

# Sprawozdanie

## Ćwiczenie 3

Jan Kwinta

Prowadzący ćwiczenia: dr. Szymon Niedźwiedzki

Data wykonania: 19 kwietnia 2023

### Wstęp

Tematem trzecich zajęć z elektroniki były wzmacniacze operacyjne i układy elektryczne budowane przy ich użyciu: wzmacniacz odwracający fazę, sumator, przerzutnik Schmidta i multiwibrator astabilny.

Wzmacniacz operacyjny to wzmacniacz o bardzo dużym wzmocnieniu napięciowym, który posiada dwa wejścia i jedno wyjście. Jedno wejście, oznaczane minusem to wejście odwracające – sygnał wyjściowy jest przesunięty w fazie o  $180^\circ$  względem sygnału przyłożonego do tego wejścia. Drugie wejście, oznaczane plusem, to wejście nieodwracające – sygnał wyjściowy jest zgodny w fazie z sygnałem podanym na to wejście.

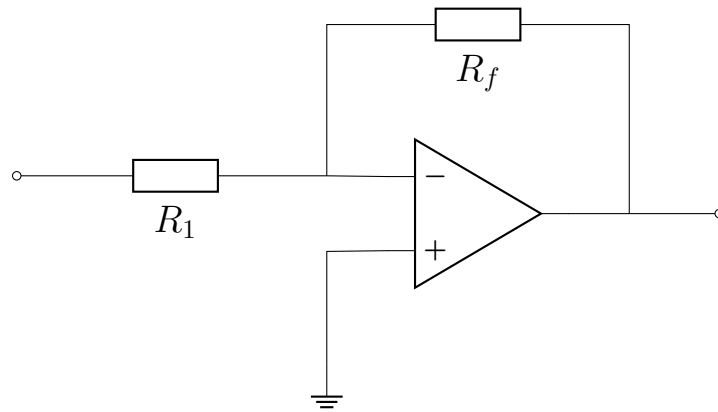
Napięcie na wyjściu wzmacniacza operacyjnego względem napięć na wejściu (+) i (-) dane jest funkcją:

$$U_{WY} = K(U_+ - U_-), \text{ gdzie } K \text{ to wzmocnienie napięciowe.}$$

Idealny wzmacniacz operacyjny ma nieskończenie duże wzmocnienie napięciowe  $K$ , nieskończenie dużą rezystancję wejściową, zerową rezystancję wyjściową, nieskończenie szerokie pasmo przenoszenia (częstotliwości sygnałów od 0 do  $\infty$  Hz) i napięcie wyjściowe równe zeru, jeżeli obydwa napięcia wejściowe są identyczne.

Wzmacniacz operacyjny jest zazwyczaj częścią większego układu, często obwodu sprzężenia zwrotnego (czyli takiego, gdzie wyjście oddziałuje na wejście). Schematy montowanych przeze mnie takich układów znajdują się na kolejnych stronach.

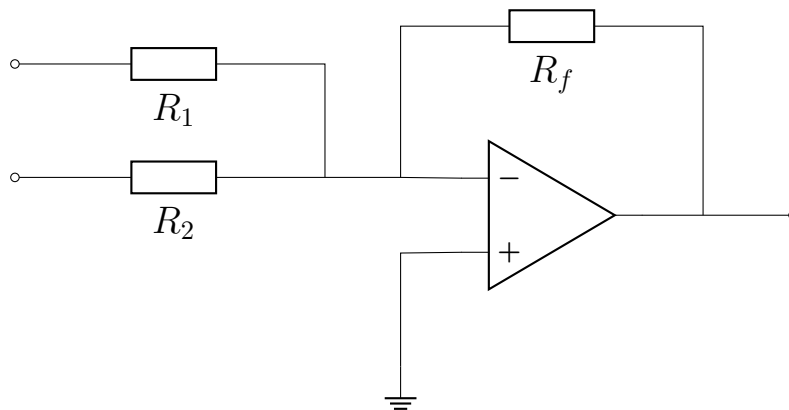
### Wzmacniacz odwracający fazę.



Napięcie na wyjściu jest funkcją napięcia na wejściu, która zależy od rezystancji użytych oporników. Minus przy stosunku oporów oznacza obrócenie fazy (przesunięcie o 180 stopni).

$$U_{WY} = -R_f \frac{U_{WE}}{R_1}$$

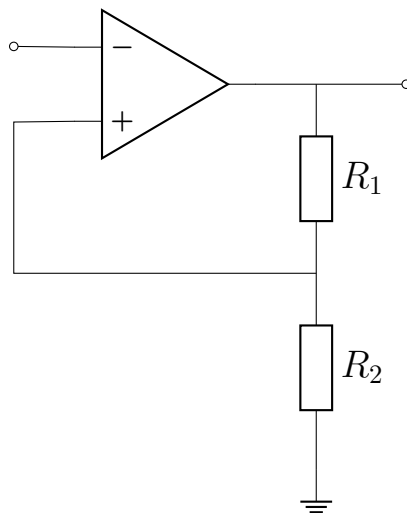
### Sumator o dwóch wejściach.



Sumator, nazywany też wzmacniaczem sumującym jest układem podobnym do powyższego, w którym napięcie wyjściowe zależy od sumy (ważonej oporami) napięć wejściowych. W przypadku dwóch wejść:

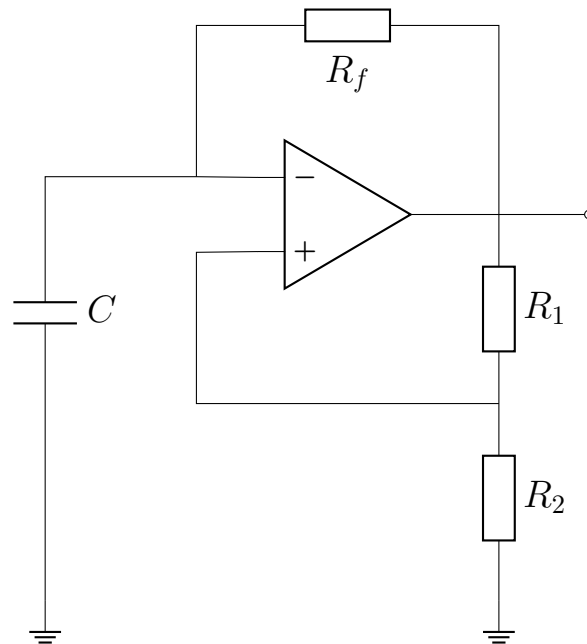
$$U_{WY} = -R_f \left( \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} \right)$$

## Przerzutnik Schmidta.



W tym układzie dodatnie sprzężenie zwrotne realizowane jest przez oporowy dzielnik napięcia. Napięcie wyjściowe przyjmuje wartości: maksymalną  $(+E)$  lub minimalną  $(-E)$ , które określone są przez napięcia podawane na zasilanie wzmacniacza operacyjnego. Jeżeli  $U_- < U_+$  to  $U_{WY} = +E$ , a jeżeli  $U_- > U_+$  to  $U_{WY} = -E$ . Jest to przerzutnik bistabilny, czyli taki, który ma dwa stany stabilne.

