



**A G H**

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

KATEDRA Robotyki i Mechatroniki

## Praca dyplomowa

*Zastosowanie przetworników wykonanych z piezokompozytowych mikro-włókien do wzbudzania i detekcji fal prowadzonych w strukturach cienkościennych*

*Excitation and detection of guided waves using microfiber piezocomposite (MFC) transducers*

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

Kraków, 2023

# Spis treści

<b>1.</b>	<b>Wstęp .....</b>	<b>4</b>
<b>2.</b>	<b>Cel i zakres pracy .....</b>	<b>7</b>
<b>2.1.</b>	<b>Zakres pracy .....</b>	<b>7</b>
<b>3.</b>	<b>Teoria.....</b>	<b>8</b>
<b>3.1.</b>	<b>Akustyczne fale powierzchniowe .....</b>	<b>8</b>
<b>3.1.1.</b>	<b>Fale Lamba.....</b>	<b>8</b>
<b>3.2.</b>	<b>Przetwornik międzypalczasty .....</b>	<b>10</b>
<b>3.3.</b>	<b>Charakterystyka kierunkowa .....</b>	<b>10</b>
<b>4.</b>	<b>Stanowisko pomiarowe .....</b>	<b>11</b>
<b>4.1.</b>	<b>Opis przetworników.....</b>	<b>11</b>
<b>4.2.</b>	<b>Opis stanowisk .....</b>	<b>12</b>
<b>4.3.</b>	<b>Przetwarzanie danych – opisy algorytmów .....</b>	<b>15</b>
<b>4.3.1</b>	<b>Skrypt ch_kierunkowe.m.....</b>	<b>15</b>
<b>4.3.2.</b>	<b>Skrypt ch_kierunkowe_polkole.m .....</b>	<b>17</b>
<b>4.3.3.</b>	<b>Skrypt dyspersja.m .....</b>	<b>17</b>
<b>5.</b>	<b>Wyniki .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1.</b>	<b>Eksperymenty 1,2 – płyta aluminiowa .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1.1.</b>	<b>Przetwornik M-2814-P2 .....</b>	<b>18</b>
<b>5.1.2.</b>	<b>Przetwornik M-2807-P2 .....</b>	<b>21</b>
<b>5.1.3.</b>	<b>Przetwornik M-0714-P2 .....</b>	<b>24</b>
<b>5.2.</b>	<b>Eksperymenty 3,4 – płyta kompozytowa .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2.1.</b>	<b>Przetwornik M-2814-P2 .....</b>	<b>27</b>
<b>5.2.2.</b>	<b>Przetwornik M-2807-P2 .....</b>	<b>33</b>
<b>5.2.3.</b>	<b>Przetwornik M-0714-P2 .....</b>	<b>36</b>

<b>5.2.4. Przetwornik piezoelektryczny .....</b>	39
<b>5.3. Eksperyment 5 .....</b>	42
<b>6. Wnioski .....</b>	46
<b>6.1. Eksperymenty 1-2.....</b>	46
<b>6.2. Eksperymenty 3-4.....</b>	47
<b>6.3. Eksperyment 5 .....</b>	49
<b>7. Podsumowanie .....</b>	53
<b>8. Bibliografia.....</b>	54
<b>9. Załączniki .....</b>	55

## **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[1].

Monitorowanie stanu konstrukcji to dziedzina nauki specjalizującej się w lokalizacji, identyfikacji, detekcji oraz prognozy rozwoju uszkodzeń, które w czasie teraźniejszym lub przyszłym mogą skutkować niewłaściwym funkcjonowaniem obiektu[2].

Znajdują tu zastosowanie układy zbudowane z członów wykonawczych, czujników, jednostek obliczeniowych zintegrowanych z analizowanym obiektem oraz układy transmisji danych. Zazwyczaj systemy monitorowania stanu konstrukcji mają na celu obecną identyfikację defektów konstrukcji i najczęściej spotyka się je w przemyśle lotniczym, satelitach oraz obiektach inżynierii lądowej, czyli urządzeniach, których niewłaściwe funkcjonowanie grozi katastrofą. Układy takie oparte są na metodach nieniszczącego wykrywania uszkodzeń, które są stosowane przy inspekcjach okresowych w miejscach największego ryzyka grożącego awarią[2].

Uszkodzenie definiuje się tu jako zmianę własności geometrycznych lub materiałowych obiektu, które mogą spowodować zakłócenie poprawnego funkcjonowania układu. Zmiany te powinny być wykrywane tak szybko, jak jest to możliwe. Standardowo oceniany jest tu stan konstrukcji dzięki odpowiednim pomiarom i analizie procesów technologicznych lub resztkowych, zachodzących podczas ich działania, takich jak temperatura czy drgania. Rodzaj stosowanego układu zależy od używanych materiałów, prognozowanego rodzaju potencjalnych uszkodzeń i zjawisk wykorzystywanych w metodzie detekcji. Z przyczyn finansowych systemy monitorowania ograniczane są zazwyczaj do sieci punktów pomiarowych. Przy stosunkowo niewielkich pęknieniach wymagana jest dokładna analiza lokalnego zachowania obiektu z zastosowaniem narzędzi symulacyjnych oraz analitycznych, wykorzystywanych do interpretacji zjawisk zachodzących w obiekcie. Są one

prototypowane, a ich struktura jest optymalizowana dzięki odpowiednim narzędziom programowym[2].

Obecnie monitorowanie stanu konstrukcji zdobywa przewagę nad badaniami nieniszczącymi. Jest to spowodowane większą niezawodnością, działaniu w czasie rzeczywistym i wczesnym ostrzeganie o narastaniu defektów i uszkodzeń strukturalnych. W rezultacie istnieje możliwość instalacji prefabrykowanych czujników. Przewidywany jest rozwój tej dziedziny, wiązany z poszerzaniem zastosowań fal kierowanych i innowacjami w ich oprogramowaniu[3].

Ultradźwiękowe fale kierowane posiadają przewagę nad bardziej standardowymi masowymi falami. Umożliwiają one wykonanie setek trybów testowych, podczas gdy w przypadku fal masowych możliwe są tylko dwa tryby inspekcji, podłużny i ścinający. Innowacja w zakresie fal kierowanych jest niesamowita pod względem zastosowania, czułości i siły penetracji. Dlatego też można zaobserwować trend zastępowania fal masowych falami kierowanymi. Wpływ na to mają stosunkowo niższe koszty, krótszy czas inspekcji i większy zasięg oraz możliwość rozwiązywania zagadnień, których wcześniej nie dało się rozwiązać, lub było to nieopłacalne[3].

Można zatem stwierdzić, że zagadnienie fal prowadzonych nabiera na znaczeniu i jest w nim spory potencjał rozwoju.

Na rynku istnieje wiele typów takich przetworników, różniących się pomiędzy sobą sposobem jednego rodzaju energii w inną. Ponadto, po określaniu rodzaju urządzenia, pozostaje dobór jego indywidualnych parametrów, takich jak częstotliwość rezonansowa, geometria, czy charakterystyka kierunkowa.

Aby wybrać odpowiedni czujnik w monitorowaniu stanu konstrukcji konieczna jest znajomość tych czynników. Konieczne jest zatem zebranie o nich jak największej liczby jakościowych informacji.

W niniejszej pracy scharakteryzowano zatem zastosowanie przetworników przeznaczonych do wzbudzania i detekcji fal prowadzonych w strukturach cienkościennych, co niewątpliwie przyczyni się do dalszego rozwoju tego zjawiska i poszerzeniu wiedzy o nim. Skupiono się w niej również na opracowaniu narzędzi do generowania charakterystyk takich przetworników, czego celem jest umożliwienie ich parametryzacji, skutkujące umozliwieniem lepszego ich doboru do określonego zadania.

Następnie opracowano narzędzie umożliwiające wykreślenie krzywych dyspersji w zadanym ośrodku. Na ich podstawie możliwe jest określenie prędkości modów, z jakimi rozchodzi się fala. Porównując otrzymane krzywe możliwe jest zdeterminowanie, czy prędkość nadawanej fali zależna jest od kierunku, co jest istotnym parametrem analizowanego materiału.

## **2. Cel i zakres pracy**

Celem pracy było scharakteryzowanie przetworników wykonanych z piezokompozytowych mikro-włókien przeznaczonych do wzbudzania i detekcji fal prowadzonych w strukturach cienkościennych oraz przedstawienie ich potencjalnego zastosowania w monitorowaniu stanu konstrukcji. Skupiono się również na opracowaniu narzędzi do opracowania parametrów tych przetworników; głównie charakterystyk kierunkowych. Dodatkowo przeprowadzono badanie umożliwiające analizę prędkości rozchodzenia się fali w zależności od jej częstotliwości i kierunku, w jakim się ona rozchodzi.

### **2.1. Zakres pracy**

Na zakres niniejszej pracy magisterskiej składa się 7 rozdziałów.

W pierwszym rozdziale przedstawiono wstęp i motywację do podjęcia rozważanego tutaj tematu.

W trzecim rozdziale ujęto wstęp teoretyczny, którego znajomość jest konieczna do odpowiedniego zrozumienia treści niniejszej pracy.

Rozdział czwarty obejmuje opis stanowiska pomiarowego, przeprowadzanych badań i zastosowanych algorytmów.

Piąty rozdział zawiera otrzymane wyniki.

W szóstym rozdziale odpowiednio opracowano wyniki i wyciągnięto na ich podstawie wnioski.

Ostatni, siódmy rozdział to podsumowanie pracy.

### **3. Teoria**

W tym rozdziale przedstawiono zakres teorii koniecznej do zrozumienia istoty niniejszej pracy.

#### **3.1. Akustyczne fale powierzchniowe**

Akustyczna fala powierzchniowa to rodzaj fali mechanicznej, która propaguje wzdłuż powierzchni podłożu sprężystego graniczącego z innym ciałem sprężystym (lub próżnią) i zanika, zazwyczaj wykładniczo, w głąb tego podłożu[2].

Wiele metod badania stanu konstrukcji opiera się na analizie rozchodzenia się fal powierzchniowych. Wprowadzenie na rynek przetwornika międzypałczastego umożliwiło łatwą generację i detekcję takich fal na powierzchni kryształów piezoelektrycznych, co poszerzyło ich aplikację w przemyśle technicznym. Najczęściej stosowanymi akustycznymi falami powierzchniowymi są fale Lamba oraz Rayleigha [2].

##### **3.1.1. Fale Lamba**

Sterowana fala Lamba jest uznawana za jedno z najbardziej zachęcających narzędzi do ilościowej identyfikacji uszkodzeń w strukturach kompozytowych[4].

W niniejszej pracy wzbudzane są fale na powierzchniach cienkich płyt, są to zatem fale Lamba. Zrozumienie ich zagadnienia jest zatem niezbędne do odpowiedniej interpretacji badań.

Istotną ich właściwością jest możliwość przemieszczać się na duże odległości, nawet w materiałach o wysokim współczynniku tłumienia, takich jak kompozyty wzmacnione włóknem węglowym[4]. Zatem ich analiza nie tylko w materiale aluminiowym, ale też kompozycie będzie zasadna. Oba rodzaje materiałów zostaną przeanalizowane w tym kontekście w ramach niniejszej pracy.

Fale Lamba, to fale dyspersywne, czyli takie, których prędkości (fazowa i grupowa) zależą od prędkości. Składają się one z superpozycji modów ścinających i podłużnych, a ich charakterystyka propagacji zmienia się w zależności od kąta wejścia, wzbudzenia i

geometrii strukturalnej. W anizotropowych strukturach kompozytowych ich prędkość zależy od kierunku[4].

Do wzbudzenia i odbioru tych fal można zastosować urządzenia, które można podzielić na pięć głównych kategorii:

- i) Sonda ultradźwiękowa,
- ii) Laser,
- iii) Element piezoelektryczny,
- iv) Przetwornik międzypalcowy,
- v) Światłowód[4].

W niniejszej pracy zastosowano narzędzia (iii) oraz (iv) do nadawania, a narzędzie (ii) do odbioru.

Charakteryzując krótko użyte metody, warto zaznaczyć, że najbardziej precyzyjne urządzenie to laser, który jest jednocześnie bezkontaktowy. Można go również stosować do sygnałów zarówno wąsko- jak i szerokopasmowych. Jego wadą jest oczywiście wysoka cena[4].

Elementy piezoelektryczne zapewniają dobrą wydajność i są odpowiednie jako przetworniki kontaktowe, ze względu na pomijalną masę i objętość, łatwą integrację, szerokie pasmo przenoszenia, dobrą wytrzymałość mechaniczną, niską impedancję akustyczną, niewielki pobór mocy, a także relatywnie niski koszt. Niestety fale przez nie generowane zawierają wiele modów, co wiąże się z koniecznością zaawansowanego przetwarzania sygnałów. Ponadto elementy piezoelektryczne zwykle wykazują nieliniowe zachowania i histerezę przy dużych odkształceniach (napięciach) lub w wysokiej temperaturze. Mała siła napędowa, małe przemieszczenie, kruchosć, mała trwałość zmęczeniowa mogą być innymi problemami ograniczającymi ich zastosowanie[4].

Przetworniki międzypalczaste są coraz częściej wprowadzane, aby dostosować się do bardziej wszechstronnych zastosowań przy niższych kosztach. W porównaniu z elementami piezoelektrycznymi, przetworniki takie charakteryzują się lepszą elastycznością czasie i łatwiejszą obsługą. Są one w stanie wytworzyć fale Lamba o kontrolowanej długości fali poprzez regulację odległości między elektrodami międzypalcowymi. Dzięki mniejszej twardości i większej elastyczności, mogą być one

różnie kształtowane, co jest kluczowe w przypadku zakrzywionych powierzchni. Ich największą wadą jest niewielka siła napędowa[4].

### **3.2. Przetwornik międzypalczasty**

Przetwornik międzypalczasty, stosowany do generowania kierowanej fali Lamba ma przewagę nad przetwornikami jednoelementowymi w wyborze trybu takiej fali dla danego materiału. Są one tworzone przez arkusz lub cienką płytę materiału piezoelektrycznego wyposażonego w elektrody na przeciwnieństwowych powierzchniach. Przynajmniej jedna strona musi zawierać dwa zestawy przeplatanych elektrod grzebieniowych z oddzielnymi połączeniami, podczas gdy druga może przedstawiać inny układ elektrod lub płaszczyznę uziemienia[5].

Przetwornik ma jedną stronę sprzężoną z ośrodkiem przewodzącym fale ultradźwiękowe. Urządzenia te są wykonane z folii piezopolimerowej, zazwyczaj PVDF[5].

### **3.3. Charakterystyka kierunkowa**

Kierunkowość to właściwość używana do opisania nierównomiernego rozkładu natężenia kątowego dla nadajnika i nierównej czułości kątowej dla odbiornika. Charakterystyka kierunkowa jest używana do opisywania właściwości wąskopasmowych nadajników i odbiorników. Można z niej odczytać obszary, w które przetwornik emitemuje lub z których odbiera sygnał najsilniej i najsłabiej[6].

Sygnał w kierunkach o niskiej czułości ma największą podatność na zanieczyszczenie przez różnego rodzaju zakłócenia[6].

Wykresy kierunkowości służą do graficznego przedstawienia właściwości kierunkowych przetwornika. Są one najczęściej przedstawiane na wykresie biegunowym i tak też będą przedstawiane w niniejszej pracy.

## **4. Stanowisko pomiarowe**

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

### **4.1. Opis przetworników**

W pracy wykorzystano przetworniki MFC (ang. Macro Fiber Composite) oraz przetwornik piezoelektryczny.

MFC został wynaleziony i jest rozwijany od 1996 roku przez NASA. Jest to czujnik oferujący wysoką wydajność, elastyczność i trwałość. Jego komercjalizacją zajmuje się firma Smart Material[7].

Składa się on z prostokątnych prętów piezo-ceramicznych umieszczonych pomiędzy warstwami kleju, elektrodami i folią poliimidową. Elektrody są przyjmocowane do folii w ułożony naprzemiennie wzór, który przenosi przyłożone napięcie bezpośrednio do prętów w kształcie taśmy. Ten zespół umożliwia biegunowanie, uruchamianie i wykrywanie w płaszczyźnie w szczelnym i trwałym, gotowym do użycia opakowaniu. Jako cienka, dopasowująca się do powierzchni blacha może być nakładana na różnego rodzaju konstrukcje lub osadzona w konstrukcji kompozytowej. Przyłożenie napięcia spowoduje wygięcie lub zwiększeniekształcenie materiałów, przeciwdziałanie lub generowanie wibracji. Pozwala on m. in. na precyzyjne monitorowanie stanu konstrukcji, czy generowanie fal Lambda w materiale, do którego został przytwierdzony[7].

