



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE
Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

KATEDRA Robotyki i Mechatroniki

Praca dyplomowa

*Zastosowanie interferometru akustycznego do pomiaru
przemieszczeń i prędkości drgań*

*Application of acoustical interferometer for
measurement of displacement and vibration velocity*

Autor:	Michał Zając
Kierunek studiów:	Inżynieria Mechatroniczna
Opiekun pracy:	dr inż. Łukasz Ambroziński

Kraków, 2022

Spis treści

1. Wstęp	4
2. Cel i zakres pracy	6
2.1. Zakres pracy	6
3. Teoria.....	7
3.1. Ultradźwięki i ich zastosowania.....	7
3.2. Wybrane parametry fal akustycznych	8
3.2.1. Częstotliwość i okres	8
3.2.2. Długość i prędkość fali	9
3.3. Przemieszczenie a przesunięcie faz.....	9
3.4. Demodulacja i usuwanie modulacji.....	12
3.4.1. Usunięcie modulacji amplitudowej	13
3.4.2. Demodulacja kątowa	13
3.5. Charakterystyka roboczych fal ultradźwiękowych.....	13
4. Stanowiska pomiarowe	15
4.1. Opis urządzeń	15
4.1.1. Generator funkcyjny Keysight 33500B.....	15
4.1.2. Bezkontaktowy przetwornik Ultram Group NCG500-D25.....	15
4.1.3. MicroAcoustic Instruments Inc. BAT-1	17
4.1.4. Thorlabs LTS300 i LTSP3	18
4.1.5. Wzbudnik elektrodynamiczny The Modal Shop K2007E01.....	19
4.2. Schematy stanowisk	20
4.2.1. Stanowisko 1.....	21
4.2.2. Stanowisko 2.....	22
4.3. Konfiguracja sprzętu i zebranie danych	23
4.3.1. Parametry generatora	23

a) Do badania przemieszczeń.	23
b) Do pomiaru prędkości drgań.	24
4.3.2. Konfiguracja karty akwizycji danych.....	24
4.3.3. Konfiguracja platformy translacyjnej.....	25
5. Wyniki	26
5.1. Częstotliwość rezonansowa nadajnika	26
5.2. Bandanie przemieszczeń.....	27
5.2.1. Wymuszenie impulsem.....	28
5.2.1.1. Omówienie programu	29
5.2.2. Wymuszenie sygnałem sinusoidalnym.....	35
5.2.2.1. Omówienie programu	35
5.2.3. Porównanie metod pomiaru przemieszczeń	36
5.3. Badania prędkości drgań	38
5.3.1. Stała częstotliwość, zwiększana amplituda	39
5.3.2. Zwiększana częstotliwość, stała amplituda	45
6. Podsumowanie	48
7. Bibliografia	49
8. Załączniki	51

1. Wstęp

Każda pracująca maszyna ulega eksploatacji i zużyciu. Jest to problem natury technicznej, występujący w różnych gałęziach przemysłu. Zniszczenie jednego elementu mechanizmu generuje różnego rodzaju niedogodności. Może na przykład spowodować wstrzymanie produkcji lub/i uszkodzenie innych fragmentów maszyny.

Rozwiązywanie owego zagadnienia opiera się na diagnostyce technicznej, czyli nauce o rozpoznawaniu stanów urządzeń tego typu. Stosowane są tu różne metody, a jedną z nich jest diagnostyka wibroakustyczna. Opiera się ona na fakcie, że każdy pracujący mechanizm generuje określony sygnał drganiowo-akustyczny, zależny od chwilowego stanu urządzenia. Sygnał ten, po odpowiednim przetworzeniu, porównywany jest z sygnałem wzorcowym i dostarcza cenne informacje.

Nadzór wibroakustyczny, spośród wszystkich rodzajów diagnostyki mechanizmów, dostarcza najwięcej informacji. Dzięki nim, możliwe jest przejście z systemu planowo zapobiegawczego na system z nadzorem diagnostycznym. Wydłuża to okres bezawaryjnej eksploatacji maszyny [1].

Istnieje wiele sposobów na pomiar drgań urządzeń. Takie badania można przeprowadzać kontaktowo lub bezkontaktowo. Do pierwszej grupy zaliczają się akcelerometry pojemnościowe MEMS i czujniki piezoelektryczne. Używane są one w przypadkach, gdy badane urządzenie jest w miejscu łatwo dostępnym i umieszczenie takiego urządzenia nie wpływa znacząco na vibracje maszyny.

W przeciwnym przypadku używane są sensory z drugiej grupy. Do badań bez kontaktu z monitorowanym mechanizmem stosuje się laserowe czujniki przemieszczenia lub specjalistyczne mikrofony akustyczne [2].

Wykonywanie badań laserowo wiąże się jednak z koniecznością przygotowania powierzchni diagnozowanej maszyny. Musi ona bowiem w odpowiedni sposób odbijać wiązkę laserową. Drugą istotną wadą takiego rozwiązania jest wysoka cena wibrometrów laserowych.

Bardziej uniwersalną metodą jest ultradźwiękowy pomiar drgań. Jest ona tańsza i nie ma w niej konieczności przygotowania powierzchni diagnozowanego urządzenia.

W niniejszej pracy przedstawiono sposób ultradźwiękowego pomiaru drgań płyty. Temat zrealizowano, korzystając z odpowiednio przygotowanego stanowiska laboratoryjnego i specjalistycznych urządzeń.

2. Cel i zakres pracy

Celem pracy było zbudowanie stanowisk laboratoryjnych i przeprowadzenie na nich badań polegających na pomiarze przemieszczeń i prędkości drgań z wykorzystaniem ultradźwiękowych przetworników pracujących w sprzężeniu powietrznym.

2.1. Zakres pracy

Na zakres niniejszej pracy inżynierskiej składa się 6 rozdziałów.

W pierwszym rozdziale przedstawiono wstęp i motywację do podjęcia rozważanego tutaj tematu. Opisano problematykę pomiaru drgań w eksploatacji maszyn.

W trzecim rozdziale ujęto wstęp teoretyczny, którego znajomość jest konieczna do odpowiedniego zrozumienia treści niniejszej pracy. Opisano w nim m.in. wyprowadzenie wzoru na odległość będącej w fazie 0 lub π fali względem elementu odbijającego, na podstawie którego wykonano pomiar przemieszczeń falą sinusoidalną. Umieszczono tam też opis procesu demodulacji fali, używanego przy pomiarze prędkości drgań. Scharakteryzowano również parametry fal ultradźwiękowych, za pomocą których wykonane zostały pomiary.

Czwarty rozdział poświęcony został natomiast opisowi stanowisk laboratoryjnych, zaczynając od krótkiej charakterystyki zastosowanych urządzeń po ich połączenie i implementację.

W piątym rozdziale wygenerowane dane zostały przetworzone. Określono w nim błędy przemieszczeń względem danych referencyjnych. Porównano wady i zalety wykonywania takich pomiarów za pomocą fali impulsowej i sinusoidalnej. Zawarto tam wyniki próby pomiaru prędkości drgań, przy zwiększającej się amplitudzie lub częstotliwości.

Ostatnia część pracy to podsumowanie. Ujęto w nim najważniejsze informacje o przeprowadzonych badaniach i wyciągnięte z nich wnioski.

3. Teoria

W tym rozdziale przedstawiono krótki opis ultradźwięków i ich zastosowań, najważniejsze parametry fal akustycznych, wyprowadzenie zależności przesunięcia fazowego (fali odbitej względem padającej) od przemieszczenia odbijającej płyty, opis procesu demodulacji fali oraz charakterystykę fal wygenerowanych przez wykorzystany w pracy generator.

3.1. Ultradźwięki i ich zastosowania

Ultradźwięki to fale akustyczne o częstotliwości wykraczającej poza zakres słyszalny przez człowieka, a zatem większej niż 20 kHz, ale też mniejszej niż 1 GHz. Człowiek znalazł dla nich zastosowanie w różnych dziedzinach swojego życia.

Wykorzystywane są one między innymi:

- w akustooptyce, np. przy określaniu własności materiałów lub w spektroskopii fotoakustycznej,
- w akustoelektronice, np. przy budowie układów, w których wykorzystuje się zjawisko piezoelektryczne oraz w silnikach i sterownikach ultradźwiękowych,
- w diagnostyce materiałów, np. w defektoskopii ultradźwiękowej,
- w chemii, np. do oczyszczania przyrządów laboratoryjnych,
- w przemyśle, np. przy obróbce i formowaniu twardych materiałów lub przy spajaniu i lutowaniu ultradźwiękowym,
- w medycynie, np. w terapii schorzeń reumatycznych lub niszczeniu kamieni w nerkach, woreczku żółciowym czy pęcherzyku moczowym,
- w miernictwie, np. do badań strukturalnych lub w diagnostyce medycznej i materiałowej.

Warto wspomnieć, że w miernictwie ultradźwiękowym wykorzystuje się metody z falą impulsową lub ciągłą [3]. Obie te metody zostały zaimplementowane w niniejszej pracy.

Ultradźwięki nie są jednak tylko generowane sztucznie. Występują również naturalnie w przyrodzie. Różne zwierzęta, takie jak nietoperze czy delfiny używają ich do echolokacji. Polega ona na obrazowaniu otoczenia. Wykorzystywane fale akustyczne o wysokiej częstotliwości, które generowane są przez te zwierzęta, odbijają się od obecnych w pobliżu przeszkód i wracając, są przez nie rejestrowane [4]. Dzięki temu stworzenia te są w stanie np. określić swoją lokalizację względem znajdującego się niedaleko głazu lub znaleźć pożywienie.

Tak więc fale ultradźwiękowe mają, częściowo wykorzystany już przez człowieka, potencjał w pomiarze odległości czy przemieszczeń różnych ciał fizycznych. W niniejszej pracy, korzystając ze specjalnie przygotowanego stanowiska badawczego, postaram się skorzystać z tego właśnie potencjału.

3.2. Wybrane parametry fal akustycznych

Fale dźwiękowe definiuje się za pomocą różnych wielkości fizycznych. Niezbędne w analizie niniejszej pracy opisuję poniżej.

3.2.1. Częstotliwość i okres

Pierwszą wielkością jest częstotliwość mierzona w hercach [Hz]. Wyraża liczbę pełnych cykli zjawiska okresowego w jednostce czasu. Oznacza się ją literą “ f ” i oblicza ze wzoru:

$$f = \frac{n}{t} \quad (3.1)$$

gdzie:

n - liczba drgań,

t - czas, w którym te drgania wystąpiły.

Odwrotnością częstotliwości jest okres, czyli czas, w którym zjawisko okresowe wykona jedno pełne drganie [5].

3.2.2. Długość i prędkość fali

Kolejnymi istotnymi pojęciami są długość i prędkość fali. Długość fali to odległość pomiędzy kolejnymi powtórzeniami kształtu fali. Prędkość fali to natomiast prędkość, z jaką rozchodzi się zaburzenie wywołane drganiami źródła. Powiązane są one ze sobą zależnością:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (3.2)$$

gdzie:

λ - długość fali,

v - prędkość fali,

f – częstotliwość [5].

W niniejszej pracy ośrodkiem rozchodzenia się fali ultradźwiękowej jest powietrze. Warto zatem skorzystać ze wzoru na prędkość fali w tym właśnie ośrodku. Zależy ona od wilgotności i temperatury. Wilgotność powietrza ma tu relatywnie małe znaczenie, natomiast wpływ temperatury otoczenia jest istotny i przybliżony wzorem doświadczalnym:

$$v = 331.5 + 0.6 \cdot \theta \quad (3.3)$$

gdzie:

θ - temperatura otoczenia [°C].

Wzór ten jest poprawny dla temperatur z przedziału od -20°C do 40°C [6]. Temperatura zmierzona w laboratorium to natomiast 25°C, zatem będzie miał on zastosowanie.

3.3. Przemieszczenie a przesunięcie faz

Przesunięcie fazowe, czyli minimalna odległość pomiędzy punktami fal będącymi w tej samej fazie to wartość bezwzględna z przesunięcia faz, definiowanej tu jako

przesunięcie fazowe z uwzględnieniem, która fala jest falą będącą odniesieniem dla drugiej. Wyraża się je wzorem:

$$\varphi = |\Delta\varphi| \quad (3.4)$$

gdzie:

$\Delta\varphi$ - przesunięcie faz.

Można je wyznaczyć również z zależności:

$$\varphi = \frac{\Delta X}{\lambda} 2\pi \quad (3.5)$$

gdzie:

ΔX – różnica dróg obydwu przebiegów,

λ – długość fali [5].

Dla opisywanych fal (nadawanej i odbitej) ΔX jest taka sama dla każdych dwóch punktów z obu fal będących w tej samej fazie. Jest tak, ponieważ fale mają taką samą częstotliwość i oscylują wzdłuż tej samej prostej.

Warto zauważyć, że badany odcinek ΔX wynosi 0, gdy fala sinusoidalna z przedziału $[0, 2\pi)$, pada na płytę odbijającą będąc w fazie 0 lub π , a zatem wtedy, gdy przecina ona poziomą oś. Wykorzystano ten fakt jako odniesienie przy pomiarze różnicy faz, mierząc odległość płyty odbijającej sygnał względem będącej w takiej właśnie fazie fali nadawanej. Odcinek ten nazwano x_1 .

