

Primljen / Received: 7.8.2020.

Ispravljen / Corrected: 24.2.2021.

Prihvaćen / Accepted: 10.5.2021.

Dostupno online / Available online: 10.8.2021.

# Praćenje stanja greda pomoću pomičnog oscilatora: teorija i eksperiment

## Autori:



Izv.prof.dr.sc. **Reza Goldaran**, dipl.ing.građ.  
Američko sveučilište Girne, Girne, Sjeverni Cipar  
Tehnički fakultet  
Odjel za građevinarstvo  
[rezagoldaran@gmail.com](mailto:rezagoldaran@gmail.com)



Doc.dr.sc. **Mehdi Kouhdaragh**, dipl.ing.građ.  
Islamsko sveučilište Azad, Malekan, Iran  
Odjel za građevinarstvo, Podružnica Malekan  
[mehdikouhdaragh@gmail.com](mailto:mehdikouhdaragh@gmail.com)  
Autor za korespondenciju

Prethodno priopćenje

**Reza Goldaran, Mehdi Kouhdaragh**

## Praćenje stanja greda pomoću pomičnog oscilatora: teorija i eksperiment

U ovom se radu daje eksperimentalni i teoretski prikaz novog inteligentnog prenosivog mehaničkog sustava za otkrivanje oštećenja u kojem se koristi neizravni genetski algoritam i metoda empirijskog rastavljanja (EMD). Za te je potrebe akcelerometrima izmjereno ubrzanje u vremenu na tri točke proste grede. Dobiveni signal rastavljen je metodom EMD na male komponente. Svaka komponenta sadrži određeni raspon frekvencija. Na kraju je provedeno projektiranje predloženog algoritma kako bi se utvrdilo mjesto i razina oštećenja na temelju obrasca variranja frekvencija na neoštećenoj i oštećenoj gredi.

### Ključne riječi:

otkrivanje oštećenja, sustav za generiranje vibracija, empirijsko rastavljanje, obrada signala, neizravni genetski algoritam

Research Paper

**Reza Goldaran, Mehdi Kouhdaragh**

## Structural health monitoring of beams with moving oscillator: theory and laboratory

In this paper, a new intelligent portable mechanical system is introduced experimentally and theoretically to detect damage employing the fuzzy-genetic algorithm and EMD. For this purpose, the acceleration-time history is obtained from three points of a simply-supported beam utilizing accelerometer sensors. The gained signal is decomposed into small components by using an EMD method. Each decomposed component contains a specific frequency range. Finally, the proposed algorithm is designed to find the location and severity of damage through the frequency variation pattern among the safe and the damaged beam.

### Key words:

damage detection, vibration generating system, empirical mode decomposition, signal processing, fuzzy-genetic algorithm

## 1. Uvod

Nedostaci i pogreške u građevinama koji ugrožavaju ljudske živote i uzrokuju financijske štete mogu se eliminirati primjenom metoda za identifikaciju konstrukcijskih oštećenja koje su opisane u literaturi. Od tih metoda, danas su zbog svoje praktičnosti vrlo popularne metode modalne analize. Te se metode temelje na činjenici da modalni parametri (vlastita frekvencija, modalni oblik i modalno prigušenje) ovise o fizikalnim parametrima (tj. o masi, prigušenju i krutosti) pa stoga bilo kakve promjene fizikalnih parametara mogu dovesti i do promjena modalnih parametara konstrukcije [1-2]. Najčešće se primarni podaci za usporedbu izvode iz podataka izmjerenih na neoštećenoj konstrukciji ili iz modela konačnih elemenata. Modalni parametri koji se koriste za identifikaciju grešaka na konstrukciji uključuju između ostalog funkciju frekvencije, vlastite frekvencije, zakrivljenost modalnog oblika, modalno savijanje itd. [3-6]. Svaki sustav za otkrivanje nedostataka dijeli se na nekoliko segmenata, a to su npr. otkrivanje oštećenja, otkrivanje mjesta oštećenja, otkrivanje brzine širenja oštećenja te predviđanje utjecaja oštećenja. Kako bi se postigao zadovoljavajući učinak, treba se provesti vrlo detaljno matematičko modeliranje promatranih sustava. Pogreške u modeliranju mogu utjecati na učinkovitost sustava za otkrivanje oštećenja, i to naročito kada se radi o nelinearnim sustavima. Primjenom inteligentnih proračunskih metoda pogreške u modeliranju mogu se kompenzirati te se na taj način postiže kvalitetna aproksimacija nelinearnih sustava. Lia Ding i dr. sa Sveučilišta Western Australian ocijenili su dinamičkim postupkom osovinska opterećenja na mostovima s raznim stupnjevima dotrajlosti kolničkih konstrukcija. Inovativna komponenta ove studije sastoji se u primjeni "evolucijske spektralne metode" za ocjenjivanje dinamičkih opterećenja vozila na gredi, pri kretanju konstantnom brzinom po hrapavoj površini grede [6]. Jean-Charles i dr. s Građevinskog fakulteta Sveučilišta u Tokiju predložili su metodu za predviđanje vozilom induciranih lokalnih odziva, a ta je metoda primijenjena na kosom grednom mostu [7]. Law i dr. s Tehničkog veleučilišta u Hong Kongu istraživali su osovinsko opterećenje vozila na ploči mosta. Osnovno opterećenje nanoseno na gredu ocijenjeno je na temelju nepravilnog profila površine ceste [8]. Neves i dr. sa Sveučilišta u Portu koristili su izravnu metodu u analizi vertikalne interakcije između vozila i konstrukcije. Metoda koju autori predlažu pogodnija je za sustave s velikim obujmom konstrukcije, tj. manje je pogodna za sustave koji se stalno ažuriraju [9]. Law i dr. statističkim su postupkom predvidjeli dinamički odziv gredne konstrukcije nepoznatih svojstava zbog nasumičnog prolaska pokretnih opterećenja. Pretpostavljeno je da su nepoznata svojstva gredne konstrukcije Gaussovog tipa, te su modelirana primjenom metode konačnih elemenata. Nepoznata svojstva vozila s Gaussovom raspodjelom prikazana su pomoću Karhunen–Loèveove ekspanzije. Na i dr. koristili su genetski algoritam (GA) u detektiranju krutosti dvadesetokatne posmične okvirne konstrukcije [11]. Marano i dr. koristili su metodu GA za otkrivanje oštećenja na posmičnoj okvirnoj

konstrukciji pomoću nepotpunih mjerenja [12]. Mosquera i dr. koristili su GA za detektiranje promjena pomaka na dvorasponskom mostu u El Centrou [13]. Loh i dr. modelirali su trodimenzionalnu pukotinu u konstrukciji te su koristili valičnu i Fourierovu transformaciju za određivanje oštećenja AB okvirne konstrukcije, a za to su primijenili eksperiment s pobuđivačem [14]. Ganguli i dr. prikazali su oštećenje kao smanjenje krutosti u modulu elastičnosti te su otkrili lokaciju i stupanj oštećenosti na helikopterskoj elisi primjenom sustava neizrazite logike [15]. Od modalnih se parametara najčešće koristi vlastita frekvencija jer se može jednostavno i točno izmjeriti. U ovom se radu predlaže novi inteligentni prenosivi mehanički sustav za otkrivanje oštećenja grednih konstrukcija na temelju neizrazitog genetskog algoritma. Osnovne prednosti ovog postupka su:

- primjena je moguća na složenim vrstama konstrukcija zbog jednostavnosti i djelotvornosti sustava.
- za određivanje vlastite frekvencije primjenjuje se empirijska metoda rastavljanja (eng. *Empirical Mode Decomposition* - EMD) signala i brza Fourierova transformacija, što nije bio slučaj u prethodnim radovima.

