

**ALGORITAM ZA IDENTIFIKACIJU PARAMETARA OŠTEĆENJA
KOD GREDNIH STRUKTURA NA BAZI SOPSTVENIH
FREKVENCIJA**

**THE ALGORITHM FOR DAMAGE PARAMETERS IDENTIFICATION
IN BEAM-LIKE STRUCTURES BASED ON
NATURAL FREQUENCIES**

Elma Ekinović, Nedim Hodžić, Sabahudin Ekinović
Univerzitet u Zenici
Bosna and Hercegovina

REZIME

Identifikacija oštećenja mašinskih elemenata u proizvodnim pogonima, na građevinskim konstrukcijama, u automobilske industriji i slično predstavlja važan segment u oblasti održavanja i zaštite ljudskih i materijalnih resursa općenito. U ovom radu je predstavljen algoritam za identifikaciju oštećenja kod grednih struktura korištenjem promjene sopstvenih frekvencija savojnih modova oscilovanja. Prikazana tehnika identifikacije oštećenja provodi se u nekoliko koraka, a zasniva se na numeričkoj i regresionoj analizi, kao i na izmjerenim vrijednostima sopstvenih frekvencija realne strukture u obliku grede. Minimiziranjem vrijednosti usvojenog funkcionala dobijaju se vrijednosti parametara oštećenja, odnosno njegov položaj na gredi i veličina (dubina). Predložena tehnika testirana je na 28 slučajeva stvarnih oštećenja i pokazala se dovoljno tačnom.

Ključne riječi: greda, položaj oštećenja, dubina oštećenja, sopstvene frekvencije

ABSTRACT

Damage identification in machine parts in production facilities, civil engineering, automotive industry and so on represents a significant task in the field of maintenance and preservation of human and material resources in general. The present paper presents the algorithm for damage identification in beam-like structures through the use of natural frequencies of bending modes of oscillation. The presented technique of damage identification is performed in several steps and is based on numerical and regression analysis, as well as on measured values of bending frequencies of real beam structure. Using the minimization of the adopted functional the estimation of damage parameters i.e. its location and depth is performed. The proposed technique is tested on 28 real damage scenarios, and the results of damage identifications are quite satisfactory.

Key words: beam, damage location, damage depth, natural frequencies

1. UVOD

Otkrivanje i kvantifikacija oštećenog stanja strukture, po mogućnosti u najranijem stadiju, predmet su istraživanja naučnika već duži niz godina. Ideja o korištenju modalnih parametara strukture kao pokazatelja njenog stanja pojavila se još četrdesetih godina XX vijeka. Naime,

modalni parametri (sopstvene frekvencije, modalni oblici, karakteristike prigušenja) su u direktnoj vezi sa fizičkim karakteristikama strukture, odnosno njenom masom, krutošću i prisutnim prigušenjem. Stoga je bilo logično pretpostaviti da se mjerenjem promjena modalnih parametara mogu otkriti promjene u fizičkom stanju strukture. Neke od predloženih metoda koje tretiraju navedenu problematiku mogu se naći u brojnoj literaturi, kao naprimjer u radu [1].

U ovom radu predstavljen je algoritam za identifikaciju oštećenja kod grednih struktura korištenjem promjene sopstvenih frekvencija savojnih modova grede i istražena je efikasnost predstavljene tehnike.

2. ALGORITAM PREDLOŽENE TEHNIKE IDENTIFIKACIJE OŠTEĆENJA

Na slici 1 prikazan je algoritam predložene tehnike identifikacije parametara oštećenja. Kako se može vidjeti, proces identifikacije obuhvata sljedeće korake:

