

Generator sinusoidalny w oparciu o mostek Wiena

Michał Dobrzycki
Akademia Górniczo-Hutnicza im.
Stanisława Staszica w Krakowie

Bartłomiej Osiak
Akademia Górniczo-Hutnicza im.
Stanisława Staszica w Krakowie

Jakub Kurzyński
Akademia Górniczo-Hutnicza im.
Stanisława Staszica w Krakowie

Abstract—Dokument przedstawia projekt zaliczeniowy wykonany na potrzeby przedmiotu analogowe układy elektroniczne 2. Projekt obejmuje opis teoretyczny, symulacje oraz realizację praktyczną układu generatora sygnału sinusoidalnego w oparciu o mostek Wiena.

Index Terms—generator sinusoidalny, mostek Wiena, układy analogowe, pomiar pojemności, symulacja LTspice

I. WSTĘP TEORETYCZNY

MOSTEK Wiena jest często spotykany w elektronice analogowej. Swoje główne zastosowanie znajduje w miernictwie elektronicznym, gdzie możemy wykorzystać go do pomiaru pojemności. Jednak to nie koniec zalet układu tego układu – okazuje się, że szeregowo połączenie rezystora i kondensatora do wejścia oraz równoległe połączenie tych samych elementów do wyjścia skutkuje połączeniem dwóch filtrów – idąc od strony wejścia: filtru górnoprzepustowego, a następnie filtru dolnoprzepustowego. Po analizie właściwości częstotliwościowych układu (obliczając transmitancję) zauważamy, że jeśli użyjemy takich samych wartości rezystancji i pojemności w obu filtrach, układ charakteryzuje transmitancja:

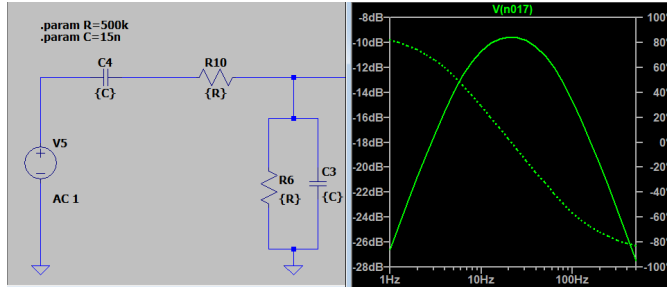


Fig. 1: Mostek Wiena - Filtr pasmowo przepustowy

$$\beta(j\omega) = \frac{j\omega R_2 C_1}{1 - \omega^2 R_2 C_2 R_1 C_1 + j\omega(R_1 C_1 + R_2 C_2 + C_1 R_2)} \quad (1)$$

Dla fazy równej 0° wartość wzmacnienia osiąga maksimum (Fig. 1). Ponadto widzimy, że dobroć układu wynosi:

$$Q = \frac{f_r}{\Delta f_{3dB}} = 0,33 \quad (2)$$

Pomimo niskiej dobroci, w porównaniu do układów LC, lub generatorów wykorzystujących rezonatory kwarcowe, mostek Wiena może pełnić funkcje oscylatora w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego, na przykład wzmacniacza operacyjnego. Omawiany układ ma przewagę w stosunku do generatorów zawierających w swoich topologiach elementy

indukcyjne, zwłaszcza w technologiach scalonych, bowiem fizyczne gabaryty cewek uniemożliwiają ich skuteczną implementację w mikroelektronice, ponadto cewki wprowadzają zakłócenia elektromagnetyczne co w mikroskalach ma destrukcyjny wpływ na działanie układu. Integracja cewek w najbardziej zaawansowanych obecnie technologiach jest problematyczna – wymaga specjalistycznych procesów, takich jak tworzenie spiralnych ścieżek. Generator zbudowany w oparciu o mostek Wiena rozwiązuje dodatkowo problem dużych wartości komponentów potrzebnych do realizacji generatora LC, który miałby pracować przy niskich częstotliwościach.

