



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 I

Elena Daniela BÎRDEANU, Ionică NEGRU, Gilbert-Rainer GILLICH

STATE-OF-THE-ART FOR VIBROACOUSTIC DAMAGE DETECTION IN PRISMATIC BEAMS - I -

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

Principiul de bază pentru metodele de detectare a defectelor bazate pe vibrații (VBDD) este relativ simplu: din moment ce caracteristicile dinamice ale unei structuri (frecvențele naturale, în special modul formelor, și proprietățile de amortizare), sunt funcții ale proprietăților sale fizice (de exemplu, proprietățile materiale, de configurare geometrică, de distribuție de masă și a condițiilor suport), orice modificări ale acestor proprietăți fizice cauzate de defecte vor fi reflectate în modificările aduse caracteristicilor dinamice. Metodele VBDD, prin urmare, se bazează pe măsurători precise ale parametrilor

modali, de obicei, atât la o stare inițială (de preferință pură) și periodic în timpul duratei de funcționare a structurii. Schimbările măsurate în acești parametri sunt apoi folosite pentru a detecta, localiza, și cuantifica defectele.

O serie de cercetători au studiat utilizarea metodelor de detectare a defectelor bazate pe vibrații, de asemenea uneori menționate ca metode de identificare a defectelor pe bază de vibrații (VBDI), pentru a evalua starea podurilor și altor tipuri de structuri.

Premisa de bază a metodelor de detectare a defectelor bazate pe vibrații (VBDD) este utilizarea modificărilor în proprietățile dinamice (raportul de amortizare, în special, frecvența naturală și forma modului), a unei structuri cauzată de defecte pentru a detecta și localiza defecte. Ca urmare, primul pas a VBDD a fost de a determina cu exactitate schimbarea de forme sau a modului frecvențelor naturale; al doilea pas a fost apoi de a utiliza aceste schimbări pentru a detecta în mod fiabil defecte.

2. Metode de detectare a defectelor

2.1 Metode bazate pe schimbări de frecvență naturale

Cantitatea lucrărilor este destul de mare în literatura de specialitate referitoare la detectarea defectelor folosind schimbări în frecvența naturală (Loland și Dodds 1976, Cawley și Adams 1979, 1997 și Salawu Doebling la 1996). Observația că modificări ale proprietăților structurale ar trebui să provoace schimbări corespunzătoare în frecvențele vibrațiilor a fost, de fapt, un impuls pentru utilizarea metodelor de identificare modală pentru defecte și monitorizarea stării de integritate structurală. Simplitatea acestei abordări face mai atractivă modalitatea de detectare a defectelor. Cu toate acestea, schimbările de frecvență s-au dovedit a fi relativ insensibile la defecte, chiar mai rău, frecvențele naturale sunt foarte sensibile la schimbările de temperatură și de alte condiții de mediu.

Grupul de metode bazate pe schimbarea de frecvență pot fi divizate în două categorii: Categoria 1 - metodele sunt limitate la identificarea defectelor - Nivelul 1, în timp ce în categoria 2 sunt de obicei utilizate pentru nivelul 2 și nivelul 3 de identificare a defectelor. Pentru categoria 1 metodele au fost dezvoltate pentru mai mulți ani. Încă din 1976, Loland și Dodds (1976) au utilizat modificări în frecvențele de rezonanță și spectrele de răspuns pentru a identifica defecte în platformele petroliere offshore. Modificările frecvențelor de rezonanță de 3 %, în timp s-au observat și atribuit acelor modificări

aduse masei platformei și modificări la nivelul fluxului. Schimbările de frecvență de 10 % la 15 % au fost observate atunci când o modificare structurală a fost pusă în aplicare care seamăna cu o defecțiune structurală în apropierea liniei de plutire.

Astfel, autorii au ajuns la concluzia că schimbările în frecvența naturală și spectrul de răspuns ar putea fi folosite pentru a monitoriza integritatea structurală.

Cu toate acestea, studiul numeric și experimental al lui Fox (1992) pentru o grindă a dus la o concluzie diferită. În acest studiu, s-a constatat că schimbările în frecvențele de rezonanță au fost un indicator slab de defecte într-o grindă provocate de o tăietură de fierăstrău. În datele experimentale, frecvențele de rezonanță au fost de fapt observate prin creșterea ușoară pentru câteva moduri după ce defectul a fost a indus. Aceste creșteri au fost atribuite inexactității din metodele utilizate pentru a estima frecvențele de rezonanță.

Kim și Stubbs (2003) au constatat că frecvențele măsurate natural din primele trei moduri au crescut ușor, atunci când două defecte de dimensiuni mici au fost induse. Aceste creșteri au fost atribuite schimbărilor de temperatură ambiantă. Cu toate acestea, după introducerea a două defecte de dimensiuni mari, frecvențele naturale ale primelor trei moduri au scăzut în comparație cu stare nedefectată. S-a ajuns la concluzia că efectul temperaturii asupra proprietăților dinamice pare a fi o barieră semnificativă pentru aplicarea frecvențelor naturale, bazate pe metode de detectare a defectelor în structuri reale din inginerie civilă.