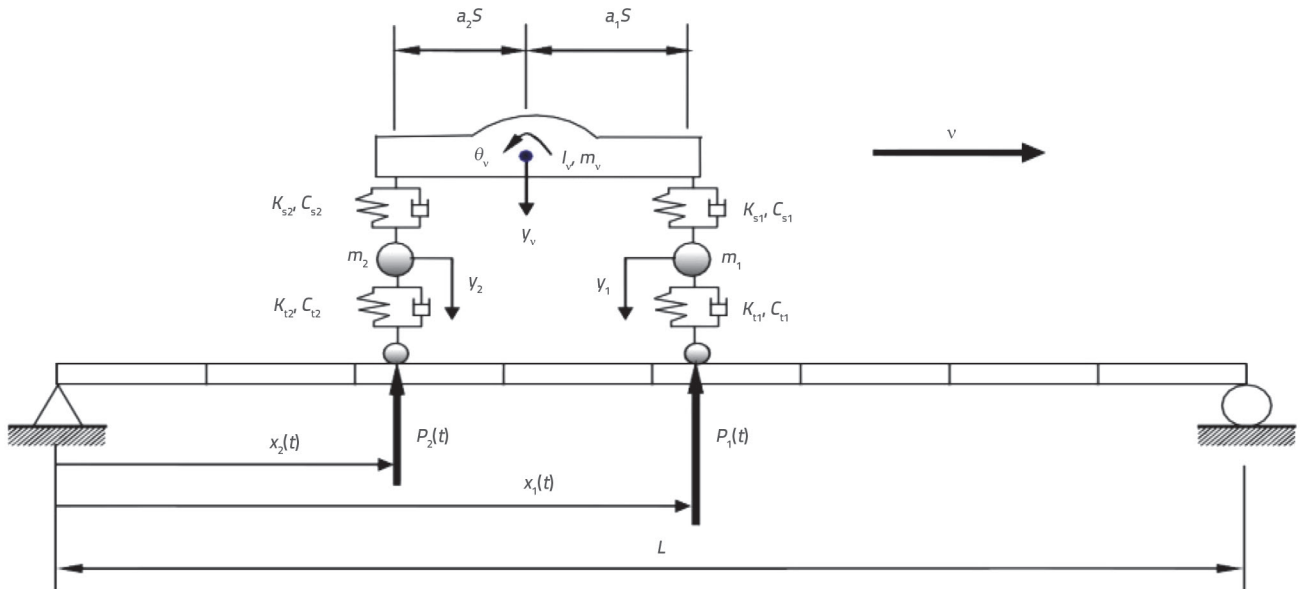
Sadašnjim se postupkom može odrediti lokacija i razina oštećenosti u raznim modalitetima. U ovom se radu za dinamičko pobuđivanje proste grede koristi pokretno opterećenje uključujući i koncentriranu masu i linearnu elastičnu oprugu pri konstantnoj brzini. Podaci o ubrzanju u vremenu mjereni su na tri točke grede pomoću akcelerometara. Metoda EMD primijenjena je za pretvaranje podataka o ubrzanju u informacije primjenjive za određivanje stupnja oštećenosti. U ovom se radu najprije uvodi empirijska metoda rastavljanja signala na osnovne oblike te se istražuje prikladnost metode za otkrivanje oštećenja. Zatim se komponente signala poznate kao prirodne sastavne funkcije (eng. *intrinsic mode function* - IMF) definirane metodom EMD pretvaraju u raspon frekvencija pomoću brze Fourierove transformacije. Dominantne frekvencije svakog IMF-a koriste se kao pokazatelji neizrazitog genetskog algoritma (eng. *Fuzzy-Genetic Algorithm* - FGA) za određivanje mjesta i stupnja oštećenosti u konstrukciji.

## 2. Vibracijski sustav grede za modeliranje i pomični oscilator

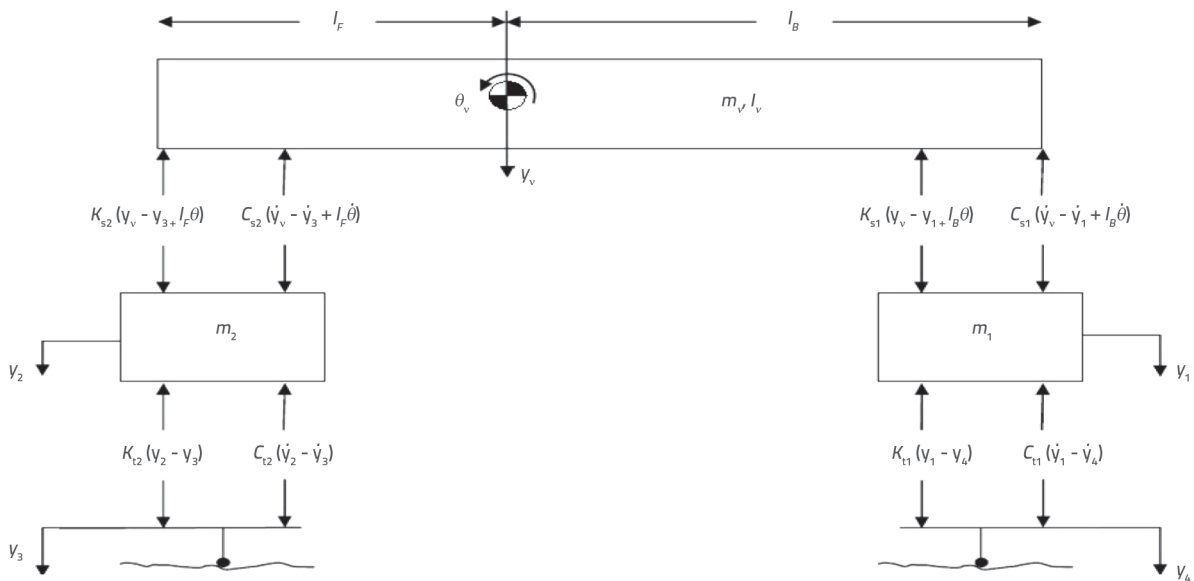
### 2.1. Jednadžba gibanja pomičnog oscilatora

Slika 1. prikazuje pomični oscilator, a to je zapravo model poluoscilatora s četiri stupnja slobode koji se pomiče konstantnom brzinom po prostoj gredi. Na slici 2. prikazan je dijagram slobodnog tijela za pomični oscilator iz slike 1. Četiri stupnja slobode ovog pomičnog oscilatora su:

- vertikalno gibanje  $y_1$  neogibljene mase  $m_1$
- vertikalno gibanje  $y_2$  neogibljene mase  $m_2$
- vertikalno gibanje  $y_v$  ogibljene mase  $m_v$  poznato kao vertikalno kretanje
- kutna količina gibanja  $\theta_v$  ogibljene mase.