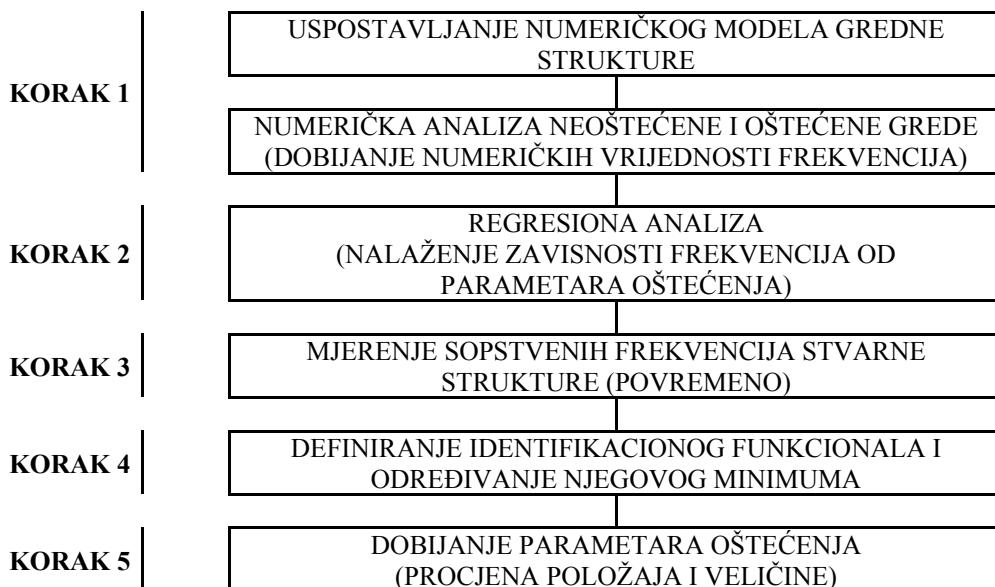
KORAK 1. Izgradnja numeričkog modela stvarne gredne strukture u nekom od komercijalnih programa i dobijanje vrijednosti frekvencija za neoštećenu gredu i sa različitim scenarijima oštećenja grede;

KORAK 2. Regresiona analiza numerički dobijenih vrijednosti sopstvenih frekvencija u zavisnosti od položaja i veličine oštećenja, odnosno dobijanje regresionog modela;

KORAK 3. Mjerenje sopstvenih frekvencija stvarne gredne strukture u sklopu redovnog održavanja;

KORAK 4. Uspostavljanje funkcionala za određivanje stanja gredne strukture;

KORAK 5. Identifikacija parametara oštećenja (njegovog položaja i dubine) korištenjem uspostavljenog funkcionala.



Slika 1. Algoritam predložene tehnike identifikacije parametara oštećenja gredne strukture

3. PRIMJER PRIMJENE PREDLOŽENOG ALGORITMA IDENTIFIKACIJE

3.1. Numerička analiza gredne strukture (KORAK 1)

Za numeričku analizu gredne strukture može poslužiti bilo koji od raspoloživih komercijalnih softwera na bazi metoda konačnih elemenata. Ovdje je korišten software I-DEAS Master Series 9. Analiziran je jednostavan slučaj uniformne grede u slobodnom stanju. Karakteristike grede su bile: dužina $L_B=400$ mm, visina $H=8.16$ mm, širina $B=8.12$ mm, modul elastičnosti $E=2.068 \times 10^{11}$ Pa, gustina $\rho=7820$ kg/m³, Poissonov koeficijent $\nu=0.29$.

Oštećenje je simulirano u vidu otvorenog zarez a širine 1 mm po cijeloj širini grede. Zarez je urezan okomito na uzdužnu osu grede. Položaj oštećenja L_D (mjereno od jednog kraja) i njegova dubina d su stepenasto mijenjani. Za neoštećenu gredu, kao i za svaki scenarij oštećenog stanja, numerički su proračunate vrijednosti prve četiri sopstvene frekvencije savojnih modalnih oblika f_i^{NN} i f_i^{NO} , $i=1,2,3,4$. Ovdje indeks NN označava numerički dobijene vrijednosti za neoštećenu gredu, a NO numeričke vrijednosti za oštećenu gredu. Više detalja o ovome može se naći u radu [2].

3.2. Regresiona analiza za sopstvene frekvencije (KORAK 2)

Numerički dobijene vrijednosti sopstvenih frekvencija f_i^{NN} i f_i^{NO} su u narednom koraku korištene kao polazni podaci za uspostavljanje regresionih relacija između parametara oštećenja $D=d/H$ i $L=L_D/L_B$ korištenjem softwera STATISTICA 6.0. Najbolje regresione zavisnosti (s najvišim koeficijentom korelacije) dobijene su uz pretpostavku kvadratnog utjecaja relativne dubine oštećenja D i polinomijalnog utjecaja relativnog položaja oštećenja L . Pri ovome se koristila programska opcija nelinearne regresije (Nonlinear Estimation).