## Multiwibrator astabilny.



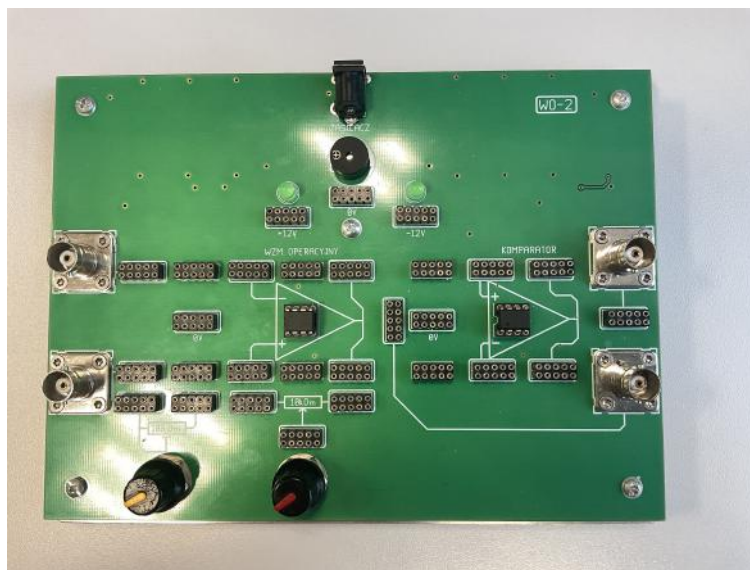
Podobny do układu przerzutnika Schmitta realizuje oprócz sprzężenia zwrotnego dodatniego sprzężenie zwrotne ujemne. Nie posiada wejścia, jest układem astabilnym (nie posiada stanów stabilnych). Realizowane jest to przez ładowanie i rozładowywanie kondensatora na wejściu układu przez prąd przepływający przez opornik  $R_f$  ujemnego sprzężenia zwrotnego. W przerzutniku następują cykliczne przejścia pomiędzy stanami  $+E$  i  $E$  na wyjściu (sygnał wyjściowy jest falą prostokątną o amplitudzie *peak-to-peak*  $2E$ ). Okres drgań układu wynosi:

$$T = 2R_f C \ln \left( \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \right)$$

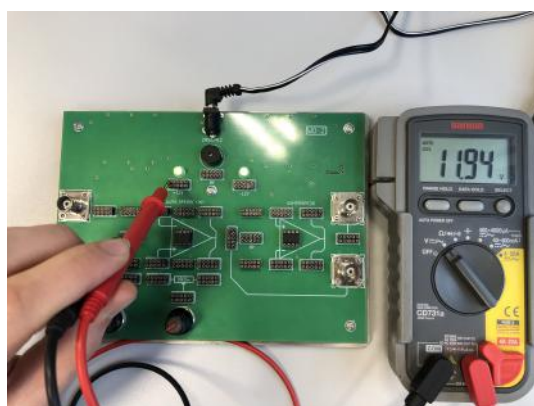
$$\text{gdzie } \gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

### Ćwiczenie 3.1

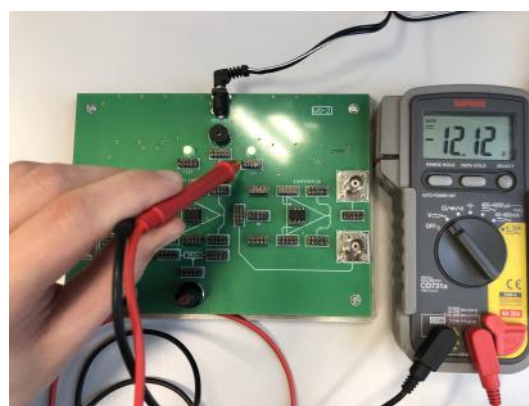
Schemat ideowy wzmacniacza operacyjnego.



Płytką ze wzmacniaczem operacyjnym.



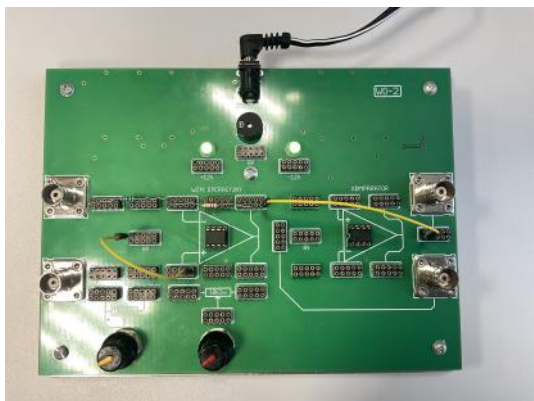
(a) Napięcie 12 V



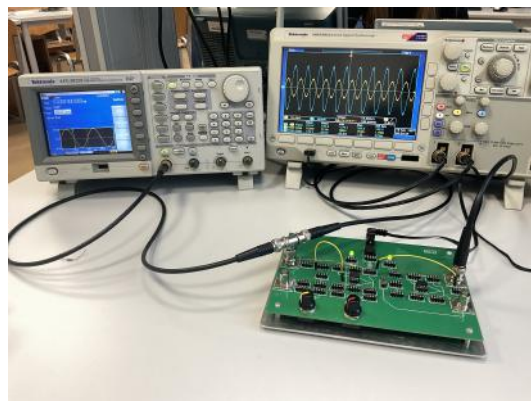
(b) Napięcie -12 V

## Ćwiczenie 3.2

Zmontowanie wzmacniacza odwracającego fazę o wzmacnieniu 10, zdjęcie jego charakterystyki częstotliwościowej i fazowej.



(c)



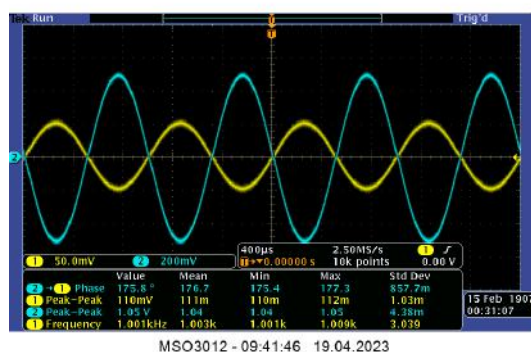
(d)

Montując ten układ użyłem rezystorów o oporze  $R_f = 100\text{ k}\Omega$  oraz  $R_1 = 10\text{ k}\Omega$ . Wzmocnienie tego wzmacniacza powinno więc wynosić 10:

$$U_{WY} = -\frac{R_f}{R_1}U_{WE} = -\frac{100\text{ k}\Omega}{10\text{ k}\Omega}U_{WE} = -10U_{WE}$$

Gdzie minus przy napięciu wyjściowym oznacza odwrócenie fazy.

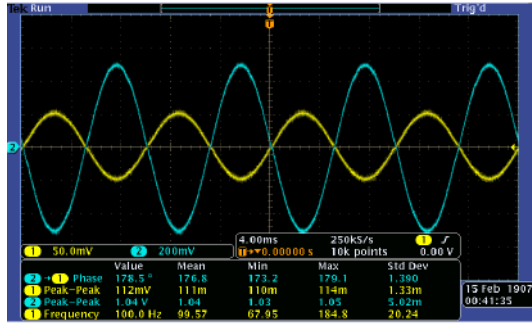
Podając na wejście układu sygnał sinusoidalny o częstotliwości  $1\text{ kHz}$  i amplitudzie  $100\text{ mV}_{pp}$ . Napięcie na wyjściu zmierzone oscyloskopem wynosiło  $1.05\text{ V}_{pp}$  i sygnał wyjściowy był przesunięty o około  $175.8^\circ$  w stosunku do wejściowego.



(e) Dziesięciokrotne wzmocnienie sygnału i odwrócenie fazy

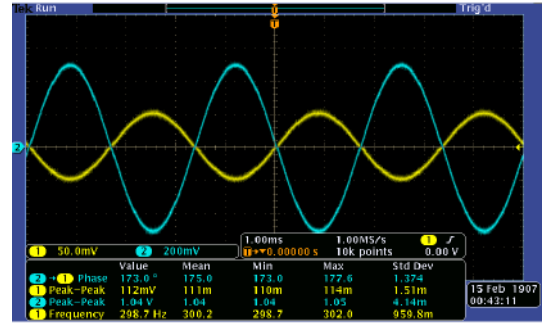
Aby zdjąć charakterystyki amplitudową i fazową zbudowanego przeze mnie układu podałem sygnał sinusoidalny o amplitudzie  $100\text{ mV}_{pp}$  i częstotliwości z przedziału od  $100\text{ Hz}$  do  $900\text{ kHz}$ . Na kolejnej stronie znajdują się zrzuty ekranu z oscyloskopu (nie wszystkie pomiary, żeby nie przedłużać niepotrzebnie tego sprawozdania).

