

MONITOROWANIE STANU KONSTRUKCJI Z WYKORZYSTANIEM CZUJNIKÓW PIEZOELEKTRYCZNYCH DO POMIARÓW I METODY DYSTORSJI WIRTUALNYCH DO ANALIZY

Przemysław KOŁAKOWSKI, Andrzej ŚWIERCZ
CONTEC s.j., Warszawa, <http://www.smart-tech.pl/>
Jan HOLNICKI-SZULC, Jerzy MOTYLEWSKI
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN, Warszawa, <http://smart.ippt.gov.pl/>

1. Wprowadzenie

Starzejąca się infrastruktura i rosnące obciążenia eksploatacyjne obiektów inżynierskich (np. mostów) są głównymi bodźcami dla szybko postępujących od kilkunastu lat badań naukowych nad nową, interdyscyplinarną dziedziną wiedzy technicznej o nazwie Monitorowanie Stanu technicznego Konstrukcji lub systemów (MSK, ang. *Structural Health Monitoring*). Dziedzina ta obejmuje zarówno aspekty teoretyczne np. metody analizy wibroakustycznej, teorię propagacji fal, cyfrową obróbkę sygnału, jak i czysto praktyczne np. sposoby wymuszenia drgań na rzeczywistych obiektach (aktywatory), oprzyrządowania obiektu, akwizycji (sensory) i obróbki (analizatory) danych pomiarowych, itp. W rozwijanych metodach MSK [1] dąży się do zlokalizowania uszkodzeń konstrukcji, oceny ich intensywności i ewentualnym prognozowaniu bezpiecznego czasu eksploatacji lub podjęciu decyzji o remoncie bądź wymianie uszkodzonego elementu. Zatem rozwój MSK przyczynia się do szeroko rozumianego bezpieczeństwa konstrukcji lub systemu.

Proces MSK postępuje według następującego schematu:

- a) obserwacja konstrukcji (systemu) w określonym czasie na podstawie dokonanych przez sensory, dyskretnie spróbkowanych pomiarów odpowiedzi dynamicznej, wywołanej działaniem aktywatora lub środowiska;
- b) wyodrębnienie na podstawie pomiarów parametrów konstrukcji wrażliwych na wykrycie uszkodzenia;
- c) analiza tych parametrów w celu określenia aktualnego stanu technicznego konstrukcji – porównanie odpowiedzi referencyjnej (dla konstrukcji pierwotnej) z odpowiedzią aktualną (dla konstrukcji uszkodzonej).

Pierwsze prace z zakresu MSK zajmowały się stwierdzeniem faktu czy konstrukcja jest uszkodzona (istnienie defektu). Następnie skoncentrowano się na kwantyfikacji defektu tj. określeniu jego lokalizacji, typu i rozciągłości (intensywności). Wyzwaniem pozostaje nadal zagadnienie prognozowania użytecznego czasu eksploatacji konstrukcji.

Historycznie problemy MSK wywodzą się z zagadnień wibroakustyki, w szczególności problemów diagnostyki maszyn np. turbin w elektrowniach. Są to analizy w zakresie tzw. niskich częstotliwości tj. 1 Hz – 10 kHz. Również nieniszczące metody badań, w szczególności metoda ultradźwiękowa, emisja akustyczna oraz holografia optyczna stanowią podwaliny wielu metod MSK. Są to analizy w zakresie wysokich (ultradźwiękowych) częstotliwości tj.

powyżej 20 kHz. W konsekwencji w sposób najbardziej ogólny można podzielić metody MSK na nisko i wysokoczęstotliwościowe.

2. Metoda Dystorsji Wirtualnych - omówienie

Metoda Dystorsji Wirtualnych MDW [2] należy do metod szybkiej reanalizy [3] konstrukcji. W domyśle zakłada więc istnienie odpowiedzi bazowej, otrzymywanej z Metody Elementów Skończonych. Celem reanalizy jest uzyskanie efektywnej odpowiedzi konstrukcji na podstawie odpowiedzi bazowej przy założeniu lokalnej modyfikacji parametrów np. zmianie materiału lub przekroju pewnych elementów konstrukcji. Reanaliza ma zatem sens jeśli jest szybsza niż przeprowadzenie drugiej analizy konstrukcji ze zmienionymi parametrami.