Slika 1. Spojeni sustav pomičnog oscilatora i grede



Slika 2. Dijagram slobodnog tijela za pomični oscilator

To je sustav vibriranja glavne aktivacijske funkcije koju karakteriziraju pomaci  $y_3$  i  $y_4$ . Svi se pomaci mjere u odnosu na njihovo statičko stanje, a smatra se da je vrijednost  $\theta_v$  niska. Jednadžbe gibanja za četiri stupnja slobode oscilatora koji se kreće modeliraju se na temelju drugog Newtonovog zakona, nakon pojednostavljenja, a rezultat se dobiva kako slijedi:

$$\begin{bmatrix} m_v & 0 & 0 & 0 \\ 0 & I_v & 0 & 0 \\ 0 & 0 & m_1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{y}_v \\ \ddot{\theta}_v \\ \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{s2} & I_F C_{s2} - I_B C_{s1} & -C_{s1} & -C_{s2} \\ I_F C_{s2} - I_B C_{s1} & I_B^2 C_{s1} + I_F^2 C_{s2} & I_B C_{s1} & -I_F C_{s2} \\ -C_{s1} & I_B C_{s1} & C_{s1} + C_{t1} & 0 \\ -C_{s2} & -I_F C_{s2} & 0 & C_{s2} + C_{t2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{y}_v \\ \dot{\theta}_v \\ \dot{y}_1 \\ \dot{y}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_{s1} + K_{s2} & I_F K_{s2} - I_B K_{s1} & -K_{s1} & -K_{s2} \\ I_F K_{s2} - I_B K_{s1} & I_B^2 K_{s1} + I_F^2 K_{s2} & I_B K_{s1} & -I_F K_{s2} \\ -K_{s1} & I_B K_{s1} & K_{s1} + K_{t1} & 0 \\ -K_{s2} & -I_F K_{s2} & 0 & K_{s2} + K_{t2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_v \\ \theta_v \\ y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ (C_{t1})\dot{y}_4 + (K_{t1})y_4 \\ (C_{t2})\dot{y}_3 + (K_{t2})y_3 \end{bmatrix} \quad (1)$$

S obzirom na to da vrijednosti  $y_3$  i  $y_4$  nisu poznate, matrica  $P(t)$  može se definirati na sljedeći način:

$$P(t) = \begin{bmatrix} (C_{t1})\dot{y}_4 + (K_{t1})y_4 \\ (C_{t2})\dot{y}_3 + (K_{t2})y_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} P_1(t) \\ P_2(t) \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} (m_1 + a_2 m_v)g + K_{t1} (y_1 - w(\hat{x}_1(t), t) - r(\hat{x}_1(t))) + C_{t1} (\dot{y}_1 - \dot{w}(\hat{x}_1(t), t)) \\ (m_2 + a_1 m_v)g + K_{t2} (y_2 - w(\hat{x}_2(t), t) - r(\hat{x}_2(t))) + C_{t2} (\dot{y}_2 - \dot{w}(\hat{x}_2(t), t)) \end{bmatrix} \quad (2)$$

Prema tome,  $P(t)$  se dobiva iz sume statičkih sila koje proizlaze iz kretanja oscilatora i sila koje proizlaze iz međudjelovanja grede i pokretnog oscilatora.

U izrazu (2),  $r(x)$  je površinska hrapavost grede u točki  $x$ ,  $\hat{x}_1(t)$  i  $\hat{x}_2(t)$  su mjesta na kojima se nalaze prednje i stražnje osovine pokretnog oscilatora, u vremenu  $t$ ;  $g$  označava ubrzanje sile teže;  $w(\hat{x}_1(t), t)$  i  $w(\hat{x}_2(t), t)$  su vertikalni progibi tijela grede u točkama u kojima se nanose prednje i stražnje sile, u vremenu  $t$ . Točka  $(\cdot)$  označava vremensku derivaciju. Sljedeći zapisi definirani su kako bi se pojednostavnio oblik jednadžbi gibanja:

$$\begin{aligned}
 M_{V1} &= \begin{bmatrix} m_v & 0 \\ 0 & I_v \end{bmatrix}; M_{V2} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix}; C_{V11} = \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{s2} & I_F C_{s2} - I_B C_{s1} \\ I_F C_{s2} - I_B C_{s1} & I_B^2 C_{s1} + I_F^2 C_{s2} \end{bmatrix}; C_{V12} = \begin{bmatrix} -C_{s1} & -C_{s2} \\ -I_B C_{s1} & -I_F C_{s2} \end{bmatrix}; \\
 C_{V21} &= \begin{bmatrix} -C_{s1} & I_B C_{s1} \\ -C_{s2} & -I_F C_{s2} \end{bmatrix}; C_{V22} = \begin{bmatrix} C_{s1} + C_{t1} & 0 \\ 0 & C_{s2} + C_{t2} \end{bmatrix}; K_{V11} = \begin{bmatrix} K_{s1} + K_{s2} & I_F K_{s2} - I_B K_{s1} \\ I_F K_{s2} - I_B K_{s1} & I_B^2 K_{s1} + I_F^2 K_{s2} \end{bmatrix}; \\
 K_{V12} &= \begin{bmatrix} -K_{s1} & -K_{s2} \\ I_B K_{s1} & -I_F K_{s2} \end{bmatrix}; K_{V21} = \begin{bmatrix} -K_{s1} & I_B K_{s1} \\ -K_{s2} & -I_F K_{s2} \end{bmatrix}; K_{V22} = \begin{bmatrix} K_{s1} + K_{t1} & 0 \\ 0 & K_{s2} + K_{t2} \end{bmatrix}; C_t = \\
 \begin{bmatrix} C_{t1} & 0 \\ 0 & C_{t2} \end{bmatrix}; K_t &= \begin{bmatrix} K_{t1} & 0 \\ 0 & K_{t2} \end{bmatrix}; P_0 = \begin{bmatrix} (m_1 + a_2 m_v)g \\ (m_2 + a_1 m_v)g \end{bmatrix}; Y = \begin{bmatrix} \ddot{y}_v \\ \ddot{y}_1 \\ \ddot{y}_2 \end{bmatrix};
 \end{aligned} \tag{3}$$

Stoga se izraz (3) može ponovo iskazati kao izraz (4), tj. kao jednadžba gibanja pokretnog oscilatora.

$$\begin{bmatrix} M_{V1} & 0 \\ 0 & M_{V2} \end{bmatrix} \ddot{Y} + \begin{bmatrix} C_{V11} & C_{V12} \\ C_{V21} & C_{V22} \end{bmatrix} \dot{Y} + \begin{bmatrix} K_{V11} & K_{V12} \\ K_{V21} & K_{V22} \end{bmatrix} Y = \begin{bmatrix} 0 \\ P(t) \end{bmatrix} \tag{4}$$

