

INSTYTUT ELEKTROTECHNIKI I ELEKTRONIKI PRZEMYSŁOWEJ
WYDZIAŁ AUTOMATYKI, ROBOTYKI I ELEKTROTECHNIKI
POLITECHNIKA POZNAŃSKA



INŻYNIERSKA PRACA DYPLOMOWA

**WIRTUALNY GENERATOR SYGNAŁÓW
TESTOWYCH**
VIRTUAL TEST SIGNAL GENERATOR

Bartosz PREINIGER

Promotor:
dr inż. Dariusz PROKOP

Poznań, 2022

Streszczenie:

Praca inżynierska przedstawia projekt wirtualnego generatora sygnałów testowych opartego o kartę dźwiękową oraz środowisko LabVIEW. Na wstępie omówiono budowę wirtualnych przyrządów pomiarowych, rodzaje generatorów elektronicznych oraz używane w technice sygnały testowe. W części praktycznej przedstawiono strukturę wirtualnego generatora, użyte karty dźwiękowe, proces budowy oprogramowania w środowisku LabVIEW oraz zbudowany wirtualny generator. Następnie wykonano testy i dokonano ich analizy i zauważono, że zbudowany generator działa w poprawny sposób.

Spis treści

1. Wstęp.....	4
2. Cel i zakres pracy	4
3. Elektryczne przyrządy pomiarowe.....	5
4. Budowa wirtualnych przyrządów pomiarowych.....	6
5. Generatory – rodzaje, budowa oraz zasada działania.....	10
6. Sygnały testowe stosowane w technice.....	14
7. Projekt wirtualnego generatora sygnałów testowych.....	16
7.1 Struktura wirtualna generatorów sygnałów.....	16
7.2 Karty dźwiękowe zastosowane w projekcie	16
7.3 Przegląd sprawdzonych rozwiązań.....	19
7.4 Oprogramowanie i budowa wirtualnego generatora sygnałów	21
7.5 Test i analiza wyników pomiarów generowanych sygnałów testowych	23
8. Podsumowanie	35
9. Bibliografia.....	36

1. Wstęp

W obecnych czasach, gdy wszystko zmierza w stronę powszechnej komputeryzacji, przemysł i laboratoria naukowe nie mogłyby funkcjonować bez rozporoszonych systemów pomiarowych. Tematyka wirtualnych przyrządów pomiarowych oraz środowiska LabVIEW zawiera się obszarze tych systemów, dlatego ma ogromny potencjał w przemyśle jak i badaniach naukowych. Projekt został oparty o kartę dźwiękową, jednego z powszechniejszych urządzeń zawierających przetwornik cyfrowo-analogowy. W projekcie zastosowano kartę dźwiękową z laptopa oraz dwie zewnętrzne karty. Będąc w posiadaniu karty dźwiękowej i odpowiedniego oprogramowania jesteśmy w stanie małym kosztem stworzyć generator funkcyjny, który można użyć w różnych aplikacjach, np. testowanie sprzętu audio.

Strukturę pracy można podzielić na część teoretyczną i praktyczną. W części teoretycznej zagłębiono się w tematykę dotyczącą wirtualnych przyrządów pomiarowych, generatorów oraz używanych w technice sygnałów testowych. Zasięgnięto wiedzy z literatury, artykułów internetowych oraz opisów i danych katalogowych producentów urządzeń zawierających się w tej tematyce. W ramach części praktycznej wykonano generator funkcyjny oparty o kartę dźwiękową oraz oprogramowanie w środowisku LabVIEW, następnie wykonano testy funkcjonalne, których wyniki przeanalizowano.

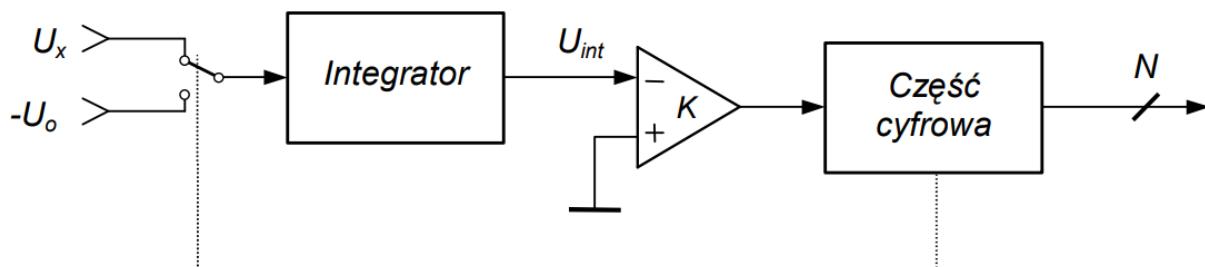
2. Cel i zakres pracy

Celem pracy jest wykonanie generatora sygnałów testowych wykorzystując kartę dźwiękową oraz środowisko LabVIEW. Praca jest podzielona na 6 części. W rozdziale 3 przedstawiono historię urządzeń pomiarowych. W rozdziale 4 zawarto opis budowy wirtualnych przyrządów pomiarowych. W następnej części przedstawiono rodzaje generatorów elektronicznych, ich budowę i zasadę działania. W rozdziale 6 opisano sygnały testowe najczęściej stosowane w technice, pokazano ich wykresy graficzne oraz matematyczne formy zapisu. W kolejnej części pokazany został proces tworzenia oprogramowania i elektronicznej części generatora oraz jego testy i analizę otrzymanych wyników pomiarów. Rozdział 8 stanowi podsumowanie pracy.

3. Elektryczne przyrządy pomiarowe

Przemysł elektrotechniczny nie byłby w stanie dobrze funkcjonować bez metrologii. Każdy najprostszy element i najbardziej skomplikowane urządzenie przy procesie tworzenia jak i produkcji jest poddawane różnym typom testów i pomiarów, dzięki którym można określić ich poprawną pracę oraz wykonanie. Urządzenia używane do pomiarów nazywamy przyrządami pomiarowymi. Historia przyrządów pomiarowych elektrycznych sięga 1820 roku, gdy duński fizyk i chemik Hans Oersted stworzył pierwszy galwanometr. W kolejnych latach powstawały pierwsze przyrządy analogowe. Jednymi z nich były przyrządy magnetoelektryczne, w których pomiar opierał się na wychyleniu wskazówki wywołanym oddziaływaniem pola magnetycznego magnesu trwałego na cewkę, przez którą płynie prąd stały. Gdy pod koniec XIX wieku prąd zmienny zaczął wypierać używany dotychczas w przemyśle prąd stały, powstało poważne zapotrzebowanie na mierniki mierzące wielkości zmiennoprądowe. Wtedy na bazie elektromagnesu powstał nowy typ przyrządów analogowych – przyrządy elektromagnetyczne [9]. Mierniki o ustroju elektromagnetycznym są konstrukcyjnie proste i niezawodne w użytkowaniu, co jest spowodowane brakiem ruchomej cewki. Poza wyżej wymienionymi typami przyrządów pomiarowych, które były najpopularniejsze powstały także m. in. mierniki termoelektryczne, elektrodynamiczne, indukcyjne, elektrostatyczne oraz cieplne. Spowodowało to, że metrologia rozwijała się bardzo szybko.

W związku z rozwojem elektroniki zaczęły powstawać mierniki cyfrowe oparte o przetworniki analogowo-cyfrowe. Najbardziej popularnym typem miernika cyfrowego jest multimeter cyfrowy, wielofunkcyjny przyrząd pomiarowy o duże liczbie zakresów [6]. W większości multimetrów cyfrowych stosowane są integracyjne przetworniki A/C, bazujące na pośredniej metodzie przetwarzania. Napięcie wejściowe jest przetwarzane na odcinek czasu lub częstotliwość, a następnie, za pomocą licznika, na postać cyfrową. Na rys 3.1 pokazano schemat blokowy przetwornika A/C, który jest zbudowany z integratora, komparatora, źródła napięcia referencyjnego oraz części cyfrowej, w której skład wchodzi licznik, zegar i układ sterujący pracą przetwornika.



Rys. 3.1. Schemat blokowy przetwornika A/C realizującego metodę podwójnego całkowania (U_x -napięcie mierzone, $-U_o$ -napięcie wzorcowe, U_{int} – napięcie na wyjściu integratora, N - rozdzielcość bitowa przetwornika A/C)

Obecnie są produkowane dwa typy multimetrów cyfrowych: nieprogramowanych ze „sztywną” logiką i programowane (mikroprocesorowe) [6].

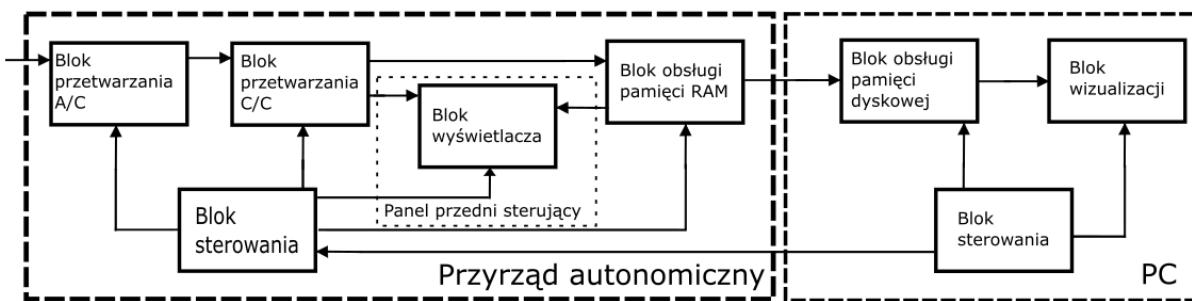
Wraz z ciągłym rozwojem techniki pomiarowej zaczęła się rozwijać najnowsza generacja przyrządów pomiarowych, które stanowią wirtualne przyrządy pomiarowe [1].

4. Budowa wirtualnych przyrządów pomiarowych

Słowo wirtualny według słownika wyrazów obcych to „mogący zaistnieć”. Oznacza to, coś, co nie istnieje w danej formie w rzeczywistości, ale z punktu widzenia użytkownika spełnia daną rolę z wykorzystaniem innych środków niż tradycyjnie. Wirtualne przyrządy pomiarowe zawierają oprogramowanie, zastępujące odpowiednie części klasycznych przyrządów pomiarowych. To oprogramowanie przy współpracy z komputerem ma zastąpić realizację sprzętową poszczególnych funkcji. Najczęściej oprogramowanie to substytuuje wykonywanie algorytmów przetwarzania sygnałów oraz obsługę przyrządu. Umożliwia to łatwe przekonstruowanie przyrządu oraz jego szybką adaptację do oczekiwania konsumenta, bez konieczności określania kosztów takiej modyfikacji, jak jest w przypadku urządzeń fizycznych. W zależności od przeznaczenia urządzenia oraz wykorzystywanego programu przyrząd może pełnić różne funkcje, np. funkcję oscyloskopu. Wirtualne przyrządy można sklasyfikować dzieląc na następujące grupy:

- przyrządy bez płyty czołowej połączone z komputerem albo zawierające się w jego obudowie,
- autonomiczne urządzenia posiadające w standardowy interfejs, przez który są połączone z komputerem.

Rysunek poniżej przedstawia przykładowy schemat funkcjonalny urządzenia wirtualnego zaimplementowanego, jako autonomiczne urządzenie połączone z komputerem.

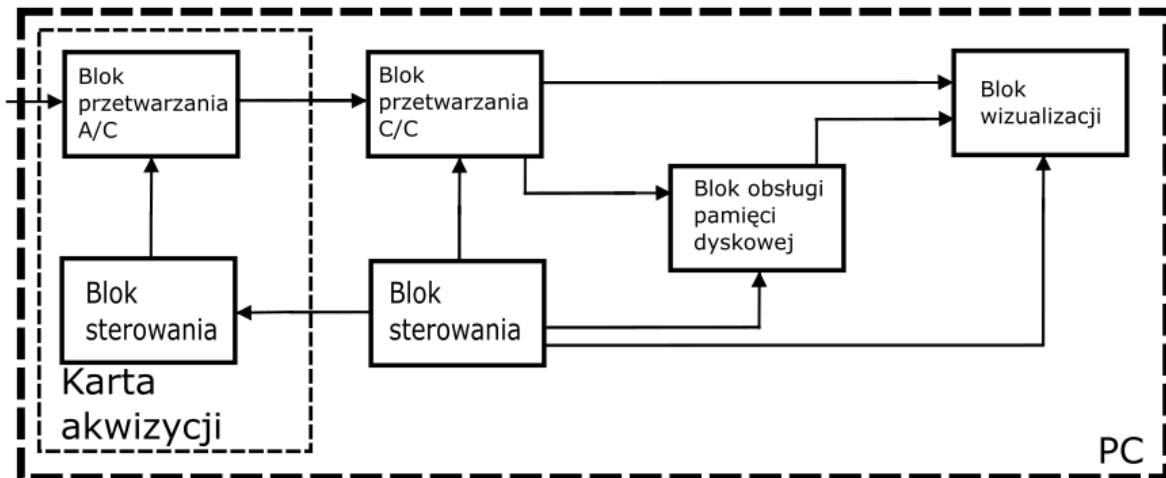


Rys. 4.1. Struktura przyrządu wirtualnego, jako połączonego przyrządu autonomicznego z komputerem[1]

W bloku przetwarzania A/C analogowe napięcie wejściowe jest przetwarzane na postać cyfrową. Po przetworzeniu dane są zapisywane w pamięci RAM. Jednocześnie zarejestrowane wyniki mogą być przesyłane do komputera za pośrednictwem interfejsu i wyświetlane na ekranie monitora. Parametry pomiaru ustawiane są przez operatora za pomocą panelu przedniego własnego przyrządu lub poprzez panel na ekranie monitora. Zastąpienie obsługi tego urządzenia własnym panelem symulowanym na ekranie monitora można wnieść nową jakość do współpracy z nim. W rzeczywistym przyrządzie, zgodnie z trybem pracy, tylko jeden wyświetlacz pokazuje nam wszystkie niezbędne informacje. W przypadku przyrządów wirtualnych takiego ograniczenia nie ma – każdy parametr pomiarowy może mieć osobny wskaźnik. Dlatego obsługa przyrządu wirtualnego opartego o moduł akwizycji sygnałów jest bardziej intuicyjna i prostsza niż korzystanie z rzeczywistego panelu niezależnego urządzenia. Szersza jest również możliwość prezentacji wyników. Nie muszą to być oddzielne liczby, ale mogą być także prezentowane w bardziej złożonych formach, takich jak tabele i wykresy. Nie ma również ograniczeń w przetwarzaniu wyników w oparciu o wbudowane funkcje samodzielnego przyrządu. Odpowiednie oprogramowanie pozwala dowolnie rozszerzać możliwości obróbki i analizy wyników. Kolejną zaletą wirtualnych instrumentów jest możliwość wykonywania pomiaru na

odległość, w miejscach o uciążliwych czynnikach środowiska oraz w lokalizacjach trudno dostępnych.

Przyrządy z drugiej grupy dają większe możliwości w dostosowaniu do potrzeb obsługującego.