Następnie zauważono, że będąca w tej samej fazie fala odbita (a właściwie przedłużenie tej fali) znajduje się w jednakowej odległości od płyty odbijającej sygnał. Występuje zatem zależność:

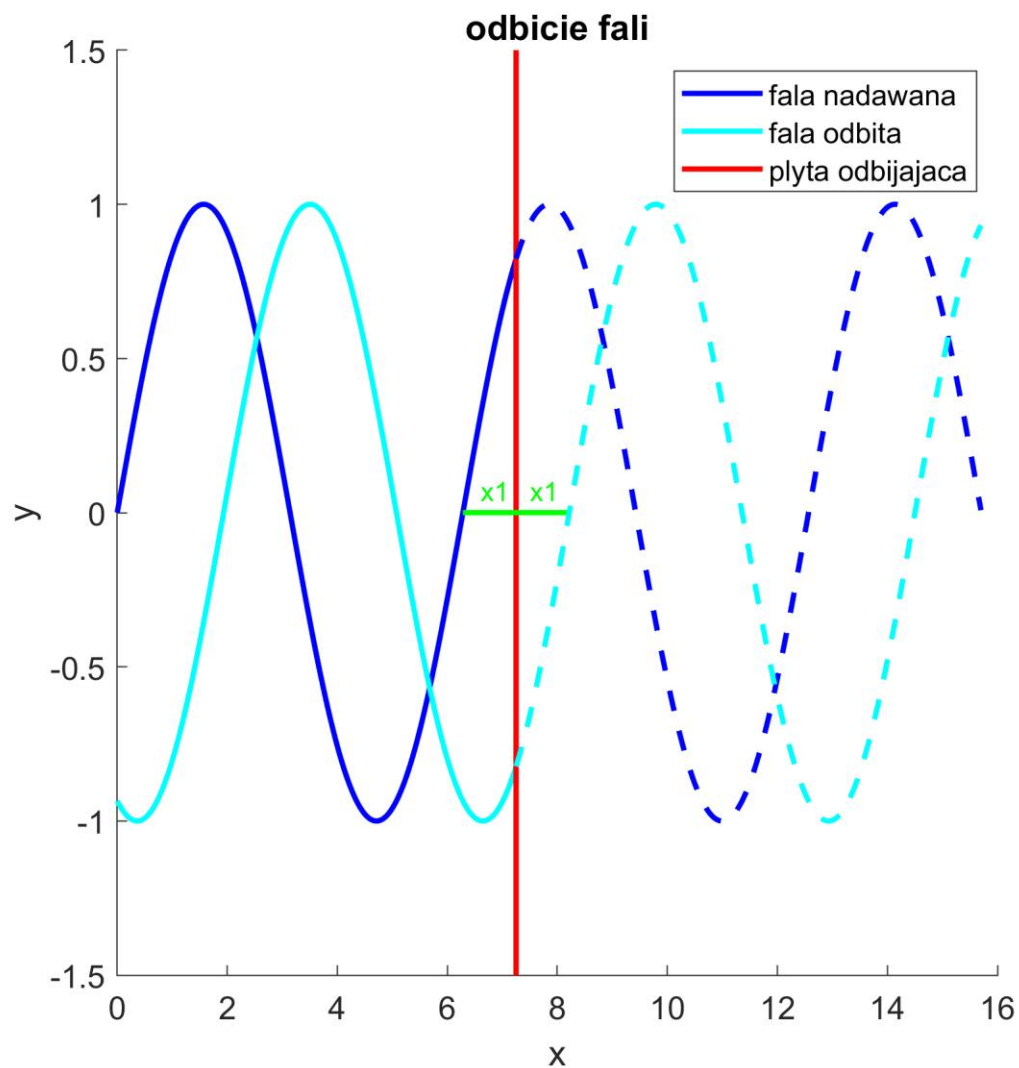
$$\Delta X = 2 \cdot x_1 \quad (3.6)$$

gdzie:

x_1 – pozycja elementu odbijającego względem zerowego wychylenia fali (fazy 0 lub π).

Warto zaznaczyć, że $x_1 \in [0, \pi)$, a zatem $\Delta X \in [0, 2\pi)$.

Zobrazowanie powyższego rozumowania przedstawia rysunek 3.1.



Rys. 3.1. Odbicie fali

Z równań 3.5 oraz 3.6 można zatem wyznaczyć wzór na x_1 :

$$x_1 = \frac{\varphi \cdot \lambda}{4\pi} \quad (3.7)$$

gdzie:

φ – przesunięcie fazowe,

λ – długość fali.

Warto zauważyć, że na tym etapie zakres pomiarowy to jedynie $\frac{\lambda}{4}$. Jest to spowodowane tym, że φ przy przekroczeniu wartości π o $\alpha \in (0, \pi)$ wynosi $\pi - \alpha$. Zatem $\varphi \in [0, \pi)$.

Metodą na dwukrotne zwiększenie zakresu pomiarowego jest przejście z przesunięcia fazowego na przesunięcie faz. W takim przypadku określa się sygnał, względem którego mierzona jest faza drugiego. Dzięki temu, gdy przekroczona zostanie wartość π , faza sygnału mierzonego, która jest już mniejsza z drugiej strony, nie będzie brana pod uwagę. Zakres zatem zostanie zwiększony do $\frac{\lambda}{2}$; ($\Delta\varphi \in [0, 2\pi)$).

Uwzględniając zatem wykres z rysunku 3.1., dla którego wyprowadzono wzór na x_1 , można stwierdzić, że w opisywanym przypadku faza sygnału rejestrowanego przez mikrofon mierzona jest względem fazy sygnału nadawanego. Zatem końcowy wzór na odległość będącej w fazie 0 lub π fali względem płyty odbijającej wynosi:

$$x_1 = \frac{(\varphi_{nad} - \varphi_{odb}) \cdot \lambda}{4\pi} \quad (3.8)$$

gdzie:

φ_{nad} – faza fali padającej,

φ_{odb} – faza fali odbitej,

λ – długość fali.

3.4. Demodulacja i usuwanie modulacji

Modulacja polega na okresowym przekształceniu sygnału. Sygnały modulować można:

- amplitudowo (AM),
- częstotliwościowo (FM),
- fazowo (PM).

Modulacje stosowane są np. przez stacje radiowe w komunikacji do zwiększenia zasięgu, na który wysyłany jest sygnał modulujący. Sygnałem modulowanym jest tzw.

sygnał nośny, będący sinusoidą o wysokiej częstotliwości. Odbiornik słuchacza ma za zadanie pozbyć się go z otrzymanego sygnału w procesie tzw. demodulacji [7].

3.4.1. Usunięcie modulacji amplitudowej

Jednym ze sposobów na usunięcie modulacji amplitudowej jest podzielenie zmodulowanego sygnału przez jego obwiednię [7]. Wynikowy sygnał oscyluje wtedy w przedziale $[-1, 1]$.

Obwiednię sygnału można wyznaczyć stosując transformatę Hilberta. W programie MATLAB stosuje się do tego polecenia `abs(hilbert(s1))`, gdzie `s1` to zmodulowany sygnał.

3.4.2. Demodulacja kątowna

Na demodulację kątową składają się demodulacja częstotliwościowa i fazowa. Jeden z algorytmów tego procesu opisano w tym podpunkcie.

Jego pierwszym krokiem jest filtracja BP (*ang. bandpass*) zmodulowanego sygnału w otoczeniu częstotliwości sygnału nośnego. Celem tej operacji jest usunięcie różnych zakłóceń.

Następnie należy zróżniczkować sygnał po czasie. Implikuje to pozbycie się fluktuacji sygnału z dziedziny częstotliwości (pojawiają się one wtedy na obwiedni sygnału). Później wydziela się sygnał przez tę obwiednię i usuwa się z niej komponent stały (jej średnią).

Kolejnym krokiem jest filtracja dolnoprzepustowa. Jest ona stosowana celem pozbycia się niskoczęstotliwościowych komponentów sygnału.

Na końcu, aby obliczyć fazę sygnału, z całości liczona jest całka [8][9].

3.5. Charakterystyka roboczych fal ultradźwiękowych

W pracy za pomocą generatora utworzono fale sinusoidalne, których parametry przedstawiono w tabeli 3.1.

Tab. 3.1. Wybrane parametry generowanych fal sinusoidalnych

	Fala 1	Fala 2
Częstotliwość [kHz]	340	340
Amplituda [Vpp]	10	10
Offset [V]	0	0
Faza początkowa [°]	0	0
Liczba cykli	4	Fala ciągła
Okres wysyłania pakietu impulsów [ms]	10	Fala ciągła

Jak można wywnioskować z tabeli 3.1., fale różnią się ciągłością. „Fala 1” złożona jest z 4 okresów sinusa, po których następuje przerwa w nadawaniu sygnału. Jest to właściwie seria czterech cykli fali, które wysyłane są co 10 ms. Można właściwie traktować ją jako impuls. „Fala 2” natomiast jest falą sinusoidalną ciągłą.

Częstotliwość fal nie jest przypadkowa. Została ona dobrana tak, by umożliwić pracę nadajnika blisko jego częstotliwości rezonansowej. Zostanie on opisany w kolejnym rozdziale.

4. Stanowiska pomiarowe

W tym punkcie zawarto krótkie opisy użytych do badań urządzeń, ich implementację i połączenie oraz sposoby wykonywania pomiarów.

4.1. Opis urządzeń

Do utworzenia pierwszego stanowiska badawczego („Stanowisko 1”), a zatem tego, na którym zbadane zostaną przemieszczenia, użyto generatora funkcyjnego, nadajnika, mikrofonu, platformy translacyjnej, elementów mocujących, odpowiednich przewodów i komputera z wbudowaną kartą akwizycji danych i zainstalowanym środowiskiem MATLAB.

W drugim przypadku („Stanowisko 2”), do zbudowania stanowiska do pomiaru prędkości drgań, miejsce platformy translacyjnej zajął wzbudnik elektrodynamiczny.

4.1.1. Generator funkcyjny Keysight 33500B

Generatory funkcyjne arbitralne Keysight serii 33500 wyposażone są w technologię „Trueform”, która dzięki połączeniu atrybutów architektury DDS i przebiegów punkt-punkt, generuje sygnał w paśmie od 20 MHz do 30 MHz dla przebiegów sinusoidalnych. Sygnał próbkowany jest od 160 do 250 MSa/s, z rozdzielczością na poziomie dwóch bajtów.

Pamięć wynosi tu 1 MSa z możliwością rozszerzenia do 16 MSa, co pozwala na generację sygnałów w trybie dwukanałowym ze sprzężeniem częstotliwościowym lub amplitudowym, sygnałów różnicowych oraz sumowanie kanałów do jednego wyjścia [10].

4.1.2. Bezkontaktowy przetwornik Ultran Group NCG500-D25

Nadajnik ten przeznaczony jest do wykonywania pomiarów w powietrzu i innych niekorozyjnych środowiskach gazowych. Powszechnie stosowany jest przy produkcji i kontroli jakości różnych materiałów, takich jak kompozyty, ceramika czy polimery. Posiada aluminiową obudowę i złącza BNC. Zawiera również opatentowany przez firmę

Ultran kompozyt piezoelektryczny z matrycą gazową. Posiada aktywną średnicę długości 25 mm, a jego teoretyczna częstotliwość rezonansowa to 500 kHz [11].

W rzeczywistości jest ona inna, przeprowadzono zatem jej badanie, a jego wyniki opisano w następnym rozdziale. Zdjęcia nadajnika przedstawiono na rysunkach 4.1. oraz 4.2.



Rys. 4.1. Nadajnik Ultran Group 33500B



Rys. 4.2. Nadajnik Ultran Group 33500B

4.1.3. MicroAcoustic Instruments Inc. BAT-1

BAT-1 to mikrofon pojemnościowy o nieostrej konstrukcji z aperturą planarną o średnicy 10 mm. Jego dobrze wytłumiona odpowiedź przejściowa eliminuje „huczenie” przetwornika i umożliwia pomiary w odległości mniejszej niż 2 mm od apertury. BAT-1 jest tak czuły na gazy, że może badać wiele substancji stałych przez pośrednią warstwę powietrzną, tj. bez kontaktu. Łączy się go z odpowiednią aparaturą za pomocą złotego złącza elektrycznego SMB [12].

Mikrofon ten przedstawiono na rysunkach 4.3. oraz 4.4.



Rys. 4.3. Mikrofon MicroAcoustic Instruments Inc. BAT-1



Rys. 4.4. Mikrofon MicroAcoustic Instruments Inc. BAT-1

Warto zaznaczyć, że jego pasmo ultradźwiękowe w powietrzu to przedział od 40 kHz do 2.25 MHz, zatem jest on w stanie poprawnie zarejestrować używane w badaniach fale.

4.1.4. Thorlabs LTS300 i LTSP3

Urządzenie Thorlabs LTS300 to platforma translacyjna, przesuwająca element LTSP3, będący wspornikiem osi Z, który w badaniach pełni funkcję płyty, od której odbijana jest nadawana fala w kierunku zbierającego sygnał mikrofonu. Urządzenie LTS300 umożliwia ruch wzdłuż jednej osi. Zasilane jest ono precyzyjnym silnikiem krokowym, który, wraz z oprogramowaniem dostarczanym przez producenta, daje informację zwrotną o pozycji przesuwanego elementu [13]. Dzięki temu możliwe jest określenie precyzji pomiaru odległości przez układ nadajnik-LTSP3-odbiornik.

W tabeli 4.1. przedstawiono wybrane parametry platformy translacyjnej Thorlabs.

Tab. 4.1. Wybrane parametry Thorlabs LTS300

	Thorlabs LTS300
Całkowity zasięg [mm]	300
Maksymalna prędkość [mm/s]	50
Minimalne przemieszczenie [μm]	0.1
Dokładność [μm]	5.0
Typ silnika	Silnik krokowy

Źródło: [13]

Fotografię połączonych ze sobą urządzeń Thorlabs LTS300 i LTSP3 przedstawia rysunek 4.5.



Rys. 4.5. Thorlabs LTS300 i Thorlabs LTSP3

4.1.5. Wzbudnik elektrodynamiczny The Modal Shop K2007E01

The Modal Shop K2007E01 to urządzenie wytwarzające drgania. Wyposażone jest ono w zintegrowany wzmacniacz, zatem można je podłączyć bezpośrednio do generatora funkcyjnego. Zapewnia ono siłę sinusoidalną do 31 N przy skoku 1/2 cala (1,27 cm). Urządzenie zasilane jest prądem stałym i zakończone jest gwintowaną wkładką montażową, obsługującą obciążenia do 0.91 kg [14].

