



INSTYTUT MASZYN PRZEPLYWOWYCH

im. Roberta Szewalskiego

POLSKIEJ AKADEMII NAUK

80-231 Gdańsk

ul. J. Fiszera 14

Tel. (centr.): **058 3460881**

Fax: **058 3416144**

e-mail: **imp@imp.gda.pl**

Tel. (sekr.): **058 3416071**

www.imp.gda.pl

Sprawozdanie końcowe z realizacji zadania Nr 1

Koncepcja systemu monitorowania stanu technicznego konstrukcji

Okres realizacji zadania 01.01.2010-30.06.2010

Realizowanego w ramach projektu PROFAL
pt. „System monitorowania stanu technicznego konstrukcji metodą analiz propagacji fal
Lamba”

Numer projektu POIG.01.03.01-22-078/09

Zadanie zrealizowano w całości zgodnie z planem i harmonogramem realizacji. Szczegółowe informacje zawarto w treści niniejszego sprawozdania na stronach 2 do 23

Sprawozdający:

Kierownik zespołu realizatorów zadania

.....

Odbierający:

Kierownik projektu PROFAL

.....

Gdańsk 2010



Projekt współfinansowany ze środków Europejskiego Funduszu Rozwoju Regionalnego w ramach Programu Operacyjnego Innowacyjna Gospodarka



REGON: **000326121**

NIP: **584-035-78-82**

POLTAX VAT-5UE: **PL5840357882**

IBAN: **PL 42109010980000000009015357**

kod SWIFT: **WBKPPLPP**

Natowski Kod Podmiotu Gospodarki Narodowej **NCAGE: 0409H**

Koncepcja systemu monitorowania stanu technicznego konstrukcji

Autorzy:

Prof. dr hab. inż. Wiesław Ostachowicz

Prof. dr hab. inż. Marek Krawczuk

Dr hab. inż. Arkadiusz Żak

Dr hab. inż. Lech Murawski

Mgr Paweł Malinowski

Mgr Renata Opieka

Zakład Mechaniki Struktur Inteligentnych
Instytut Maszyn Przepływowych PAN

1. Wprowadzenie: Structural Health Monitoring

Structural Health Monitoring (SHM) obejmuje swoim zakresem ciągle monitorowanie stanu materiału konstrukcji (w czasie rzeczywistym) dla elementów konstrukcji jak i całości konstrukcji realizowane w czasie jej eksploatacji. Stan materiału konstrukcji ma pozostawać w granicach określonych przez wymagania stawiane podczas projektowania. Wymagania stanu materiału muszą uwzględniać zmiany spowodowane normalnym zużyciem w czasie eksploatacji, zmiany spowodowane oddziaływaniem środowiska oraz przypadkowe zdarzenia mające wpływ na stan materiału. Ze względu na to, że monitorowanie jest prowadzone w sposób ciągły w czasie eksploatacji, znana jest pełna historia eksploatacji, a te informacje mogą być wykorzystane do prognozowania stanu, przewidywania awarii oraz przewidywania czasu bezpiecznej eksploatacji konstrukcji.

W wielu pozycjach literaturowych SHM jest definiowane jako nowy sposób realizacji badań nieniszczących konstrukcji (NDT(E) czyli *Non-Destructive Testing (Evaluation)*). Nowość tego podejścia polega na ciągłym monitorowaniu stanu materiału w czasie eksploatacji urządzenia. Wymaga to pewnych rozwiązań konstrukcyjnych i eksploatacyjnych, które są charakterystyczne dla tej nowej dziedziny badań konstrukcji.

SHM jest integracją takich dziedzin jak sensoryka, teleinformatyka, elektronika, mechanika oraz inżynieria materiałowa. Integracja tych dziedzin daje w efekcie efekt synergii pozwalający na podniesienie bezpieczeństwa eksploatacji konstrukcji oraz obniżenia kosztów ich eksploatacji.

Układy realizujące procesy SHM powinny być zintegrowane z konstrukcją. Daje to możliwości wprowadzania zmian konstrukcyjnych, tak, aby prawdopodobieństwo awarii było minimalne oraz takie zarządzanie eksploatacją konstrukcji, aby zminimalizować ryzyko awarii. Pierwszą warstwą systemu SHM jest warstwa monitorująca określona przez typ zjawiska fizycznego, które jest monitorowane przez czujniki, a jest związane z uszkodzeniem konstrukcji oraz typ zjawiska fizycznego, które jest wykorzystywane przez czujniki w celu wygenerowania sygnału, najczęściej elektrycznego zawierającego informacje o uszkodzeniu, a podlegającego rejestracji i przetwarzaniu. Najczęściej w takim systemie pracuje kilka lub kilkadziesiąt czujników połączonych w sieć czujników i mierzących również czynniki środowiskowe wpływające na stan i przebieg eksploatacji konstrukcji. Dane z wszystkich czujników oraz dane historyczne łącznie z danymi z innych podobnych konstrukcji pozwalają na syntezę informacji (*ang. signal fusion*) diagnostycznej o stanie konstrukcji. Łącząc te informacje z danymi z systemu wiedzy o zjawiskach uszkodzenia i zużycia konstrukcji można uzyskać prognozę jej stanu oraz dane o zakresie koniecznego remontu. Coraz częściej do tych celów stosuje się systemy symulacyjne pozwalające bardzo szybko wygenerować wyniki podobne do uzyskanych z sieci czujników na bazie znanych modeli uszkodzenia (wirtualna eksploatacja konstrukcji).

Motyacją stosowania takich systemów jest:

- możliwość unikania awarii o katastroficznych skutkach,
- możliwość optymalizacji procesu eksploatacji (minimalizacja czasu przestojów awaryjnych),
- uzyskiwanie informacji dla konstruktorów niezbędnej do modyfikacji konstrukcji,

- możliwość zminimalizowania kosztów serwisu oraz podniesienie dyspozycyjności urządzenia dzięki możliwości zastosowania metodologii napraw według stanu oraz unikania demontażu i wymiany elementów nieuszkodzonych lub nie zużytych,
- możliwość uniknięcia błędów operatora w ocenie stanu konstrukcji.

Systemy takie można zastosować w lotnictwie wojskowym i cywilnym, sprzęcie wojskowym, infrastrukturze budowlanej, maszynach krytycznych w przemyśle (np. energetyce, chemii, itp.) Bardzo istotnym czynnikiem wpływającym na powszechność zastosowania systemów SHM są przesłanki ekonomiczne. Uzasadnienie to można znaleźć w kilku pracach i polega ono na porównaniu kosztów serwisowania oraz dyspozycyjności konstrukcji. Dla konstrukcji bez zainstalowanych systemów SHM koszty rosną wraz z czasem eksploatacji, a spada ich dyspozycyjność. Natomiast zainstalowanie takich systemów pozwala na utrzymaniu stałej wartości kosztów utrzymania przy również stałej dyspozycyjności konstrukcji. Istnieje jeden warunek stosowalności systemów SHM, który ogranicza powszechność ich wdrożenia, a mianowicie koszt samego systemu musi być mniejszy niż dodatni efekt ekonomiczny związany z jego zastosowaniem.

Konieczność zmniejszenia kosztów systemów SHM jest w chwili obecnej związana z zastosowaniem materiałów i konstrukcji inteligentnych. Pozwalają one na integrację konstrukcji i czujników wbudowanych do niej w jeden system. Takie działania, aby były skuteczne muszą być podjęte na etapie projektowania konstrukcji.

Tendencje do stosowania konstrukcji inteligentnych obserwuje się od początku lat 80 tych, szczególnie w lotnictwie i budownictwie. Ich cechą charakterystyczną jest adaptacja własności tych konstrukcji do warunków eksploatacji. Adaptacja ta dokonuje się w konstrukcjach inteligentnych autonomicznie. W zakresie konstrukcji inteligentnych rozróżnia się konstrukcje wrażliwe na warunki eksploatacji, konstrukcje sterowalne w zakresie ich własności oraz konstrukcje auto – adaptacyjne, dopasowujące swoje własności do potrzeb eksploatacji. W praktyce materiały homogeniczne stosowane powszechnie w konstrukcjach, są zastępowane materiałami kompozytowymi lub innymi multi – materiałami (materiały złożone z warstw o różnych własnościach fizycznych). W zakresie materiałów i konstrukcji inteligentnych wyróżnia się konstrukcje o sterowanej geometrii (kształcie), konstrukcje o sterowanych drganiach oraz konstrukcje o sterowanym stanie. W szczególności ten ostatni typ konstrukcji jest ściśle związany z technikami SHM. Najczęściej wyraża się to poprzez integracje z konstrukcją czujników wykonanych z materiałów inteligentnych (ang. *embedded sensors*) lub członów wykonawczych (ang. *embedded actuators*) mających za zadanie złagodzenie efektów związanych z wystąpieniem awarii. Działanie takich członów polega na generowaniu odkształceń konstrukcji tak, aby zmniejszyć naprężenia w obszarach ich koncentracji. W chwili obecnej poszukuje się zjawisk i metod ich pomiaru, pozwalających na realizację ciągłego monitorowania stanu konstrukcji, poprzez monitorowanie stanu jej materiału.

Badania w kierunku rozwoju systemów SHM są bardzo często inspirowane przez odkrycia w zakresie biologii i funkcjonowania organizmów żywych (ang. *biomimetics*). Bardzo podobne badania prowadzi się w zakresie medycyny i rozwoju metod SHM. Systemy SHM mają zastosowanie nie tylko w czasie eksploatacji konstrukcji, ale w czasie jej wytwarzania, transportu oraz montażu. Umożliwiają one właściwe zarządzanie życiem konstrukcji poprzez odpowiedni dobór misji, jaka może być zrealizowana oraz czynności

serwisowych, jakie wymaga, aby bezpiecznie spełniać stawiane jej wymagania. Poszukiwane są coraz częściej metody, które mogłyby być stosowane w każdej fazie życia produktu, jako najbardziej efektywne ekonomicznie i najłatwiejsze w implementacji.