A. Pomiar Pojemności Przy Pomocy Mostka Wiena

Aby zmierzyć pojemność za pomocą omawianej topologii, będziemy potrzebować potencjometrów, które posłużą do kalibracji układu – dążymy do ustawiania takich rezystancji, żeby różnica potencjałów pomiędzy zaciskami wyjściowymi układu była równa zero. W następnej kolejności mierzymy aktualnie ustawiony opór potencjometrów i korzystamy ze wzorów opisujących badaną pojemność C_X . Rezystancja R_X reprezentuje straty na dielektryku kondensatora. Kąt δ jest skorelowany ze stratnością badanego elementu [1].

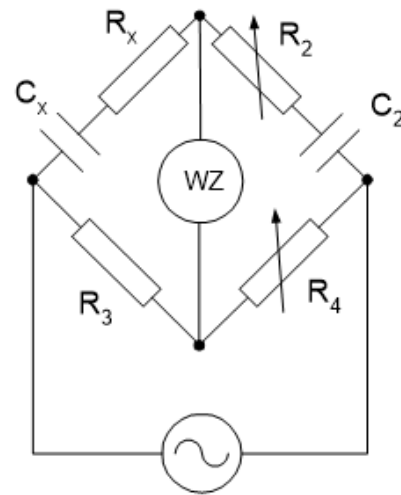


Fig. 2: Mostek Wiena - Filtr pasmowo przepustowy

$$C_X = C_2 \frac{R_4}{R_3} \quad (3)$$

$$R_X = R_2 \frac{R_3}{R_4} \quad (4)$$

$$\tan(\delta) = \frac{R_X}{\frac{1}{\omega C_X}} = \omega C_X R_X = \omega C_2 R_2 \quad (5)$$

II. DZIAŁANIE UKŁADU

Korzystając z warunków Barkhausena dla generacji, umieszczamy zmodyfikowany mostek Wiena w pętli dodatniego sprzężenia zwrotnego wzmacniacza operacyjnego [2]. Dobieramy wzmocnienie w konfiguracji nieodwracającej tak, aby było nieco większe niż 3. Dzięki temu zapewniamy wzbudzenie układu w warunkach rzeczywistych, uwzględniając tolerancje komponentów (współczynnik regeneracji większy niż jeden).

$$\begin{cases} \operatorname{Re}\{K(j\omega)\beta(j\omega)\} = 1 \\ \operatorname{Im}\{K(j\omega)\beta(j\omega)\} = 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$\begin{cases} \omega^2 R_2 C_2 R_1 C_1 = 1 \\ \frac{R_2 C_1}{R_1 C_1 + R_2 C_2 + C_1 R_2} = \frac{1}{K} \end{cases} \quad (7)$$

$$\varphi\{K(j\omega)\beta(j\omega)\} = n \cdot 2\pi, \quad n \in \mathbb{Z} \quad (8)$$

$$\omega = \frac{1}{\sqrt{R_2 C_2 R_1 C_1}} \quad (9)$$

$$R = R_1 = R_2 \quad (10)$$

$$C = C_1 = C_2 \quad (11)$$

$$\omega = \frac{1}{RC} \quad (12)$$

$$\frac{1}{K} = \frac{RC}{3 \cdot RC} \Rightarrow K = 3 \quad (13)$$

III. CZĘŚĆ PROJEKTOWA

Na podstawie powyższej analizy projektujemy układ, który jest w stanie spełnić kryteria (Fig. 3).

