

WPŁYW KONFIGURACJI CZUJNIKÓW W ZAGADNIENIU DETEKCJI USZKODZEŃ

Beata Zima

III stopień, 2 semestr, Politechnika Gdańska
Wydział Inżynierii Lądowej i Środowiska
e-mail: beazima@pg.gda.pl

Promotor: *dr hab. inż.* Magdalena Rucka

diagnostyka płyt, detekcja uszkodzeń, propagacja fal

1 WSTĘP

Wszystkie konstrukcje inżynierskie podlegają ciągłej degradacji na skutek niekorzystnych warunków pogodowych, zmęczenia materiału, wad wykonawczych oraz nieprawidłowego użytkowania. Bezpieczeństwo użytkowania obiektu zapewnione może być jedynie poprzez regularne inspekcje. Tradycyjna metoda oceny stanu opiera się głównie na ocenie wizualnej i wymaga stosunkowo dużych nakładów czasowych i pieniężnych. Nowoczesne metody nieniszczące bazujące na emisji akustycznej, radiografii czy skaningu ultradźwiękowym wymagają wykorzystania kosztownego sprzętu, który ze względu na ciężar i rozmiar nie może być umieszczony w dowolnym miejscu badanej konstrukcji. Dodatkowo, są to metody lokalne, czyli pozwalają na diagnozowanie jedynie wybranych obszarów obiektu. Atrakcyjną alternatywą mogą być metody nieniszczące wykorzystujące zjawisko propagacji fal sprężystych cechujące się relatywnie małą dyssypacją energii podczas propagacji, co umożliwia inspekcję dużych obszarów konstrukcji podczas jednego pomiaru [4]. Inną ważną zaletą jest możliwość stworzenia systemu stałego monitoringu, który wykorzystywałby niewielką liczbę stale przytwierdzonych czujników. Efektywność wykorzystania propagacji fal w problemach diagnozowania konstrukcji czy ich elementów stanowi przedmiot wielu prac [2, 3, 7]. Ze względu na fakt, iż czułość algorytmu detekcji uszkodzeń ściśle zależy od konfiguracji i liczby wykorzystanych czujników, sieć czujników powinna być zaprojektowana w odpowiedni sposób.

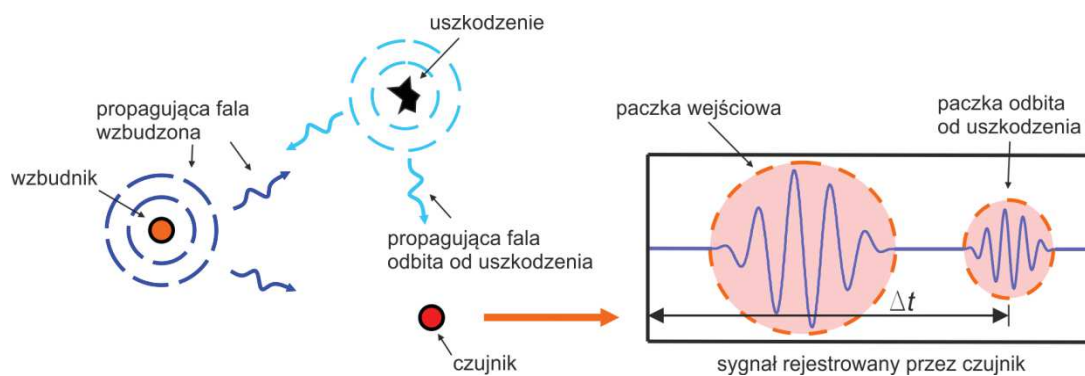
W artykule przedstawiono algorytm detekcji uszkodzeń punktowych w elementach 2D z wykorzystaniem fal Lamba, które propagują w płytach o grubości porównywalnej do długości fali [1]. Przedstawiono wyniki obliczeń numerycznych dotyczących lokalizacji uszkodzenia w płycie stalowej. Omówiono wpływ liczby czujników i ich konfigurację na jednoznaczność uzyskanego rozwiązania w postaci położenia uszkodzenia. Wyniki przedstawione zostały w postaci map.