Za ovdje analiziranu grednu strukturu, dobijene regresione relacije su date izrazima (1)-(4):

$$f_{1R}(D,L)=f_1^{NN} [1-0.177566 D^2 (-0.01948-0.85975L+6.32585L^2+47.5372L^3-83.912L^4)] \quad \dots(1)$$

$$f_{2R}(D,L)=f_2^{NN} [1-0.42922 D^2 (0.065133-3.8651L+45.7407L^2-44.275L^3-267.41L^4+406.144L^5)] \quad \dots(2)$$

$$f_{3R}(D,L)=f_3^{NN} [1-11.0353 D^2 (0.006469-0.37663L+5.74127L^2-16.533L^3-32.81L^4+180.968L^5-177.36L^6)] \quad \dots(3)$$

$$f_{4R}(D,L)=f_4^{NN} [1-69.938 D^2 (0.00252-0.17049L+3.30183L^2-18.862L^3+21.3852L^4+121.863L^5-375.07L^6+298.339L^7)] \quad \dots(4)$$

gdje su f_i^{NN} , $i=1,2,3,4$, numerički dobijene frekvencije neoštećene grede, Tabela 1.

3.3. Eksperimentalno mjerenje uzoraka neoštećene i oštećene grede (KORAK 3)

Da bi se procijenila tačnost predložene metode za identifikaciju oštećenja, napravljeno je sedam čeličnih uzoraka u vidu grede nominalne dužine 400 mm. Mjerenje je izvedeno tokom eksperimenata na postavci prikazanoj na slici 2. Korišteni su sljedeći mjerni uređaji: frekventni analizator HP 3567A, interfejs HP82335A, akcelerometri B&K 4394 i udarni čekić B&K 8202 sa mjernom čelijom B&K 8200.

Za postizanje slobodnog (neoslonjenog) stanja, gredni uzorci su obješeni pomoću dvije tanke



Slika 2. Eksperimentalna postavka grede u slobodnom stanju

silikonske niti. Oštećenje u vidu zarezaja je izrezano pomoću pile širine 1 mm na jednoj od sedam predviđenih lokacija. Mjerenja frekvencija su prvo izvršena na neoštećenom uzorku, zatim na istom uzorku sa zarezom najmanje dubine u iznosu $d=1\text{mm}$, odnosno $D=0.125$. Nadalje, dubina zarezaja je povećavana za 1 mm na preostale tri dubine (do 4 mm).

Mjerenja frekvencija neoštećenog i oštećenih uzoraka greda vršena su dva puta i srednja vrijednost dobijenih frekvencija predstavljala je eksperimentalno određene frekvencije f_i^{EN} i f_i^{EO} , $i=1,2,3,4$.

Vrijednosti frekvencija koje su dobijene numerički i eksperimentalno se u određenoj mjeri razlikuju zbog grešaka pri modeliranju i grešaka pri mjerenju. S obzirom na to da je većina ovih grešaka neizbježna, treba težiti tome da se one svedu na najmanju moguću mjeru. S druge strane, razlika u dobijenim vrijednostima može poslužiti u smislu provjere robusnosti predložene tehnike, odnosno njene osjetljivosti na odstupanja između simuliranog i stvarnog modela. U ovom radu, konkretno, svih sedam uzoraka, mada nisu bili potpuno identično izrađeni, modelirano je istim numeričkim modelom u programu I-DEAS. Također, narezivanje željene dubine zarezaja u tačnom iznosu nije bilo moguće ostvariti u potpunosti ručnom pilom. Više detalja o izvedenom eksperimentu može se naći u radu [2].