Poniżej przedstawiono fotografie przetworników wykorzystanych w stanowiskach laboratoryjnych.



Rys. 4.1. Przetwornik M-2814-P2



Rys. 4.2. Przetwornik M-2807-P2



Rys. 4.3. Przetwornik M-0714-P2



Rys. 4.4. Przetwornik piezoelektryczny przyklejony do płyty kompozytowej

## 4.2. Opis stanowisk

Przygotowano w sumie pięć różnych konfiguracji. Generowano w nich sygnał wymuszający, który nadawany był przez kolejne nadajniki przyklejone do płyty. Zastosowano w tym celu przetworniki opisane w punkcie 4.1. Drgania płyty natomiast odbierano przy pomocy lasera. Sygnał w czterech pierwszych przypadkach mierzony był na płycie w siatce, będącej półokręgiem, o środku w miejscu przytwierdzenia przetwornika i wyborze punktów powyżej jego osi poziomej, lub był do takiej sprowadzany przy wyborze punktów pomiarowych. W ostatnim przypadku pomiaru dokonano wzduż pięciu linii, również o środku w miejscu przytwierdzenia przetwornika, rozchodzących się wzduż linii o kątach  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  oraz  $180^\circ$  względem osi

poziomej, przechodzącej przez środek nadajnika. Aby wiązka pomiarowa lasera była w stanie dokładnie zmierzyć drgania kolejnych płyt, naklejano na nie taśmy refleksyjne.

Różnice pomiędzy kolejnymi stanowiskami zawiera poniższa tabela.

Tab. 4.1. Stanowiska laboratoryjne

Nr stanowiska	Generator sygnału	Nadajnik	Materiał płyty	Odbiornik (punkty pomiarowe)
1)	Keysight + wzmacniacz	M-2814-P2/ M-2807-P2/ M-0714-P2/	aluminium	Laser (półokrąg)
2)	OPLabBox	M-2814-P2/ M-2807-P2/ M-0714-P2/	aluminium	Laser (półokrąg)
3)	Keysight + wzmacniacz	M-2814-P2/ M-2807-P2/ M-0714-P2/ Piezoelektryczny	kompozyt	Laser (półokrąg)
4)	OPLabBox	M-2814-P2/ M-2807-P2/ M-0714-P2/ Piezoelektryczny	kompozyt	Laser (półokrąg)
5)	Keysight + wzmacniacz	Piezoelektryczny	kompozyt	Laser (linie)

W przypadkach 1) i 3) wykonano cztery zestawy pomiarów, różniące się między sobą częstotliwością wymuszenia. Wynosiła ono kolejno 80kHz, 100kHz, 150kHz oraz 200kHz, a sygnał składał się z pięciu okresów sinusa o takich częstotliwościach i amplitudzie 6Vp-p. W przypadkach 2), 4) oraz 5) wymuszenie było szerokopasmowe.

Fotografie wybranych stanowisk przedstawiono poniżej.



Rys. 4.5. Stanowisko 1



Rys. 4.6. Stanowisko 4

## **4.3. Przetwarzanie danych – opisy algorytmów**

W tym podpunkcie opisane zostaną algorytmy zastosowane do przetwarzania wygenerowanych danych. Skrypty zostały zaimplementowane za pomocą programu MATLAB (v. R2020a). Opisywane skrypty jak i dane, na których operują, zostały uwzględnione w załącznikach niniejszej pracy.

### **4.3.1 Skrypt ch\_kierunkowe.m**

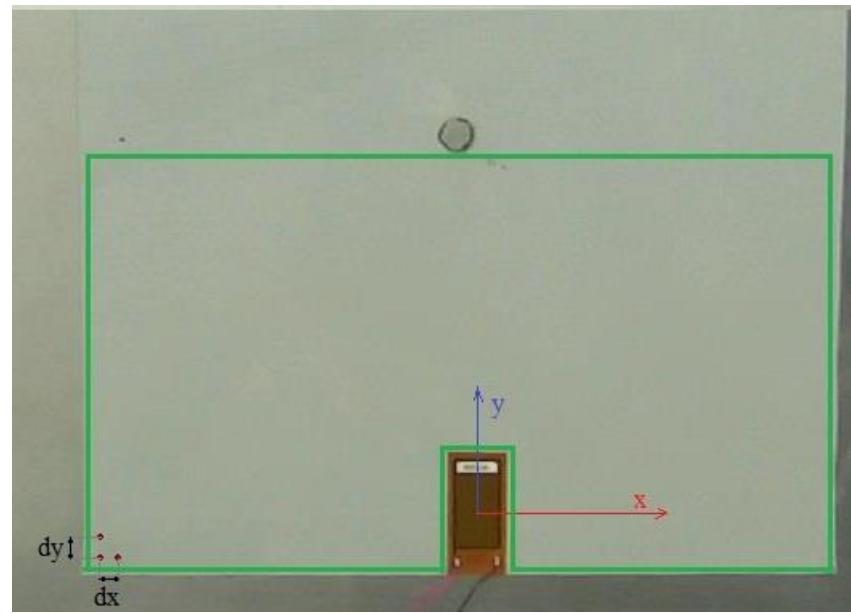
Przetwarzanie wyników za pomocą tego skryptu ma na celu wykreślenie charakterystyk kierunkowych kolejnych przetworników.

Po odpowiednim wczytaniu danych i określeniu niektórych parametrów, główna część programu zamknięta zostaje w pętli, wczytująccej kolejne zestawy wyników dla zdefiniowanego czujnika.

W każdej iteracji pętli wczytywane są wyniki dla innego wymuszenia; kolejno 80kHz, 100kHz, 150kHz, 200kHz i szerokopasmowego.

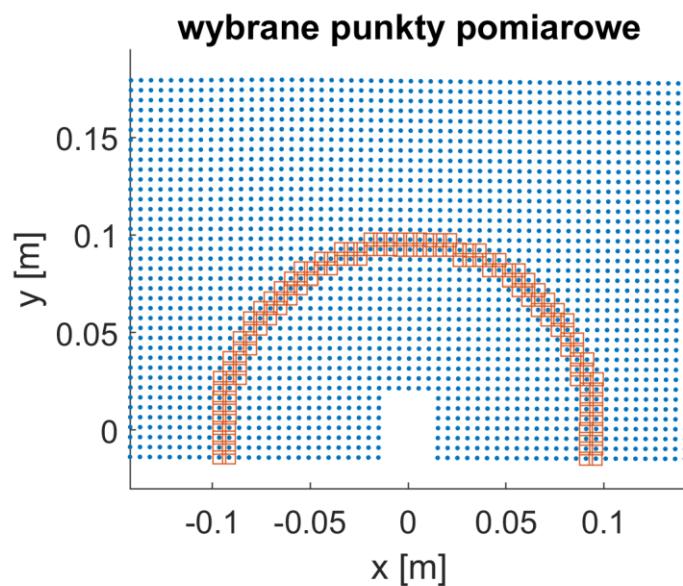
W pierwszym kroku pętli określana jest częstotliwość próbkowania sygnału, na podstawie zimportowanego wektora czasowego. Następnie dane dotyczące położenia punktów pomiarowych przeliczane są na swoje odpowiedniki we współrzędnych biegunkowych, których środek określany jest w środku nadajnika.

Punkty pomiarowe zostały zdefiniowane w prostokącie (kolor zielony na Rys. 4.7.), będącym fizycznie naklejoną na płytę taśmą refleksyjną. Jej oś pozioma to oś x (kolor czerwony na Rys. 4.7), a pionowa: y (kolor niebieski na Rys. 4.7), z początkiem układu współrzędnych w środku nadajnika. Próbkowano ją z określonymi krokami dx oraz dy, których przykład reprezentatywny również przedstawiono na rysunku 4.7., znajdującym się poniżej. Zdjęcie przedstawia wybrany przetwornik, którym jest międzypalcisty M-2814-P2. Układy współrzędne pozostałych dobrano analogicznie.



Rys. 4.7. Definicja układu współrzędnych i próbkowania dla przetwornika M-2814-P2

Jako, że w algorytmie konieczny był wybór punktów będących w stałej odległości od nadajnika, wybrano do obliczeń właśnie takie. Przykład takiej selekcji dla przypadku z poprzedniego rysunku przedstawia Rys. 4.8. Na niebiesko zaznaczono na nim wszystkie punkty pomiarowe, a na pomarańczowe – te uwzględnione w obliczeniach.



Rys. 4.8. Wybrane punkty pomiarowe dla przetwornika M-2814-P2

Następnie, po filtracji dolnoprzepustowej, odpowiednio dostosowanej do stosowanego wymuszenia, szukane są maksima obwiedni wybranych zestawów danych dla kolejnych kierunków. Determinują one szukany rozkład natężenia, w zależności od kąta w określonym wcześniej biegunowym układzie współrzędnych.

Po ich obliczeniu, posortowaniu i wygładzeniu wykresów za pomocą mediany, wykreślone są tak obliczone charakterystyki kierunkowe.

#### **4.3.2. Skrypt ch\_kierunkowe\_polkole.m**

Skrypt ten jest oparty na poprzednim (z podpunktu 4.3.1). Różnicą jest jedynie brak konieczności wyboru punktów tak, by znajdowały się w stałej odległości od przetwornika, ponieważ uwzględniono ten fakt na etapie pomiaru.

#### **4.3.3. Skrypt dyspersja.m**

W tym skrypcie, po wczytaniu danych pomiarowych, wybierany jest jeden z pięciu zestawów, czyli leżący na kierunku  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ ,  $135^\circ$  lub  $180^\circ$ . Następnie, po filtracji dolnoprzepustowej dopasowanej do pasma wymuszenia sygnału, obliczana jest dwuwymiarowa transformata Fouriera sygnału i przeliczana jest na skalę decybelową.

W kolejnym kroku determinowana jest rozdzielcość przestrzenna i częstotliwościowa, a dane są odpowiednio skalowane. Z tak wygenerowanych wykresów możliwe jest odczytanie krzywych dyspersji, oraz własności stosowanego nadajnika, takich jak jego rezonans.

## 5. Wyniki

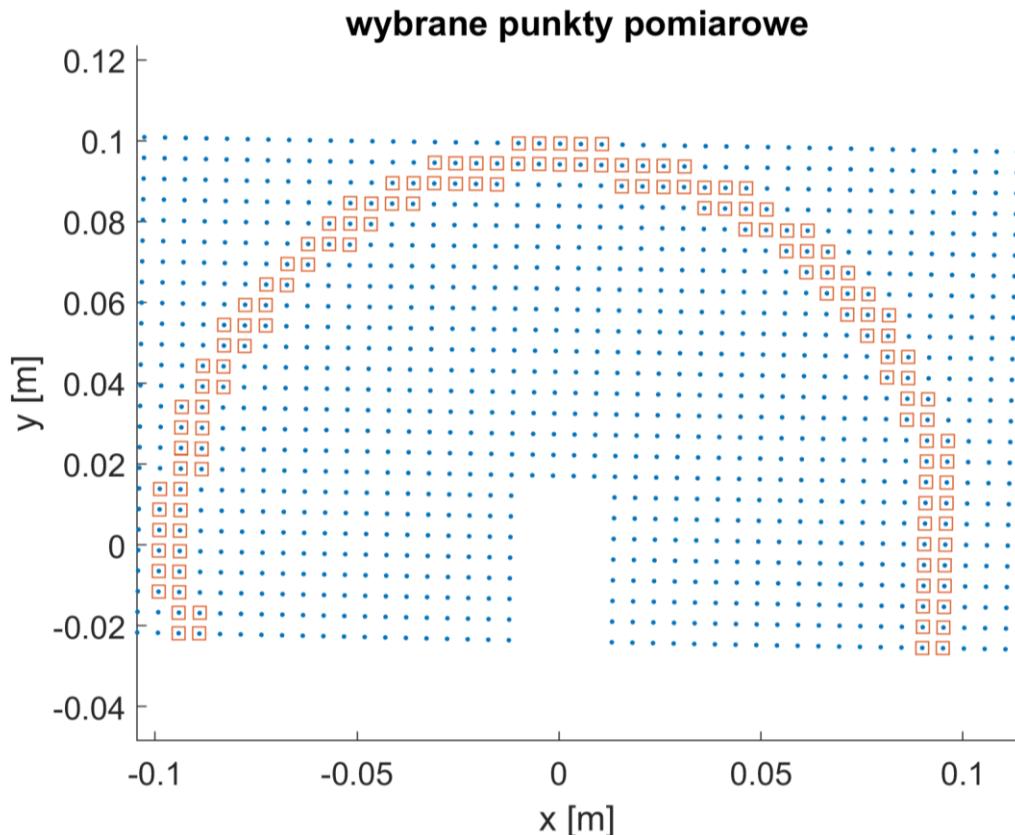
W pierwszym podpunkcie zostały zawarte wyniki pomiarów eksperymentów 1) i 2), w drugim: 3) oraz 4) a w trzecim dla eksperymentu 5).

### 5.1. Eksperymenty 1,2 – płyta aluminiowa

Jak już wspomniano, w tych eksperymentach badano drgania płyty aluminiowej w pewnej odległości od przetwornika. Został on zastosowany jako nadajnik zatem zgodnie z podpunktem 3.3, wynikowe charakterystyki kierunkowe określają jego kątowy rozkład natężenia.

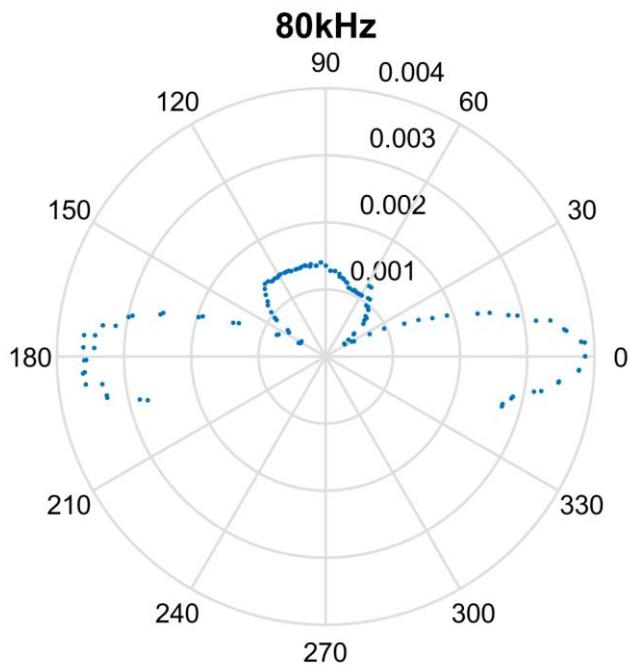
#### 5.1.1. Przetwornik M-2814-P2

Wybrane punkty pomiarowe zostały przedstawione na rysunku poniżej.

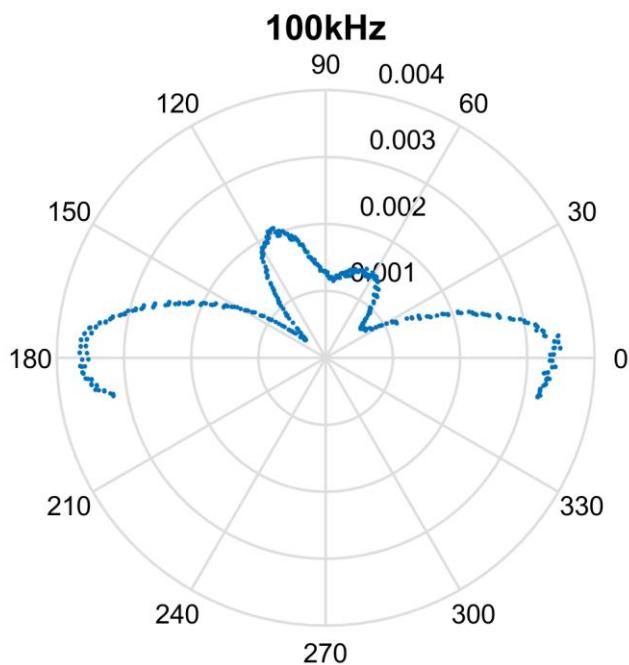


Rys. 5.1. Punkty pomiarowe dla przetwornika M-2814-P2

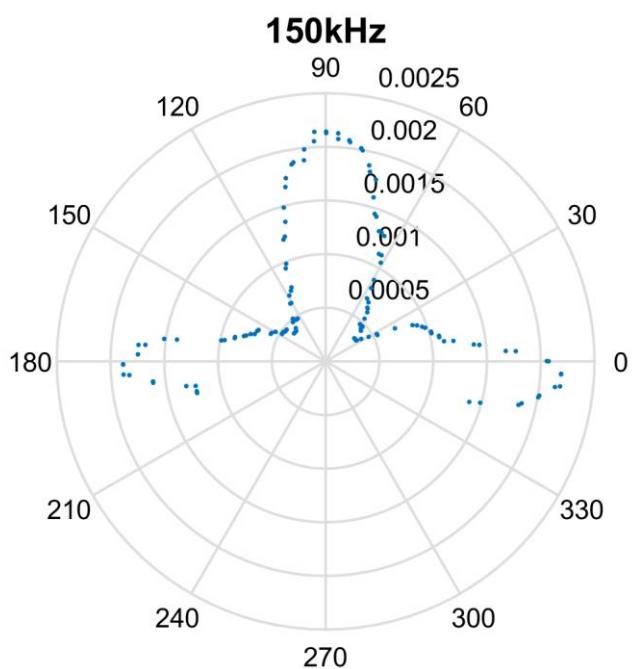
Wynikowe charakterystyki kierunkowe dla tego przetwornika dla sygnałów, gdzie tytuł wykresu odnosi się do częstotliwości pięciu okresów sinusa, który jest sygnałem wymuszającym.