2 ALGORYTM DETEKCJI USZKODZEŃ

Wszelkie algorytmy detekcji uszkodzeń z wykorzystaniem fal opierają się na ekstrakcji danych z sygnału i odpowiedniej ich interpretacji. Dodatkowe, wcześniej nierejestrowane impulsowe zmiany amplitudy sygnału mogą świadczyć o obecności obszarów o zmienionych parametrach materiałowych, inkluzjach, delaminacji na granicy warstw elementów złożonych z kilku warstw lub innych uszkodzeń w badanym obiekcie.

2.1 Podstawy teoretyczne

Algorytm identyfikacji uszkodzenia wykorzystuje czas rejestracji paczki odbitej od uszkodzenia oraz prędkość propagacji fali prowadzonej. Fala zostaje wzbudzona przez aktuator, po czym propaguje w kierunku czujnika i uszkodzenia. Czujnik początkowo rejestruje paczkę wejściową, a następnie paczkę odbitą od uszkodzenia (Rys. 1). Na podstawie czasu rejestracji paczki odbitej oraz informacji o wzajemnym położeniu wzbudnika i czujnika, możliwe jest określenie położenia uszkodzenia w badanym obiekcie.

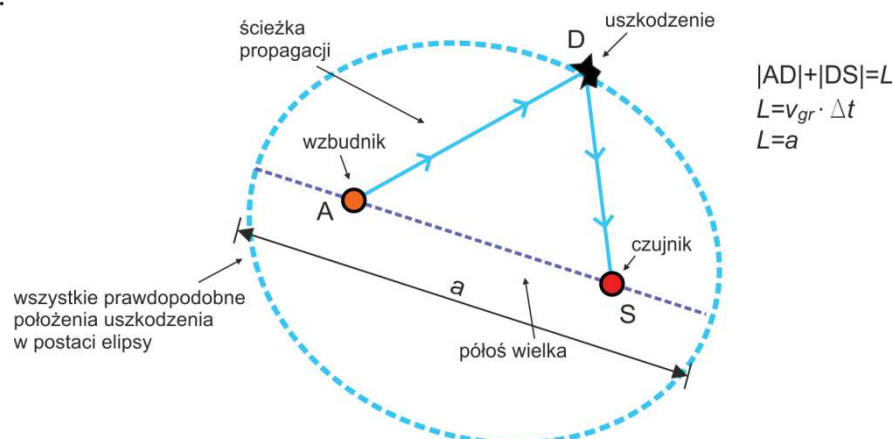


Rysunek 1: Schemat ideowy działania metody propagacji fal sprężystych

Prędkość grupowa fali v_{gr} oraz czas rejestracji odbicia Δt pozwala na obliczenie długości ścieżki L propagacji aktuator – uszkodzenie – czujnik:

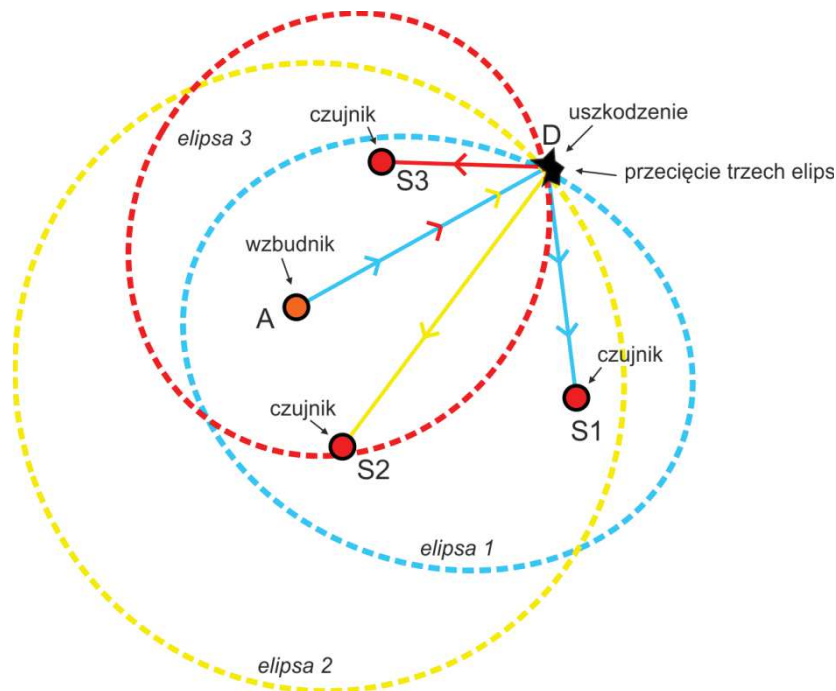
$$L = v_{gr} \cdot \Delta t \quad (1)$$

Wszystkie punkty leżące na płaszczyźnie, dla której długość ścieżki propagacji jest taka sama tworzą elipsę o ogniskach w punktach położenia wzbudnika i czujnika, zaś obliczona na podstawie sygnału długość ścieżki propagacji jest równa sumie długości promieni wodzących elipsy (Rys. 2).



Rysunek 2: Określenie prawdopodobnych położenia uszkodzenia z wykorzystaniem znanej długości ścieżki propagacji aktuator – uszkodzenie – czujnik

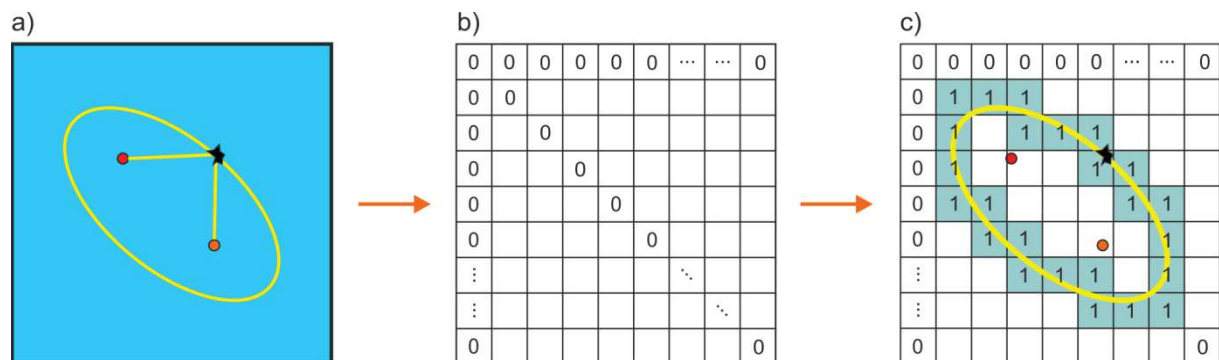
W celu jednoznacznego określenia położenia uszkodzenia konieczne jest więc zastosowanie sieci co najmniej trzech czujników, przy czym położenie to będzie określone przez punkt przecięcia wszystkich wyznaczonych elips (Rys. 3). Wykorzystanie metody elipsy przedstawiono m.in. w [3, 5].



Rysunek 3: Lokalizacja uszkodzenia metodą elipsy

2.2 Implementacja algorytmu

Algorytm dedykowany detekcji uszkodzeń w elementach płytowych na podstawie zidentyfikowanych odbić od uszkodzenia w zarejestrowanych sygnałach został zaimplementowany w programie MATLAB®. Badany obiekt płytowy w pierwszym kroku zostaje podzielony na elementy (Rys. 4). Dla każdego zarejestrowanego sygnału w programie obliczeniowym tworzona jest macierz zerowa o wymiarach odpowiadających wymiarom stworzonej siatki elementów (Rys. 4b). W ogólności macierz ta reprezentuje badany element płytowy, a wymiary macierzy odpowiadają jego wymiarom.



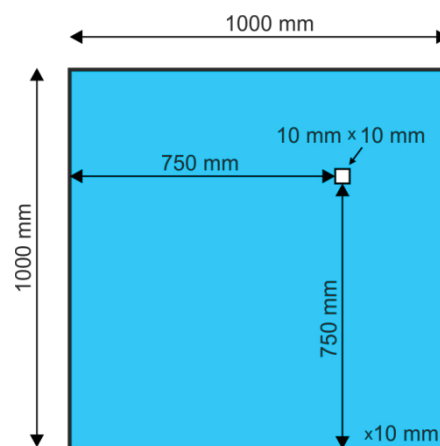
Rysunek 4: Etapy algorytmu detekcji uszkodzeń a) wyznaczenie elipsy na podstawie sygnału, b) przypisanie siatki elementów oraz macierzy zerowej badanej płycie, c) zmiana wartości elementów macierzy zawierającej obwód elipsy