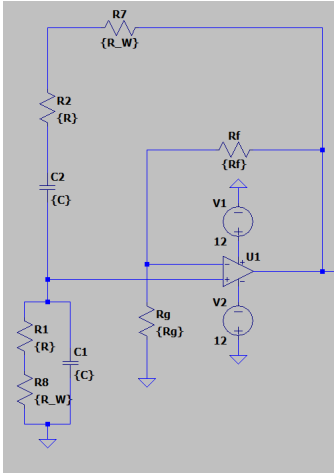


Fig. 3: Schemat ideowy układu generatora sinusoidalnego

Przyjmujemy następujące założenia:

- Generowany sinus w zakresie częstotliwości od 20 Hz do 2 kHz
- Regulacja częstotliwości przy pomocy potencjometru

- Układ zasilany nap. symetrycznym ± 12 V
 - Możliwość regulacji amplitudy od 1 V do 10 V
- Następnie dokonujemy wyliczeń wartości potrzebnych elementów.

$$1 + \frac{R_f}{R_g} \geq 3 \quad (14)$$

$$R_f = 47k\Omega \quad (15)$$

$$R_g = 20k\Omega \quad (16)$$

$$K_u = 3,35 \quad (17)$$

$$f = \frac{1}{2\pi RC} \in (20Hz, 2000Hz) \quad (18)$$

$$C = 15nF \quad (19)$$

$$R \in (1\Omega, 500k\Omega) \quad (20)$$

$$R_W = 5k\Omega \quad (21)$$

Po symulacji układu otrzymujemy wyniki:

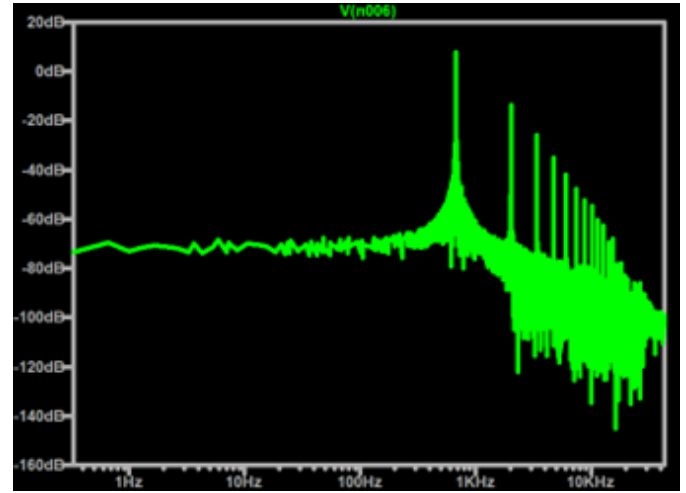


Fig. 4: FFT sygnału wyjściowego generatora

Pokazana wyżej topologia nie spełnia jednak naszych oczekiwań co do kształtu generowanego sygnału (Fig. 4). Brak regulacji wzmocnienia powoduje generację niepożądanych harmonicznych na wyjściu układu. Z pomocą przychodzi idea kompensacji wzmocnienia, polegająca na bocznikowaniu rezystancji ujemnego sprzężenia zwrotnego układem dwóch diod prostowniczych, które będą dołączały równoległą rezystancję R_{ex} , zmniejszającą czynnik odpowiedzialny za wzmocnienie – rezystancję R_f . Po uwzględnieniu dodatkowych elementów wyliczamy wartość rezystora R_{ex} .

