

*XIV Seminarium*  
**ZASTOSOWANIE KOMPUTERÓW W NAUCE I TECHNICIE' 2004**  
Oddział Gdański PTETiS

**POMIAR I OBRÓBKA SYGNAŁÓW EMISJI AKUSTYCZNEJ  
W DIAGNOSTYCE OBIEKTÓW**

**Lech HASSE<sup>1</sup>, Ludwik SPIRALSKI<sup>1</sup>, Josef ŠIKULA<sup>2</sup>**

<sup>1</sup> Politechnika Gdańska, Wydział Elektroniki, Telekomunikacji i Informatyki  
tel.: + 48 58 347 1884, fax: +48 58 341 6132, e-mail: [lhasse@pg.gda.pl](mailto:lhasse@pg.gda.pl)

<sup>2</sup> Brno University of Technology, Czech Noise Research Laboratory  
tel.: +420 5 4114 3328, fax: +420 5 4114 3398, e-mail: [sikula@feec.vutbr.cz](mailto:sikula@feec.vutbr.cz)

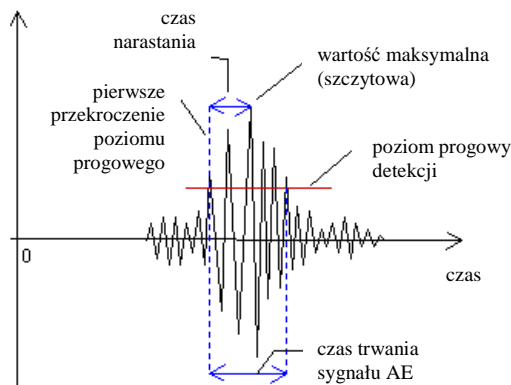
Praca zawiera skrótowy przegląd nieniszczących metod diagnostycznego badania obiektów, ukierunkowany na zastosowania analizy emisji akustycznej (AE) i elektromagnetycznej (EME) z uwypukleniem korzyści aplikacyjnych tych metod. Opisano eksperyment wskazujący na korelację między sygnałami AE i EME, co stwarza możliwość lokalizacji źródła sygnału emisji akustycznej w miejscu wystąpienia defektu.

Rekonstrukcja zniekształconych i zaszumionych obrazów defektoskopowych wad wymaga stosowania wyspecjalizowanych metod przetwarzania sygnałów. Dotyczy to estymacji parametrów i charakterystyk niestacjonarnych sygnałów o charakterze impulsowym (m. in. czasów narastania, szerokości impulsów oraz ich energii). Przedstawiono narzędzia efektywnej analizy danych zarejestrowanych i zobrazowanych dzięki wykorzystaniu odpowiednich programów komputerowych. Ich zastosowanie w diagnostyce prowadzi do wyeliminowania elementów wadliwych zwiększając bezpieczeństwo i przedłużenie okresu eksploatacji badanych obiektów.

## **1. WPROWADZENIE**

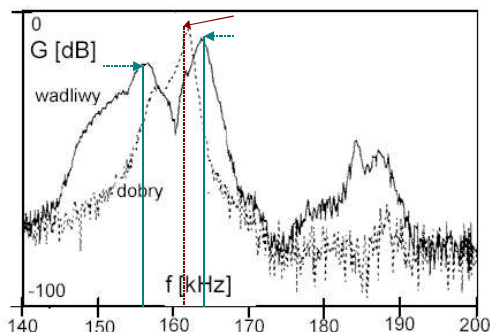
Diagnostyczne badania obiektów metodami nieniszczącymi mają na celu ocenę wytrzymałości, jednorodności i jakości połączeń, detekcję mikropęknięć, braków wypełnień (np. pęcherzyków powietrza w folii aluminiowej kondensatorów) czy nieciągłości geometrycznych, w tym problemów z wiązaniami czy korozją przez wykrycie, lokalizację i pomiar intensywności sygnałów AE generowanych w trakcie powstawania mikropęknięć. Wczesna detekcja uszkodzeń prowadzi do wyeliminowania elementów wadliwych zwiększając bezpieczeństwo i przedłużenie okresu eksploatacji obiektów. Zwiększenie wiarygodności oceny można uzyskać przez jednoczesne stosowanie kilku metod pomiarowych.

