



A XII-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională  
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",  
SEBEȘ, 2012

## **STADIUL ACTUAL PRIVIND DETECTAREA VIBROACUSTICĂ A DEFECTELOR ÎN BARE PRISMATICE – Partea a II-a**

Elena Daniela BÎRDEANU, Ionică NEGRU, Gilbert-Rainer GILLICH

### **STATE-OF-THE-ART FOR VIBROACOUSTIC DAMAGE DETECTION IN PRISMATIC BEAMS - II -**

The paper contains a review of the technical literature concerning the detection, location, and characterization of structural damage via techniques that examine changes in measured structural vibration response. The report first categorizes the methods according to required measured data and analysis technique. The report describes the development of the damage-identification methods and summarizes the current state-of-the-art of the technology.

Cuvinte cheie: vibrații, detectarea vibroacustică a defectelor, bare prismatice

Keywords: vibration, vibration detection of defects, prismatic bars

### **1. Introducere**

Premisa fundamentală a detectării defectelor bazate pe vibrații este că deteriorarea va modifica în mod semnificativ rigiditatea, masa sau proprietățile de disipare a energiei unui sistem, care, la rândul său, modifică răspunsul dinamic măsurat al acestui sistem. Deși modul de detectare a defectelor bazate pe vibrații apare intuitiv, aplicarea sa efectivă ridică multe probleme tehnice semnificative. Cea mai mare provocare fundamentală este faptul că defectele sunt de obicei un fenomen local, și nu pot influența în mod semnificativ răspunsul

structurilor globale de mai mică frecvență, care este în mod normal, măsurat în timpul testelor de vibrații.

După o analiză aprofundată a literaturii privind dezvoltarea și aplicarea de tehnici VBDD, Doebing et al. (1996), în afara aspectelor critice pentru cercetarea viitoare în identificarea defectelor și monitorizarea stării de integritate: "O problemă de importanță primară este dependența de modele analitice anterioare și / sau date anterioare de testare pentru detectarea și localizarea defectelor. Numeroși algoritmi presupun accesul la o analiză detaliată a FEM (elementele finite ale modelului) din structură, în timp ce alții consideră că un set de date din structura nedeteriorată este disponibil. Adesea, lipsa de disponibilitate a acestui tip de date poate face o metodă dificil de aplicat pentru anumite aplicații. Deși este îndoielnic faptul că toată dependența de modelele anterioare și de date poate fi eliminată, anumite măsuri pot și ar trebui să fie luate pentru a reduce dependența de astfel de informații.

## 2. Metode de detectare a defectelor

### 2.1 Metode bazate pe schimbarea formei modului

#### a) Schimbarea directă în forma modului

Mai multe studii au indicat că schimbările în forma modului pot fi folosite pentru a detecta prezența și localizarea de defecte.

Numărul unic de măsuri privind modificările formei modului au fost propuse pentru a detecta defecte. O măsură comună cu un singur număr este Criteriul Modal de Asigurare (MAC) (Ewins, 2000). Valoarea MAC a două moduri  $\phi$  și  $\phi^*$  (de exemplu, unei forme a modului în stările nedeteriorate respectiv deteriorate), este definit ca:

$$\text{MAC} = \frac{\left| \sum_{j=1}^n \phi_j \phi_j^* \right|^2}{\sum_j \phi_j^2 \sum_j \phi_j^{*2}}$$

Având  $n$  grade de libertate ce definesc forma modului. Valoarea MAC indică, prin urmare, gradul de corelare între două moduri și variază de la 0 la 1, cu 0 reprezentând cazul în care nu există o corelație și 1 pentru cazul cu corelație perfectă. Abaterea de la 1 pentru o valoare MAC derivată dintr-o comparație a două măsurători pentru forma modului pe o structură dată poate fi interpretată ca o indicație a defectelor în structură.

