

prof. dr hab. Jan Holnicki-Szulc
dr inż. Tomasz Zieliński
dr inż. Przemysław Kołakowski
dr inż. Jerzy Motylewski
mgr Anita Orłowska
mgr inż. Andrzej Świercz
dr inż. Dariusz Wiącek
Instytut Podstawowych Problemów Techniki PAN

Zastosowanie Metody Dystorsji Wirtualnych w badaniach uszkodzeń konstrukcji mechanicznych.

Identyfikacja uszkodzeń w konstrukcjach inżynierskich pomimo ogromnego rozwoju metod pomiarowych i narzędzi numerycznych wciąż pozostaje zadaniem aktualnym. Poszukiwane są metody pozwalające nie tylko na rejestrację faktu wystąpienia uszkodzenia, ale także na precyzyjne określenie położenia defektu i jego rozmiarów w jak najkrótszym czasie, przy jak najmniejszym nakładzie kosztów.

Przedmiotem badań wielu ośrodków europejskich są systemy bazujące na przetwornikach piezoelektrycznych, które mogą być zarówno źródłem jak i detektorem fal mechanicznych propagujących się w konstrukcjach. Efektem zainteresowania zastosowaniem materiałów piezoelektrycznych w monitorowaniu stanu konstrukcji jest projekt „Piezodiagnosics” rozpoczęty w 2001 roku. W ramach tego projektu kilku europejskich partnerów (IPPT PAN, ECL Lyon, Cedrat, Cegelec NDT, Alstom Cerg, CIMNE, CDRiA, TWI, WS Atkins Consultants L.) prowadziło przez trzy lata badania mające na celu opracowanie nowego, oryginalnego narzędzia identyfikacji korozji w konstrukcjach szczególnie na nią narażonych, takich jak gazociągi czy poszycia statków.

Celem niniejszej pracy jest przedstawienie wkładu wniesionego przez Pracownię Inteligentnych Technologii IPPT PAN w powyższą problematykę. Badania dotyczyły głównie możliwości wykorzystania Metody Dystorsji Wirtualnych jako

narzędzia identyfikacji uszkodzeń objawiających się zmianą cech sztywnościowych konstrukcji, przy pomijalnie małej zmianie masy. Rozwinięte zostały zarówno teoretyczne podstawy wspomnianej powyżej techniki wraz z oprogramowaniem jak również metody eksperymentalnej weryfikacji efektywności działania opracowanych algorytmów identyfikacji uszkodzeń.

1. Podstawy metodyczne zastosowanej Metody Dystorsji Wirtualnych

Metoda Dystorsji Wirtualnych (ang. Virtual Distortion Method – VDM) opiera się na wykorzystaniu pól wstępnych deformacji do modelowania zmian materiałowych w konstrukcji. W najprostszym, statycznym ujęciu VDM odpowiedź konstrukcji uszkodzonej ε_i jest liniową kombinacją odpowiedzi konstrukcji zdrowej ε_i^L oraz odpowiedzi rezydualnej ε_i^R :

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^L + \varepsilon_i^R \quad (1)$$

gdzie:

$$\varepsilon_i^R = \sum_j D_{ij} \hat{\varepsilon}_j \quad (2)$$

Oszacowanie członu rezydualnego wymaga znajomości tzw. macierzy wpływu D_{ij} , w której przechowywane są informacje o odkształceniach i-tego elementu powstałego w wyniku wprowadzenia stanu jednostkowej $\hat{\varepsilon}_j$, wstępnej deformacji elementu j-tego.

Macierz ta w przypadku konstrukcji kratowych, w których wstępną deformację elementu można opisać przy pomocy jednej liczby, jest macierzą kwadratową, o rozmiarze $n \times n$, gdzie n stanowi liczbę elementów skończonych z których jest zbudowany model MES. W przypadku elementów innego typu rozmiar macierzy D_{ij} ulega zwiększeniu.