Metoda Dystorsji Wirtualnych wykorzystuje tzw. macierz wpływu, która zawiera całą mechaniczną wiedzę o konstrukcji tj. topologię, charakterystyki elementów, warunki brzegowe. Jest to zbiór odpowiedzi konstrukcji na lokalne wymuszenia w kolejnych elementach w postaci jednostkowego odkształcenia lub w kolejnych węzłach w postaci jednostkowej siły. W ten sposób macierz wpływu gromadzi wszystkie lokalno-globalne relacje dla danej konstrukcji, co jest potem efektywnie wykorzystywane do obliczeń. W reanalizie, zmodyfikowaną odpowiedź konstrukcji uzyskuje się dzięki superpozycji odpowiedzi bazowej (otrzymanej z Metody Elementów Skończonych) oraz tzw. odpowiedzi rezydualnej (otrzymanej z Metody Dystorsji Wirtualnych). Odpowiedź rezydualna jest kombinacją liniową wyrazów macierzy wpływu i dystorsji wirtualnych, które są zmiennymi decyzyjnymi w analizie. Jest tak nawet w przypadku problemu odcinkowo nieliniowego (np. plastyczności), co jest niewątpliwą zaletą MDW. W konsekwencji zmodyfikowaną odpowiedź konstrukcji uzyskuje się w MDW poprzez jednokrotne rozwiązanie lokalnego układu równań, bez potrzeby iteracji.

Metoda Dystorsji Wirtualnych była efektywnie wykorzystywana w mechanice konstrukcji w problemach statyki np. analizie postępującego zniszczenia czy optymalizacji topologii. W ostatnich latach MDW została również sformułowana dla problemów dynamiki, zarówno w domenie czasowej jak i częstotliwościowej, w szczególności do identyfikacji uszkodzeń [4] i obciążeń [5]. Dzięki teorii grafów i analogiom pomiędzy kratownicami, sieciami wodnymi i obwodami elektrycznymi, MDW jest też wykorzystywana w hydraulice do identyfikacji wycieków w sieciach wodnych [6] oraz w inżynierii elektrycznej do identyfikacji degradacji przewodności w sieciach elektrycznych [7]. W obecnym kształcie MDW jest przystosowana do obliczeń dla konstrukcji prętowych (kratownic, belek).

3. Koncepcja piezodiagnostyki

Przetworniki piezoelektryczne są uniwersalnymi urządzeniami w diagnostyce, mogącymi służyć zarówno w charakterze sensorów (efekt piezoelektryczny wprost) jak i aktywatorów (efekt piezoelektryczny odwrotny). Jedne z pierwszych prac, wykorzystujących płytki z ceramiki PZT do generowania i detekcji fal sprężystych w płytach, opublikował zespół prof. Changa [8]. Płytki PZT były przyklejone do płyty głównej i pracowały w charakterze tensometrów, a nie jak w wielu problemach wibroakustyki w charakterze akcelerometrów. Od tej pory wiele ośrodków zajmuje się badaniami nad wykorzystaniem materiałów piezoelektrycznych do diagnostyki konstrukcji, przy założeniu pomiaru napięcia elektrycznego, proporcjonalnego do odkształceń. Badania te dotyczą w znakomitej większości wspomnianych we wprowadzeniu metod wysokoczęstotliwościowych, operujących w zakresie ultradźwięków, dla detekcji uszkodzeń lokalnych, podobnie jak metody nieniszczące.

Proponowane podejście zakłada wykorzystanie płytek z ceramiki PZT jako sensorów do detekcji odkształceń dynamicznych, w wybranych elementach konstrukcji. Zakładamy, że sensory będą równomiernie rozłożone w całej konstrukcji, aby wykrywać potencjalne uszkodzenia w całej konstrukcji (podejście globalne). Wymuszenie konstrukcji rozpatrujemy

jako dowolne, co wymusza analizę w domenie czasu lub harmoniczną, co umożliwia quasi-statyczną analizę w domenie częstości. Trzeba mieć punkt odniesienia w postaci odpowiedzi referencyjnej, czyli przebieg sygnału w czasie dla konstrukcji nieuszkodzonej. Jeśli odpowiedź aktualna różni się od referencyjnej, oznacza to wystąpienie uszkodzenia w konstrukcji.