### 2.2. Jednadžba grede

Matrice mase i matrice krutosti elemenata grede izvedene su pomoću Hermiteovih krivulja funkcija oblika. Rezultat svakog elementa može se izraziti kako slijedi, izrazi (5) i (6):

$$K_t = \frac{2EI}{l^3} \begin{bmatrix} 6 & 3l & -6 & 3l \\ 3l & 2l^2 & -3l & l^2 \\ -6 & -3l & 6 & -3l \\ 3l & l^2 & -3l & 2l^2 \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$M_t = \frac{\rho l A}{420} \begin{bmatrix} 156 & 22l & 54 & -13l \\ 22l & 4l^2 & 13l & -3l^2 \\ 54 & 13l & 156 & -22l \\ -13l & -3l^2 & -22l & 4l^2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

Integriranjem matrica svakog elementa u opću matricu dobiva se matrica mase i krutost čitave konstrukcije. Uzimajući u obzir Rayleighovo prigušenje za gredu i rubne uvjete, jednadžba vibrirajuće grede može se iskazati na sljedeći način:

$$M_b \ddot{R} + C_b \dot{R} + K_b R = H_b P \tag{7}$$

U izrazu (7),  $M_b$ ,  $C_b$  i  $K_b$  su matrice mase, prigušenja i krutosti konstrukcije grede,  $R$  i  $R'$  i  $R''$  su vektori pomaka, brzine i ubrzanja.  $H_b P$  je vektor sile na čvoru koji nastaje zbog interakcije grede i pokretnog oscilatora. Kombiniranjem izraza (7) za gredu i pokretni oscilator dobiva se vibracijski izraz (8):

$$M(t) \ddot{Z} + C(t) \dot{Z} + K(t) Z = F(t) \tag{8}$$

$M(t)$ ,  $C(t)$  i  $K(t)$  su matrice o vremenu ovisnog vibracijskog sustava grede i pokretnog oscilatora, dok je  $F(t)$  vektor sile, izraz (9).

$$\begin{aligned}
 M(t) &= \begin{bmatrix} M_b & 0 & H_b M_{V21} \\ 0 & M_{V1} & 0 \\ 0 & 0 & M_{V2} \end{bmatrix}; C(t) = \begin{bmatrix} C_b & H_b C_{V21} & H_b (C_{V22} - C_t) \\ 0 & C_{V11} & C_{V12} \\ C_t H_b^T & C_{V21} & C_{V22} \end{bmatrix}; \\
 K(t) &= \begin{bmatrix} K_b & H_b K_{V21} & H_b (K_{V22} - C_t) \\ 0 & K_{V11} & K_{V12} \\ K_t H_b^T + C_t H_b^T & K_{V21} & K_{V22} \end{bmatrix}; F(t) = \begin{bmatrix} H_b P_0 \\ 0 \\ 0 \\ C_{t1} r(\hat{x}_1(t)) \ddot{x}_1(t) + K_{t1} r(\hat{x}_1(t)) \\ C_{t2} r(\hat{x}_2(t)) \ddot{x}_2(t) + K_{t2} r(\hat{x}_2(t)) \end{bmatrix} \tag{9}
 \end{aligned}$$

$\ddot{Z}$ ,  $\dot{Z}$ ,  $Z$  su vektori pomaka, brzine i ubrzanja vibracijskog sustava grede i pokretnog oscilatora.

Newmarkova  $\beta$  metoda primjenjuje se za dobivanje dinamičkog odziva čvorova u gredi pod utjecajem prolaska pokretnog oscilatora. Zatim se dobiva vremenski zapis ubrzanja grede u sredini raspona. Signali se tada dijele na glavne oblike osciliranja pomoću metode EMD, kako je to objašnjeno u sljedećoj točki.

### 2.3. Svojstva grede i pokretnog oscilatora

Za ove se potrebe koristi prosta greda s pokretnim oscilatorom. Greda je podijeljena na osam dijelova pomoću metode konačnih elemenata. U tablicama 1. i 2. prikazana su geometrijska i fizikalna svojstva grede i pokretnog oscilatora.

Tablica 1. Svojstva grede

|                             |  |
|-----------------------------|--|
| Modul elastičnosti          | 70 GPa   |
| Površina poprečnog presjeka | 200 mm <sup>2</sup>  |
| Dužina grede                | 820 mm   |
| Aksijalni momenti tromosti  | $I_x = 1666.67 \text{ mm}^4$ ,<br>$I_y = 6666.67 \text{ mm}^4$ |
| Gustoća                     | 2700 kg/m <sup>3</sup>   |

Tablica 2. Svojstva pokretnog oscilatora

|  |
|--|
| $v = 2 \text{ m/s}$ ; $m_v = 0,5 \text{ kg}$ ; $m_1 = m_2 = 0,05 \text{ kg}$ ; $I_v = 0,0083 \text{ m}^4$<br>$s = 0,05 \text{ m}$ ; $a_1 = a_2 = 0,5 \text{ m}$ ; $K_{s1} = K_{s2} = 490,5 \text{ N/m}$ ; $K_{t1} = K_{t2} = 4900,5 \text{ N/m}$<br>$C_{s1} = C_{s2} = C_{t1} = C_{t2} = 0,2$ ; $l = 0,000167 \text{ m}^4$ |
|--|

### 3. Metoda EMD

Metoda EMD temelji se na jednostavnoj pretpostavki da se svaki signal sastoji od nekih osnovnih komponenata. Prema toj metodi, svaki se signal može podijeliti u određeni broj signala koji moraju zadovoljiti sljedeće uvjete [16]:

- broj nultočaka i ekstrema jednak je ili se razlikuje za najviše jedan i
- prosječna vrijednost lokalnih ekstrema (minimuma i maksimuma) anvelopa jednaka je nuli.

Ti podijeljeni signali nazivaju se IMF-ovi. Kako bi se signal podijelio u vremenskoj domeni i dobili IMF-ovi, trebaju se poduzeti sljedeći koraci:

- Određivanje lokalnih maksimuma i minimuma signala.
- Spajanje točaka maksimuma primjenom postupka interpolacije kubne krivulje i ponavljanje istog postupka za točke minimuma.

