



A XVII-a Conferință internațională – multidisciplinară
„Profesorul Dorin Pavel – fondatorul hidroenergeticii românești”
SEBEȘ, 2017

METODĂ DE DETECTARE A DEFECTELOR GRINZILOR ÎNCASTRATE LA AMBELE CAPETE SUPUSE VARIAȚIILOR DE TEMPERATURĂ

Horia FURDUI, Ion Cornel MITULEȚU, Gilbert-Rainer GILLICH

METHOD TO DETECT STRUCTURAL DAMAGE IN DOUBLE-CLAMPED BEAMS IN CHANGING TEMPERATURE ENVIRONMENT

In this paper we present a method to detect damages in beam-like structures applicable if the temperature during structural monitoring is subject of changes. Experiments are performed on a steel beam for the intact case to attain a baseline. Afterwards, measurements are performed on a beam with known damage location. Comparison is made via Minkowski distance, and the location is found with precision, proving that the developed method is applicable for beams if temperature changes are present during monitoring.

Keywords: damage detection, natural frequency, temperature, filtering, correction, experimental method

Cuvinte cheie: detectarea defectelor, frecvențe proprii, temperatura, filtrare, corectare, metoda experimentală

1. Introducere

Metodele de detectare a defectelor cu ajutorul vibrațiilor prezentate în lucrările [1-3], au la bază analiza comparativă a unui set de valori ale frecvențelor proprii achiziționate la un moment dat cu un set de valori ale frecvențelor proprii achiziționate într-o stare inițială, numită stare de referință. Modul de rezemare încastrat-încastrat poate

împiedica sau limita deplasările axiale, ceea ce permite modificarea stării inițiale de încărcare cu forțe axiale a grinzii datorită dilatărilor sau contracțiilor produse de variațiile de temperatură. Pentru ca rezultatele concrete obținute în urma utilizării diferitelor metode de detectare a defectelor bazate pe modificarea relativă a valorilor frecvențelor proprii ca urmare a apariției sau evoluției defectului să fie viabile, este necesară prelucrarea valorilor determinate prin măsurători astfel încât să fie eliminată influența variației factorilor de mediu. În această lucrare vom prezenta o metodă de detectare a defectelor grinzilor încastrate la ambele capete expuse variațiilor de temperatură structurată în trei etape:

- calibrarea sistemului.
- filtrarea și corectarea valorilor frecvențelor proprii măsurate.
- detectarea și localizarea defectului.

Pentru a dovedi eficiența metodei, vom prezenta aplicarea acesteia pentru detectarea și localizarea defectelor unei grinzi reale. Determinările experimentale se vor face pentru o grindă cu lungimea $l = 1$ m, lățimea $b = 0,05$ m și înălțimea $h = 0,01$ m, confecționată din oțel carbon laminat marca OL 37. Măsurătorile se vor efectua utilizând standul experimental prezentat în figura 1.

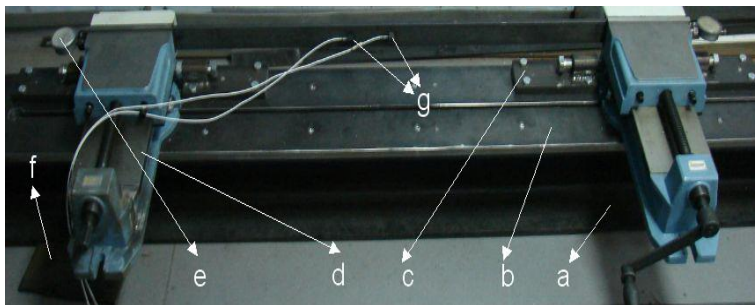


Fig. 1 Stand experimental pentru măsurarea valorilor frecvențelor proprii ale grinzii încastrate la ambele capete în condiții de temperaturi variabile, cu monitorizarea deplasărilor reazemelor

Standul este astfel construit încât să permită achiziționarea valorilor frecvențelor proprii ale grinzii încastrate la ambele capete cu și fără defect, modificarea temperaturii grinzii analizate, măsurarea valorii acesteia în momentul achiziției valorilor frecvențelor proprii și măsurarea deplasărilor reazemelor. Standul are ca bază o grindă din profil HEA 250, marcată cu (a) în figura 1, care are lungimea de 2,5 m.