Podsumowując powyższy przegląd problematyki związanej z SHM, można powiedzieć, że jest to nowa interdyscyplinarna dziedzina skupiająca takie nauki szczegółowe jak mechanika, inżynieria materiałowa, elektronika, informatyka, fizyka, optyka i wiele innych, mająca zastosowanie w eksploatacji konstrukcji lotniczych, budowlanych, samochodowych, energetycznych w tym związanych z energetyką jądrową. Zakres zastosowań jest coraz szerszy.

Wśród wielu metod stosowanych w systemach SHM można wyróżnić metody aktywne lub metody pasywne. W metodach pasywnych obserwuje się sygnały generowane przez wbudowane do konstrukcji czujniki i na ich podstawie ocenia się stan, natomiast metody aktywne polegają na wymuszaniu poprzez odpowiednio wbudowane człony wykonawcze zaburzeń, które wywołują mierzone przez czujniki odpowiedzi konstrukcji. Na podstawie rejestrowanych z czujników sygnałów odpowiedzi rozpoznawany jest stan. Jednymi z szeroko rozpowszechnionych metod SHM są metody oparte o pomiary drgań konstrukcji, wśród nich stosuje się metody symptomowe, w których symptomem uszkodzenia są pewne estymatory sygnałów odpowiedzi konstrukcji lub metody oparte na modelu, w których symptomem uszkodzenia są zmiany parametrów lub struktury modelu.

Wiele metod w praktyce wykorzystywanych do budowy systemów SHM to metody adoptowane z szeroko znanej i stosowanej dziedziny, jaką jest NDT. Klasyczne metody NDT realizowane w sposób ciągły takie jak pomiar emisji akustycznej, fal Lamba, temperatury, czy impedancji mechanicznej lub bezpośrednio monitorowanie pól przemieszczeń metodami wizyjnymi mogą być przykładami zastosowania technik NDT w systemach SHM.

W rozwiązaniach tych można wyróżnić dwie klasy metod; metody, w których czujniki zintegrowane są ze strukturą oraz metody bezstykowe. Te ostatnie mają coraz większe zastosowanie ze względu na miniaturyzację eksploatowanych konstrukcji i koszt instalacji systemów SHM.

Jedną z takich metod, która może być zastosowana jako pasywna lub aktywna, a pomiary realizowane są w sposób bezstykowy, jest metoda oparta o badanie zjawisk termosprężystości towarzyszącym uszkodzeniom, w szczególności ich powstawaniu i propagacji. Zainteresowanie tą metodą jest obecnie coraz większe ze względu na możliwość bezstykowego pomiaru zjawisk cieplnych w konstrukcjach oraz bardzo intensywnym rozwojem technik pomiaru temperatury. Niemniej jednak aparatura termowizyjna jest obecnie kosztowna.

Inną metodą jest metoda wzbudzania w konstrukcji fal powierzchniowych Lamba. W metodzie tej wykorzystywana jest sieć czujników/wzbudników. Dokonywana jest rejestracja i przetwarzania zarówno fal przechodzących jak i odbitych. Ocena stanu konstrukcji dokonywana jest na podstawie zniekształceń fali na skutek wystąpienia uszkodzenia w obszarze obserwacji konstrukcji.

Jeszcze inną metodą jest metoda oparta na śledzeniu w czasie eksploatacji zmian parametrów modeli modalnych monitorowanych konstrukcji. Bardzo efektywna metoda jest metoda filtru modalnego oraz oceny statystycznej wykrytych zmian modelu.

Coraz powszechniejsze jest zastosowanie obrazów wizyjnych do oceny odkształcenia konstrukcji. W ten sposób można śledzić zarówno zmiany statyczne jak i dynamiczne. W zależności od wymagań pomiarowych stosowane są metody wykorzystujące światło laserowe (metody plamkowe, holograficzne, interferometrii siatkowej charakteryzujące się nanometrowymi czułościami pomiarów pól przemieszczeń) lub metody światła niekoherentnego (metody fotogrametryczne, metoda korelacji obrazów, techniki prążków mory i projekcji prążków). Najczęściej stosowaną techniką przetwarzania obrazów jest tutaj korelacja obrazu konstrukcji nieodkształconej oraz konstrukcji odkształconej. Współczesne techniki pomiaru i rejestracji obrazu pozwalają na śledzenie nawet bardzo małych zmian w stanie konstrukcji dzięki zastosowaniu tzw. metod fazowych analizy obrazów prążkowych lub technik podpikselowych w metodach fotogrametrycznych lub korelacji obrazu. Współczesne szybkie kamery pozwalają na rejestrację zmian dynamicznych odkształcenia z częstotliwością do 32000 Hz a impulsowe laserowe źródła światła pozwalają na wyjście z wysokoczułymi metodami interferencyjnymi z laboratorium bezpośrednio na konstrukcję badaną.

W nowych obiektach, dla których bezpieczeństwo eksploatacji ma podstawowe znaczenie obecnie wbudowuje się czujniki w postaci materiałów inteligentnych, piezoelektryków, światłowodów (*fibre Bragg gratings*). Stanowią one nieodłączną jej część i w sposób ciągły zbierają informacje o wyężeniu konstrukcji i stanie materiału. Umożliwia to predykcje własności, ocenę czasu bezpiecznej eksploatacji oraz ocenę zakresu planowanego remontu.

Jak widać z przedstawionego przeglądu stanu wiedzy badania stosowane w zakresie SHM są coraz bardziej precyzyjne i pozwalają na ocenę stanu w zakresie zmian lokalnych w szczególności degradacji materiału konstrukcji [1-10]. Umożliwia to coraz dokładniejsze przewidywania stanu konstrukcji w czasie ich eksploatacji.

2. Koncepcje systemów monitorowania konstrukcji

Nowoczesne systemy diagnostyczne mają na celu ułatwienie podejmowania decyzji o dopuszczeniu badanego obiektu do dalszego użytkowania lub skierowaniu do naprawy albo wycofania z użytku. Ich działanie opiera się na bieżącej analizie parametrów obiektu i informowaniu użytkownika o jego stanie technicznym. Istotną funkcją systemu SHM jest nie tylko zdolność do powiadamiania o występujących w konstrukcji chwilowych zagrożeniach, ale również o przewidywanej prędkości rozwoju degradacji konstrukcji. Ostatecznym celem systemu diagnostycznego jest wykrycie istniejących wad strukturalnych oraz sprecyzowanie ich rodzaju, położenia i wielkości.

W skład każdego systemu diagnostycznego wchodzi trzy główne elementy:

- przetworniki – o ściśle określonej liczbie i lokalizacji,
- system generacji i rejestracji sygnałów,
- system analizy danych pomiarowych.

Określenie liczby i sposobu rozmieszczenia czujników w badanym obiekcie jest związane z przeprowadzeniem analizy wytrzymałościowej w celu zidentyfikowania obszarów koncentracji naprężeń czy maksymalnych odkształceń. Do tego wykorzystuje się najczęściej numeryczne metody modelowania takie jak na przykład metoda elementów skończonych. Informacja na temat stanu naprężeń i odkształceń znacznie ułatwia dobór rodzaju oraz rozmieszczenia czujników w konstruowanym systemie diagnostycznym. Istnieje wiele

rodzajów czujników w zależności od mierzonego parametru. Najczęściej stosowane są czujniki elektryczne, takie jak tensometry czy akcelerometry. Rośnie również zainteresowanie wykorzystaniem czujników optycznych mających wiele zalet w porównaniu do najbardziej rozpowszechnionych czujników elektrycznych. Czujniki wykorzystywane w systemach SHM mierzą naprężenia, przemieszczenia czy przyspieszenia, mierzą parametry zewnętrzne wpływające na badany obiekt, tj. prędkość wiatru, temperatura, stan podłoża. Ze względu na zróżnicowanie mierzonych parametrów w SHM wykorzystuje się jednocześnie kilka rodzajów czujników. W nowoczesnych systemach pomiary zmian parametrów urządzenia są wykonywane w trakcie jego pracy, zatem czujniki muszą pracować w czasie rzeczywistym, a rejestrowane nimi dane – na bieżąco analizowane z zastosowaniem zaawansowanych algorytmów przetwarzania sygnałów.

2.1 System wykorzystujący przetworniki PZT

Zadaniem systemu wykorzystującego przetworniki piezoelektryczne (PZT) jest generacja oraz rejestracja fal sprężystych a następnie przetwarzanie zarejestrowanych sygnałów reprezentujących fale sprężyste w celu detekcji oraz lokalizacji uszkodzeń. System taki może zostać podzielony na dwie części: sprzętową oraz programową - zawierającą oprogramowanie.

W skład pierwszej części wchodzi: generator sygnału, wzmacniacze napięcia, układ akwizycji sygnałów oraz sieć przetworników piezoelektrycznych. Ta ostatnia jest kluczowym elementem całego systemu. Od sposobu jej zaprojektowania zależy skuteczność i czułość systemu całego systemu diagnostycznego. Właśnie zagadnieniu opracowania optymalnej konfiguracji rozmieszczenia przetworników piezoelektrycznych powinno poświęcić się najwięcej czasu przy projektowaniu systemu.

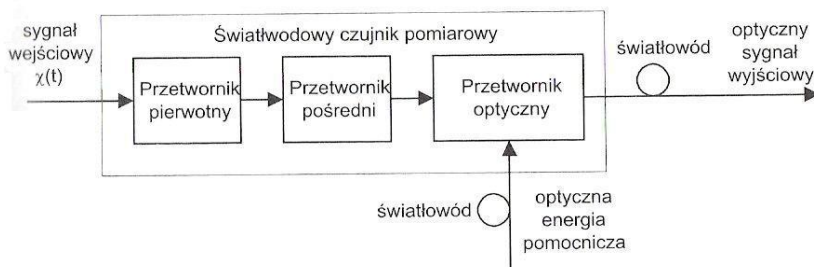
W skład drugiej części wchodzi oprogramowanie realizujące algorytmy filtrowania sygnałów, przetwarzania w celu wydobycia cech sygnałów pozwalających na detekcję i lokalizację uszkodzeń oraz wizualizacji otrzymanych wyników.