Opierając się na postulatcie równości pól odkształceń i naprężeń konstrukcji modelowanej dystorsjami i konstrukcji uszkodzonej [1], można zdefiniować wektor modyfikacji sztywności konstrukcji μ_i :

$$\mu_i = \frac{\varepsilon_i - \hat{\varepsilon}_i}{\varepsilon_i} \quad (3)$$

Wektor ten opisuje modyfikację sztywności osiowej wprowadzoną w elemencie uszkodzonym. Znając wartość wektora μ_i można obliczyć wektor dystorsji wirtualnych stowarzyszony z określonym uszkodzeniem:

$$\varepsilon_i = (1 - \mu_i)\hat{\varepsilon}_i \quad (4)$$

Po podstawieniu do równania (1) związku (2) otrzymujemy wyrażenie opisujące odpowiedź konstrukcji uszkodzonej modelowanej dystorsjami w następującej postaci:

$$\varepsilon_i = \varepsilon_i^L + \sum_j D_{ij}\hat{\varepsilon}_j \quad (5)$$

gdzie:

$$\hat{\varepsilon}_i = (1 - \mu_i)\varepsilon_i$$

Z tak zapisanego układu równań macierzowych można wyliczyć wartość zmiennej ε_i , bądź też (jeżeli znana jest odpowiedź konstrukcji zmodyfikowanej) znaleźć wartość wektora μ_i opisującego uszkodzenie.

Przedstawiony powyżej opis należy odnieść do statyki konstrukcji, wszystkie macierze i wektory występujące we wzorach (1) do (5) zawierają odpowiedzi konstrukcji obciążonej statycznie.

Równania opisujące zachowanie konstrukcji zmodyfikowanej obciążonej dynamicznie, przyjmują analogiczną postać, z tą jedynie różnicą że wszystkie występujące w nich wielkości są zależne od czasu:

$$\varepsilon_i(t) = \varepsilon_i^L(t) + \sum_{\tau=0}^t \sum_j D_{ij}(t-\tau)\hat{\varepsilon}_j(\tau) \quad (6)$$

W występującej w równaniu (6) trójwymiarowej macierzy wpływu przechowywane są teraz odpowiedzi konstrukcji na obciążenie siłą impulsową węzłów odpowiadających jej kolejnym elementom (stąd też dynamiczne ujęcie metody nazywane jest Metodą Impulsowych Dystorsji Wirtualnych). Wprowadzenie zależności czasowych do opisu VDM stanowi oryginalny wkład zespołu Pracowni Inteligentnych Technologii IPPT PAN [1].

2) Zastosowanie VDM w problemie identyfikacji uszkodzeń

Istotną zaletą zastosowania metody VDM jest możliwość wyprowadzenia analitycznych wzorów na składowe gradientu funkcji przejścia, a co za tym idzie wykorzystanie gradientowych metod optymalizacji w celu rozwiązania problemu identyfikacji zmian materiałowych w konstrukcji.

W ramach projektu „Piezodiagnosics” opracowano narzędzia numeryczne przeznaczone do identyfikacji uszkodzeń w konstrukcjach prętowych (kratowych) i belkowych. Za podstawę identyfikacji defektu w stworzonym oprogramowaniu została przyjęta minimalizacja funkcji celu f w postaci:

$$f = \sum_{A,t} (\varepsilon_A^M(t) - \varepsilon_A(t))^2 \quad (7)$$

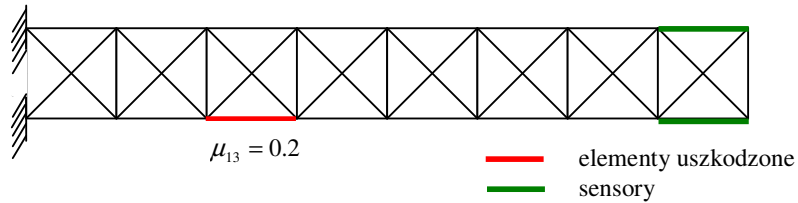
gdzie ε_A^M jest odpowiedzią konstrukcji uszkodzonej otrzymaną eksperymentalnie, natomiast ε_A stanowi odpowiedź konstrukcji modelowanej dystorsjami. Zmienną decyzyjną w tak sformułowanym zadaniu optymalizacji jest wektor modyfikacji sztywnościowej konstrukcji związany z wielkością ε_A .