Bazat pe vibrații simultane și măsurători de mediu, Steenackers și Guillaume (2005) au propus o metodă care să stabilească corelația dintre variațiile de temperatură și variațiile frecvențelor de rezonanță care au rezultat. Autorii au concluzionat că este posibil să se distingă schimbări în parametrii modali datorită defectelor provocate de schimbările de temperatura sau variațiile de mediu.

Nasser ș.a. (2005) a prezentat o expresie simplificată de interes pentru definirea efectului temperaturii asupra parametrilor modali. O explicație a fost furnizată cu privire la modul în care temperatura influențează rigiditatea la încovoiere a unei structuri, și, astfel, parametrii modali. În cele din urmă, au modificat testele de detectare a defectelor pentru manipularea temperaturii măsurate ca parametru de poluare. Aplicarea metodelor statistice de testare, au monitorizat abaterile parametrilor modali în timpul efectului de respingere a temperaturii.

Categoria 2 a metodelor bazate pe schimbarea de frecvență, care include Nivelul 2 sau 3 pentru identificarea defectelor, este folosită

pentru a estima diferiți parametri a defectelor cum ar fi lungimea fisurii și/sau locația, schimbarea frecvenței.

Multe alte metode bazate de schimbarea de frecvență de categoria 2 au fost introduse în comentarii ale literaturii de specialitate Doebling ș.a. (1996 și 1998). Toate acestea s-au bazat pe modele, de obicei, bazându-se pe utilizarea modelelor de elemente finite. Cerința pentru un model exact poate fi un dezavantaj pentru aceste tipuri de metode, mai ales pentru structurile complicate.

O analiză aprofundată a literaturii pentru detectarea defectelor structurale, prin schimbări în frecvența proprie este dat de Salawu (1997). Avantajul major folosind doar frecvența proprie în evaluarea defectelor unei structuri este că acestea sunt achiziționate ușor, oferind o tehnică structurală de evaluare ieftină. Cu toate acestea, este nevoie de grijă deosebită pentru a filtra influența condițiilor de mediu, cum ar fi temperatura privind rigiditatea structurii și influența temperaturii în condiții limită. Un dezavantaj ulterior al tehnicilor frecvențelor proprii este că utilizează numai modelele ireale a defectelor care sunt uneori găsite. Aceste metode de obicei nu pot face distincția între defectul în locații simetrice, într-o structură simetrică, în plus, numărul de frecvențe proprii măsurate, în general, este mai mic decât numărul modelelor parametrilor necunoscuți, rezultând o soluție non-unic. Prin urmare, modul formelor este de multe ori, luat în considerare în cadrul procesului de evaluare a defectelor.

2.2. Metode bazate pe amortizare

Istoricul de utilizare a amortizării pentru evaluarea defectelor este la fel de mare ca și utilizarea schimbării naturale de frecvență, deși există foarte puțin în literatura de specialitate privind utilizarea de amortizări. Deficitul relativ din literatura de specialitate cu privire la detectarea defectelor pe baza amortizării poate fi atribuită atât lipsei de precizie în stabilirea proporției tehnice de identificare a amortizării din sistem cât și a lipsei aparente de consecvență în corelația dintre sistemul de amortizare și defecte.

Adams ș.a. (1975) a constatat că, în materialele plastice armate cu fibră, o stare de deteriorare ar putea fi detectată printr-o reducere în rigiditatea dinamică și o creștere a amortizării, dacă acest defect a fost localizat ca o fisură, sau distribuită în mare parte a modelului ca mai multe micro-fisuri. Cu toate acestea, Casas și Aparicio (1994) au făcut un test pe grinzi prismatice concrete parțial fisurate și au constatat că nu există nici o relație clară între creșterea fisurii și creșterea amortizării. De fapt, în testul efectuat pe o grindă

fisurată s-a constatat că avea valori de amortizare ușor mai scăzute decât cele pentru o grindă nefisurată.

De asemenea, Farrar și Jauregui (1998) au constatat că amortizarea în grinda placă de oțel nu crește sau descrește în mod consecvent la o creștere a nivelului de deteriorare.

3. Concluzii

■ În Gudmundson (1983), autorul se referă la comportamentul dinamic al grinzii fisurate. Ideea este că pierderea de rigiditate care rezultă din fisură poate fi reprezentată de o matrice echivalentă de flexibilitate. Matricea de flexibilitate este determinată de o ecuație a echilibrului energetic în cazul în care energia de elasticitate a matricei de flexibilitate este echilibrată cu energia de deformare în apropierea fisurii. Metoda este folosită pentru a calcula schimbările de frecvență pentru o grindă consolă cu fisuri de margine. Rezultatele sunt în acord cu datele experimentale.