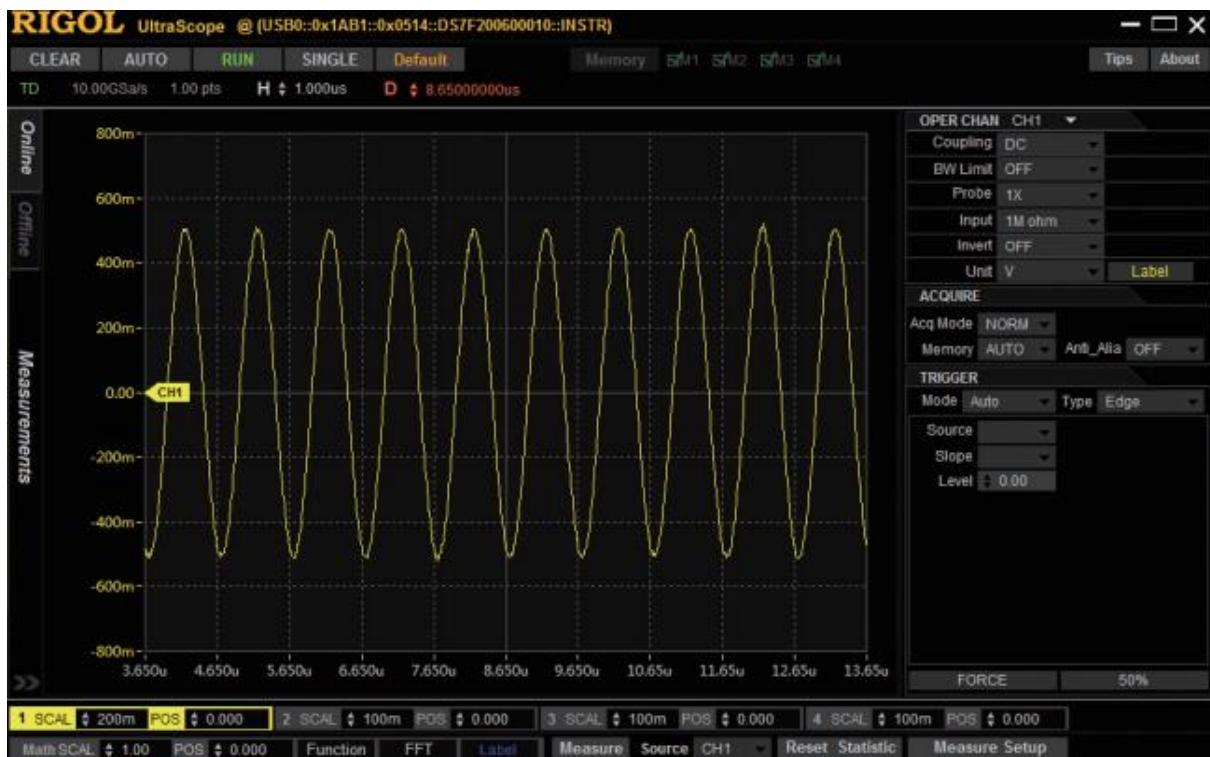


Rys. 4.2. Struktura przyrządu wirtualnego opartego o moduł akwizycji sygnałów pomiarowych[1]

Na powyższym rysunku 4.2 przedstawiono przykładową strukturalną budowę takiego przyrządu. Mierzone napięcie jest przyłączone do analogowego wejścia modułu akwizycji sygnałów. Następnie zmierzona wartość zostaje wyświetlona w odpowiednim miejscu na panelu wirtualnym oraz zostaje także zapisana do pamięci urządzenia. Na bazie tego rodzaju modułów akwizycji sygnałów można opracować i wykonać rozmaite urządzenia pomiarowe wirtualne przeznaczenia ogólnego, np.: multimetry, generatory, oscyloskopy oraz urządzenia specjalistyczne, które są budowane by je wykorzystać w unikatowej implementacji [1].

Przykładem przyrządu wirtualnego będącego autonomicznym przyrządem z możliwością sterowania za pośrednictwem komputera jest model MSO/DS7000 oscyloskopu cyfrowego firmy RIGOL. Sterowanie za pomocą komputera odbywa się za pośrednictwem programu Ultra Scope.

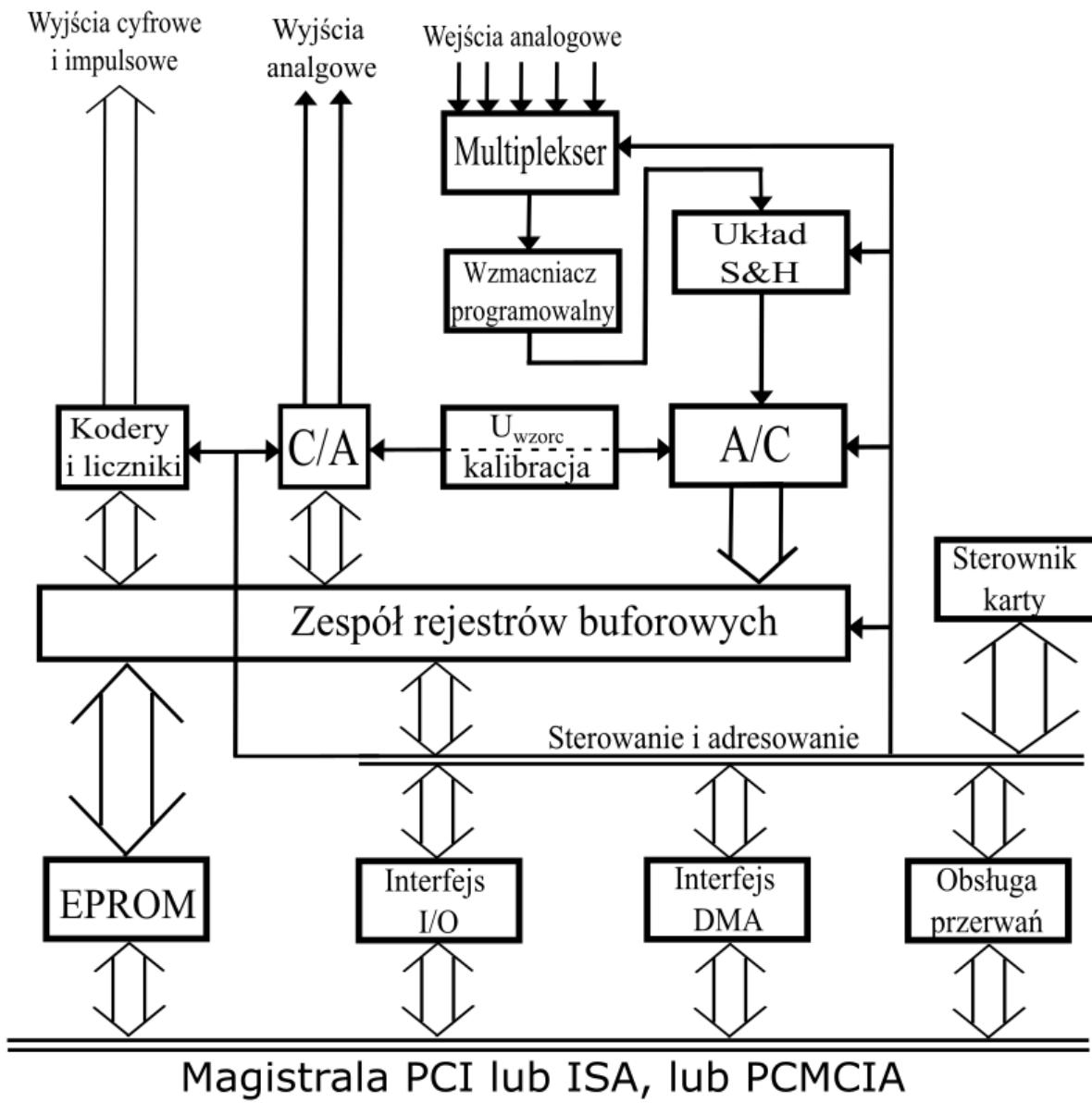




Rys. 4.4. Panel programu Ultra Scope firmy RIGOL [2]

Przedstawiony na rysunku 4.4 panel programu umożliwia zadawanie mierzonej wielkości, zakresu pomiarowego, rozdzielczości, liczby pomiarów oraz wybór odpowiedniego kanału, z którego chcemy pobierać informacje o pomiarze. W związku z możliwościami tego urządzenia, znajduje ono zastosowanie w przemyśle przy układach regulacji, zasilania i elektroniki samochodowej[2].

Przykładem nieautonomicznego urządzenia, który wraz z oprogramowaniem tworzy wirtualny przyrząd pomiarowy, jest karta pomiarowa DAQ (eng. *Data Acquisition Card* – karta akwizycji danych). Nowoczesne karty pomiarowe spełniają wiele rozbudowanych funkcji akwizycji danych m. in. przetwarzanie a/c wielu sygnałów dołączonych do wielu wejść analogowych, filtracja sygnałów oraz wytwarzanie żądanych sygnałów na wyjściach analogowych dzięki operacji przetwarzania cyfrowo-analogowego. Typowa karta DAQ składa się z następujących bloków funkcjonalnych: multiplekser, wzmacniacz programowalny, układ próbkująco-pamiętający S&H lub próbkująco-śledzący, przetwornik a/c, przetwornik c/a, wysokiej jakości źródło napięcia odniesienia, układ kalibracji, blok wyzwalania, rejestr, układy pamięci i blok sterowania. Na rysunku 4.5 przedstawiono budowę karty pomiarowej DAQ. W porównaniu do klasycznych cyfrowych przyrządów pomiarowych karty pomiarowe DAQ: umożliwiają pomiary wielokanałowe, pełnią funkcję klasycznych przyrządów cyfrowych zależnie od wyboru trybu pracy. Dane techniczne kart pomiarowych obejmują następujące parametry użytkowe: liczbę wejść analogowych i cyfrowych oraz ich rodzaj, rozdzielczość przetwornika analogowo-cyfrowego dana liczbą bitów, największą wartością częstotliwości próbkowania, zakresem pomiarowym, dokładnością pomiaru, pojemnością pamięci oraz magistralą za pomocą której można podłączyć kartę do komputera.



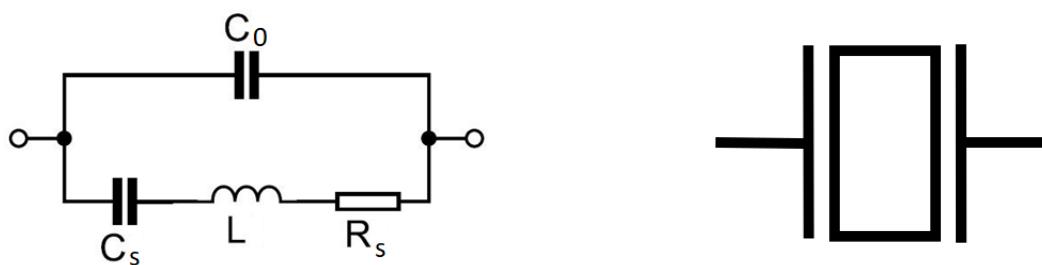
Rys. 4.5. Schemat blokowy karty pomiarowej DAQ[3]

5. Generatory – rodzaje, budowa i zasada działania

Generatory są to układy wytwarzające z reguły sygnały okresowe, o określonym kształcie i częstotliwości. Znajdują one zastosowanie w niemal każdym systemie elektronicznym, zaczynając od sprzętu najpowszechniejszego użytku po komputery, kończąc na profesjonalnej aparaturze kontrolno-pomiarowej [4]. Parametrami charakteryzującymi generatory są: kształt przebiegów, częstotliwość generowanego przebiegu, zakres i charakter przestrajania generatora, długo i krótkoterminowa stałość częstotliwości generowanego przebiegu, współczynnik zawartości harmonicznych, współczynnik zniekształceń całkowitych. Ze względu na budowę rozróżniamy następujące typy generatorów:

a) Generatory kwarcowe:

Generatory kwarcowe stanowią najbardziej powszechnie źródło sygnałów o dużej dokładności i stałości częstotliwości. Znalazły zastosowanie w niemal wszystkich źródłach sygnałów odniesienia: zaczynając od ręcznych zegarków, poprzez telefony komórkowe, komputery, urządzenia audiowizualne, aparaturę pomiarową, na atomowych wzorcach czasu skończywszy [4]. Głównym elementem generatorów kwarcowych jest rezonator kwarcowy, którego drgania mechaniczne można pobudzić za pomocą pola elektrycznego. Rezonator kwarcowy z dołączonymi elektrodami zachowuje się jak obwód rezonansowy o dużej dobroci. [11]. Klasyczne generatory kwarcowe XO osiągają stałość częstotliwości rzędu 10^{-5} , generatory z kompensacją temperatury TCXO osiągają stałość częstotliwości rzędu 10^{-7} , natomiast najlepszą stałość częstotliwości z generatorów kwarcowych charakteryzują się generatory z wbudowaną grzałką OCXO, których stałość częstotliwości osiąga wartości rzędu 10^{-9} . Elektryczne właściwości rezonatora kwarcowego dobrze reprezentuje schemat zastępczy z rysunku nr. 5.1.



Rys. 5.1. Schemat zastępczy oraz symbol rezonatora kwarcowego [4]

Na powyższym rysunku jak i poniższych wzorach poszczególne symbole oznaczają:

- C_0 – pojemność elektrod rezonatora,
- C_s , L – parametry uzależnione od właściwości mechanicznych płytka kwarcowej rezonatora,
- R_s – rezystancja odzwierciedlająca tłumienie obwodu

Częstotliwość rezonansu szeregowego takiego rezonatora jest równa:

$$f_s = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_s}} \quad 5.1$$

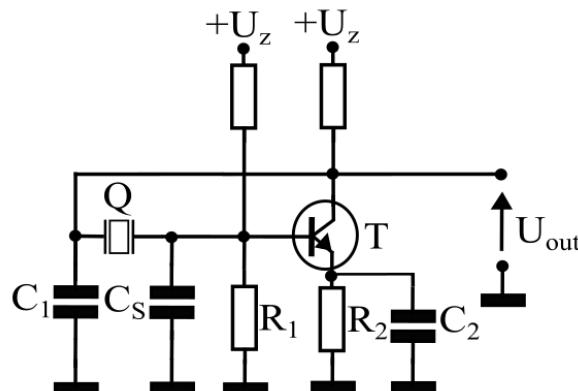
Natomiast częstotliwość rezonansu równoległego jest równa:

$$f_p = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_p}} \quad 5.2$$

Gdzie C_p jest równe (przy założeniu małej rezystancji R_s):

$$C_p = \frac{C_s C_0}{C_s + C_0} \quad 5.3$$

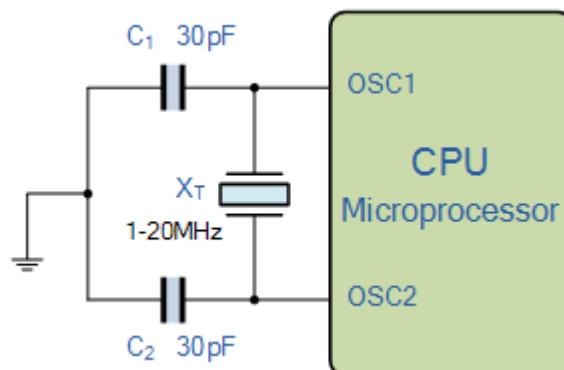
Schemat zastępczy z rysunku nr 5.1 jest słuszny tylko dla drgań o częstotliwościach podstawowych. Przykładowym generatorem drgań sinusoidalnych o częstotliwościach podstawowych jest generator Pierce'a przedstawiony na rysunku 5.2.