<b>Częstotliwość</b>	<b>Amplituda wyjściowa</b>	<b>Przesunięcie fazowe</b>	<b>Stosunek <math>U_{WY}/U_{WE}</math></b>
100 Hz	1.04 V	178.5°	10.4
200 Hz	1.03 V	176.8°	10.3
300 Hz	1.04 V	173°	10.4
400 Hz	1.04 V	177.7°	10.4
500 Hz	1.05 V	176.4°	10.5
600 Hz	1.03 V	177°	10.3
700 Hz	1.04 V	176.9°	10.4
800 Hz	1.05 V	175.7°	10.5
900 Hz	1.03 V	175°	10.3
1 kHz	1.03 V	176°	10.3
2 kHz	1.04 V	175.5°	10.4
3 kHz	1.03 V	176.1°	10.3
4 kHz	1.04 V	173.1°	10.4
5 kHz	1.04 V	173°	10.4
6 kHz	1.03 V	175.2°	10.3
7 kHz	1.03 V	173.7°	10.3
8 kHz	1.04 V	172.9°	10.4
9 kHz	1.03 V	172.1°	10.3
10 kHz	1.04 V	173.2°	10.4
20 kHz	1.02 V	163.9°	10.2
30 kHz	1 V	156°	10
40 kHz	960 mV	148.8°	9.6
50 kHz	928 mV	144.1°	9.28
60 kHz	880 mV	139°	8.8
70 kHz	832 mV	132°	8.32
80 kHz	792 mV	130.4°	7.92
90 kHz	752 mV	127.7°	7.52
100 kHz	712 mV	121.7°	7.12
200 kHz	440 mV	97.69°	4.4
300 kHz	286 mV	88.38°	2.86
400 kHz	216 mV	79.96°	2.16
500 kHz	174 mV	70.81°	1.74
600 kHz	138 mV	65.04°	1.38
700 kHz	117 mV	58.04°	1.17
800 kHz	102 mV	51.72°	1.02
900 kHz	88 mV	47.91°	0.88