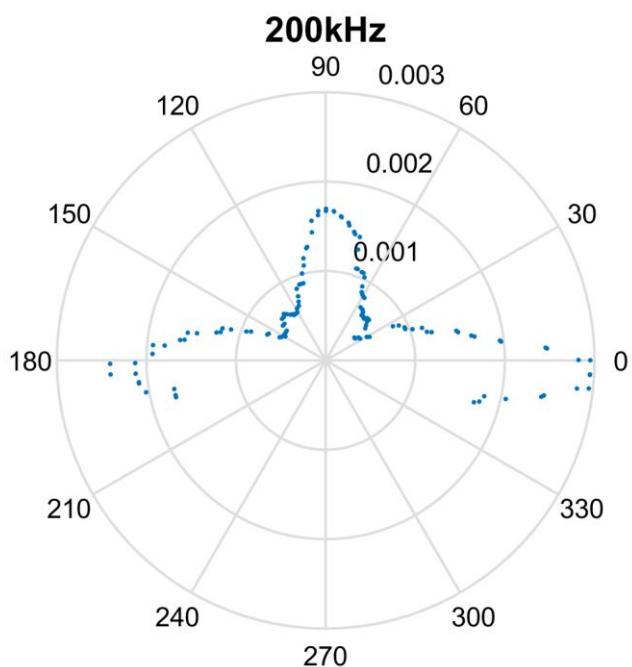
Rys. 5.2. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (80kHz)



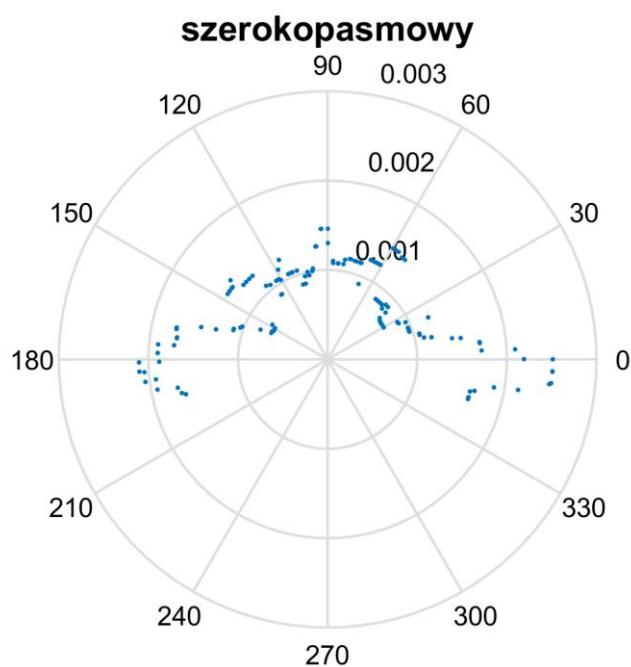
Rys. 5.3. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (100kHz)



Rys. 5.4. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (150kHz)



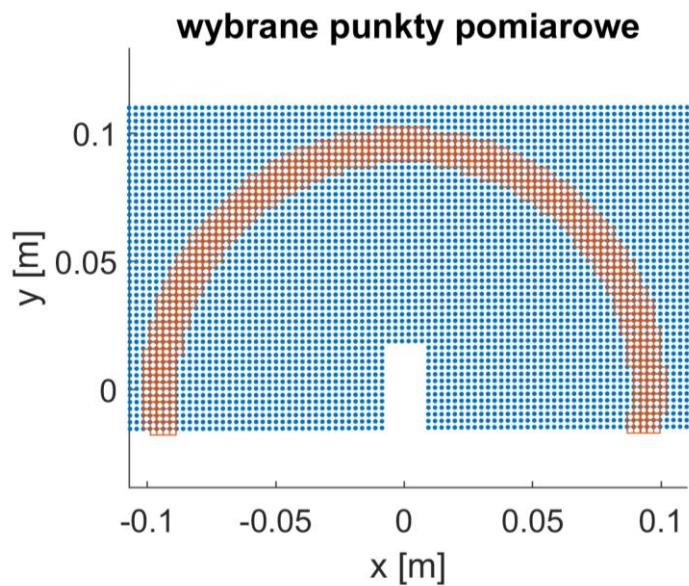
Rys. 5.5. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (200kHz)



Rys. 5.6. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (wymuszenie szerokopasmowe)

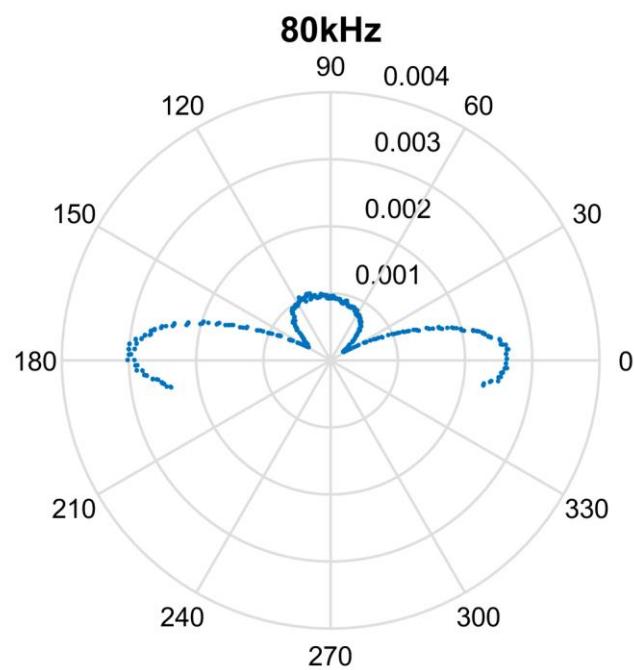
### 5.1.2. Przetwornik M-2807-P2

Wybrane punkty pomiarowe:

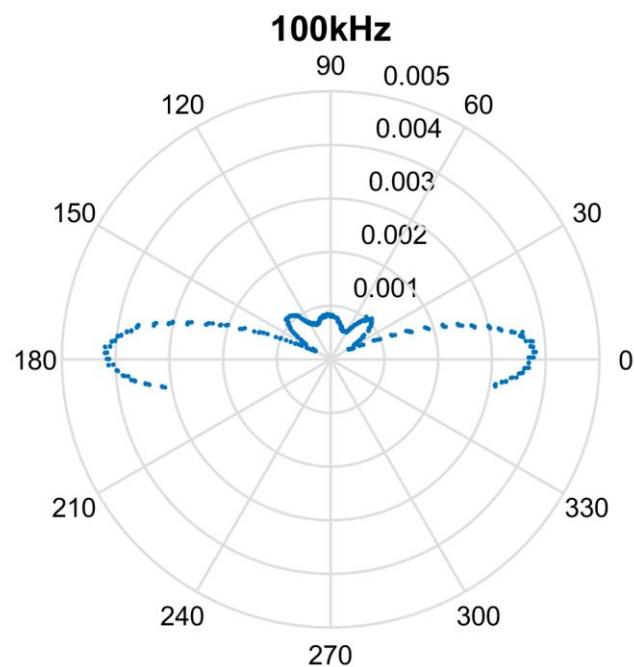


Rys. 5.7. Punkty pomiarowe dla przetwornika M-2807-P2

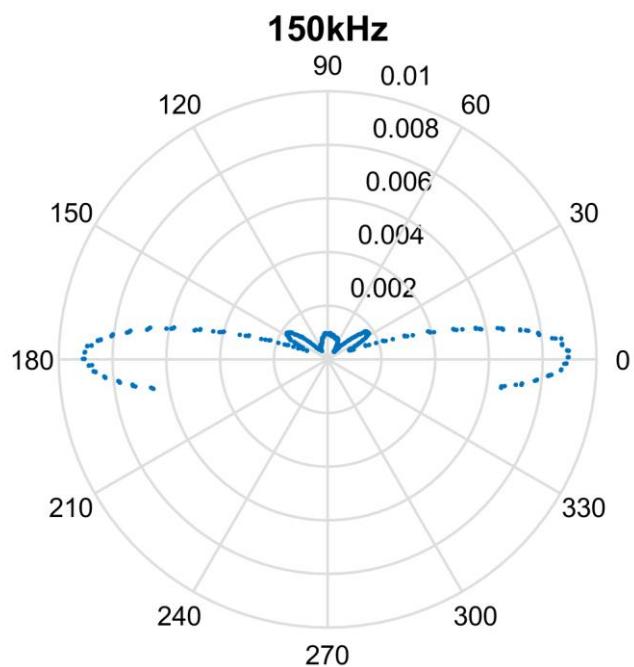
Wynikowe charakterystyki kierunkowe:



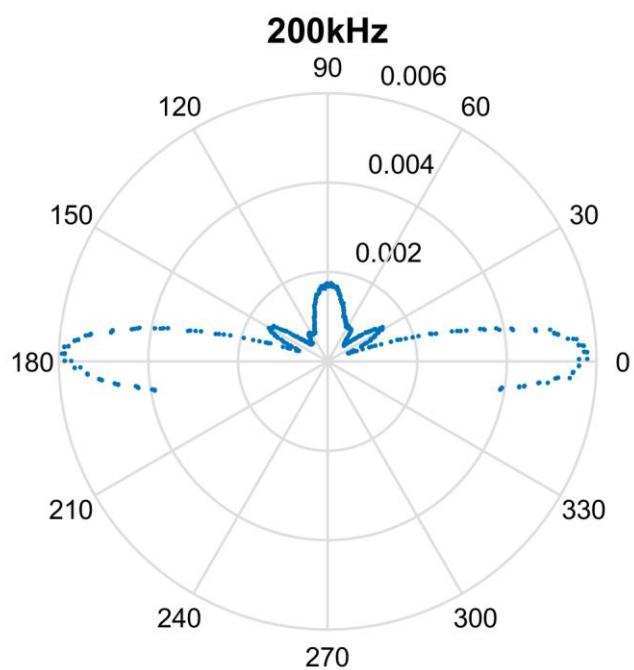
Rys. 5.8. Charakterystyka kierunkowa dla M-2807-P2 (80kHz)



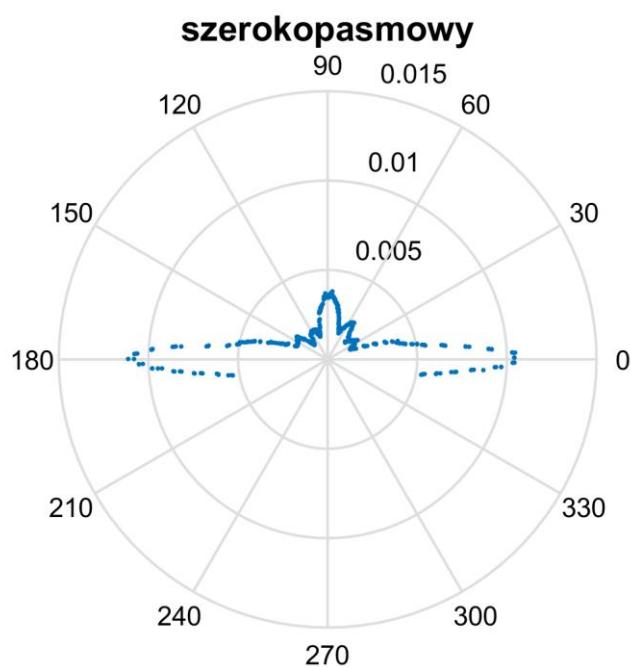
Rys. 5.9. Charakterystyka kierunkowa dla M-2807-P2 (100kHz)



Rys. 5.10. Charakterystyka kierunkowa dla M-2807-P2 (150kHz)



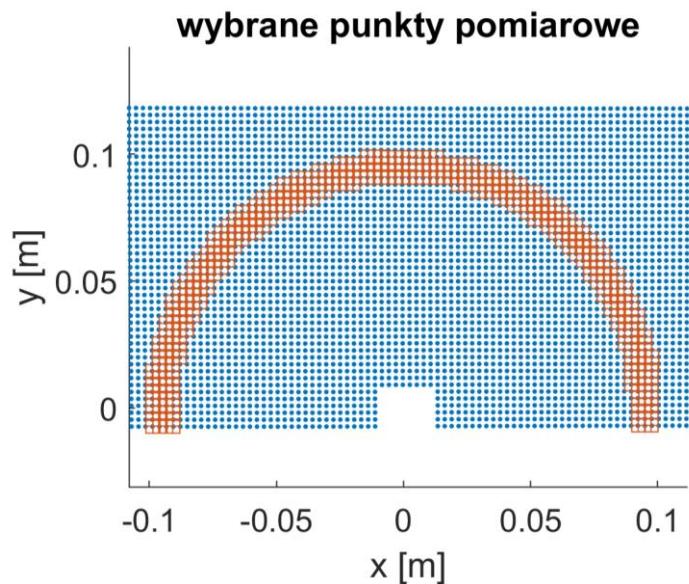
Rys. 5.11. Charakterystyka kierunkowa dla M-2807-P2 (200kHz)



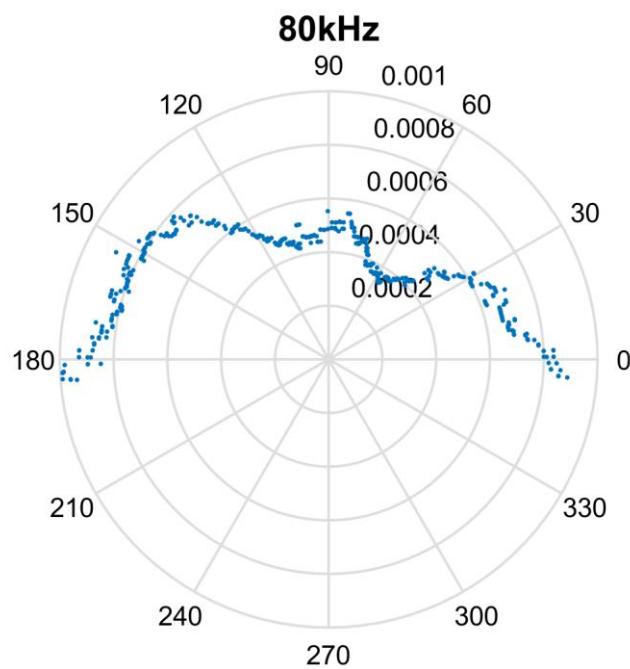
Rys. 5.14. Charakterystyka kierunkowa dla M-2807-P2 (wymuszenie szerokopasmowe)

### 5.1.3. Przetwornik M-0714-P2

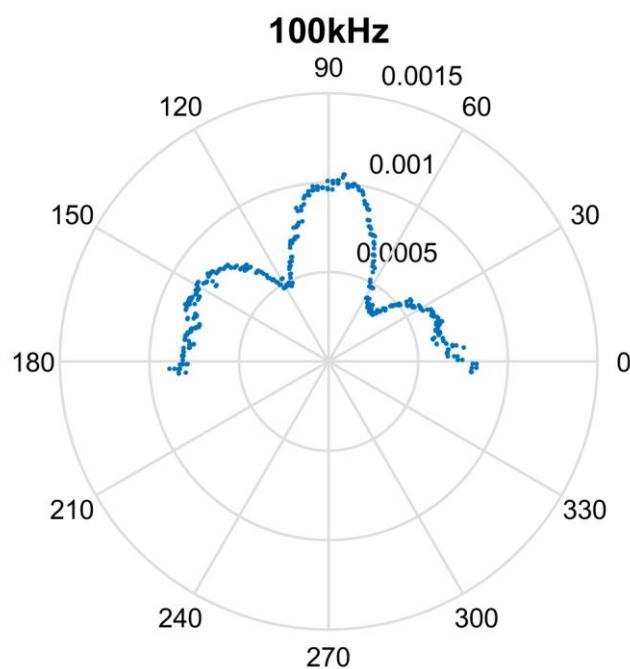
Wybrane punkty pomiarowe:



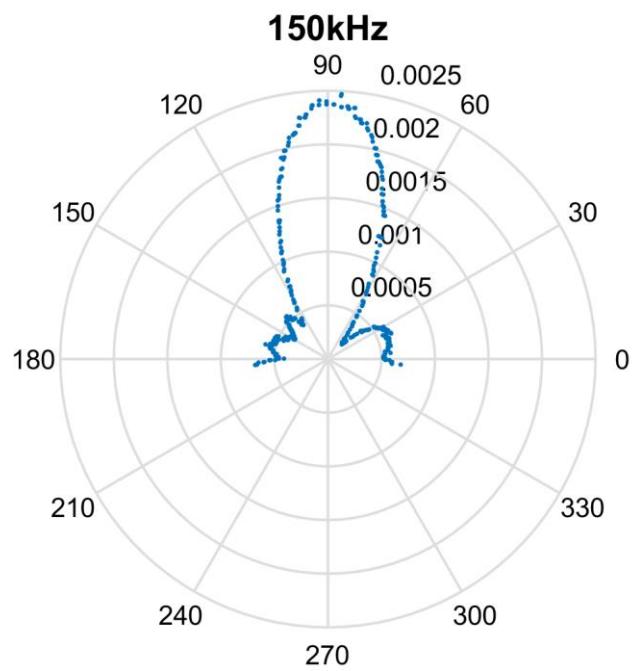
Rys. 5.15. Punkty pomiarowe dla przetwornika M-0714-P2



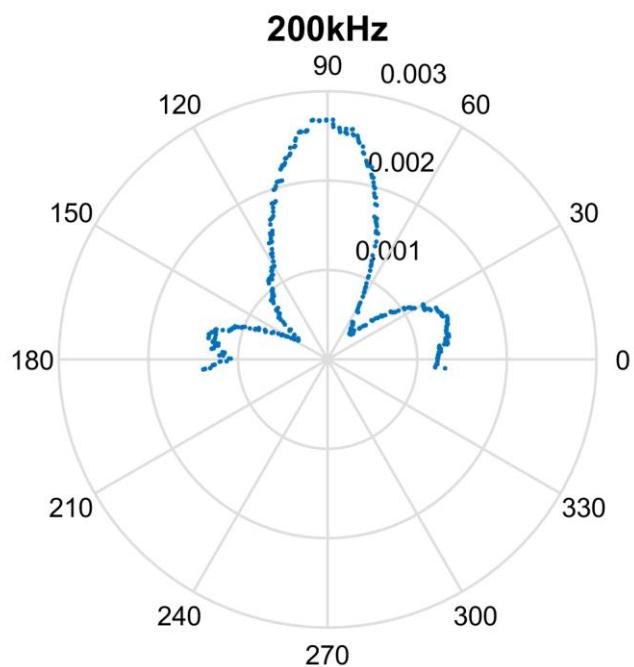
Rys. 5.16. Charakterystyka kierunkowa dla M-0714-P2 (80kHz)



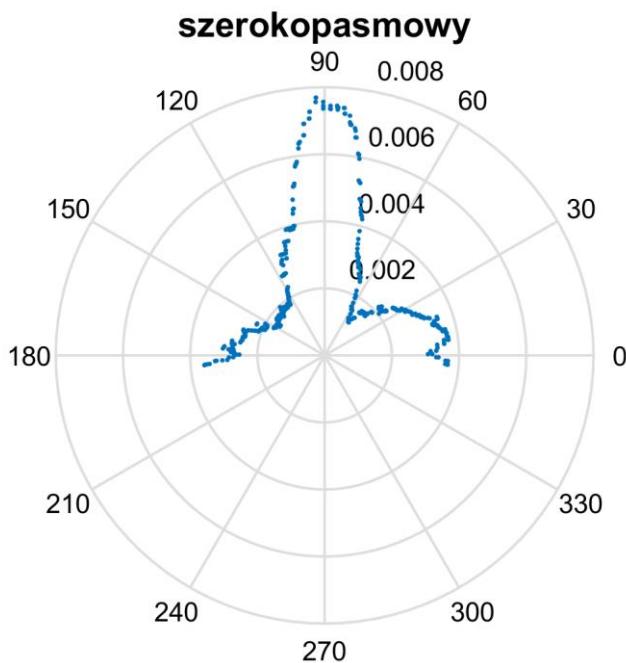
Rys. 5.17. Charakterystyka kierunkowa dla M-0714-P2 (100kHz)



Rys. 5.18. Charakterystyka kierunkowa dla M-0714-P2 (150kHz)



Rys. 5.19. Charakterystyka kierunkowa dla M-0714-P2 (200kHz)



Rys. 5.20. Charakterystyka kierunkowa dla M-0714-P2 (wymuszenie szerokopasmowe)

## 5.2. Eksperymenty 3,4 – płyta kompozytowa

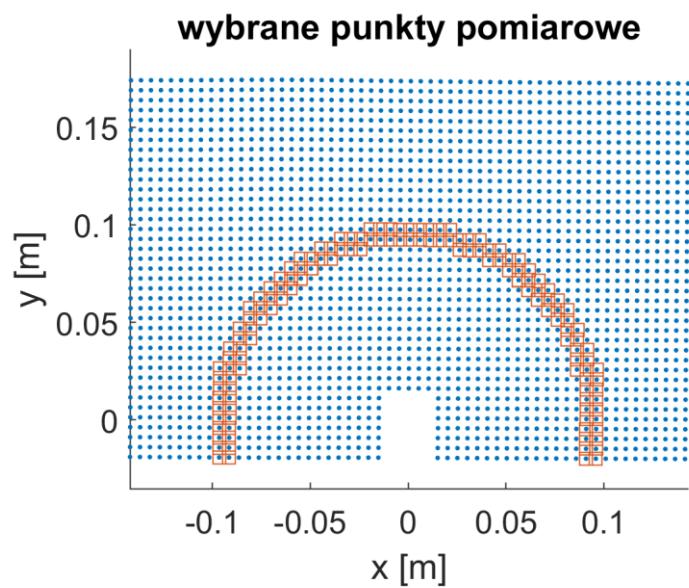
Charakterystyki wykonano analogicznie jak w podpunkcie 5.1. Różnice to oczywiście zastosowanie płyty z innego materiału niż poprzednio oraz przeprowadzenie dodatkowego eksperymentu dla przetwornika piezoelektrycznego.

### 5.2.1. Przetwornik M-2814-P2

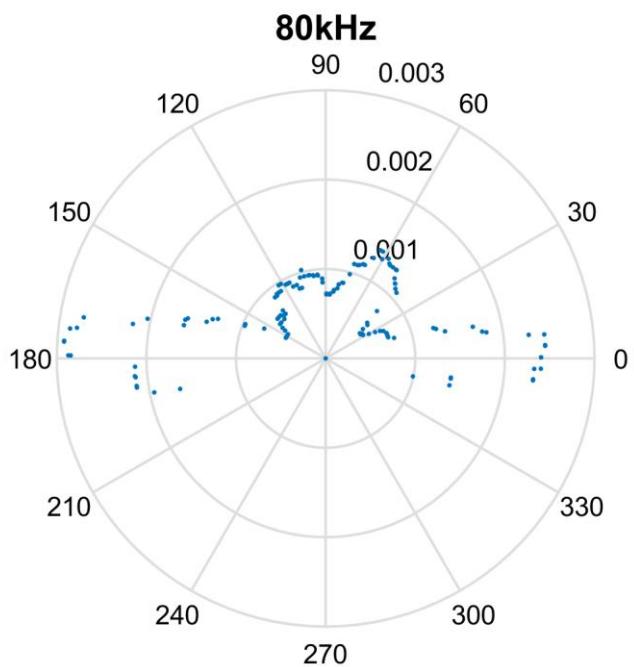
Na początku tego podpunktu warto zaznaczyć, że dla tego przetwornika z użytych nadajników MFC charakterystyki okazały się najlepsze. Dlatego też, aby jeszcze bardziej zwiększyć ich wiarygodność, przeprowadzono tu dodatkowe pomiary (bez wymuszenia szerokopasmowego), gdzie siatkę pomiarową przedstawiła półokrąg o większej rozdzielczości i bardziej dokładną pod względem odległości od środka układu współrzędnych, niż w przypadku punktów rozmieszczonych w prostokącie.

Dlatego też ten podpunkt zawiera wyniki dwóch zestawów pomiarów.

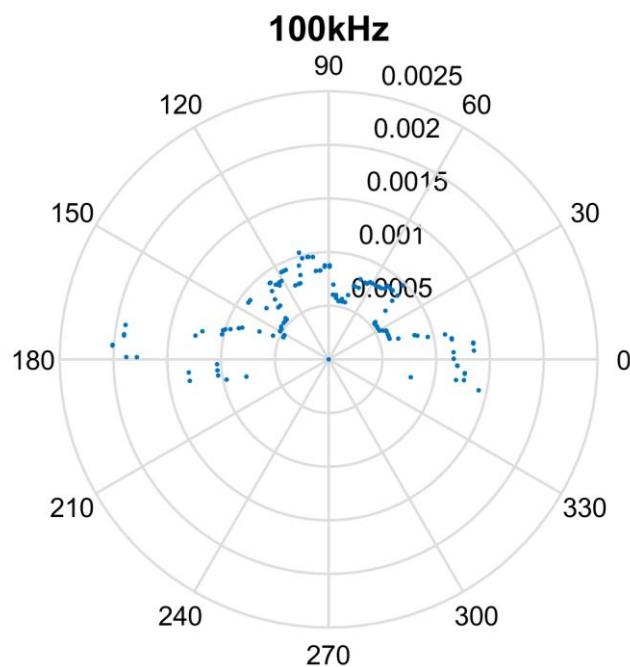
- a) wybrane punkty pomiarowe – siatka prostokątna sprowadzona do półokręgu:



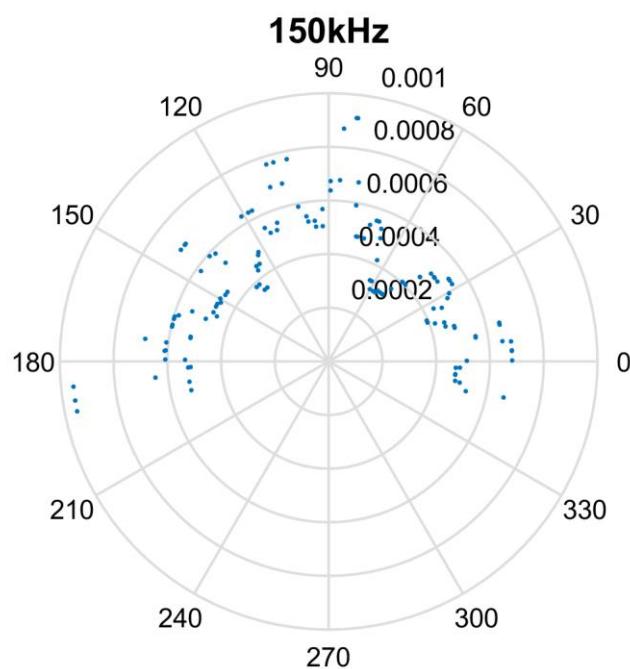
Rys. 5.21. Punkty pomiarowe dla przetwornika M-0714-P2 – siatka prostokątna



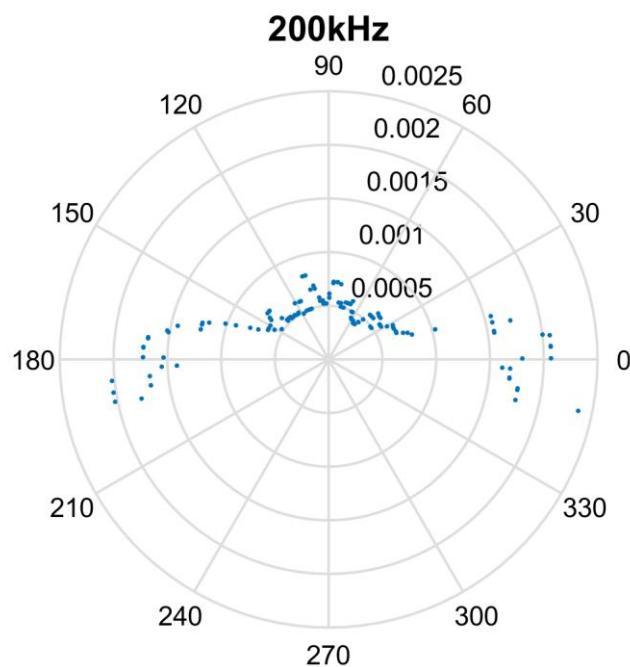
Rys. 5.22. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (80kHz)



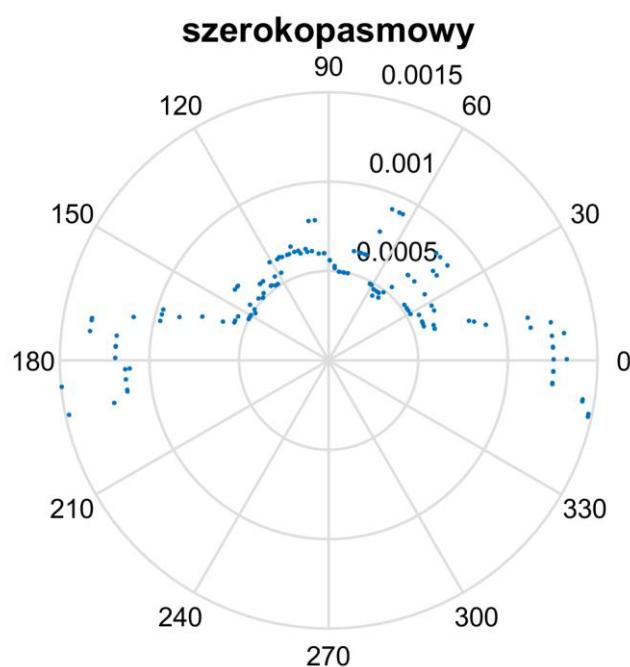
Rys. 5.23. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (100kHz)



Rys. 5.24. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (150kHz)

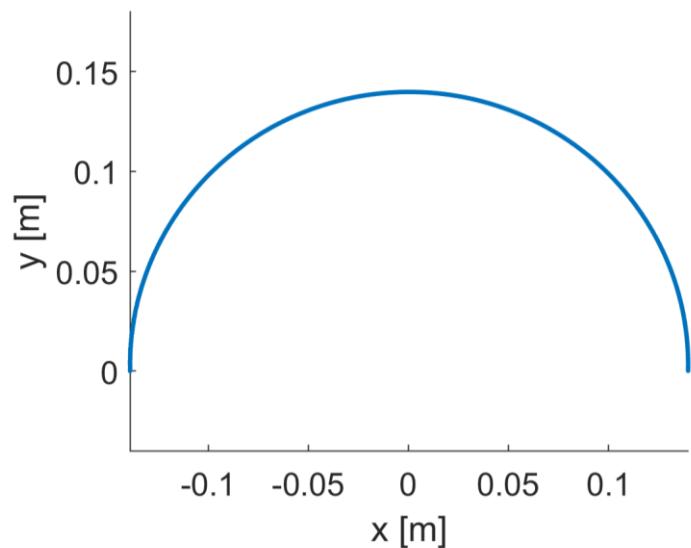


Rys. 5.25. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (200kHz)