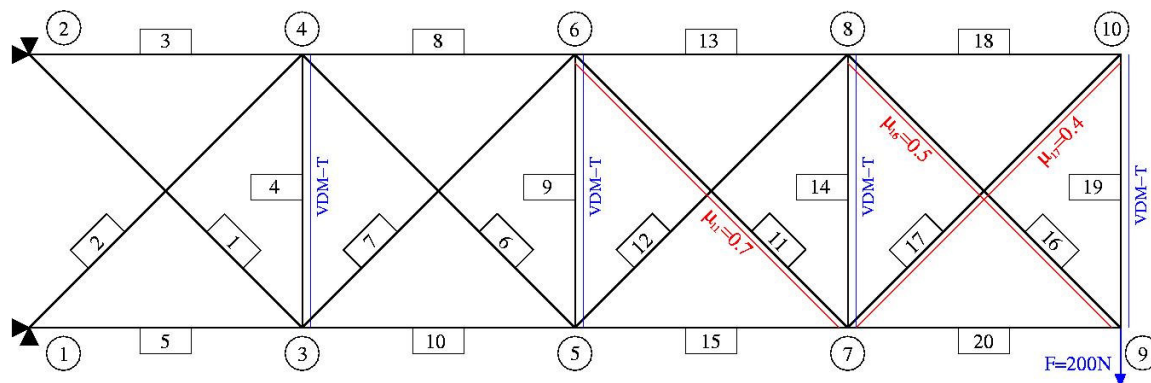
Proponowana metodologia należy do klasy metod ang. *model updating* czyli aktualizacji parametrów modelu, niezbędny więc jest model numeryczny w celu jej realizacji. Konstrukcja jest modelowana Metodą Elementów Skończonych, a podstawę algorytmu identyfikacji stanowi Metoda Dystorsji Wirtualnych. Uszkodzenie jest modelowane jako redukcja sztywności lub/i masy poprzez wygenerowanie odpowiednich pól dystorsji wirtualnych w konstrukcji. Wprowadzenie dystorsji wirtualnych ma na celu możliwie najlepsze dopasowanie odpowiedzi konstrukcji referencyjnej do odpowiedzi konstrukcji uszkodzonej. Funkcja celu w algorytmie optymalizacji sumuje po elementach różnice kwadratów odkształceń pomierzonych i modelowanych numerycznie. Użyty algorytm analizy odwrotnej wykorzystuje gradientowe metody optymalizacji dla rozwiązania problemu identyfikacji, w efekcie czego otrzymuje się lokalizację i intensywność uszkodzenia.

Istotną częścią weryfikacji proponowanej metodologii jest dopasowanie modelu do wyników eksperymentalnych. Po osiągnięciu zgodności modelu z eksperymentem wykonuje się serie pomiarów dla różnych scenariuszy uszkodzenia, symulowanego w doświadczeniu poprzez zmianę pierwotnych parametrów fizycznych (materiał) i/lub geometrycznych (przekrój poprzeczny) konstrukcji. Dla zebranych odpowiedzi eksperymentalnych rozwiązywane są zadania odwrotne czyli następuje identyfikacja (lokalizacja i parametry) podmienionych elementów w konstrukcji.

4. Analizy numeryczne

Dla zaprezentowania proponowanej metodologii wykrywania uszkodzeń zostanie przedstawiony przykład numeryczny kratownicy wspornikowej. Kratownica zbudowana jest z czterech segmentów pięcioelementowych o jednakowych parametrach materiałowych tj. module Younga $E=210$ GPa, przekroju poprzecznym $A=10^{-5}$ m², gęstości $\rho=7800$ kg/m³. Długość boku każdego z kwadratowych segmentów wynosi 1 m.