W tej wkładce została umieszczona konstrukcja zakończona szklaną płytą, która drga z zadaną przez generator funkcyjny częstotliwością i amplitudą. Całość mechanizmu przedstawiają zdjęcia umieszczone na rysunkach 4.6. oraz 4.7.



Rys. 4.6. The Modal Shop K2007E01 z



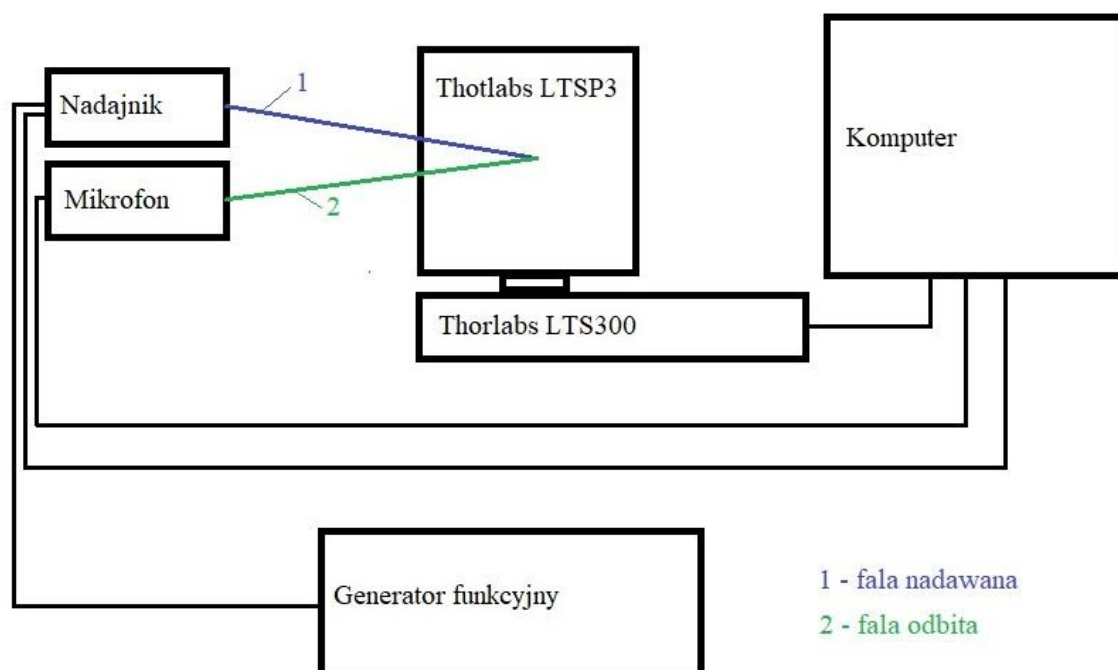
Rys. 4.7. The Modal Shop K2007E01

4.2. Schematy stanowisk

W tym podpunkcie zostaną opisane kolejno stanowiska. Pierwsze zostało wykorzystane do pomiaru przemieszczeń, a drugie – prędkości drgań.

4.2.1. Stanowisko 1

Na rysunku 4.8. przedstawiono wykonany w programie Paint schemat „Stanowiska badawczego 1”.



Rys. 4.8. Schemat „Stanowiska 1”

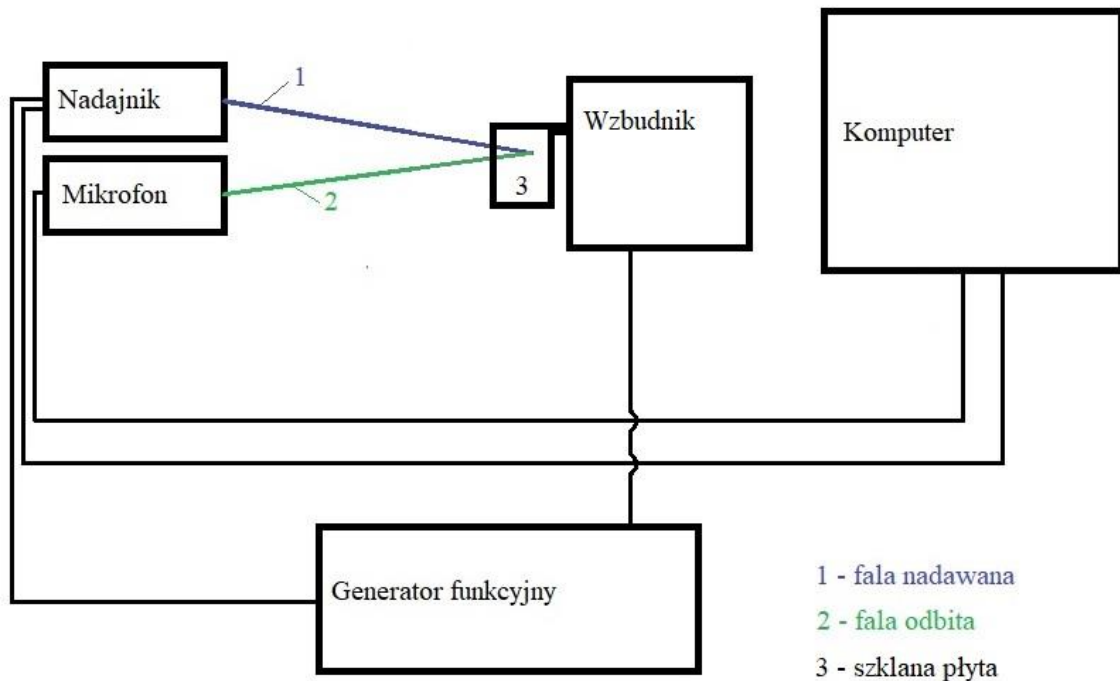
Warto zaznaczyć, że nadajnik i mikrofon, utwierdzone w stałej pozycji, znajdują się w takiej samej odległości od płyty, od której odbijana jest fala ultradźwiękowa. Płyta ta porusza się zgodnie z ruchem platformy translacyjnej, która przesyła informacje o swojej pozycji do komputera. Kierunek, w którym porusza się ten mechanizm jest w przybliżeniu równoległy do kierunku rozchodzenia się fali.

Generator funkcyjny wysyła tu sygnał przewodowo do nadajnika, z którego jest emitowany, odbijany od płyty i zbierany przez mikrofon. Oba te sygnały przetwarzane są przez kartę akwizycji danych i zapisywane.

Akwizycja danych wykonywana jest na przemian z przesunięciem platformy odbijającej sygnał, dzięki czemu zbierane są dane o kolejnych pozycjach (przemieszczeniach).

4.2.2. Stanowisko 2

Rysunek 4.9. przedstawia schemat „Stanowiska badawczego 2”, wykonany w programie Paint.



Rys. 4.9. Schemat „Stanowiska 2”

Jak widać, „Stanowisko 2” różni się od „Stanowiska 1” mechanizmem odbijającym falę. W tym przypadku jest to płyta szklana podłączona do wzbudnika, drgająca zgodnie z zadanymi mu przez generator funkcyjny parametrami.

Ponadto, tym razem referencją do przeprowadzonych badań nie będą kolejne zapisywane pozycje, a ustawione na generatorze parametry drgań płyty, tj. amplituda i częstotliwość.

Poza tym, generowanie i akwizycja danych następuje analogicznie jak w „Stanowisku 1”.

4.3. Konfiguracja sprzętu i zebranie danych

Aby możliwe było przeprowadzenie badań należało skonfigurować generator funkcyjny, kartę akwizycji danych znajdującą się w komputerze oraz platformę translacyjną lub wzбудnik modalny.

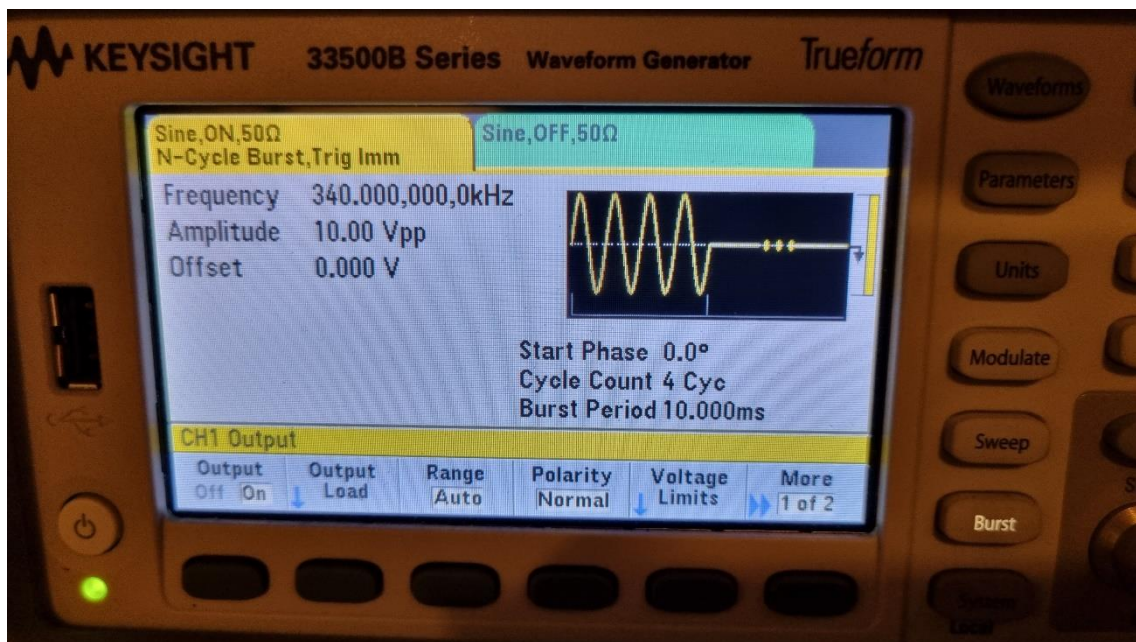
Generator posiada własny interfejs, dzięki któremu można odpowiednio ustalić parametry nadawanych fal, bez sterowania nim przez inne urządzenie. Natomiast karta akwizycji danych i platforma translacyjna zaprogramowane zostały, dzięki połączeniu z komputerem, w programie MATLAB.

Wszystkie opisywane skrypty są dostępne w załączniku.

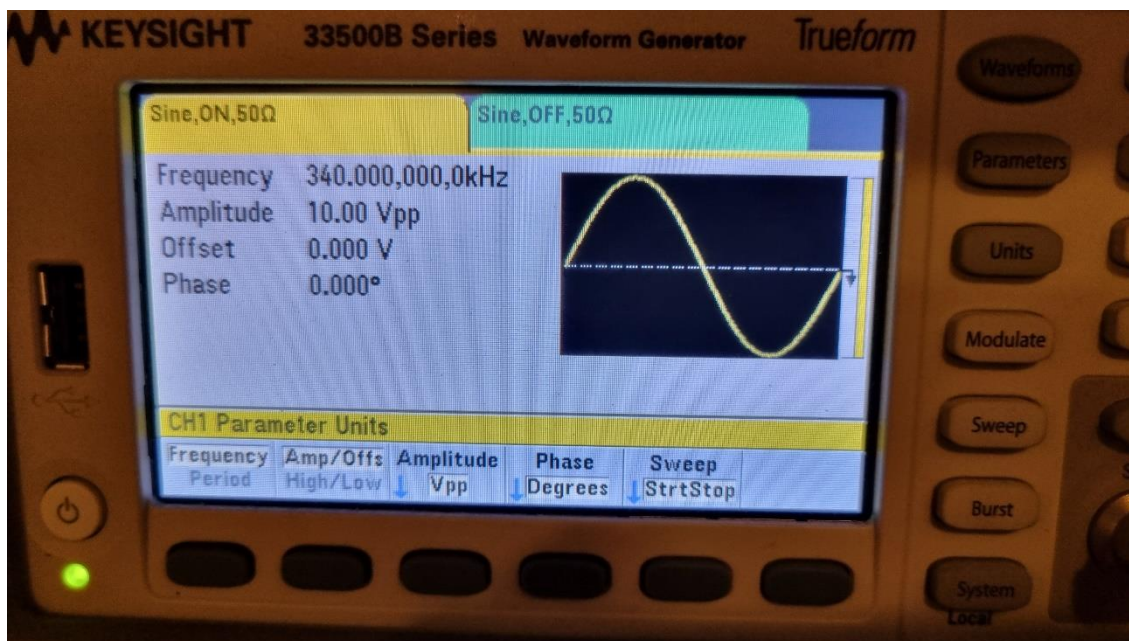
4.3.1. Parametry generatora

a) Do badania przemieszczeń.

Generator konfigurowano dwukrotnie. Raz tak, aby wytwarzał on „Falę 1”, a raz „Falę 2”. Parametry tych fal, a zatem i generatora, przedstawiono już w tabeli 1.1, w poprzednim punkcie. Na rysunkach 4.10. oraz 4.11. przedstawiono zdjęcia generatora, z ustawionymi już parametrami, odpowiednio dla „Fali 1” oraz „Fali 2”.



Rys. 4.10. Generator wytwarzający „Falę 1”



Rys. 4.11. Generator wytwarzający „Falę 2”

b) Do pomiaru prędkości drgań.

W tym przypadku konieczne było skonfigurowanie dwóch wyjść generatora (w poprzednim przypadku wystarczyło jedno; drugie było stale wyłączone).

Na jednym wyjściu zdefiniowano „Falę 2” i tak jak wcześniej, połączono je z nadajnikiem.

Drugie wyjście podłączone zostało do wzбудnika i jego parametry były zmieniane wraz z wykonywaniem kolejnych pomiarów. Wygenerowano w ten sposób dwa zestawy danych.

W pierwszym przypadku częstotliwość była stała i wynosiła 100 Hz, a zmieniana była amplituda sygnału (od 40 do 230 mVpp, co 10 mVpp).

W drugim przypadku to amplituda pozostawała niezmienną, a częstotliwość zmieniano co pomiar (od 40 do 230 Hz, co 10 Hz).

4.3.2. Konfiguracja karty akwizycji danych

Korzystając z dokumentacji karty akwizycji do programu MATLAB napisano skrypty do rejestrowania fali nadawanej i odbitej [15].