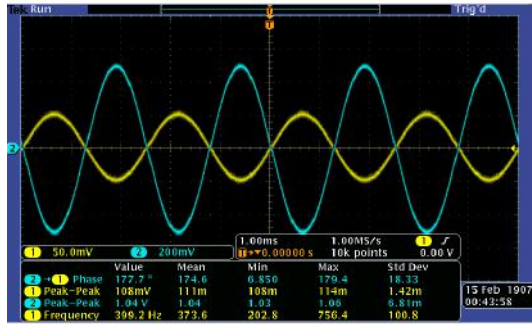
MSO3012 - 09:52:14 19.04.2023

(f) 100  $Hz$



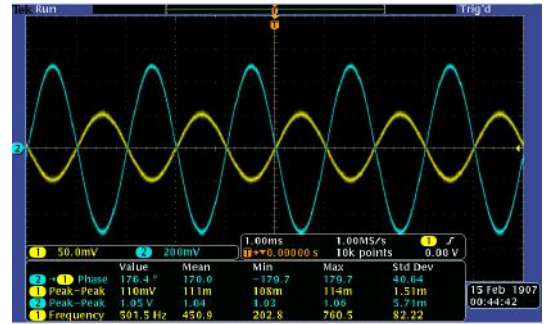
MSO3012 - 09:53:50 19.04.2023

(g) 300  $Hz$



MSO3012 - 09:54:37 19.04.2023

(h) 400  $Hz$



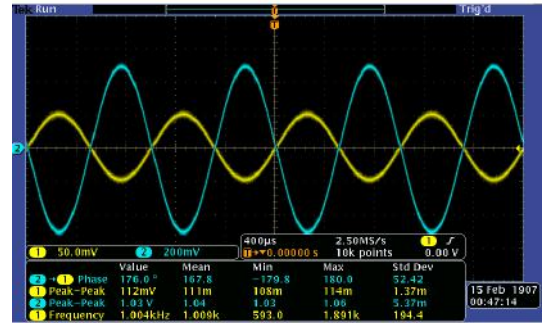
MSO3012 - 09:55:20 19.04.2023

(i) 500  $Hz$



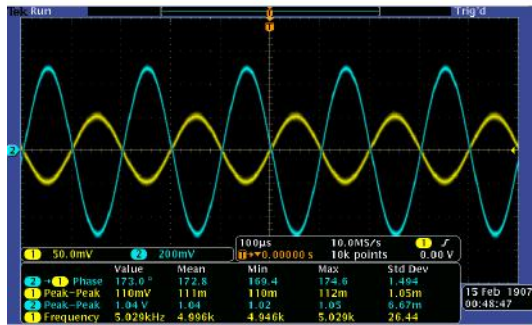
MSO3012 - 09:55:54 19.04.2023

(j) 600  $Hz$



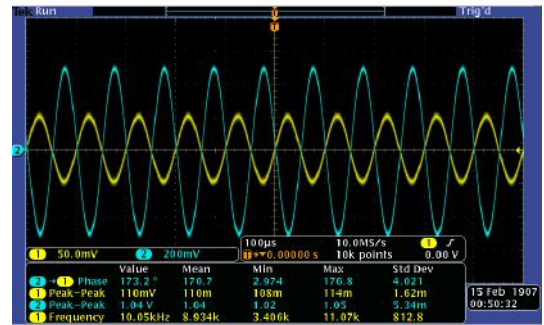
MSO3012 - 09:57:53 19.04.2023

(k) 1  $kHz$



MSO3012 - 09:59:25 19.04.2023

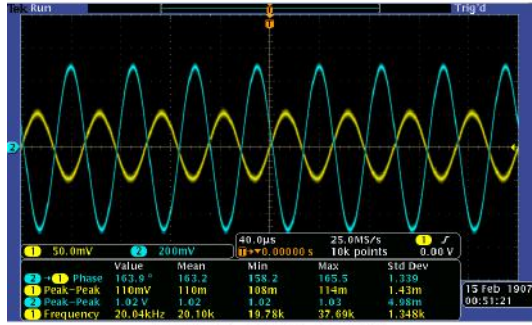
(l) 5  $kHz$



MSO3012 - 10:01:10 19.04.2023

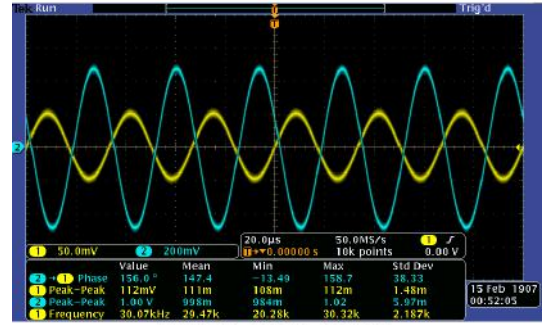
(m) 10  $kHz$





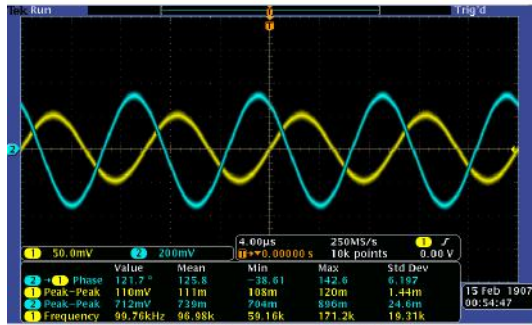
MSO3012 - 10.01:59 19.04.2023

(n) 20 kHz



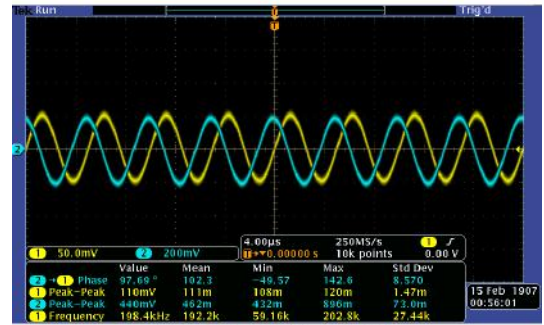
MSO3012 - 10.02:43 19.04.2023

(o) 30 kHz



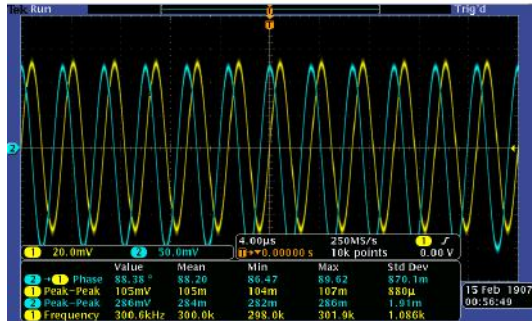
MSO3012 - 10.05:25 19.04.2023

(p) 100 kHz



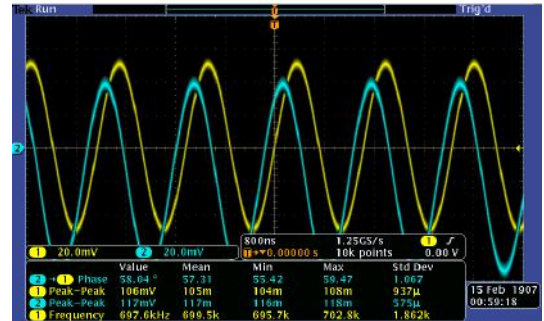
MSO3012 - 10.06:38 19.04.2023

(q) 200 kHz



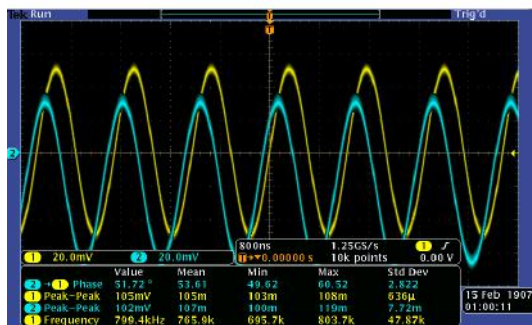
MSO3012 - 10.07:27 19.04.2023

(r) 300 kHz



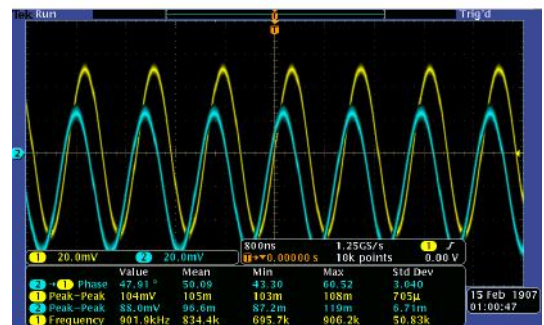
MSO3012 - 10.09:56 19.04.2023

(s) 700 kHz



MSO3012 - 10.10:49 19.04.2023

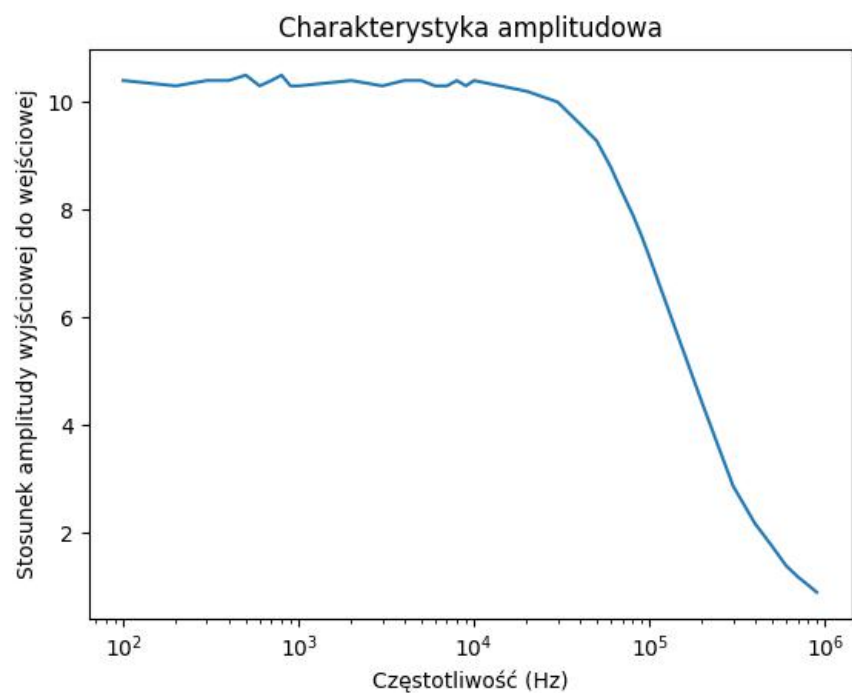
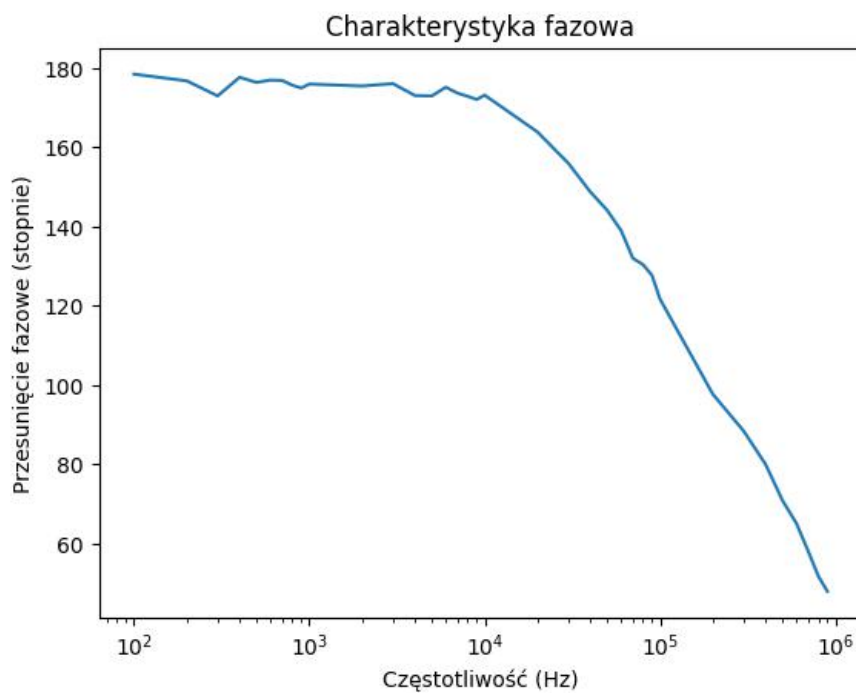
(t) 800 kHz



MSO3012 - 10.11:24 19.04.2023

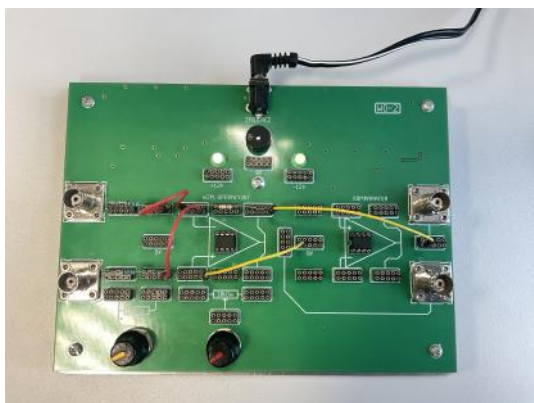
(u) 900 kHz

## Wykresy charakterystyk fazowej i amplitudowej wzmacniacza.

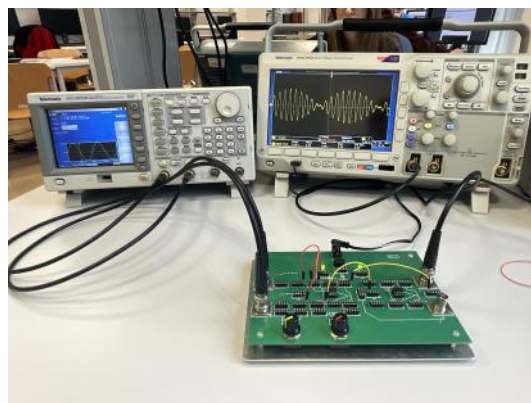


### Ćwiczenie 3.3

Zmontowanie sumatora o dwóch wejściach. Zsumowanie drgań sinusoidalnych z dwóch generatorów, zaobserwowanie dudnień.