- Izračunavanje srednje vrijednosti funkcijskih linija koje odgovaraju maksimumima i minimumima vrijednosti  $m_1$  i odgovarajuće razlike s vrijednošću glavnog ulaznog signala koji se odnosi na vibracije  $x(t)$ , a definiran je kao  $h_1$  [16].

$$x(t) - m_1 = h_1 \quad (10)$$

gdje je  $h_1$  prvi element za koji se treba provjeriti usklađenost sa zahtjevima IMF. Za to se u obzir trebaju uzeti dva spomenuta uvjeta IMF. Ako se usvoji kao IMF,  $h_1$  se dijeli od početnog signala kao prvi IMF i dobiva oznaku  $c_1$ . Ostatak se označava kao  $r_1$ . U sljedećem se koraku  $r_1$  tretira isto kao i početni signal i gornji se postupak ponavlja [16].

$$r_1 = x(t) - c_1 \quad (11)$$

$$r_{n-1} - c_n = r_n \quad (12)$$

Ako  $h_1$  nije IMF, tada se treba tretirati kao početni signal i trebaju se iterativno ponoviti isti koraci (od 1 do 3). Ponavljanje se nastavlja do koraka  $k$  kako bi se utvrdilo da se radi o IMF-u.

$$h_1 - m_{11} = h_{11} \quad (13)$$

$$c_1 = h_{1k} \quad (14)$$

Taj postupak dekompozicije smatra se dovršenim kada posljednji ostatak  $r_n$  ima najviše jedan lokalni ekstrem [16].

$$sd = \sum_f \left[ \frac{|h_{n-1}(t) - h_n(t)|^2}{h_{n-1}^2(t)} \right] < \varepsilon \quad (15)$$

gdje  $n$  predstavlja korake u postupku, a smatra se da se  $\varepsilon$  nalazi između 0,2 i 0,3. Ako funkcija  $r$  udovoljava prije spomenutim uvjetima, algoritam se zaustavlja. Ako to nije slučaj, trebaju se ponoviti prethodni koraci. Nakon dekompozicije, glavni se signal može predstaviti kako slijedi [17-19].

#### 4. Kratka Fourierova transformacija (STFT)

U vezi s nestacionarnim signalima može se pretpostaviti i postojanje nekih stacionarnih komponenta. Ako je stacionarni dio signala suviše mali, tada se trebaju koristiti odgovarajuće mali prozori. Prema ovoj metodi, signal se dijeli u komponente koje su dovoljno male da se može pretpostaviti da su stacionarne. U tom je smislu odabran korak u kojem je širina koraka jednaka dijelu signala čija stacionarnost se može smatrati varijabilnom. Ovaj se korak inicijalno stavlja na početak signala  $t = 0$ . Ako pretpostavimo da širina koraka iznosi  $T$  sekundi, korak će u vremenu  $t = 0$  pokriti prve  $T/2$

s signala. U sljedećem se koraku korak množi sa signalom. Ako se smatra da je korak pravokutnik s vrijednošću 1, tada će produkt biti jednak istom dijelu signala. Taj se produkt zatim obrađuje kao neovisan signal pomoću Fourierove transformacije.

$$STFT_f^{(w)}(t, w) = \int [f(t) \times w^*(t - t')] \times e^{-iwt} dt \quad (16)$$

gdje je  $f(t)$  signal,  $w(t)$  je funkcija prozora (korak), a  $*$  je znak složene konjugacije funkcije. Ako je signal koji je odijeljen od glavnog signala stacionaran, njegov se Fourierov spektar može smatrati dobrom aproksimacijom sadržaja frekvencije za prve  $T/2$  s signala. Zatim se taj korak treba pomaknuti u sljedeći dio signala nakon čega se isti postupak ponavlja. Postupak se nastavlja sve do kraja signala.

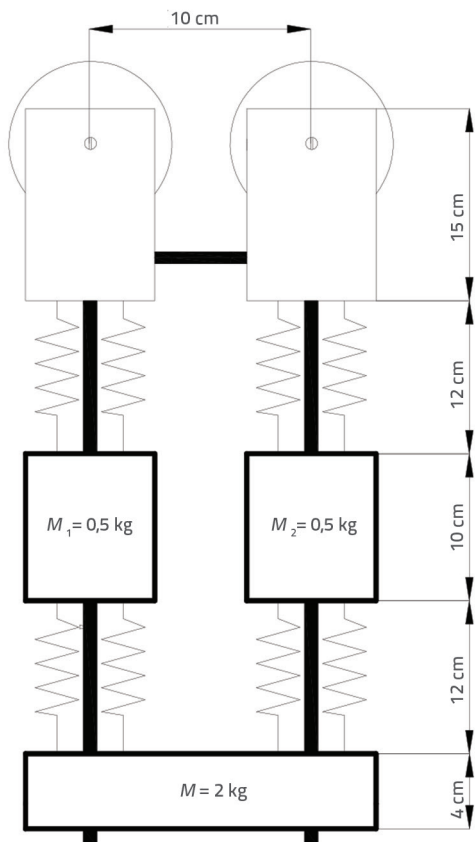
#### 5. Modeliranje grede i pomičnog opterećenja

Ispitana je aluminijska greda dužine 2 m i poprečnog presjeka 20 x 10 mm. Na oba kraja grede spojena su dva stupa visine 50 cm, kao što je prikazano na slici 2. Vlastita težina aluminijske grede te sva nanesena opterećenja preuzimaju se kod kugličnih ležajeva na oba kraja, a ti se ležajevi ponašaju kao zglobni oslonci. Suprotno vozilo se koristi za modeliranje dinamičkog sustava pobuđivanja, kao što je prikazano na slikama 3. i 4. u laboratoriju i shematski.



Slika 3. Zglobni oslonci

Kao što se može vidjeti na slici 4., predloženo vozilo sastoji se od dva teflonska kotača kojima se tijekom eksperimenta ostvaruje kontakt s gredom i to zbog njene vlastite težine. Dva utega,  $m_1$  i  $m_2$ , pojedinačne težine od 0,5 kg spojena su na uteg mase 2 kg pomoću dvije vlačne opruge, nakon čega su pričvršćeni na kotače. Vozilo pokreće električni motor s mjenjačem. Vozilo se kreće konstantnom brzinom od 1 m/s, što uzrokuje vibriranje grede. Oblik i lokacija pukotina prikazani su na slici 5.



Slika 4. Fizikalni model pokretnog opterećenja

### 6. Mjerenje signala vibracija

Signali se mjere na gredi pomoću tri akcelerometra B&K (Tip 4507) koji su postavljeni na gornjem dijelu grede na 168, 94 i 54 cm gledajući od početka grede. Za provedbu eksperimenta