W pierwszym etapie kratownica jest pobudzana siłą harmoniczną o amplitudzie $F=200$ N i częstości $\omega=500$ rad/s. Założono scenariusz defektów w konstrukcji w postaci redukcji początkowej sztywności (współczynnik $\mu=1$) w elementach 11, 16 i 17 odpowiednio do wartości 0.7, 0.5 i 0.4. Widok kratownicy z zaznaczonymi elementami uszkodzonymi dla przyjętego scenariusza uszkodzeń przedstawia rys. 1.

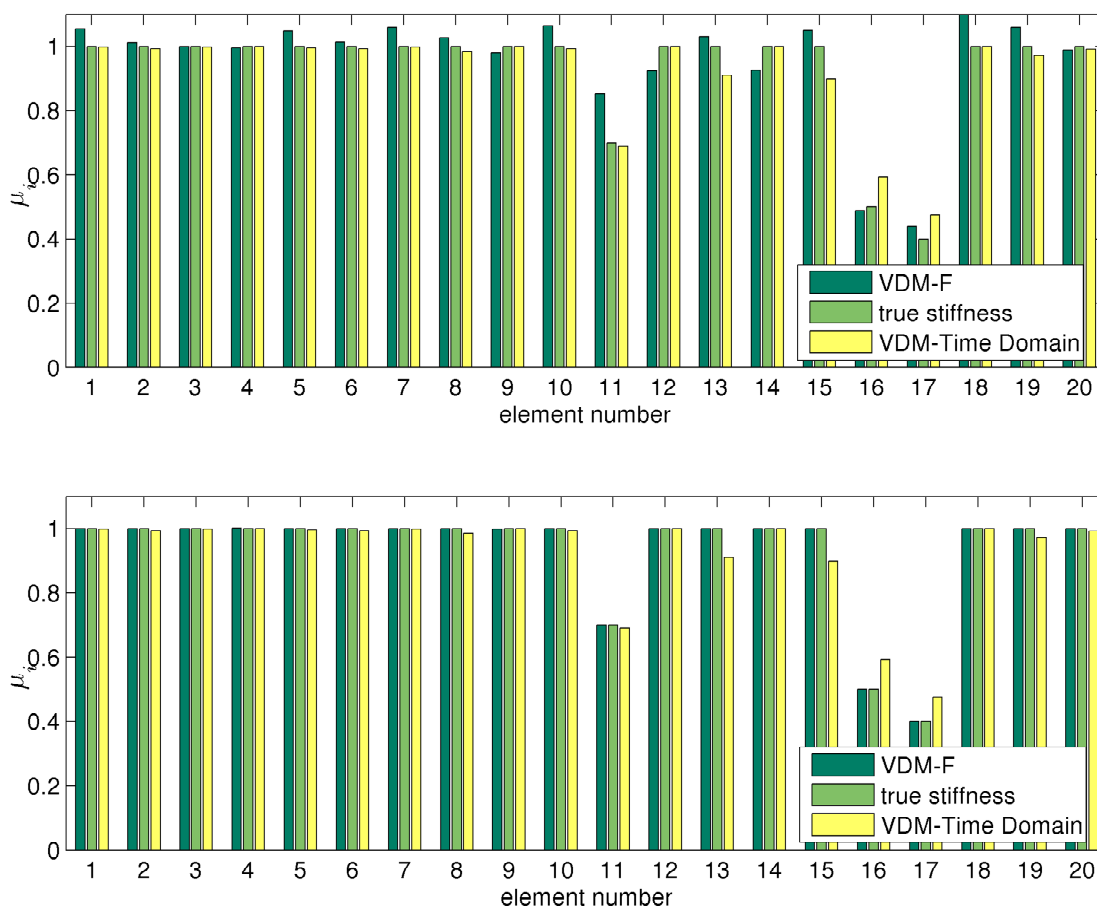


Rys. 1 Analizowana kratownica wspornikowa

W drugim etapie zastosowano zmodyfikowaną funkcję celu, sumującą odpowiedzi konstrukcji dla kilku arbitralnie wybranych częstości wymuszenia tj. $\omega=0, 500$ oraz 1000 rad/s. Rozważano analogiczne scenariusze defektów, jak w etapie pierwszym.

