

## OPTYMALNA KONFIGURACJA CZUJNIKÓW PZT W ZAGADNIENIACH DETEKCCJI USZKODZEŃ

MAREK KRAWCZUK

*Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki i Automatyki, Gdańsk*

MAGDALENA PALACZ  
TOMASZ WANDOWSKI

*Instytut Maszyn Przepływowych PAN, Gdańsk*

Streszczenie. W artykule przedstawiono wykorzystanie sieci przetworników piezoelektrycznych do wykrywania uszkodzeń. Stosowane przetworniki służą do generowania oraz rejestrowania fal sprężystych. Różnice w propagacji fali sprężystej, jakie powstają w wyniku zmian własności fizycznych i mechanicznych, są wykorzystywane w proponowanym algorytmie wykrywania uszkodzeń. Czułość algorytmu detekcji uszkodzeń bardzo ściśle zależy między innymi od liczby stosowanych czujników oraz ich rozmieszczenia.

### 1. WSTĘP

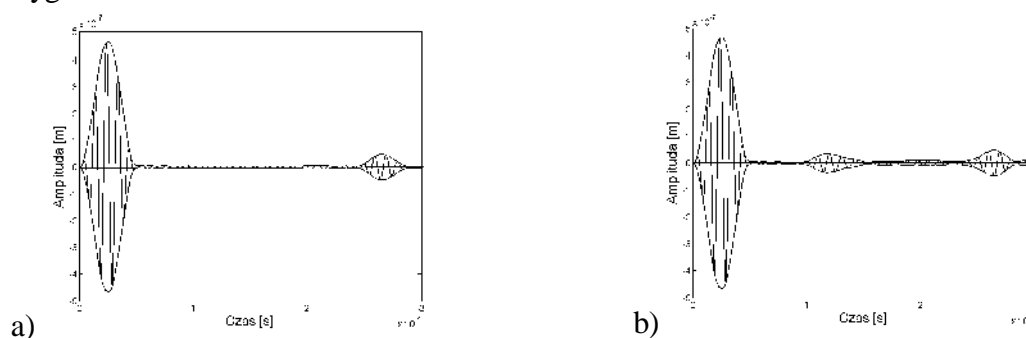
Uszkodzenia zmęczeniowe rozwijają się w elementach konstrukcyjnych pod wpływem cyklicznie działających obciążeń oraz warunków środowiska pracy. Wykrywanie tego typu uszkodzeń we wczesnej fazie ich rozwoju, szczególnie w przemyśle lotniczym, jest głównym elementem zapobiegania katastrofom oraz wydłużania czasu pracy urządzeń. Z tego powodu zagadnienia związane z detekcją uszkodzeń stanowią przedmiot badań wielu ośrodków naukowych.

W ostatnich latach opracowywane są systemy detekcji uszkodzeń wykorzystujące zjawisko propagacji fal sprężystych. Zasada działania tych systemów polega na wykorzystaniu faktu pojawienia się zaburzenia w propagacji fali wywołanego zmianami własności materiału, takimi jak na przykład lokalna zmiana sztywności, która może być spowodowana pęknięciem zmęczeniowym. Zaburzenia te rejestruje się i na tej podstawie można zbudować algorytm umożliwiający identyfikację położenia uszkodzenia. Przykładowy przebieg rejestrowanego sygnału przedstawiono na rys. 1.

Fale sprężyste są generowane oraz rejestrowane za pomocą przetworników wykonanych z materiałów piezoelektrycznych (w skrócie PZT). Czujniki PZT są najczęściej rozmieszczone w postaci specjalnie przygotowanych układów, najczęściej są to specjalne matryce o różnych konfiguracjach. Sieć tych czujników jest kluczowym elementem systemu detekcji uszkodzeń. Od sposobu jej zaprojektowania (liczba czujników, sposób rozmieszczenia) bardzo ściśle zależy czułość algorytmu identyfikacji położenia uszkodzenia, dlatego tak ważne jest, aby

zaprojektować sieć przetworników w sposób optymalny. Optymalna sieć przetworników powinna:

- wiarygodnie określać położenie uszkodzenia,
- informować o położeniu uszkodzenia bez informacji o stanie początkowym badanego elementu,
- wykorzystywać minimalną liczbę przetworników,
- umożliwiać rejestrację wszystkich informacji niezbędnych w algorytmie przetwarzania sygnałów.