Emisja akustyczna występuje w wyniku lokalnego lub ogólnego obciążenia konstrukcji, powodującego propagację pęknięć, przemieszczenia materiału lub też propagację mikropęknięć pochodzących od korozji międzykrystalicznej.



Rys. 1. Typowe parametry charakteryzujące przebiegi sygnału AE o charakterze impulsowym

Każdy obiekt o jednorodnej strukturze posiada własne częstotliwości rezonansowe. Wprowadzając impulsowe pobudzenie mechaniczne i badając strukturę częstotliwościową sygnału emisji akustycznej można wykryć mikropęknięcia obserwując zmianę częstotliwości rezonansowych obiektu [1]. Przykładowe widma prętów kompozytowych (wolfram–karbid-kobalt) uzyskane przy zastosowaniu czujników piezoelektrycznych przedstawiono na rys. 2.



Rys. 2. Widma emisji akustycznej badanych prętów dobrej jakości (linia ciągła) i wadliwych (linia przerywana)

Emisją magnetoakustyczną określa się zjawiska zachodzące w strumieniu magnetycznym wytworzonym w sondzie przy zbliżaniu jej do ferromagnetyka. Polegają one na generacji dźwięku podczas lokalnych odkształceń materiału wywołanych skokowymi przemieszczeniami granic domen przemagnesowywanego ferromagnetyka (akustyczny odpowiednik efektu Barkhausena), co pozwala uzyskać informacje o przemagnesowywanej objętości, a więc i o jakości (degradacji) stali. Do detekcji emisji magnetoakustycznej stosuje się podobne czujniki jak w pomiarach emisji akustycznej, a magnesowanie materiału wymusza się za pomocą elektromagnesu. Czułość metody jest relatywnie bardzo duża - uzyskuje się nawet 40% obniżenie natężenia tej emisji dla stali o już nieznacznym stopniu zdegradowania.

## 2. NARZĘDZIA STOSOWANE W BADANIACH EMISJI AKUSTYCZNEJ

W badaniach istotną rolę odgrywają czujniki AE. Typowe czujniki stosowane w pomiarach AE pokazano na rys. 3.



Rys. 3. Czujniki AE Firmy Valen [2]

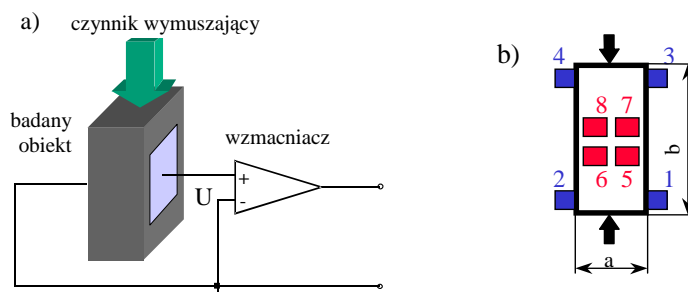
Nowe techniki sprzęgania głowicy z badanym obiektem (np. sprzężenie z obiegiem zamkniętym przez wodę, jak i przez żel czy przez powietrze), metody ze wzbudzeniem (krótkie impulsy - przeważnie 20 ns o częstotliwości 1÷30 MHz) i odczytem laserowym. Fale dźwiękowe generowane są w paśmie od kilku Hz do MHz. Przy wykorzystaniu fal podłużnych i echa można dzięki pośredniemu sprzężeniu z badanym obiektem zdalnie kontrolować grubość obiektu i wykrywać wady obniżające wytrzymałość elementu; stosowana w nich aparatura jest jednak bardzo złożona. Również kosztowne są ultradźwiękowe przetworniki mozaikowe. Przykładowo, mozaika zestawu *Portable Automated Remote Inspection System* składa się z 1024 sond ultradźwiękowych (32×32), które mogą badać obszar 20×20 cm. Stosowane są też ultradźwiękowe kamery mozaikowe zawierające np. 16384 pikseli (128×128 czynnych mikrodetektorów).