W przypadku badania przemieszczeń zatytułowany jest on jako „pomiar_sygnalu” i wywoływany jest w odpowiednich momentach przez skrypt opisany w podpunkcie 4.3.3.

Skrypt wykorzystany do badań prędkości fali to „pomiar_sygnalu_drgania” i wywoływany jest ręcznie, po włączeniu generatora z odpowiednimi parametrami.

4.3.3. Konfiguracja platformy translacyjnej

Korzystając ze stworzonej przez producenta dokumentacji napisano skrypt w programie MATLAB sterujący platformą. Zatytułowany jest jako „pomiar_odleglosci”.

Jego działanie jest następujące. Po ustaleniu pozycji na położenie „0”, następuje połączenie urządzenia i ustalenie parametrów silnika. Później urządzenie przyjmuje pozycję, od której zaczynany będzie pomiar. Następnie na przemian wywoływany jest skrypt „pomiar_sygnalu” i ruch płyty odbijającej falę ultradźwiękową o stałą odległość.

5. Wyniki

W pierwszym podpunkcie zostały zawarte wyniki dotyczące badania częstotliwości rezonansowej nadajnika. Mają one wpływ na zadawanej mu częstotliwości.

Drugi podpunkt dotyczy badań przemieszczeń. Został on podzielony na część dotyczącą pomiarów impulsem i sinusem oraz porównanie skuteczności owych metod.

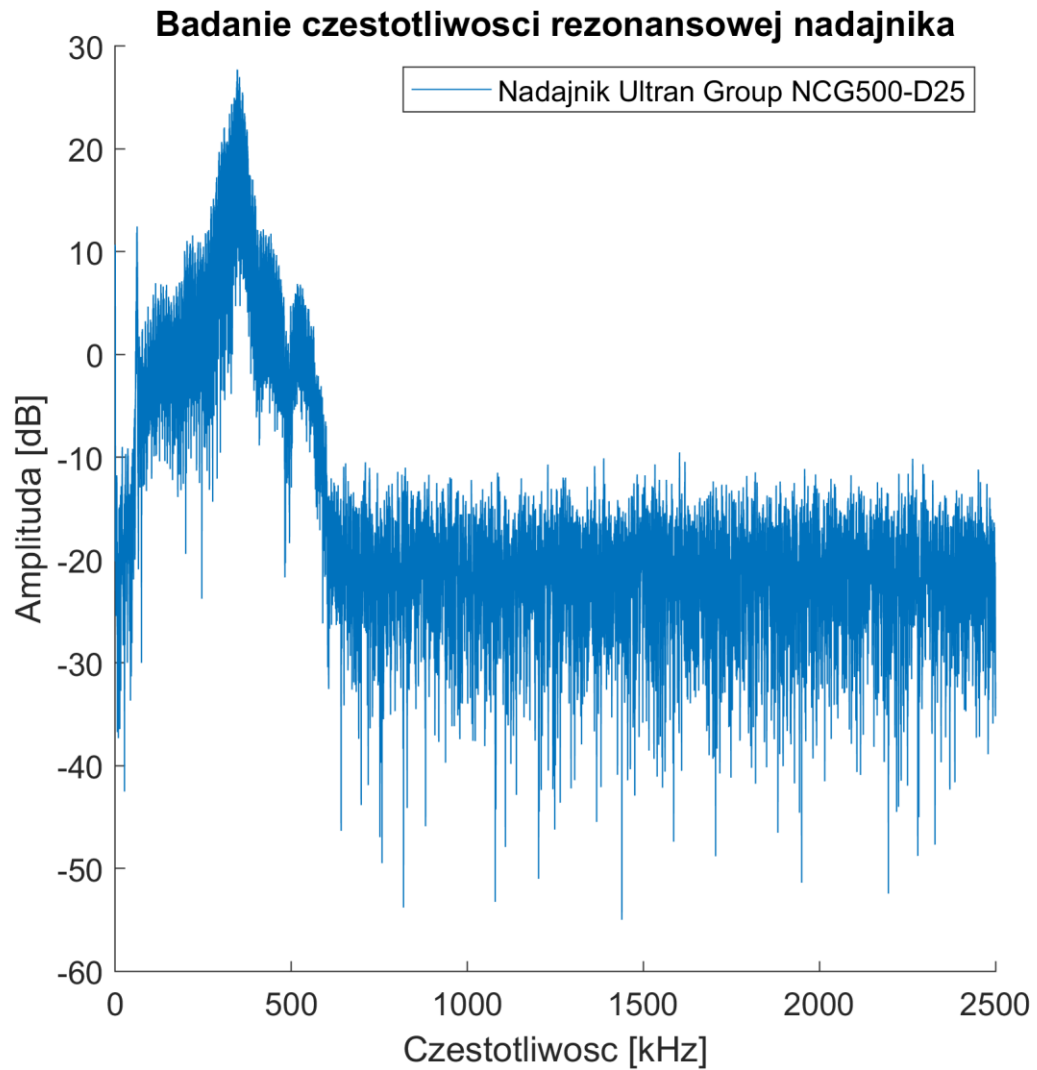
Trzeci podpunkt zawiera natomiast omówienie wyników pomiaru prędkości drgań szklanej płyty podłączonej do wzбудnika.

5.1. Częstotliwość rezonansowa nadajnika

Producent zadeklarował, że częstotliwość rezonansowa przetwornika jako 500 kHz [11]. Nie ma to jednak zastosowania w rzeczywistości.

Zostały przeprowadzone zatem badania owej częstotliwości w programie MATLAB. Podczas analizy tego urządzenia wygenerowano wykres, na podstawie którego można stwierdzić, że różni się ona znacznie od tej w dokumentacji. Przyjęto, że wynosi 340 kHz.

Rysunek 5.1. przedstawia charakterystykę częstotliwościową tego urządzenia.



Rys. 5.1 Charakterystyka częstotliwościowa nadajnika

5.2. Bandanie przemieszczeń

W tym podrozdziale skorzystano ze „Stanowiska 1”. Dane wygenerowane generatorem funkcyjnym i skryptami z podpunktów 4.3.1.a, 4.3.2. oraz 4.3.3. przetworzono, by uzyskać informacje o przemieszczeniach i określić precyzję opisywanej metody pomiarowej. Warto wspomnieć, że wygenerowane zostały trzy zestawy danych. Każdy z nich to tablica, która w kolejnych kolumnach zawiera informacje o:

- odległości nadajnika/mikrofonu od płyty odbijającej sygnał,
- sygnale nadawanym,

- sygnałe odbieranym,

W każdym przypadku mierzona odległość zaczyna się od 267 mm i zmniejsza się o 10 mm lub 0.1 mm. Za każdym razem badane jest szesnaście kolejnych pozycji układu (a zatem 15 przemieszczeń). Tabela 5.1. przedstawia różnice pomiędzy kolejnymi pakietami danych.

Tab. 5.1. Zbiory danych – badanie przemieszczeń

	Dane 1	Dane 2	Dane 3
Wygenerowana fala	Fala 1	Fala 1	Fala 2
Krok [mm]	10	0.1	0.1

5.2.1. Wymuszenie impulsem

Jak wiadomo z parametrów generatora, impuls wysyłany jest co 10 ms. Aby upewnić się, że w zebranych pliku danych występuje minimum jeden pełny pakiet danych, składający się z impulsu nadanego oraz (po odbiciu) odebranego, skorzystano ze wzoru:

$$t_{\min} = t_{\text{imp}} + \frac{s_{\max}}{v} \quad (5.1)$$

gdzie:

t_{imp} – różnica czasu pomiędzy impulsami

s_{\max} – maksymalna droga, jaką może przebyć fala dla zbudowanego stanowiska,

v – prędkość fali nadawanej w powietrzu [°C].

Warto przypomnieć, że zmierzona odległość pomiędzy nadajnikiem (lub mikrofonem), a maksymalnie wysuniętą platformą wynosi 171 mm, podczas gdy pozycja „0” tej platformy jest oddalona od tego punktu o kolejne 300 mm. Droga ta przez fale przemierzana jest dwukrotnie. „ s_{\max} ” przyjęto zatem, ze sporym zapasem jako 1 m.

Prędkość fali nadawanej została wyznaczona ze wzoru 3.3.

Tak więc:

$$t_{\min} = 0.01 + \frac{1}{331.5 + 0.6 \cdot 25} \approx 0.0129 \text{ [s]} \quad (5.2)$$

Czas rejestrowania sygnałów wynosi ok. 0.0131 s, jest zatem wystarczający.

5.2.1.1. Omówienie programu

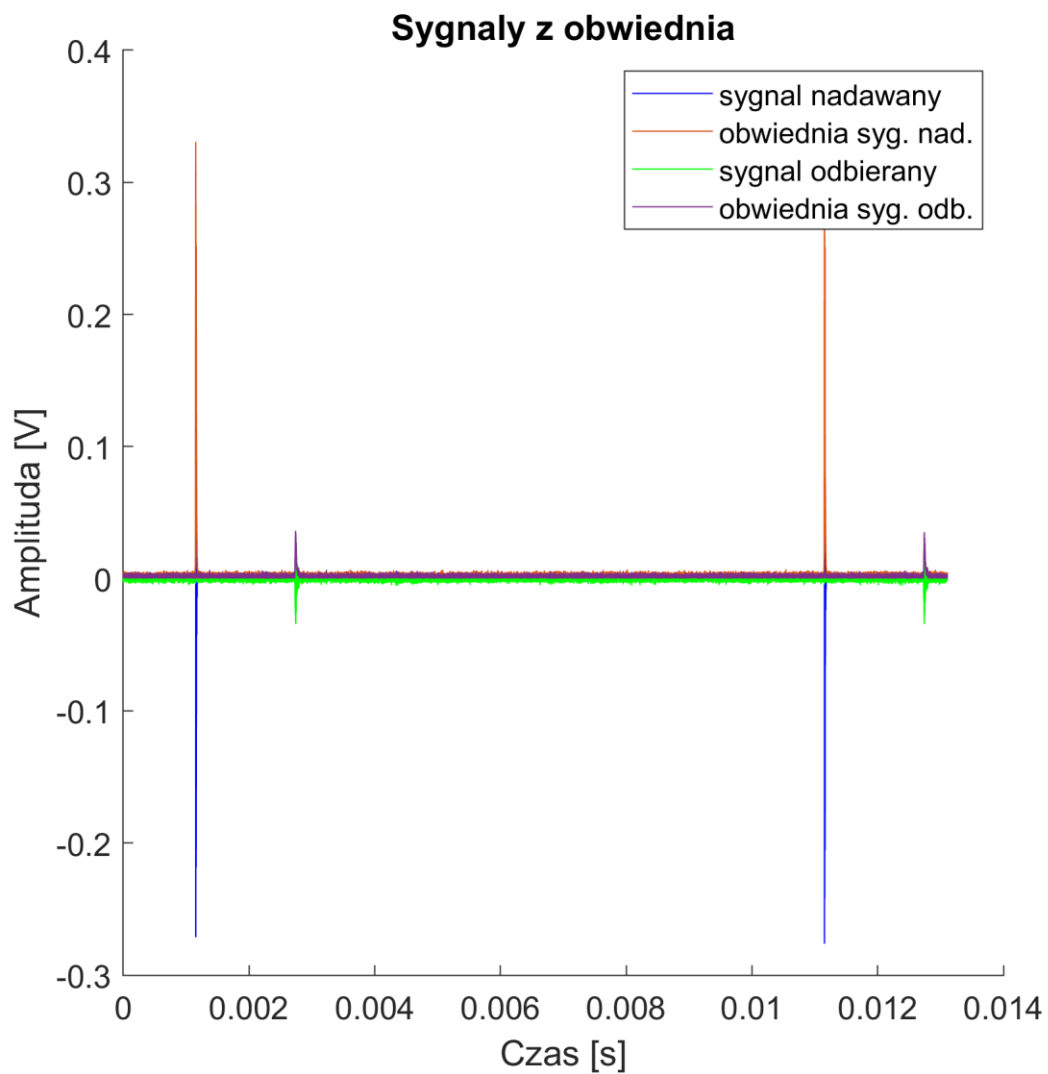
Program z tego podpunktu zatytułowany został „przetwarzanie_danych_impuls”.

Po zaimportowaniu odpowiedniego pakietu danych (w tym podpunkcie są to „Dane 1” lub „Dane 2”), rozpatrywano jego kolejne wiersze (każdy wiersz zawiera pełną dokumentację pomiaru dla jednej z szesnastu pozycji).

Następnie, na podstawie transformaty Hilberta, wyznaczono obwiednie obu sygnałów.