Rys.1. Sygnały zarejestrowane przez przetworniki umieszczone na elemencie: a) bez uszkodzenia, b) z uszkodzeniem

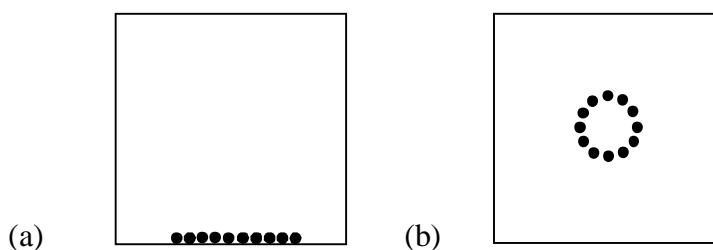
Zastosowanie zbyt wielu przetworników nie musi poprawić dokładności działania systemu identyfikacji uszkodzenia, natomiast na pewno wiąże się z wyższymi kosztami jego budowy.

Praca zawiera opis metody identyfikacji położenia uszkodzenia, opartej na zmianach w propagującej fali sprężystej. Do rejestracji zmian propagującej fali zaproponowano dwie konfiguracje rozmieszczenia przetworników PZT. W obu przypadkach przedstawiono odpowiedni algorytm identyfikacji. Analizowanym obiektem była aluminiowa płyta zamodelowana za pomocą spektralnych elementów skończonych. Stosowany model płyty przedstawiony jest w pracy [4].

## 2. BADANY OBIEKT

Badania przeprowadzono dla aluminiowej płyty o wymiarach: 1[m] x 1[m] x 0.01[m], zamodelowanej za pomocą metody spektralnych elementów skończonych. Uszkodzenie modelowano, redukując o 80% sztywność w wybranych elementach. Przyjęto następujące parametry mechaniczne materiału: gęstość  $\rho = 2700$  [kg/m<sup>3</sup>], moduł Younga  $E = 72.2$  [GPa], współczynnik Poissona  $\nu = 0.33$ .

Do identyfikacji uszkodzenia na badanym obiekcie zaproponowano dwie konfiguracje rozmieszczenia przetworników PZT. Układ pierwszy stanowił pasek dziesięciu przetworników umieszczony na krawędzi płyty (Rys. 2a). Jako układ drugi przyjęto dwanaście czujników rozmieszczonych na okręgu zlokalizowanym w centralnej części płyty (Rys. 2b).



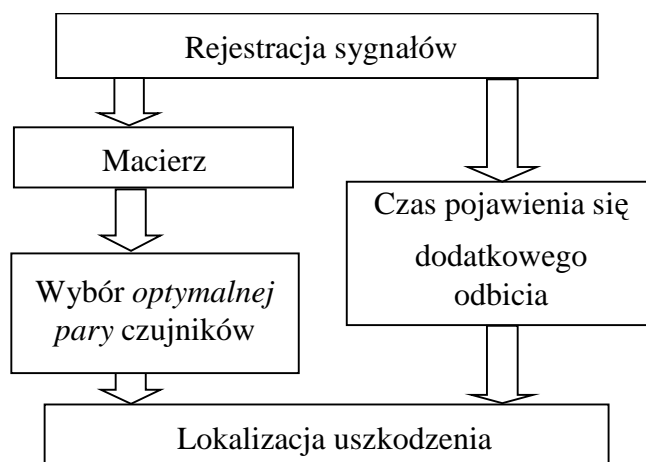
Rys.2. Rozpatrywane konfiguracje rozmieszczenia przetworników PZT

### 3. ALGORYTM IDENTYFIKACJI POŁOŻENIA USZKODZENIA

Efektom działania proponowanego algorytmu jest zlokalizowanie uszkodzenia. Procedura składa się z kilku etapów. W pierwszym kroku za pomocą przetworników PZT rejestrowane są odpowiednie sygnały. Następnie sygnały te poddawane są przetwarzaniu, które ma na celu pozyskanie informacji umożliwiających wybór optymalnych czujników, a w konsekwencji lokalizację uszkodzenia. Proces przetwarzania został podzielony na dwie części.

W pierwszej z nich, z zarejestrowanych sygnałów tworzone są wektory sygnałów różnicowych. Na ich podstawie budowana jest macierz podatności, która umożliwia wybór optymalnej pary czujników. Reprezentowana jest ona przez indeksy elementów macierzy podatności o najmniejszych wartościach, leżących poza główną przekątną. Optymalna para czujników usytuowana jest najbliższej kierunku, na którym znajduje się uszkodzenie.