Każdemu wyrazowi macierzy przypisuje się odpowiedni element siatki. Jeżeli dany element zawiera w sobie obwód wyznaczonej elipsy, odpowiadający mu wyraz macierzy przyjmuje wartość 1 (Rys. 4c). Procedura powtarzana jest każdego dla każdej pary aktuator-czujnik. Ostatnim krokiem jest dodanie wszystkich macierzy i stworzenie tzw. mapy zniszczenia obrazującej najbardziej prawdopodobne położenie uszkodzenia.

3 OBLICZENIA NUMERYCZNE

3.1 Model numeryczny

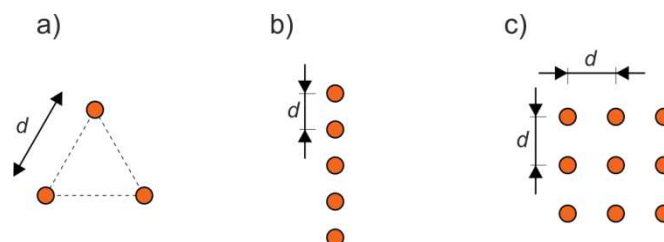
Obliczenia numeryczne zostały przeprowadzone dla modelu stalowej płyty o wymiarach $1\text{ m} \times 1\text{ m} \times 1\text{ mm}$, gęstości $\rho=7850\text{ kg/m}^3$, liczbie Poissona $\nu=0,3$ oraz module Younga $E=210\text{ GPa}$. Założono liniowo sprężyste zachowanie się materiału. Uszkodzenie w płycie zamodelowano jako nieciągłość geometrii modelu o wymiarach $10\text{ mm} \times 10\text{ mm}$. Do obliczeń wykorzystano moduł Explicit programu Abaqus. Model wykonano z wykorzystaniem 4-węzłowych elementów płytowych (S4R) ze zredukowanym całkowaniem. Wzbudzenie fali zrealizowane było poprzez przyłożenie obciążenia w postaci paczki falowej o 5 cyklach sinusoidy zmodulowanej oknem Hanninga i częstotliwości nośnej 100 kHz w zadanym węźle w kierunku prostopadłym do powierzchni płyty.



Rysunek 5: Geometria modelu

3.2 Konfiguracje czujników

Do identyfikacji położenia uszkodzenia zaproponowano trzy konfiguracje czujników przedstawione na Rys. 6. Rozstaw czujników, który był modyfikowany w trakcie analizy oznaczono jako d i wynosił od odpowiednio 1, 2, 3 i 5 cm.