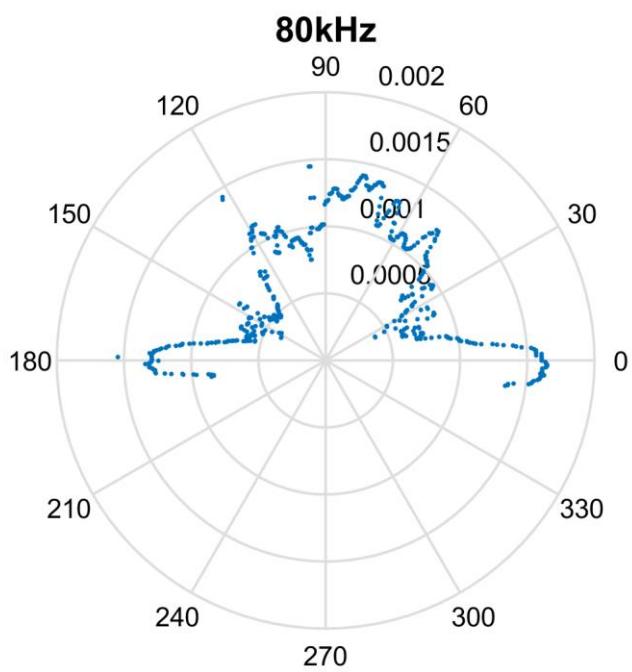


Rys. 5.26. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (wymuszenie szerokopasmowe)

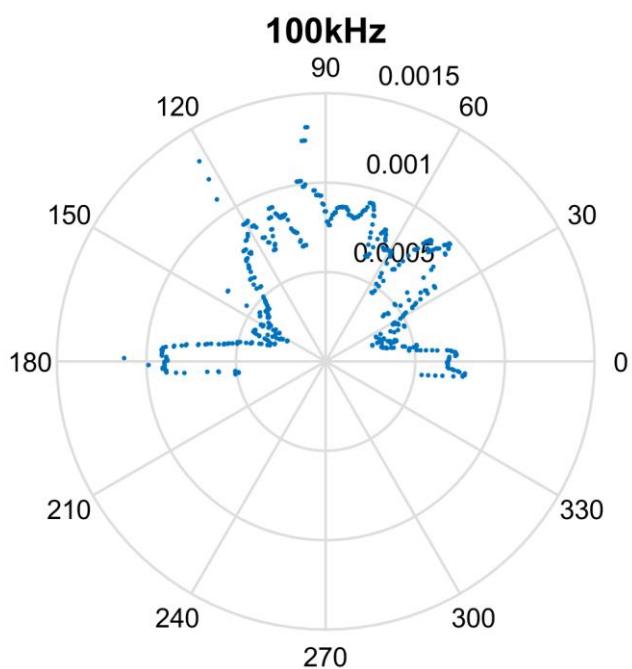
b) wybrane punkty pomiarowe – siatka z półokręgu



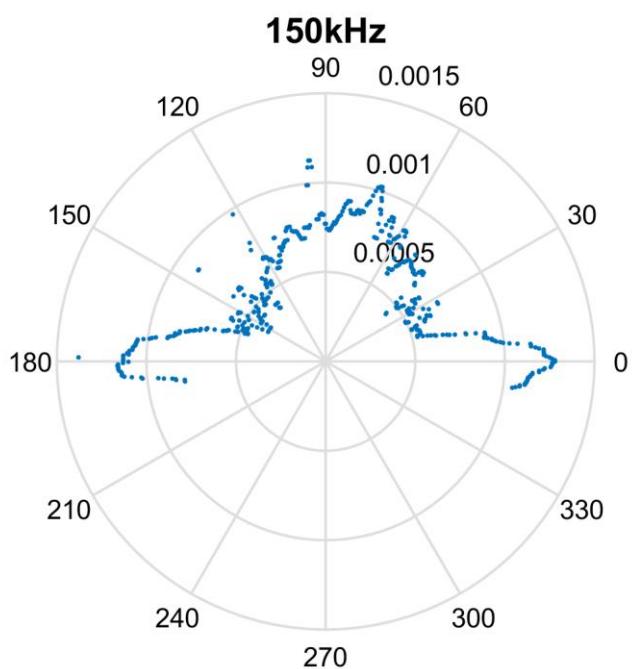
Rys. 5.27. Punkty pomiarowe dla przetwornika M-0714-P2 – siatka z półokręgu



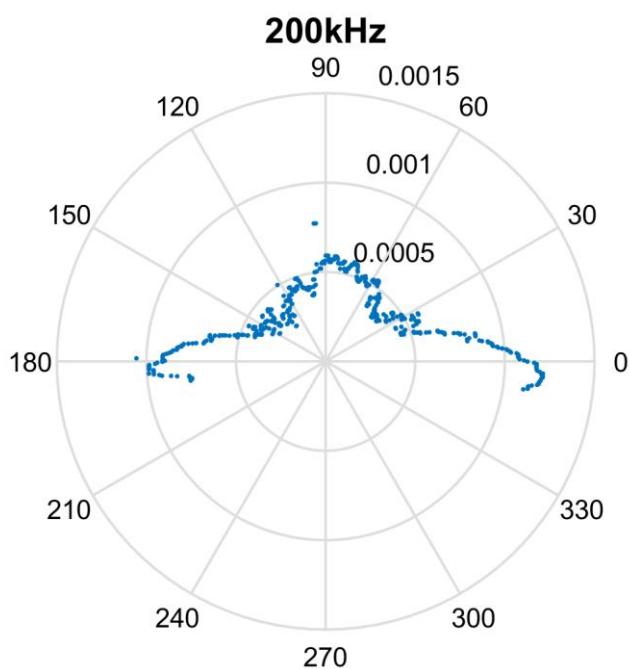
Rys. 5.28. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (80kHz)



Rys. 5.29. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (100kHz)



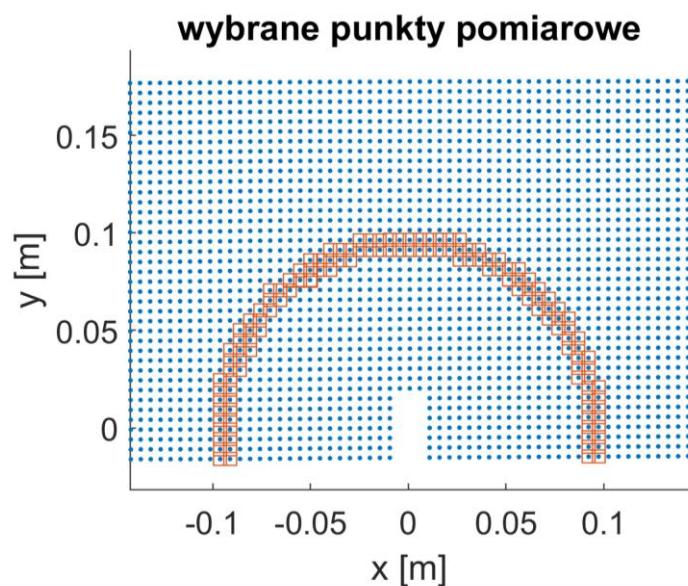
Rys. 5.30. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (150kHz)



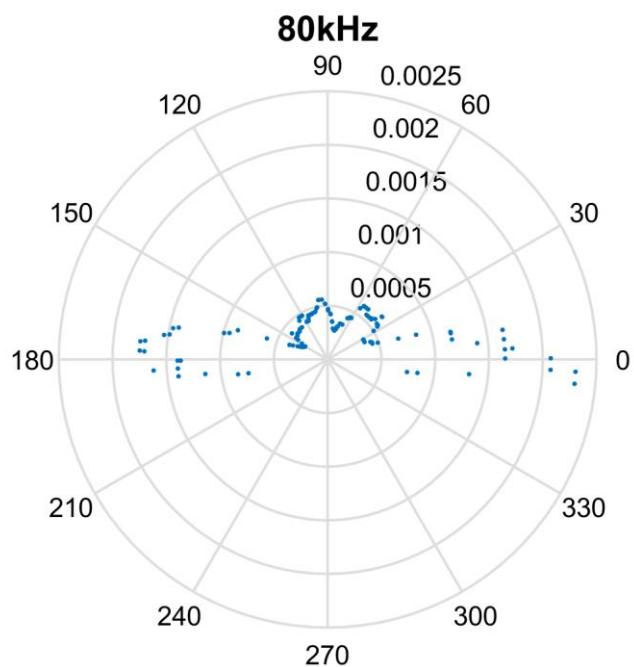
Rys. 5.31. Charakterystyka kierunkowa dla M-2814-P2 (200kHz)

### 5.2.2. Przetwornik M-2807-P2

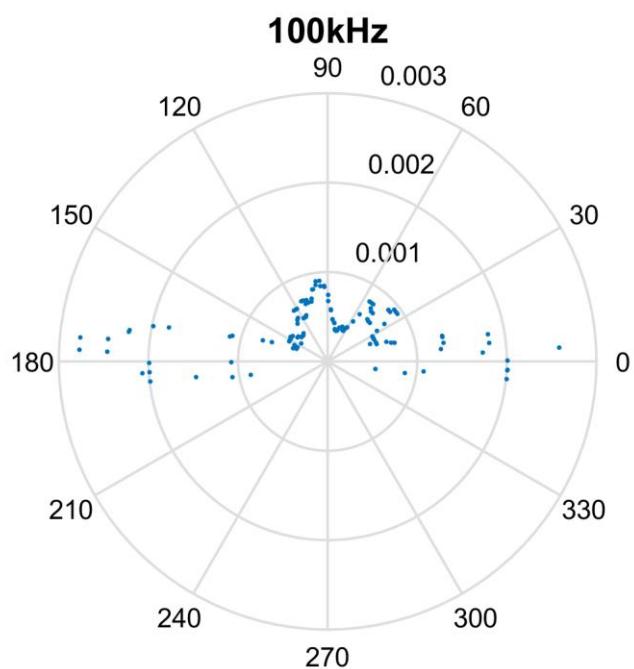
Wybrane punkty pomiarowe:



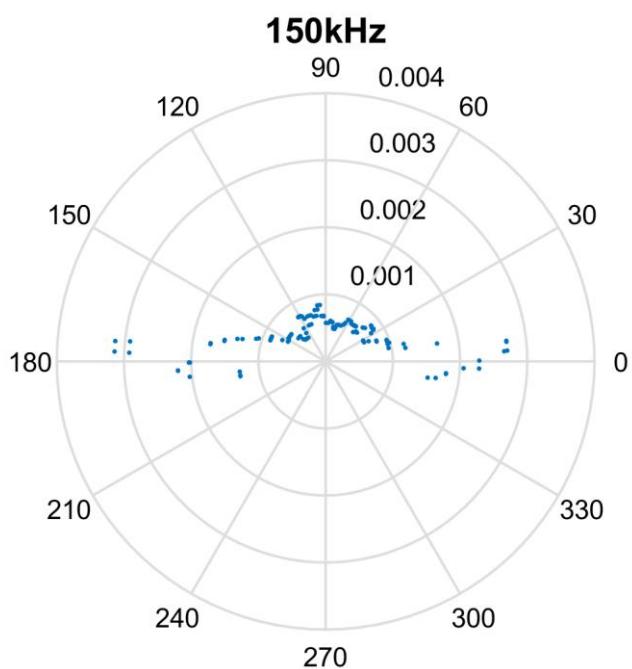
Rys. 5.32. Punkty pomiarowe dla przetwornika M-2807-P2



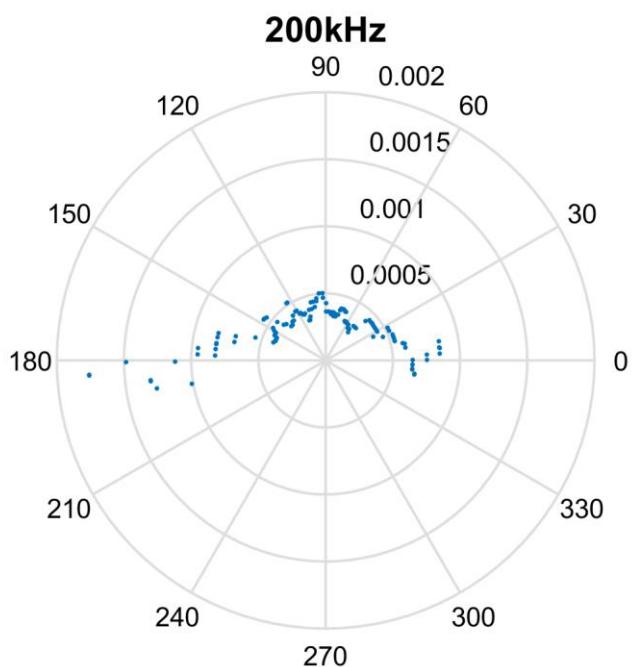
Rys. 5.33. Charakterystyka kierunkowa dla M-2807-P2 (80kHz)



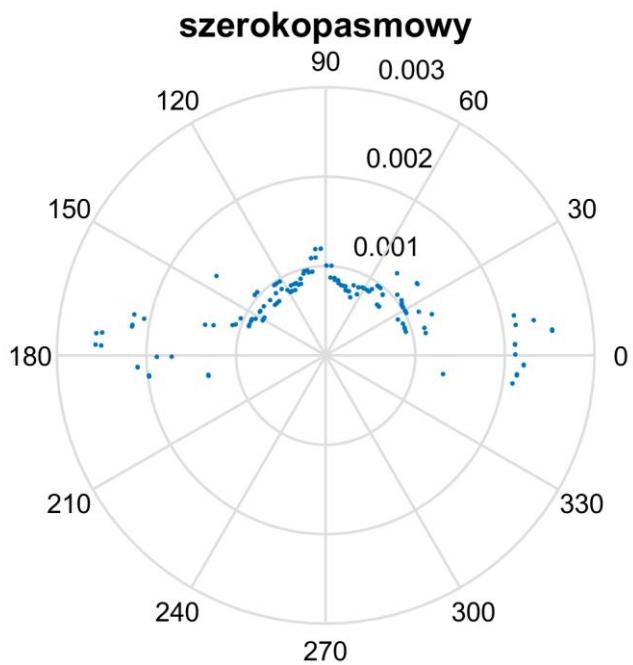
Rys. 5.34. Charakterystyka kierunkowa dla M-2807-P2 (100kHz)



Rys. 5.35. Charakterystyka kierunkowa dla M-2807-P2 (150kHz)



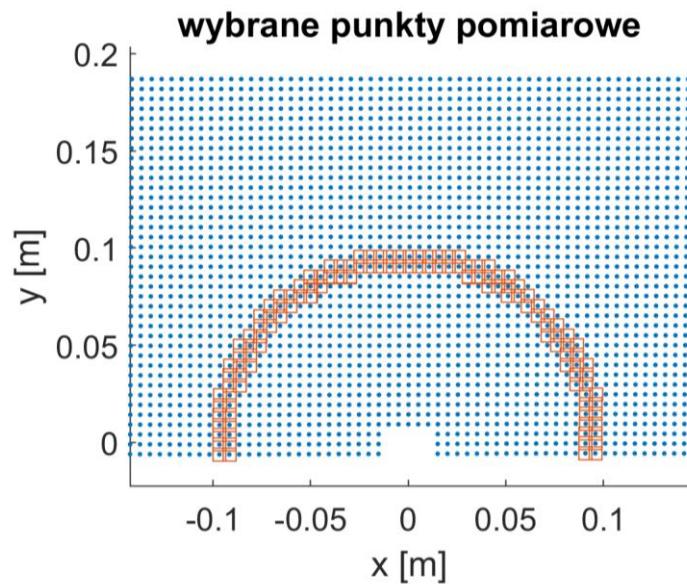
Rys. 5.36. Charakterystyka kierunkowa dla M-2807-P2 (200kHz)



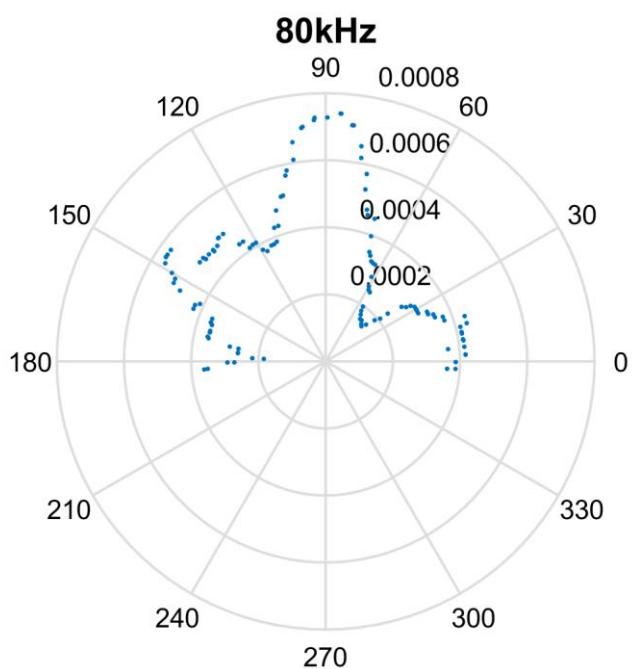
Rys. 5.37. Charakterystyka kierunkowa dla M-2807-P2 (wymuszenie szerokopasmowe)