■ Yuen (1985) efectuează modelarea FEM pe grinzi consolă unde defectul a fost modelat folosind un element de rigiditate redusă. El a descoperit modul forme bazate pe parametrii proprii pentru a fi ușor mai sensibil la defecte decât schimbările de frecvență.

■ Ju și Mimovich (1986) au modelat defecte în grinzi consolă, printr-o "balama fracturată", concept dezvoltat de autori. Defectul a fost modelat prin introducerea unei articulații fracturate în locul fisurii. Articulația fracturată este un arc de torsiune, a cărui rigiditate depinde de geometria fisurii. Puterea articulației fracturate ar putea fi măsurată experimental, și atunci când este inclusă în analiza ulterioară, ar putea fi folosită pentru a prezice schimbările de frecvență care rezultă din fisuri de 0,3 %. Utilizând schimbările de frecvență, autorii au reușit să localizeze defecte ale fisurii la maxim 3 % în medie, cu condiția ca fisura apărută într-o poziție a grinzii să aibă momentul de încovoiere mare. Autorii au avut mult mai puțin succes în estimarea intensității fisurii.

■ Sanders ș.a. (1989) prezintă o metodă, de asemenea, bazată pe măsurarea parametrilor modali, pentru a detecta locația și gradul de deteriorare în structuri. Lucrarea a fost bazată pe utilizarea de ecuații modale de sensibilitate, și se aplică grinzilor armate cu fibre compozite.

■ Ismail ș.a. (1990) a cercetat efectul de închidere a fisurii la oboseală cu privire la modificările frecvenței în grinzi consolă fisurate. Bazat pe un program combinat experimental-numeric, autorii ajung la concluzia că întreruperi exclusive ale frecvențelor de rezonanță mai ales pentru modurile mai mari, sunt măsuri insuficiente de severitate a

fisurilor. Fiabilitatea metodei de testare a vibrațiilor pentru a detecta prezența și natura fisurii a fost, însă, demonstrată.

■ Lin și Ewins (1990) au aplicat tehnica lor de localizare a neliniarității la o structură neliniară special concepută. Un cadru dreptunghiular, suspendat prin arcuri, a fost condus către un agitator cu o buclă de feedback, astfel încât forța aplicată a fost proporțională cu cubul deplasării. Matricea măsurată descrie neliniaritatea, pe baza modurilor măsurate la două niveluri de răspuns, care au indicat regiunea neliniarității, dar au arătat de asemenea indicii false în alte regiuni.

■ Rizos ș.a. (1990) a efectuat teste pe grinzi consolă de oțel; bucăți tăiate de 2 mm au fost introduse în locații pe toată lungimea grinzii. Grinda a fost excitată cu o rezonanță, și amplitudinea vibrației a fost măsurată în mai multe puncte de-a lungul lungimii. Din aceste măsurători de amplitudine, locația și lungimea fisurii au fost calculate. Valorile au fost stabilite la 8 % din valorile reale, în toate cazurile.

■ Kam și Lee (1992) au aplicat detectarea fisurilor și algoritmul locației pentru același set de date și au raportat, de asemenea, rezultate bune.

■ Stubbs și Osegueda (1990), aplică aceleași tehnici unei grinzi din aluminiu în consolă, defectul fiind simulat prin reducerea ariei secțiunii transversale a grinzii pe intervale de lungime limitate. Rezultatele procedurii de identificare a defectelor sunt similare cu cele obținute în exemplele numerice înregistrate de Stubbs și Osegueda (1990) și arată că această metodă poate localiza cu exactitate defectul și prezice cu exactitate amploarea defectului.

■ Kim și Bartkowicz (1993) au realizat un studiu numeric comercial folosind o grindă de aluminiu cu 40 de grade de libertate simplu acceptate. Autorii au arătat cum numărul senzorilor și a modurilor afectează capacitatea de a localiza defecte structurale.

■ Kaouk și Zimmerman (1994), aplică tehnicile matricei actualizate MRPT la o grindă consolă, cu o masă discret concentrată. Grinda a fost testată cu masa concentrată local, iar apoi masa a fost eliminată și grindă a fost supusă unei noi analize. Tehnica în acest caz a fost capabilă de a localiza defectul unic folosind primele patru moduri măsurate.

■ Perchard și Swamidas (1994) au obținut măsurători cu accelerometre și traductoare tensometrice pe o grindă consolă cu o creștătură prelucrată. Schimbările de frecvență nu s-au potrivit previziunilor FEM. Deformările bazate pe FRF au fost, de asemenea, foarte sensibile la defecte, cu condiția ca traductoarele tensometrice să fi fost destul de aproape de locația defectului.