W trzecim etapie przeprowadzono identyfikację uszkodzeń Metodą Dystorsji Wirtualnych w domenie czasu. Jako wymuszenie impulsowe przyjęto siłę o amplitudzie $200N$, zmienną według tylko jednego okresu sinusoidy o częstości 1000 rad/s. Analizowany czas odpowiedzi wynosił 4 okresy wymuszenia. Identyfikację w domenie czasu przeprowadzono dla porównania dokładności z domeną częstości.

Wyniki identyfikacji uszkodzeń dla założonego scenariusza uszkodzeń przy jednej częstości wymuszenia przedstawia rys. 2a, a przy trzech częstościach wymuszenia rys. 2b. Na każdym z rysunków widoczne jest jakościowe porównanie identyfikacji w domenie częstości i czasu.



Rys. 2 Wyniki identyfikacji dla a) jednej częstości harmonicznej b) trzech częstości harmonicznych oraz porównanie z domeną czasu

Jakościowe wyniki uzyskane w domenie częstości dla trzech częstości wymuszenia są lepsze niż dla jednej. Należy podkreślić, że w domenie częstości wszystkie elementy wyposażone były w sensory, natomiast w domenie czasu liczba sensorów jest ograniczone do 4 sztuk w słupkach pionowych (patrz rys. 1). Mała liczba sensorów to niewątpliwa przewaga domeny czasu. Natomiast czasochłonność obliczeń zdecydowanie wskazuje na korzyść domeny częstości, w której optymalizacja trwała ok. 1 minuty, a w domenie czasu ponad 300 minut.

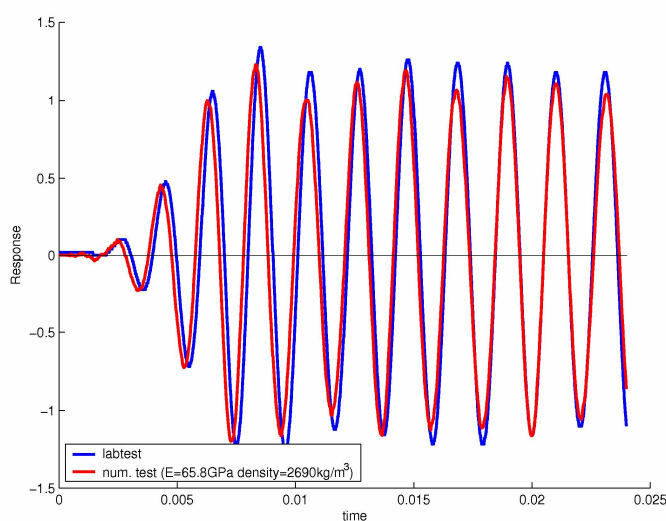
5. Badania eksperymentalne

Eksperymentalną weryfikację proponowanej metodologii rozpoczęto od prostej belki wspornikowej. Aluminiowa belka miała 1 m długości i przekrój prostokątny o wymiarach 2 x 0.5 cm. Model numeryczny składał się z 25 elementów skończonych. Wzbudzenie belki następowało dzięki aktywatorowi piezoelektrycznemu, przymocowanemu do belki śrubami, pokazanemu na rys. 3a. Odpowiedź była czytana przez płytkę piezoceramiczną PZT, przyklejoną do belki (rys. 3b). Jako sygnał wymuszający zastosowano sinus w oknie trójkątnym o częstotliwości odpowiadającej 4-tej częstotliwości własnej (ok. 150 Hz).