Czujniki PZT będą stanowiły podstawę systemu detekcji uszkodzeń w ramach niniejszego projektu.

2.2 System wykorzystujący czujniki optyczne

2.2.1 Czujniki światłowodowe

Burzliwy rozwój telekomunikacji światłowodowej oraz podzespołów i przyrządów optoelektronicznych spowodował powstanie nowej techniki pomiarowej – miernictwa wielkości fizycznych bazującego na czujnikach światłowodowych [11-14]. Pod pojęciem czujnika światłowodowego (Rys. 1) rozumie się przetwornik pomiarowy (lub zespół przetworników), za pomocą którego odbiera się informację o wielkości mierzonej ze źródła informacji i przetwarza ją, powodując powstanie na jego wyjściu sygnału optycznego. Odbiór informacji o wielkości mierzonej i jej przetwarzanie w czujniku światłowodowym, odbywa się bezpośrednio lub pośrednio za pomocą światłowodu [12].



Rys. 1 Schemat światłowodowego czujnika pomiarowego

Wyróżnia się w nim trzy rodzaje przetworników pomiarowych: przetwornik wejściowy nazywany także pierwotnym, przetwornik pośredni i przetwornik optyczny.

Czujniki światłowodowe charakteryzują się własnościami, które umożliwiają ich stosowanie tam, gdzie stosowanie innych rodzajów czujników jest utrudnione lub niemożliwe.

Podstawowymi cechami czujników światłowodowych są:

- nieelektryczny sygnał wyjściowy,
- możliwość pracy w środowiskach palnych, zagrożonych wybuchem i chemicznie agresywnych,
- często możliwość pracy bezdotykowej,
- niewielka masa i wymiary,
- odporność na zakłócenia elektromagnetyczne,
- duża czułość przetwarzania,
- możliwość sprzężenia z systemami telekomunikacyjnymi.

Oprócz wszystkich zalet, właściwych dla czujników światłowodowych, ich podstawową zaletą jest częstotliwościowy charakter sygnału wyjściowego. Sygnał taki jest odporny na zakłócenia amplitudowe, wywołane fluktuacją natężenia źródła światła zasilającego oraz zakłócenia powstałe w torze przetwarzania sygnału optycznego, pod wpływem czynników zewnętrznych.

Dominujące znaczenie w tej grupie czujników, mają światłowodowe czujniki z siatkami Bragga. Światłowodowa siatka Bragga stanowi strukturę o zmiennym współczynniku załamania, którą wykonano w rdzeniu włókna przez jego naświetlenie światłem ultrafioletowym [12].

Fala padająca na granicę między obszarami o różnych współczynnikach załamania ulega częściowemu rozproszeniu. Jeżeli fale odbite od kolejnych elementów struktury są w fazie, to uzyskuje się odbicie wsteczne światła. W efekcie otrzymuje się brak w widmie transmitowanym pewnej długości fali i pojawienie się jej w wiązce odbitej (Rys.). Długość fali odbitej – fali Bragga, opisuje zależność [12]:

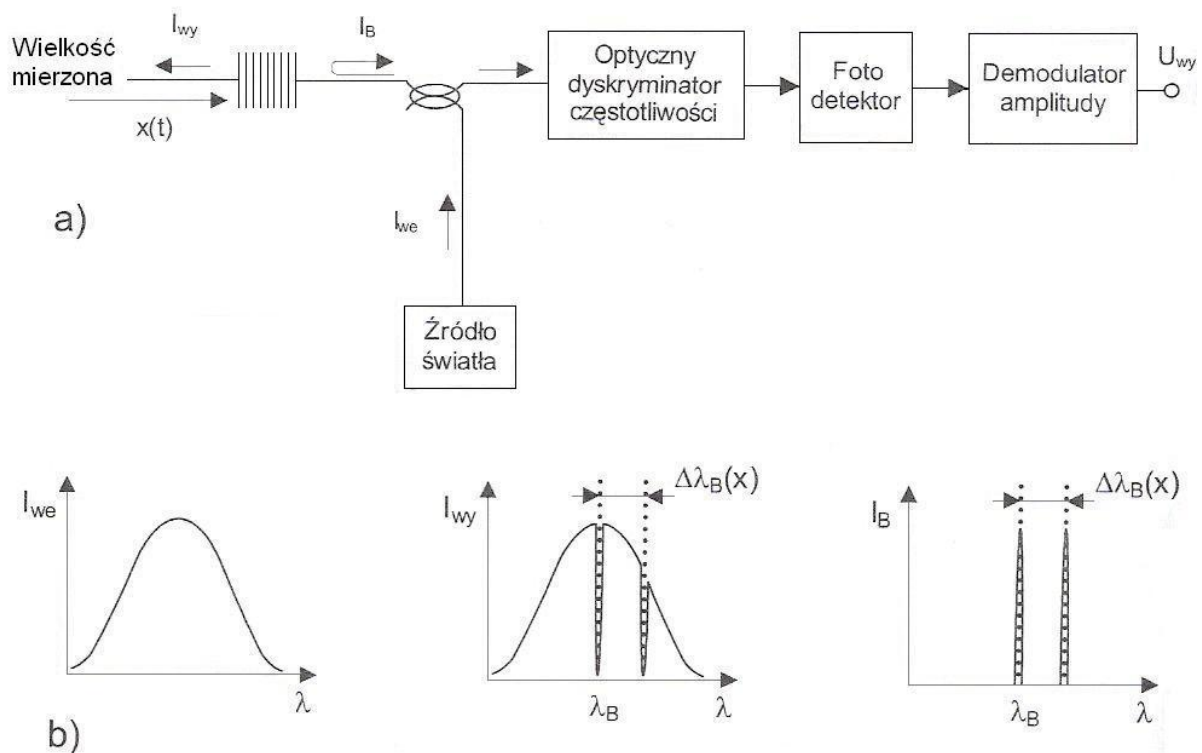
$$\lambda_B = 2n_{ef} \cdot A, \quad (1)$$

gdzie: A - okres siatki, n_{ef} - efektywny współczynnik załamania siatki.

W rzeczywistości nie występuje fala odbita, o jednej długości, ale wiązka odbita o wąskim paśmie, której szerokość zależy od wielu parametrów siatki. Obecnie wytwarzane są różne rodzaje światłowodowych siatek Bragga, z których najczęściej stosowane to: równomierne – o stałym okresie, o zmiennym okresie, skośne i długookresowe.

Światłowodowe siatki Bragga mogą być wykorzystywane w miernictwie jako przetworniki odkształcenia i temperatury, gdyż wielkości te wpływają na efektywny współczynnik załamania n_{ef} jak i okres siatki A . Wykorzystuje się je także w budowie laserowych czujników światłowodowych, w których siatki tworzą wnęki laserów. W ten sposób determinują długość fali świetlnej generowanej przez laser, zależnej od mierzonej wielkości.

Na Rys. przedstawiono schemat toru pomiarowego ze światłowodowym czujnikiem, z siatką Bragga. Światło z szerokopasmowego źródła, wprowadzane jest przez optyczny sprzęgacz o wzmocnieniu 3 dB, do siatki czujnika. Wiązka odbita, której długość fali modulowana jest wielkością mierzoną, doprowadzona jest przez sprzęgacz do dyskriminatora częstotliwości. Dyskriminator częstotliwości przetwarza wiązkę światła o zmodulowanej częstotliwości, na wiązkę o zmodulowanej amplitudzie, która doprowadzona jest do fotodetektora. Na wyjściu demodulatora amplitudy otrzymuje się sygnał odpowiadający wielkości mierzonej.



Rys. 2. Czujnik pomiarowy ze światłowodową siatką Bragga a) schemat toru pomiarowego, b) widmo wiązek światła: wejściowej, wyjściowej i odbitej przez siatkę.

Światłowodowe siatki Bragga są obecnie powszechnie stosowane nie tylko w technice sensorowej, jako przetworniki optyczne odkształcenia, ciśnienia i temperatury, ale na znacznie szerszą skalę w telekomunikacji światłowodowej, jako elementy różnych urządzeń tej techniki.

Obecnie w kilku ośrodkach badawczych na świecie prowadzone są badania nad wykorzystaniem czujników światłowodowych do pomiaru bardzo małych odkształceń, co ma umożliwić rejestrację propagacji fal sprężystych. Jednak badania te są w początkowym stadium. Nie można też znaleźć zbyt wielu informacji na ten temat w literaturze przedmiotu.

Stąd czujniki światłowodowe rozważane są jako czujniki komplementarne w projektowanym systemie monitorowania stanu technicznego konstrukcji opartym o propagację fal sprężystych. W szczególności będą one pomocne w pomiarach zmian temperatury oraz odkształceń wstępnych, które to parametry mają wpływ na zmiany w propagacji fal sprężystych (w tym fal Lamba) [6].

3. Techniki wykorzystujące metodę propagacji fal sprężystych

Wiele różnych technik wykorzystujących metodę propagacji fal sprężystych używanych jest do detekcji, lokalizacji oraz identyfikacji uszkodzeń występujących w elementach konstrukcji. Ye Lu et al. [3] używa w badaniach sieci przetworników piezoelektrycznych umieszczonych na badanym obiekcie do generowania oraz rejestrowania fal sprężystych w celu lokalizacji pęknięcia. Zarejestrowane sygnały są przetwarzane za pomocą transformaty falkowej. Połączona generacja za pomocą przetworników piezoelektrycznych oraz rejestracja za pośrednictwem wibrometru laserowego 3D w celu lokalizacji pęknięcia w płycie wykonanej ze stopu aluminium wykorzystywana jest w pracy [15]. Giurgiutiu et al. [16, 17] wykorzystuje technikę układów fazowych przetworników (z ang. phased array) do lokalizacji uszkodzeń.