Rys. 5.2. Generator Pierce'a ze wzmacniaczem w układzie wspólnego emitera [11]

Obwód rezonansowy jest pobudzany z kolektora. Jeżeli założymy, że prąd płynący w obwodzie rezonansowym jest znacznie większy od prądu wzbudzającego, na pojemnościach C_1 i C_S otrzymamy sygnały w przeciwej fazie. W ten sposób jest realizowane dodatnie sprzężenie zwrotne [11].

Jednym z zastosowań generatorów kwarcowych jest ich użycie w układach z mikroprocesorem. Zadaniem takiego generatora jest wygenerowanie przebiegu prostokątnego, który ustala prędkość taktowania mikroprocesora. Na rysunku 5.3 przedstawiono przykładową realizację takiego generatora kwarcowego.

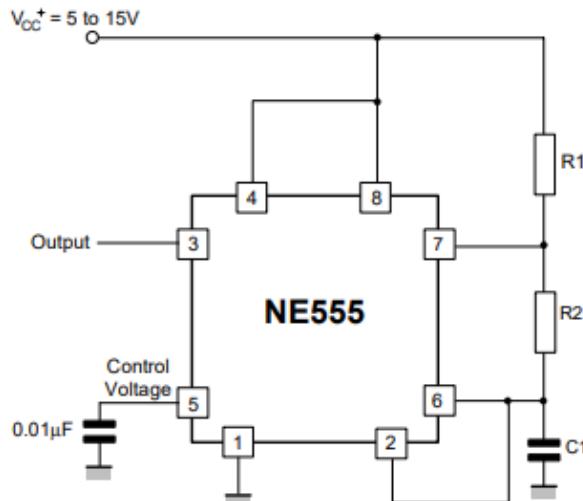


Rys. 5.3. Generator kwarcowy współpracujący z mikroprocesorem

b) Generatory relaksacyjne

Generator relaksacyjny jest to nieliniowy generator drgań, który generuje sygnały okresowe niesinusoidalne, takie jak sygnał trójkątny albo sygnał prostokątny. Obwód generatora relaksacyjnego składa się ze sprzężenia zwrotnego, w którego skład wchodzi łącznik (np. tranzystor, komparator, przekaźnik albo wzmacniacz operacyjny) albo urządzenia o ujemnej rezystancji (np. dioda tunelowa), które powtarzalnie ładują kondensator albo cewkę przez rezystancję, aż osiągnie się odpowiedni poziom napięcia, by ponownie odpowiedni element rozładować. Częstotliwość generatora zależy od stałej czasowej obwodu kondensatora lub cewki [5]. Generatory relaksacyjne są używane do generacji sygnałów o niskiej częstotliwości. Jednym z pierwszych generatorów relaksacyjnych był generator zawierający

lampę neonową, generującą przebieg piłokształtny. Z powodu rozwoju mikroelektroniki, zostały one wyparte przez bardziej powszechnie generatory relaksacyjne, np. generatory oparte o Timer 555 (NE555). Przykładem generatora opartego o NE555 jest generator przebiegów prostokątnych przedstawiony na rysunku nr 5.4.

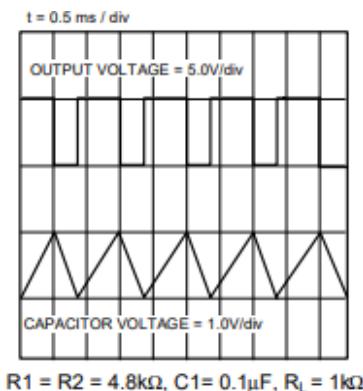


Rys. 5.4. Generator relaksacyjny oparty o NE555 pracujące, jako multiwibrator [14]

Zasada działania jest prosta, kondensator ładuje i rozładowuje się przez określony czas. Czasy te zdeterminowane są przez elementy pasywne, które dobieramy w zależności od naszych potrzeb. Na podstawie okresu wyznaczamy częstotliwość, której wartość wynosi:

$$f = \frac{1.44}{(R_1 + 2R_2)C_1} \quad 5.4$$

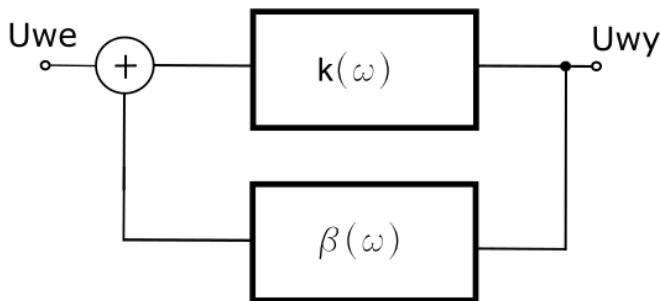
Na poniższym wykresie pokazano przykładowe przebiegi dla konkretnej realizacji układu:



Rys. 5.5. Przykładowy wykres czasowy napięć generatora opartego o NE555[14]

c) Generatory ze sprzężeniem zwrotnym

Generatory ze sprzężeniem zwrotnym składają się ze wzmacniacza o wzmacnieniu napięciowym K oraz czwórnika sprzężenia zwrotnego o współczynniku przenoszenia β .[6] By taki generator działał poprawnie musi zostać spełniony warunek konieczny istnienia drgań. Ten warunek ma 2 części: warunek fazy i warunek amplitudy. W najprostszym sposobie znajdują się wyprowadzone z analizy obwodu z wykorzystaniem liniowego modelu elementów. Jeżeli jesteśmy w stanie oddzielić w generatorze wzmacniacz i obwód sprzężenia zwrotnego, można wyznaczyć warunki powstawania drgań, wykorzystując model przedstawiony na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Model generatora, jako układu ze sprzężeniem zwrotnym[4]

Jeżeli układ generatora zostanie pobudzony, to powstające drgania będą miały częstotliwość f_0 , oznacza to, że wzmacnianie jak i sprzężenie zwrotne mogą być zależne od częstotliwości, zatem warunki generacji mogą zostać zapisane, jako[4]:

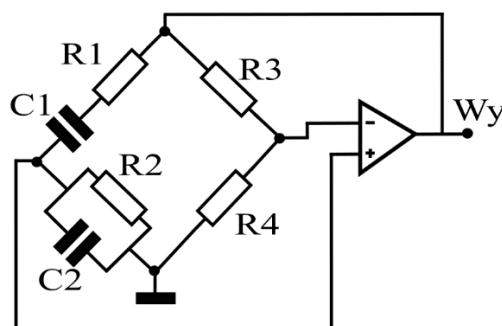
- warunek fazy, określający pulsację generacji:

$$\arg[k(\omega_0)] + \arg[\beta(\omega_0)] = 0 + 2n\pi \quad 5.5$$

- warunek wzbudzenia drgań, określający minimalne wzmacnianie w pętli otwartej:

$$|k(\omega_0)| |\beta(\omega_0)| \geq 1 \quad 5.6$$

Najpopularniejszymi generatorami ze sprzężeniem zwrotnym są generatory LC oraz RC. Generatory LC swoją zasadę działania opierają na obwodzie rezonansowym elementów L i C, których parametry określają częstotliwość generatora. Mają one stabilność częstotliwości większą od generatorów RC, ale są one znacznie droższe. Bazując na obwodach LC trudno zrealizować generację sygnałów małych i średnich częstotliwości (10Hz- 100kHz), dlatego w tym zakresie stosuje się generatory RC. Charakteryzują się one dosyć dobrą stałością częstotliwości oraz małą zawartością harmonicznych. Najbardziej popularnym generatorem RC jest generator z mostkiem Wiena, stosowany do generacji sygnałów w zakresie częstotliwości akustycznych ze względu na dobrą stałość częstotliwości i małe zniekształcenia nieliniowe. Na rysunku nr 5.7 przedstawiono schemat przykładowej realizacji generatora RC:



Rys. 5.7. Schemat generatora RC z mostkiem Wiena[6]

Generator przedstawiony na rysunku 5.7 generuje na wyjściu układu przebieg sinusoidalny. Stan równowagi mostka przedstawionego powyżej występuje dla pulsacji:

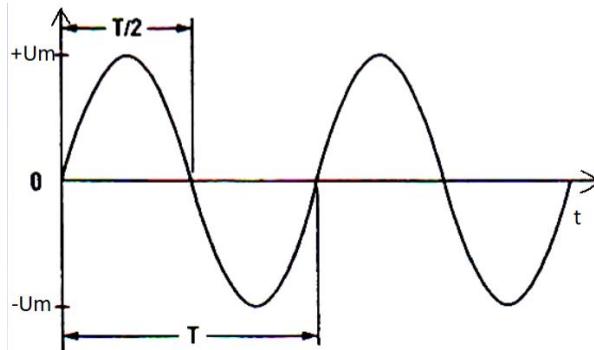
$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{R_1 C_1 R_2 C_2}} \quad 5.7$$

Jeżeli $R_1=R_2=R$ oraz $C_1=C_2=C$ (mostek symetryczny), co jest często spotykane w praktyce, to:

$$\omega_0 = \frac{1}{RC} \quad 5.8$$

6. Sygnały testowe stosowane w technice

Generacja sygnałów może być częścią każdego systemu testującego lub pomiarowego. Powszechnie stosowanymi sygnałami testowymi są przebiegi: sinusoidalne, prostokątne, trójkątne oraz piłokształtne [7]. Pierwszym omawianym sygnałem jest sygnał sinusoidalny, który jest najczęściej stosowany do testowania sprzętu audio. Pobudzając testowany układ sygnałem sinusoidalnym, można na podstawie jego odpowiedzi, ocenić istotne parametry układu, na przykład wyznaczenie charakterystyk Bodego filtrów i wzmacniaczy. Przebieg graficzny oraz wzory postaci czasowej sygnału napięcia sinusoidalnego przedstawiono poniżej:

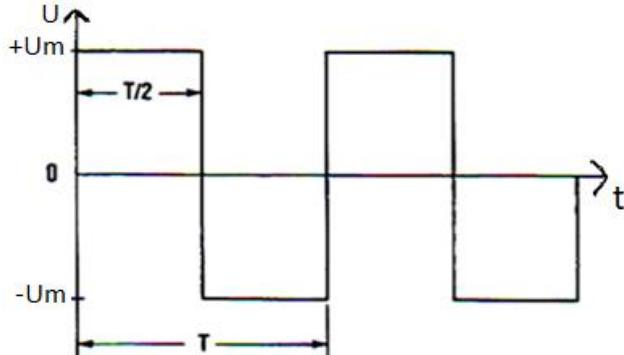


Rys. 6.1. Przebieg sygnału sinusoidalnego[8]

Postać czasowa sygnału sinusoidalnego jest następująca:

$$u(t) = U_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad 6.1$$

Następnym często stosowanym sygnałem jest sygnał prostokątny.



Rys. 6.2. Przebieg sygnału prostokątnego[8]

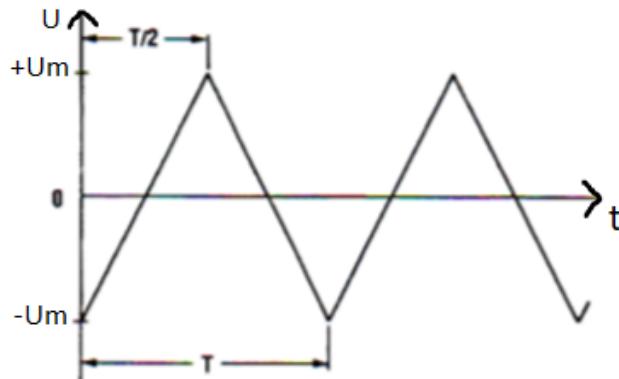
Postać czasowa sygnału wyraża się:

$$u(t) = \begin{cases} U_m & \text{dla } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ -U_m & \text{dla } \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad 6.2$$

$$u(t) = \frac{4 \cdot U_m}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{2k-1} \cdot \sin\left(\frac{(2k-1) \cdot \pi \cdot t}{T}\right) \quad 6.3$$

Sygnał prostokątny jest najczęściej stosowany do testowania sprawności układów i wyznaczania ich charakterystyki skokowej np. regulatorów. Jest też używany do testowania właściwości dynamicznych zasilaczy sieciowych.

Przebieg trójkątny prezentuje się w następujący sposób:



Rys. 6.3. Przebieg sygnału trójkątnego[8]

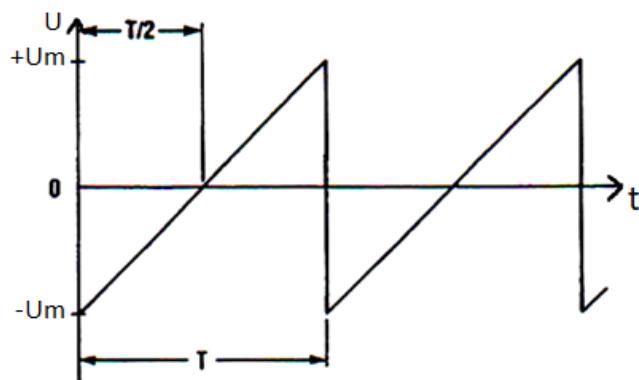
Postać czasowa sygnału wyraża się następująco:

$$u(t) = \begin{cases} U_m \cdot \left(-\frac{4}{T} \cdot t + 1 \right) & \text{dla } 0 \leq t \leq \frac{T}{2} \\ U_m \cdot \left(\frac{4}{T} \cdot t - 1 \right) & \text{dla } \frac{T}{2} \leq t \leq T \end{cases} \quad 6.4$$

$$u(t) = \frac{8 \cdot U_m}{\pi^2} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1 + (-1)^k}{2 \cdot (2k-1)^2} \cdot \sin\left(\frac{(2k-1) \cdot \pi t}{T}\right) \quad 6.5$$

Sygnał trójkątny jest używany do sprawdzenia odpowiedzi układu na sygnał narastający liniowo.