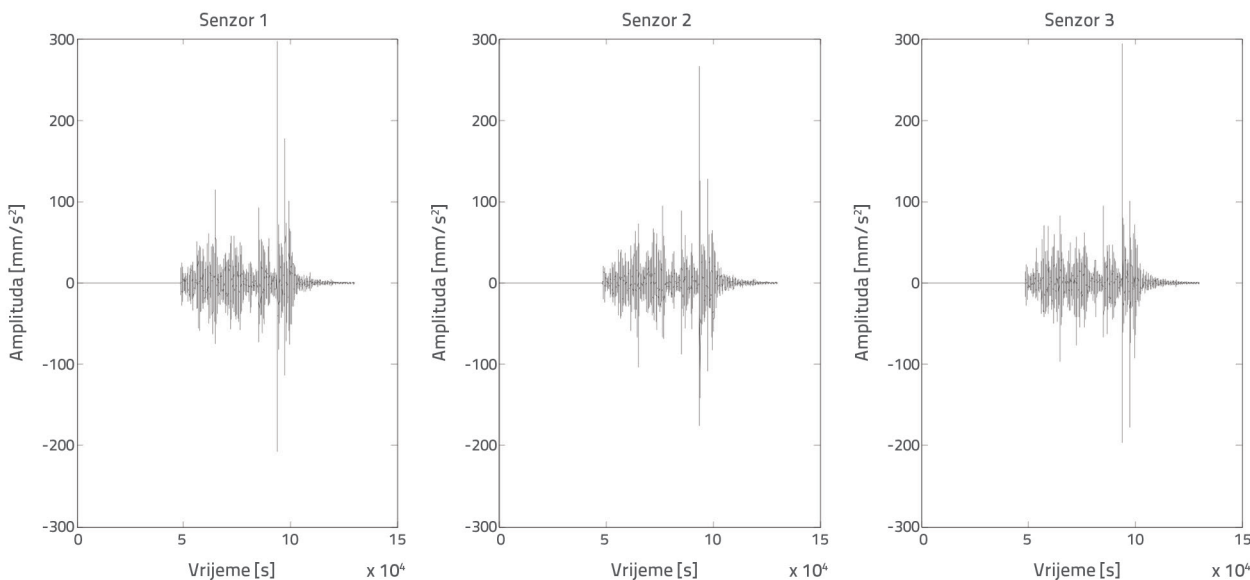
Slika 5. Mjesto pukotina na gredi

koristi se frekvencija od 6,4 kHz, jer senzori mogu mjeriti signale čak i pri najmanjim vibracijama. Vozilo pokreće električni motor, a kreće se konstantnom brzinom od 1 m/s te prolazi po čitavoj dužini grede i generira vibracije na gredi. Signali se pohranjuju pomoću akcelerometara. Kako bi se povećala pouzdanost ispitivanja, svaki se eksperiment ponavlja dvadeset puta. Isto tako, u svakom se eksperimentu signali mjereni na sva tri senzora na raznim lokacijama ponavljaju dvadeset puta, tako da se za svaki scenarij oštećenja generira ukupno šezdeset signala. Shema laboratorijskog ispitivanja prikazana je na slici 6.

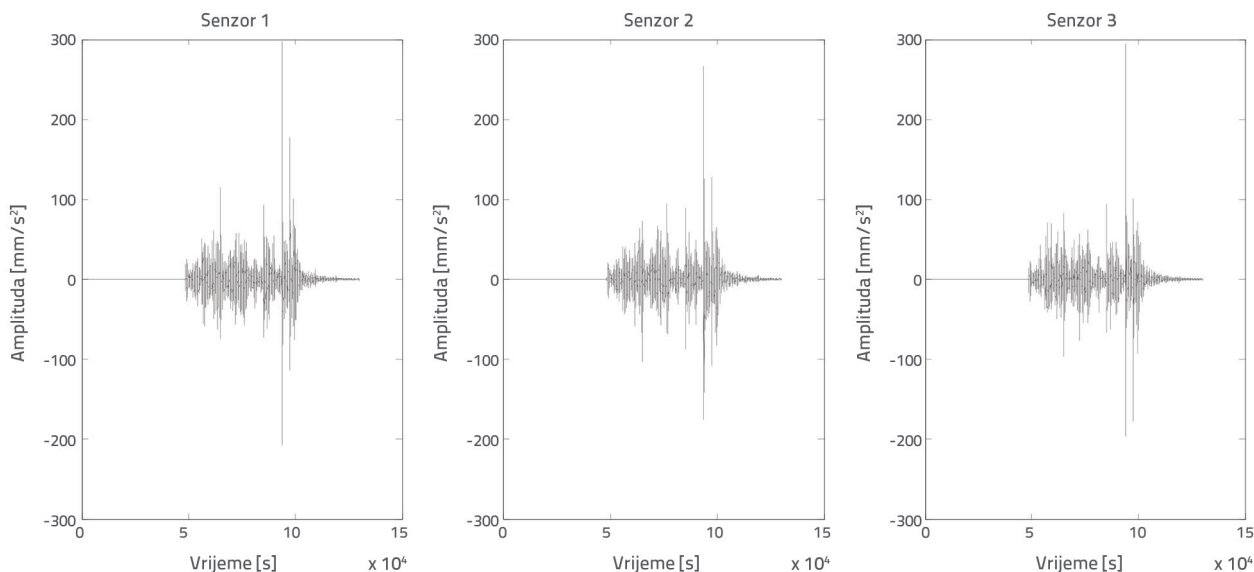


Slika 6. Greda u laboratoriju

Tri pukotine napravljene pomoću tankih pila urezane su na gredi na četvrtinama i polovici raspona grede s intenzitetima oštećenja



Slika 7. Zapis ubrzanja za neoštećenu gredu u prvom testu



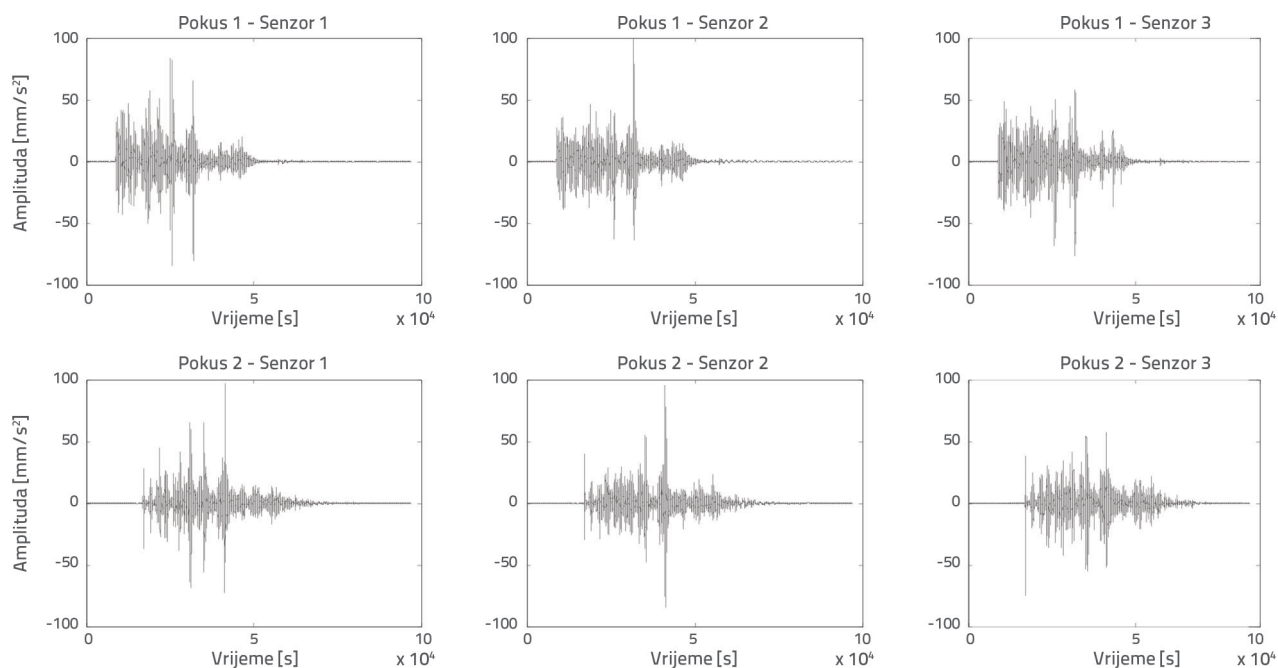
Slika 8. Zapis ubrzanja za neoštećenu gredu u drugom pokusu

od 50 % i 80 % (d/h). Eksperiment je proveden dvadeset puta za svaku pukotinu. U prvom je slučaju ispitana neoštećena greda kretanjem vozila dvadeset puta po gredi pri konstantnoj brzini od 1 m/s, a rezultati ubrzanja pohranjeni su zasebno za svaki eksperiment. Rezultati prolaska vozila prikazani su na slikama 7. i 8. za neoštećenu gredu.