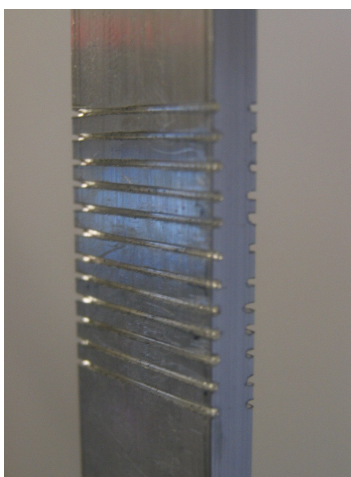
Rys. 3 Aktywator (a) i sensor (b) piezoelektryczny, zamontowane na belce wspornikowej

Pierwszym zadaniem było dostrojenie modelu elementów skończonych belki do odpowiedzi na zadane wymuszenie, uzyskanej w eksperymencie. Na podstawie powierzchni błędów, wykreślonej w pewnym zakresie zmienności parametrów, dobrano optymalnie moduł Younga $E=65.8$ GPa oraz gęstość $\rho=2690$ kg/m³ dla analizowanej belki. Zgodność odpowiedzi modelu i odpowiedzi eksperymentalnej można prześledzić na rys. 4.



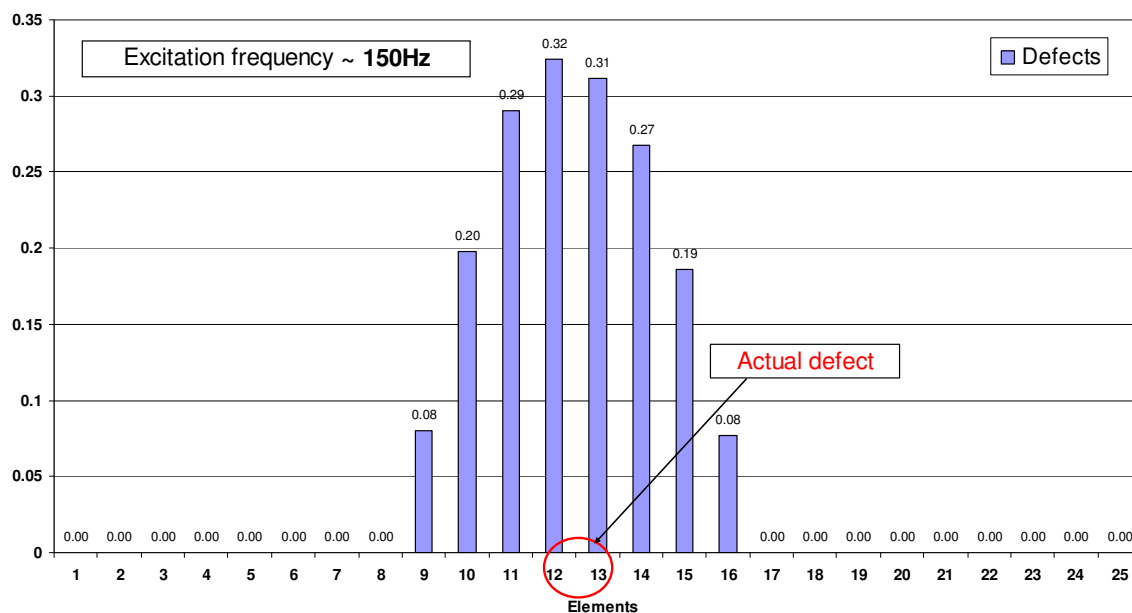
Rys. 4 Zgodność odpowiedzi numerycznej i eksperymentalnej dla belki wspornikowej

Uszkodzenie zaprojektowano jako serię nacięć (rys. 5) na obu krawędziach belki, mających na celu lokalne osłabienie sztywności.



Rys. 5 Lokalne osłabienie sztywności belki poprzez serię nacięć

Wynik identyfikacji analizowanego uszkodzenia przedstawia rys. 6.



Rys. 6 Identyfikacja osłabienia sztywności dla rzeczywistej belki wspornikowej

Następnym krokiem weryfikującym proponowaną metodologię będzie przetestowanie 3-wymiarowej kratownicy, pokazanej na rys. 7. Kratownica ta składa się z 70 elementów o przekroju rurowym i może być modelem dźwigara powierzchniowego. Każdy element kratownicy wyposażony jest w płytkę piezoceramiczną do odczytu odkształceń. Dzięki modularnej budowie węzłów kratownicy możliwa jest łatwa wymiana elementów i analiza innych właściwości materiałowych. W ten sposób realizowane będą różne scenariusze uszkodzenia w konstrukcji.