3.4. Definiranje identifikacionog funkcionala (KORAK 4)

Procjena dubine i položaja oštećenja izvršena je nalaženjem minimuma funkcionala $FUN1(D,L)$, koji je definiran formulom:

$$FUN1(D,L) = \sum_{i=1}^4 \left[\frac{\left(f_i^{NN} \frac{f_i^{EO}}{f_i^{EN}} \right)^2 - (f_{iR}(D,L))^2}{\left(f_i^{NN} \frac{f_i^{EO}}{f_i^{EN}} \right)^2} \right]^2 \quad \dots (5)$$

gdje su:

f_i^{NN} - i -ta sopstvena frekvencija neoštećene grede dobijena numeričkim putem,

f_i^{EN} - i -ta sopstvena frekvencija neoštećene grede dobijena eksperimentalno (mjerenjem),

f_i^{EO} - i -ta sopstvena frekvencija oštećene grede dobijena mjerenjem,

$f_{iR}(D,L)$ - i -ta sopstvena frekvencija oštećene grede izračunata pomoću regresionih modela datih jednačinama (1-4).

Predloženi funkcional je sličan funkcionalu koji je dat u radu [3], a koji je zasnovan na pretpostavci da je odnos $f_i^{NN}/f_{iR}(D,L)$ blizak po vrijednosti odnosu f_i^{EN}/f_i^{EO} . Minimum funkcionala se tražio u granicama za D od 0 do 0.5 i za L od 0 do 0.5, koje su već ranije usvojene za numeričku analizu.

3.5. Primjer identifikacije oštećenog stanja (KORAK 5)

Rezultati identifikacije oštećenog stanja grede predloženom metodom prikazani su ovdje za slučaj grede koja je oštećena na lokaciji $L_D=140\text{ mm}$ ($L_{stv}=0.35$).

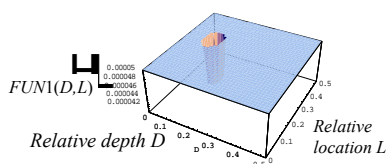
Vrijednosti sopstvenih frekvencija za neoštećenu gredu i gredu oštećenu na mjestu $L_{stv}=0.35$ date su u tabeli 1. Korištenjem vrijednosti frekvencija datih u tabeli 1, u programu Mathematica 5.1 tražila se vrijednost parametara oštećenja D i L koji funkcionalu $FUN1(D,L)$ daju minimalnu vrijednost.

Na slici 3 grafički su prikazani odgovarajući funkcionali, odnosno okolina vrijednosti D i L za koje funkcional dostiže minimalnu vrijednost. Na slici 3 su također date vrijednosti procjene parametara oštećenja dobijene korištenjem opcije FindMin u Mathematici 5.1.

Tabela 1. Frekvencije uzorka grede za scenarij oštećenja na mjestu $L_{stv}=0.35$

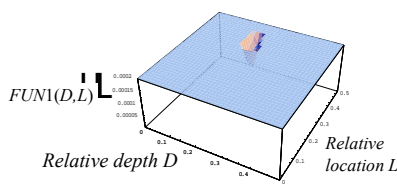
i	Frekvencije neoštećene grede		Frekvencije oštećene grede na mjestu $L_{stv}=0.35$ dobijene eksperimentalno			
	Numeričke f_i^{NN}	Eksperimentalne f_i^{EN}	f_i^{EO}			
			$D_{stv}=0.125$	$D_{stv}=0.25$	$D_{stv}=0.375$	$D_{stv}=0.5$
1	264.2195	263.625	262.68	260.875	256.62	248.875
2	737.647	735	732.12	728	713.12	693.12
3	1416.678	1410	1409.25	1408.75	1409.25	1407.88
4	2354.085	2352	2354.5	2337	2305	2260.5

Stvarno: $D_{stv}=0.125, L_{stv}=0.35$
 Procijenjeno: $D_{pr}=0.123219, L_{pr}=0.307815$



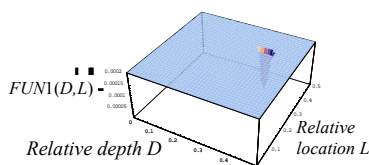
a)

Stvarno: $D_{stv}=0.25, L_{stv}=0.35$
 Procijenjeno: $D_{pr}=0.216849, L_{pr}=0.351392$



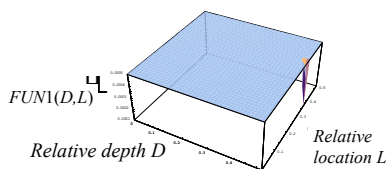
b)