3. Wyniki badań

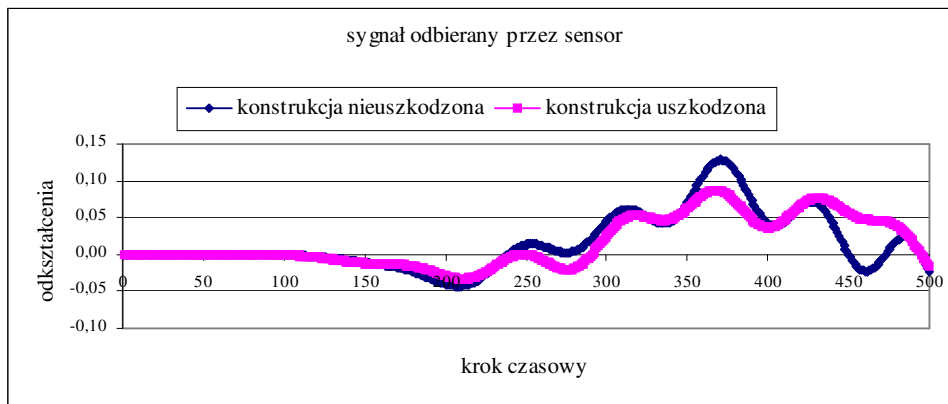
Dla przykładu przedstawione zostaną wyniki identyfikacji pojedynczego defektu oraz czterech jednocześnie występujących uszkodzeń. Obliczenia zostały wykonane dla kratownicy 40-to elementowej z dwoma symetrycznie rozmieszczonymi sensorami. Zarówno w przypadku pojedynczego uszkodzenia (rys.1), jak i kilku jednocześnie

występujących defektów (rys. 2), w wyniku minimalizacji funkcji celu opisanej równaniem (7) zidentyfikowane zostały współczynniki uszkodzenia odpowiadające wprowadzonym modyfikacjom sztywnościowym.

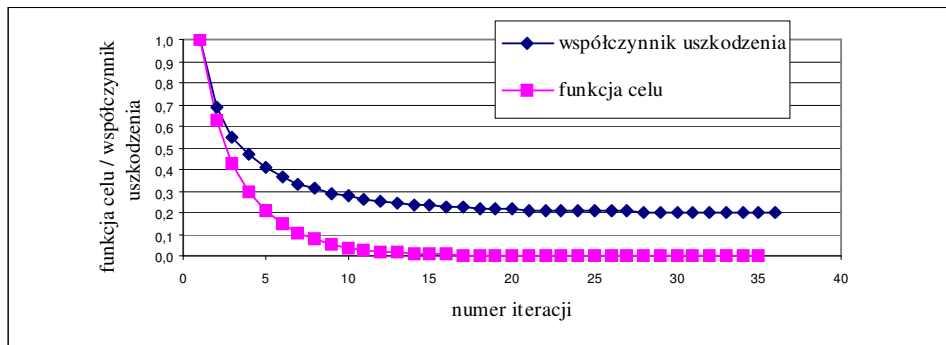
a)



b)

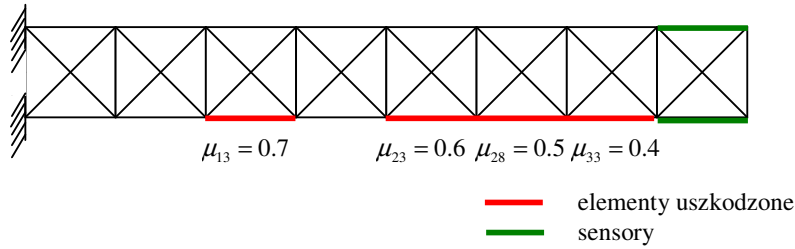


c)

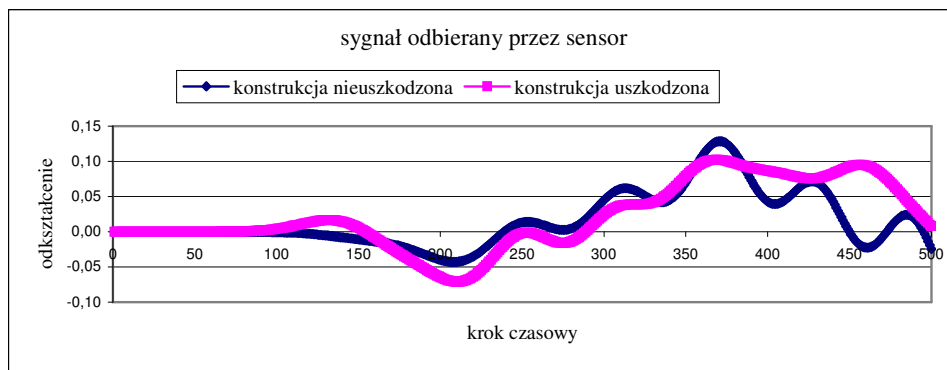


Rys. 1 Identyfikacja pojedynczego uszkodzenia. Model numeryczny (a), odkształcenia konstrukcji obciążonej dynamicznie (b), wyniki identyfikacji (c).