## 3. KORELACJA MIĘDZY EMISJĄ AKUSTYCZNĄ I ELEKTROMAGNETYCZNĄ

Powstawaniu pęknięć (defektów) w obiektach towarzyszy generacja fononów oraz kumulacja ładunków przy powierzchniach pęknięcia wskutek utraty wiązań chemicznych, tworząc struktury elektrycznie spolaryzowane. Prowadzi to do emisji promieniowania elektromagnetycznego. Energia promieniowania może być, przykładowo, wyznaczona z gęstości ładunku na okładzinach kondensatora, zależnej od energii sublimacji, temperatury i od geometrii mikropęknięcia. Napięcie na kondensatorze fluktuuje w czasie (wibrują powierzchnie mikropęknięcia) i jest funkcją wzajemnego oddziaływania między procesem relaksacji ładunku a polem fononu.

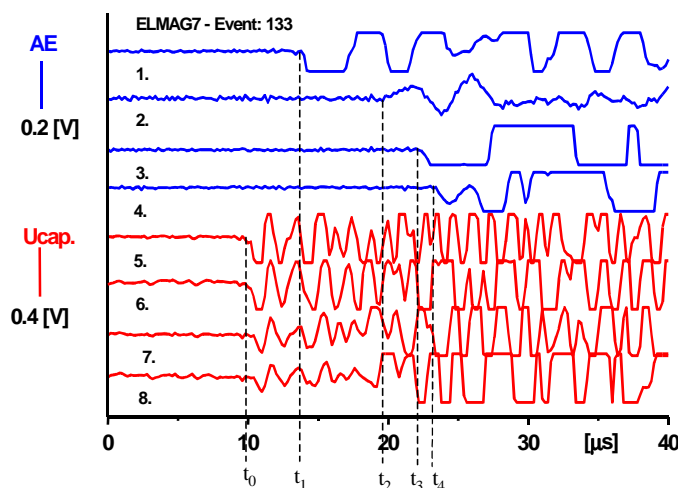
### 3.1. Eksperyment

W celu zbadania korelacji między AE oraz EME przeprowadzono eksperyment, w którym obiektem badanym była prostopadłościenna bryła poddawana stałemu narażeniu (rys. 4a), na której krawędziach umieszczone były 1÷4 sensory promieniowania akustycznego, zaś równoległe płytki metalowe (okładziny kondensatora) 5÷8 stanowiły anteny dla pola elektrycznego o znacznie większej długości emitowanych fal niż badany obiekt (pomiaru pola bliskiego) – rys. 4b [3].



Rys. 4. Czujnik z pojedynczym kondensatorem jako anteną pola emisji elektromagnetycznej (a) oraz rozmieszczenie ośmiu czujników (b)

Wzmocnione sygnały rejestrowano w ośmiu kanałach pomiarowych (dla tego samego defektu zlokalizowanego w okolicy anteny nr 5) – rys. 5.



Rys. 5. Przebiegi czasowe wzmocnionych sygnałów AE oraz EME ( $U_{cap}$ ) dla tego samego mikropęknięcia

W sygnałach emisji elektroakustycznej można wyróżnić składowe częstotliwości od 1 do 6 MHz, które niosą informacje o długości mikropęknięcia (oszacowanej dla zarejestrowanych danych na ok. 1 mm), oraz składowe o mniejszych częstotliwościach (poniżej 500 kHz), zawierające dane o widmie wibracji mechanicznych i skorelowane z sygnałami AE.

Zależności czasowe pokazują, że sygnały EME są generowane w przybliżeniu równocześnie, podczas gdy sygnały AE są opóźnione. Różnica czasu między sygnałami AE oraz EME wynosi od 2 do 13  $\mu s$ . Mikropęknięcie, odpowiedzialne za te sygnały jest usytuowane w pobliżu anteny nr 5 – sygnał AE nr 1 ma minimalne opóźnienie, natomiast maksymalne opóźnienie ma sygnał zarejestrowany przez czujnik AE nr 4, który znajduje się naprzeciw czujnika nr 1 (najdalej). Metoda ta umożliwia lokalizację defektu, ustalenie kierunku mikropęknięcia, ładunku na ścianach mikropęknięcia oraz aktywną powierzchnię mikropęknięcia.

Stwierdzono, że gęstość ładunku powierzchniowego zależy od energii sublimacji i od temperatury. Można na tej podstawie wyznaczyć energię emisji elektromagnetycznej. Jej parametry zależą również od geometrii mikropęknięcia.