Ostatnim spotykanyem sygnałem testowym jest sygnał piłokształtny, którego wykres czasowy wygląda następująco:



Rys. 6.4. Przebieg sygnału piłokształtnego [8]

Postać czasowa sygnału wyraża się:

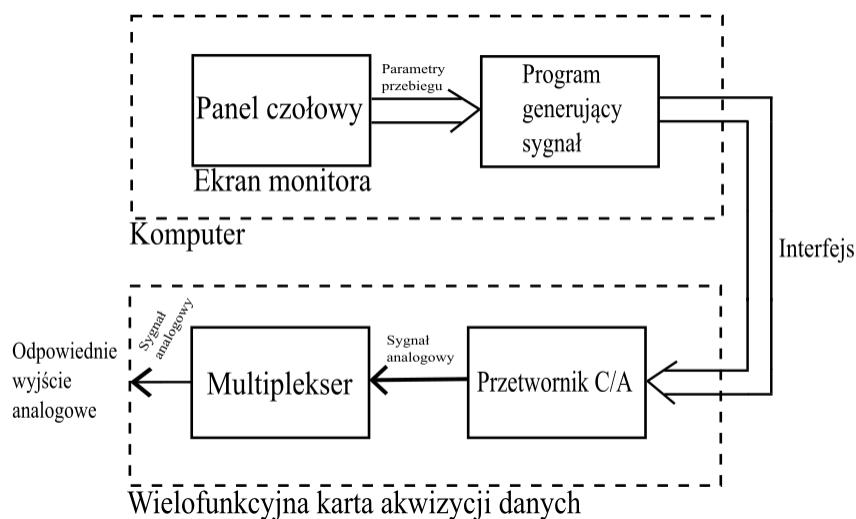
$$u(t) = U_m \cdot \frac{-2}{\pi} \cdot \arctan\left(\cot\frac{\pi \cdot t}{T}\right) \quad 6.6$$

$$u(t) = -\frac{2 \cdot U_m}{\pi} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{(-1)^k}{k} \cdot \sin(2\pi k t) \quad 6.7$$

7. Projekt wirtualnego generatora sygnałów testowych

7.1 Struktura wirtualna generatorów sygnałów

Wirtualny generator sygnałów składa się z komputera, oprogramowania oraz wielofunkcyjnej karty akwizycji. Na monitorze komputera, na wirtualnym panelu czołowym urządzenia ustawiane są parametry sygnału, który chcemy wygenerować, m. in.: częstotliwość sygnału, częstotliwość próbkowania, ilość próbek, amplitudę, kąt przesunięcia fazowego oraz kształtu przebiegu. Następnie po wywołaniu programu odpowiednie próbki danych są przesyłane odpowiednim interfejsem (np. USB) do wielofunkcyjnej karty akwizycji danych, gdzie przetwornik C/A „składa” próbki w sygnał analogowy, a multiplekser podaje je na odpowiednie wyjście analogowe karty. Zasadę działania można przedstawić także na schemacie blokowym (rys. 7.1).



Rys. 7.1. Schemat blokowy wirtualnego generatora sygnałów

7.2 Karty dźwiękowe zastosowane w projekcie

Wirtualne generatory posiadają w swojej strukturze przetwornik cyfrowo-analogowy, który jest kluczowym elementem urządzenia. Przedmiotem nieoczywistym, aczkolwiek dość powszednim jest karta dźwiękowa. W tym projekcie użyto następujących modeli kart dźwiękowych:

- Zewnętrzna karta dźwiękowa AK103E

Jest to karta muzyczna umożliwiająca symulację dźwięku stereofonicznego. Do połączenia z komputerem wykorzystuje interfejs USB. Posiada 16-bitowy przetwornik cyfrowo-analogowy i standardową częstotliwość próbkowania 44.1 kHz. Umożliwia podłączenie sprzętów obsługujących cyfrowe audio dzięki złączu optycznemu S/PDIF[12]. Koszt karty to ok. 70 złotych.

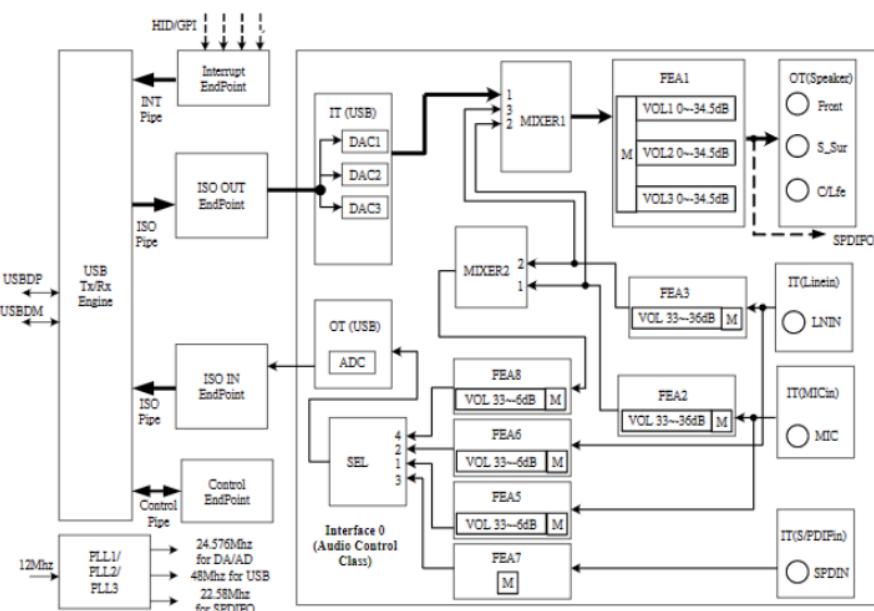


Rys. 7.2. Zdjęcia karty dźwiękowej AK103E

Po otwarciu obudowy udało się sprawdzić, że architektura urządzenia jest oparta o chipset CM6206-LX. Jest to wysoko zintegrowany układ kontrolera I/O USB Audio firmy Cmedia.



Rys. 7.3. Zdjęcie karty dźwiękowej AK103E bez obudowy



Rys. 7.4. Schemat blokowy układu CM6206-LX[12]

b) Zewnętrzna karta dźwiękowa AK103D

Jest to karta dźwiękowa z systemem Virtual 7.1 CH, co oznacza symulację dźwięku w Stereo 7.1. Zasilana jest z portu USB. Posiada dwa wejścia słuchawkowe i dwa wyjścia mikrofonowe. Posiada 16-bitowy przetwornik C/A. Jej koszt to około 10 złotych. Nawet po otwarciu obudowy nie można było zidentyfikować elementu sterującego (brak opisu elementu na płytce PCB). Można natomiast zauważać, że budowa tej karty jest dużo prostsza od karty AK103E.



Rys. 7.5 Zdjęcie karty dźwiękowej AK103D



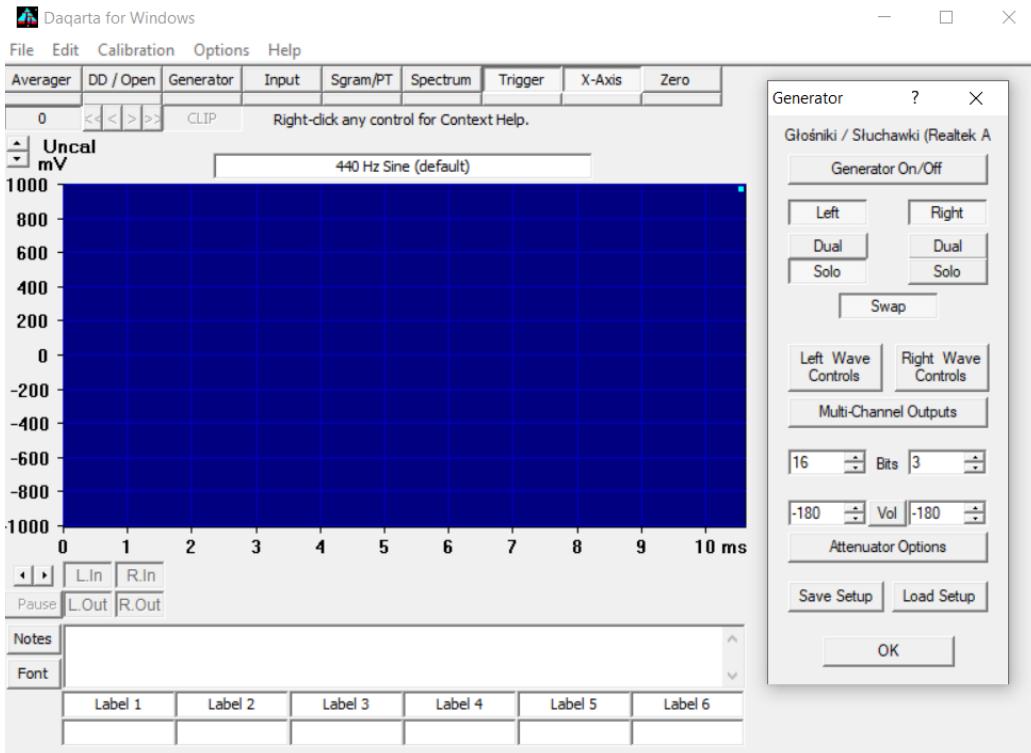
Rys. 7.6 Zdjęcie karty dźwiękowej AK103D bez obudowy

c) Zintegrowana karta dźwiękowa z płytą główną Dell 0J11DHA00

Jest to karta dźwiękowa wbudowana w płytę główną, posiada jedno wejście słuchawkowe i jedno wyjście mikrofonowe.

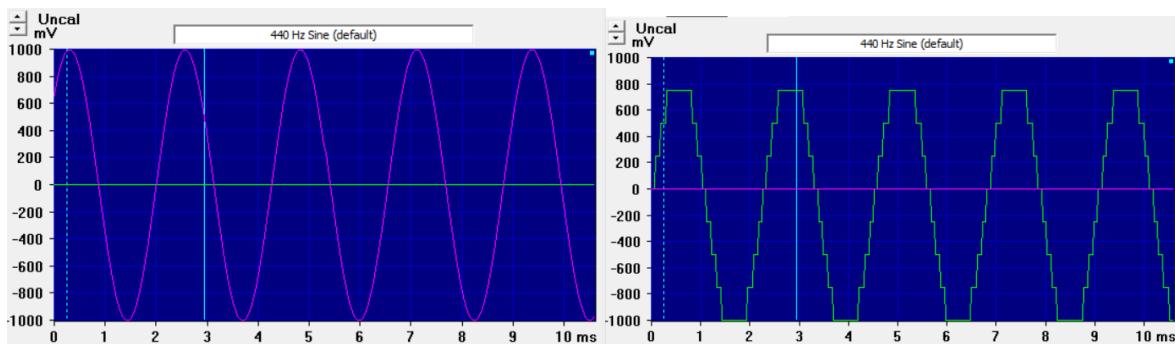
7.3 Przegląd sprawdzonych rozwiązań oprogramowania generatora wirtualnego

Przed rozpoczęciem projektowania generatora dokonano przeglądu dotychczasowych rozwiązań tego typu programów. Pierwszym rozwiązaniem jest program Daqarta, wydany przez firmę Interstellar Research.



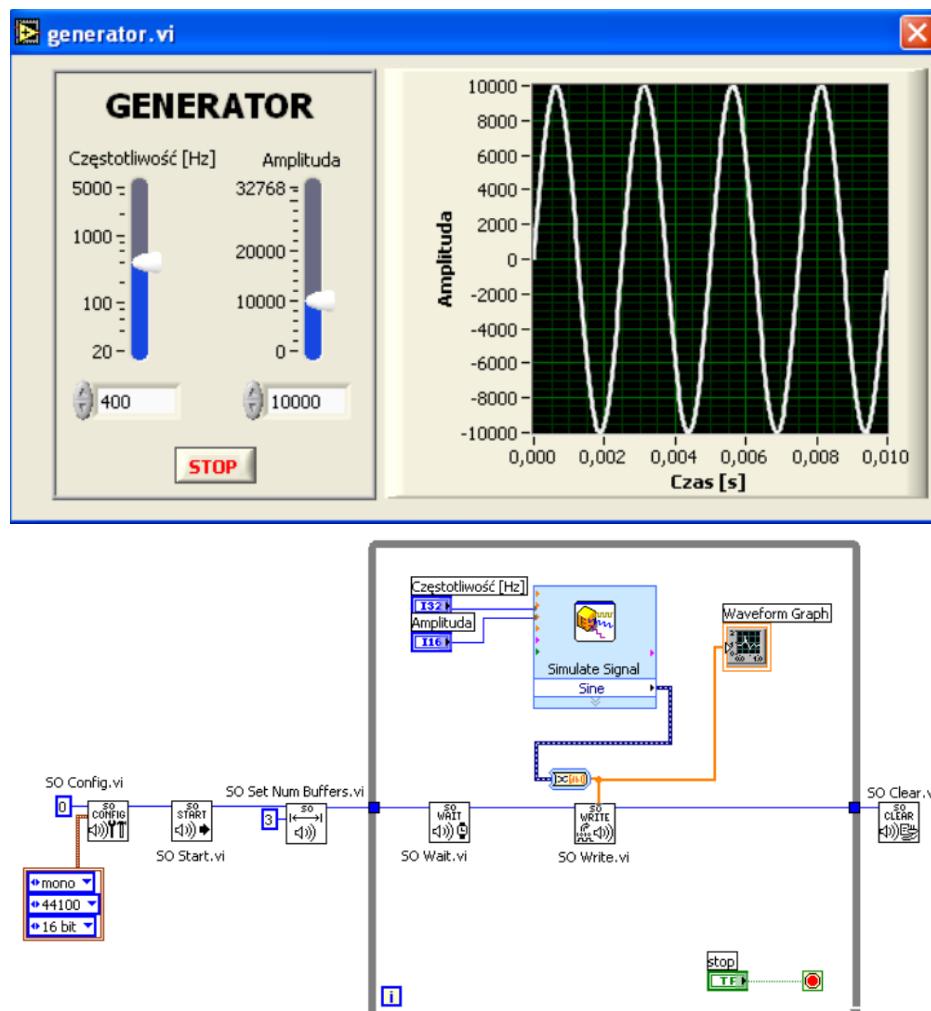
Rys. 7.7. Panel czołowy generatora w programie Daqarta

Program pozwala na generację sygnałów na wyjściach karty dźwiękowej. Potrafi wygenerować kilkanaście rodzajów przebiegów, m. in. sygnał sinusoidalny, sygnał trójkątny, sygnał piłokształtny, sygnał prostokątny oraz sygnał PWM. Program umożliwia także wybranie różnych parametrów sygnałów osobno dla lewego i prawego kanału. Daje możliwość zmiany amplitudy sygnału, nie zmieniając poziomu głośu w systemie operacyjnym. Najciekawszym elementem programu jest możliwość zmiany rozdzielczości przetwornika C/A karty. Za pomocą tego programu, na wyjściu karty nr, przy maksymalnym poziomie głośności, dla przebiegu sinusa 440 Hz, wygenerowano sygnał z rozdzielczością 16 i 3bitową i zmierzoną multimetrem uniwersalnym odczytując wartość napięcia 0,64 V.



Rys. 7.8. Przykład tego samego przebiegu wygenerowanego z rozdzielczością 16 bitową oraz 3 bitową

Następnym przykładem rozwiązań wirtualnego generatora jest program wykonany w środowisku LabVIEW. Na rysunku 7.9 przedstawiono panel czołowy urządzenia wirtualnego, za którego pomocą można zmieniać następujące parametry: częstotliwość sygnału w zakresie od 20 do 5000 Hz i amplitudę sygnału od 0 do 32768. Na panelu można także śledzić graficznie te parametry. W schemacie blokowym programu można zmieniać następujące parametry: częstotliwość próbkowania, ID urządzenia, liczbę bitów przetwornika oraz tryb próbkowania. Na rysunku 7.9 przedstawiono schemat blokowy tego generatora[13]. Wykonany w LabVIEW 7.1 przez pracowników Laboratorium Eksperymentu Fizycznego Wydziału Fizyki Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu.