Allemang (2002) oferă o imagine de ansamblu a utilizării de valori MAC și alte criterii de asigurare pentru corelația între două moduri. Srinivasan și Kot (1992) au constatat că schimbările în forma modului au fost un indicator mai sensibil la defecte decât schimbările în frecvențele de rezonanță pentru învelișul structurii. Aceste modificări au fost cuantificate prin modificări ale valorilor MAC comparativ formei modurilor deteriorate și nedeteriorate.

Coordonata Criteriului Modal de Asigurare (COMAC) este diferită de definiția MAC, deoarece oferă informații locale, precum și informații din combinarea modurilor diferite. COMAC de coordonată modală  $j$  utilizează  $m$  moduri este definită ca (West 1984):

$$COMAC_j = \frac{\left| \sum_{i=1}^m \phi_{j,i} \phi_{j,i}^* \right|^2}{\sum_{i=1}^m \phi_{j,i}^2 \sum_{i=1}^m \phi_{j,i}^{*2}}$$

În cazul în care deplasările modale de coordonată  $j$  din două seturi de măsurători sunt identice, valoarea COMAC este egal cu 1 pentru această coordonată. Cea mai mică valoare în orice punct COMAC indică locul cel mai probabil al defectului.

Salawu și Williams (1995) au constatat că valorile MAC ar putea fi folosite pentru a indica ce mod a fost cel mai benefic pentru reparațiile structurale. De asemenea, valorile COMAC au fost găsite pentru a da indicații bune privind prezența și localizarea reparațiilor. În aceste teste, două din cele trei puncte reparate au fost în mod corect identificate, însă, două locații false au fost, de asemenea, identificate. Succesul localizării defectelor utilizând valorile MAC și COMAC a fost găsit să depindă dacă sunt sau nu utilizate în modurile, locațiile de măsurare și analiza ce reflectă în mod corespunzător defectele. Astfel, s-a ajuns la concluzia că nu a fost posibil să se identifice toate zonele deteriorate, astfel cum au demonstrat faptul că un punct afectat nu a fost identificat în mod corespunzător.

Fox (1992) a demonstrat că un singur număr de măsuri a formelor, cum ar fi modul MAC a fost relativ insensibil la defecte într-o grindă deteriorată de o taietură de fierăstrău.

## **b) Modificarea în forma modului de curbură**

O alternativă la utilizarea formei modului direct pentru a obține informații despre modificările în caracteristicilor vibrației este utilizarea derivatelor formei, cum ar fi modul curburii (de exemplu derivata a doua a modului formei cu privire la poziție). Este de remarcă mai întâi că,

pentru grinzii, curbura  $K$  și tensiunea de încovoiere  $\varepsilon$ , sunt direct legate de

$$\varepsilon = \frac{\gamma}{R} = K \cdot \gamma$$

unde  $R$  este raza de curbură, și  $\gamma$  este distanța perpendiculară din punctul în chestiune a axei neutre. Aspecte practice legate de măsurarea directă a tensiunii sau calculul tensiunii pentru deplasări sau accelerații sunt discutate de către unii cercetători (Pandey ș.a. 1991, Chance ș.a. 1994, Salawu and Williams 1994)

Utilizarea formei modului de curbură pentru detectarea defectelor a fost introdus de Pandey ș.a. (1991). Să presupunem că modul formei pentru unitatea-normă într-o structură normalizată prevede stări inițiale (de bază) și stări deteriorate cunoscute și sunt notate cu vectori  $\phi_i$ , respectiv,  $\phi_i^*$ . Curbura vectorului asociat acestei forme al modului este dat de  $\phi_i''$  și  $\phi_i^{*''}$ , în cazul în care notația primei duble reprezintă derivata a doua spațială. În acest caz, creșterea în forma modului asociate a curburii defectului este calculat prin

$$\Delta\phi_i'' = \left| \phi_i^{*''} - \phi_i'' \right|$$

În cazul în care sunt utilizate multiple moduri, suma dintre diferențele de curbură pot fi utilizate ca un indicator de defect, după cum urmează:

$$\Delta\phi'' = \sum_{i=1}^n \Delta\phi_i''$$

unde  $n$  este numărul de moduri utilizate.