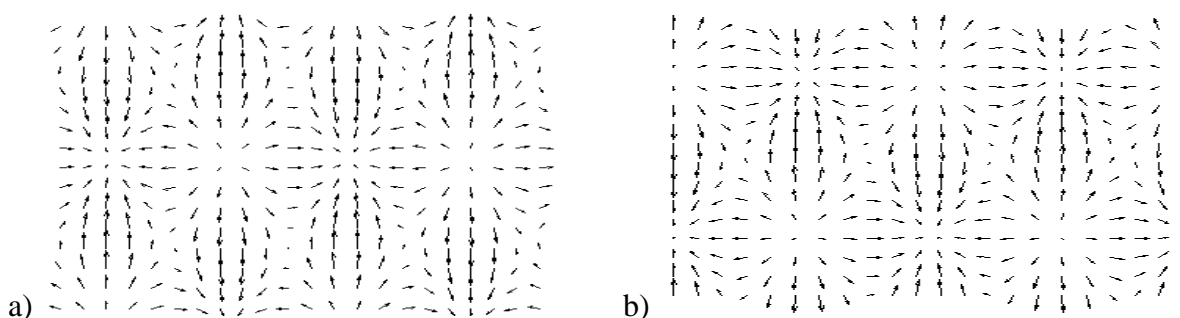
Metoda propagacji fal sprężystych wykorzystuje fakt, że nieciągłości występujące w badanym elemencie powodują zaburzenia w propagacji fal. Wspomniane zaburzenia mogą zostać zarejestrowane za pośrednictwem sieci przetworników piezoelektrycznych a zarejestrowane sygnały po procesie filtracji wykorzystane w algorytmie komputerowym, którego zadaniem jest detekcja, lokalizacja bądź identyfikacja rodzaju uszkodzenia. Najczęściej spotykane w literaturze metody detekcji uszkodzeń wykorzystują w swych algorytmach rejestrowane sygnały propagujących fal Lamba.

3.1. Fale Lamba

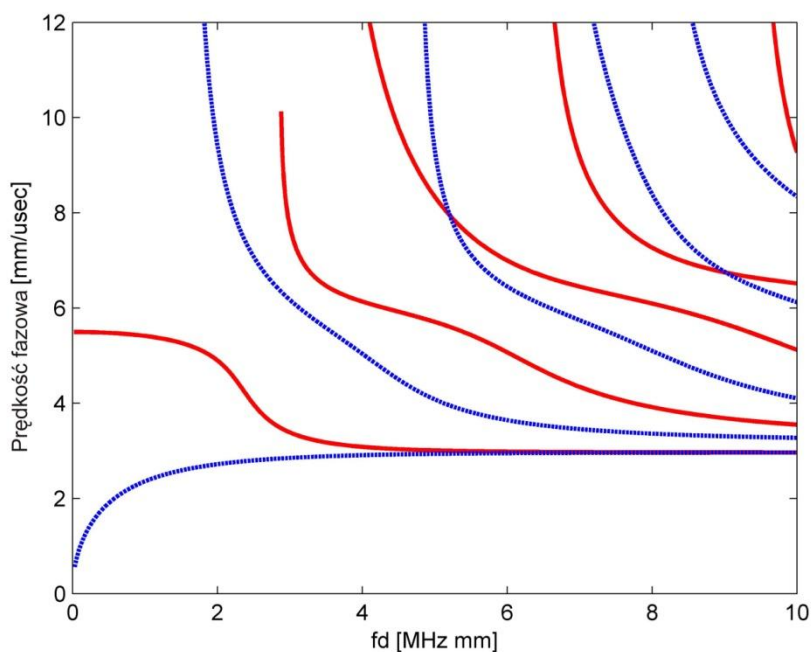
Fale Lamba są odmianą fal sprężystych, które propagują w cienkich elementach konstrukcji ograniczonych dwiema równoległymi powierzchniami. Nazwa pochodzi od nazwiska uczonego, który opracował opis matematyczny zjawiska propagacji fal. Fale Lamba propagują w dwóch formach: symetrycznej (S_0, S_1, S_2, \dots) i antysymetrycznej (A_0, A_1, A_2, \dots). Formy te często nazywane są modami (z ang. mode). Liczba poszczególnych form propagujących w danym obiekcie zależy od iloczynu częstotliwości wymuszenia i grubości elementu. W płycie wykonanej ze stopu aluminium podstawowe dwie formy: S_0 i A_0 propagują do 2 MHz·mm dla większych wartości iloczynu w płycie propagować będą kolejne formy fal Lamba (porównaj Rys. 4–5). Każda z form fal propaguje z inną prędkością (dyspersja), a więc fakt występowania wielu form (co najmniej dwóch) utrudnia dość znacznie, a czasami wręcz uniemożliwia przeprowadzenie procesu lokalizacji uszkodzeń. Należy nadmienić, że istnieją metody, które pozwalają na wygenerowanie dwóch podstawowych form Lamba, przy czym amplituda jednej jest wielokrotnie większa od drugiej i w praktyce druga forma zawiera się w szumie pomiarowym, w zarejestrowanych sygnałach. Metody te wykorzystują pewne zakresy częstotliwości, w których przetwornik generuje np. podstawową formę symetryczną o dominującej amplitudzie, a formę antysymetryczną

o bardzo małej amplitudzie. Dla innego zakresu częstotliwości dominować w sygnałach będzie z kolei forma antysymetryczna [16].

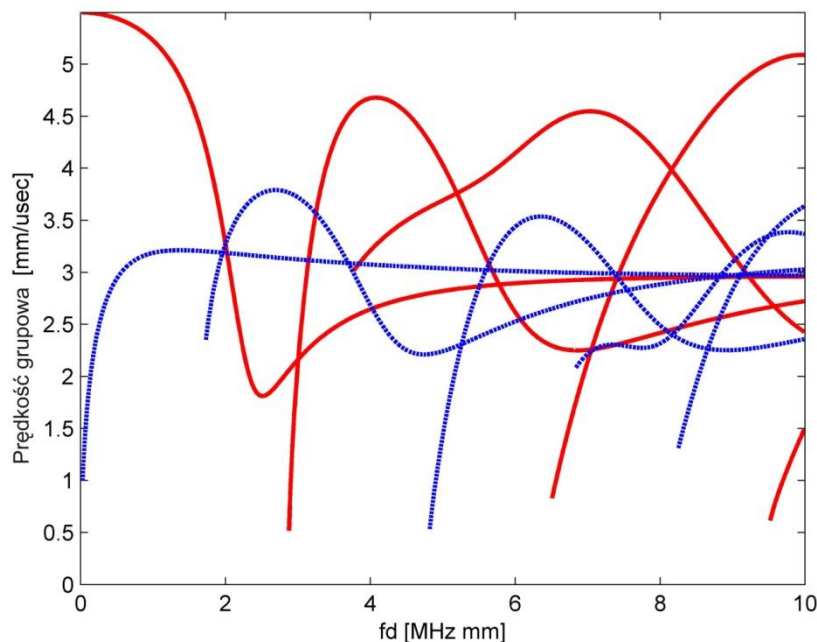
Dla lepszego wyobrażenia zachowania się fal Lamba sporządzono wykresy pola przemieszczeń wyznaczone na podstawie wzorów podanych w pracy [1]. Przemieszczenia cząstek materiału podczas propagacji postaci symetrycznej i antysymetrycznej przedstawiono na (Rys. 3a, b).



Rys. 3. Postacie fal Lamba: a) symetryczna, b) antysymetryczna



Rys. 4. Krzywe dyspersji prędkości fazowych: postacie symetryczne (czerwone linie) i antysymetryczne (niebieskie linie przerywane)



Rys. 4. Krzywe dyspersji prędkości grupowych: postacie symetryczne (czerwone linie) i antysymetryczne (niebieskie linie przerywane)

Do generacji oraz rejestracji najczęściej wykorzystywane są przetworniki piezoelektryczne [2–6] choć można znaleźć prace, w których do wzbudzenia oraz rejestracji sygnałów propagujących fal korzystano z konwencjonalnych przetworników ultradźwiękowych [7]–[8]. Przeprowadzono również próby wykorzystywania lasera do generacji fal oraz wibrometru laserowego do rejestracji fal sprężystych [8]–[10].

3.2. Generacja i rejestracja fal a zjawisko piezoelektryczne

Opracowywane w ramach projektu stanowisko ma umożliwić generację oraz rejestrację fal sprężystych (Lamba) za pośrednictwem przetworników piezoelektrycznych. Przetworniki piezoelektryczne wykorzystują dwa zjawiska fizyczne: prosty i odwrotny efekt piezoelektryczny. Prostym efektem piezoelektrycznym nazywane jest zjawisko polegające na powstawaniu indukcji w elemencie piezoelektrycznym pod wpływem naprężeń. W konsekwencji na ściankach przetwornika gromadzą się ładunki elektryczne. Odwrotny efekt piezoelektryczny polega na powstawaniu odkształceń w elemencie piezoelektrycznym pod wpływem pola elektrycznego. Dzięki wykorzystywaniu obu zjawisk fizycznych możliwa jest zarówno generacja fal jak i rejestracja fal sprężystych. Generowanie fal polega na uzyskiwaniu odkształceń pod wpływem różnicy potencjałów między elektrodami. Rejestracja fal sprężystych natomiast polega na rejestracji różnic potencjału między elektrodami na skutek doznanych odkształceń spowodowanych propagacją fal sprężystych.