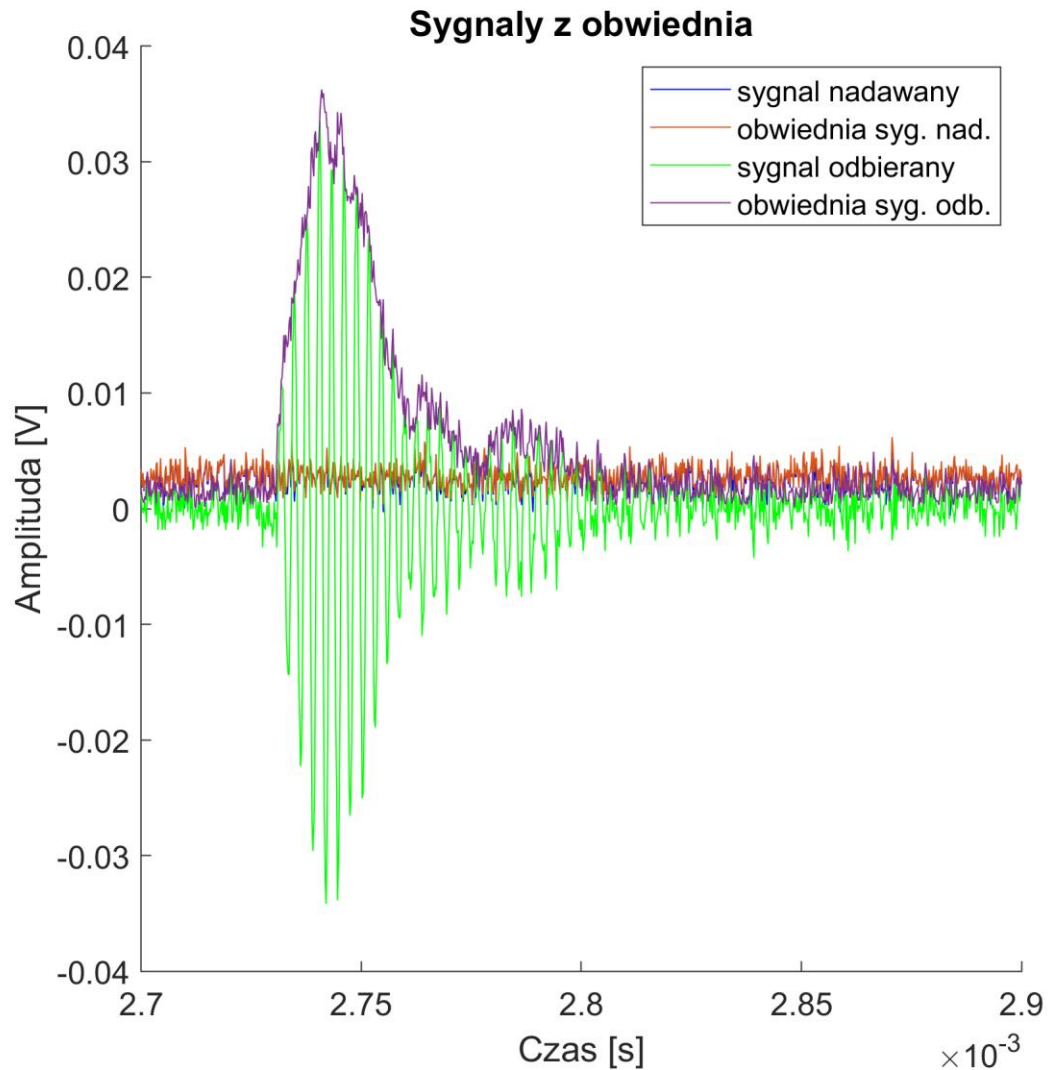
Później konieczne było znalezienie impulsu/ów w próbce sygnału nadawanego. Z informacji, że czas badania sygnału to 0.0131 s, a impulsy wysyłane są co 0.010 s można wywnioskować, że w nadawanym sygnale mogą być maksymalnie dwa impulsy i to w dwóch różnych połówkach tego sygnału. Podzielono go zatem na pół i zlokalizowano wówczas maksima obwiedni obu połówek. Następnie skorzystano z operatora warunku. Jeśli maksimum z drugiej połówki jest wyraźnie większe od tego z pierwszej, definiowano je jako impuls. W przeciwnym przypadku brano maksimum z pierwszej połówki.

W kolejnym kroku szukane są dwa maksima w obwiedni sygnału odbieranego, po zdefiniowanym impulsie. Są one szukane do końca sygnału lub do kolejnego impulsu (jeśli występuje). Po znalezieniu pierwszego maksimum, jest ono wycinane w otoczeniu szerokości dwóch impulsów i dopiero znajduwane jest drugie. Zazwyczaj pierwsze maksimum po impulsie to szukany sygnał (rys 5.2.).



Rys. 5.2. Wykres sygnału z obwiednią dla pierwszej próbki z pakietu danych dot. „Fali 1” oraz przemieszczeń 10 mm.

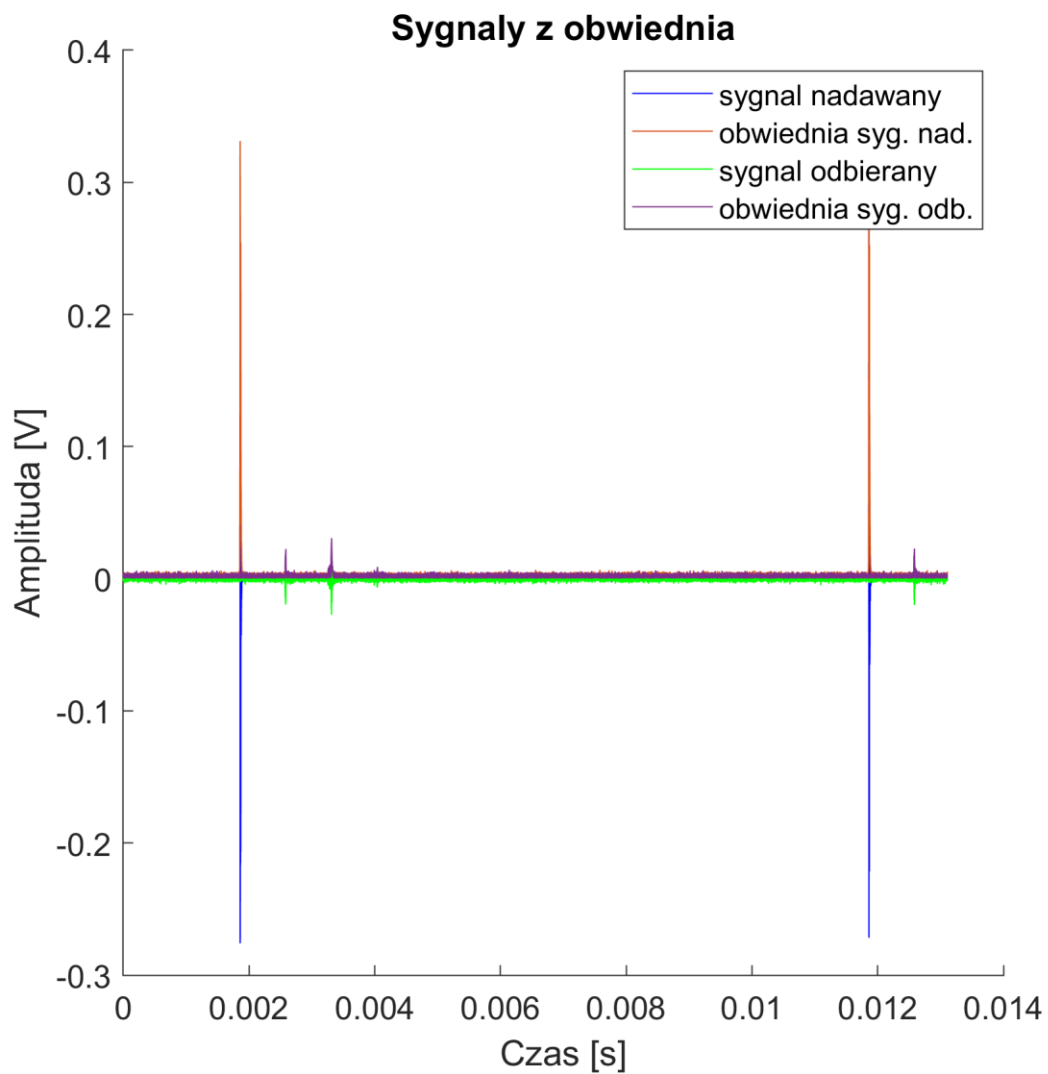
Rysunek 5.3. przedstawia przybliżenie przedziału powyższego wykresu, w którym występuje zebranie pierwszego impulsu przez mikrofon.



Rys. 5.3. Wykres sygnału z obwiednią dla pierwszej próbki z pakietu danych dot. „Fali 1” oraz przemieszczeń 10 mm.

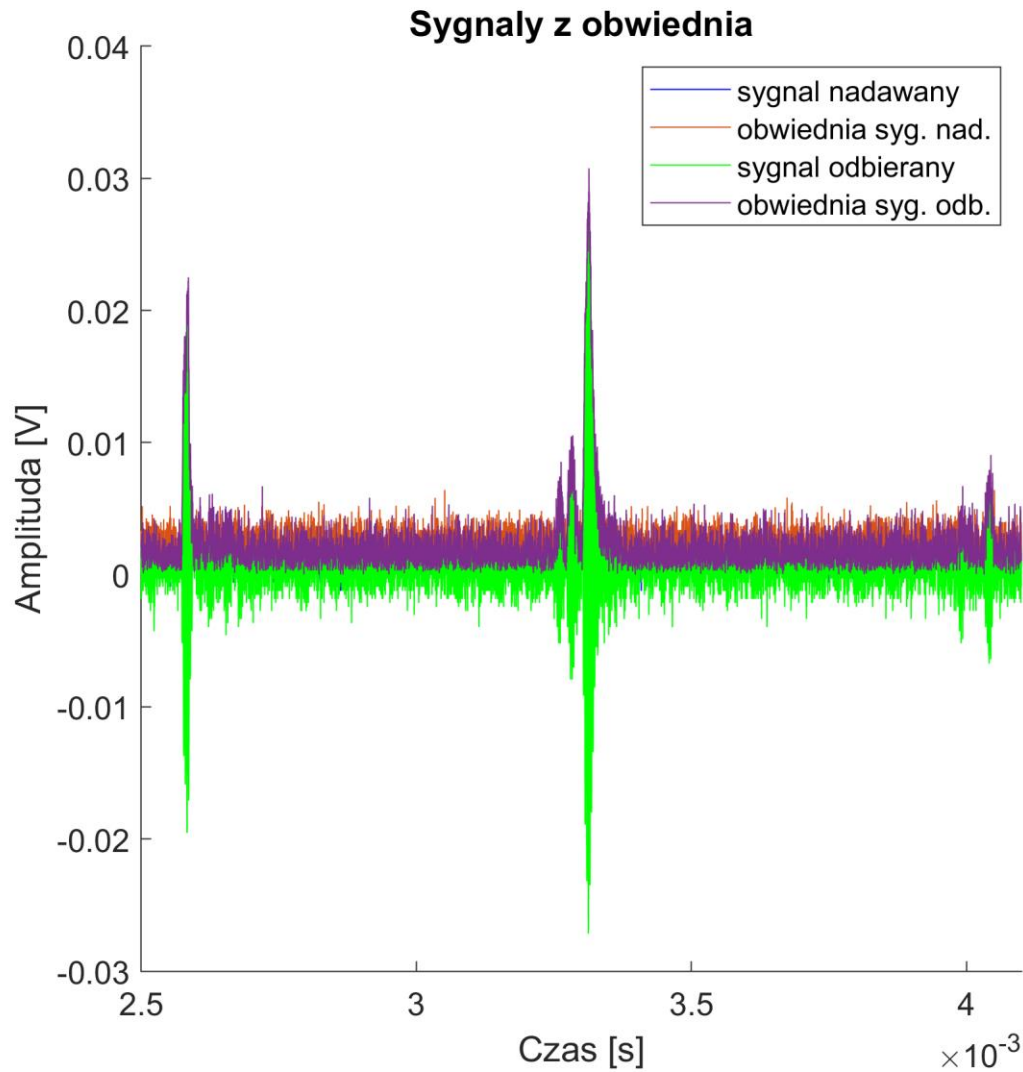
Zdarza się jednak, że impuls odbity od układu nadajnik-odbiornik, drugi raz przemierzający określoną trasę, pozostawia większą amplitudę niż ten pierwszy. Zjawisko to występuje szczególnie często w próbkach wygenerowanych, gdy płyta odbijająca sygnał znajduje się blisko końca platformy (a zatem najbliższej przetworników). Przykład takiego sygnału, dotyczącej próbki w pozycji właśnie najbliższej przetworników, przedstawia rysunek 5.4.

W takim przypadku do obliczeń oczywiście brany jest pod uwagę maksimum będące bliżej impulsu.



Rys. 5.4. Wykres sygnału z obwiednią dla ostatniej próbki z pakietu danych dot. „Fali 1” oraz przemieszczeń 10 mm.

Na rysunku 5.5. przedstawiono przybliżenie przedziału, w którym mikrofon odebrał impuls i jego kolejne odbicia.



Rys. 5.5. Wykres sygnału z obwiednią dla ostatniej próbki z pakietu danych dot. „Fali 1” oraz przemieszczeń 10 mm.

W kolejnym kroku analizy sygnałów do określenia odległości między nadajnikiem/odbiornikiem a płytą skorzystano ze wzoru:

$$d = \frac{dt \cdot v \cdot 10^3}{2} [mm] \quad (5.3)$$

gdzie:

dt – różnica czasu pomiędzy impulsem z sygnału nadawanego, a zarejestrowaną na niego pierwszą odpowiedzią w sygnale odebranym,

v – prędkość fali.

Następnie cały opisywany powyżej fragment skryptu zamknięto w pętlę „for” i wykonano opisane operacje dla całości danych (z szesnastu różnych pozycji z krokiem 10 mm lub 0.1 mm).

Ostatni fragment skryptu, już poza pętlą, określa błąd bezwzględny w pomiarze poszczególnych przemieszczeń, a zatem moduł z różnic pomiędzy kolejnymi obliczonymi pozycjami a odpowiednim krokiem. Przedstawione są one odpowiednio w tabeli 5.2. Na końcu tabeli obliczony jest średni błąd bezwzględny dla obu zestawów danych.

Tab. 5.2. Błędy przy pomiarze kolejnych przemieszczeń i średni błąd bezwzględny

Punkt pomiarowy	Błąd bezwzględny: Dane 1 [mm]	Błąd bezwzględny: Dane 2 [mm]
2-1	0.0554	0.6198
3-2	0.2910	0.5930
4-3	0.0901	0.0654
5-4	0.1594	0.1079
6-5	0.0554	0.1346
7-6	0.2217	0.1772
8-7	0.2980	0.8276
9-8	0.1525	0.7662
10-9	0.2287	0.1693
11-10	0.0555	0.5851
12-11	0.1248	0.0039
13-12	0.0485	0.0040
14-13	0.1247	0.5930
15-14	0.4643	0.2118
16-15	0.6792	0.1000
Średni błąd	0.2033	0.3306

5.2.2. Wymuszenie sygnałem sinusoidalnym

Przy badaniu przemieszczeń impulsem średni błąd zmierzonego przemieszczenia jest kilkakrotnie większy od długości fali. By zwiększyć precyzję pomiarów, do zmierzenia relatywnie małych przemieszczeń względem tej wielkości, można skorzystać z przesunięcia faz. Takie badanie ma zastosowanie, gdy odległość pomiędzy mierzonymi pozycjami jest mniejsza niż połowa długości fali roboczej, lub gdy jest ona zawężona do takiego zakresu.