În investigațiile lor, Pandey ș.a. (1991) au făcut uz de modelele elementelor finite ale grinzilor tip consolă simplu sprijinite. Ei au descoperit că curba modală a fost de departe indicatorul cel mai sensibil al defectelor decât MAC sau valorile COMAC. Ei au sugerat, de asemenea, obținerea curbei experimentale a modului formelor direct prin măsurarea tensiunilor în locul deplasărilor sau a accelerațiilor.

Salawu și Williams (1994) au utilizat o curba măsurată a formei modului calculată folosind armonizarea diferenței centrale. Ei au comparat performanța acestei metode cu o schimbare în metoda directă a formei modului. Ei au demonstrat că schimbarea curbei nu a oferit de obicei, un bun indicator al defectului folosind datele experimentale. Ei au subliniat faptul că cel mai important factor a fost

selecția modurilor care trebuie utilizate în analiză. În plus, în cazul metodelor care trebuie aplicate unei structuri mari (curba formei modului și diferența formei modului relative), ar fi necesar să se măsoare răspunsul pentru un număr suficient al puncte, eventual într-un format grilă, în scopul de a perfecționa în mod rezonabil identificarea.

Chance ș.a. (1994) a constatat că calculul numeric al curbei pentru forma modului a dus la erori inacceptabile. În schimb, ei au folosit tensiunea măsurată pentru a calcula curba directă, cu rezultate îmbunătățite dramatic.

### **(c) Schimbarea energiei de deformare modală (metoda indicării defectului)**

Utilizarea schimbării energiei de deformare modală (MSE) pentru a detecta defecte structurale a fost folosită în mai multe studii. Conceptul de metodă a fost introdus de Stubbs ș.a. (1992). Ei au dezvoltat o metodă bazată pe reducerea energiei de deformare modală cauzată de defecte într-o zonă situată între două grade de libertate structurale, cum rezultă din curba măsurată a formei modului. Această metodă este menționată în literatura de specialitate ca metoda indicelui defectelor.

Pentru o structură care poate fi reprezentată ca o grindă, indicele defectului  $\beta$  bazat pe modificarea energiei de deformare modală în locația  $j$  pentru modul  $i$  poate fi exprimat după cum urmează:

$$\beta_{ji} = \frac{\left( \int_a^b [\phi_i^{**}(\chi)]^2 dx + \int_0^L [\phi_i^{**}(\chi)]^2 dx \right)}{\left( \int_a^b [\phi_i^*(\chi)]^2 dx + \int_0^L [\phi_i^*(\chi)]^2 dx \right)} \times \frac{\int_0^L [\phi_i^*(\chi)]^2 dx}{\int_0^L [\phi_i^{**}(\chi)]^2 dx} = \frac{NUM_{ji}}{DEN_{ji}}$$

unde  $\phi_i^*(\chi)$  și  $\phi_i^{**}(\chi)$  sunt funcții continue ale curbei modului formei pentru modul  $i$  în condiții de distanță  $x$ , de-a lungul grinzii, care corespunde structurilor nedeteriorate respectiv deteriorate, pe baza derivatelor a doua ale funcțiilor continue de deplasare ale formei modului  $\phi_i(\chi)$  și  $\phi_i^*(\chi)$ .

Kim și Stubbs (1995) au aplicat această abordare la un model grindă tip placă. A fost observat că defectul ar putea fi localizat cu încredere cu o relativ mică eroare de localizare și o eroare relativ mică fals-negativă (de exemplu, lipsă detectării unei locații adevărate a defectului), cu toate acestea au fost observate erori cu o incidență

relativ ridicată de fals-pozitive (de exemplu, predicția locațiilor care nu sunt deteriorate).