Pe aceasta este montată o masă cu canal "T", (b) în figura 1, executată din tablă cu grosimea de 0,02 m. Cele două reazeme (încăstrări) sunt materializate de două menghine universale pentru mașini-unelte, marcate cu (d) în figura 1. Standul este dotat cu doi suportți magnetici pentru comparatoare cu cadran, (e) în figura 1, folosiți pentru monitorizarea deplasărilor axiale ale reazemelor. Pentru evitarea deplasărilor necontrolate și a rotirilor reazemelor standul a fost prevăzut cu sisteme de blocare cu șurub, notat (c) figura 1. Aceste sisteme permit și un reglaj exact al lungimii grinzii studiate.

Pentru măsurarea și achiziționarea valorilor frecvențelor proprii s-au folosit două accelerometre mono-axiale *Kistler 8772*, un sistem de achiziție cu patru canale *NI 9234*, un sistemul compact de transmitere a datelor *NI cDAQ-9172*, și un laptop. Pentru prelucrarea datelor obținute în urma măsurărilor de vibrații, s-a utilizat programul *LabVIEW*. Măsurarea temperaturii grinzilor analizate s-a realizat cu un termometru manual *Optris Laser Sight*, iar deplasările reazemelor s-au măsurat cu două comparatoare cu cadran.

2. Calibrarea sistemului

În această etapa a metodei de detectare a defectelor am determinat experimental valorile frecvențelor proprii ale primelor 6 moduri de vibrație transversală ale grinzii fără defect pentru temperatura de referință și pentru 5 valori ale temperaturii grinzii obținute prin încălzirea treptată a grinzii, de la temperatura de referință până la valoarea limită impusă de domeniul de utilizare al accelerometrelor, adică 65 °C. Pentru fiecare valoare măsurată a temperaturii la care au fost achiziționate frecvențele proprii s-au măsurat și deplasările sistemului Δl_s .

Tabelul 1

Parametru	Valori măsurate				
T [°C]	22,5	31,5	45	53,5	65,5
ΔT [°C]	0	9	22,5	31	43
Δl_s [m]	0	0,00008	0,0002	0,00028	0,00038
f mod 1 [Hz]	48,6536	45,8775	42,64603	40,48183	38,61872
f mod 2 [Hz]	133,83	130,633	126,925	124,413	122,332
f mod 3 [Hz]	265,5266	261,884	258,0888	255,7937	253,461
f mod 4 [Hz]	440,303	435,0948	429,4263	426,5311	424,6341
f mod 5 [Hz]	675,8196	671,7682	666,6463	663,5772	660,4918
f mod 6 [Hz]	955,3994	950,2185	945,1366	942,1311	940,0546

Valorile parametrilor măsurați pentru grinda fără defect sunt date

în tabelul 1.

Pe baza valorii frecvenței la temperatura de referință și a valorilor măsurate ale temperaturilor de achiziție și a deplasărilor sistemului vom calcula valorile frecvențelor proprii cu relația [1]:

$$f_i(T) = f_i(T_0) \sqrt{1 - \frac{A\alpha(T - T_0)l^2}{I\lambda_i^2}} \quad (1)$$

Valorile frecvențelor proprii determinate analitic pe baza parametrilor măsurați sunt date în tabelul 2.