(a)



(b)

Montując ten układ użyłem rezystorów o oporze  $R_f = 100 \text{ k}\Omega$  oraz  $R_1 = R_2 = 10 \text{ k}\Omega$ . Na dwa wejścia wzmacniacza sumującego podałem z dwóch kanałów generatora sygnały sinus o amplitudzie  $100 \text{ mV}_{pp}$  i częstotliwościach  $1 \text{ kHz}$  i  $1.1 \text{ kHz}$ .

Jeżeli sygnały zostały poprawnie zsumowane, to zaobserwowane dudnienia powinny mieć teoretyczne częstotliwości:

$$\text{Częstotliwość wypadkowa: } f_w = \frac{f_1 + f_2}{2} = \frac{1 + 1.1}{2} = 1.05 [\text{kHz}]$$

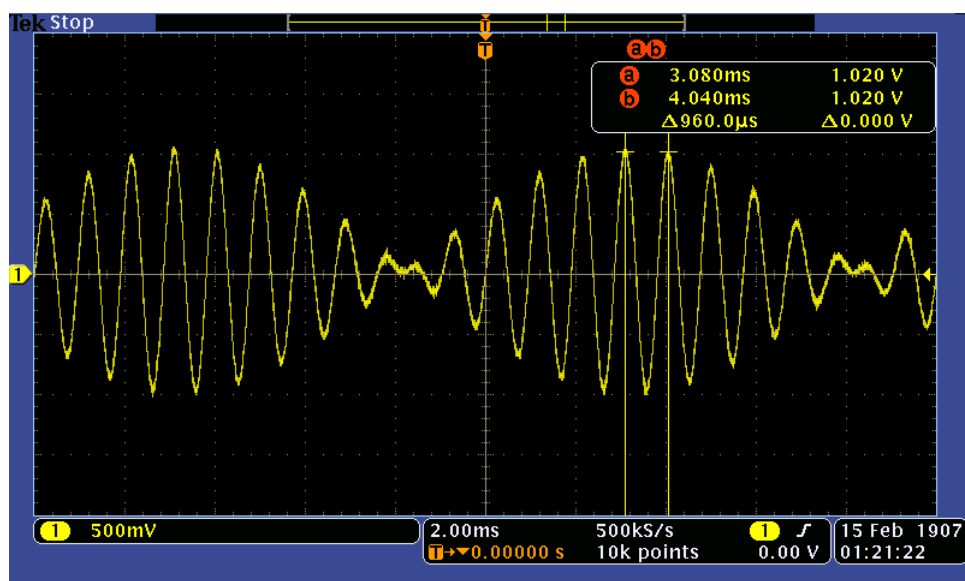
$$\text{Częstotliwość dudnień: } f_d = |f_1 - f_2| = |1 - 1.1| = 0.1 [\text{kHz}] = 100 [\text{Hz}]$$

I odpowiadające im okresy:

$$T_w = \frac{1}{f_w} = \frac{1}{1050} \left[ \frac{1}{\text{Hz}} \right] = 0.00095238 [\text{s}] = 952.38 [\mu\text{s}]$$

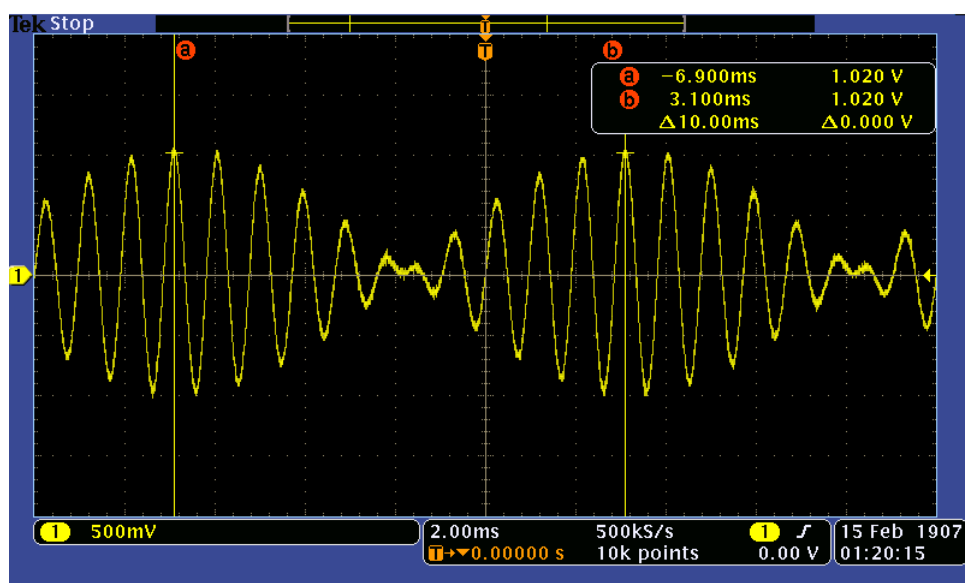
$$T_d = \frac{1}{f_d} = \frac{1}{100} \left[ \frac{1}{\text{Hz}} \right] = 0.01 [\text{s}] = 10 [\text{ms}]$$

Zaobserwowane przeze mnie okresy wypadkowy i dudnień wynosiły:



MSO3012 - 10:31:58 19.04.2023

Okres wypadkowy  $T_w = 960 \mu s$



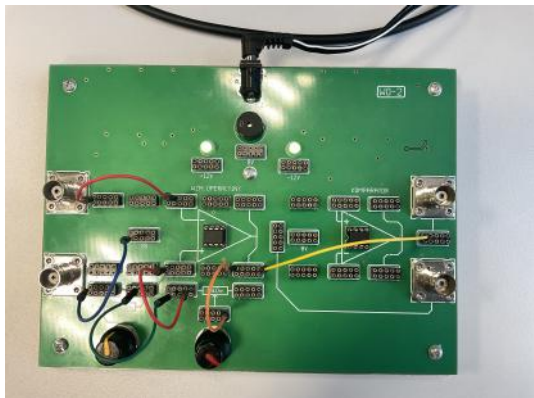
MSO3012 - 10:30:52 19.04.2023

Okres dudnień  $T_d = 10 ms$

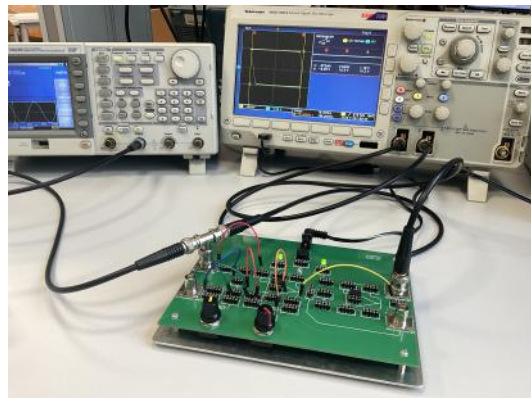


### Ćwiczenie 3.4

Zbudowanie przerzutnika Schmidta dla napięcia histerezy równego  $1\text{ V}$ . Zaobserwowanie przebiegów napięcia wyjściowego, wykreślenie charakterystyki statycznej układu.