Kao što se može vidjeti na slikama 7. i 8., greda je počela oscilirati kada se vozilo počelo kretati duž grede, a s prolaskom vozila, oscilacije su se prigušile do stanja bez vibracija. Analizom signala nakon dvadeset pokusa može se zaključiti da je sustav ponovljiv. U drugom slučaju pukotina je urezana na polovici dužine grede s

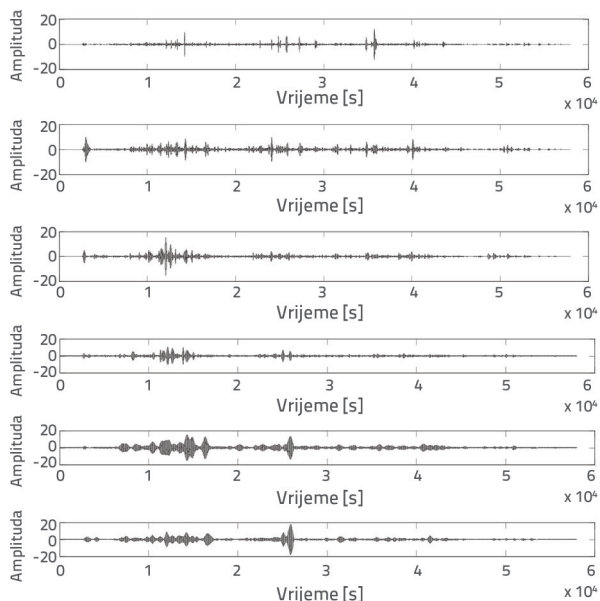
intenzitetom oštećenja od 50 i 80 % te je ponovljen isti postupak koji je proveden i za neoštećenu gredu. Pohranjeni su rezultati za svako od dvadeset ponavljanja. Rezultati dobiveni nakon prva dva pokusa s intenzitetom oštećenja od 50 % prikazani su na slici 9. U trećem i četvrtom slučaju, pukotine su urezane na četvrtinama dužine grede s intenzitetom oštećenja od 50 i 80 %. Ponovljeni su isti koraci prolaska vozila preko grede, a isto tako su zabilježeni svi pojedinačni rezultati. Međutim, ti rezultati ovdje nisu prikazani jer su vrlo slični.

Signali su u svakom zasebnom slučaju podijeljeni na 31 komponentu pomoću metode EMD, a frekvencija s najvišom



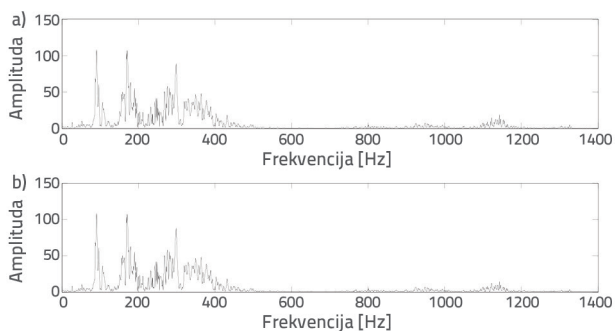
Slika 9. Vremenski zapis ubrzanja za oštećenje grede u prvom i drugom pokusu

amplitudom (dominantna frekvencija) odabrana je kao obilježje FGA. Na primjer, signal ubrzanja je u neoštećenom slučaju podijeljen na 31 komponentu pomoću metode EMD a samo šest komponenata rezultata prikazano je na slici 10.



Slika 10. Vrijednosti IMF izvedene iz signala ubrzanja

Kao što se vidi na slici 10., signal ubrzanja dobiven u prvom pokusu na prvom senzoru pretvoren je na 31 raspon frekvencija, a na slici je prikazano samo prvih pet komponenata. U svrhu provjere rezultata izračunan je raspon frekvencija svake komponente pomoću metode bazirane na spektralnoj gustoći snage (PSD), nakon čega su svi (31) rasponi frekvencija zbrojeni i uspoređeni s rezultatom PSD dobivenim na prvobitnoj frekvenciji signala, kako je to prikazano na slici 11.

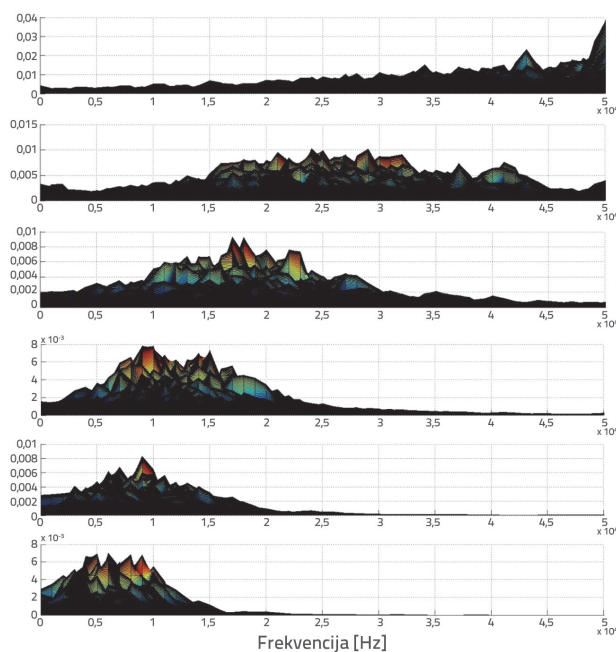


Slika 11. Podudarnost dviju frekvencija prema zbroju 31 vrijednosti IMF: a) frekvencija EMD; b) frekvencija prvobitnog signala prema metodi PSD

Na slici 11. može se uočiti odlična podudarnost zbroja raspona frekvencija i frekvencija glavnog signala. Rezultati EMD pretvoreni su u frekvencijski raspon pomoću brze Fourierove transformacije te su nakon toga dobivene dominantne

frekvencije svakog IMF-a, koje su korištene kao značajke FGA. Treba napomenuti da se u ovom stadiju iz svakog signala dobiva 31 vrijednost IMF-ova. Zatim se pomoću Fourierove transformacije dobiva dominantna frekvencija svake komponente. S druge strane, u svakom se pokusu dobivaju tri signala, a svaki od njih ima 31 dominantnu frekvenciju. Tako na kraju dobivamo 1860 frekvencija s obzirom na to da u svakom slučaju ima dvadeset ponavljanja.