Rys. 7 Kratownica 3-wymiarowa do testów laboratoryjnych

W przyszłości planowane jest sprawdzenie możliwości aplikacji opisanego podejścia do monitorowania stanu technicznego rzeczywistych obiektów. Przewidziana jest instalacja oprzyrządowania i wykonanie pomiarów dla kratownicy mostowej, pokazanej na rys. 8.



Rys. 8 Rzeczywisty obiekt mostowy do przyszłych testów

6. Podsumowanie

W pracy zaprezentowano metodologię identyfikacji uszkodzenia w konstrukcji rozumianego jako redukcja sztywności/masy. Algorytm identyfikacji wykorzystuje Metodę Dystorsji Wirtualnych, która umożliwia modelowanie zmian sztywności/masy poprzez wprowadzenie do konstrukcji odpowiednich pól dystorsji wirtualnych. Jako sensory, które czytają odpowiedź konstrukcji, zastosowano płytki z piezoceramiki PZT.

Zaproponowano dwa podejścia dla rozwiązania problemu odwrotnego - jedno w domenie czasu z ograniczoną liczbą sensorów, ale długim czasem obliczeń, natomiast drugie w domenie częstości z wieloma sensorami, ale krótkim czasem obliczeń. Oba podejścia są efektywne w numerycznej lokalizacji defektów i określeniu ich intensywności.

Laboratoryjne próby eksperymentalne dla belki wspornikowej pozytywnie weryfikują zaproponowane podejścia. W przyszłości zostanie przeprowadzona podobna weryfikacja dla 3-wymiarowej kratownicy.

Planowana jest również demonstracja skuteczności opisanego metodologii monitorowania stanu konstrukcji dla rzeczywistego kratownicowego mostu kolejowego o konstrukcji stalowej. Badania te będą zrealizowane we współpracy z PKP PLK S.A.

7. Podziękowania

Autorzy pragną wyrazić podziękowania za wsparcie finansowe z projektów:

- DIADYN, PBZ-KBN-105/T10/2003 *Zintegrowany dynamiczny system oceny ryzyka, diagnostyki oraz sterowania dla obiektów i procesów technicznych*
- Grant 3T11F00930 *Nowe metody projektowania bezpiecznych konstrukcji, uwzględniające identyfikację zagrożeń i aktywną adaptację w stanach krytycznych*

8. Literatura

- [1] Sohn H., Farrar C. R., Hemez F. M., Shunk D. D., Stinemates D. W., Nadler B. R. (2003) *A Review of Structural Health Monitoring Literature: 1996-2001*, Los Alamos National Laboratory Report, LA-13976-MS
- [2] Holnicki-Szulc J., Gierlinski J. T. (1995) *Structural Analysis, Design and Control by the Virtual Distortion Method*, J. Wiley & Sons, Chichester, U.K.
- [3] Akgun M. A., Garcelon J. H., Haftka R. T. (2001) Fast Exact Linear and Non-linear Structural Reanalysis and the Sherman-Morrison-Woodbury Formulas, *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 50, pp. 1587–1606
- [4] Kolakowski P., Zielinski T. G., Holnicki-Szulc J. (2004) Damage Identification by the Dynamic Virtual Distortion Method, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 15(6), pp. 479–493
- [5] Jankowski L., Wiklo M. (2006) A Posteriori Impact Identification, *Proc. of the 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring*, 5-7 July, Granada, Spain, pp. 675-682
- [6] Holnicki-Szulc J., Kolakowski P., Nasher N. (2005) Leakage Detection in Water Networks, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 16(3), pp. 207–219
- [7] Kokot M., Holnicki-Szulc J. (2006) SHM Concept Applied to Dynamical Defect Identification in Electrical Circuits, *Proc. of the 3rd European Workshop on Structural Health Monitoring*, 5-7 July, Granada, Spain, pp. 1111-1118
- [8] Tracy M., Chang F.-K. (1998) Identifying Impacts in Composite Plates with Piezoelectric Strain Sensors, Part I: Theory, Part II: Experiment, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, vol. 9, pp. 920-937