■ Zimmerman ș.a. (1996) descrie dezvoltarea unui sistem integrat de detectare a defectelor structurale. Sistemul include hardware de achiziție de date și software de identificare a defectelor, și o deteriorare-test de identificare a articolului demonstrativ constând dintr-o grindă consolă cu diverse scenarii de defecte. Dificultatea primară întâmpinată a fost extragerea sistematică a parametrilor modali din datele măsurate de răspuns în frecvență.

■ 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 neliniar?

● 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] Adams, R.D., Walton, D., Flitcroft, J.E., Short, D., *Vibration Testing as a Nondestructive Test Tool for Composite Materials*, Composite Reliability, 1975.
- [2] Al-Nasser, Ebrahim, M., *A new Nonparametric Method for Estimating the Slope of Simple Linear Measurement Error Model in the Presence of Outliers*. Pak J. Statist, 2005.
- [3] Casas, J.R., Aparicio, A.C., *Structural Damage Identification from Dynamic-Test Data*, Journal of Structural Engineering , 1994.
- [4] Dodds, C.J., Loland, O., Begg, R.D., Mackenzie, A.C., *Structural Integrity Monitoring Using Digital Processing of Vibration Signals*, in Proc. 8th Annual Offshore Technology Conference, Houston, 1976.
- [5] Doebling, S.W., Charles, R., Farrar, ș.a., *Damage Identification and Health Monitoring of Structural and Mechanical Systems from Changes in Their Vibration Characteristics*. A Literature Review.
- [6] Doebling, S.W., Farrar, C.R., and Prime, M.B, *A summary review of vibration based damage identification methods. Shock Vibration Digest, 1998.*
- [7] Farrar, C.R., Jauregui, D.V., *Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Modal Data From the I-40 Bridge*, Los Alamos National Laboratory report LA-13074-MS, 1966.
- [8] Farrar, C.R. and D.V. Jauregui, 1996, *“Damage Detection Algorithms Applied to Experimental and Numerical Modal Data From the I-40 Bridge”*, Los Alamos National Laboratory report LA-13074-MS.

- [9] 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*.
- [10] Gudmundson, P., 1983, "The Dynamic Behavior of Slender Structures with Cross- Sectional Cracks," *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*..
- [11] Ismail, F., A. Ibrahim, and H.R. Martin, 1990, "Identification of Fatigue Cracks from Vibration Testing," *Journal of Sound and Vibration*.
- [12] Ju, F D & Mimovich, M. 1986, *Modal frequency method in diagnosis of fracture damage in structures Proc. Int. Conf. on Modal Analysis (Los Angeles)*.
- [13] Kam, T.Y. and T.Y. Lee, 1992, "Detection of Cracks in Structures Using Modal Test Data," *Engineering Fracture Mechanics*.
- [14] Kaouk, M. & Zimmerman D.C., 1994c, "Structural Damage Detection Using Measured Modal Data and No Original Analytical Model," in *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conf.*
- [15] Kim, H.M. & T.J. Bartkowicz, 1993, "Damage Detection and Health Monitoring of Large Space Structures, *Sound and Vibration*.
- [16] Kim, J. T. and N. Stubbs, 2003, "Crack Detection in Beam-Type Structures Using Frequency Data," *Journal of Sound and Vibration*..
- [17] Lin R.M. and D.J. Ewins, 1990, "On the Location of Structural Nonlinearity from Modal Testing—A Feasibility Study," in *Proc. of the 8th International Modal Analysis Conference*.
- [18] Perchard, D.R., and A.S.J. Swamidias, 1994, "Crack Detection in Slender Cantilever Plates Using Modal Analysis," in *Proc. of the 12th International Modal Analysis Conference*.
- [19] Rizos, P.F., N. Aspragathos, and A.D. Dimarogonas, 1990, "Identification of Crack Location and Magnitude in a Cantilever Beam from the Vibration Modes," *Journal of Sound and Vibration*.
- [20] Salawu, O. S. 1997, "Detection of structural damage through changes in frequency: A review." *Engineering Structures*, 19(9).
- [21] Sanders, D., R.N. Stubbs, and Y.I.Kim, 1989, "Global Nondestructive Damage Detection in Composite Structures," in *Proc. of the 7th International Modal Analysis Conference*.
- [22] Steenackers, G. and Guillaume, P. 2005, "Structural design optimization using a regressive finite element updating approach", *Proceedings of the 23rd IMAC Conference, Jan 31-Feb 3, Orlando, Fl. .*
- [23] Stubbs, N., T.H. Broome and R. Osegueda, 1990, "Nondestructive Construction Error Detection in Large Space Structures," *AIAA Journal*.

Drd.Ing. Elena Daniela BÎRDEANU

e-mail: e.sgaverdea@uem.ro

Drd.Ing. Ionică NEGRU

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