Chen ș.a. (1999) a folosit o distribuție bidimensională a tensiunii energetice pentru a detecta defecte pe o placă de aluminiu și o placă compusă supuse la diferite scenarii de defectare. Metoda s-a dovedit a fi eficace pentru detectarea defectelor în plăci.

### 3. Concluzii

■ Fox (1992) a realizat teste de impact modal pe o grindă realizând tăieturi de 1 mm, 3 mm și de 6 mm, situate la o adâncime de 200 mm de un capăt. Arcurile moi au fost utilizate pentru a simula condițiile libere limitate în timpul testelor. Analizele modale a exemplarelor de testare s-au efectuat, de asemenea, numeric, cu metoda elementelor finite. Deși frecvențele de rezonanță și valorile MAC au arătat puține schimbări, defectul ar putea fi localizat prin examinarea modificărilor relative în modul formei ale căror frecvențe au fost găsite pentru a schimba rezultatul defectelor.

■ Salawu și Williams (1993) aplică metoda matricei de eroare la o grindă FEM și compară rezultatele unor alte criterii, cum ar fi schimbări în modul de masă, forme normalizate și schimbări în matricea de rigiditate măsurată. Ei introduc, de asemenea, metoda cursorului matricei, care folosește teoria spațiului vectorial pentru a identifica rânduri și coloane diferite de zero ale unei matrice dinamice de eroare. Ei folosesc matricile parametrilor mășurați în toate aceste metode.

■ Budipriyanto și Swamidas (1994) au evaluat parametrii modali ai unei grinzi zîmtate în consolă atât în aer cât și parțial și complet scufundată în apă. Grinda zîmtată a fost simetrică pe ambele suprafețe de sus și de jos. Măsurătorile au fost efectuate cu accelerometre și timbre tensometrice. Rezultatele prezentate includ frecvențe naturale, ratele de amortizare, și magnitudini maxime de răspuns pentru toate combinațiile tipurilor de senzori și gradului de scufundare.

■ Chance ș.a. (1994) a testat o grindă care conține un "dispozitiv fisurat biliniar." Canelura a fost prelucrată în grindă și două piese au fost introduse în canelură. Formele modale din accelerometre nu au putut localiza fisura. Formele curbelor din măsurătorile tensometrice au localizat în mod evident defectul, cu condiția ca tractoarele tensometrice să fie situate destul de aproape de fisură.

■ Chen ș.a. (1995) a testat două secțiuni canal C, unde defectul a fost introdus succesiv prin tăierea la distanță a unor porțiuni

ale flanșei. Modul formelor identificate prin dezintegrarea fără vibrații a structurii nu s-au dovedit a fi utile în localizarea defectelor.

■ Problemele apărute sunt:

- Care este cel mai mic defect care poate fi detectat?
- Micile modificări de frecvență asociate cu scenariile defectelor studiate pot fi măsurate cu precizie?

- Cum va afecta precizia metodei comportamentul

nelinear?

- Cum poate un analist dezvolta cu exactitate matricile de sensibilitate pentru o structură existentă?

■ Reacția cercetătorilor a fost că răspunsurile la aceste întrebări generale nu sunt disponibile, iar acestea trebuie să fie studiate cu privire la cererea respectivă care este investigată.