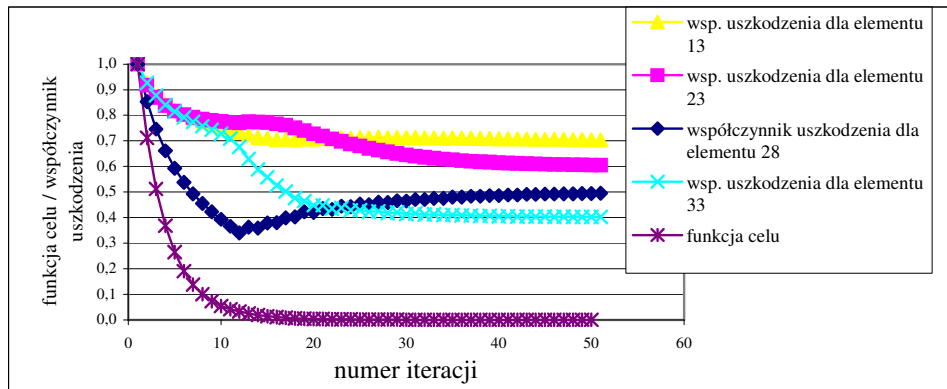
a)



b)



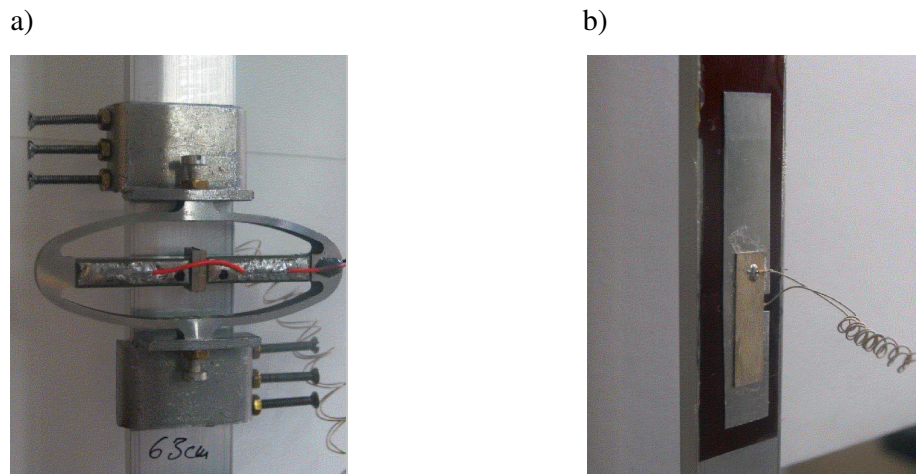
c)



Rys.2 Identyfikacja kilku jednocześnie występujących uszkodzeń. Model numeryczny (a), odpowiedź konstrukcji obciążonej dynamicznie (b), wyniki identyfikacji (c).

Przeprowadzono także weryfikację eksperymentalną metody VDM. Przedmiotem badań doświadczalnych była płaska, aluminiowa belka wspornikowa o długości ok. 1 m i przekroju prostokątnym o wymiarach 20 mm × 5 mm. W górnej części belki zamocowano piezo-aktywator wymuszający drgania giętne konstrukcji. W pobliżu swobodnego końca badanej próbki naklejoną został piezo-sensor o długości 25mm.

Napięciowy sygnał wymuszający o kształcie odpowiadającym jednemu okresowi sinusoidy z generatora funkcyjnego po wzmacnieniu podawany był na wzbudnik piezoelektryczny APA100M (produkt firmy Cedrat, jednego z partnerów projektu). Na uwagę zasługuje konstrukcja wzbudnika, która składa się z dwu słupków piezoelektrycznych pobudzających okalającą je eliptyczną obejmę (rys.3). Tego typu konstrukcja powoduje zwiększenie amplitudy sygnału wzbudzającego drgania.