### 5.2.3. Przetwornik M-0714-P2

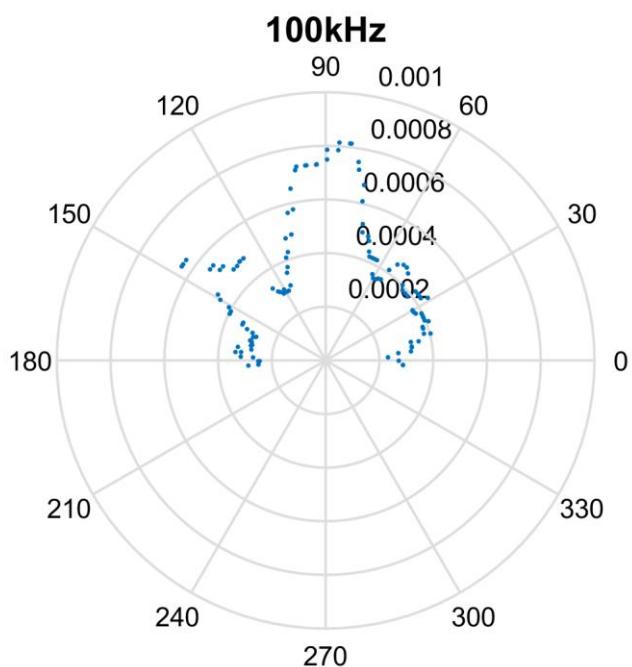
Wybrane punkty pomiarowe:



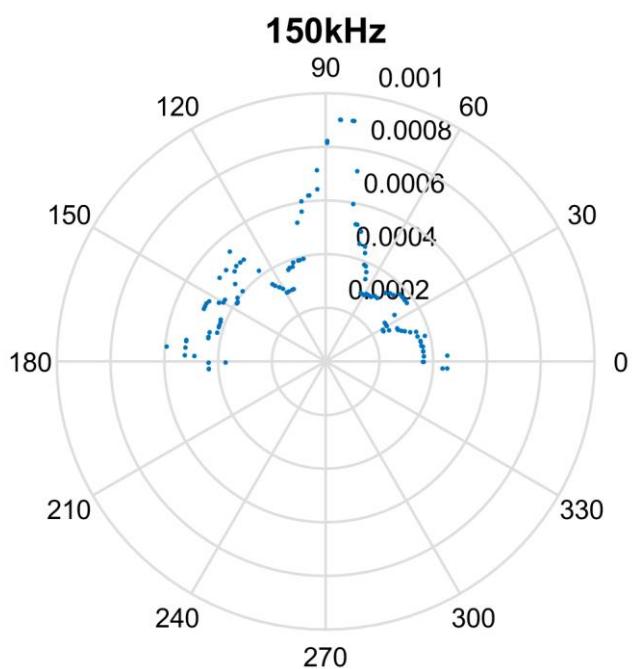
Rys. 5.38. Punkty pomiarowe dla przetwornika M-0714-P2



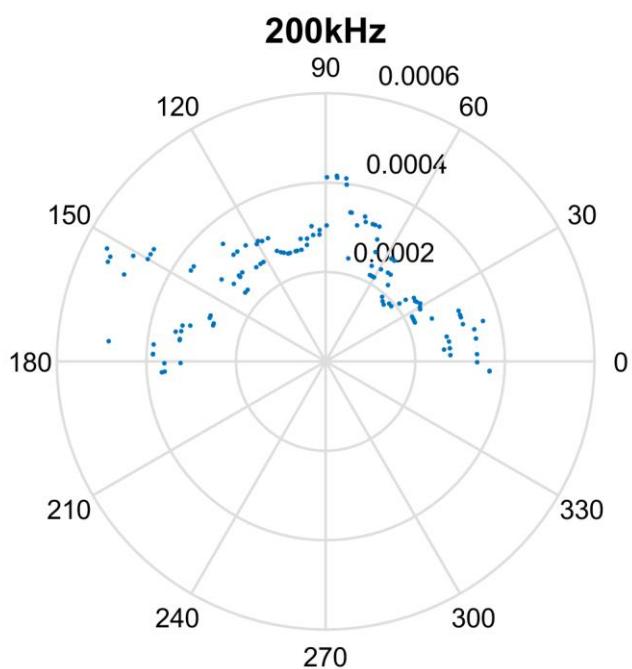
Rys. 5.39. Charakterystyka kierunkowa dla M-0714-P2 (80kHz)



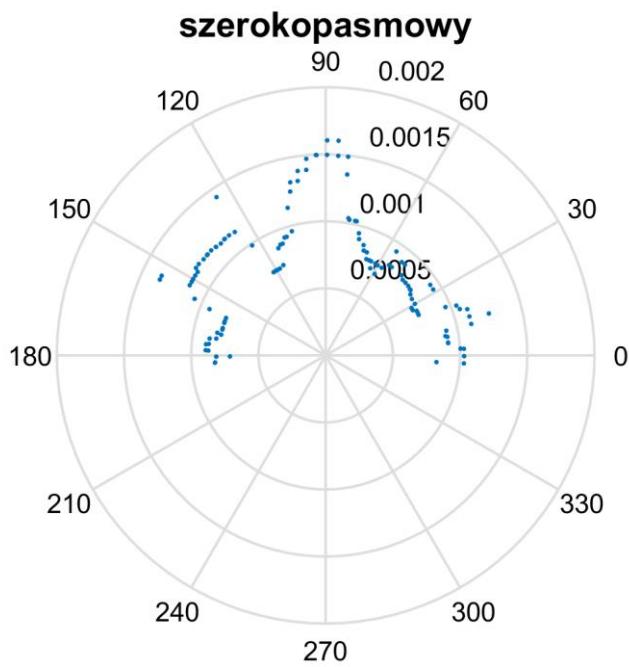
Rys. 5.40. Charakterystyka kierunkowa dla M-0714-P2 (100kHz)



Rys. 5.41. Charakterystyka kierunkowa dla M-0714-P2 (150kHz)



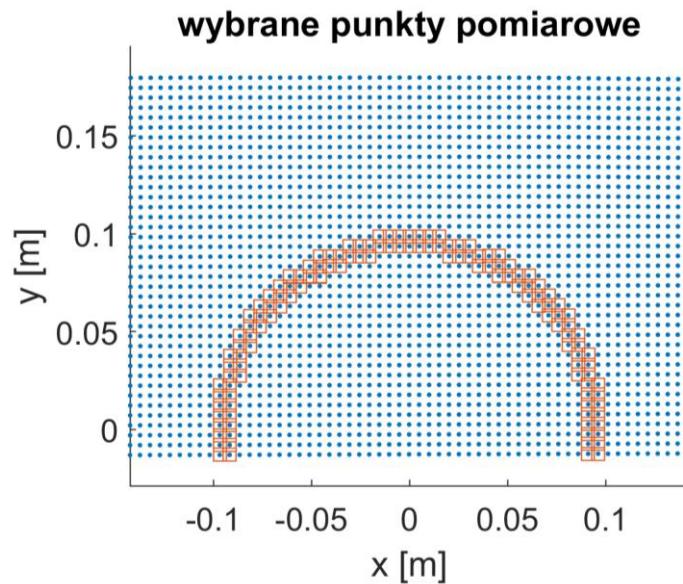
Rys. 5.42. Charakterystyka kierunkowa dla M-0714-P2 (200kHz)



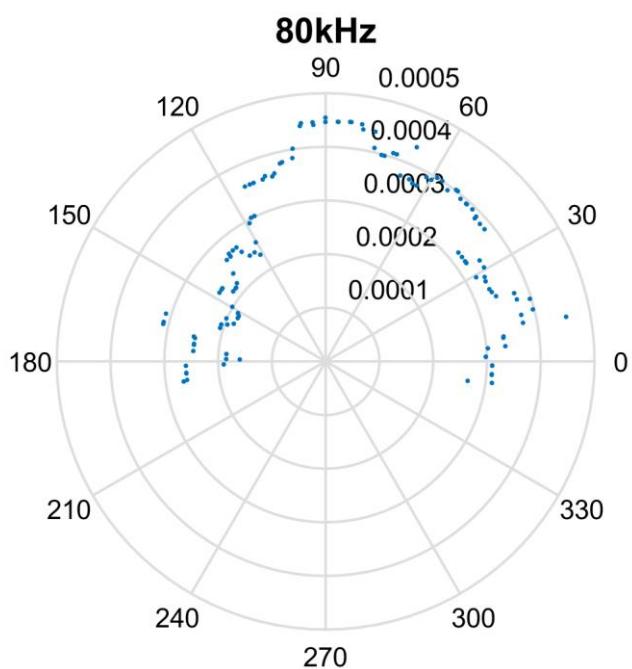
Rys. 5.43. Charakterystyka kierunkowa dla M-0714-P2 (wymuszenie szerokopasmowe)

#### 5.2.4. Przetwornik piezoelektryczny

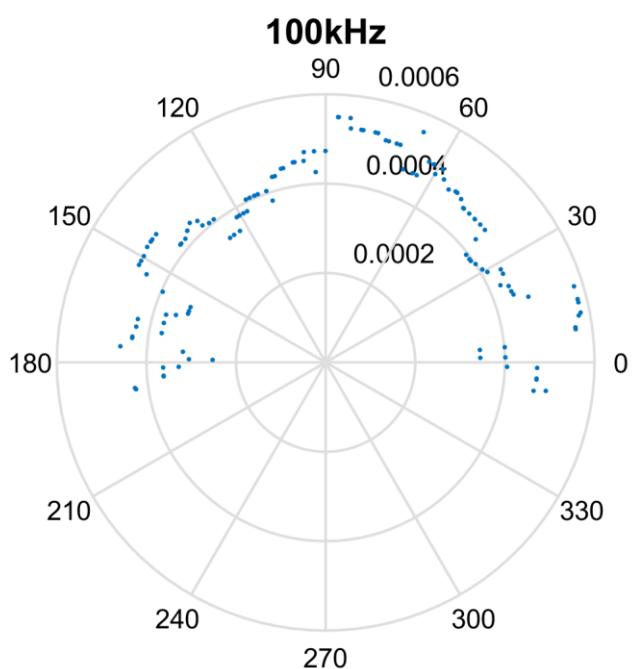
Wybrane punkty pomiarowe:



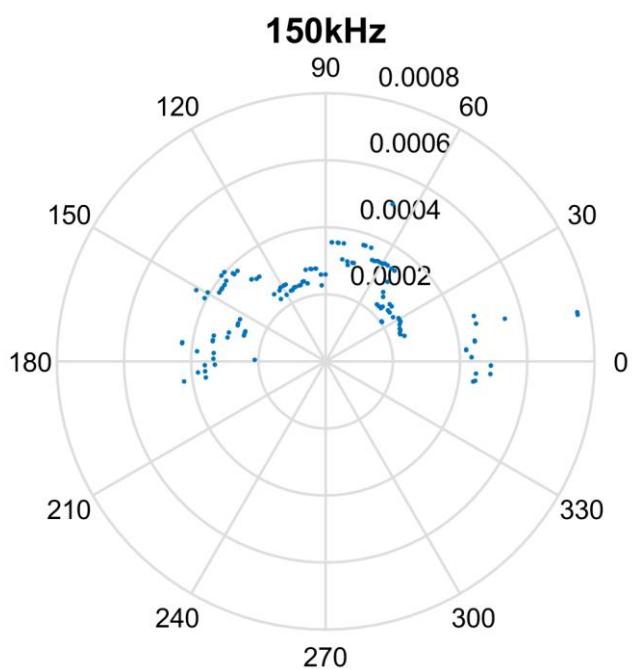
Rys. 5.44. Punkty pomiarowe dla przetwornika piezoelektrycznego



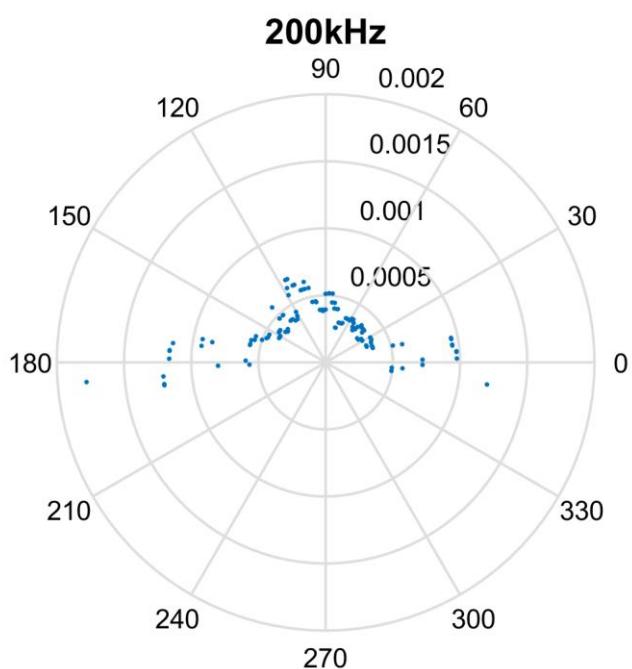
Rys. 5.45. Charakterystyka kierunkowa dla przetwornika piezoelektrycznego (80kHz)



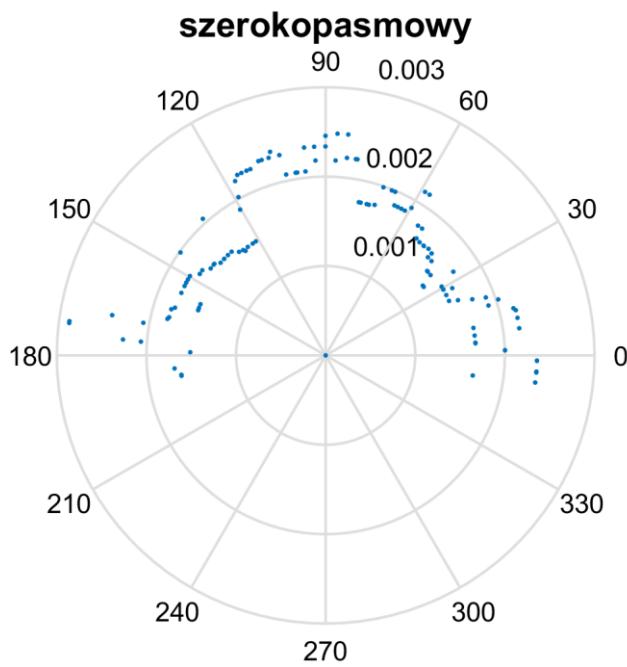
Rys. 5.46. Charakterystyka kierunkowa dla przetwornika piezoelektrycznego (100kHz)



Rys. 5.47. Charakterystyka kierunkowa dla przetwornika piezoelektrycznego (150kHz)



Rys. 5.48. Charakterystyka kierunkowa dla przetwornika piezoelektrycznego (200kHz)



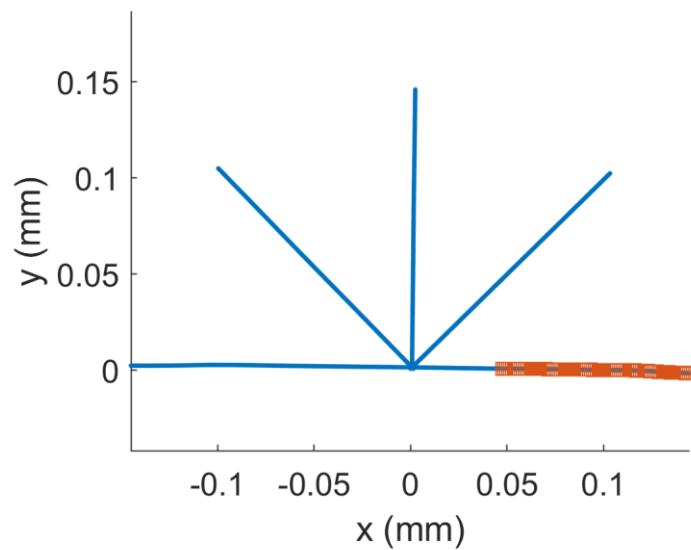
Rys. 5.46. Charakterystyka kierunkowa dla przetwornika piezoelektrycznego (wymuszenie szerokopasmowe)

### 5.3. Eksperyment 5

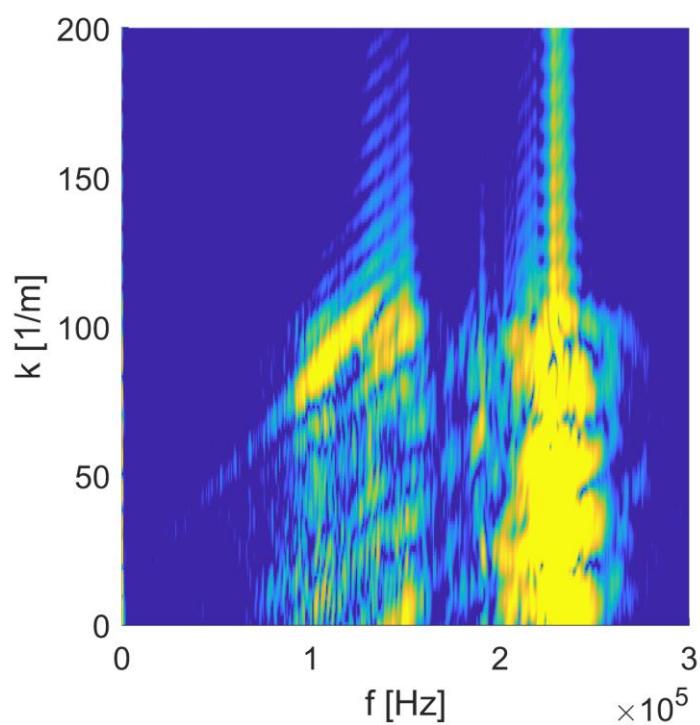
W tym badaniu zastosowano wymuszenie szerokopasmowe, o paśmie od 50kHz do 250kHz, dla przetwornika piezoelektrycznego nadającego drgania dla płyty kompozytowej. Wyróżnia go definicja siatki pomiarowej, która nie jest półokręgiem, a liniami rozchodząymi się od przetwornika. Celem tego eksperymentu nie była, jak poprzednio, wygenerowanie charakterystyki kierunkowej nadajnika, a zbadanie własności kompozytu, ściślej – określenie jego krzywych dyspersji.