Tabelul 2

Parametru	Valori măsurate / Valori analitice				
T [°C]	22,5	31,5	45	53,5	65,5
ΔT [°C]	0	9	22,5	31	43
Δ/s [m]	0	0,00008	0,0002	0,00028	0,00038
fa mod 1 [Hz]	48,6536	46,88372	44,09592	42,62316	39,28502
fa mod 2 [Hz]	133,83	131,4728	127,8555	125,9947	121,9157
fa mod 3 [Hz]	265,5266	263,1451	259,5318	257,6932	253,7122
fa mod 4 [Hz]	440,303	437,6946	433,7526	431,7541	427,444
fa mod 5 [Hz]	675,8196	673,1323	669,0812	667,032	662,6236
fa mod 6 [Hz]	955,3994	952,5628	948,2919	946,134	941,4977

Utilizând valorile măsurate ale frecvențelor proprii date în tabelul 1 și valorile calculate în funcție de valorile măsurate ale lui Δl_s și ΔT cu formula (1) date în tabelul 2, se vor determina ecuațiile factorilor de corecție cu variabila ΔT pentru cele 6 moduri de vibrație analizate. Pentru determinarea valorilor factorilor de corecție am reprezentat grafic în Excel curbele de variație a celor două seturi de valori pe intervalul de temperaturi pe care s-au efectuat măsurătorile și le-am aproximat cu curbe a căror funcții sunt cunoscute (exemplu dat în figura 2). Din diferența algebrică a celor două funcții vor rezulta ecuațiile de determinare a factorilor de corecție în funcție de ΔT pentru fiecare mod de vibrație în parte. Ecuațiile din care se determină valorile factorilor de corecție pentru fiecare mod de vibrație sunt:

$$C_1(\Delta T) = -4 \cdot 10^{-5} \Delta T^2 + 0,104 \Delta T - 0,09 \quad (2)$$

$$C_2(\Delta T) = -5 \cdot 10^{-5} \Delta T^2 + 0,78 \Delta T - 0,1 \quad (3)$$

$$C_3(\Delta T) = -5 \cdot 10^{-5} \Delta T^2 + 0,98 \Delta T + 0,1 \quad (4)$$

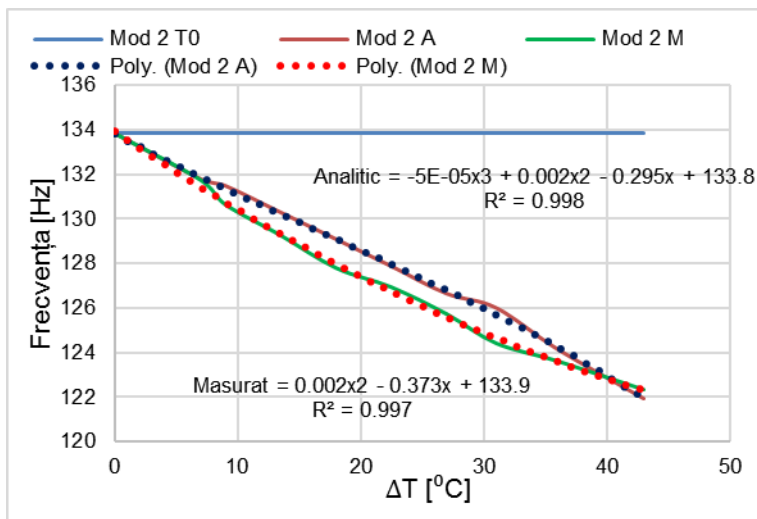


Fig. 2 Frecvențe mod 2 grindă fără defect

$$C_4(\Delta T) = -6 \cdot 10^{-5} \Delta T^3 - 0,003 \Delta T^2 + 0,328 \Delta T - 0,1 \quad (5)$$

$$C_5(\Delta T) = -6 \cdot 10^{-5} \Delta T^3 + 0,001 \Delta T^2 + 0,137 \Delta T + 0,1 \quad (6)$$

$$C_6(\Delta T) = -6 \cdot 10^{-5} \Delta T^3 - 0,001 \Delta T^2 + 0,195 \Delta T + 0,3 \quad (7)$$

Factorii de corecție determinați din ecuațiile (2-7) compensează deviațiile comportamentului dinamic al grinzii reale față de cel impus de relația analitică.

3. Filtrarea și corectarea valorilor măsurate ale frecvențelor proprii

În prima fază a acestei etape se vor realiza măsurători pe aceeași grindă după ce s-a practicat un defect deschis cu lățimea de 1 mm și adâncimea de 4 mm, situat la o distanță de 235 mm de reazem, care micșorează rigiditatea după axa slabă. Valorile parametrilor măsurați sunt date în tabelul 3.