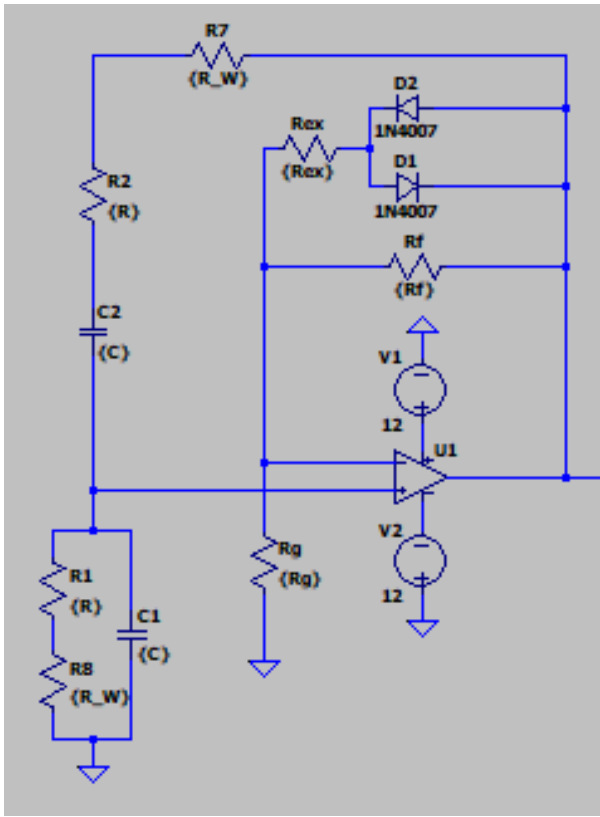


Fig. 5: Układ generatora z kompensacją wzmacnienia

$$R_{ex} = R_f = 47k\Omega \quad (22)$$

$$K_u' = 1 + \frac{R_f}{2R_g} = 2,18 \quad (23)$$

W rezultacie otrzymaliśmy lepszy stosunek amplitudy pożądaną harmoniczną do pozostałych.

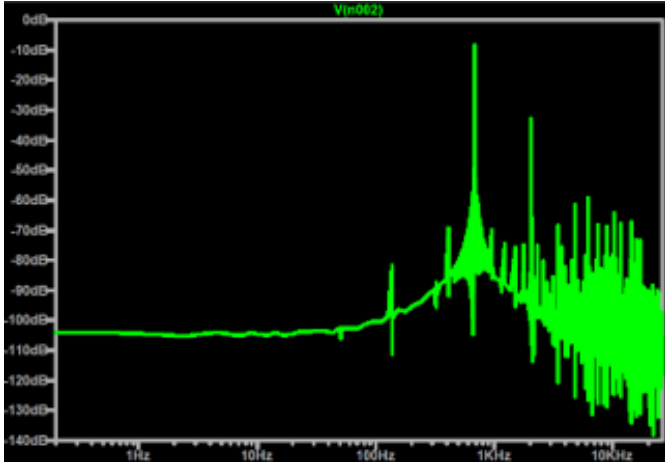


Fig. 6: FFT sygnału wyjściowego generatora po zmianie układu

Aby móc sterować amplitudą sygnału wyjściowego dodajemy stopień wyjściowy – wykorzystując zastosowany układ scalony LM324N, zawierający cztery wzmacniacze operacyjne. Parametry rezystancji szeregowo podłączonych do potencjometrów zostały dobrane w taki sposób, aby unik-

nąć nasycenia wzmacniaczy operacyjnych dla ekstremalnych ustawień rezystancji.

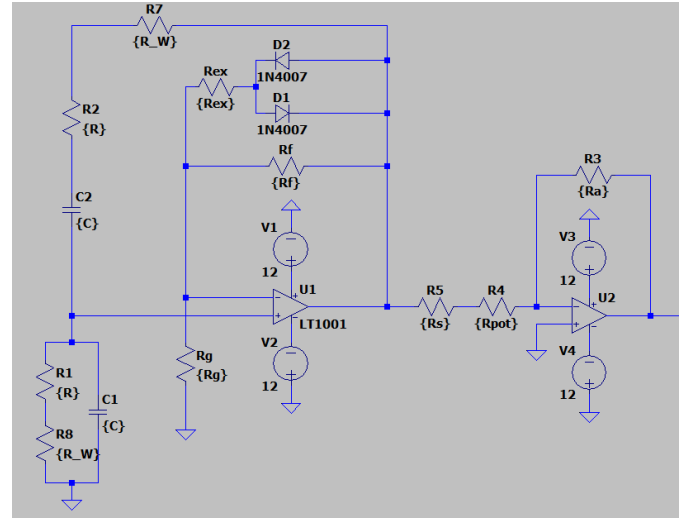


Fig. 7: Końcowy układ generatora sinusoidalnego

$$R_a = 500k\Omega \quad (24)$$

$$R_s = 35k\Omega \quad (25)$$

$$R_{pot} \in (1\Omega, 500k\Omega) \quad (26)$$

Stosując taki układ wyjściowy zapewniamy nie tylko regulowaną amplitudę (potencjometr jako elementy regulujący wzmacnienie), ale także unieważniamy wyjście oscylatora na obciążenie.