Stvarno: $D_{stv}=0.375, L_{stv}=0.35$
 Procijenjeno: $D_{pr}=0.361375, L_{pr}=0.353335$



c)

Stvarno: $D_{stv}=0.5, L_{stv}=0.35$
 Procijenjeno: $D_{pr}=0.509035, L_{pr}=0.354808$



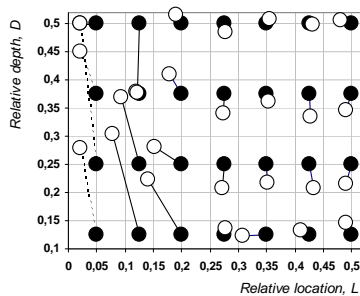
d)

Slika 3. Detaljan pogled na područje minimuma funkcionala $FUN1(D,L)$ za oštećenje na $L_{stv}=0.35$ sa četiri vrijednosti dubine D

4. REZULTATI IDENTIFIKACIJE OŠTEĆENJA

Procedura identifikacije predstavljena algoritmom u poglavlju 2 provedena je za 28 scenarija oštećenog stanja (na 7 lokacija sa 4 dubine). Na osnovu prikazanih odnosa na slici 4 između stvarnog (*stv*) i procijenjenog (*pr*) scenarija oštećenja može se zaključiti da, usprkos svim greškama koje su bile neizbježne pri modeliranju stvarne gredne strukture i greškama pri mjerenju, dobijeni rezultati su u dovoljnoj mjeri tačni i kao takvi prihvatljivi.

Ovdje treba napomenuti da za četiri slučaja oštećenja koji se nalaze na mjestu $L_{stv}=0.05$, program Mathematica nije mogao naći tačnu numeričku procjenu tj. D_{pr} i L_{pr} za minimum funkcionala, ali su se na osnovu zumiranog položaja okoline minimalne vrijednosti funkcionala mogle približno procijeniti tražene vrijednosti.



Slika 4. Rezultati identifikacije oštećenja:

● - tačka L_{stv} i D_{stv} , ○ - tačka D_{pr} i L_{pr}

5. ZAKLJUČCI

U ovom radu je prikazan algoritam za identifikaciju oštećenog stanja gredne strukture na osnovu vrijednosti sopstvenih savojnih frekvencija. Sopstvene frekvencije su dobijene numeričkim putem za simulirani model grede i eksperimentalnim mjerenjem stvarnih greda u laboratorijskim uvjetima. Primjenom statističkog programa uspostavljene su regresione zavisnosti prve četiri savojne frekvencije od parametara oštećenog stanja. Identifikacija oštećenog stanja, odnosno procjena parametara oštećenja izvršena je minimiziranjem vrijednosti predloženog funkcionala.

Dobijeni rezultati identifikacije su zadovoljavajuće tačni uzevši u obzir da tačnost predložene tehnike zavisi od niza faktora, kao naprimjer od poklapanja numeričkog modela sa stvarnom grednom strukturom, od izbora regresione zavisnosti, od kvaliteta eksperimentalnog mjerenja i tako dalje. Rezultati identifikacije bi se, između ostalog, mogli poboljšati korištenjem sitnije mreže konačnih elemenata i provođenjem većeg broja numeričkih simulacija, čime bi se povećao broj ulaznih podataka za dobijanje regresione zavisnosti.

Bilo bi zanimljivo istražiti da li bi se prezentirana identifikaciona tehnika mogla koristiti kod grednih struktura promjenljivog poprečnog presjeka ili, naprimjer, korištenjem sopstvenih frekvencija ostalih vibracionih modova (aksijalnih, torzionih).

6. LITERATURA

- [1] Dimarogonas AD.: Vibration of Cracked Structures - A State of the Art Review. Engineering Fracture Mechanics, 55/5: pp 831-857, 1996.
- [2] Ekinović E.: An Approximate Technique for Damage Identification in Beams Using Shifts in Natural Frequencies, International Conference on Noise and Vibration Engineering ISMA2010, 20-22 September, Leuven, Belgium, 2010.
- [3] Rucevskis. S., Wesolowski, M.: Identification of Damage in a Beam Structure by using Mode Shape Curvature Squares, Shock and Vibration, 17: pp 601-610, 2010