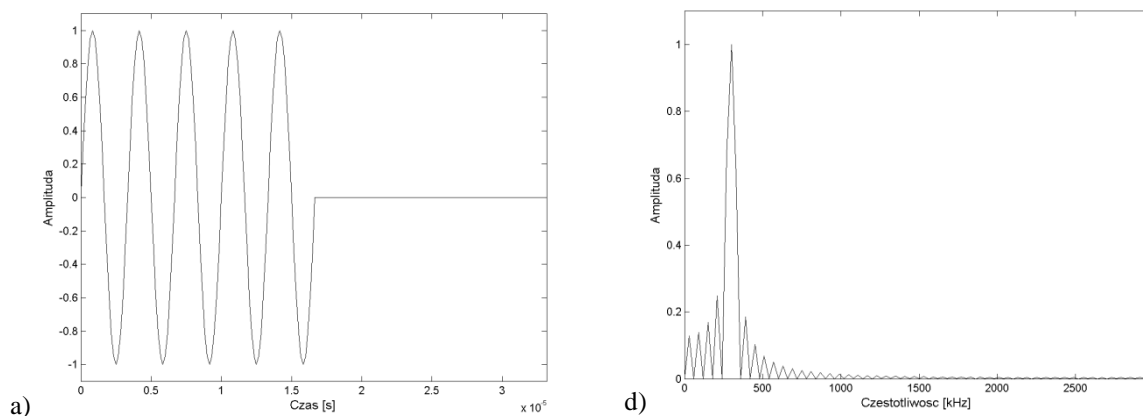
3.3. Dobór parametrów sygnału wzbudzenia

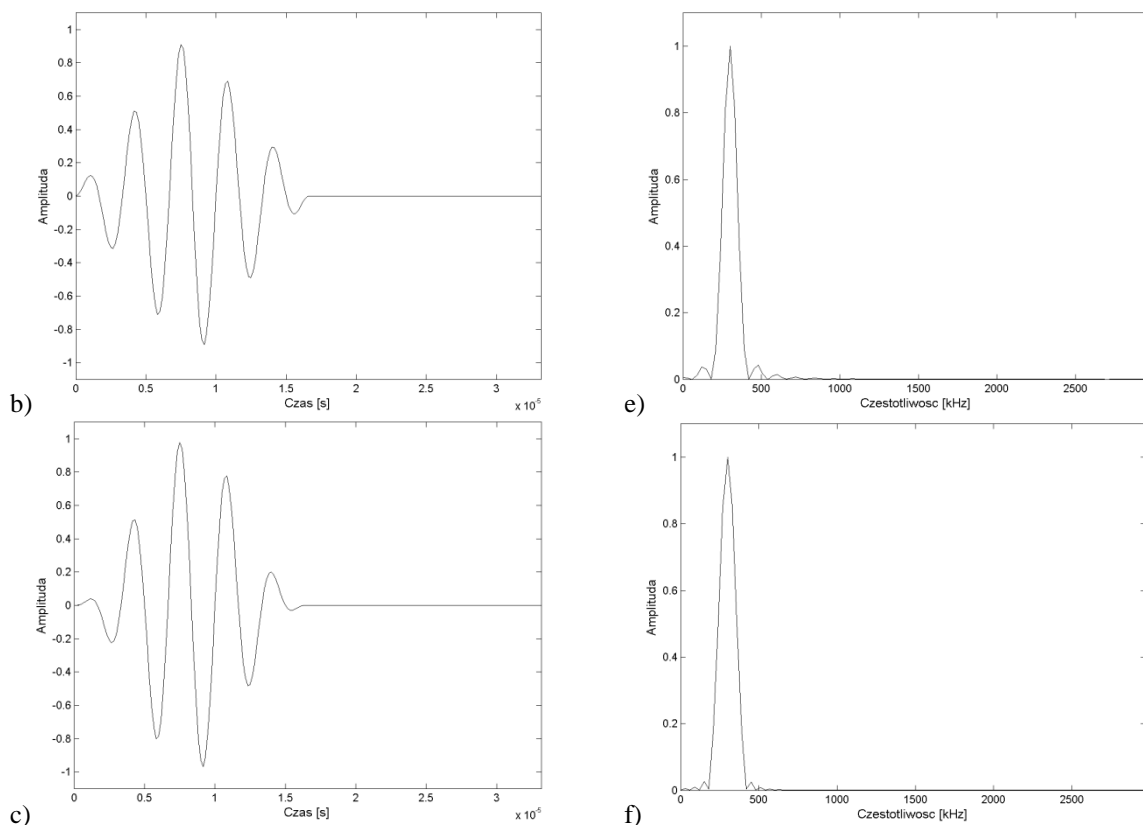
Generowane sygnały będą mieć postać kilku cykli funkcji sinus zmodulowanej oknem Hanninga. Założono, że będzie możliwość wyboru liczby cykli funkcji sinus (maksymalnie

15 cykli) oraz wyboru okna modulującego. Modulacja sygnału konieczna jest, aby otrzymać tzw. paczkę falową, w przypadku odbicia fal od nieciągłości w sygnale zostaje również zarejestrowana paczka falowa. W ten sposób na podstawie czasu występowania paczki falowej można łatwo obliczyć odległość propagacji. Modulacja pozwala skupić energię sygnału w wąskim paśmie częstotliwości. Ponieważ fale Lamba są dyspersyjne, istotne jest, aby uzyskać jak najwęższe pasmo składowych częstotliwościowych sygnału. Jeżeli pobudzone by fale, której składowe częstotliwościowe zajmowałyby szeroki zakres częstotliwości każda fala składowa odpowiadająca składowej częstotliwości propagowałaby z inną prędkością w efekcie paczka falowa zostałaby rozciągnięta w czasie oraz zdeformowana. Gdy energia sygnału zgromadzona jest w węższym paśmie częstotliwości wtedy zmiany prędkości zależne od częstotliwości są mniejsze, w związku z tym paczka falowa jest mniej deformowana.

Na 5a, b, c przedstawiono zmodulowane sygnały czasowe zaś na Rys 5d, e, f widma częstotliwościowe tych sygnałów dla różnych okien czasowych wykorzystywanych do modulacji funkcji sinus. Analizując widma sygnałów dostrzegamy, że w przypadku modulacji oknem prostokątnym (Rys. 5d) otrzymujemy najszersze pasmo częstotliwości, w którym skupiona jest energia sygnału. Węższe pasmo częstotliwości otrzymujemy dla przypadku, w którym wykorzystano trójkątne okno czasowe (Rys. 5e). Najlepsze rezultaty, a więc najwęższe pasmo częstotliwości, w którym zgromadzona jest energia sygnału otrzymano w przypadku okna Hanninga (Rys. 5f). W tym ostatnim przypadku łatwo zauważyć, że boczne prążki w widmie mają bardzo małe amplitudy.

Oprócz doboru modulacji, umożliwiającej wygenerowanie sygnału o wąskim paśmie częstotliwości istotne jest również dobór częstotliwości nośnej sygnału. Aby zminimalizować zjawisko dyspersji fal częstotliwość nośna powinna znajdować się na „płaskim” fragmencie wykresu prędkości grupowej analizowanej postaci fal Lamba (Rys. 4).





Rys. 5. Sygnały o różnej modulacji (od góry okno prosiokątne, trójkątne oraz Hanninga) przedstawione w: a–c) dziedzinie czasu, d–f) dziedzinie częstotliwości

4. Konceptje algorytmów lokalizacji uszkodzeń bazujące na modelu numerycznym

Początkowym etapem projektowania systemu jest wirtualne prototypowanie. Polega on na prowadzeniu symulacji komputerowych działania poszczególnych podsystemów albo całego systemu. W tym celu rozwijane jest oprogramowanie, które będzie przydatne przy projektowaniu systemu detekcji i lokalizacji uszkodzeń wykorzystującego metodę propagacji fal sprężystych.

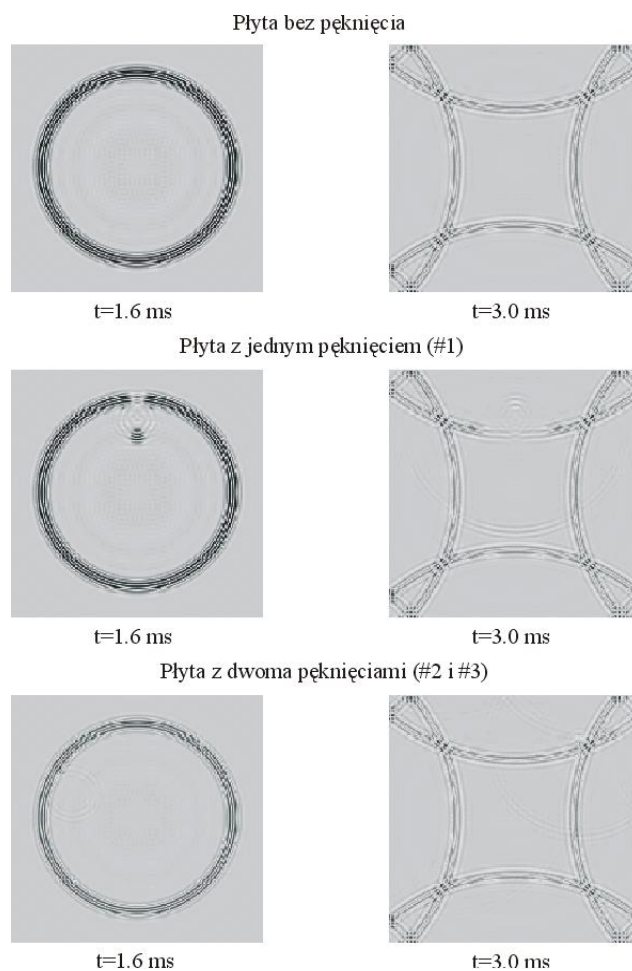
Aktualnie obiektem, który stanowi przedmiot detekcji oraz lokalizacji uszkodzeń jest kwadratowa płyta wykonana ze stopu aluminium o wymiarach 1000mm x 1000mm x 10 mm zamodelowana za pomocą *Metody Elementów Spektralnych*. Płyta została podzielona na 1600 elementów spektralnych. Uszkodzenia zostały zamodelowane na dwa sposoby: jako redukcja sztywności w wybranym elemencie oraz jako rozdzielenie węzłów między wybranymi elementami spektralnymi. Zaproponowano dwie konfiguracje rozmieszczenia przetworników: 12 przetworników rozmieszczonych na okręgu o promieniu $r=50\text{mm}$ (Rys. 6a) oraz dodatkowy przetwornik w środku okręgu i konfiguracja stanowiąca układ fazowy przetworników (Rys. 6b). Układ fazowy składa się z dwóch pasków po 9 przetworników w każdym (środkowy przetwornik wspólny). Odstępy między przetwornikami w jednym pasku wynoszą odpowiednio: 6, 7, 6, 3, 3, 6, 7, 6 [mm]. Nierównomierny odstęp między przetwornikami wynika ze specyficznego rozmieszczenia węzłów w elemencie spektralnym (odczyt oraz generacja fal dokonywane są w węzłach elementów spektralnych). Użyty odstęp między przetwornikami spełnia założenie konieczne do prawidłowej pracy układu fazowego. Odstęp

pomędzy dwoma sąsiednimi przetwornikami musi być mniejszy lub równy połowie długości generowanej fali.