IV. ELEMENTY UŻYTE W PROJEKCIE

- Wzmacniacz operacyjny LM324N w obudowie DIP14
- Rezystory: $5k\Omega$, $20k\Omega$, $47k\Omega$ z tolerancją 1%
- Potencjometry $500k\Omega$
- Kondensatory ceramiczne $15nF$
- Diody prostownicze 1N4007
- Płytki prototypowa przeznaczona do lutowania

V. SYMULACJA UKŁADU

Przed zmontowaniem układ został zasymulowany w programie LTspice. Na poniższej charakterystyce obserwujemy uzyskany zakres częstotliwości przy wykorzystaniu podanych w poprzednim rozdziale elementów.

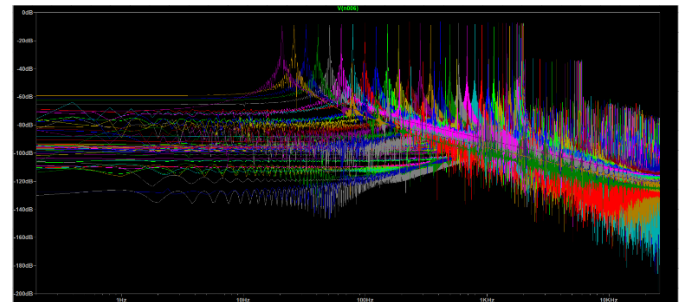


Fig. 8: Zakres częstotliwości generatora

Symulacja potwierdziła założenia – generowany sygnał jest w zakresie od 20Hz do 2kHz w zależności od nastawienia potencjometru. Następnie sprawdziliśmy wartości amplitudy sygnału wyjściowego w zależności od ustawienia R_{pot} .

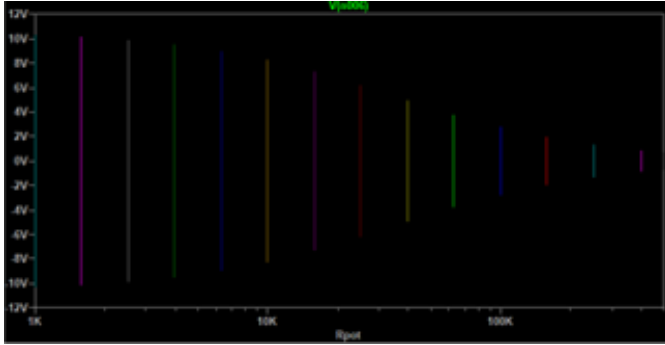


Fig. 9: Amplituda sygnału wyjściowego w zależności od potencjometru

Uzyskane wyniki pokrywają się z założeniami. Następnie sprawdzamy warunki generacji przy pomocy wykresu Nyquista w zależności od układu kompensującego wzmacnienie.