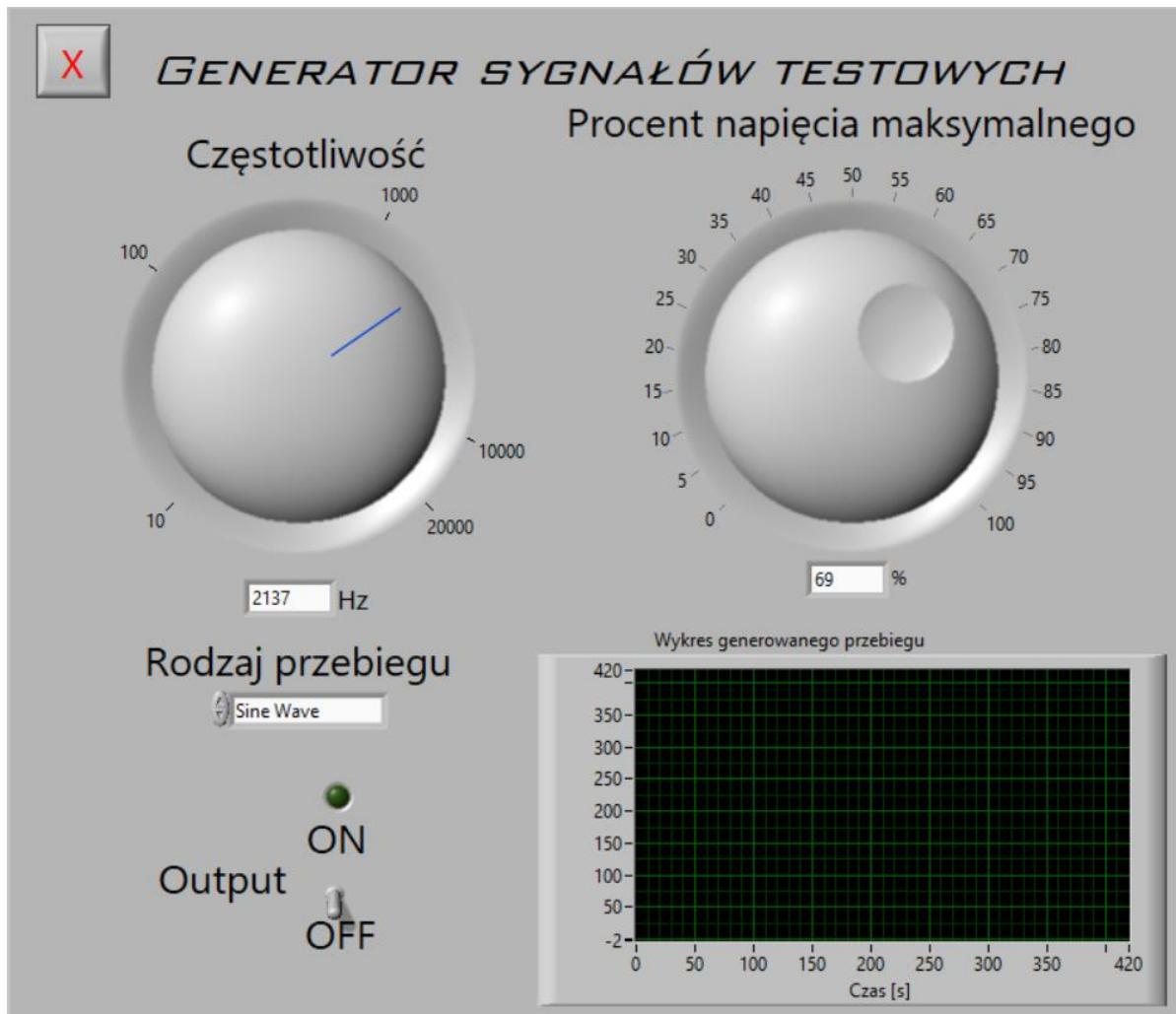
Rys. 7.9 Panel czołowy i schemat blokowy wirtualnego generatora przebiegów sinusoidalnych[13]

7.4 Oprogramowanie i budowa projektu.

Założeniami projektu wirtualnego generatora sygnałów testowych opisywanego w tej pracy są:

- a) Wykonanie oprogramowania w środowisku LabVIEW umożliwiającego karcie dźwiękowej:
 - generowanie przebiegu: sinusoidalnego, trójkątnego, piłokształtnego, prostokątnego,
 - amplituda napięcia wyjściowego w granicach 1-5 V,
 - częstotliwość sygnałów w zakresie częstotliwości dźwięku od 10 Hz do 20 kHz.
- b) Wykonanie części zewnętrznej umożliwiającej wyrowadzenie sygnału wyjściowego karty na zaciski umożliwiające pomiary m. in. oscyloskopem.

Oprogramowanie w środowisku LabVIEW dzieli się na 2 części: panel czołowy oraz schemat blokowy. Panel czołowy wygląda następująco:



Rys. 7.10 Panel czołowy oprogramowania wirtualnego generatora sygnałów testowych

Na panelu czołowym ustawiamy poszczególne parametry sygnału:

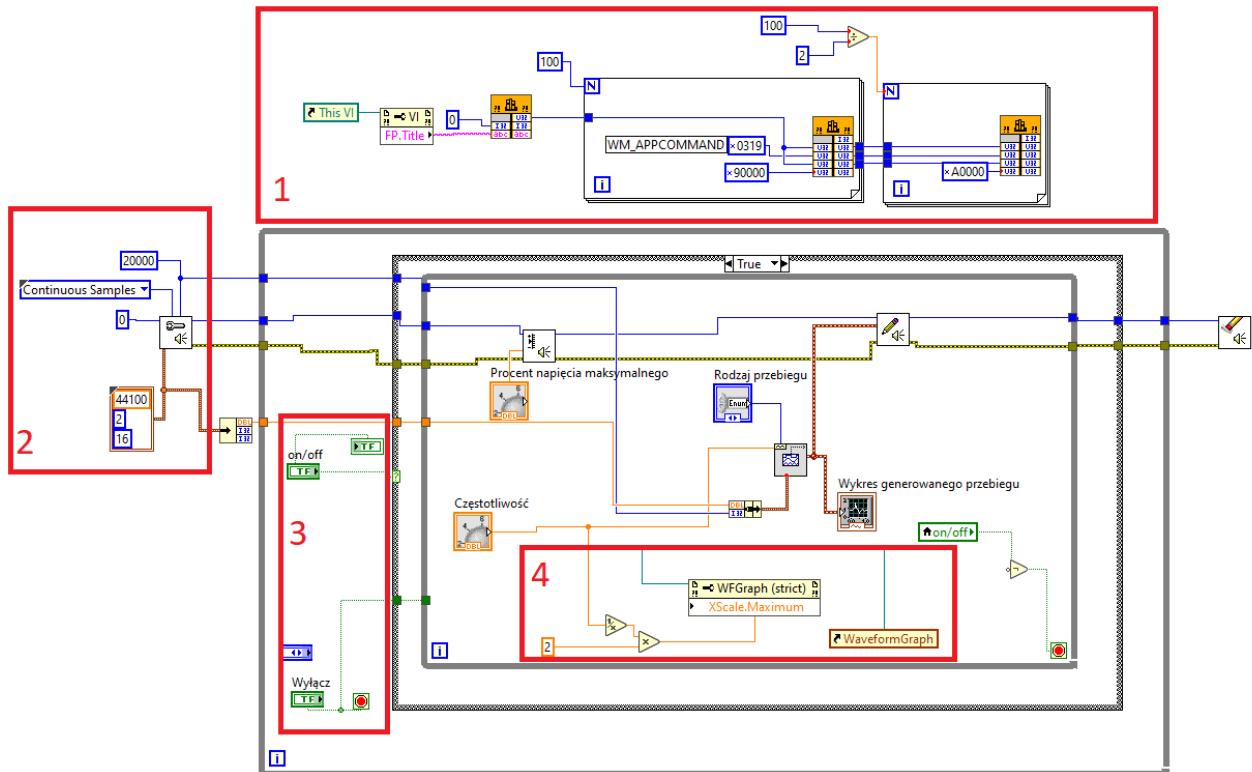
- częstotliwość ustalamy na pokrętłe „Częstotliwość” lub wpisując wartość w pole tekstowe pod pokrętłem,
- amplitudę przebiegu ustalamy na pokrętłe „Procent napięcia maksymalnego” lub wpisując wartość w pole tekstowe pod pokrętłem,
- kształt przebiegu ustalamy wybierając z listy „Rodzaj przebiegu”.

Na panelu czołowym można także odczytać kształt wybranego, generowanego przebiegu na wyjście karty dźwiękowej oraz diodę statusu wyjścia generatora przy przełączniku Output.

Na panelu czołowym są także elementy sterujące takie jest przycisk oraz przełącznik:

- przełącznik Output, gdy jest w pozycji OFF generacja sygnału nie następuje, natomiast w pozycji ON generowany jest sygnał na wyjściu karty dźwiękowej,
- przycisk z czerwonym X po minimalnym opóźnieniu wyłącza program. Można go także aktywować klawiszem Escape.

Działaniem panelu operuje schemat blokowy programu, który przedstawiono na rysunku nr 7.11.



Rys. 7.11 Schemat blokowy oprogramowania wirtualnego generatora sygnałów testowych

Po uruchomieniu programu wykonuje się część schematu oznaczona nr 1. Ta część programu ustala głośność systemową na maksimum, by uniknąć sytuacji, w której napięcie wyjściowe nie mogłoby osiągnąć wartości maksymalnej. Jak można zauważyć reszta programu znajduje się w zewnętrznej pętli While, która wykonuje się bez końca, do momentu kliknięcia przycisku Wyłącz (przycisk z czerwonym X). W części nr 2 następuje konfiguracja karty dźwiękowej. Zostaje ustalona częstotliwość próbkowania karty, ilość próbek, ID karty, ilość użytych kanałów, ilość użytych bitów przetwornika C/A oraz sposób próbkowania. W części schematu oznaczonej nr 3 znajduje się przełącznik Output, który po przełączeniu na pozycję ON, powoduje wejście do wewnętrznej pętli While. Część nr 4 włącza skalowanie osi X ustalając maksymalną wartość wyświetlana na osi X. Wartość jest domyślnie ustawiona w ten sposób, by na wykresie generowanego przebiegu były widoczne dwa okresy przebiegu. Reszta programu poza zaznaczonymi częściami spełnia funkcję generacji sygnału o ustalonych parametrach oraz przekazania go na wyjście karty dźwiękowej. Częstotliwość próbkowania oraz ilość próbek generowanego sygnału jest pobierana z parametrów skonfigurowanej karty.

Część zewnętrzna zrealizowano w następujący sposób. Do wtyczki Jack 3,5mm (minijack) przylutowano 2 przewody, które doprowadzono do gniazd bananowych. Zaciski

bananowe zamontowano w obudowie uniwersalnej, oba przewody zaizolowano na odcinku od wtyczki minijack do otworu w obudowie. Efekt końcowy przedstawiono na rysunku 7.12.



Rys. 7.12. Zdjęcie zewnętrznej części wirtualnego generatora sygnałów testowych

7.5 Test i analiza wyników pomiarów generowanych sygnałów testowych

Najważniejszym aspektem wirtualnego generatora w tym projekcie było otrzymanie pożądanego kształtu przebiegu zmierzonego na wyjściu generatora. Następnymi ważnymi parametrami sygnału była amplituda napięcia oraz częstotliwość. Pomiarów dokonano z udziałem wszystkich trzech kart opisanych w podrozdziale 7.2. Przebiegi zarejestrowano za pomocą oscyloskopu cyfrowego Agilent DSO1072B oraz oscyloskopu Rigol DS1000Z. Pomiary zostały wykonane dla następujących ustawień parametrów kart dźwiękowych:

- częstotliwość próbkowania – 44.1 kHz,
- ilość próbek – 20000 próbek,
- maksymalna wartość napięcia – głośność systemowa ustawiona na 100%.

Kształt generowanego sygnału

Na następnych stronach przedstawiono oscylogramy wykonane podczas pomiarów kształtu przebiegów na wyjściach zastosowanych kart dźwiękowych. Testowane sygnały miały kształt: sinusoidalny, piłokształtny, prostokątny oraz trójkątny.

a) Przebieg sinusoidalny

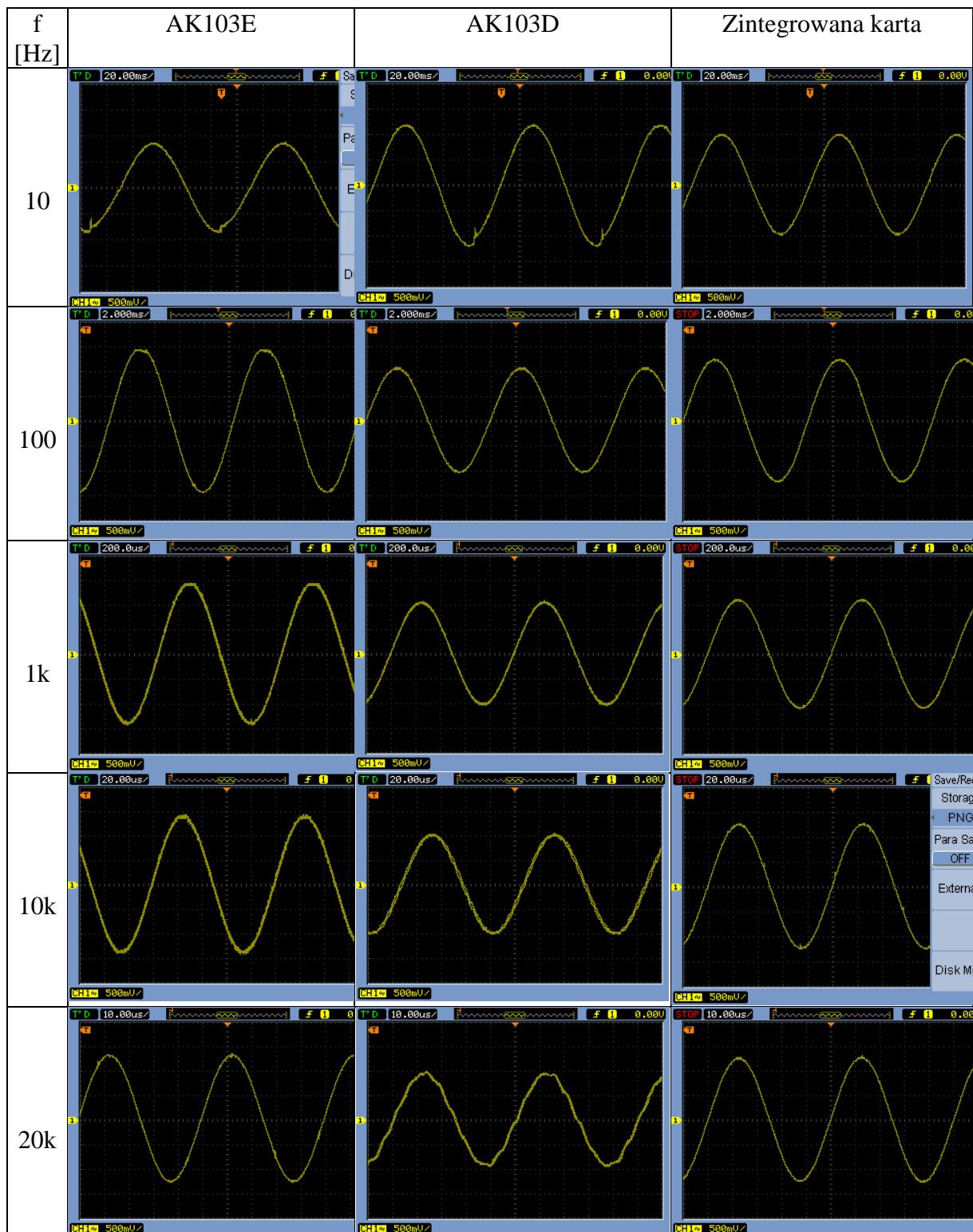


Tabela 1. Osciłygramy wygenerowanych sygnałów sinusoidalnych na wyjściach kart dźwiękowych

f [Hz]	AK103E	AK103D	Zintegrowana karta
	THD [%]	THD [%]	THD [%]
10	4.11	72.83	6.63
100	14.41	44.29	7.58
1000	7.77	32.09	8.11
10000	8.65	37.89	7.36
20000	9.06	38.77	7.07