5.2.2.1. Omówienie programu

Omawiany program został nazwany „przetwarzanie_danych_sinus”.

Po zaimportowaniu do programu odpowiedniego pliku danych zebranych w laboratorium, podzielono go na wiersze. Każdy z nich zawiera informacje o pozycji, sygnale nadawanym i zbieranym przez mikrofon dla jednego pomiaru.

Następnie, korzystając z transformaty Hilberta oraz polecenia „angle”, obliczono przesunięcie fazy sygnału odbieranego względem nadawanego.

Jako, że długość fali jest znana, możliwe jest obliczenie x_1 , określającego pozycję elementu odbijającego względem zerowego wychylenia fali (fazy 0 lub π), korzystając ze wzoru 3.10. z podpunktu 3.1.5.

Odpowiednio manipulując zatem zakresem pomiarowym, tzn. doprecyzowując badany zakres do połowy długości fali, wyznaczono kolejne pozycje płyty odbijającej sygnał.

Opisywany skrypt został zamknięty w pętli „for” i został zaimplementowany dla szesnastu kolejnych położzeń. Następnie z położzeń zostały obliczone kolejne przemieszczenia.

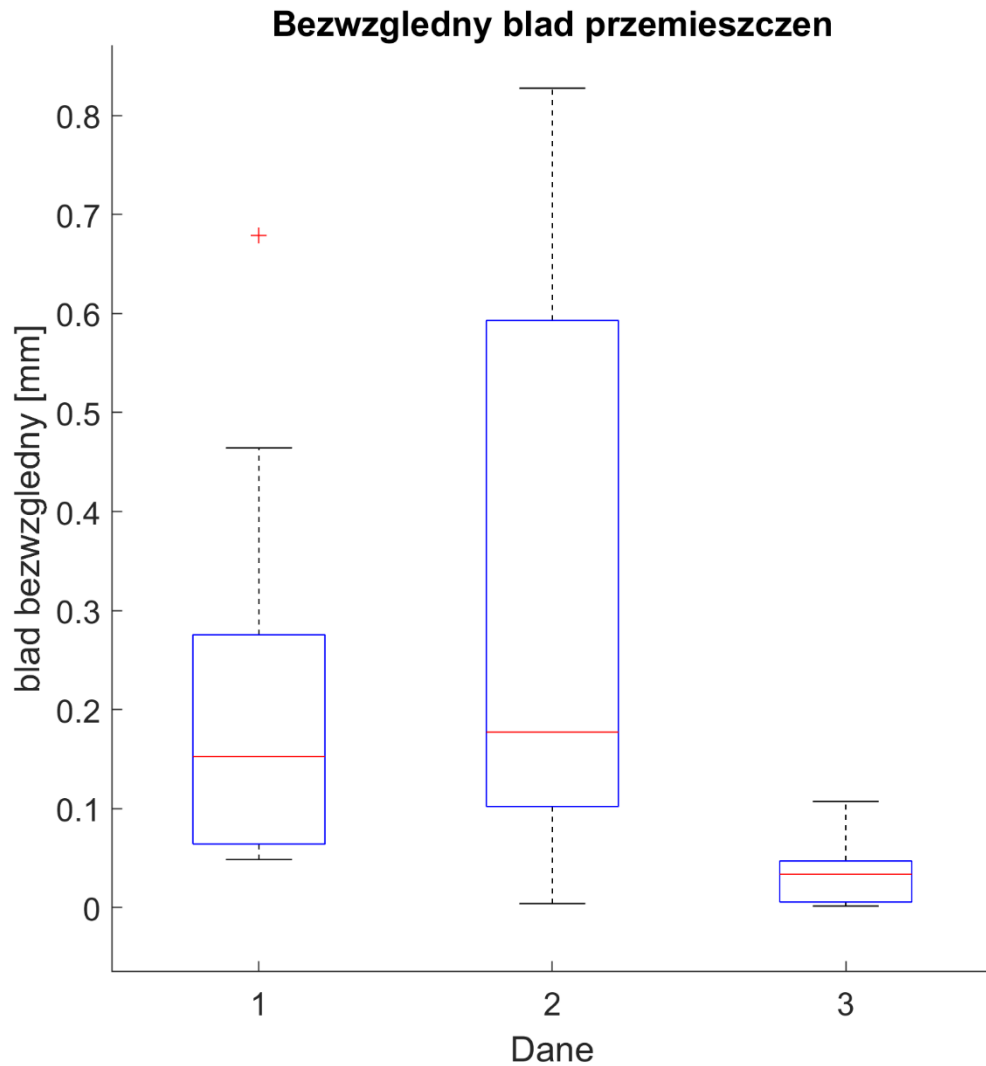
Tak jak przy pomiarze impulsem, ostatni fragment skryptu określa błąd bezwzględny w pomiarze poszczególnych przemieszczeń. Przedstawione są one odpowiednio w tabeli 5.3. Na końcu tabeli obliczony jest średni błąd bezwzględny dla obu zestawów danych.

Tab. 5.3. Błędy przy pomiarze kolejnych przemieszczeń i średni błąd bezwzględny

Punkt pomiarowy	Błąd bezwzględny: Dane 3 [mm]
2-1	0.0064
3-2	0.0691
4-3	0.0353
5-4	0.0385
6-5	0.0483
7-6	0.0159
8-7	0.0784
9-8	0.1072
10-9	0.0035
11-10	0.0017
12-11	0.0279
13-12	0.0052
14-13	0.0336
15-14	0.0431
16-15	0.0015
Średni błąd	0.0344

5.2.3. Porównanie metod pomiaru przemieszczeń

Do porównania obu metod skorzystano z „boxplot” w programie MATLAB. Generuje ono wykres pudełkowy dla błędów (w opisywanym przypadku). Czerwona linia oznacza tu medianę, w niebieskim prostokącie zawarty jest rozstęp ćwiartkowy, a pomiędzy czarnymi „wąsami” znajdują się wszystkie dane, poza oznaczonymi czerwonymi plusami „outliner’ami” – uznanymi przez algorytm wartościami odstającymi. Wykres znajduje się na rysunku 5.6.



Rys. 5.6. Wykres pudełkowy bezwzględnych błędów przemieszczeń dla kolejnych zestawów danych

Jak widać na wykresie, mediany błędów „Danych 1” oraz „Danych 2” są na podobnym poziomie. Zastosowano dla nich tę samą metodę pomiarową, więc wynik ten wydaje się być poprawny.

Przy mniejszych przemieszczeniach dokładność przy badaniu impulsem nie poprawia się, a w tym przypadku nawet jest pogorszona (szczególnie uwzględniając średni błąd bezwzględny z tabeli 5.2., gdzie jest on większy dla drugiego pakietu o ok. 50%).

Rozstęp ćwiartkowy błędu z „Danych 2” sięga wartości 0.6 mm. Jest to wartość większa od połowy długości fali ultradźwiękowej (ok. 0.5 mm), a zatem maksymalnego błędu w badaniu sinusem.

To właśnie ta metoda, a zatem zastosowana do „Danych 3” jest najbardziej precyzyjna. Mediana błędu bezwzględnego wynosi tu 0.0336 mm, co jest znacznie lepszym wynikiem od poprzednich (odpowiednio: 0.1525 mm i 0.1772 mm). Oczywiście należy mieć na uwadze zakres pomiarowy owej metody. Z tego powodu będzie ona miała ograniczone zastosowanie.

Tak więc obie metody można stosować w nieco innych warunkach. Badanie impulsem: dla większego zakresu, a sinusem, gdy wymagana jest większa precyzja, przy odpowiednio zawężonym zakresie.

5.3. Badania prędkości drgań

W tym podpunkcie omówiono badania prędkości drgań szklanej płyty podłączonej do wzбудnika. Przetwarzane dane wygenerowano na „Stanowisku 2”, korzystając ze skryptu opisanym w podpunkcie 4.3.2. oraz parametrów generatora omówionych w podpunkcie 4.3.1.b.

Wygenerowano i scalono dwa zestawy danych. Są one podzielone na wiersze, gdzie każdy wiersz to jeden pomiar, zawierający informacje w kolejnych kolumnach o:

- sygnale nadawanym,
- sygnale odbieranym,

Tym razem odniesieniem dla wyników będą ustawiane parametry generatora. Różnice pomiędzy pakietami danych określono w tabeli 5.4.

Tab. 5.4. Zbiory danych – badanie prędkości drgań

	Dane 4	Dane 5
Częstotliwość drgań płyty [Hz]	100	40÷230, krok: 10
Amplituda drgań płyty [mVpp]	40÷230, krok: 10	50

Jak zatem można wywnioskować z powyższej tabeli, na „Dane 4” oraz „Dane 5” składa się po 20 pomiarów.

Do przetwarzania danych napisano skrypt „przetwarzanie_predkosc_drgan”. Jest on dostępny w załączniku.

Odpowiednie dane podzielono na wiersze. Częstotliwość i amplituda drgań znane są z parametrów ustalonych na generatorze.

Na początku z sygnału usunięto modulację, a następnie przeprowadzono demodulację FM i PM. Skorzystano tu z teorii opisanej w podpunkcie 3.1.6. Całkowanie przeprowadzono przy pomocy skrypt „inteFD” [16]. Dzięki temu otrzymano zależność wychylenia płytki od czasu (sygnał). Sygnał ten zróżniczkowano, by otrzymać szukaną prędkość drgań szklanej płytki. Całość zamknięto w pętli „for” i zaimplementowano dla kolejnych wierszy.

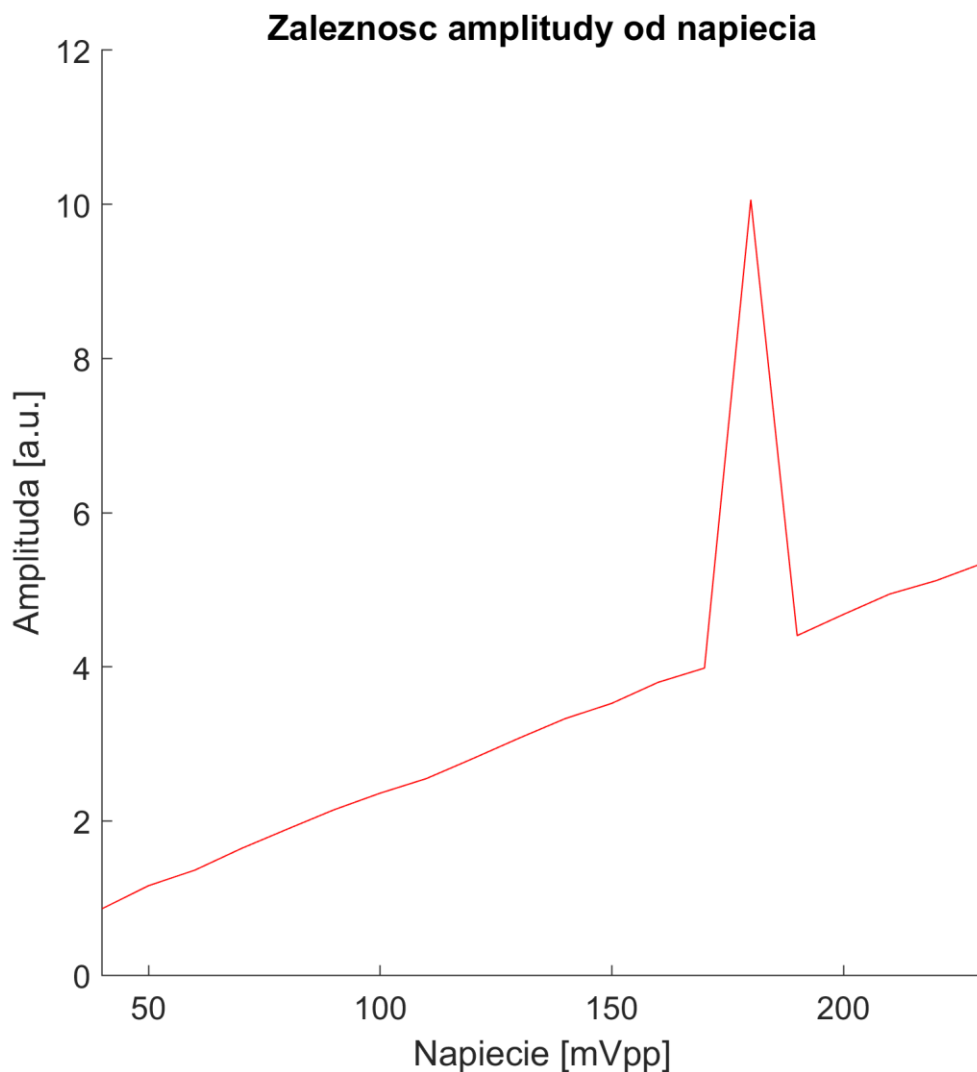
Na końcu narysowano wykresy zależności amplitudy i prędkości od wierszy danych. Dla „Danych 4” częstotliwość drgań płytki jest stała, a wraz z kolejnymi pomiarami zwiększana była amplituda. Dla „Danych 5”, gdzie amplituda jest niezmienna, z kolejnymi wierszami zwiększana jest częstotliwość.

Należy zaznaczyć, że wynikowa amplituda i prędkość zostały otrzymane w jednostkach arbitralnych. Jest to spowodowane stopniem trudności zamiany amplitud podanych w jednostce elektrycznej (Vpp) na metryczną (m). Problem pojawia się już w sygnale nadawanym. Nadajnikowi zadana jest amplituda 10 Vpp, a w danych z jego kanału pojawia się wartość ok. 7.7 Vpp. Nie jest też trywialnym zagadnieniem przeliczenie amplitudy we wzбудniku, a należy też mieć na uwadze, że mikrofon również przetwarza sygnał innymi parametrami.