După efectuarea măsurătorilor se vor calcula valorile factorilor de

corecție cu relațiile (2-7) pentru toate valorile ΔT măsurate, pentru fiecare mod de vibrație în parte.

Tabelul 3

Parametru	Valori măsurate				
T [°C]	23,5	37	46	53	64
ΔT [°C]	0	13,5	22,5	29,5	40,5
Δl_s [m]	0	0,00012	0,00019	0,00025	0,00035
f mod 1 [Hz]	49,4487	45,4206	42,4521	40,32436	38,7948
f mod 2 [Hz]	132,621	127,871	124,413	122,013	120,105
f mod 3 [Hz]	262,5916	256,4333	252,985	250,8413	248,7004
f mod 4 [Hz]	437,5136	429,0573	422,8997	420,9016	417,6912
f mod 5 [Hz]	665,5737	662,5136	661,5576	658,471	656,3934
f mod 6 [Hz]	934,9248	933,9118	932,8961	930,8469	929,36

Valorile calculate ale factorilor de corecție sunt date în tabelul 4.

Tabelul 4

Factor corecție	ΔT [°C]				
	0	4,5	22,5	29,5	40,5
mod 1	0	0,374355	1,794375	1,951105	1,464795
mod 2	0	0,246444	1,085469	0,917381	-0,26251
mod 3	0	0,536444	1,735469	1,707381	0,747494
mod 4	0	1,309783	5,077813	5,424908	4,277443
mod 5	0	0,531283	2,805313	3,271408	3,102943
mod 6	0	1,151783	3,497813	3,641908	2,571443

Valorile filtrate și corectate ale frecvențelor proprii măsurate se vor determina cu relația [1]:

$$f_{i \rightarrow ref}(\Delta l_s(\Delta T), \Delta T) = \frac{f_{i-mas}(\Delta T)}{\sqrt{1 - \frac{A\alpha l(\alpha l \Delta T - \Delta l_s(\Delta T))}{I\lambda_f^2}}} \quad (8)$$

Pentru determinarea acestor valorilor se vor utiliza valorile măsurate ale frecvențelor proprii, deplasărilor sistemului, temperaturilor și valorile calculate ale factorilor de corecție. Valorile astfel obținute mai conțin doar modificările produse de defect, care vor fi exploatate în etapa a treia a acestei metode în scopul detectării și localizării defectului.

Valorile filtrate ale frecvențelor proprii măsurate la diferite valori ale temperaturii pentru grinda cu defect sunt date în tabelul 5.

Tabelul 5

Frecvență filtrată [Hz]	ΔT [°C]				
	0	4,5	22,5	49,1888	40,5
mod 1	0	49,72093	49,52571	131,9257	49,65189
mod 2	0	132,6891	132,3852	261,5136	131,7277
mod 3	0	262,6573	261,5996	436,0983	261,1644
mod 4	0	438,6799	435,4801	676,0016	434,6778
mod 5	0	677,8746	677,2943	948,25	674,8348
mod 6	0	947,9609	947,6661	49,1888	947,3162

4. Detectarea și localizarea defectului

Metoda de detectare a defectului [2-4] utilizată în această etapă se bazează pe compararea modificărilor relative normalizate ale frecvențelor măsurate și filtrate, față de valorile măsurate pentru grinda intactă la temperatura de referință, cu valorile modificărilor relative normalizate determinate prin analiza FEM a modificării frecvențelor în funcție de poziția defectului. Modificările relative normalizate pentru 50 de posibile poziții ale defectului pe jumătatea lungimii grinzii studiate sunt conținute de modelul predictiv construit în urma analizei FEM efectuate în lucrarea [4]. Am calculat valorile modificărilor relative ale frecvențelor măsurate pentru grinda cu defect față de valorile de referință, pentru toate modurile de vibrație obținând un număr de șiruri de valori egal cu numărul măsurătorilor. Un șir cuprinde valorile modificărilor relative a frecvențelor celor 6 moduri pentru o valoare a temperaturii de achiziție. Am împărțit valorile dintr-un șir la valoarea cea mai mare, obținând pentru fiecare șir o valoare unitară și restul subunitare. Valorile obținute reprezintă modificările relative normalizate. Prin normalizare se elimină informațiile cantitative, procesul de comparare este mai facil dar nu se mai pot obține informații privind gravitatea defectului ci doar referitoare la poziția lui.

