A XI-a Conferință Națională multidisciplinară – cu participare internațională,
"Profesorul Dorin PAVEL – fondatorul hidroenergeticii românești",
SEBEȘ, 2011

LOCALIZAREA DEFECTULUI ÎN BARE ÎNCASTRATE UTILIZÂND INDICELE ABATERII RELATIVE A FRECVENȚELOR PROPRII

Petru Florin MINDA, Zeno Iosif PRAISACH, Gilbert Rainer GILLICH

LOCALIZATION OF DAMAGE IN CANTILEVER BEAMS USING THE RELATIVE SHIFT IN NATURAL FREQUENCIES

This paper presents a method to locate the damages in cantilever beams based on relative shift in natural frequencies. This method takes in to account the particular manner in which the natural frequencies of the first then modes change due to the occurrence of damage. The measured frequencies changes are a compared with values contained in a databases, determined on models using the finite element method. For these databases we consider a large number of damages locations. By comparing the changes in frequencies obtained trough measurements with those determined on models, for the first ten vibration modes, it was possible to locate damages with high accuracy.

Keywords: vibration, bar mixer, frequencies, detecting defects
Cuvinte cheie: vibrații, bară încastrată, frecvențe proprii, detectarea defectelor

1. Introducere

În scopul detectării defectelor care apar la diferite structuri este necesară inspectarea lor regulată şi controlul acestora. Există o serie de metode nedistructive de testare a acestor defecte. Metodele convenționale bazate pe inspectarea vizuală, analiza cu raze X sau cu ultrasunete au un caracter local, permițând o caracterizare precisă a

defectelor, dar necesită cunoaşterea poziției zonei în care este localizat defectul. Pe de altă parte, metodele dinamice, au un caracter global, putând indica apariția unui posibil defect într-o structură mare şi să localizeze zona cu defect. Un avantaj important al metodei dinamice este dat de faptul că nu este nevoie să avem acces la zona inspectată. Astfel, cele două metode nu se exclud una pe alta, ele putând fi utilizate complementar [1].

În literatura de specialitate sunt prezentate o serie de tehnici de detectare a defectelor utilizând măsurători de vibrații, bazate pe modificarea frecvenței naturale [2], [3], [4], modificarea deplasării sau rotirii pentru modurile de vibrație [5], [6], funcția de răspuns în frecvență, amortizare etc. Metodele pot fi directe [4] sau inverse [7], acestea din urmă urmărind depistarea modificărilor apărute în matricea de rigiditate, a maselor, de amortizare etc, ca urmare a apariției defectului.

Analizând aceste metode putem identifica o serie de probleme ce pot fi grupate în patru categorii. Prima categorie implică *achiziție de date şi procesare*. Vom pune în evidență două tipuri de probleme. Prima problemă se referă la datele utilizate în detectarea defectelor. Cunoscând evoluția în timp a accelerației sau a amplitudinii obținem frecvențele proprii sau formele modurilor de vibrație. Frecvențele proprii pot fi măsurate cu acuratețe mai mare decât formele modurilor de vibrație, deoarece acestea din urmă necesită estimarea distribuției spațiale a răspunsului. În contrast, frecvențele proprii sunt în legătură cu răspunsul în timp a structurii şi măsurarea frecvenței unui semnal poate fi făcută foarte precis. Chiar şi aşa, abaterea frecvenței, datorată defectelor poate fi determinată cu dificultate. Procesarea semnalelor poate duce la pierdere sau deteriorarea unor date măsurate. O altă problemă care apare aici, este utilizarea a mai multor senzori şi/sau a mai multor puncte de măsurare, în special pentru metodele bazate pe modele.

Problemele din a doua categorie se datorează *utilizării de modele matematice*, care pot duce la concluzii greşite în detectarea şi localizarea defectelor, deoarece erorile modelului matematic pot produce modificări ale frecvenței, care pot fi mai mari decât acelea generate de defect. Utilizând modele cu elemente finite se obțin informații referitoare la localizarea defectului, precizia acestora depinzând de gradele de libertate ale modelului şi în consecință de numărul de senzori utilizați.

O altă categorie de probleme se referă la *relații de intrare-ieşire*. Metodele bazate pe identificarea parametrilor au de-a face cu

semnale de intrare şi de ieşire măsurate pentru a determina parametrii sistemului. Zgomotele afectează aceste metode aşa cum de altfel le afectează şi pe cele bazate pe forme modale.