W drugiej części procesu przetwarzania sygnałów wybiera się sygnały zarejestrowane optymalną parą czujników i wyznacza się dla nich czas pojawienia się dodatkowego odbicia. Algorytm identyfikacji położenia uszkodzenia został schematycznie przedstawiony na rys.3.



Rys.3. Schemat zasady działania algorytmu identyfikacji położenia uszkodzenia

#### 3.1. Wybór optymalnych par czujników

Dla obu proponowanych układów czujników przeprowadzono następującą serię pomiarów: obiekt pobudzono do drgań w pierwszym czujniku, odpowiedź rejestrowano wszystkimi pozostałymi przetwornikami. Procedurę tę powtarzano kolejno dla każdego z przetworników. Z zarejestrowanych sygnałów utworzono wektory sygnałów różnicowych oraz wykonano sumowanie elementów dla każdego wektora sygnału różnicowego. Wyniki tej sumy umieszczano w odpowiednie miejsca wyżej wspomnianej macierzy podatności.

Element (1,1) macierzy podatności otrzymano przez sumowanie elementów wektora różnicowego sygnału zarejestrowanego w przetworniku 1 i zarejestrowanego w tym samym przetworniku przy wymuszeniu w pierwszym przetworniku. Element (1,2) macierzy podatności otrzymano przez sumowanie elementów wektora różnicowego sygnału zarejestrowanego w przetworniku 1 i sygnału zarejestrowanego w przetworniku 2, przy wymuszeniu w pierwszym przetworniku. Element (2,1) macierzy podatności powstał jako suma elementów wektora sygnału różnicowego zarejestrowanego w przetworniku 2 i sygnału z przetwornika 1, przy wymuszeniu przyłożonym w przetworniku numer 2. Schemat tworzenia wspomnianej macierzy przedstawia Tabela 1.

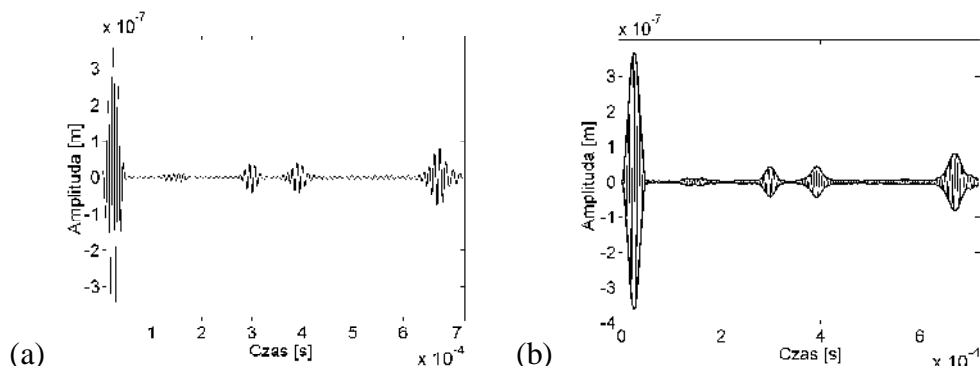
Macierz podatności jest macierzą kwadratową o wymiarze zależącym od liczby przetworników. Indeksy do wyrazów o najmniejszych wartościach, nie leżących na głównej przekątnej, oznaczają numery szukanej optymalnej pary czujników.

Tabela 1. Zasada tworzenia macierzy podatności

Odczyt Wymuszenie	Przetwornik $S_1$	Przetwornik $S_2$	Przetwornik $S_3$	...	Przetwornik $S_i$
Przetwornik $S_1$	$\Sigma(S_{11}-S_{11})$	$\Sigma(S_{11}-S_{12})$	$\Sigma(S_{11}-S_{13})$	...	$\Sigma(S_{11}-S_{1i})$
Przetwornik $S_2$	$\Sigma(S_{22}-S_{21})$	$\Sigma(S_{22}-S_{22})$	$\Sigma(S_{22}-S_{23})$	...	$\Sigma(S_{22}-S_{2i})$
Przetwornik $S_3$	$\Sigma(S_{33}-S_{31})$	$\Sigma(S_{33}-S_{32})$	$\Sigma(S_{33}-S_{33})$	...	$\Sigma(S_{33}-S_{3i})$
...	...	...	...	...	...
Przetwornik $S_j$	$\Sigma(S_{jj}-S_{j1})$	$\Sigma(S_{jj}-S_{j2})$	$\Sigma(S_{jj}-S_{j3})$	...	$\Sigma(S_{jj}-S_{ji})$