Tabelul 6

MRF normalizat	ΔT [°C]				
	0	4,5	22,5	29,5	40,5
mod 1	0	-2,03012	-1,21201	-0,72784	-1,24896
mod 2	0	0,788939	0,729959	0,941511	0,956214
mod 3	0	1	1	1	1
mod 4	0	0,341136	0,740633	0,631856	0,777669
mod 5	0	-0,28139	-0,14754	-0,01782	0,088703
mod 6	0	0,720504	0,547303	0,495131	0,514997

Valorile modificărilor relative normalizate sunt date în tabelul 6.

Tabelul 7

Distanța Minkowski	Distanța normalizată x/l				
	0,01	0,02	0,03	0,04	0,05
$\Delta T=4,5$	3,19755933	3,16173339	3,1593325	3,18091142	3,21188744
$\Delta T=40,5$	2,32484617	2,3194129	2,35943	2,42911309	2,50652778
	Distanța normalizată x/l				
	0,06	0,07	0,08	0,09	0,1
$\Delta T=4,5$	3,23657086	3,2496221	3,2655521	3,31779719	3,24845417
$\Delta T=40,5$	2,56880833	2,6063315	2,6328158	2,68298388	2,61466671
	Distanța normalizată x/l				
	0,11	0,12	0,13	0,14	0,15
$\Delta T=4,5$	3.12398575	3.0590734	3,0024429	2,90898534	2,85218284
$\Delta T=40,5$	2.50343249	2.3944781	2,3025359	2,17083223	2,06751201
	Distanța normalizată x/l				
	0,16	0,17	0,18	0,19	0,2
$\Delta T=4,5$	2,72381918	2,6151844	2,5262262	2,44244575	2,30748795
$\Delta T=40,5$	1,91187949	1,7851268	1,6820897	1,58510112	1,4784041
	Distanța normalizată x/l				
	0,21	0,22	0,23	0,24	0,25
$\Delta T=4,5$	2,19153631	2,1021265	2,0537773	2,06490856	2,12631658
$\Delta T=40,5$	1,39509262	1,3422292	1,3380352	1,40001764	1,50539722
	Distanța normalizată x/l				
	0,26	0,27	0,28	0,29	0,3
$\Delta T=4,5$	2,20121175	2,2955154	2,4240873	2,55263107	2,63686581
$\Delta T=40,5$	1,59662805	1,6848832	1,7891811	1,87952113	1,92436231
	Distanța normalizată x/l				
	0,31	0,32	0,33	0,34	0,35
$\Delta T=4,5$	2,69597113	2,7750563	2,8736308	3,00196266	3,05899777
$\Delta T=40,5$	1,95246573	2,0003732	2,0634974	2,14930981	2,18060259
	Distanța normalizată x/l				
	0,36	0,37	0,38	0,39	0,4
$\Delta T=4,5$	2,97088185	2,878061	2,8243359	2,80671158	2,82595991
$\Delta T=40,5$	2,10301961	2,035962	2,0100273	2,02036016	2,06412606
	Distanța normalizată x/l				
	0,41	0,42	0,43	0,44	0,45
$\Delta T=4,5$	2,88295706	2,8475917	2,8775197	2,9895049	3,14875666
$\Delta T=40,5$	2,13909795	2,1259169	2,1582215	2,2573453	2,40253072
	Distanța normalizată x/l				
	0,46	0,47	0,48	0,49	0,5
$\Delta T=4,5$	3,12298181	3,1477253	3,1886323	3,22140889	3,23303891
$\Delta T=40,5$	2,38994946	2,4317713	2,4883637	2,53103411	2,54615182

Pentru detectarea poziției defectului valorile modificărilor relative normalizate se compară cu valorile conținute de modelul predictiv cu algoritmul distanța Minkowski. Rezultatele comparației vor fi prezentate grafic. Ordonata la care curba reprezentată prezintă un minim indică poziția defectului. Dacă grinda este intactă valorile obținute prin algoritmul utilizat tind la zero pentru toate pozițiile posibile ale defectului. Valorile distanței Minkowski calculate pentru MRF normalizat al frecvențelor grinzii cu defect achiziționate pentru două valori ale temperaturii sunt date în tabelele 7 și 8. Aceste valori sunt reprezentate grafic în figura 3.