Metoda umożliwi przybliżoną lokalizację mikropęknięcia (sygnał emisji akustycznej ma najmniejsze opóźnienie w kanale 1, a największe w kanale 5) i ustalenie jego kierunku, jak również oszacowanie ładunku na powierzchniach mikropęknięcia.

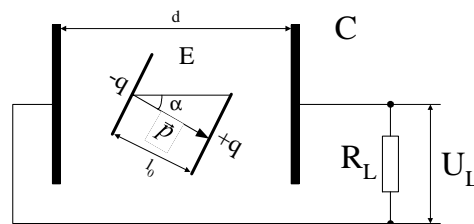
### 3.2. Model fizyczny

Pęknięciu w obiekcie towarzyszy generacja fononów oraz generacja ładunków elektrycznych na powierzchniach pęknięcia wskutek utraty wiązań chemicznych tworzących dipole lub bardziej złożone struktury ładunków elektrycznych. Występują zjawiska dwojakiego rodzaju:

- generacja promieniowania elektromagnetycznego – emisja elektromagnetyczna,
- redystrybucja ładunku elektrycznego.

Dwie przewodzące płytki przylegają do ścianek obiektu badanego tworząc kondensator. Napięcie na kondensatorze  $C$  zmienia się w czasie w funkcji przewodności elektrycznej obiektu i wibracji ścian mikropęknięcia. Zależność tę określa wzajemna relacja między ładunkiem relaksacji i polem fononu. Moment dipola zmienia się w czasie z dwóch powodów:

- wskutek zmian przewodności elektrycznej próbki,
- z powodu przemieszczania się ścian mikropęknięcia.



Rys. 6. Model fizyczny powstawania zjawiska EME

Mierzoną wielkością jest napięcie  $U_L(t)$  (rys. 6) na obciążeniu rezystywnym  $R_L$  dołączonym równolegle do kondensatora. Załóżmy, że w chwili powstania mikropęknięcia pojawiają się ładunki  $+q$  i  $-q$  na powierzchni mikropęknięcia. Gdy ładunek elektryczny  $q$  przemieszcza się z prędkością  $\vec{v}$  w polu elektrycznym  $\vec{E}$ , napięcie na kondensatorze się zmienia i przez rezystor  $R_L$  płynie prąd  $i$ . W inkrementalnym przedziale czasu  $dt$  energia elektryczna  $d\mathcal{E}_e = q\vec{E} \cdot \vec{v}dt$  jest zamieniana na ciepło Joula w rezystorze  $R_L i^2 dt$ , a energia kondensatora wzrasta. Zgodnie z zasadą zachowania energii

$$q\vec{E} \cdot \vec{v}dt = R_L i^2 dt + CU_L dU_L . \quad (1)$$

Napięcie  $U_L(t)$  można wyznaczyć z równania

$$\frac{dU_L}{dt} + \frac{U}{CR_L} = \frac{q}{CU} \vec{E} \cdot \vec{v}. \quad (2)$$

Przy powstaniu mikropęknięcia, pewna część energii mechanicznej zostaje przetworzona na wibracje. Przemieszczanie się ścian mikropęknięcia w funkcji czasu powoduje powstanie składowej zmiennej sygnału elektromagnetycznego, której częstotliwość odpowiada częstotliwości wibracji mechanicznych obiektu. Wskutek tego zjawiska ściany mikropęknięcia wibrują a szerokość mikropęknięcia  $l$  jest funkcją czasu. Ładunki  $+q$  oraz  $-q$  znajdują się w odległości ich równowagi  $l_0$ , a ich przemieszczenie  $u(t)$  określa zależność  $u = u_0 \cdot e^{-\delta t} \cdot \sin \omega t$ , gdzie  $\delta$  i  $\omega$  są stałymi ruchu harmonicznego tłumionego. Przewodność elektryczna powoduje rozładowanie elementarnego kondensatora reprezentującego ściany mikropęknięcia. Przyjmując wykładniczą zależność ładunku elektrycznego od czasu  $q = q_0 e^{-\beta t}$ , moment dipola  $p(t)$  określa równanie

$$\bar{p} = q_0 e^{-\beta t} (l_0 + 2u_0 e^{-\delta t} \sin \omega t) \bar{p}^0, \quad (3)$$