### 3.2. Wyznaczanie czasu pojawienia się dodatkowego odbicia

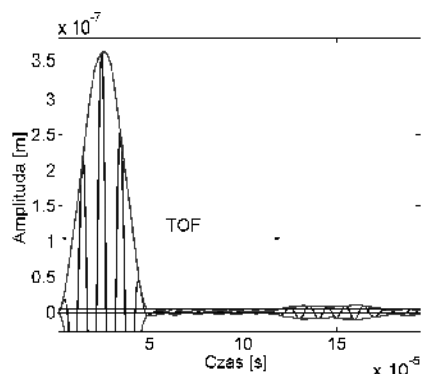
Czas pojawienia się dodatkowego odbicia wyznaczano dla sygnałów zarejestrowanych optymalną parą czujników piezoelektrycznych. W tym celu w pierwszej kolejności zbudowano obwódnie sygnałów (Rys.4.).



Rys.4. (a) sygnał zarejestrowany przez przetwornik, (b) sygnał z obwiednią

Czas pojawienia się dodatkowego odbicia określany jest jako odległość pomiędzy dwoma wartościami sygnału znajdującymi się bezpośrednio nad poziomem odcięcia. Pierwszą wartością jest wielkość wymuszenia, druga z kolei związana jest z odbiciem od uszkodzenia. Odpowiednio założony poziom odcięcia pozwala wyeliminować wpływ szumu pomiarowego na dokładność wyznaczenia czasu pojawienia się dodatkowego odbicia. Zasadę wyznaczenia czasu wystąpienia dodatkowego odbicia zilustrowano na rys.5. Należy wspomnieć, że zarejestrowane sygnały są użyteczne do czasu pojawienia się w nich pierwszego odbicia od krawędzi. Przy dłuższej rejestracji identyfikacja odbicia od uszkodzenia będzie trudna z uwagi na silne tłumienie sygnału czy szumy pomiarowe. Poza tym odległość przetwornika od najbliższej krawędzi płyty definiuje promień powierzchni, która może być monitorowana. Poza tym obszarem występują tzw. martwe strefy, to znaczy miejsca, w których występujące uszkodzenie może być niezlokalizowane. Sposobem zapobiegania występowaniu martwych

stref jest zmiana położenia całego układu czujników tak, żeby badaniem objąć cały obszar testowanego obiektu. Dodatkowo na podstawie geometrii badanego obiektu i prędkości propagacji fali sprężystej można dokładnie określić, które odbicia pochodzą od brzegów obiektu. Pozwala to uzyskać dodatkowe informacje do poprawnej identyfikacji odbicia od uszkodzenia.



Rys.5. Zasada wyznaczenia czasu pojawienia się dodatkowego odbicia (TOF – z j. ang. Time Of Flight)

### 3.3. Wyznaczenie położenia uszkodzenia

W kolejnym kroku algorytmu detekcji wyznaczano odległości optymalnej pary czujników od uszkodzenia. Odległości te obliczano ze wzorów (1) i (2), przy czym założono, że znany jest czas pojawienia się dodatkowego odbicia w sygnałach zarejestrowanych oraz prędkość grupowa propagującej fali.

$$L_1 = \frac{V_{gr} \cdot TOF_1}{2} \tag{1}$$

$$L_2 = \frac{V_{gr} \cdot TOF_2}{2}, \tag{2}$$

gdzie:  $L_1, L_2$  – odległości uszkodzenia od czujników 1 i 2 [m],

$V_{gr}$  – prędkość grupowa fali [m/s],

$TOF_1, TOF_2$  – czasy pojawienia się dodatkowego odbicia w sygnałach zarejestrowanych przez czujniki 1 i 2 [s].

Prędkość grupowa fali wyznaczana jest ze wzoru (3), zakładając, że znane są parametry materiału, z jakiego wykonano badany element oraz częstotliwość wymuszenia.

$$V_{gr}^2 = 8 \cdot p \cdot f \cdot \sqrt{\frac{E \cdot h^2}{12 \cdot (1-n) \cdot r}} \tag{3}$$

gdzie:  $f$  – częstotliwość wymuszenia [Hz],

$E$  – moduł Younga [Pa],

$n$  – liczba Poissona [-],

$r$  – gęstość materiału, z którego wykonana jest płyta [ $kg/m^3$ ],

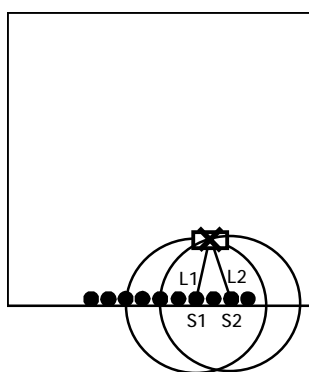
$h$  – grubość płyty [m].