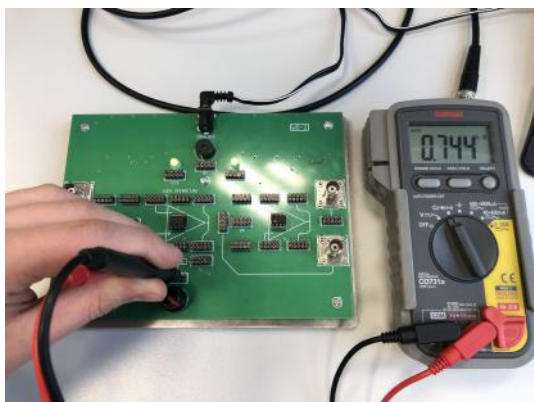


(a)

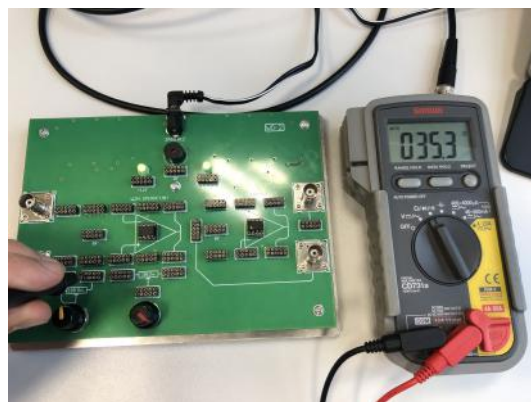


(b)

Montując przerzutnik jako rezystorów w dzielniku napięcia w układzie sprzężenia zwrotnego dodatniego użyłem znajdujących się na płytce potencjometrów. Badając przebiegi napięcia wejściowego ustawiłem potencjometry na takie wartości, aby napięcie histerezy było równe  $1\text{ V}$ , a po rozmontowaniu układu zmierzyłem rezystancję na obydwu potencjometrach.

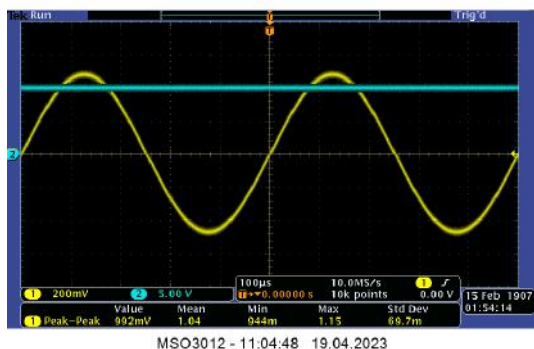


(c)  $R_1 = 744\ \Omega$

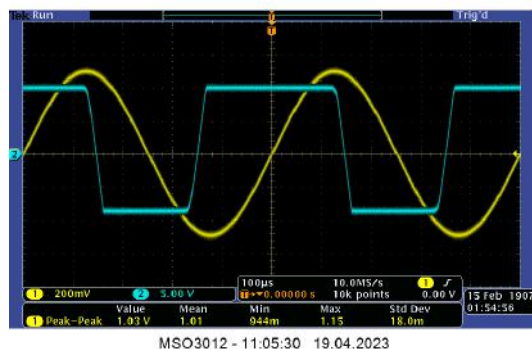


(d)  $R_2 = 35.3\ \Omega$

Przy tych oporach podając na wejście przerzutnika sygnał sinusoidalny o amplitudzie  $992\text{ mV}$  napięcie na wyjściu było stałe, wynoszące około  $10\text{ V}$ . Kiedy zwiększyłem amplitudę sygnału wejściowego do  $1\text{ V}_{pp}$  na wyjściu zaobserwowałem sygnał zbliżony do fali prostokątnej, o amplitudzie  $19\text{ V}_{pp}$  i częstotliwości równej fali sinusoidalnej podanej na wejście układu.

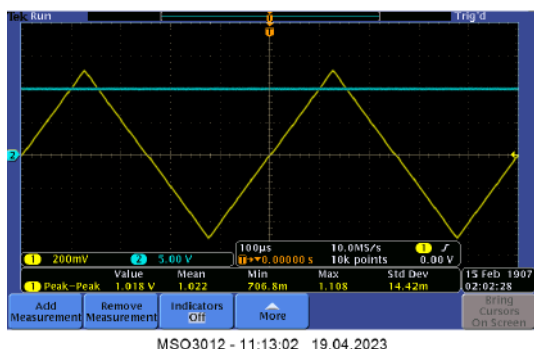


(e)

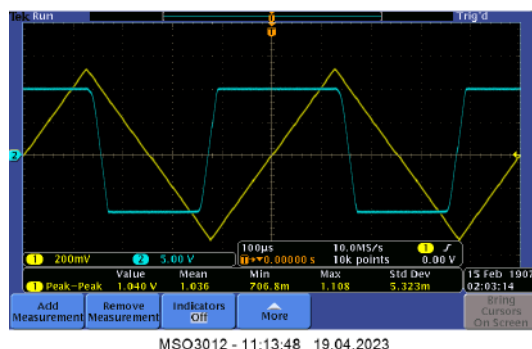


(f)

Po zmianie kształtu fali sygnału wejściowego na trójkątny aby dochodziło do zmian stanów przerzutnika musiałem zwiększyć napięcie na wejściu (około  $1.04\text{ V}$ ).



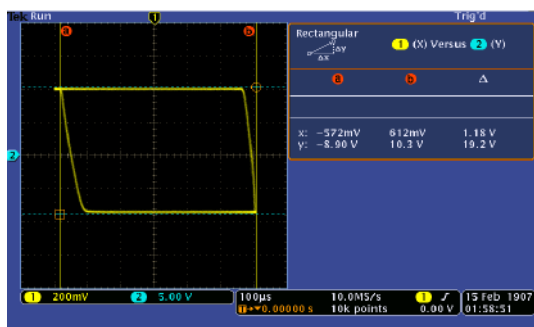
(g)



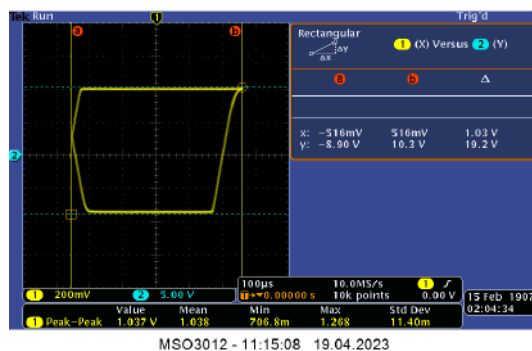
(h)

Na wykresach X-Y oscylatora zaobserwować można charakterystykę statyczną układu (dla sygnałów sinusoidalnego i trójkątnego). W obydwu przypadkach wartości na osi y zamykały się w przedziale od około  $-9.2\text{ V}$  do  $10\text{ V}$  (oscylloskop zmierzył  $\Delta y = 19.2\text{ V}$ ). Te wartości odpowiadały amplitudzie sygnału na wyjściu przerzutnika.

Wartości na osi x, odpowiadające napięciu wejściowemu, miały amplitudę  $\Delta x = 1.18\text{ V}$  i  $1.04\text{ V}$  odpowiednio dla sygnału sinusoidalnego i trójkątnego.