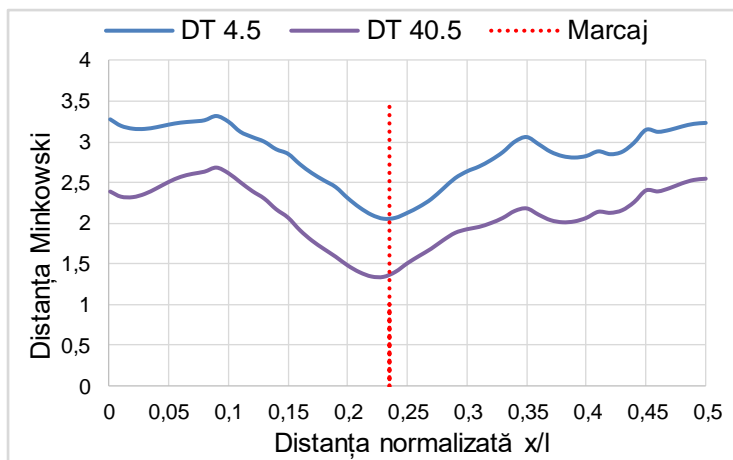


Fig. 3 Distanța Minkowski pentru grinda cu defect la 235 mm de reazem

Din reprezentările grafice se observă că precizia de localizare a defectului este de aproximativ 10-15 mm. Aceste abateri pot fi rezultatul unor erori de măsurare determinate de încălzirea neuniformă în tot volumul grinzii.

5. Concluzii

- Cercetarea experimentală prezentată în cadrul acestei lucrări validează metoda de detectare a defectelor în trei etape și algoritmi care o compun.

- S-a demonstrat eficiența algoritmului de filtrare și precizia metodelor de determinare a factorilor de corecție. Abaterile înregistrate în procesul de localizare a defectului pot fi cauzate de erori de

măsurare datorate încălzirii neuniforme a grinzii.

Mulțumiri

Rezultatele prezentate în acest articol au fost obținute cu sprijinul Ministerului Fondurilor Europene prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007-2013, Contract nr. POSDRU/159/1.5/S/132395.

BIBLIOGRAFIE

1. Gillich, G.R., Praisach, Z.I., Wahab, M.A., Furdui, H., *A new modal based damage location indicator*, ISMA 2014, 15-17 septembrie 2014, Leuven, Belgia.
2. Gillich, G.R., Praisach, Z.I., Amariei, D., *A Method to Detect and Assess Damage in Beams Based on Frequency Changes*, The Eleventh International Conference on Computational Structures Technology, Paper 77, 2012.
3. Gillich, G.R., Praisach, Z.I., *Detection and Quantitative Assessment of Damages in Beam Structures Using Frequency and Stiffness Changes*, Key Engineering Materials, Vol. 569, pp. 1013-1020, 2013.
4. Furdui, H., *Contribuții privind influența sarcinilor operaționale și de mediu asupra detectării defectelor în grinzi*, Teza de doctorat, Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița, 2016.

Drd.Ing. Horia FURDUI
Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița
e-mail: hfurdui@yahoo.com

Șef lucr.Dr.Ing. Ion Cornel MITULEȚU
Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița
e-mail: mituic@zahoo.com

Prof.Univ.Dr.Ing.Ec. Gilbert-Rainer GILLICH
Director CSUD,
Universitatea „Eftimie Murgu” din Reșița, membru AGIR
e-mail: gr.gillich@uem.ro