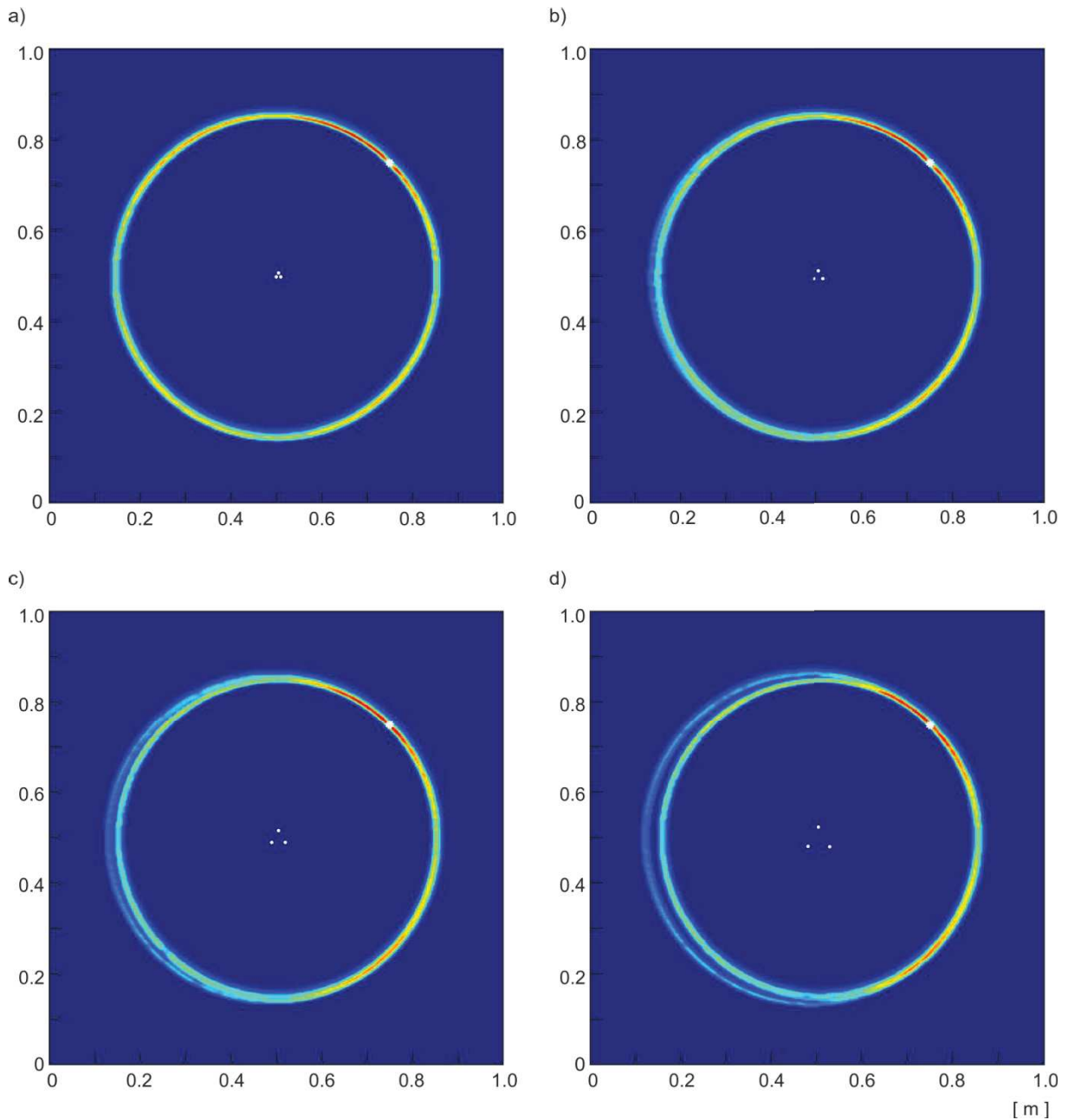


Rysunek 6: Analizowane konfiguracje czujników

Obliczenia dla każdej konfiguracji i rozstawu realizowano w następujący sposób: fala wzbudzana była w jednym punkcie, zaś odpowiedź rejestrowana była w pozostałych. Następnie procedurę powtarzano dla każdego z kolejnych położenia wzbudnika. W konsekwencji dla przedstawionych układów czujników (3, 5 i 9 czujników) uzyskano odpowiednio 6, 20 i 72 sygnałów.