Tabela 2. Wyniki obliczeń współczynnika THD

Wartość THD dla idealnie wygenerowanego sygnału sinusoidalnego powinna wynosić 0%. Po analizie wyników obliczeń można stwierdzić, że najlepszą jakość generowania sinusa uzyskuję się na wyjściu karty nr 3. W przypadku karty nr 2 wartości sąsiednich próbek bardzo się od siebie różniły przy osiąganych ekstremach, dlatego wartość THD ma wartość kilkudziesiąt procent. Nawet w przypadku kart nr 1 i nr 3 THD na poziomie kilku procent oznacza, że wygenerowany sygnał sinusoidalny nie jest dosyć wysokiej jakości.

a) Przebieg piłokształtny

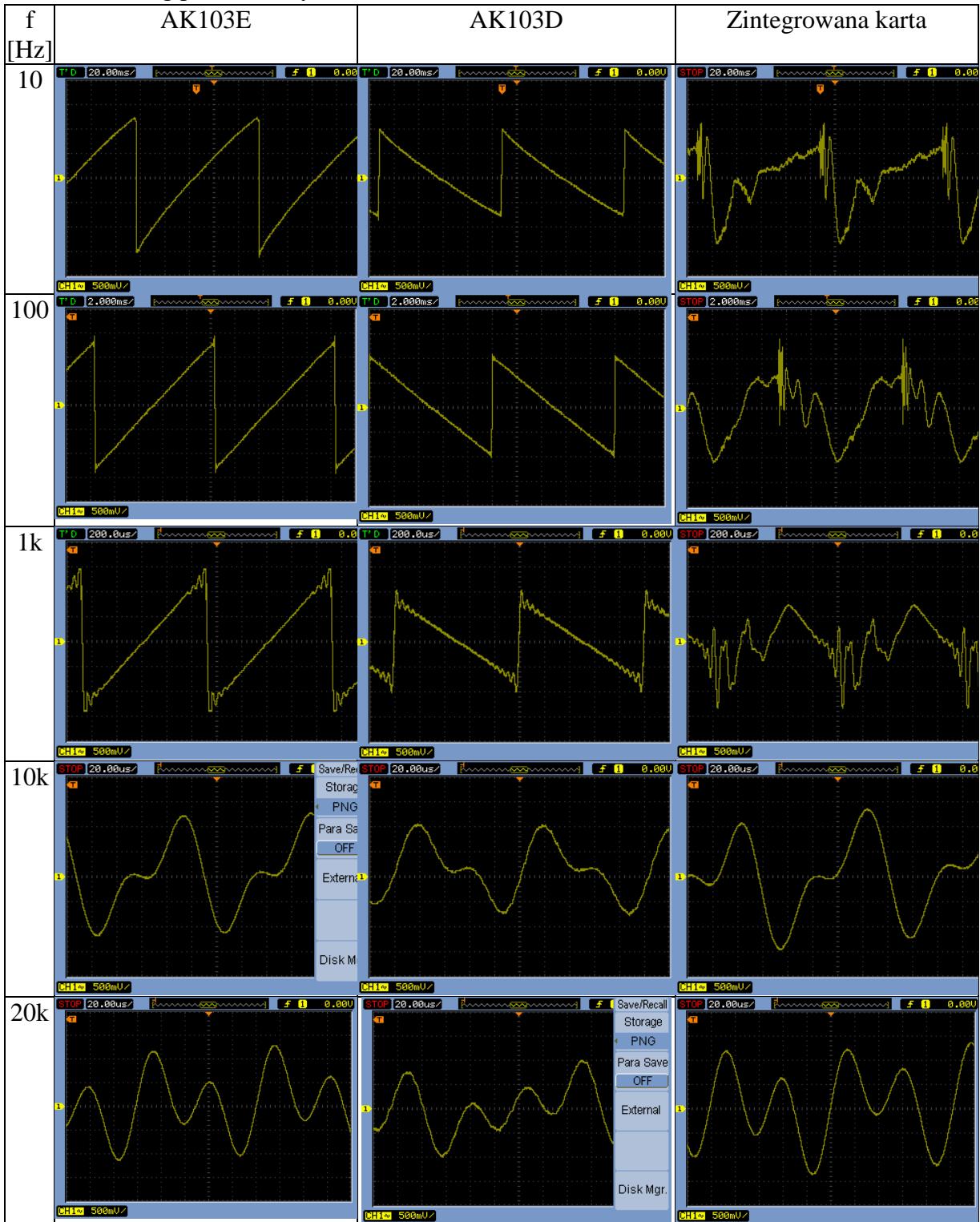


Tabela 3. Osciłygramy wygenerowanych sygnałów piłokształtnych na wyjściach kart dźwiękowych

Po analizie oscylogramów wygenerowanych sygnałów piłokształtnych, zauważalne jest to, że przy częstotliwości 10kHz i wyższych sygnał nie przypomina już kształtem „piły”. Prawdopodobnie jest to spowodowane przez stłumienie wyższych harmonicznych sygnału przez filtr dolnoprzepustowy karty dźwiękowej, a kilka niższych harmonicznych formuje zaobserwowany na oscyloskopie sygnał. Ciekawą obserwacją jest to, że karta nr 2 odwróciła sygnał wyjściowy o 180°. Wyniki pomiarów sygnałów z kart nr 1 i 2 są podobne, może to być

spowodowane tym, że obie mają przetwarzanie 16-bitowe. Karta nr 3 wykazała się najgorszą jakością, co prawdopodobnie jest spowodowane inną rozdzielczością przetwornika C/A lub tym, że karta jest połączona z komputerem innym interfejsem niż pozostałe karty.

b) Przebieg prostokątny

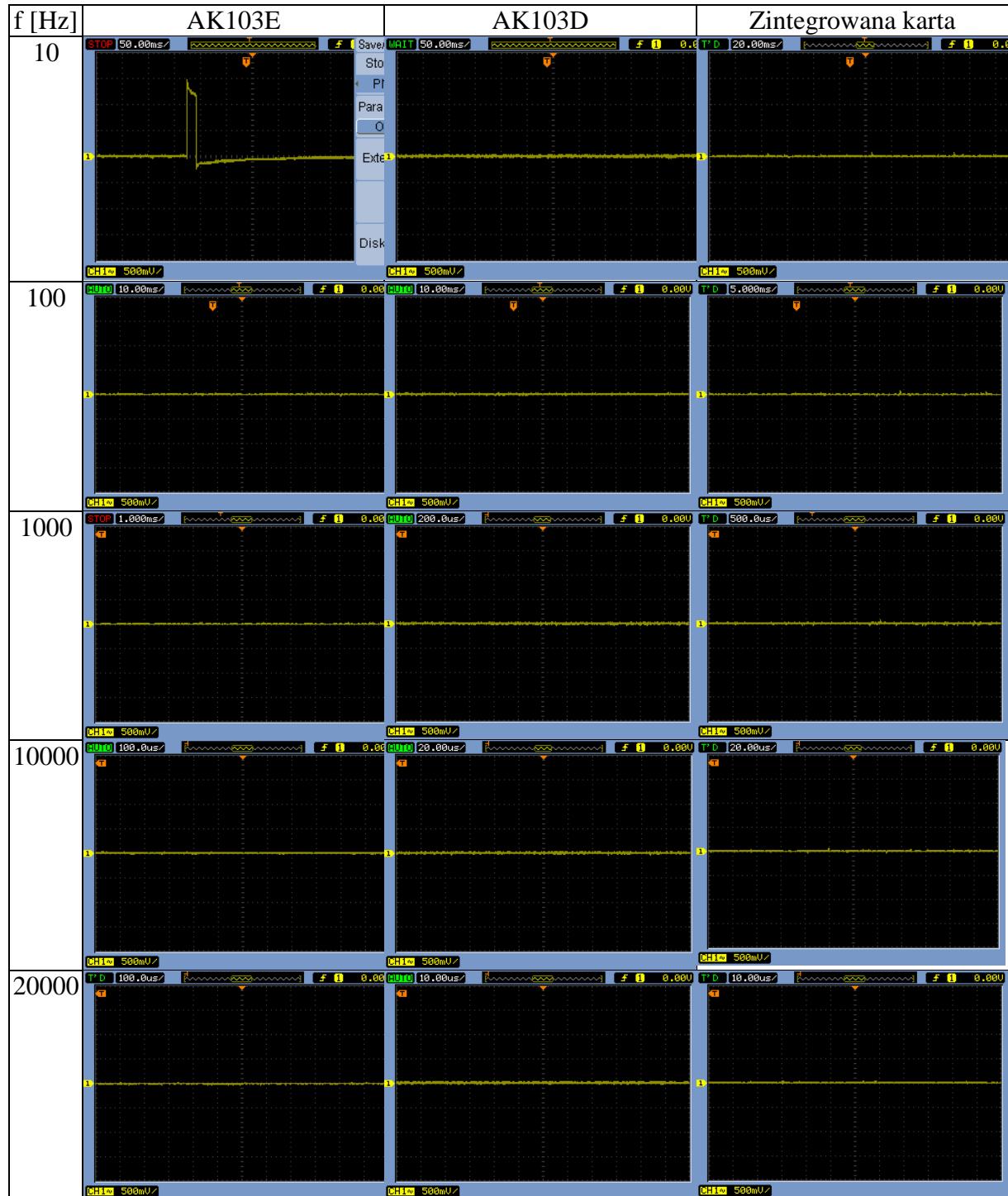


Tabela 4. Osciłygramy wygenerowanych sygnałów prostokątnych

Po przyjrzeniu się oscylogramom wygenerowanego sygnału prostokątnego, można zauważyć, że wykonany generator nie jest w stanie generować tego rodzaju sygnałów. Prawdopodobnie jest to spowodowane tym, że układy kart dźwiękowych mają także filtr górnoprzepustowy, który powoduje wycięcie składowej stałej oraz niskich częstotliwości, co można było

zaobserwować także na minimalnym tłumieniu amplitudy dla częstotliwości równej 10 Hz. Na jednym oscylogramie możemy zauważyc pewną zmianę napięcia, która prawdopodobnie jest spowodowana ładowaniem się kondensatora. Udoskonaleniem układu, które poprawiłoby generację sygnału prostokątnego jest usunięcie filtra dolnoprzepustowego układu. Mogłoby to zwiększyć niedokładność generacji, aczkolwiek generator zyskałby możliwość generacji sygnału prostokątnego.

c) Przebieg trójkątny

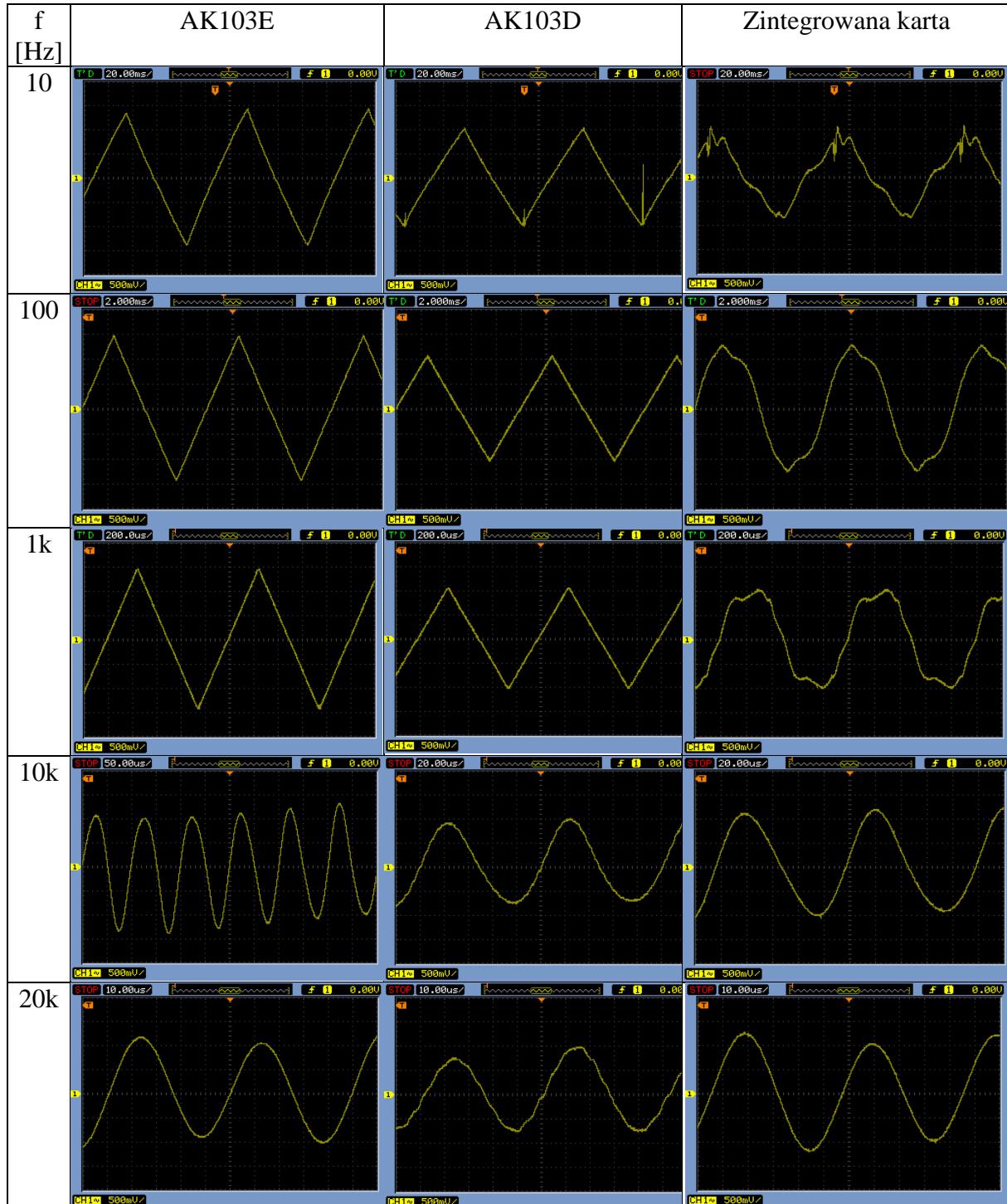


Tabela 5. Oscylogramy wygenerowanych sygnałów trójkątnych

Przeglądając oscylogramy wygenerowanych sygnałów trójkątnych, zauważalne jest, że podobnie jak w przypadku sygnału piłokształtnego pierwotny kształt sygnału trójkątnego nie został zachowany dla częstotliwości 10 kHz i wyższych. Widoczny sygnał dla tych częstotliwości to czysty sinus, co biorąc pod uwagę rozkład funkcji trójkątnej w szeregu Fouriera oznacza pełne stłumienie wyższych harmonicznych (nr 3, 5, 7 itd.) sygnału trójkątnego.