5.3.1. Stała częstotliwość, zwiększana amplituda

W tym podpunkcie omówiono wyniki przetwarzania „Danych 4”.

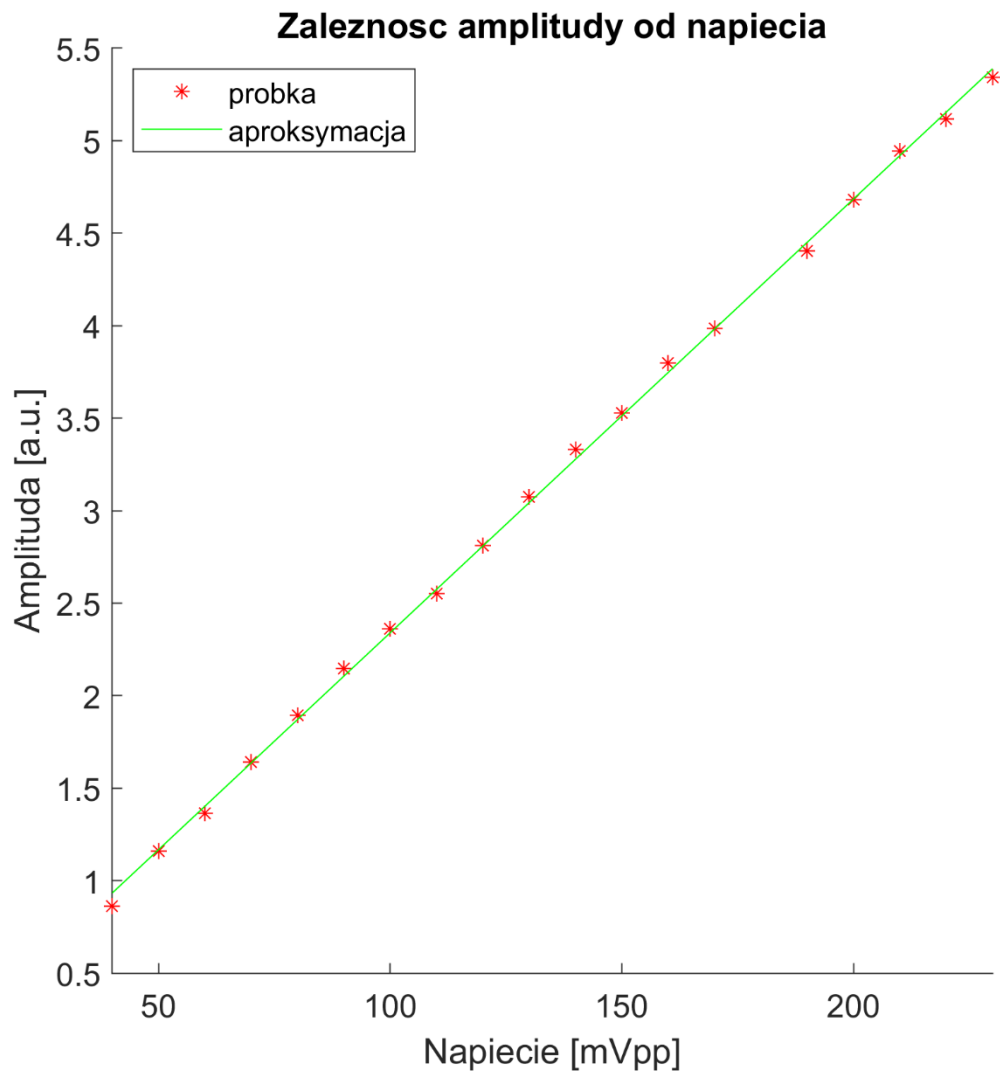
Rysunek 5.7. przedstawia wykres amplitudy drgań szklanej płytki od czasu.



Rys. 5.7. Zależność amplitudy drgań płyty od napięcia na wzбудniku

Należy zauważyć, że amplituda z próbki nr. 15 znacznie odstaje od pozostałych. Obliczona w tym przypadku częstotliwość drgań płytki to 1.0460 Hz, a w pozostałych przypadkach jest ona jednakowa do czterech miejsc po przecinku (wynosi 100.4184 Hz). Pomiar ten został zatem określony jako niepoprawny a jego wynik nie jest brany pod uwagę.

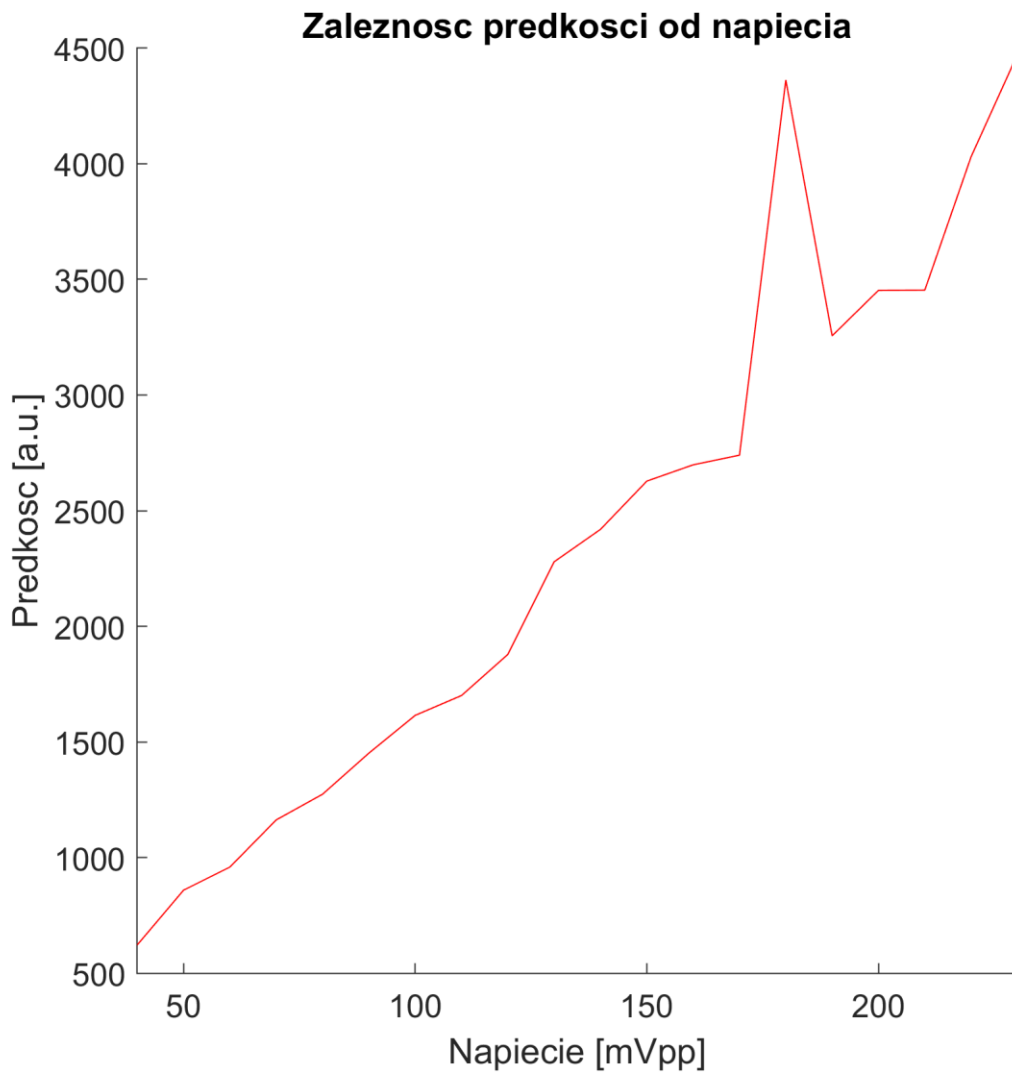
Korzystając z pozostałych amplitud zaproksymowano liniowo wyniki metodą najmniejszych kwadratów (rys. 5.8.).



Rys. 5.8. Aproksymacja amplitud drgań płyty dla kolejnych zestawów danych

Wygenerowana prosta przybliża relacje pomiędzy kolejnymi wierszami danych. Średni błąd zbadanej wartości względem tej przybliżonej prostej wynosi 1.26%, jest to zatem dobre przybliżenie.

Wykres zależności prędkości drgań szklanej płyty od wiersza „Danych 4” zaprezentowany został natomiast na rysunku 5.9.



Rys. 5.9. Zależność prędkości drgań płyty od napięcia na wzбудniku

Ponownie dane z wiersza nr. 15 nie będą uwzględnione w omówieniu wyników.

Prędkość drgań płyty rośnie, w przybliżeniu liniowo, wraz ze wzrostem zadanej amplitudy. Teoretycznie szklana płyta drga ruchem harmonicznym, gdzie zależność przemieszczenia od czasu dana jest wzorem:

$$x(t) = A \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (5.4)$$

gdzie:

A – amplituda drgań,

f – częstotliwość,

t – czas,

φ – faza początkowa [5].

Natomiast prędkość w ruchu harmonicznym jest pochodną po czasie powyższego wyrażenia, zatem:

$$v(t) = -A \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) \quad (5.5)$$

gdzie:

A – amplituda drgań,

f – częstotliwość,

t – czas,

φ – faza początkowa [5].

Badana jest wartość maksymalnej prędkości rozchodzenia się drgań, czyli, gdy $\sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t + \varphi) = 1$. Powinna ona wynosić zatem:

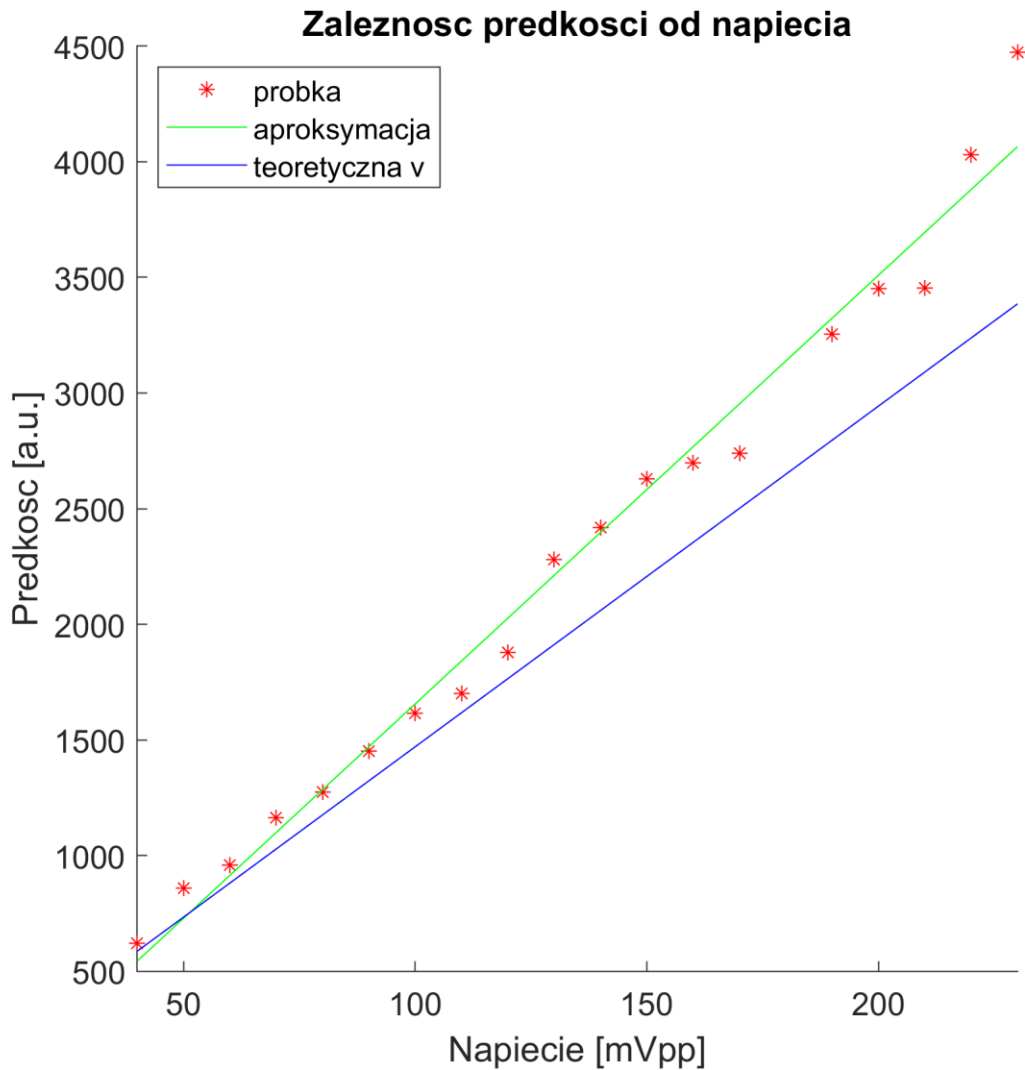
$$|v_{max}| = A \cdot 2 \cdot \pi \cdot f \quad (5.6)$$

gdzie:

A – amplituda drgań,

f – częstotliwość.

W następnym kroku sprawdzono zatem, czy taka relacja występuje. Na rysunku 5.10. przedstawiono wykres na którym porównana jest prosta aproksymująca maksymalną prędkość drgań (kolor zielony) do tej wyznaczonej ze wzoru 5.8 (kolor niebieski).