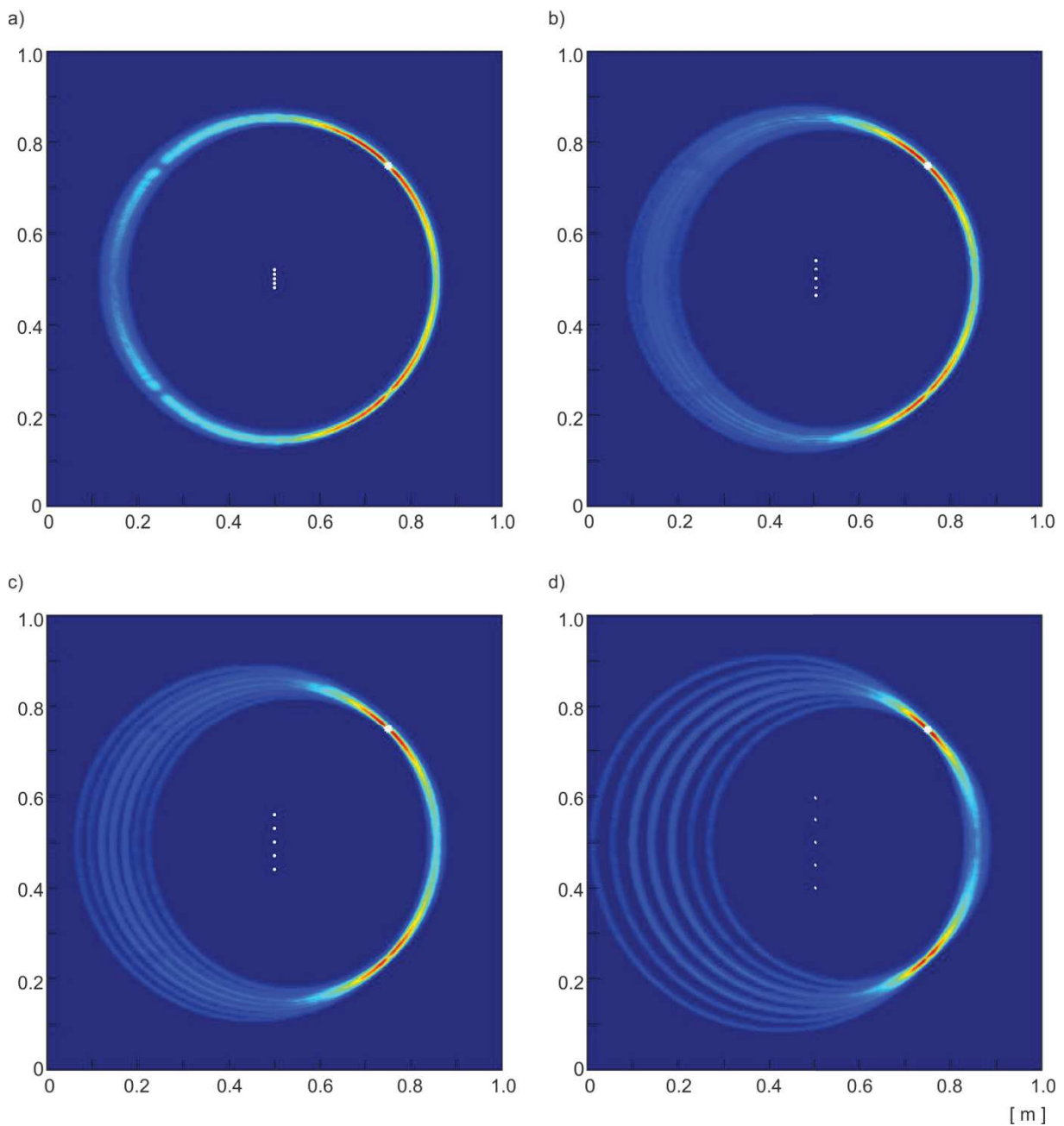
3.3 Wyniki obliczeń numerycznych

Wyniki zastosowania algorytmu dedykowanego detekcji uszkodzeń punktowych w elementach płytowych zostały przedstawione na Rys. 7, 8 i 9 w postaci map.



Rysunek 7: Wyniki w postaci map uzyskane dla trójkątnej matrycy czujników o rozstawie a) 1 cm, b) 2cm, c) 3 cm, d) 5 cm