Napięcie wyjściowe kart dźwiękowych

W następnej kategorii pomiarów zwrócono uwagę na maksymalną wartość napięcia międzyszczytowego oraz szумy osiągane na wyjściach poszczególnych kart. Pomiarów dokonano ustawiając w programie wartość napięcia na odpowiednio 0% i 100%. Poniżej przedstawiono oscylogramy pomiarów, a wyniki przedstawiono w tabeli nr 7.

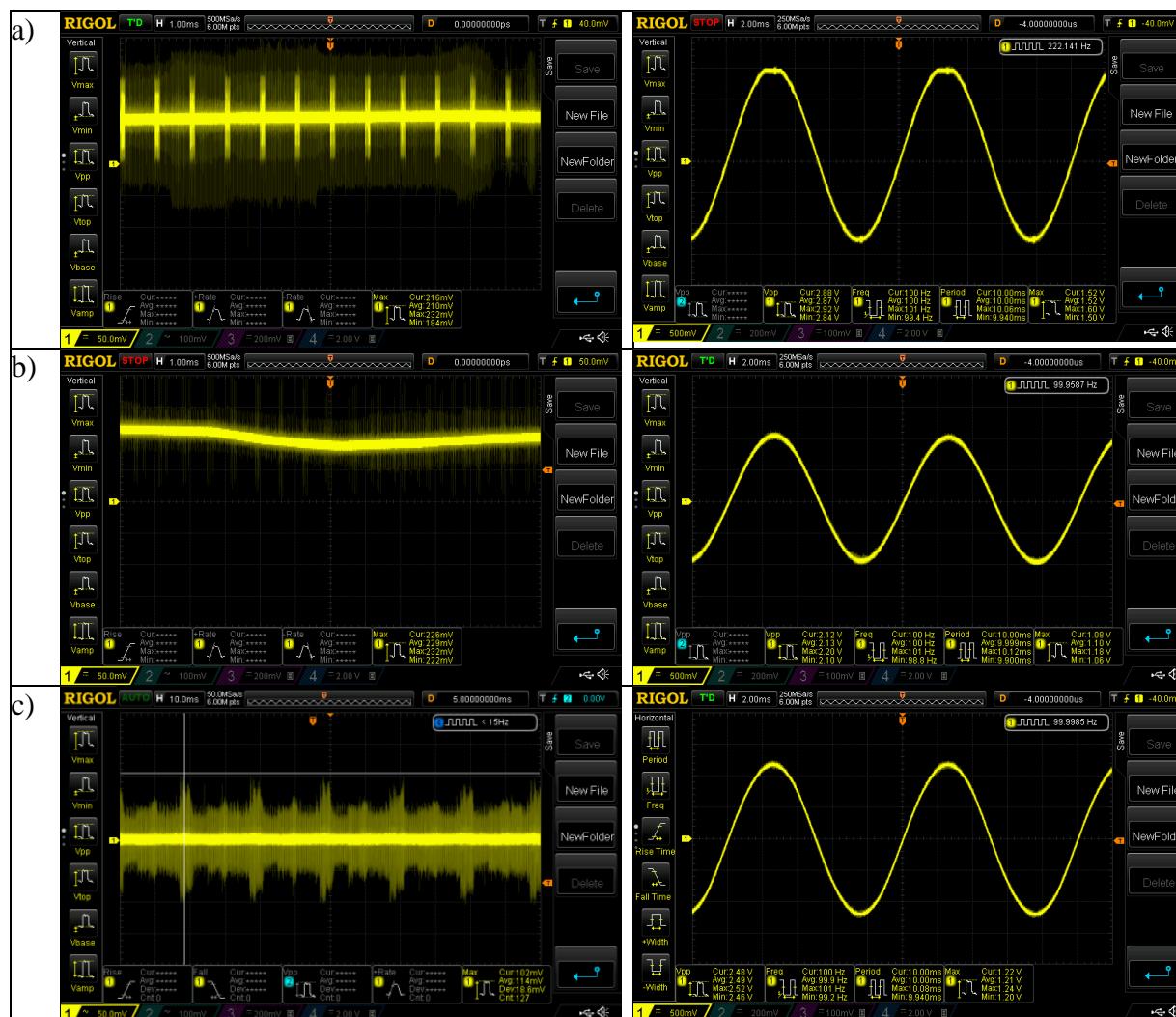


Tabela 6. Oscylogramy szumów własnych i wygenerowanych przez nie maksymalnych wartości napięcia sygnału sinusoidalnego dla wyjść kart nr a) 1, b) 2, c) 3

	Karta 1	Karta 2	Karta 3
Maksymalna wartość napięcia międzyszczytowego U_{ppmax} [V]	2.87	2.13	2.49
Wartość międzyszczytowa szumów U_{spp} [mV]	200	150	200

Tabela 7. Wyniki pomiarów napięcia międzyszczytowego i szumów

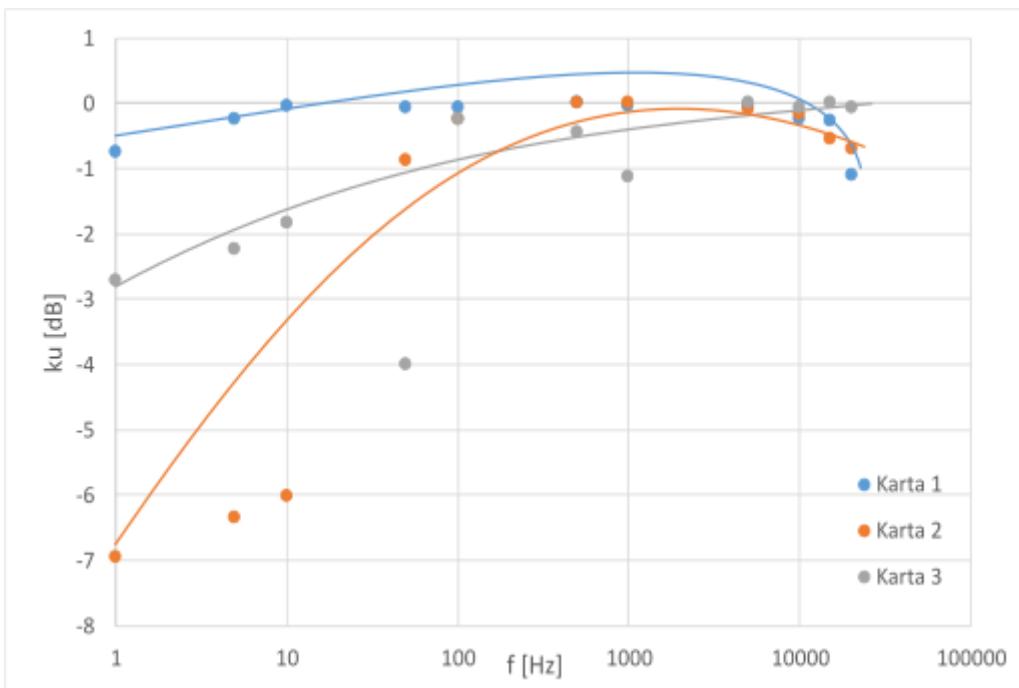
Analizując wyniki pomiarów wartości maksymalnej oraz szumów, można zauważyć, że założenia dotyczące napięcia są spełnione dla każdej karty dźwiękowej. Najwyższe napięcie na wyjściu wygenerowała karta nr 1. Taka niska wartość napięcia maksymalnego jest spowodowana tym, że karta dźwiękowa jest przeznaczona do zasilania obciążen niskoimpedancyjnych np. typowych słuchawek o wartość impedancji $16\ \Omega$. By podnieść napięcie wyjściowe układu, co pozwoliłoby zasilić odbiorniki o większej impedancji, generator należałoby wyposażyć w wzmacniacz. Duża wartość międzyszczytowa szumów, może mieć wpływ na generację sygnałów o niskiej amplitudzie, prawdopodobnie ich wysokie wartości i szeroki zakres wysokich częstotliwości są spowodowane zakłóceniami powodowanymi np. impulsowym zasilaczem laptopa, z którego wirtualny generator był obsługiwany.

Wyznaczanie pasma przenoszenia

Wyznaczania pasma przenoszenia dokonano generując sygnał sinusoidalny o maksymalnej wartości międzyszczytowej oraz o częstotliwości zmienianej w zakresie od 1 Hz do 20kHz. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabeli nr 8 oraz rysunku 7.13.

f [Hz]	Karta 1	Karta 2	Karta 3
	U_{pp} [V]	U_{pp} [V]	U_{pp} [V]
1	2.72	0.98	1.88
5	2.88	1.05	1.99
10	2.95	1.09	2.08
50	2.94	1.97	1.62
100	2.94	2.12	2.5
500	2.96	2.18	2.44
1000	2.95	2.18	2.26
5000	2.95	2.16	2.57
10000	2.88	2.14	2.55
15000	2.87	2.05	2.57
20000	2.61	2.01	2.55

Tabela 8. Pomiar pasma przenoszenia

Rys. 7.13. Wyznaczanie zależności k_u od częstotliwości

Wzór, którym się posłużyono by wyliczyć k_u przedstawiono poniżej:

$$k_u = 20 \cdot \log \frac{U_{pp}}{U_{ppmax}} \quad 7.1$$

gdzie U_{pp} jest zmierzona wartością napięcia międzyszczytowego, a U_{ppmax} jest to najwyższa wartość napięcia międzyszczytowego zmierzona w tej sesji pomiarowej dla poszczególnej karty dźwiękowej.

Analizując wyniki pomiarów można zauważyć, że najszerzym pasmem przenoszenia i najmniejszym tłumieniem wartości międzyszczytowej napięcia cechuje się karta nr 1. Karta nr 2 do częstotliwości około 50 Hz ma tłumienie powyżej 3 dB. Natomiast tłumienie karty nr 3 tylko dla jednego punktu pomiarowego wzrosło powyżej 3 dB, dla częstotliwości 50 Hz. Nie jest to wartość na granicy mierzonego zakresu częstotliwości, aczkolwiek pomiar dla tej częstotliwości powtórzono kilka razy i wynik był taki sam, więc nie jest on obarczony błędem. Tłumienie o dużej wartości w okolicy 50 Hz dla tej karty prawdopodobnie jest spowodowane budową wewnętrzną karty.

Stromość zboczy sygnałów wyjściowych

Kolejne pomiary dotyczą tylko sygnału trójkątnego. Zmierzono maksymalne i minimalne nachylenia zboczy tego przebiegu, który karty są w stanie wygenerować.

Wirtualny generator sygnałów testowych

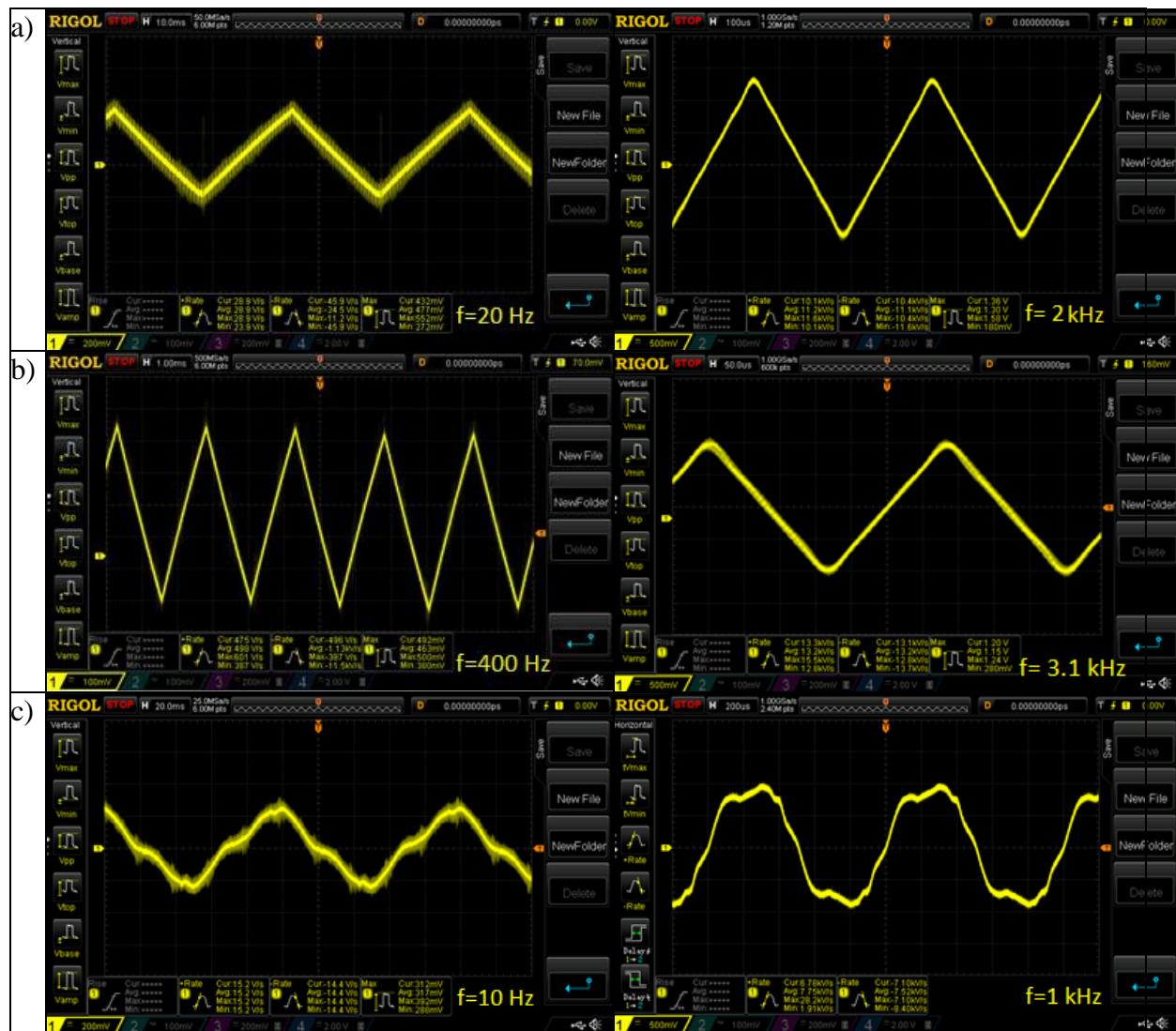


Tabela 9. Oscylogramy maksymalnych i minimalnych nachyleń wygenerowanych sygnałów trójkątnych na wyjściu kart nr: a) 1, b) 2, c) 3

Pomiarów maksymalnego nachylenia dokonano ustawiając napięcie na maksymalną wartość, a częstotliwość na najwyższą wartość, dla której kształt przebiegu będzie bliski trójkątowi. Podobnie dla minimalnego nachylenia z tym, że wartość napięcia i częstotliwość były stopniowo zmniejszane razem, do momentu, w którym przebieg przestawał przypominać kształtem trójkąt. Wartości nachylenia przeliczono na jednostkę [V/ms] i umieszczone w tabeli 10.