Do kolejnych analiz wybierano po 100 najbardziej oddalonych od przetwornika punktów, znajdujących się na kolejnych odcinkach o początku w miejscu umieszczenia elementu piezoelektrycznego.

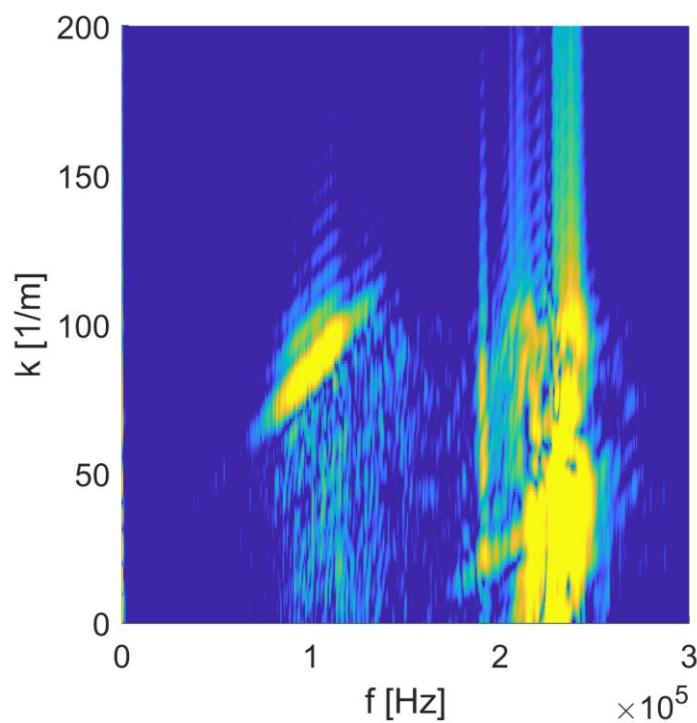
Poniższy rysunek przedstawia zbiór punktów dla pierwszej linii, a kolejne punkty dobierano analogicznie, poruszając się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara.



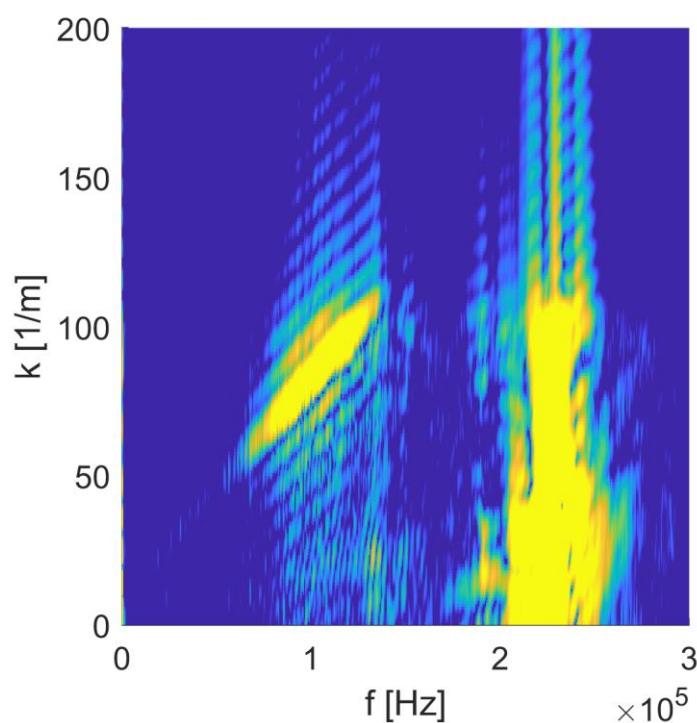
Rys. 5.47. Pierwszy zestaw wybranych punktów



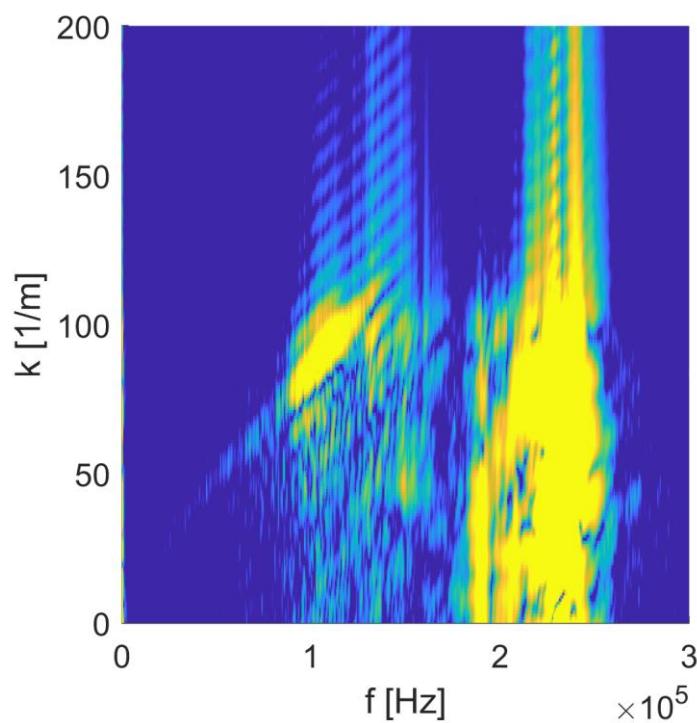
Rys. 5.48. Wykres dla zestawu punktów I)



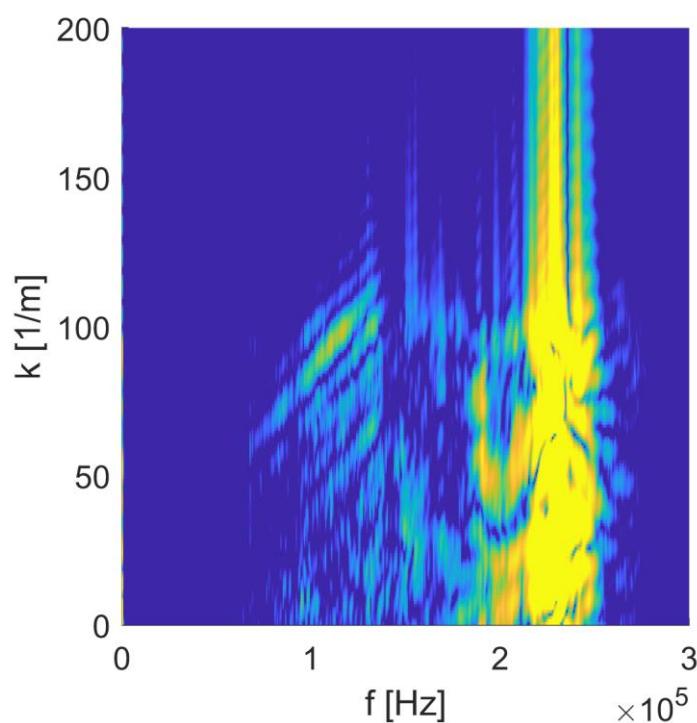
Rys. 5.49. Wykres dla zestawu punktów II)



Rys. 5.50. Wykres dla zestawu punktów III)



Rys. 5.51. Wykres dla zestawu punktów IV)



Rys. 5.51. Wykres dla zestawu punktów V)

## **6. Wnioski**

W tym rozdziale omówiono kolejne wyniki z rozdziału 5) i opisano wnioski wyciągnięte na ich podstawie.

### **6.1. Eksperymenty 1-2**

Wykreślanie charakterystyk kierunkowych przetworników zakończyło się sukcesem. Oczywiście każdy z przebadanych przetworników osiągnął inne wyniki, co powinno być brane pod uwagę podczas doboru do rozwiązywanego zagadnienia. Generalnie maksima lokalne charakterystyk występują dla kierunków  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  i  $180^\circ$ , a minima:  $45^\circ$  i  $135^\circ$ , co spowodowane jest prostokątnym kształtem nadajników.

Przetwornik M-2814-P2 emittuje częstotliwości 80kHz i 100kHz najsilniej w kierunku poziomym, choć też z wyraźnym maksimum w pionie. Wyniki te są ostre. Zniekształcenia zwiększały się przy wyższych częstotliwościach, czyli dla 150kHz i 200kHz, choć nie wykluczają one przetwornika z zastosowania; implikują jedynie konieczność relatywnie niewielkiego zwiększenia tolerancji błędu. Dla tych częstotliwości też sygnał emitowany jest bardziej jednolicie w kierunkach poziomym i pionowym. Dla wymuszenia szerokopasmowego można zauważać podobne tendencje, choć charakterystyka jest mniej wyraźna.

Przetwornik M-2807-P2 z dobrą dokładnością przetworzył wszystkie zadane sygnały. Na jego kolejnych charakterystykach bardzo wyraźnie widać dominację listków bocznych. Listek główny również występuje, choć jest kilkakrotnie mniejszy. Wynikowe charakterystyki są bardzo wyraźne, co świadczy o małych zniekształcenach sygnału i dobrej jakości stosowanego przetwornika.

Przetwornik M-20714-P2 lepiej poradził sobie w dwóch wyższych częstotliwościach. Tu emisja sygnału dla 80kHz wydaje się być przypadkowa i zaczyna się klarować dopiero przy 100kHz. Charakterystyki są jednak najbardziej ostre przy częstotliwościach 150kHz i 200 kHz oraz wymuszeniu szerokopasmowym. Dominuje tu emisja sygnału w kierunku  $90^\circ$ ; występują tu bardzo wyraźne maksima globalne.

## 6.2. Eksperymenty 3-4

Już na wstępie analizy wyników tych badań można zauważyc, że są one jakościowo gorsze od wyników poprzednich eksperymentów. Zastosowana tu płyta kompozytowa niewątpliwie ma negatywny wpływ na sygnał, znieksztalcając go.

Ponownie już na początku można zauważyc, że dla przetworników międzypalczastych, kierunkom  $0^\circ$ ,  $90^\circ$  i  $180^\circ$  odpowiadają maksima lokalne, a przy  $45^\circ$  i  $135^\circ$  występują minima, co wiąże się z kształtem tych przetworników.

Kształty charakterystyk kierunkowych przetwornika M-2814-P2 ponownie wskazują na jego lepszą pracę w zakresie 80kHz-100kHz i jego maksima lokalne występują w osi poziomej, z nieco mniejszym w okolicy pionu. W przypadku wymuszenia 150 kHz jest ona bardziej rozrzucona, by dla 200kHz i wymuszenia szerokopasmowego znów wskazać lepszą emisję sygnału w poziomie, z mniejszym maksimum w kierunku  $90^\circ$ . Charakterystyki kierunkowe w tym eksperymencie wyszły najlepiej dla tego właśnie przetwornika, dlatego powtórzono pomiar, z siatką utworzoną na półokręgu, którego końce leżą na osi poziomej przechodzącej przez środek przetwornika. W tym przypadku, z racji większej gęstości pomiarów i lepiej zdefiniowanej odległości od środka przetwornika, charakterystyki kierunkowe okazały się być dokładniejsze. W okolicach kątów  $30^\circ$  i  $150^\circ$  przy wszystkich zdefiniowanych wymuszeniach pojawiają się tu minima lokalne, a w kierunku poziomym wyraźnie widoczna są maksima. W kierunku  $90^\circ$  również widać wyraźnie silną emisję nadawanego sygnału, rozmyte w zakresie  $60^\circ$  do  $120^\circ$ .

Przetwornik M-2807-P2 emisuje sygnał wyraźnie lepiej w kierunku poziomym, choć ich ostrość maleje wraz ze wzrostem częstotliwości wymuszenia. W okolicach kąta  $90^\circ$  można zaobserwować minimum lokalne, otoczone maksimami dla przypadków 80kHz-150kHz, a w przypadku 200kHz i wymuszenia szerokopasmowego – maksima lokalne.

Ostatni z analizowanych przetworników międzypalczastych, M-20714-P2, tak jak w przypadku płyty aluminiowej, generuje wyraźne maksima lokalne charakterystyk kierunkowych wzdłuż kierunku dodatniego osi pionowej. Wyjątkiem jest tu sygnał o wymuszeniu 200kHz, gdzie maksimum to jest rozmyte.

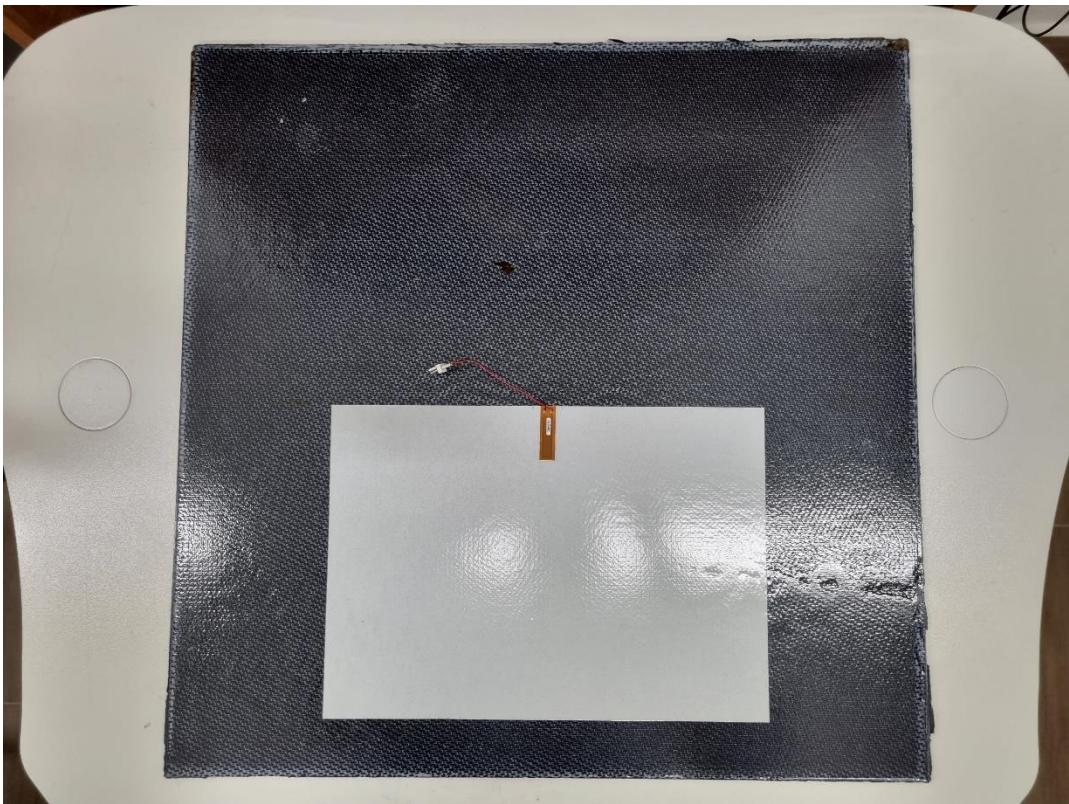
Charakterystyki kierunkowe przetwornika piezoelektrycznego rozkładają się bardziej równomiernie; nie występują tu odseparowane listki boczne czy główny. Wynika to oczywiście z geometrii tego urządzenia. Wyjątkiem jest tu przypadek z sygnałem częstotliwości wymuszenia 200kHz; tu sygnał emitowany jest wyraźnie mocniej w kierunku poziomym.