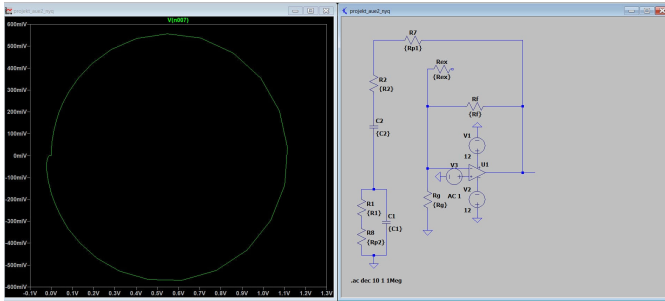


Fig. 10: Wykres Nyquista dla układu bez kompensacji wzmacnienia

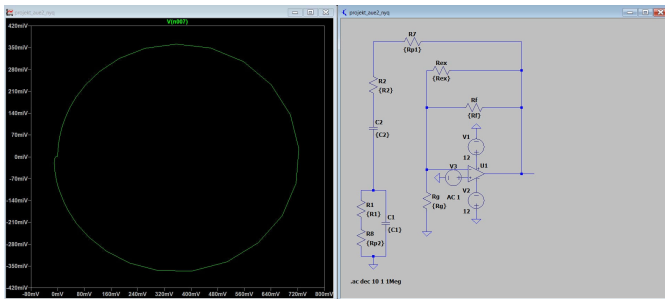


Fig. 11: Wykres Nyquista dla układu z kompensacją wzmacnienia

Na koniec sprawdziliśmy jak tolerancja zastosowanych elementów wpływa na działanie układu. W tym celu posłużyliśmy się analizą Monte Carlo programu LTspice przy założeniach niepewności zgodnymi z Sekcją IV.

Uzyskane wyniki:

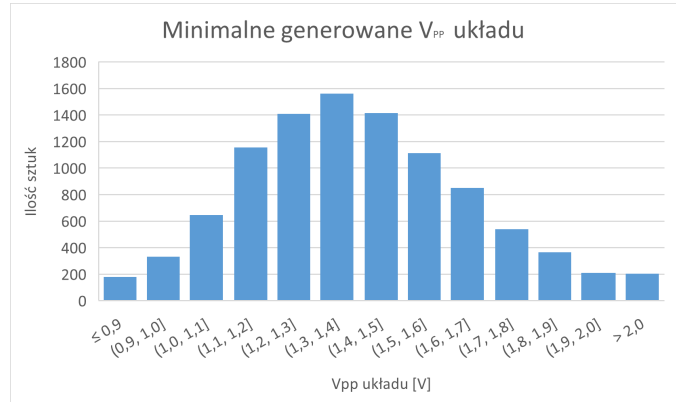


Fig. 12: Histogram analizy Monte Carlo

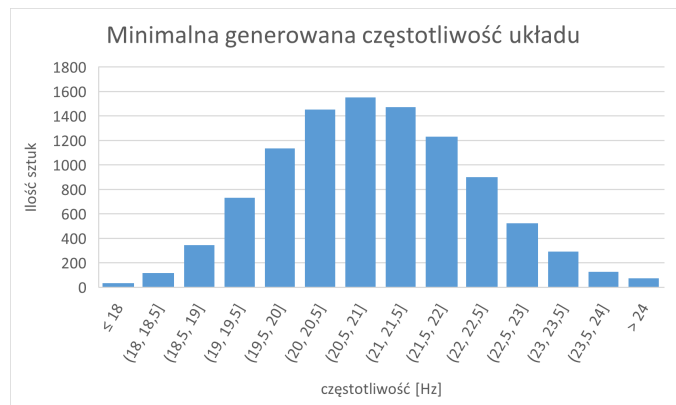


Fig. 13: Histogram analizy Monte Carlo

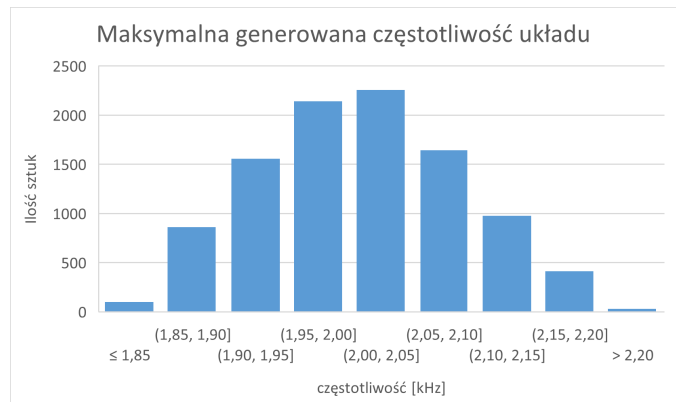


Fig. 14: Histogram analizy Monte Carlo

Z powyższych histogramów wynika, że większość wyprodukowanych układów powinna być zgodna z założeniami. Dla dokładniejszych danych zawartych w załączniku „mc.xlsx” można też stwierdzić, że dla każdego przypadku zajdzie generacja.