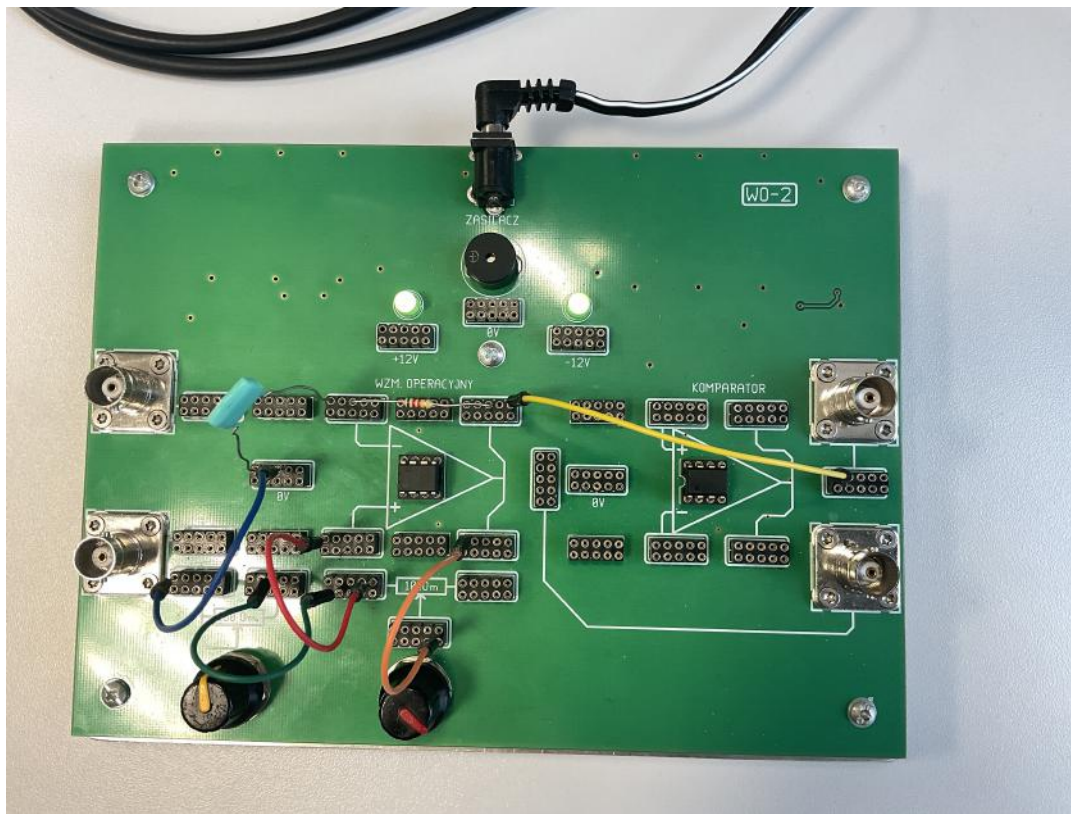
(i)



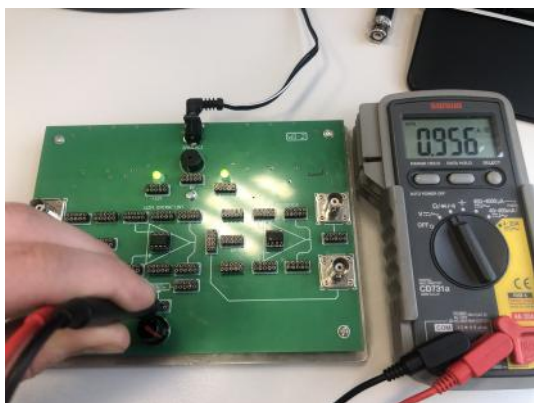
(j)

### Ćwiczenie 3.5

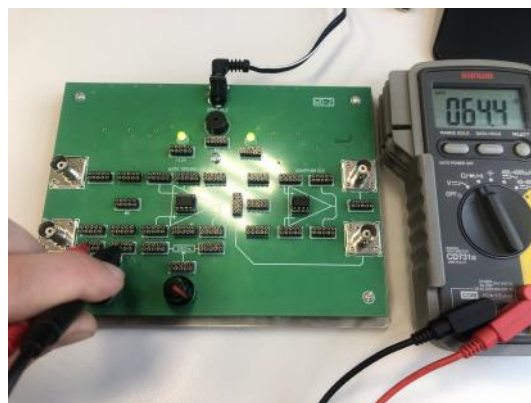
Zbudowanie multiwibratora astabilnego. Zaobserwowanie i odrysowanie przebiegów impulsów na wyjściu układu i na wejściu (-) wzmacniacza operacyjnego. Porównanie zmierzonego okresu drgań z wartością teoretyczną.



Montując ten układ użyłem kondensatora o pojemności  $C = 47 \text{ nF}$  i w układzie ujemnego sprzężenia zwrotnego opornika o rezystancji  $R_f = 6.2 \text{ k}\Omega$ . Jako oporniki w dzielniku napięcia w układzie dodatniego sprzężenia zwrotnego użyłem, tak jak w zadaniu powyżej, potencjometrów na płytce. Po rozmontowaniu układu zmierzyłem ich opory:



(a)  $R_1 = 956 \Omega$



(b)  $R_2 = 64.4 \Omega$



Teoretyczny okres drgań multiwibratora:

$$T = 2R_f C \ln \left( \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \right)$$

$$\text{gdzie } \gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

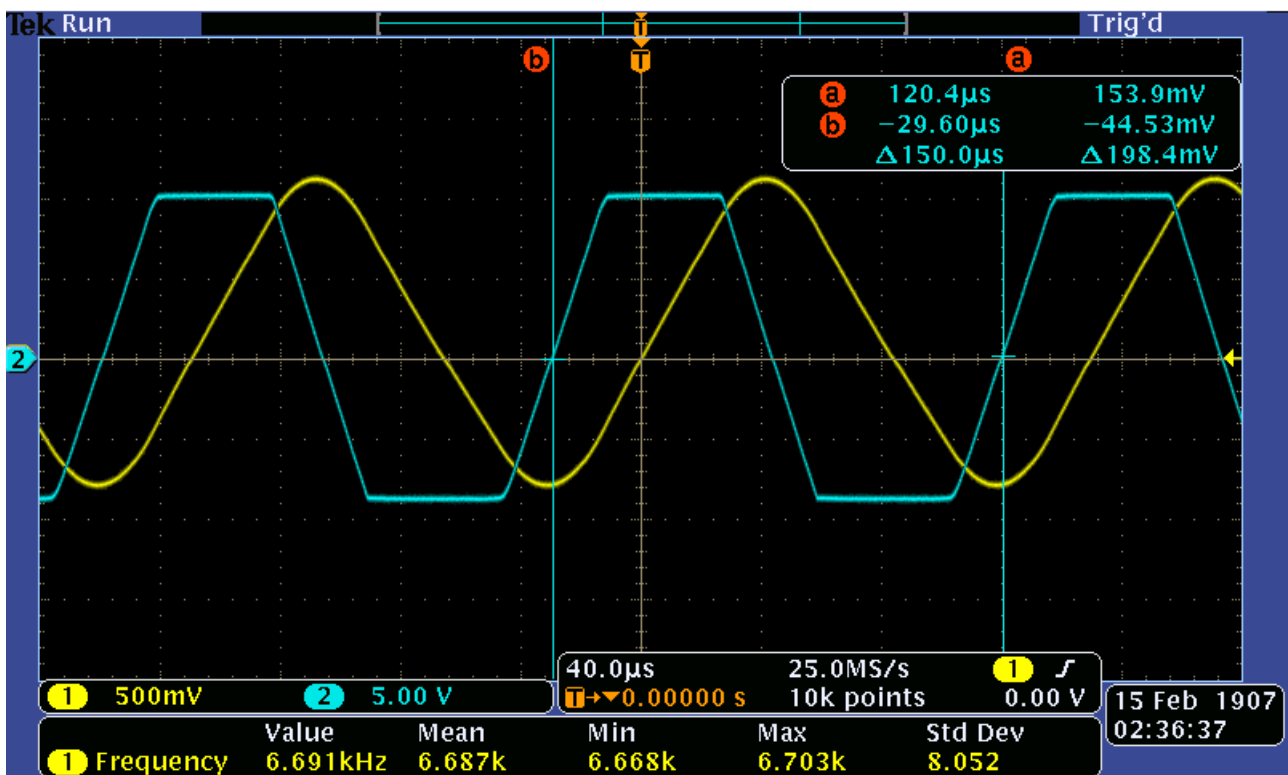
$$\gamma = \frac{64.4}{956 + 64.4} = \frac{64.4}{1020.4} = 0.0631125$$

$$T = 2 \cdot 6.2 \cdot 10^3 \cdot 47 \cdot 10^{-9} \cdot \ln \left( \frac{1 + 0.0631125}{1 - 0.0631125} \right) = 582.8 \cdot 10^{-6} \cdot \ln \left( \frac{1.0631125}{0.9368875} \right) \approx$$

$$\approx 582.8 \cdot 10^{-6} \cdot 0.126392994 \approx 73.6618 \cdot 10^{-6} [s] = 73.6618 [\mu s]$$

Zmierzona wartość okresu drgań:

- Kanał żółty - przebieg napięcia na wejściu (-) wzmacniacza operacyjnego
- Kanał niebieski - przebieg impulsów na wyjściu układu



MSO3012 - 11:47:09 19.04.2023

Zaobserwowany okres drgań:  $T = 150 \mu s$

## Omówienie wyników

W ćwiczeniach 3.2 i 3.3 zarówno pomiary jak i wyniki, które policzyłem na ich podstawie były bardzo zbliżone do teoretycznych wartości spodziewanych. W ćwiczeniu 3.2 punkt załamania charakterystyki amplitudowej i fazowej (częstotliwość sygnału wejściowego, powyżej której wzmacnienie wzmacniacza spada) jest pomiędzy  $30\text{ kHz}$  a  $40\text{ kHz}$ . Jest to spowodowane tym, że używany na zajęciach wzmacniacz operacyjny nie jest wzmacniaczem idealnym i posiada pewne skończenie szerokie pasmo przenoszenia. Wzmocnienie układu było o kilka procent (około 4–5%) większe niż spodziewane 10 razy. Jest to prawdopodobnie powodowane niedokładnościami komponentów - oporników i wzmacniacza operacyjnego.