## BIBLIOGRAFIE

- [1] Allemang, R.J., Brown, D.L., McGraw-Hill Book Company, 2002. *Experimental Modal Analysis*, *Shock and Vibration Handbook, Fifth Edition*, Harris, C.M.
- [2] Ewins, D.J. 2000, *Modal Testing: Theory, Practice and Application*, Research Studies Press, Baldock, England.
- [3] Budipriyanto, A. and A.S.J. Swamidas, 1994, "Experimental and Analytical Verification of Modal Behavior of Uncracked/Cracked Plates in Air and Water," in *Proc. of the 12<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference*.
- [4] Chance, J., G.R. Tomlinson, and K. Worden, 1994, "A Simplified Approach to the Numerical and Experimental Modeling of the Dynamics of a Cracked Beam," in *Proc. Of the 12th International Modal Analysis Conference*,
- [5] Chen, H.L., C.C. Spyrakos, and G. Venkatesh, 1995, "Evaluating Structural Deterioration by Dynamic Response," *Journal of Structural Engineering*.
- [6] Doebling, S.W., Farrar, C.R., and Prime, M.B. 1998. *A summary review of vibration based damage identification methods. Shock Vibration Digest*
- [7] Doebling Scott W., Charles R. Farrar & all, *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics: A Literature Review*.
- [8] Fox, C.H.J., 1992, "The Location of Defects in Structures: A Comparison of the Use of Natural Frequency and Mode Shape Data," in *Proc. of the 10th International Modal Analysis Conference*.
- [9] Kim J-T, Stubbs N, Farrar C R 1995, "Field Verification of a Nondestructive Damage Localization and Severity Estimation Algorithm" *Proc. 13th International Modal Analysis Conference*.
- [10] Pandey, A.K., M. Biswas, and M.M. Samman, 1991, "Damage Detection from Changes in Curvature Mode Shapes," *Journal of Sound and Vibration*.

- [11] Salawu, O.S. and C. Williams, 1993, "Structural Damage Detection Using Experimental Modal Analysis—A Comparison of Some Methods," in *Proc. of 11th International Modal Analysis Conference*.
- [12] Salawu, O.S. and C. Williams, 1994, "Damage Location Using Vibration Mode Shapes," in *Proc. of 12th International Modal Analysis Conference*.
- [13] Salawu, O.S. and C. Williams, 1995, "Bridge Assessment Using Forced-Vibration Testing," *Journal of Structural Engineering*.
- [14] Salawu, O.S. 1997, *Detection of structural damage through changes in frequency: a review. Engineering Structures*
- [15] Srinivasan, M.G. and C.A. Kot, 1992, "Effects of Damage on the Modal Parameters of a Cylindrical Shell," in *Proc. of the 10th International Modal Analysis Conference*.
- [16] Stubbs, N., J.-T. Kim, and K. Topole, 1992, "An Efficient and Robust Algorithm for Damage Localization in Offshore Platforms," in *Proc. ASCE Tenth Structures Congress*.
- [17] West, W.M., 1984, "Illustration of the Use of Modal Assurance Criterion to Detect Structural Changes in an Orbiter Test Specimen," in *Proc. Air Force Conference on Aircraft Structural Integrity*.
- [18] Zhengjie Zhou, *Vibration-Based Damage Detection of Simple Bridge Superstructures*.
- [19] Zimmerman, D.C., S.W. Smith, H.-M. Kim, and T.J. Bartkowicz, 1996, "Spacecraft Applications for Damage Detection Using Vibration Testing," in *Proc. of the 14th International Modal Analysis Conference*.
- [20] Zhou Zhengjie, *Vibration-Based Damage Detection of Simple Bridge Superstructures*.
- [21] Yuen, M.M.F., 1985, "A Numerical Study of the Eigenparameters of a Damaged Cantilever," *Journal of Sound and Vibration*.

Drd.Ing. Elena Daniela BÎRDEANU  
 Facultatea de Inginerie  
 Universitatea Eftimie Murgu Reșița, membru AGIR  
 e-mail: e.sgaverdea@uem.ro  
 Drd.Ing. Ionică NEGRU  
 Facultatea de Inginerie  
 Universitatea Eftimie Murgu Reșița, membru AGIR  
 e-mail: i.negru@uem.ro  
 Prof.Univ.Dr.Ing.Ec. Gilbert-Rainer GILLICH  
 Facultatea de Inginerie  
 Universitatea Eftimie Murgu Reșița, președinte AGIR Sucursala Caraș-Severin  
 e-mail: gr.gillich@uem.ro