VI. REALIZACJA PRAKTYCZNA UKŁADU

Fizyczną realizację projektu przeprowadziliśmy w studenckim laboratorium projektowym. Niestety ze względu na brak potrzebnego potencjometru podwójnego musieliśmy zrezy-

gnować z możliwości regulacji częstotliwości oraz wzmocnienia w praktycznej implementacji.

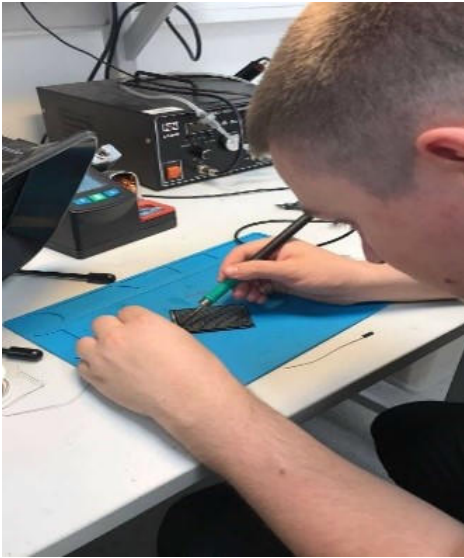


Fig. 15: Proces tworzenia układu

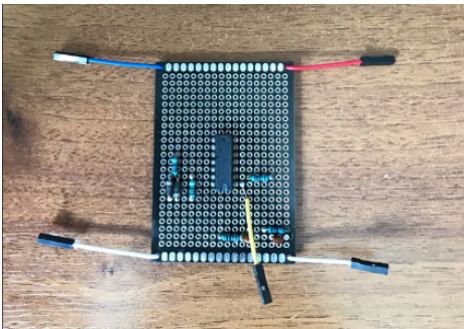


Fig. 16: Gotowa płytką z układem

Pierwsze testy układu wykazały, że układ działa poprawnie, generując sinusoidalny sygnał o częstotliwości około 1 kHz i amplitudzie około 0,6 V. Niestety, ze względu na brak podwójnego potencjometru, nie mogliśmy przeprowadzić testów regulacji częstotliwości ani amplitudy.

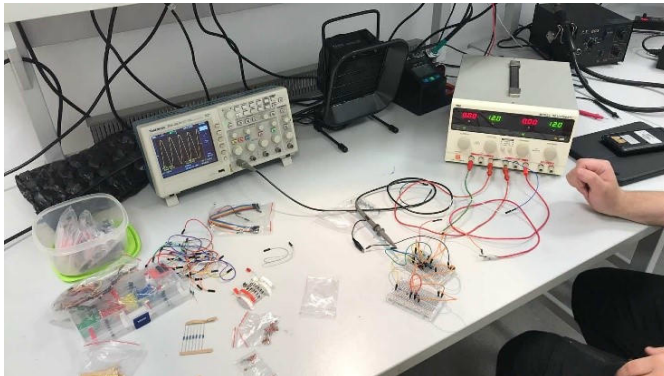


Fig. 17: Testy układu

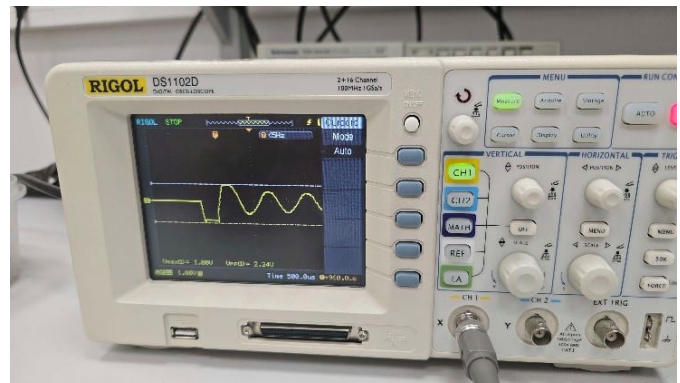


Fig. 18: Testy układu Oneshot

Po wykonaniu podstawowych testów udało nam się sprawdzić układ dla innej częstotliwości z wykorzystaniem potencjometrów z laboratorium.