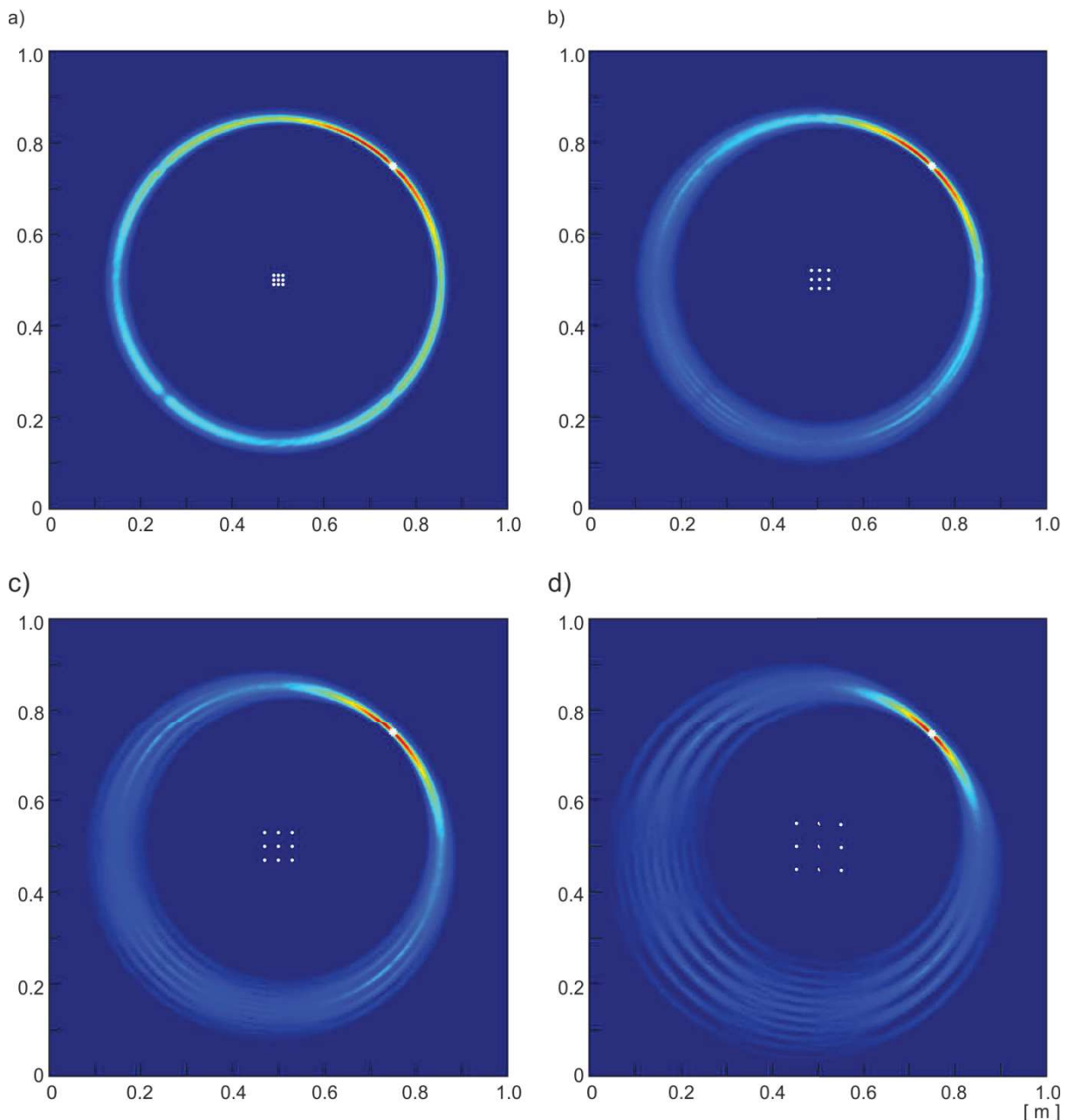
Skala kolorów stanowi o wielkości prawdopodobieństwa położenia uszkodzenia w danym obszarze. Na mapie naniesione zostało położenie uszkodzenia oraz pozycje punktów, w których rejestrowany był sygnał.



Rysunek 8: Wyniki w postaci map uzyskane dla liniowej matrycy czujników o rozstawie a) 1 cm, b) 2cm, c) 3 cm, d) 5 cm

W przypadku każdej z zanalizowanych konfiguracji, zwiększenie odległości pomiędzy czujnikami skutkuje wzrostem jednoznaczności rozwiązania. Zbyt mały rozstaw czujników powoduje, że uzyskiwane mapy mogą być trudne do interpretacji. Należy jednak wziąć pod uwagę, iż przyjęcie zbyt dużego rozstawu czujników wiąże się ze zwiększeniem obszaru tzw. martwych stref czyli obszarów pomiędzy wzbudnikiem a czujnikami, które nie mogą być monitorowane. Inną trudnością związaną z zbyt dużym rozstawem czujników mogą być pojawiające się odbicia od krawędzi, które zwykle cechują się relatywnie dużą wartością amplitudy w stosunku do amplitudy odbicia od uszkodzenia. Interferencja propagujących

odbić skutecznie uniemożliwia ekstrakcję informacji z sygnału na temat zmian zachodzących w monitorowanym obiekcie czyli np. o pojawieniu się uszkodzenia. Bardzo często istnieje więc konieczność zastosowania w opracowywanych algorytmach zaawansowanych technik przetwarzania sygnałów [6].



