) 2 kHz, (c) 3 kHz, (d) 4 kHz, (e) 5 kHz, (f) 6 kHz, (g) 7 kHz, (h) 8 kHz, (i) 9 kHz, (j) 10 kHz, (k) 20 kHz, (l) 30 kHz, (m) 40 kHz, (n) 50 kHz, (o) 60 kHz





Rys. S2. Obrazy służące odczytaniu odpowiednich wartości podczas wykonywania charakterystyki fazowej i amplitudowej wzmacniacza odwracającego fazę. Zestawienie sygnału wejściowego i wyjściowego o zadanych częstotliwościach: (a) 70 kHz, (b) 80 kHz, (c) 90 kHz, (d) 100 kHz, (e) 200 kHz, (f) 300 kHz, (g) 400 kHz.



oporniki w zakresie  $k\Omega$ ,  $M\Omega$   
oscylloskop 1 MP2

stanowisko 3  
mierniki 1  
~~prędkość 2~~

sumator:  $R_1 = R_2$   
zbiór w dwóch zakresach częstotliwości  
suma  $\times 10$  musi być mniejsza od 20V  
sprawdzić też sygnały wychodzące

zmieniamy oporniki ze statycznych na dynamiczne, spicz! o!  
amplituda 2V, prędkość musi być na górnej fali  
napięcie ustalamy +/- większe poleć, potem dokładnie długie

①  $R_1 = 19,98 k\Omega$   
 $R_2 = 198,7 k\Omega$

②  $U_{we} = R \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} \right) U_{we}$  01 - zmierz na sucho  
 $R_1 = 19,98 \Omega$  wejścia częstotliwości  
 $R_2 = 19,97 \Omega$  i amplitudy  
 $R_f = 198,7 k\Omega$  02 - ~~zmierz~~  
03 -

~~10~~ ~~zmierz~~  $A_1 = 1,94 V$  1-kanał 1,  $R_1$   
 $A_2 = 1,92 V$  2-kanał 2,  $R_2$   
 $f_1 = 9,998 kHz$   
 $f_2 = 10,5 kHz$

④ ~~zmierz~~  $R_1 = 93,8 \Omega$   
 $R_2 = 263,3 \Omega$   $U_{we} = 14,2 V$   
01 - sinusoidalna  
02, 03 - histereza sin,  $U_{we} = V_P = \frac{R_2}{R_1 + R_2} U_{we} \approx 3,6 V$   
04 - trójkąt } 6V  
05, 06 - histereza 2

do tej pory mierz impedancje na generatorze

Rys. S3. Skan notatek z zeszytu laboratoryjnego.