Równanie (3) jest słuszne wyłącznie dla modelu płyty Kirchoffa, to znaczy w przypadku, gdy w modelu nie uwzględnia się poprzecznych naprężeń ścinających.

#### 4. PRZYKŁADY

##### UKŁAD 10 PRZETWORNIKÓW

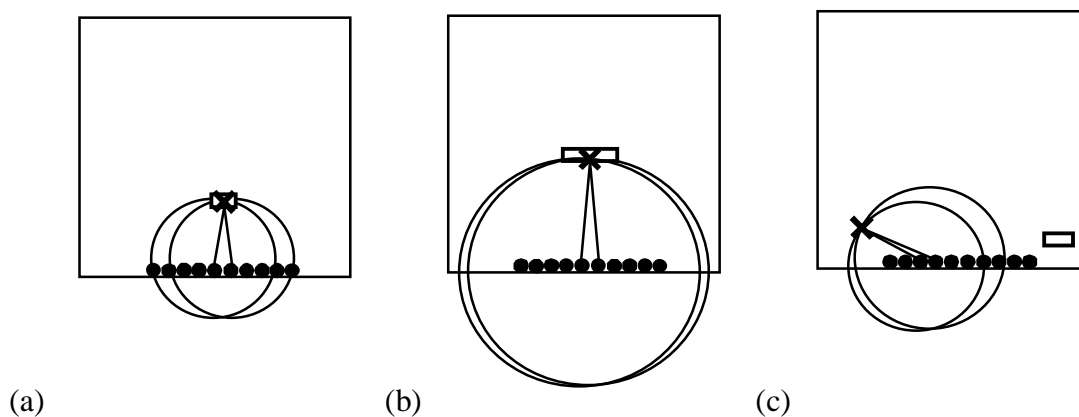
Poniżej przedstawione są wyniki identyfikacji położenia uszkodzenia dla układu 10 przetworników ułożonych w postaci paska na krawędzi płyty. W tym przypadku utworzono dwa okręgi o środkach w miejscach położenia optymalnej pary czujników oraz o promieniach wyznaczonych ze wzorów (1) i (2). Punkt przecięcia okręgów, który leży w obszarze płyty, wskazuje jednoznacznie położenie uszkodzenia. Drugi z punktów przecięcia okręgów występuje poza obszarem płyty i nie jest brany pod uwagę (Rys.6.).



Rys.6. Ilustracja procedury lokalizacji uszkodzenia dla paska dziesięciu czujników;  
 □ – uszkodzenie zamodelowane, x – uszkodzenie wykryte

#### 4.1. Wyniki

Na rys.7 przedstawiono wyniki lokalizacji uszkodzenia otrzymane z zastosowaniem paska dziesięciu przetworników. Dla dwóch pierwszych przypadków (Rys.7.a-b) położenie uszkodzenia zostało wykryte z zadowalającą dokładnością. W trzecim przypadku (Rys.7.c), gdy uszkodzenie znajduje się w tzw. martwej strefie, nie zostało ono zlokalizowane.

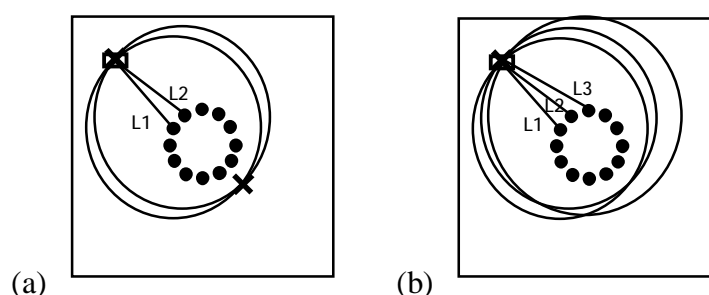


Rys.7. Lokalizacja uszkodzenia układem 10 czujników; □ – uszkodzenie zamodelowane,  
 x – uszkodzenie zlokalizowane

## UKŁAD 12 PRZETWORNIKÓW

Poniżej przedstawione są wyniki identyfikacji położenia uszkodzenia dla układu 12 czujników rozmieszczonych w równomiernie po okręgu w środkowej części płyty. Dla rozważanej konfiguracji procedura lokalizacji wymaga dodatkowych informacji w porównaniu do poprzednio opisywanego układu. Podobnie jak w przypadku poprzednio opisywanym utworzono dwa okręgi na podstawie przetworników pary optymalnej. W ten sposób otrzymuje się dwa punkty przecięcia leżące w obszarze płyty. Uszkodzenie nie jest jednoznacznie zlokalizowane.