În final, *mediul înconjurător* poate duce la apariția de modificări în comportamentul structurii şi să modifice mai mult sau mai puțin frecvențele proprii şi astfel apare o altă categorie de probleme care pot să afecteze metodele de detectare a defectelor. Pe baza acestor observații, autorii au dezvoltat o metodă care să poată acoperi primele trei nivele de identificare a defectelor, metodă care se poate folosi pentru barele cu defect deschis având următoarele atribute:

- necesită utilizarea unui singur accelerometru, deci se bazează pe modificările frecvențelor proprii;
- localizează defecte şi evaluează severitatea lor cu o înaltă precizie;
- necesită o activitate redusă pe teren, dar presupune o muncă intensă în laborator;
- poate compensa influența mediului extern.

2. Considerente teoretice

Pentru grinda Euler-Bernoulli, prezentată în figura 1, putem scrie ecuația de mişcare:

$$\frac{\partial^4 v}{\partial x^4} + \frac{\rho A}{EI} \cdot \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} = 0 \qquad (1)$$

unde v este amplitudinea barei la distanța x măsurată de la capătul încastrat.

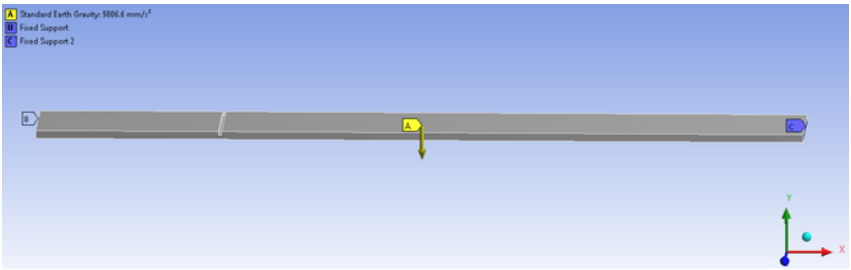

Fig. 1 Bara încastrată cu defect

Considerând că v depinde de distanța x şi momentul t, şi că evoluția în timp este armonică, expresia deplasării este:

$$v(x,t) = \varphi(x) \cdot y(t) = \varphi(x) \cdot \sin(\omega t + \phi) \qquad (2)$$

Înlocuind această funcție în ecuația (1), obținem:

$$\varphi^{iv}(x)\sin(\omega t + \phi) - \frac{\rho A \omega^2}{EI}\varphi(x)\sin(\omega t + \phi) = 0 \qquad (3)$$

$$\varphi^{iv}(x) - \frac{\rho A \omega^2}{EI}\varphi(x) = 0 \qquad (4)$$

ecuație care are soluția

$$\varphi(x) = A\sin\alpha x + B\cos\alpha x + C\sinh\alpha x + D\cosh\alpha x \qquad (5)$$

unde

$$\frac{\rho A \omega^2}{EI} = \alpha^4$$

Punând condițiile de mărginire pentru diverse variante de susținere a barei, din considerente mecanice, obținem:

- pentru bara încastrată la un singur capăt: $1 + \cos\lambda \cdot \cosh\lambda = 0$
- pentru bara încastrată la ambele capete: $1 - \cos\lambda \cdot \cosh\lambda = 0$
- pentru bara simplu rezemată: $\sin\lambda = 0$

pentru $\lambda = \alpha L$, ceea ce permite calculul valorilor λ_i pentru i moduri de vibrație. De aici se obțin frecvențele proprii, care, spre exemplificare, pentru bara încastrată la un capăt, sunt:

$$f_i = \frac{\lambda_i^2}{2\pi}\sqrt{\frac{EI}{\rho A L^4}} \qquad (6)$$

Cu relația (6), se calculează primele 10 frecvențe proprii pe direcție verticală, iar cu relația (7), se determină primele 10 forme modale pentru bara încastrată la un singur capăt, prezentate în figura 2.

$$\varphi_i(x) = (\cosh\alpha_i x - \cos\alpha_i x) - \frac{(\cos\alpha_i L + \cosh\alpha_i L)}{(\sin\alpha_i L + \sinh\alpha_i L)}(\sinh\alpha_i x - \sin\alpha_i x) \qquad (7)$$

În cazul barelor cu defecte apar modificări, atât în frecvență, cât şi în forma modală. Cercetările efectuate de autori au permis formularea unor concluzii legate de poziția defectului pe bară şi influența asupra frecvențelor proprii.

Astfel, pentru bare cu rigiditate EI constantă, independent de lungimea barei, pentru fiecare poziție a defectului, modificările de frecvență în cele 10 moduri de vibrație țin numai de caracteristicile geometrice, mecanice şi fizice ale barei (vezi relația 6) şi de geometria defectului.