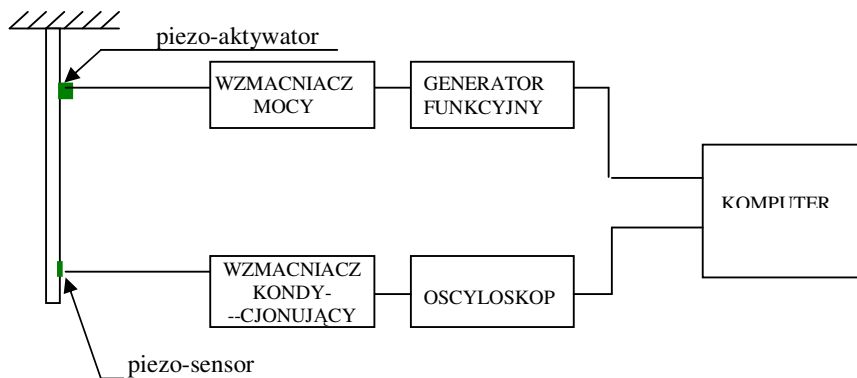
Rys. 3 Aktywator piezoelektryczny wzbudzający drgania (a), sensor piezoceramiczny (b).

Elementem odczytującym odkształcenia konstrukcji był sensor piezoceramiczny. Sygnał napięciowy generowany przez płytkę poddany został kondycjonowaniu a następnie zmierzony za pomocą oscyloskopu cyfrowego i przesyłany do komputera. Schemat blokowy układu pomiarowego podano na rys. 4.

Wykorzystując opisane stanowisko eksperymentalne wykonano dwa typy pomiarów. Pierwszy z nich obejmował badania konstrukcji nieuszkodzonej. Na podstawie zgromadzonych informacji dotyczących częstości drgań własnych

konstrukcji opracowano jej model numeryczny. Analiza modalna na podstawie której dobrano parametry materiałowe została wykonana w programie Adina. Następnie dopasowano odpowiedzi eksperymentalną i numeryczną uzyskaną wskutek wzbudzenia konstrukcji sygnałem sinusoidalnym o częstotliwości 130 Hz i czasie trwania równym 8 ms.

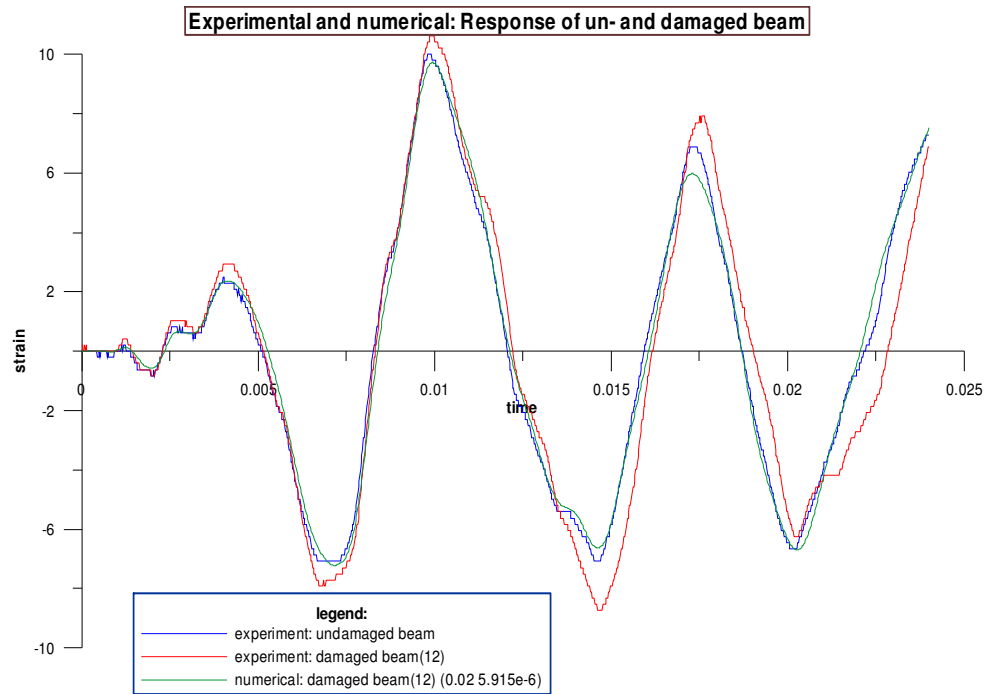
Drugi typ pomiarów dotyczył konstrukcji uszkodzonej. Na odcinku 2.5 cm wykonano w poprzek belki 12 par symetrycznych nacięć. Dla takiej konstrukcji przeprowadzono pomiar odpowiedzi na wymuszenie dynamiczne i w oparciu o uzyskany wynik przeprowadzono identyfikację uszkodzenia.