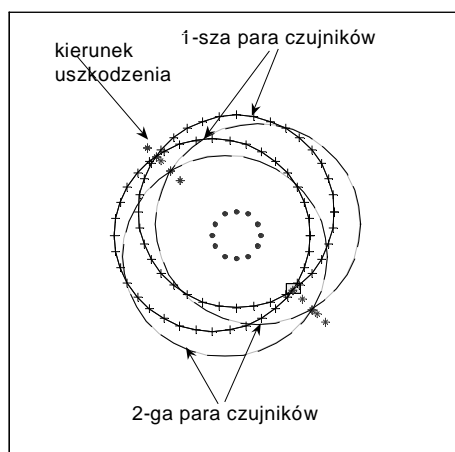
Tylko dwa optymalne czujniki pozwalają jedynie wyznaczyć kierunek, na którym znajduje się uszkodzenie (rys.8a). Dlatego w dalszej kolejności z kolejnej optymalnej pary wybrano trzeci przetwornik. Utworzono trzeci okrąg. Otrzymano wspólny punkt przecięcia trzech okręgów, który jednoznacznie określa lokalizację uszkodzenia (patrz Rys.8b).



Rys.8. Lokalizacja uszkodzenia układem II czujników, (a) dwa przetworniki, (b) trzy przetworniki; □ – uszkodzenie zamodelowane, x – uszkodzenie zlokalizowane

### 4.2. Wyniki

Wyniki otrzymane z zastosowaniem algorytmu identyfikacji położenia uszkodzenia dla układu 12 czujników zaprezentowano na rys.9. W tym przypadku uszkodzenie zlokalizowano z większą dokładnością w porównaniu do metody wykorzystującej pasek 10 przetworników. Również martwe strefy występują wyłącznie w narożach płyty. Należy podkreślić, że ta metoda pozwala na bardzo precyzyjne określenie kierunku, na którym występuje uszkodzenie.



Rys.9. Przykład lokalizacji uszkodzeń przez czujniki konfiguracji II

## 5. WNIOSKI

W pracy przedstawiono nowatorskie podejście do problemu identyfikacji uszkodzeń w elementach. Główną zaletą zaproponowanego podejścia jest fakt, że pozwala ono zlokalizować uszkodzenie bez informacji o stanie początkowym obiektu. Istnieją jednak trudności z poprawną oceną czasu pojawienia się odbicia od uszkodzenia w sygnale. Wynika to z kilku przyczyn. Na przykład silne tłumienie propagującej fali w materiale, dyspersja samego sygnału jak również fakt pojawienia się odbić od krawędzi badanego obiektu silnie nachodzących na odbicie od uszkodzenia.

W dalszym etapie badań wyniki otrzymane na drodze symulacji numerycznych zostaną porównane z wynikami pomiarów przeprowadzonych na rzeczywistym obiekcie.

## LITERATURA

1. Ihn J., B., Chang F.K.: Detection and monitoring of hidden fatigue crack growth using a built-in piezoelectric sensor/actuator network: I. Diagnostics. *Smart material and structures*, 13, 2004, s. 609-620.
2. Giurgiutiu V., Bao J.: Embedded-ultrasonics structural radar for in situ structural health monitoring of thin-wall structures. *Structural Health Monitoring*, 41, 2004, s. 121-140.
3. Fromme P., Wilcox P., Lowe M., Cawley P.: Development of permanently attached guided ultrasonic waves array for structural integrity monitoring. *NDT*, 191, 2004, s. 1-8.
4. Kudela P., W. Ostachowicz.: Modelowanie propagacji fal w płytach kompozytowych. XLV Sympozjon „Modelowanie w mechanice”, Wisła 2006

## OPTIMAL PZT TRANSDUCERS CONFIGURATION FOR DAMAGE DETECTION

Summary. This paper presents application of optimal piezoelectric transducers (in short PZT) in damage detection systems. This system uses fact that any changes of material properties, such as for example local stiffness change caused due to fatigue crack development, affects wave propagation. These disturbances can be easily registered and algorithm can be constructed for identification and localization of such damages. Elastic waves are excited and registered through application of PZT transducers. The sensitivity of damage detection algorithm depend on among other things number and configuration of sensors.