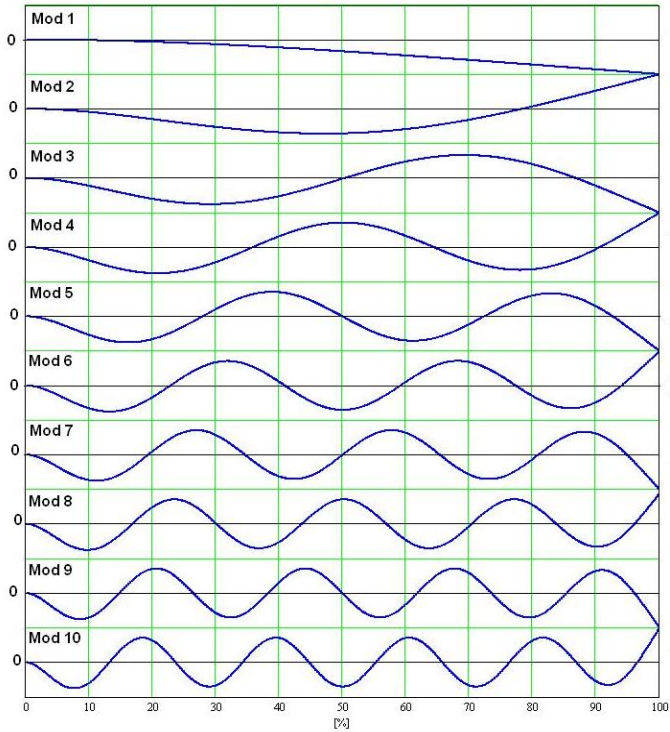

Fig. 2 Forma primelor 10 moduri de vibrație

3. Metoda propusă pentru localizarea defectelor

Pentru bara din figura 1, s-au simulat defecte pe un număr mare de poziții, utilizând metoda elementelor finite.

În urma analizei modale, s-au obținut primele 10 frecvențe proprii, pe care le-am reprezentat grafic, în care abscisa reprezintă lungimea barei, iar ordonata reprezintă variația frecvențelor naturale.

Figura 3 prezintă, spre exemplificare, variația frecvențelor naturale, pentru modul 1 şi modul 6 de vibrație, pentru defect ce reduce cu 50 % secțiunea transversală a barei.

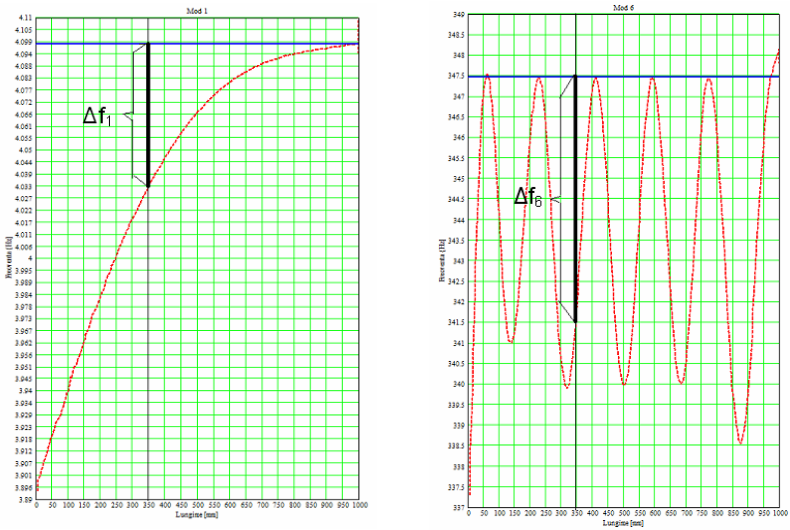

Fig. 3 Variația frecvențelor proprii

S-a introdus noțiunea de indice al abaterii relative, definit cu relația:

$$f_{i-D_j}^{*FEM} = \frac{\Delta f_{i-D_j}^{FEM}}{f_{i-U}^{FEM}} \cdot 100 = \frac{f_{i-U}^{FEM} - f_{i-D_j}^{FEM}}{f_{i-U}^{FEM}} \cdot 100 \qquad (8)$$

Matricea linie $S_{D_j} = (f_1, f_2, ..., f_{10})$ defineşte unic poziția defectului situat la distanța D_j de capătul încastrat, rezultate verificate şi experimental.

Figura 4 prezintă abaterea relativă, măsurată pentru bara reală cu defect, pentru D_j = *577* mm.