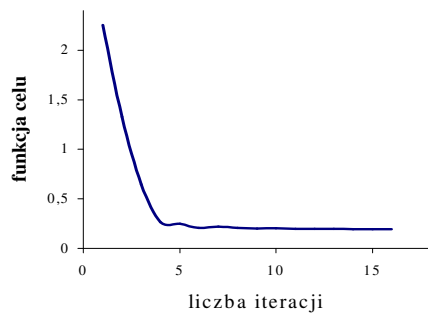
Rys. 4 Schemat układu pomiarowego.

Wyniki eksperymentalnej weryfikacji algorytmu identyfikacji podano na rys. 5. Maksymalne wskazane uszkodzenia przypadają na elementy 12 i 13 odpowiadające w przyjętym modelu obszarowi uszkodzonemu. Rozmycie wyniku na elementy sąsiednie jest spowodowane faktem iż dla sygnału wymuszającego o przyjętej częstotliwości, różnica odpowiedzi konstrukcji uszkodzonej tylko na odcinku odpowiadającym elementom 12 i 13 i konstrukcji z defektem o odpowiednio większej intensywności (gdzie uszkodzenie rozciąga się na elementy sąsiednie) jest bardzo mała.

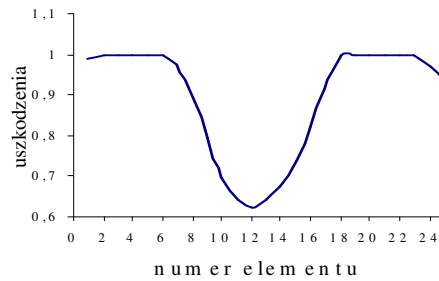
a)



b)



c)



Rys. 5 Wyniki eksperymentalnej weryfikacji algorytmu identyfikacji uszkodzeń. Porównanie odpowiedzi czasowej eksperymentalnej i numerycznej (a), wartość funkcji celu uzyskiwana w poszczególnych iteracjach działania procedury optymalizacyjnej (b), obliczone wartości współczynników uszkodzenia dla poszczególnych elementów (c).

4) Podsumowanie

Przeprowadzone badania numeryczne i eksperymentalne wykazują przydatność metody identyfikacji uszkodzeń konstrukcji opartej na zastosowaniu Metody Dystorsji Wirtualnych. Problemem numerycznym może być wykrycie bardzo małych uszkodzeń ze względu na konieczność wykonania obliczeń dla odpowiednio gęstej dyskretyzacji przestrzennej i czasowej. Otrzymane wyniki zachęcają do dalszych prac zmierzających w kierunku poprawy efektywności działania algorytmu identyfikacji uszkodzeń oraz zastosowania metody VDM do modelowania i identyfikacji innych typów uszkodzeń konstrukcji mechanicznych (np. delaminacji).

Literatura:

1. Zieliński T. G. , , „Metoda Impulsowych Dystorsji Wirtualnych z zastosowaniem do modelowania i identyfikacji defektów w konstrukcjach”, Prace IPPT PAN, nr 1/2005
2. Moetakef, M.A., Joshi, S.P., Lawrence, K.L., “Elastic Wave Generation by Piezoceramic Patches”, *AIAA Journal*, vol.34, No.10, 1996.
3. Mahmoud, M.A., Abu Kiefa, M.A., “Neural Network Solution of the Inverse Vibration Problem”, *NDT&E International*, 32, 1999, pp.91-99.
4. Holnicki-Szulc, J., Gierlinski, J.T., “Structural Analysis, Design and Control by the VDM Method”, *J. Wiley & Sons, Chichester*, 1995.
5. Kolakowski, P., Holnicki-Szulc, J., “Sensitivity Analysis of Truss Structures (Virtual Distortion Method Approach)”, *Int. Journal for Numerical Methods in Engineering*, vol.43, 1998, pp.1085-1108.
6. Holnicki-Szulc, J. and Zieliński, T.G., “Damage Identification Method Based on Analysis of Perturbation of Elastic Wave Propagation”, *Proc. of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring*, Fu-Kuo Chang, Ed., Stanford, September 1999.
7. Holnicki-Szulc, J. and Zieliński, T.G., “New Damage Identification Method Through the Gradient Based Optimisation”, *Proc. of the International Conference on System Identification & Structural Health Monitoring*, Gomes and Fu-Kuo Chang Ed., Madrid, June 2000.
8. Kawiecki, G., “Feasibility of Applying Distributed Piezotransducers to Structural Damage Detection”, *Journal of Intelligent Material, Systems and Structures*, vol.9, 1998, pp.1-9.