gdzie  $l_0$  jest "grubością" elementarnego kondensatora określoną przez odległość ścian mikropęknięcia. Wstawiając zależności (2) i (3) do równania różniczkowego mamy:

$$\frac{dU_L}{dt} + \frac{U_L}{CR_L} = g e^{-\gamma t} \sin(\omega t + \varphi), \quad (4)$$

gdzie  $g = \frac{2q_0 v_0 \cos \alpha}{Cd}$ ,  $\gamma = \delta + \beta$ ,  $v_0$  - amplituda prędkości,  $d$  - grubość kondensatora, zaś  $\alpha$  - kąt pomiędzy natężeniem pola elektrycznego  $\vec{E}$  a prędkością  $\vec{v}$ . Rozwiązanie ma zatem postać  $U_L(t) = K e^{-\frac{1}{R_L C} t} - \frac{g e^{-\gamma t}}{\omega_0^2 + \omega^2} [\omega_0 \sin(\omega t + \varphi) + \omega \cos(\omega t + \varphi)]$ , gdzie  $K$  jest stałą

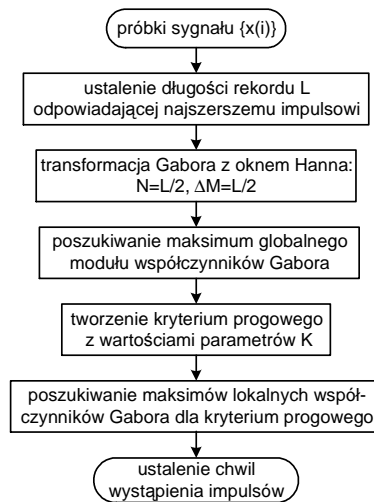
całkowania, a  $\omega_0 = \gamma - \frac{1}{RC}$  częstością graniczną. Napięcie o postaci  $U_L(t) = U_{L_0} e^{-\frac{t}{R_L C}}$  występuje, gdy ściany mikropęknięcia są prostopadłe do okładzin kondensatora  $C$  (wówczas wektory  $\vec{E}$  i  $\vec{v}$  są prostopadłe, zatem  $\cos \alpha = 0$ ).

#### 4. CYFROWE PRZETWARZANIE SYGNAŁÓW AE

Sygnały AE oraz dwuwymiarowe obrazy defektoskopowe wad są zwykle zniekształcone i zaszumione, a często właściwości szumów tła (które mają charakter niestacjonarny) nie są możliwe do jednoznacznego określenia. Rekonstrukcja sygnałów i obrazów rzeczywistych wymaga stosowania specjalizowanych metod przetwarzania sygnałów z wykorzystaniem np. oprogramowania środowiska MATLAB (z pakietem *Image Processing Toolbox*). Dotyczy to estymacji parametrów i charakterystyk sygnałów niestacjonarnych o charakterze impulsowym (m. in. czasów narastania, szerokości impulsów oraz ich energii).

Procedury pomiarowe z wykorzystaniem technik cyfrowego przetwarzania sygnałów stwarzają znacznie szersze możliwości analizy w trybie *off-line*. Aplikacja teorii nieparametrycznej czasowo-częstotliwościowej analizy sygnałów umożliwia wydobywanie z sygnałów niestacjonarnych pożądanej informacji w dziedzinie czasu i częstotliwości.

Wynikiem krótkoczasowej analizy widmowej jest częstotliwościowa dekompozycja sygnału pozwalająca obserwować zmiany widma w czasie. Stosuje się w tym przypadku m. in. analizę falkową przy doborze odpowiedniej falki dla danego rodzaju sygnału, co wpływa na efektywność wykrywania uszkodzeń. Jest to szczególnie przydatne dla niestacjonarnych sygnałów emisji akustycznej o charakterze szumów wybuchowych dając możliwość detekcji różnych form defektów. Zastosowanie dekompozycji sygnału pomiarowego wykonanej transformatą falkową daje możliwość wykrywania różnych form niestacjonarności niewidocznych w tradycyjnych metodach analizy.