Rys. 6. Konfiguracje rozmieszczenia przetworników

W praktyce symulacja komputerowa wyglądała w ten sposób, że w miejscu płyty, w którym znajdują się przetworniki piezoelektryczne dokonywano generacji oraz rejestracji sygnałów. Należy dodać, że nie modelowano samych przetworników. Stworzony model numeryczny pozwala na symulację propagacji tylko formy falowej A_0 fal Lamba. W praktyce dla używanego zakresu częstotliwości wymuszenia (100kHz) w płycie o grubości jak w modelu (10mm) mogą propagować dwie formy fal Lamba: A_0 i S_0 . W pierwszej odmianie dominuje ruch poprzeczny natomiast w drugiej, dominuje ruch podłużny objętości materiału. Skrót A_0 i S_0 pochodzą od pierwszych liter nazw angielskich *anti-symmetric* oraz *symmetric*, indeks oznacza numer danej postaci. Należy nadmienić, że każda z tych postaci propaguje się w konstrukcji z inną prędkością, poza tym prędkość propagacji zależy od częstotliwości wymuszenia. Dla wyższych zakresów częstotliwości w płycie będą propagować także wyższe postaci falowe np. A_1 , A_2 , S_1 i S_2 , itd. W rzeczywistym obiekcie wybierając wymiary, geometrię, a przede wszystkim częstotliwość wymuszenia można sprawić tak, że propagują w nim dwie podstawowe formy falowe A_0 i S_0 , przy czym dla używanej częstotliwości amplituda jednej jest wielokrotnie mniejsza od amplitudy drugiej. Można więc przyjąć, że w elemencie propaguje tylko jedna forma fal Lamba. Takie podejście bardzo mocno ułatwia analizę zarejestrowanych sygnałów. W przypadku, gdy w badanym elemencie propagują dwie formy fal Lamba analiza zarejestrowanych sygnałów jest bardzo skomplikowana, podwodem tego jest fakt, że każda z form propaguje z inną prędkością grupową. Po odbiciu fal od krawędzi elementu oraz nieciągłości w nim występujących za każdym razem zarejestrowane zostają dwie paczki związane z dwiema formami fal Lamba. Ustalenie w takim przypadku, która paczka falowa związana jest, z którą postacią fal, a co ważniejsze, z którą nieciągłością występującą w elemencie czy krawędzią staje się bardzo trudne, a w wielu wypadkach wręcz niemożliwe. Przykład wizualizacji propagacji fal sprężystych otrzymany z symulacji komputerowej dla przypadku: płyty bez uszkodzenia, płyty z jednym uszkodzeniem oraz przypadku z dwoma uszkodzeniami został zaprezentowany na Rys. 7. Analizując dwa ostatnie przypadki – z uszkodzeniami, z łatwością dostrzegamy dodatkowe odbicia fal wywołane wspomnianymi nieciągłościami. Odbicia te zarejestrowane zostają w sygnałach i następnie są wykorzystywane przez specjalne algorytmy przetwarzania sygnałów, co umożliwia zlokalizowanie miejsca występowania nieciągłości.



Rys. 7. Wizualizacja propagacji fal sprężystych dla przypadku płyty: bez uszkodzenia, z uszkodzeniem oraz z dwoma uszkodzeniami

4.1. Metody lokalizacji uszkodzeń – symulacje numeryczne

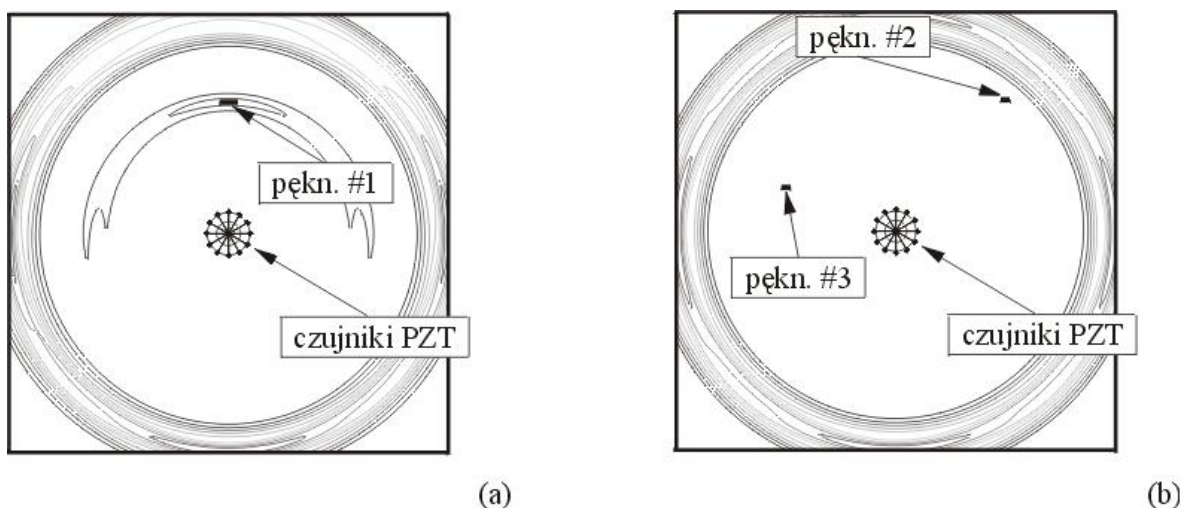
W tej części raportu zaprezentowano wyniki symulacji lokalizacji uszkodzeń wykorzystywane przez zaproponowane konfiguracje rozmieszczenia przetworników piezoelektrycznych. Należy podkreślić, że proces lokalizacji odbywał się dla sygnałów otrzymanych z komputerowej symulacji propagacji fal sprężystych zarówno w płycie z uszkodzeniami jak i bez. Dodatkowo podkreślić należy, że działanie algorytmów lokalizacji uszkodzeń bardzo silnie zależy od rozmieszczenia przetworników. Stąd algorytmy te będą rozszerzone o nowe konfiguracje przetworników oraz nowe sposoby przetwarzania sygnałów.

4.1.1 Metoda I

Ta metoda używana jest do lokalizacji uszkodzeń z wykorzystaniem konfiguracji z Rys. 6a). W pierwszym kroku zaproponowanego algorytmu dokonywana jest generacja oraz rejestracja sygnałów. W tym celu fale generowane są w przetworniku znajdującym się w środku konfiguracji, natomiast rejestracja odbywa się przy wykorzystaniu dwunastu przetworników rozmieszczonych na okręgu.

Na Rys. 8 przedstawione zostały przykładowe mapy wpływu uszkodzeń otrzymane dla przypadku, gdy w płycie występuje jedno uszkodzenie w postaci pęknięcia zmęczeniowego oraz dwóch uszkodzeń, również w postaci pęknięć zmęczeniowych. W przypadku

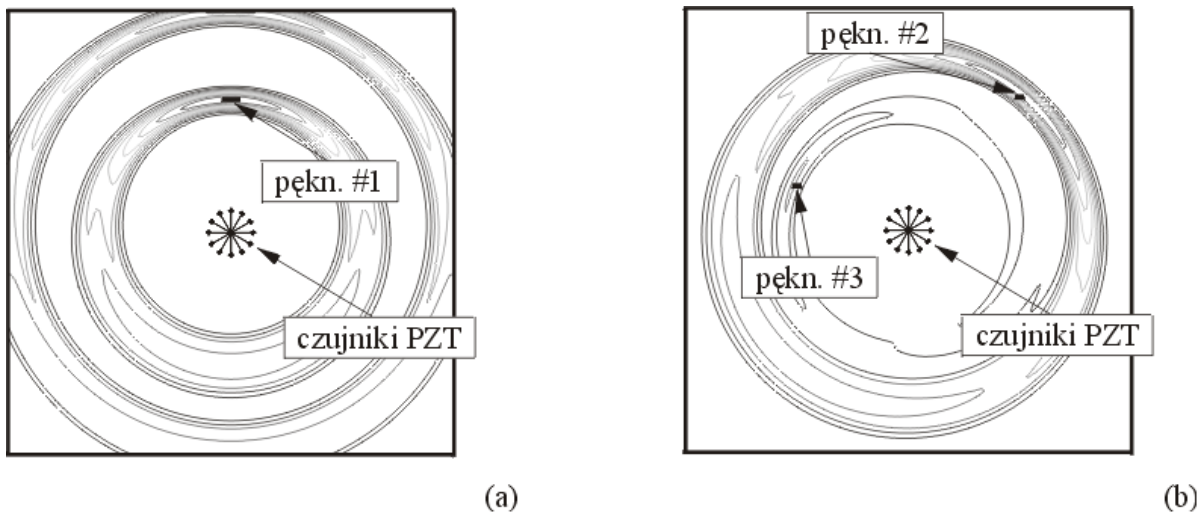
występowania jednego uszkodzenia widzimy, że bez problemu zostało ono zlokalizowane przez zaproponowany algorytm. Analizując przypadek z dwoma uszkodzeniami a więc Rys. 8b) z łatwością dostrzegamy, że żadne z uszkodzeń nie zostało zlokalizowane. W obu przypadkach widzimy bardzo dokładnie przebieg krawędzi płyty na otrzymanych mapach. Powodem, przez który żadne z dwóch uszkodzeń w drugim przypadku nie zostało zlokalizowane jest kąt orientacji uszkodzenia w stosunku do matrycy przetworników. W analizowanym przypadku oba uszkodzenia są tak usytuowane, że powodują bardzo słabe odbicie fal od uszkodzeń w stosunku do odbicia fal od krawędzi płyty.



Rys. 8. Mapy uszkodzeń dla: a) pęknięcia zmęczeniowego, b) dwóch pęknięć zmęczeniowych

Problem ten rozwiązano poprzez użycie w algorytmie sygnałów różnicowych. W tym przypadku musimy posiadać informację o stanie początkowym obiektu (brak uszkodzeń). Sygnały te tworzone są przez różnicę sygnałów zarejestrowanych dla płyty bez uszkodzenia i sygnałów zarejestrowanych dla płyty z uszkodzeniami.