Rys. 5.10. Aproksymacja prędkości drgań płyty dla kolejnych zestawów danych

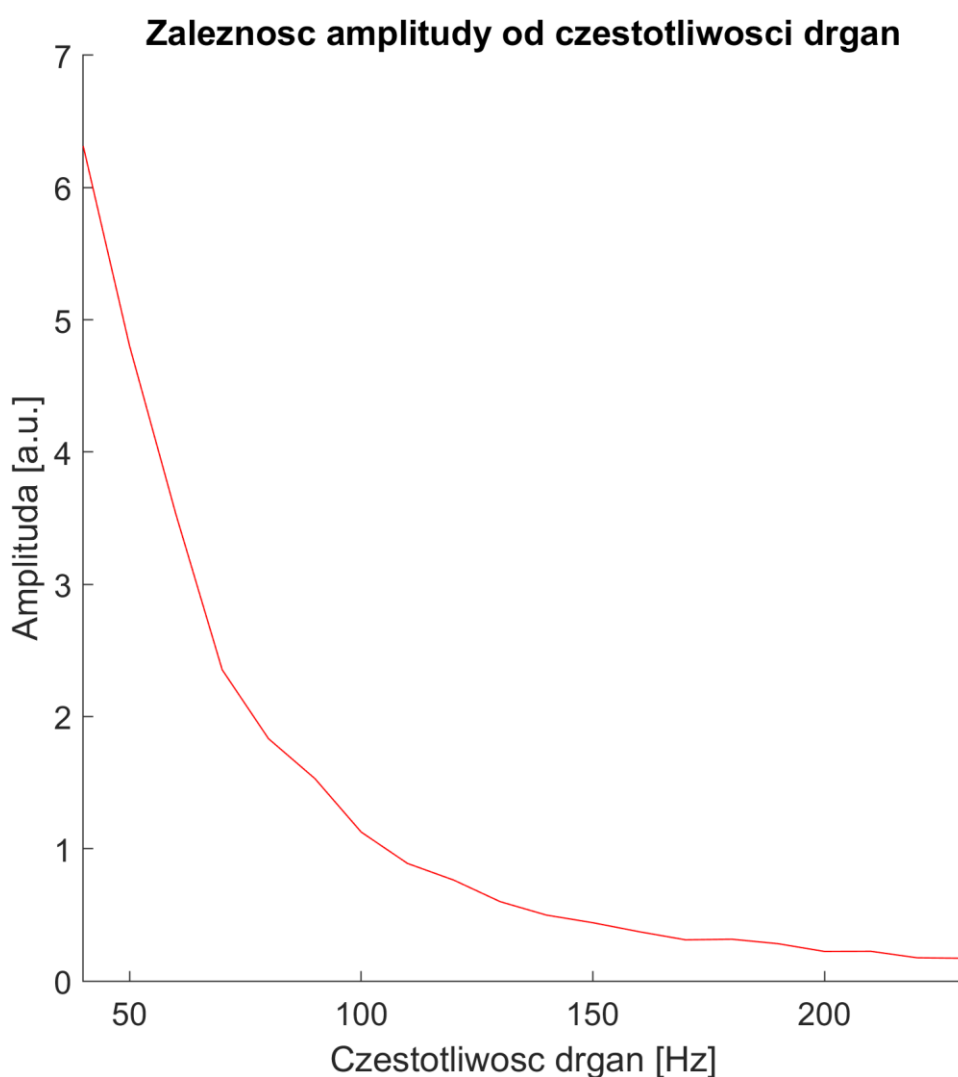
Jak widać na powyższym wykresie, wraz ze wzrostem amplitudy narysowane proste oddalają się od siebie; błąd pomiędzy nimi zwiększa się stopniowo.

Przyczyny owego błędu mogą być różne, zaczynając od faktu, że gdy zadawana amplituda drgań płytki zwiększała się, sam wzбудnik zaczynał drgać na stanowisku pomiarowym. Ponadto równanie (5.6) jest prawdziwe dla sygnału monoharmonicznego (sinusa o jednej częstotliwości). Drgania wzбудnika mogły prowadzić do powstania dodatkowych komponentów częstotliwościowych i dlatego takie przybliżenie może być błędne.

Generalnie jednak, mimo, że wyniki nie w pełni się pokrywają, można stwierdzić, że badania pomiaru maksymalnej prędkości drgań, w tym przypadku zakończone zostały sukcesem.

5.3.2. Zwiększana częstotliwość, stała amplituda

Zaimplementowano tu ten sam skrypt co w poprzednim podpunkcie, tym razem dla „Danych 5”. Wynikiem przetwarzania sygnałów jest znajdujący się na rysunku 5.11. wykres zależności amplitudy zdemodulowanego sygnału od kolejnych wierszy „Danych 5”

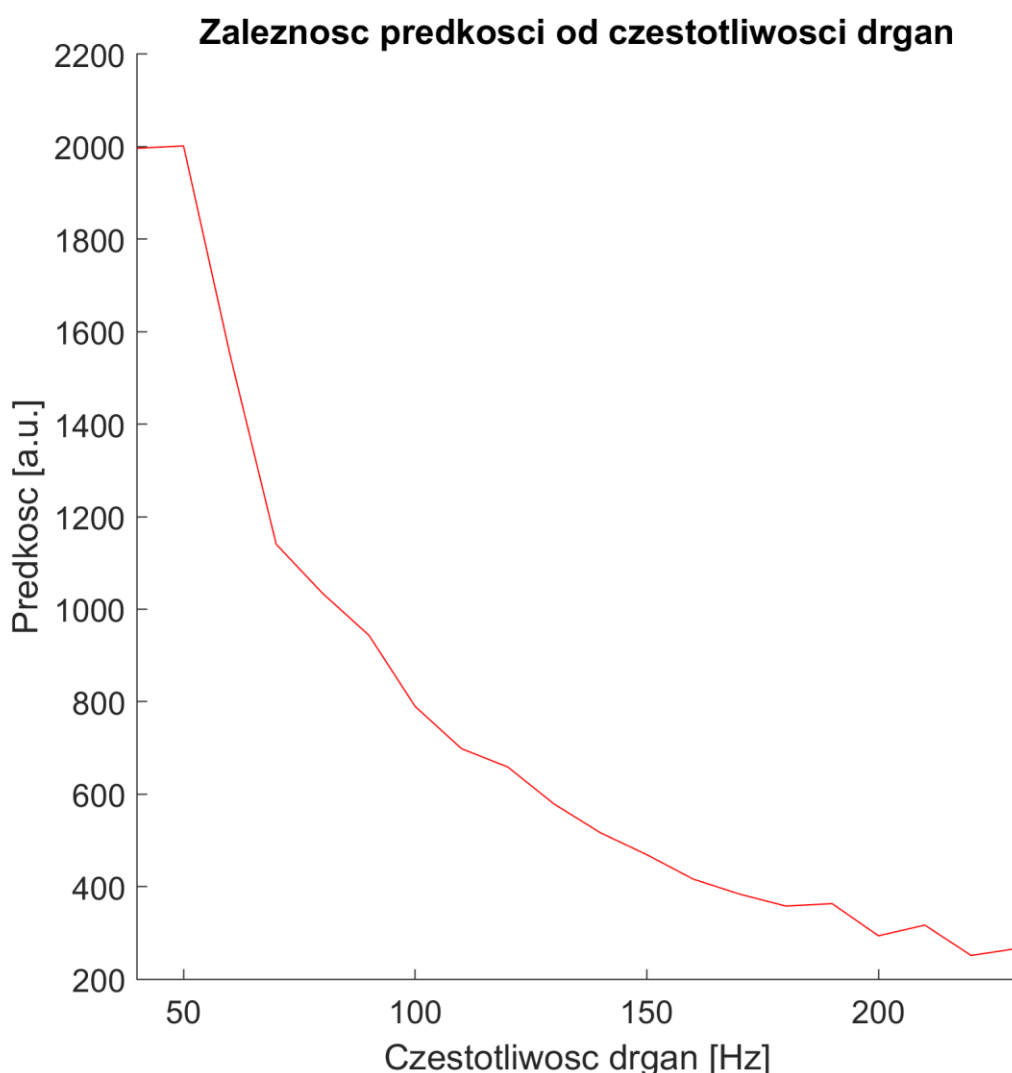


Rys. 5.11. Zależność prędkości drgań płyty od częstotliwości jej drgań

W tym przypadku zadana amplituda jest stała, natomiast wynikowa mocno maleje. Nie powinna ona w tak znacznym stopniu zmniejszać się wraz z relatywnie małym wzrostem częstotliwości.

Wynik jest nieoczekiwany i wskazuje najprawdopodobniej na niewłaściwie pracujący wzбудnik. Istnieje możliwość, że właściwa częstotliwość ma w nim wyższy priorytet niż odpowiednia amplituda, zatem np. gdy dostarczana jest mu za mała moc prądu, nie generuje on odpowiednio dużych wychyleń.

Wykres zależności prędkości od wierszy „Danych 5” przedstawia natomiast rysunek 5.12.



Rys. 5.12. Prędkość drgań płyty dla kolejnych zestawów danych

Wykres ten również przedstawia niewłaściwą relację prędkości drgań przy zwiększającej się częstotliwości. Powodem jest oczywiście błąd, który został już omówiony wcześniej w tym podpunkcie.

Niestety w opisywanym przypadku pomiar prędkości drgań płytki zakończył się niepowodzeniem. Aby umożliwić poprawę wyników konieczne jest zbadanie właściwości wzбудnika lub zastosowanie innego, poprawnie generującego zadane mu parametry.

6. Podsumowanie

Badanie przemieszczeń za pomocą impulsu i fali sinusoidalnej zakończone zostało sukcesem. Pierwsza z tych metod ma zastosowanie, gdy wymagany jest większy zakres pomiarowy, natomiast druga – dla lepszej precyzji.

Można zaryzykować tezę, że najlepszym rozwiązaniem byłoby połączenie obu metod. Jeśli przy pomocy impulsu udałoby się zawęzić badany przedział do połowy długości fali i wtedy by skorzystano z metody opartej na przesunięciu faz, wówczas zarówno zakres pomiarowy jak i precyzja mogłyby być w pełni wykorzystane. Zagadnienie to może być kontynuowane jako temat dalszych prac.

W przypadku badania maksymalnej prędkości drgań, udało się wykreślić zależność tej wielkości od zwiększającej się amplitudy. Na skutek czynników zewnętrznych, nie pokrywa się ona idealnie z teoretyczną, jednak jest ona zadowalająca. Ze względu na napotkane trudności z zamianą elektrycznych jednostek na metryczne, zbadana prędkość wyrażona została w jednostkach arbitralnych. Odpowiednie skalibrowanie tej wielkości można uzyskać mierząc amplitudy drgań np. laserowo. Problem ten można rozwiązać w tematach dalszych prac.

Niestety, ze względu na niewłaściwie dobrany do badań wzбудnik, nie było możliwe zbadanie zależności maksymalnej prędkości drgań dla zwiększającej się częstotliwości. W przypadku dostępności wzбудnika lepiej przetwarzającego zadane mu parametry, zagadnienie to można kontynuować w dalszych pracach.

7. Bibliografia

- [1] Legutko S.: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. Warszawa, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna 2004
- [2] Czujniki w diagnostyce drganiowej maszyn. Dostępny: <https://www.utrzymanieruchu.pl/czujniki-w-diagnostyce-drganiowej-maszyn/> (odwiedzona 17.01.2022).
- [3] Śliwiński A.: *Ultradźwięki i ich zastosowania*. Warszawa, Wydawnictwa Naukowo Techniczne 2001
- [4] Szabo T.: *Diagnostic Ultrasound Imaging: Inside Out*. Boston, Elsevier Inc. 2004
- [5] Halliday D., Resnick R., Walker J.: *Podstawy Fizyki II*. Warszawa, Wydawnictwo Naukowe PWN 2006
- [6] Benenson W., Harris J. Stocker H., Lutz H.: *Handbook of Physics*. Nowy Jork, Springer 2002
- [7] Thomas T., Chandra Sekhar S.: *Analog Communication*. New Delhi, Tata McGraw-Hill Publishing Company Limited 2007
- [8] Madhow U.: *Introduction to Communication Systems*. Cambridge, Cambridge University Press 2014
- [9] Agbo S., Sadiku O.: *Principles of Modern Communication Systems*. Cambridge, Cambridge University Press 2017
- [10] AM Technologies, Generator funkcyjny 33500B. Dostępny: <https://www.amt.pl/pl/prt/33500b> (odwiedzona 08.01.2022).
- [11] The Ultrason Group, transducer catalog. Dostępny: <http://ultrasongroup.com/wp-content/uploads/transducer-catalog.pdf> (odwiedzona 08.01.2022).
- [12] MicroAcoustic Instruments Inc., BAT-1: Dostępny: https://microacoustic.com/BAT_species_BAT-1.htm (odwiedzona 08.01.2022).

- [13] Thorlabs, 300 mm Linear Translation Stage with Integrated Controller. Dostępny: https://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=7652&pn=LTSP3 (odwiedzona 08.01.2022).
- [14] The Modal Shop, SmartShaker™ with Integrated Power Amplifier. Dostępny: <https://www.modalshop.com/excitation/SmartShaker-with-Integrated-Power-Amplifier?ID=272> (odwiedzona 08.01.2022).
- [15] Spectrum Instrumentation MATLAB Driver, Dostępny: https://spectrum-instrumentation.com/sites/default/files/download/spcm_matlab_manual_english.pdf (odwiedzona 08.01.2022).
- [16] MathWorks, Math Exchange. Dostępny: <https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/58999-intefd> (odwiedzona 11.01.2022).

8. Załączniki

- Praca_Inz_Zajac_Michal.docx – tekst pracy w formacie docx,
- Praca_Inz_Zajac_Michal.pdf – tekst pracy w formacie pdf,
- Dane_1.mat, Dane_2.mat, Dane_3.mat, Dane_4.mat, Dane_5.mat – dane zebrane na stanowiskach laboratoryjnych,
- pomiar_odleglosci.m, pomiar_sygnalu.m, pomiar_sygnalu_drgania.m – skrypty wykorzystane do wygenerowania danych,
- przetwarzanie_danych_impuls.m, przetwarzanie_danych_sinus.m, przetwarzanie_predkosc_drgan.m – skrypty wykorzystane do przetworzenia danych.