Tot în această figură sunt reprezentate curbele de tendință a abaterii relative pentru bara cu defect determinate utilizând FEM, pentru defecte situate la distanța D_j =*577* mm respectiv D_j = *587* mm, având adâncimea δ_k = *50* %, respectiv δ_k = *75* %, pentru fiecare caz.

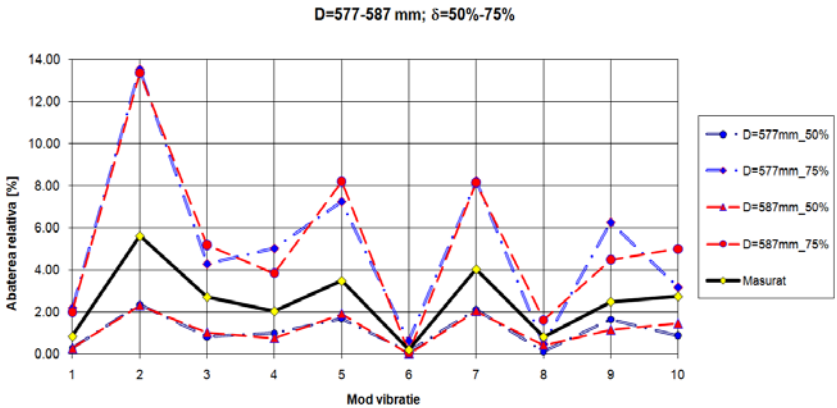

Fig. 4 Localizarea poziției defectului pe bara reală

4. Concluzii

■ Metoda propusă de autori permite definirea cu precizie ridicată, de maxim 5 %, a defectelor, utilizând analiza dinamică a sistemului.

■ Metoda este uşor de aplicat, deoarece utilizează un algoritm simplu, echipament minimal de măsurare a vibrațiilor şi poate fi aplicată structurilor pentru monitorizare la distanță fără intervenție umană.

Notă: Autorii mulțumesc pentru sprijinul acordat de Fondul Social European Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane (FSE POSDRU), prin Ministerul Muncii, Familiei şi Protecției Sociale prin co-finanțarea proiectului “Burse doctorale: investiții în cercetare-inovare-dezvoltare pentru viitor (DocInvest)” POSDRU/107/1.5/S/76813.

BIBLIOGRAFIE

[1] Balageas, D., Fritzen, C.P., Güemes, A., *Structural health monitoring*, ISTE Ltd, London, 2006.

[2] Cawley, P., Adams, R.D., *The location of defects in structures from measurements of natural frequencies*, Journal of Strain Analysis, 14(2), 1979, pag. 49-57.
[3] Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., Shevitz, D.W., *Damage identification and health monitoring of structural and mechanical systems from changes in their vibration characteristics: a literature review,* Report No. LA 13070-MS, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, NM, 1996.
[4] Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B., *A summary review of vibration based damage identification methods*, Shock Vibration Digest, 30(2), 1998, pag. 91-105.
[5] Friswell, M.I., *Damage identification using inverse methods*, Phil. Trans. R. Soc. A, 365 (2007), pag. 393-410.
[6] Friswell, M.I., Mottershead, J.E., *Finite element model updating in structural dynamics*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, The Netherlands, 1995.
[7] Pandey, A.K., Biswas, M., Samman, M.M., *Damage detection from changes in curvature mode shapes*, Journal of Sound and Vibration 145 (1991), pag. 321–332.
[8] Pandey, A.K., Biswas, M., *Damage Detection in Structures Using Changes in Flexibility*, Journal of Sound and Vibration, 169 (1994), pag. 3-17.
[9] Rytter, A., *Vibration based inspection of civil engineering structures*, Ph.D. Thesis, Aalborg University, Denmark, 1993.
[10] Salawu, O.S., *Detection of structural damage through changes in frequency*: *a review*, Engineering Structures, 19(9), 1997, pag. 718-723.
[11] Stubbs, N., Kim, J.T., Topple, K., *An effect and robust algorithm for damage localization in offshore platforms*, Proceedings of ASCE 10th Structural Congress, San Antonio, Texas, 1992, pag. 543-546.

Drd. Petru-Florin MINDA
cadru asociat, Universitatea ”Eftimie Murgu” Reşița
e-mail: f.minda@uem.ro
Dr.Ing. Zeno-Iosif PRAISACH
şef departament, S.C. Hydro Engineering S.A. Reşița
e-mail: zpraisach@yahoo.com
Prof. Dr.Ing.Ec. Gilbert-Rainer GILLICH
prorector învățământ
Universitatea ”Eftimie Murgu” Reşița
preşedinte Sucursalei AGIR Caraş-Severin
e-mail: gr.gillich@uem.ro