Mapy utworzone w wyniku zastosowania w zaproponowanym algorytmie sygnałów różnicowych zaprezentowane zostały narys. 8. Po analizie obu map można łatwo zauważyć, że mapy wskazują lokalizację zarówno jednego jak i dwóch uszkodzeń.

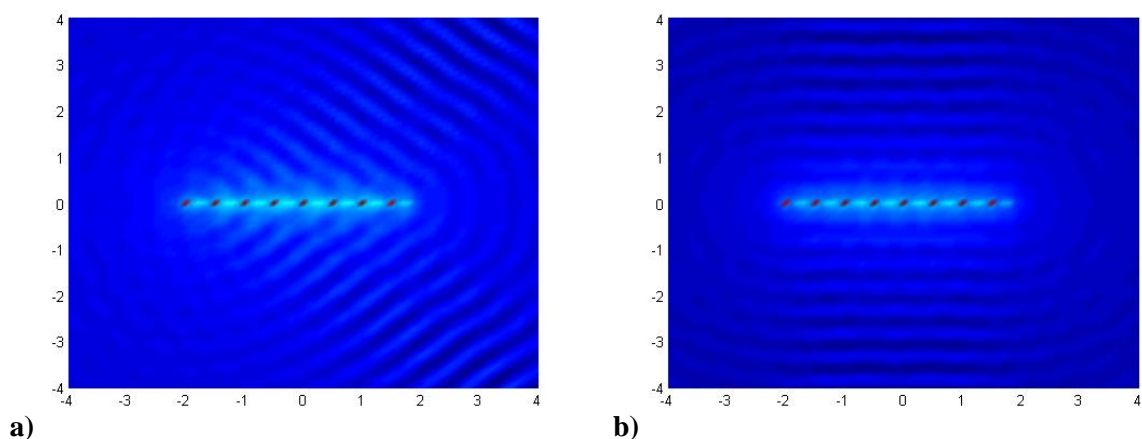


Rys. 8. Mapy uszkodzeń utworzone dla sygnałów różnicowych: a) pęknięcia zmęczeniowego, b) dwóch pęknięć zmęczeniowych

4.1.2 Metoda II

W tej części opracowania przedstawiono algorytm metody lokalizacji uszkodzeń wykorzystujący konfigurację przetworników zaprezentowaną na Rys. 6b. Stanowi ona tzw. układ fazowy przetworników (z ang. *phased array*). Omówienie wyników zostanie poprzedzone przez kilka zdań opisujących układy fazowe przetworników.

Na Rys. 9 przedstawiono wyniki symulacji interferencji fal wygenerowanych przez 16 źródeł z odpowiednio dobranym opóźnieniem generacji. Odległość między przetwornikami równa jest połowie długości generowanej fali. Po analizie rysunków dostrzec można, że tworzony front falowy jest symetryczny względem linii łączącej źródła. Wynika to z własności funkcji trygonometrycznej używanej we wzorach na obliczanie czasu opóźnienia generacji.

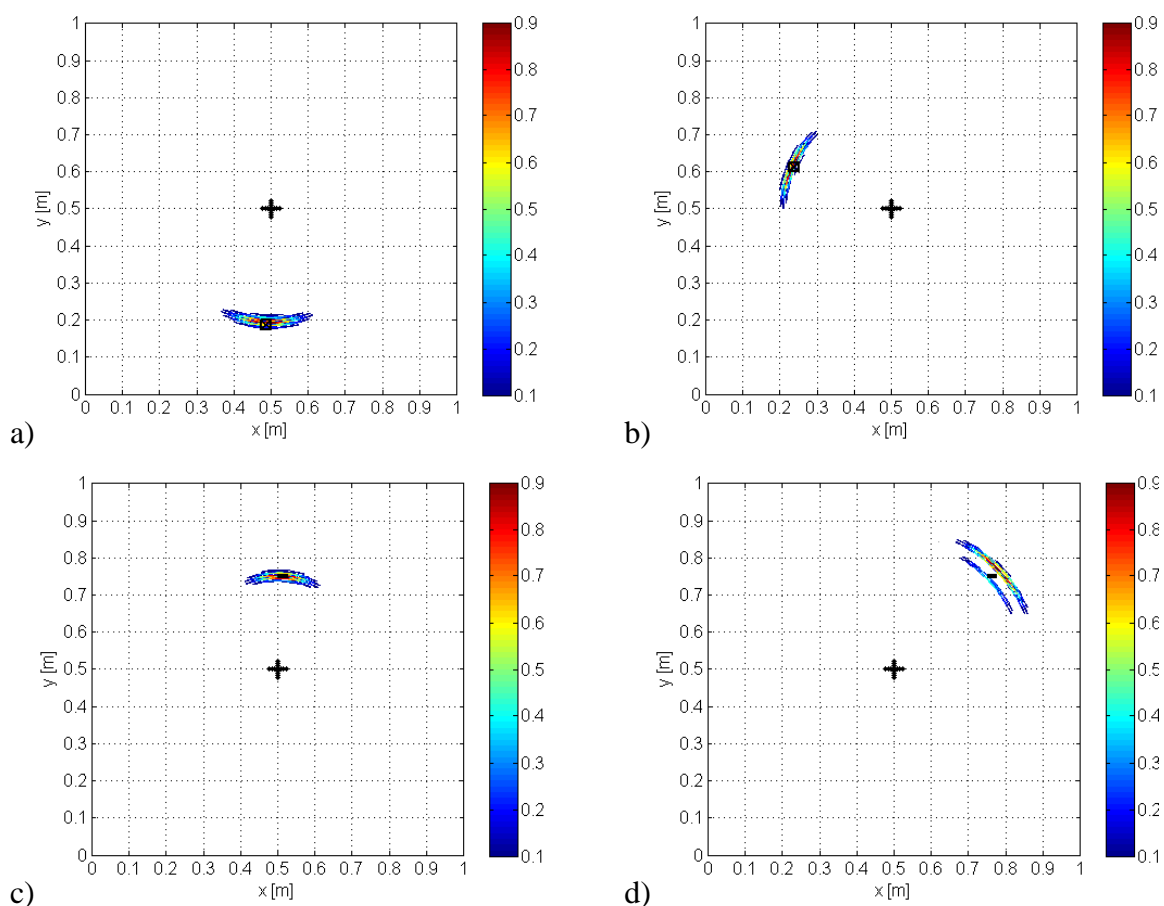


Rys. 9. Rezultat symulacji interferencji fal z 16 źródeł z opóźnieniem tak dobranym aby utworzyć front falowy propagujący pod kątem: a) 50° , b) 90°

Dla sprawdzenia poprawności działania algorytmu przetwarzania sygnałów dla zaproponowanej konfiguracji rozmieszczenia przetworników przeprowadzono symulacje komputerowe propagacji fal sprężystych w modelu płyty opisanym wcześniej.

W pierwszym przypadku, uszkodzenie zamodelowano jako 90% redukcja sztywności w jednym kwadratowym elemencie spektralnym o wymiarach 25 mm x 25 mm, jego powierzchnia stanowi 6% powierzchni całej płyty. Przeanalizowano wyniki dla dwóch miejsc występowania uszkodzenia. Na Rys. 10b) przedstawiono wyniki lokalizacji uszkodzenia, w obu położeniach. Analizując rysunki można stwierdzić, że w obu przypadkach uszkodzenie zostało jednoznacznie zlokalizowane.

W drugim przypadku uszkodzenie zamodelowano jako rozdzielenie węzłów między dwoma sąsiadującymi ze sobą elementami spektralnymi, symuluje to pęknięcie zmęczeniowe o długości 25 mm. Wyniki lokalizacji uszkodzenia zostały uwidocznione na Rys. 10c i d). Analizując wyniki można zauważyć, że również tym razem w obu przypadkach uszkodzenie zostało prawidłowo zlokalizowane.



Rys. 10. Rezultaty lokalizacji uszkodzenia zamodelowanego jako: a, b) redukcja sztywności, c, d) rozdzielenie węzłów

Przeprowadzone symulacje dowodzą, że przy użyciu zaproponowanej konfiguracji rozmieszczenia przetworników oraz algorytmu przetwarzania sygnałów bez problemu mogą zostać zlokalizowane dwa rodzaje uszkodzeń.

5. Konceptje platformy sprzętowej wykorzystującej przetworniki piezoelektryczne

Opracowana została koncepcja budowy platformy sprzętowej systemu, służącego do generacji oraz rejestracji fal sprężystych wykorzystywanych w diagnostyce stanu technicznego konstrukcji. Zadaniem platformy sprzętowej jest generacja oraz rejestracja fal sprężystych. Do generacji oraz rejestracji wykorzystywane są przetworniki piezoelektryczne. Z tego względu system musi być odpowiednio zaprojektowany, gdyż przetworniki piezoelektryczne zasilane są napięciami rzędu 200V i dodatkowo stanowią obciążenie pojemnościowe, co komplikuje budowę wzmacniacza sygnału dla tych elementów. Na wielokanałowy system generacji oraz rejestracji fal sprężystych składają się następujące podsystemy:

- generator sygnałów,
- wzmacniacz piezoelektryczny,
- multiplekser,
- wzmacniacze ładunkowe,
- układ akwizycji sygnałów,
- interfejs sprzęgający z komputerem PC,
- przetworniki piezoelektryczne.

Przejdźmy teraz do omówienia poszczególnych podsystemów. Generator sygnałów musi umożliwiać generację sygnałów w postaci kilku (w praktyce 3-10) cykli funkcji sinus zmodulowanej oknem Hanninga. Wykorzystanie tego typu sygnału energia skupiona jest w wąskim paśmie częstotliwości. Liczba cykli sygnału jest kompromisem między długością sygnału w dziedzinie czasu a szerokością pasma częstotliwości, w którym zawarta jest energia sygnału.