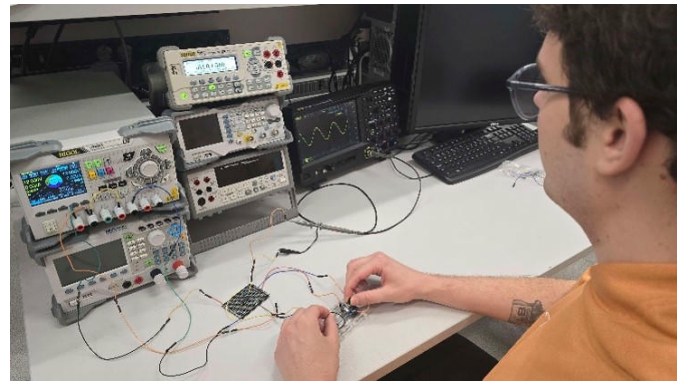


Fig. 19: Testy układu z inną częstotliwością - pomiar

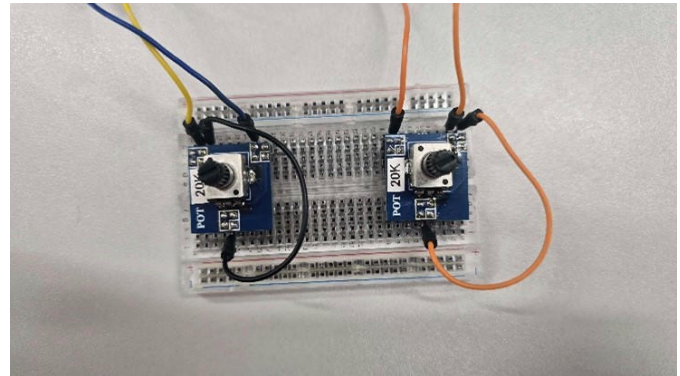


Fig. 20: Testy układu z inną częstotliwością - potencjometry

VII. PODSUMOWANIE

Generatory oparte na układzie mostka Wiena, w pętli dodatkowego sprzężenia zwrotnego WO, który jest często kojarzony z miernictwem elektronicznym, wypełniają lukę w dziedzinie niskich częstotliwości, którą pozostawiają układy generatorów LC oraz tych opartych na rezonatorze kwarcowym. Omawiany układ jest dobrym rozwiązaniem w mikroskalowych aplikacjach. Bez konieczności stosowania problematycznych elementów indukcyjnych – ze względu na swoje rozmiary i niskie zakłócenia generator na mostku Wiena to proste i skuteczne rozwiązanie dla nowoczesnych układów elektronicznych, które wymagają precyzji w zakresie bardzo niskich częstotliwości.



Michał Dobrzycki - student drugiego roku na kierunku Elektronika i Telekomunikacja na Wydziale Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH. Miłośnik wycieczek górskich, entuzjasta elektroniki i informatyki, członek koła KN Micro, gdzie pełni funkcję *Lead Balun Finder*.



Bartłomiej Osiak - student drugiego roku na kierunku Elektronika i Telekomunikacja na Wydziale Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH. Pasjonat elektroniki, wielbiciel symulacji w programach SPICE, zapalony motocyklista oraz oddany członek działu software w Kole Naukowym Micro.



Jakub Kurzyński - student drugiego roku na kierunku Elektronika i Telekomunikacja na Wydziale Informatyki, Elektroniki i Telekomunikacji AGH. Wielbiciel muzyki gotyckiej, zrzeszony członek PZW, zwolennik płyt CD, sympatyk elektroniki analogowej.

REFERENCES

- [1] „Mostek Wiena - podstawy teoretyczne”. [Online]. Dostępne na: <https://esezam.okno.pw.edu.pl/mod/book/view.php?id=62&chapterid=1348>
- [2] B. Razavi, *Design of Analog CMOS Integrated Circuits*, 2. wyd. Wiley, 2016, s. 660.