Rys. 6. Schemat przykładowego algorytmu detekcji wystąpienia impulsów AE

W Zespole Badawczym Miernictwa Szumów i Zakłóceń Politechniki Gdańskiej opracowano wiele procedur cyfrowego przetwarzania sygnałów losowych niestacjonarnych, w tym o charakterze impulsowym. W celu wyznaczenia energii sygnału zawartej w określonych pasmach częstotliwości wykorzystuje się transformatę falkową do filtracji analizowanego sygnału na poszczególne detale odnoszące się do kolejnych pasm. Jeśli w widmie impulsów można wyróżnić częstotliwości charakterystyczne, to stosuje się kryterium umożliwiające detekcję momentu wystąpienia impulsu zgodnie z algorytmem pokazanym na rys. 6 (gdzie  $K$  – liczba detali po filtracji) przy dużej rozdzielczości czasowej

i ograniczoną jedynie do kilku pasm w analizie częstotliwościowej. Inną metodą detekcji momentu wystąpienia niestacjonarnych impulsów w przebiegach szumowych jest zastosowanie filtracji o parametrach zmiennych w czasie.

W metodach identyfikacji i lokalizacji źródeł sygnałów AE wykorzystuje się procedury komparacji z sygnałem wzorcowym – zarówno w dziedzinie czasu jak i w dziedzinie częstotliwości. Stosuje się wówczas do klasyfikacji sygnałów AE aplikacje typowe dla sieci neuronowych przy porównawczej bazie danych uzyskanej wstępnie z pomiarów (często są to prążki widma mocy).

Ekstrakcja zaszumionych sygnałów AE wymaga zwykle stosowania oprogramowania typu *pattern recognition*. Dla separacji sygnału i jako narzędzia decyzyjne stosuje się algorytmy z teorii sieci neuronowych: sieci adaptacyjnych globalnie oraz lokalnie.

Wykorzystywane są również metody korelacyjne, w których analizuje się korelację sygnału uzyskanego z wadliwego obiektu z sygnałem wzorcowym.

## **5. KONKLUZJE**

AE umożliwia wczesną detekcję uszkodzeń, eliminowanie elementów wadliwych, zwiększenie bezpieczeństwa i przedłużenie okresu eksploatacji badanych obiektów. Efektywność badań AE uzależniona jest w dużym stopniu od procedur cyfrowego przetwarzania sygnałów prowadzących do redukcji szumów tła, rozwiązywania problemów inwersji przy propagacji fal czy też lokalizacji źródeł mikrouszkodzeń; wymagają one dalszego doskonalenia.

Badania AE są realizowane w ramach umowy trójstronnej między Politechniką Gdańską, Akademią Morską w Gdyni oraz Politechniką w Brnie dotyczącej m. in. badań diagnostycznych materiałów i elementów statków morskich.

## **6. BIBLIOGRAFIA**

1. Non-destructive testing method of acoustic emission with generated load, Chobola Z., Korenska M., Pazdera L., Smutny J., Šikula J., Weber Z., Proc. Int. Workshop "Physical Properties of Materials", Bratislava 2000, s. 63-64.
2. AE- Sensor Overview, Vallen-Systeme GmbH data sheet.
3. Spiralski L., Hasse L., Šikula J., Cwilewicz R.: Nondestructive investigations of materials and mechanical objects by means of the random phenomena analysis, Proc. Review Seminar on Scientific Cooperation between Austria and Poland, May 27-30, 2001, Vienna: Scien. Centre of the Pol. Acad. of Sci, s. 39-41.

### **MEASUREMENT AND PROCESSING OF ACOUSTIC EMISSION SIGNALS IN OBJECT DIAGNOSTICS**

A short review of non-destructive diagnostic testing methods has been concentrated on application of acoustic emission (AE) and electromagnetic emission (EME) analysis emphasizing advantages of their using. The experiment indicating on the correlation between AE and EME signals and enabling of AE signal source localization in a defect place was described. The simplified physical model of the phenomenon has been presented.

A reconstruction of distorted and buried in noise images of defective faults requires an application of specialized method of signal processing. It concerns a parameter and characteristic of nonstationary pulse signals estimation (e.g. rise time, impulse width and energy). Tools of effective analysis of acquired and represented data using appropriate software have been reported. Their application in diagnostics leads to elimination of faulty elements increasing safety and operation prolongation of tested objects.