Wzmacniacz piezoelektryczny wzmacnia sygnały niskonapięciowe otrzymane z generatora, tak, aby w efekcie otrzymać sygnały o napięciu międzyszczytowym wynoszącym 200V. Przy projektowaniu wzmacniacza należy uwzględnić fakt, że przetwornik piezoelektryczny stanowi głównie obciążenie pojemnościowe. Impedancja elementu piezoelektrycznego zmniejsza się ze wzrostem częstotliwości sygnału zwiększając tym samym wartość prądu płynącego w obwodzie zasilającym przetwornik. W tego typu systemach używane są zwykle częstotliwości z przedziału 50–500kHz. Przy tego rodzaju obciążeniach i dodatkowo napięciach wyjściowych oraz częstotliwościach wzmacniacz należy tak zaprojektować, aby nie pojawiały się problemy ze stabilnością.

Zadaniem multipleksera jest przełączanie między poszczególnych kanałów tak, aby możliwy był odczyt sygnałów ze wszystkich kanałów, a jednocześnie możliwość generacji sygnałów w wybranym kanale.

Wzmacniacze ładunkowe pozwalają przetworzyć ładunek zgromadzony w przetworniku piezoelektrycznym na napięcie rejestrowane w układzie pomiarowym. Bez wykorzystania wzmacniaczy na wyniki pomiaru mają wpływ wartości pojemności przewodu pomiarowego objawia się to tym, że zarówno długość jak i sposób jego ułożenia przewodu ma wpływ na pomiar. W przypadku wykorzystania wzmacniaczy ładunkowych eliminuje się wpływ długości oraz sposobu ułożenia przewodów na pomiary.

Układ akwizycji sygnałów umożliwia w zależności od rozwiązania jednoczesną akwizycję we wszystkich kanałach lub jak w proponowanym rozwiązaniu sekwencyjnie we wszystkich kanałach poprzez multipleksowanie.

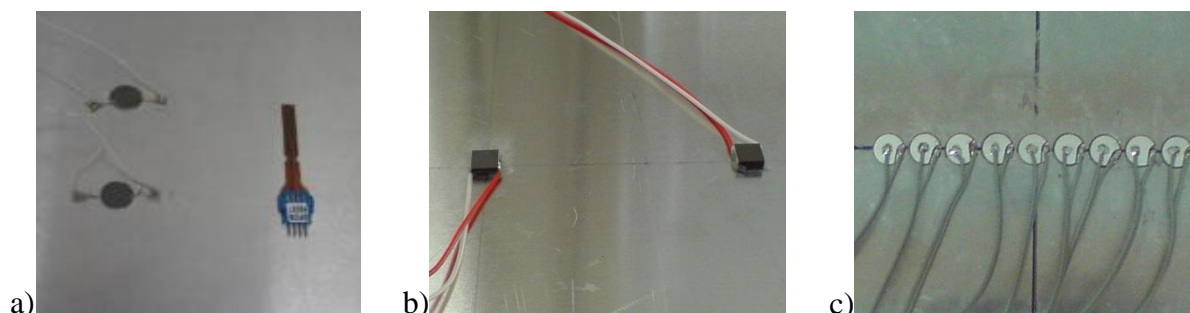
System powinien być również wyposażony w interfejs sprzęgający z komputerem PC celem umożliwienia przesyłu zarejestrowanych sygnałów (zakładamy, że przetwarzanie sygnałów odbywa się już na komputerze PC). Interfejs powinien również umożliwiać sterowanie pracą urządzenia oraz ustawienie parametrów urządzenia dotyczących generowanych sygnałów.

Ostatnim z podsystemów jest sieć przetworników piezoelektrycznych, które w oparciu o prosty oraz odwrotny efekt piezoelektryczny pozwalają zarówno na rejestrację jak i generację fal sprężystych.

Przy opracowywaniu koncepcji platformy sprzętowej założono, że przetwarzanie sygnałów odbywać się będzie w komputerze PC przy wykorzystaniu środowiska MATLAB[®]. Celem oprogramowania jest lokalizacja uszkodzeń występujących w badanych elementach konstrukcji. Przed procesem lokalizacji uszkodzeń realizowany będzie proces filtracji sygnałów, którego celem jest pozostawienie sygnałów znajdujących się w paśmie częstotliwości o tej samej rozpiętości co pasmo sygnału generowanego.

5.1 Konstrukcja przetworników PZT

Następną ważną rzeczą jest dobór przetworników piezoelektrycznych. Na Rys. 11 przedstawiono różne rodzaje przetworników piezoelektrycznych, które zakupiono w celu testowania przydatności przetworników do generacji i rejestracji fal sprężystych. Przetworniki Piezo Systems Inc. w postaci dysków (Rys. 11a) posiadają elektrody na górnej oraz dolnej powierzchni, przez co trudno jest podłączyć przewody sygnałowe do elektrod. Jeden z przewodów musi być przylutowany do dolnej elektrody, co powoduje z kolei trudności w przyklejeniu przetwornika oraz może powodować problemy przy generacji i rejestracji fal ze względu na obecność przewodu między przetwornikiem a płytą. Przetworniki Qp22b w postaci pasków z zalaminowanymi elementami piezoelektrycznymi (Rys. 11a) nie posiadają tych wad. Wyprowadzenia od elektrod występują w postaci złącza. Wadą tych przetworników jest niska częstotliwość rezonansowa ok. 57kHz. Z kolei przetworniki Noliac CMAP06 (Rys. 11b) mają elektrody wyprowadzone po bokach. Są to wielowarstwowe przetworniki, w których zdecydowanie dominuje ruch poprzeczny, więc amplitudy postaci antysymetrycznej fal Lamba będą o wiele większe niż amplitudy postaci symetrycznych.



Rys. 11. Przetworniki piezoelektryczne: a) Piezo Systems Inc. (od lewej) oraz Mide Qp22b

(po prawej), b) Noliac CMAP06, c) CeramTec

Przetworniki firmy CeramTec w postaci dysków (Rys. 11c) mają obie elektrody wyprowadzone na górnej powierzchni, co upraszcza proces przyłączenia przewodów. Ze względu na charakter wytwarzanych odkształceń umożliwiają generację zarówno postaci symetrycznych jak i antysymetrycznych.

Ponieważ przetworniki piezoelektryczne zasilane są napięciami rzędu 200V, aparatura badawcza musi umożliwiać generację sygnałów o wartości międzyszczytowej wynoszącej 200V.

Bibliografia

- [1] D. E. Adams: *Health Monitoring of Structural Materials and Components*, John Willey & Sons, Ltd, 460 pages, 2007.
- [2] V. Giurgiutiu: *Structural health monitoring with piezoelectric wafer active sensors*, 16th International Conference of Adaptive Structures and Technologies ICAST–2005, France.
- [3] Y. Lu, L. Ye, Z. Su: *Crack identification in aluminium plates using Lamb wave signals of a PZT sensor network*, *Smart Materials and Structures*, 15, pp. 839–849, 2006.
- [4] J.B. Ihn, F.–K. Chang: *Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built–in piezoelectric sensor/actuator network: I. Diagnostics*, *Smart Material and Structures* 13, pp. 609–620, 2004.
- [5] V. Giurgiutiu: *Lamb wave generation with piezoelectric wafer active sensors for Structural Health Monitoring*, *Smart Structures and Materials – proceedings of the SPIE 5056 (2003)* 111–122.
- [6] G. Konstantinidis, P.D. Wilcox, B.W. Drinkwater: *An investigation into the temperature stability of a guided wave structural health monitoring system using permanently attached sensors*, *IEEE Sensors Journal* 7(5) (2007) 905–912.
- [7] C. Wang, T. Rosej, F.–K. Chang: *A synthetic time–reversal imaging method for structural health monitoring*, *Smart Materials and Structures* 13 (2004) 415–423.
- [8] S.G. Pierce, B. Culshaw, G. Manson, K. Worden, W.J. Staszewski: *The application of ultrasonic Lamb wave techniques to the evaluation of advanced composite structures*, *Smart Structures and Materials – Proceedings of SPIE 3986 (2000)* 93–103.
- [9] K. Hongjoon, J. Kyungyoung, S. Minjea, K. Jaeyeol: *A noncontact NDE method using a laser generated focused–Lamb wave with enhanced defect–detection ability and spatial resolution*, *NDT&E International* 39 (2006) 312–319.
- [10] K. Hongjoon, J. Kyungyoung, S. Minjea, K. Jaeyeol: *Application of the laser generated focused–Lamb wave for non–contact imaging of defects in plate*, *Ultrasonics* 44 (2006) 1265–1268.
- [11] Tsamasphyros G. J., Koulalis E. A., Kanderakis G. N., Furnarakis N. K., Astreinidis V. Z.: *Structural Health Monitoring of a Steel Railway Bridge using Optical Fibre Bragg Grating Sensors and Numerical Simulation*, *Proceedings of Third European Workshop on Structural Health Monitoring*, 2006
- [12] Othonos A., Kalli K.: *Fiber Bragg Gratings. Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing*. Artech House, Boston London, 1999.
- [13] Dakin J., Culshaw B.: *Optical Fiber Sensors. Applications, Analysis, and Future Trends*. Volume Four. Artech House, Boston London, 1997.
- [14] Kersey A.: *A review of recent developments in fiber optic sensor technology*. *Optical Fiber Technology* 2, no. 0036, pp. 291–317, 1996.
- [15] Pierce S.G., Culshaw B., Manson G., Worden K., Staszewski W. J.: *The application of ultrasonic Lamb wave techniques to the evaluation of advanced composite structures*, *Smart Structures and Materials - proceedings of SPIE, 3986: 93-103, 2000*.
- [16] Giurgiutiu V., Bao J.: *Embedded ultrasonics structural radar for in situ structural health monitoring of thin-wall structures*, *Structural Health Monitoring*, 3(2): 121–140, 2004.
- [17] Giurgiutiu V.: *Embedded ultrasonics NDE with piezoelectric wafer active sensors*, *Journal Instrumentation, Mesure, Metrologie, Lavoisier Pub., France, RS series 12M, Vol. 3, No. 3-4, 2003, pp. 149-180*.