W ćwiczeniu 3.3 natomiast, przy badaniu dudnień zsumowanych sygnałów zmierzony okres dudnień był dokładnie taki jak spodziewany, a okres wypadkowy o  $7.62\text{ }\mu\text{s}$  (0.8%) dłuższy niż teoretyczny. Również amplituda na wyjściu wzmacniacza sumującego była zbliżona do spodziewanej - przy rezystancjach  $R_1 = R_2 = 10\text{ k}\Omega$ ,  $R_f = 100\text{ k}\Omega$  i amplitudach sygnałów  $100\text{ mVpp}$  maksymalna wartość amplitudy wyjścia powinna być równa  $100000 \cdot \left(\frac{0.1}{10000} + \frac{0.1}{10000}\right) = 2\text{ [V]}$  *peak-to-peak*, czyli maksymalna wartość napięcia na wyjściu to  $1\text{ V}$ , co widać na wykresach z oscyloskopu. Tu wartość znów o kilka procent większa, tak jak w zadaniu 3.2.

Dopiero w zadaniu 3.4 pomiary przestały pasować do teorii. Z wykresów charakterystyk statycznych przerzutnika i wykresów przebiegu sygnału wyjściowego wynika, że stany układu wcale nie odpowiadają wartościom maksymalnej i minimalnej  $12\text{ i } -12\text{ V}$ . Nawet jeśli wziąć pod uwagę niedokładność, którą zmierzyłem w zadaniu 3.1 ( $+E = 11.94\text{ V}$  oraz  $-E = -12.12\text{ V}$ ) amplituda *peak-to-peak* sygnału wyjściowego jest o około  $5\text{ V}$  mniejsza niż spodziewana. Powodem takiego zjawiska jest fakt, że wzmacniacz operacyjny zużywa część energii dostarczanej na piny wejściowe na wykonanie pracy (wzmacnianie sygnału wejściowego).

Zupełnym zaskoczeniem okazały się wyniki zadania 3.5. Obliczona przeze mnie spodziewana wartość okresu drgań multiwibratora ( $73.6618\text{ }\mu\text{s}$ ) była o ponad dwa razy mniejsza niż zaobserwowana ( $150\text{ }\mu\text{s}$ ). Taka rozbieżność wynikać może z wielu przyczyn: pomyłki w obliczeniach, złej metody pomiarowej lub faktu, że przypadkowo zmieniłem pozycję potencjometrów przed pomiarem ich rezystancji. Po długiej inwestygacji źródeł mojego błędu nie jestem w stanie wychwycić.

## Notatki z zeszytu laboratoryjnego

Poniżej załączone są notatki z zeszytu laboratoryjnego, które prowadziłem podczas zajęć wykonując pomiary.

ĆWICZENIE 3.

19 APR

Stacja robocza nr 1

ZMIERZONE NAPIĘCIE NA PINACH:

11.94 V

~ 12.12 V

ZADANIE 2

Wzmocniacz odwracający fazy

$$U_{wy} = -\frac{R_2}{R_1} U_{we}$$

OPORNIKI:

$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 100 \text{ k}\Omega$$

GENERATOR

1 kHz 100 mV

WEJŚCIE

AO

1 kHz 112 mV

WYJŚCIE

amplituda 1.03 V

faza 172.7°

Wzmocnienie 10 - kwadrat

# ZDEJMOWANIE CHARAKTERYSTYKI

Na wejście  
podatemu 100 mV<sub>pp</sub> sygnał  
wzmocnienie  
sinusoidalny

CZĘSTOTLIWOŚĆ		AMPLITUDA WYJŚCIOWA	FAZA
100	Hz	1.04 V	178.5°
200	Hz	1.03 V	176.8°
300	Hz	1.04 V	173°
400	Hz	1.04 V	177.7°
500	Hz	1.05 V	176.4°
600	Hz	1.03 V	177°
700	Hz	1.04 V	176.9°
800	Hz	1.05 V	175.7°
900	Hz	1.03 V	175°
1	kHz	1.03 V	176°
2	kHz	1.04 V	175.5°
3	kHz	1.03 V	176.4°
4	kHz	1.04 V	173.4°
5	kHz	1.04 V	173°
6	kHz	1.03 V	175.2°
7	kHz	1.03 V	173.7°
8	kHz	1.04 V	171.9°
9	kHz	1.03 V	172.1°
10	kHz	1.04 V	173.2°
20	kHz	1.02 V	163.9°
30	kHz	1 V	156°
40	kHz	960 mV	148.8°
50	kHz	928 mV	144.1°
60	kHz	880 mV	139°
70	kHz	832 mV	132°
80	kHz	792 mV	130.4°
90	kHz	752 mV	127.7°
100	kHz	712 mV	121.7°
200	kHz	440 mV	97.69°
300	kHz	286 mV	88.38°
400	kHz	216 mV	79.46°
500	kHz	174 mV	70.81°
600	kHz	138 mV	65.04°
700	kHz	117 mV	58.04°
800	kHz	102 mV	51.72°
900	kHz	88 mV	47.91°

### ZADANIE 3

### Sumator

$Z$  generatora :

Kanał 1:  $\sim 1 \text{ kHz}, 100 \text{ mVpp}$

Kanał 2:  $\sim 1.1 \text{ kHz}, 100 \text{ mVpp}$

Wyjście sumatora ma  
amplitudę  $2.08 \text{ Vpp}$

### Dudnienia

Okres dudnień  $T_d = 10 \text{ ms}$

Okres wypadkowy  $T_w = 960 \text{ } \mu\text{s}$

Częstotliwość obwiedni  $f = 100 \text{ Hz}$

## ZADANIE 4

### Przetwornik Schmidta

$\sim 2 \text{ kHz}$

992 mV - nie przekroczył

1.03 V - przekroczył

$\sim 2 \text{ kHz}$

1.018 V - nie przekroczył

1.04 V - przekroczył

Zmierzane opory:

$$R_1 = 0.744 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 35.3 \Omega$$

histereza  $\Delta \sim 1 \text{ V}$  x  
 $\Delta 19 \text{ V}$  y

## ZADANIE 5

### Multivibrator

$$\text{---} \overline{\text{---}} \text{---} \xrightarrow{R_f} 6.2 \text{ k}\Omega$$

$$\text{---} \overline{\text{---}} \text{---} \xrightarrow{C} 47 \text{ nF}$$

$$R_1 = 956 \Omega$$

$$R_2 = 64.4 \Omega$$

$$\gamma = \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{64.4 \Omega}{1020.4 \Omega} = 0.0631$$

$$T = 2 R_f C \cdot \ln \left( \frac{1 + \gamma}{1 - \gamma} \right) = 2 \cdot 6200 \cdot 47 \cdot X \cdot 10^{-9}$$

$$X = \ln \left( \frac{1.0631}{0.9369} \right) = 0.126368$$

$$T = 2 \cdot 6200 \cdot 47 \cdot 0.126368 \cdot 10^{-9} =$$

$$= 76347.27 \cdot 10^{-9} = 76.3 \mu\text{s}$$

$$\text{Okres zmienny} = 150 \mu\text{s}$$