Rysunek 9: Wyniki w postaci map uzyskane dla kwadratowej matrycy czujników o rozstawie a) 1 cm, b) 2cm, c) 3 cm, d) 5 cm

Jednoznaczność rozwiązania rośnie również wraz z liczbą stosowanych czujników. W ogólności, wzrost liczby rejestrowanych sygnałów powoduje wzrost kompleksowości informacji na temat uszkodzenia, a w tym przypadku jego położenia. Analiza wrażliwości rozwiązania ze względu na liczbę czujników pozwala projektować układy o minimalnej koniecznej ich liczbie. Jest to o tyle istotne, że pomimo, iż wynik uzyskany dla sieci 9 czujników o wiele bardziej jednoznaczny od wyniku uzyskanego dla 3 czujników, to różnica w czytelności map dla przypadku 5 i 9 czujników nie jest już znacząca.

Zaletą stosowania gęstej sieci czujników jest przede wszystkim uzyskiwanie pełnej informacji o położeniu wykrytego uszkodzenia, nawet przy relatywnie niewielkim rozstawie. Układ 3 czujników pozwalał na wskazanie położenia dopiero przy maksymalnym założonym rozstawie 5 cm (Rys. 7d), natomiast matryce 5- i 9-czujnikowe pozwalały na zobrazowanie położenia otworu w płycie już przy rozstawie 1 cm.

Kolejnym ważnym elementem projektu układu czujników obok ich liczby i rozstawu jest ich wzajemna konfiguracja. Ułożenie czujników w taki sposób, że wszystkie wzbudzenia oraz wszystkie odbiory realizowane są w punktach leżących na jednej linii, zawsze daje dwa symetryczne rozwiązania, przy czym oś symetrii rozwiązania pokrywa się z osią symetrii układu czujników. Pomimo, iż czytelność wykonanych map dla liniowej matrycy czujników rośnie wraz z ich rozstawem, to wskazanie jednoznacznej pozycji otworu w płycie nie jest możliwe z wykorzystaniem tej konfiguracji. Efektu tego można uniknąć instalując co najmniej jeden czujnik przesunięty względem osi układu.

4 WNIOSKI

W artykule opisano procedurę wykorzystania zjawiska propagacji fal Lamba w detekcji uszkodzeń w elementach 2D. Przedstawiona została powszechnie stosowana procedura określania położenia uszkodzenia w elemencie płytowym wykorzystująca metodę elipsy. Rozważone zostały różne konfiguracje czujników: trójkątna, liniowa i kwadratowa oraz dodatkowo zróżnicowano rozstaw pomiędzy nimi. W pracy wykazano wrażliwość uzyskiwanego rozwiązania na liczbę czujników, dystans pomiędzy czujnikami oraz ich wzajemne położenie.

Obliczenia wykonano na komputerach Centrum Informatycznego Trójmiejskiej Akademickiej Sieci Komputerowej.

LITERATURA

- [1] Achenbach J. D., *Wave propagation in Elastic Solids*, North-Holland Publishing Company, 1975.
- [2] Alleyne D. N., Cawley P., *The interaction of Lamb waves with defects*, IEEE Transaction on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control, Volume 39, 1992.
- [3] Ge L., Wang X., Jin C., *Numerical modeling of PZT-induced Lamb wave-based crack detection in plate-like structures*, Wave motion, Volume 51, 2014.
- [4] Giurgiutiu V., *Structural Health Monitoring with Piezoelectric Wafer Sensors*, Academic Press, Amsterdam, 2008.
- [5] Kudela P., Ostachowicz W., Żak A., *Damage detection in composite plates with embedded PZT transducers*, Mechanical Systems and Signal Processing, Volume 22, 2008.
- [6] Lyons R. G., *Understanding Digital Signal Processing*, Pearson Education, 2010.
- [7] Rucka M., *Guided wave propagation in structures. Modelling, experimental studies and application to damage detection*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk, 2011.