	Minimalne nachylenie		Maksymalne nachylenie	
	f [Hz]	[V/ms]	f [Hz]	[V/ms]
AK103E	20	0.0289	2000	10.1
AK103D	400	0.489	3100	13.2
Zintegrowana karta	10	0.0152	1000	7.75

Tabela 10. Wyniki pomiarów nachylenia zbocza przebiegu trójkątnego

Najszerszym zakresem wartości nachylenia cechuje się karta nr 2. Typową jednostką wyrażenia nachylenia jest $V/\mu s$, ale w przypadku badanych kart, przedstawienie wyników w tej jednostce zmniejszyłoby czytelność wyników.

Stabilność krótko i dugo okresowa

Ostatnie pomiary dotyczyły stabilności częstotliwości. Pomiarów dokonano licznikiem generatora Rigol DG1000Z dołączając na jego wejście sygnał sinusoidalny o nominalnej częstotliwości 100Hz, 1 kHz i 10 kHz oraz maksymalnej wartości międzyszczytowej napięcia. Dla stabilności krótko okresowej przyjęto okno czasowe równe 10.48 ms, natomiast dla stabilności dugo okresowej równe 10.73 s. Wykonano dwie serie pomiarów licznikiem dla każdej karty dźwiękowej: 10 pomiarów dla pomiaru stabilności krótko okresowej oraz 6 pomiarów dla pomiaru stabilności dugo okresowej. Wyniki pomiarów przedstawiono w tabelach 11 i 12 oraz na wykresach w tabeli 13

Pomiar stabilności krótko okresowej				
		Karta 1	Karta 2	Karta 3
$f_n = 100 \text{ Hz}$	Częstotliwość średnia $f_{sr} [\text{Hz}]$	99.999	99.997	99.998
	Częstotliwość maksymalna $f_{max} [\text{Hz}]$	100.005	100.083	100.005
	Częstotliwość minimalna $f_{min} [\text{Hz}]$	99.987	99.922	99.994
	Stabilność względna $f_{max} - f_{min} / f_n [-]$	0.00018	0.00161	0.00011
$f_n = 1 \text{ kHz}$	Częstotliwość średnia $f_{sr} [\text{Hz}]$	999.967	999.826	999.986
	Częstotliwość maksymalna $f_{max} [\text{Hz}]$	1000.055	1000.381	1000.016
	Częstotliwość minimalna $f_{min} [\text{Hz}]$	999.934	999.378	999.961
	Stabilność względna $f_{max} - f_{min} / f_n [-]$	0.000121	0.001003	0.00055
$f_n = 10 \text{ kHz}$	Częstotliwość średnia $f_{sr} [\text{Hz}]$	9999.811	10001.802	9999.907
	Częstotliwość maksymalna $f_{max} [\text{Hz}]$	10000.425	10005.091	9999.964
	Częstotliwość minimalna $f_{min} [\text{Hz}]$	9999.551	9997.085	9999.845
	Stabilność względna $f_{max} - f_{min} / f_n [-]$	0.0000874	0.000806	0.000018

Tabela 11. Wyniki pomiarów stabilności krótko okresowej, gdzie f_n – częstotliwość nominalna

Pomiar stabilności dugo okresowej				
		Karta 1	Karta 2	Karta 3
$f_n = 100 \text{ Hz}$	Częstotliwość średnia $f_{sr} [\text{Hz}]$	99.999	99.997	99.998
	Częstotliwość maksymalna $f_{max} [\text{Hz}]$	100.001	100.004	99.999
	Częstotliwość minimalna $f_{min} [\text{Hz}]$	99.998	99.922	99.998
	Stabilność względna $f_{max} - f_{min} / f_n [-]$	0.00005	0.00161	0.00011
$f_n = 1 \text{ kHz}$	Częstotliwość średnia $f_{sr} [\text{Hz}]$	999.99	999.926	999.99
	Częstotliwość maksymalna $f_{max} [\text{Hz}]$	999.989	1000.048	999.99
	Częstotliwość minimalna $f_{min} [\text{Hz}]$	999.989	999.861	999.99
	Stabilność względna $f_{max} - f_{min} / f_n [-]$	0.000001	0.001003	0
$f_n = 10 \text{ kHz}$	Częstotliwość średnia $f_{sr} [\text{Hz}]$	10000.011	9999.921	9999.899
	Częstotliwość maksymalna $f_{max} [\text{Hz}]$	10000.425	10000.616	9999.899
	Częstotliwość minimalna $f_{min} [\text{Hz}]$	9999.89	9999.168	9999.899
	Stabilność względna $f_{max} - f_{min} / f_n [-]$	0.0000535	0.0145	0

Tabela 12. Wyniki pomiarów stabilności dugo okresowej, gdzie f_n – częstotliwość nominalna

Analizując wyniki pomiaru stabilności częstotliwości można zauważyc, że największą stabilnością częstotliwości odznacza się karta nr 3. Stabilność względna każdej karty dla różnych wartości częstotliwości ma zbliżoną wartość, co oznacza, że maksymalne odchylenia różniły się od częstotliwości nominalnej o ten sam procent jej wartości. Pomimo tego, że wyniki pomiarów są zadowalające, zbudowany generator nie nadawałby się do użycia, jako precyzyjny wzorzec częstotliwości.

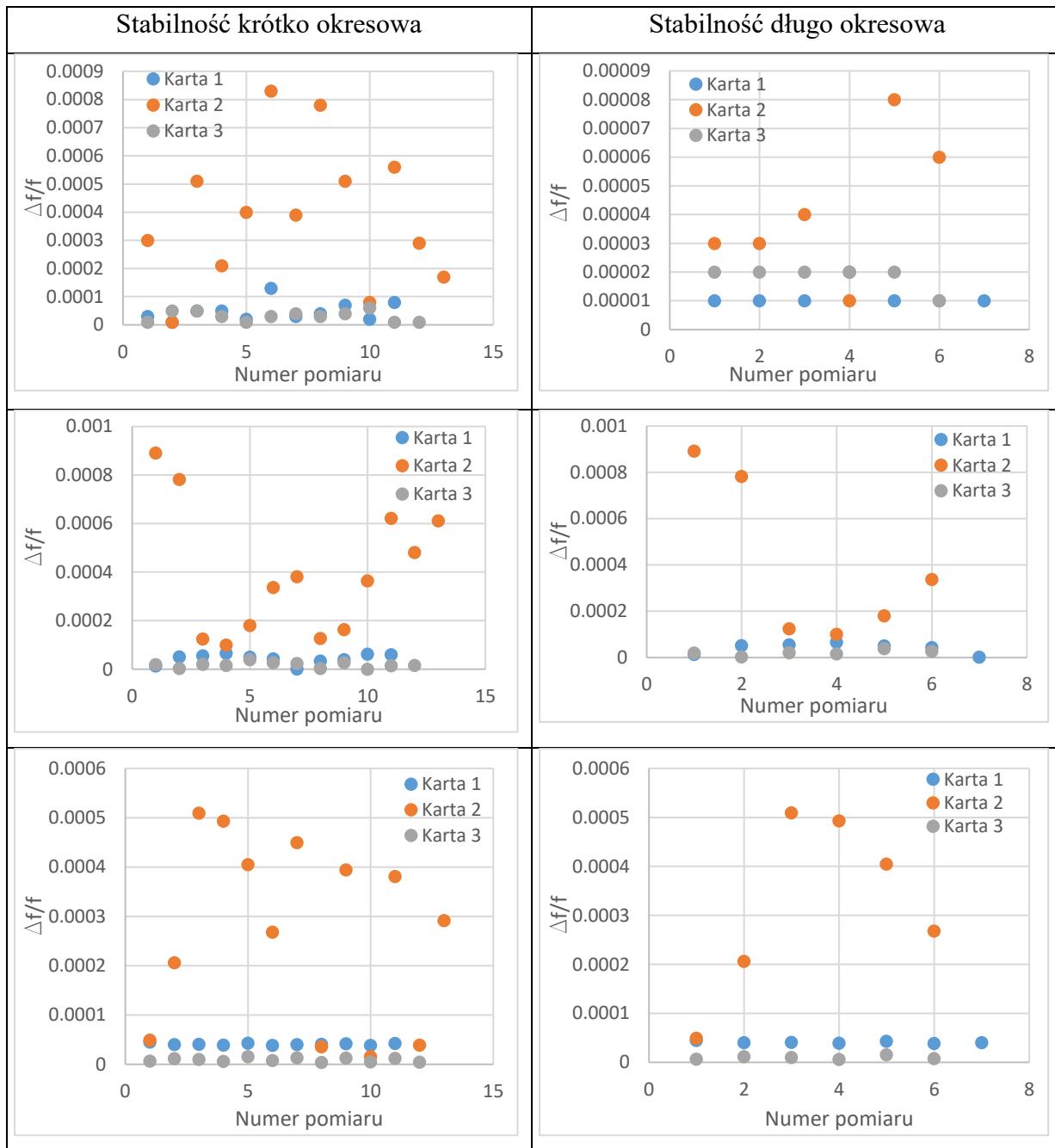


Tabela 13. Wykresy zależności stabilności częstotliwości od kolejnych pomiarów (od góry: 100 Hz, 1 kHz, 10 kHz)

Analizując powyższe wykresy, można zauważać, że wartość stabilności częstotliwości w kolejnych pomiarach dla kart nr 1 oraz nr 3 zmieniają się w bardzo wąskim zakresie. Wartość stabilności częstotliwości dla karty nr 2 zmienia się w szerszym zakresie, lecz zmiany te są przypadkowe, przez co nie jesteśmy w stanie zidentyfikować przyczyny tych zmian. Prawdopodobnie są one spowodowane niską jakością elementów wchodzących w skład układu karty nr 2.

8. Podsumowanie

Na rynku istnieje wiele modeli klasycznych generatorów funkcyjnych. Posiadanie takiego generatora może w dużym stopniu ułatwić pracę hobby elektronika albo serwisanta.

Biorąc po uwagę wszystkie zmierzone parametry wygenerowanych sygnałów wyjściowych zastosowanych kart dźwiękowych można zauważyć, że założenia postawione w tej pracy zostały w większości spełnione. Głównym problemem jest brak możliwości generacji sygnału prostokątnego, co wynika z konstrukcji toru wyjściowego kart. Kolejnym jest brak generacji sygnału trójkątnego oraz piłokształtnego w pełnym zakresie częstotliwości. Patrząc na zagadnienia teoretyczne przedstawione na początku pracy, wykonany generator jest wirtualnym generatorem sygnałów testowych, którego parametry można porównywać z generatorami LC i RC. Generator został wykonany wg założeń, a we wszystkich sesjach pomiarowych dokonano badania parametrów wszystkich 3 kart dźwiękowych.

Najefektywniej wygenerowanym sygnałem był sygnał sinusoidalny. Dla częstotliwości większych i równych 10 kHz, nie ma możliwości generowania sygnałów trójkątnych i piłokształtnych. Wartość maksymalna napięcia międzyszczytowego jest zadowalająca. Wartość szumów może wpływać, na jakość generowanego sygnału o niskich wartościach międzyszczytowych. Pomiar pasma przenoszenia pokazał, że w zakresie od 100 do 10000 Hz, generator zapewnia generację sygnału sinusoidalnego z tłumieniem nie większym niż 3 dB. Pomiar stabilności częstotliwości pokazał, że generator w poprawny sposób generuje pożądaną wartość częstotliwości ze średnim odchyleniem z zakresu od 0.001 Hz do 1.802 Hz, aczkolwiek nie mógłby zostać użyty, jako wzorzec częstotliwości. Można poszerzyć możliwości generatora i rozbudować go o wzmacniacz audio oraz zmodyfikowanie filtrów układów kart dźwiękowych. Dodatkowo wejścia karty dźwiękowej i napisanie oprogramowania dotyczącego obsługi, umożliwia rozbudowanie przyrządu o wirtualny oscyloskop.

Biorąc pod uwagę cenę badanych kart dźwiękowych to jest ona proporcjonalna, do jakości karty a tym samym, jakości sygnałów wyjściowych wykonanego wirtualnego generatora. Patrząc na wyniki pomiarów z podziałem na badane karty dźwiękowe można zauważyć, że karta AK103E (karta nr 1) cechuje się najwyższą jakością generacji sygnału spośród wszystkich badanych kart.

Bibliografia

- [1] D. Świsulski, Komputerowa technika pomiarowa – Oprogramowanie wirtualnych przyrządów pomiarowych w LabVIEW, Pomiary Automatyka Kontrola 2005
- [2] Rigol, MSO7000&DS7000 Data Sheet 2018
- [3] W. Nawrocki, Komputerowe systemy pomiarowe, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności 2006
- [4] K. Antoszkiewicz, Generacja i synteza częstotliwości, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 2015
- [5] R. F. Graf, Modern Dictionary of Electronics, 1999
- [6] A. Chwaleba, B. Moeschke, G. Płoszajski, Elektronika 2006
- [7] <http://www.prz.rzeszow.pl/kpe/materialy/astadler/DAQWWW/LabVIEW/Dataprocessing/Sygna% B3ytestowe/index.html>
- [8] http://www.ee.pw.edu.pl/eaz/_pdf/T02.pdf
- [9] S. Lebson, Elektryczne przyrządy pomiarowe, 1971
- [10] Alan V. Oppenheim, Alan S. Willsky, Syed Hamish Nawab, Signals & Systems, Prentice Hall 1997
- [11] U. Tietze, Ch. Schenk, Układy półprzewodnikowe 2009
- [12] Cmedia, CM6206LX Data Sheet
- [13] <http://ppef.amu.edu.pl/images/materialy-dydaktyczne/filami/pl/KartaMuzyczna.pdf>
- [14] STMicroelectronics, NE555 Data Sheet