Podsumowując eksperymenty z płytą kompozytową można stwierdzić, że są one jakościowo słabe. Wygenerowane charakterystyki kierunkowe są znacznie mniej ostre niż w przypadku płyty aluminiowej. Źródłem tego problemu są najprawdopodobniej liczne nierówności na powierzchni analizowanej płyty (Rys. 6.1).



Rys 6.1. Płyta kompozytowa

Nierówności te zakryte były przez naklejoną taśmę refleksyjną, która z racji sztywności do nich nie przylegała, pracując w tych miejscach jak membrana.



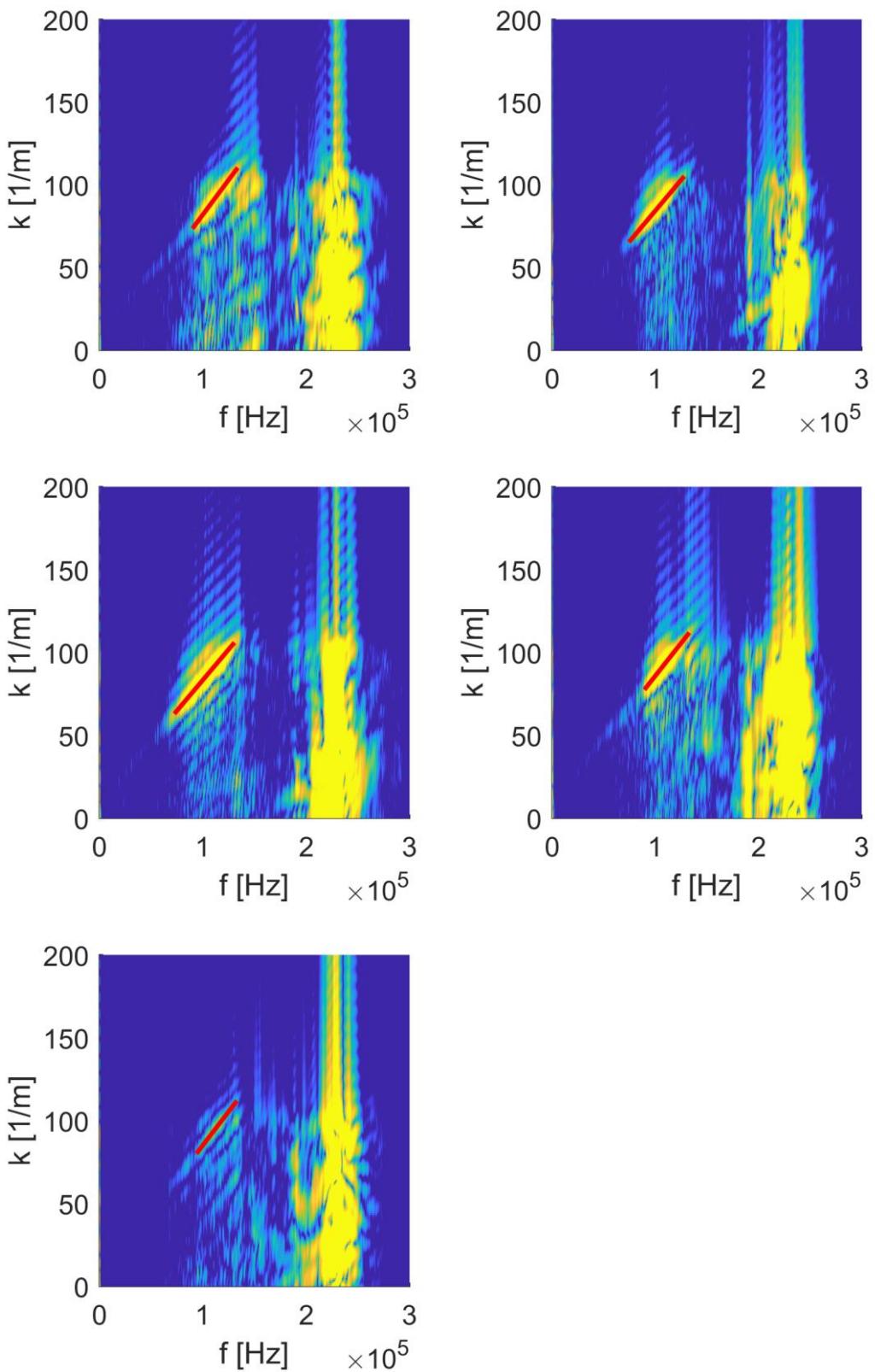
Rys 6.2. Płyta kompozytowa z naklejoną taśmą refleksyjną

### 6.3. Eksperyment 5

Warto przypomnieć, że cel tego eksperymentu różnił się od poprzednich. Podjęto się tu wykreślenia krzywych dyspersji analizowanej płyty kompozytowej za pomocą przetwornika piezoelektrycznego, z wymuszeniem, jakim był sygnał świergotowy o zakresie częstotliwości 50kHz-250kHz i napięciu 6Vp-p.

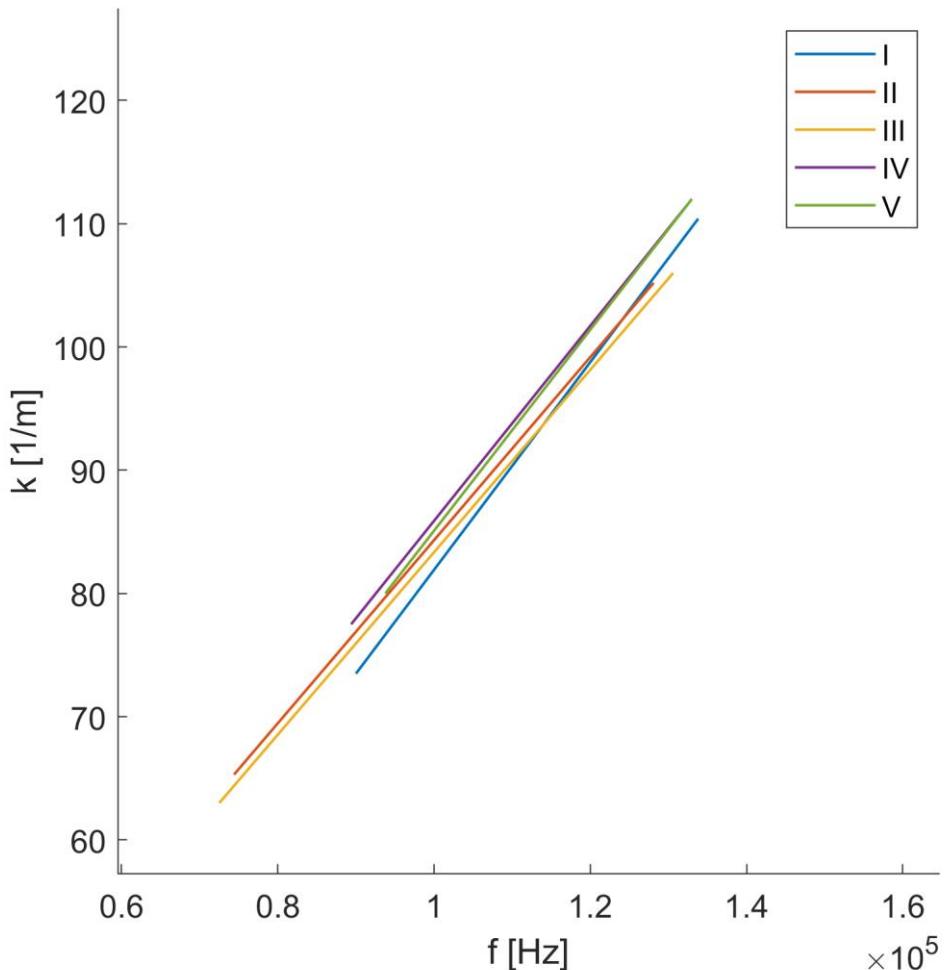
Na początku tego podpunktu warto wrócić do wyników z poprzedniego punktu. Tym razem zaznaczono na nich widoczne fragmenty modu  $A_0$ , czyli jedynego obserwowalnego na nich urywku krzywej dyspersji.

Warto zaznaczyć, że oczekiwano otrzymanie większej ilości takich fragmentów, np. części modu  $S_0$ , jednak wyraźnie widoczny rezonans przetwornika z zakresu 200kHz-250kHz negatywnie wpłynął na wykres, dominując go.



Rys 6.2. Zaznaczenie fragmentów krzywej dyspersji na wykresach wygenerowanych dla kolejnych kierunków

W kolejnym kroku porównamy te krzywe, zestawiając je na jednym wykresie.

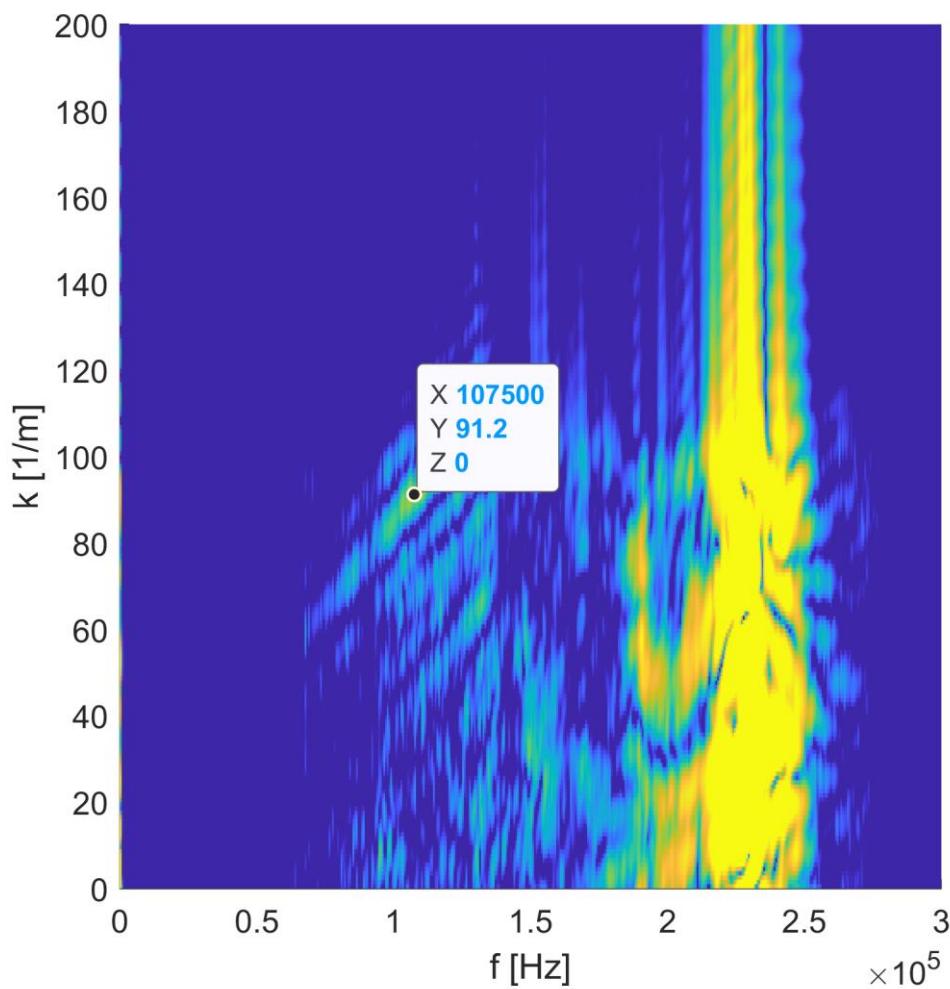


Rys 6.3. Porównanie widocznych fragmentów krzywych dyspersji

Można zauważyć, że wykreślone fragmenty krzywych nakładają się na siebie z niewielkim błędem. Oczywiście nie znajdują się one na siebie idealnie. Może być to spowodowane chociażby wspomnianym już rezonansem wykorzystywanego w eksperymencie przetwornika piezoelektrycznego.

Na tej podstawie można wnioskować, że płyta posiada właściwość izotropową; prędkość rozchodzenia się fali nie zależy tu od kierunku.

Z otrzymanych krzywych dyspersji można określić prędkość rozchodzenia się fali w zastosowanej płycie kompozytowej. Przykładowo:



Rys 6.4. Wybrany punkt ostatniej z krzywych dyspersji

Dla wybranego punktu można obliczyć:

$$v = \frac{w}{k} = \frac{2\pi \cdot f}{k} = \frac{2\pi \cdot 107500}{2\pi \cdot 91.2} \approx 1179 \left[ \frac{m}{s} \right]$$

Tak więc w płycie kompozytowej, dla częstotliwości 107.5kHz fala w modzie A<sub>0</sub> rozchodzi się z prędkością  $1179 \left[ \frac{m}{s} \right]$ .

## **7. Podsumowanie**

Wygenerowanie narzędzi do opracowania charakterystyk przetworników zakończyło się sukcesem.

Przeanalizowano charakterystyki przetworników międzypalczastych dla płyty aluminiowej i potwierdzono zasadność ich zastosowania w takim przypadku. Dobór odpowiedniego nadajnika można przeprowadzić na ich podstawie, uwzględniając częstotliwość wymuszenia sygnału wymuszającego oraz kierunek, w jakim będzie on nadawany.

W przypadku płyty kompozytowej otrzymane wyniki okazały się być jakościowo gorsze, choć bardziej dokładna definicja siatki punktów pomiarowych, jaką zastosowano dla przetwornika M-2814-P2 doprowadziła do ich poprawy. Kolejnym krokiem, jaki należy postawić w celu ich polepszenia, byłoby zastosowanie płyty kompozytowej o gładkiej powierzchni. Umożliwi to równomierne przyklejenie taśmy refleksywnej do całej jej powierzchni, niwelując problem jej pracy jako „membrana”. Wprowadzenie takiej poprawki i powtórzenie eksperymentu sugeruje się dla dalszych prac.

W ostatnim eksperymencie udało się wykreślić fragmenty modu A<sub>0</sub> dla płyty kompozytowej. Na ich podstawie zauważono, że prędkość rozchodzenia się fali nie zależy od kierunku jej rozchodzenia. Pokazano też przykładową prędkość rozchodzenia się tego modu fali dla jednej z mieszczących się w zakresie wymuszenia częstotliwości. Niestety rezonans przetwornika uniemożliwił wykreślenie większej ilości krzywych. Badanie należy powtórzyć, stosując w tym celu przetwornik o znacznie większej częstotliwości rezonansowej, dla płyty kompozytowej o płaskiej powierzchni. Sugeruje się to jako temat dalszych prac.

## **8. Bibliografia**

- [1] Legutko S.: *Podstawy eksploatacji maszyn i urządzeń*. Warszawa, Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne Spółka Akcyjna 2004
- [2] Uhl T.: *Współczesne metody monitorowania i diagnozowania konstrukcji*. Wyd. Fundacja im. Wojciecha Świętosławskiego na Rzecz Wspierania Nauki i Rozwoju Potencjału Naukowego w Polsce 2010
- [3] Rose J.: *The upcoming revolution in ultrasonic guided waves*. Bellingham, SPIE 2011
- [4] Su Z., Ye L., Lu Y.: *Guided Lamb waves for identification of damage in composite structures: A review*. Sydney, Journal of Sound and Vibration 2006
- [5] Capineri L., Bulletti A.: *Ultrasonic Guided-Waves Sensors and Integrated Structural Health Monitoring Systems for Impact Detection and Localization: A Review*, Florencja, Department of Information Engineering, University of Florence 2021
- [6] Kleiner M.: *Electroacoustics*, USA, CRC Press 2013
- [7] Smart Material, Dostępny: <https://www.smart-material.com/index.html> (odwiedzona 28.06.2023).

## **9. Załączniki**

- Praca\_Mgr\_Zajac\_Michal.docx – tekst pracy w formacie docx,
- Praca\_Mgr\_Zajac\_Michal.pdf – tekst pracy w formacie pdf,
- skrypt ch\_kierunkowe.m,
- skrypt ch\_kierunkowe\_polkole.m,
- skrypt dyspersja.m,
- pliki pomiarowe.