Kako je broj značajki suviše visok za FGA, samo tri frekvencije se izvode iz svakog signala te se na temelju sadašnje pretpostavke dobiva devet frekvencija. Osim toga, kako je već spomenuto, algoritam FGA mora se osposobiti i zatim provjeriti po završetku ispitivanja. Tada se može iskazati postotak točnih odgovora. Stoga je za osposobljavanje algoritma korišteno prvih deset ispitivanja a sljedećih deset je korišteno za provjeru (validaciju). Frekvencije neoštećene grede u prvom eksperimentu i na prvom senzoru prikazane su na slici 12. primjenom kratke Fourierove transformacije (STFT). Treba napomenuti da su trodimenzionalni dijagrami frekvencija u vremenu na slici 12. iskazane kao dvodimenzionalni dijagrami.



Slika 12. Dijagram STFT vremenskih zapisa frekvencija na neoštećenoj gredi za sve IMF-ove u prvom ispitivanju na senzoru br. 1

## 7. Neizrastiti genetski algoritam

Utemeljena na kreiranju funkcija pripadnosti, neizrastita logika (eng. *fuzzy logic* - FL) je algoritam visokog kapaciteta za klasifikaciju podataka. Zbog zahtjeva FL u pogledu srednje vrijednosti i standardnog odstupanja podataka, što se može optimizirati pomoću genetskog algoritma (GA), kombiniranjem FL i GA dobiva se djelotvoran algoritam.



## 7.1. Modeliranje pokazatelja oštećenja

Pokazatelj oštećenja predstavlja razliku između devedeset dominantnih vlastitih frekvencija dobivenih kratkom Fourierovom transformacijom za neoštećene i oštećene slučajeve na gredi. To se definira kao bezdimenzijski oblik na sljedeći način:

$$\Delta\omega = \frac{\omega^{(u)} - \omega^{(d)}}{\omega^{(u)}} \quad (17)$$

gdje je  $\Delta\omega$  razlika frekvencije u bezdimenzijskom obliku,  $\omega^{(u)}$  je dominantna vlastita frekvencija u neoštećenom slučaju, a  $\omega^{(d)}$  je dominantna vlastita frekvencija u oštećenom slučaju.

## 7.2. Projektiranje sustava za otkrivanje oštećenja

U ovom se sustavu vlastite frekvencije svakog scenarija oduzimaju od frekvencija neoštećene grede te se zatim dijele s istim frekvencijama za neoštećeni slučaj. Vrijednosti su normalizirane između nule i jedan, kao što se može vidjeti u tablici 3. Dakle, definiran je jedan scenarij bez oštećenja i jedan

scenarij s oštećenjem. Kao ulaz u neizraziti sustav usvojena je normalizirana razlika u frekvenciji, a kao izlaz definirana je lokacija i razina oštećenja. Međutim, osnovni cilj je pronaći odnos između ulaza i izlaza. U prvom koraku definiranja neizrazitog sustava provodi se neizrazita pretvorba postojećih podataka u lingvistički izraz. Za te se potrebe svaka normalizirana razlika u frekvenciji pretvara u pet sekcija kao što se i vidi u tablici 4.

U sljedećem se koraku definiraju funkcije pripadnosti. Funkcija pripadnosti je funkcija koja se temelji na ulaznim podacima, a za izlaz je zadana vrijednost između nule i jedan. U ovom se radu kao ulazne varijable koriste Gausove funkcije pripadnosti. Takva se funkcija može definirati na sljedeći način:

$$\mu(x) = e^{-0.5\left(\frac{x-m}{\delta}\right)^2} \quad (18)$$

gdje je  $m$  srednja točka neizrazite funkcije, a  $\delta$  je standardno odstupanje koje se odnosi na varijable. Gausove neizrazite funkcije pripadnosti vrlo se često koriste u neizrazitim sustavima. Srednje točke tih funkcija moraju se odabrati tako da se na odgovarajući način pokrije raspon frekvencija.

Odabir standardnog odstupanja neizrazitih funkcija izuzetno je značajan jer bitno utječe na učinkovitost neizrazitog sustava.

Tablica 3. Normalizirana razlika u frekvencijama između 0 i 1

| $\Delta\omega_{90}$ | ... | $\Delta\omega_2$ | $\Delta\omega_1$ | Intenzitet [%] | Lokacija oštećenja |
|---------------------|-----|------------------|------------------|----------------|--------------------|
| 0,05                | ... | 0,15             | 0,49             | 50             | na 50 cm           |
| 0,56                | ... | 0,29             | 0,53             | 80             |                    |
| 0,67                | ... | 0,34             | 0,45             | 50             | na 100 cm          |
| 0,56                | ... | 0,56             | 0,65             | 80             |                    |
| 0,09                | ... | 0,87             | 0,98             | 50             | na 150 cm          |
| 0,34                | ... | 0,56             | 0,34             | 80             |                    |

Tablica 4. Neizrazite Gausove funkcije za neizrazitu pretvorbu numeričkih vrijednosti

| 0,87-1           | 0,62-0,87  | 0,37-0,62   | 0,12-0,37 | 0-0,12          |
|------------------|------------|-------------|-----------|-----------------|
| Vrlo visoka (VH) | Visoka (H) | Srednja (M) | Niska (L) | Vrlo niska (VL) |

Tablica 5. Pravila neizrazitog sustava

| $\Delta\omega_{90}$ | ... | $\Delta\omega_2$ | $\Delta\omega_1$ | Ozbiljnost oštećenja [%] | Lokacija oštećenja |
|---------------------|-----|------------------|------------------|--------------------------|--------------------|
| N                   | ... | N                | N                | neoštećena               | neoštećena         |
| VL                  | ... | L                | M                | 50                       | na 50 cm           |
| M                   | ... | L                | M                | 80                       |                    |
| H                   | ... | L                | M                | 50                       | na 100 cm          |
| M                   | ... | M                | H                | 80                       |                    |
| VL                  | ... | H                | VH               | 50                       | na 150 cm          |
| L                   | ... | M                | L                | 80                       |                    |

Zadano je pravilo prema kojem se neizrazita pravila dobivaju pretvaranjem razlika numeričkih frekvencija u lingvističke izraze i to na svakoj lokaciji i za svaku razinu oštećenja. Na temelju funkcije pripadnosti definirane u prethodnom koraku, za svaku razliku u frekvenciji dobiva se određeni stupanj pripadnosti.

Svaka razlika u frekvenciji pripisuje se funkciji pripadnosti s maksimalnom vrijednošću. Prema prije spomenutom postupku te uzimajući u obzir lingvističke izraze definirane u tablici 2., dobiva se sedam pravila koja su navedena u tablici 3. Ta se pravila mogu u pojedinačnim slučajevima tumačiti na sljedeći način:

Ako su vrijednosti M, L i VL redom prva razlika u frekvenciji, druga razlika u frekvenciji i razlika u frekvenciji koja iznosi 90, tada intenzitet oštećenja na 50 cm dužine grede iznosi 50 %.

Pravila koja se odnose na druge slučajeve oštećenja mogu se tumačiti na isti način. Kao što se može vidjeti u tablici 3., svako pravilo ima jedinstven učinak po kojem se potpuno razlikuje od drugih pravila. Stoga se definirani neizraziti sustav može smatrati dobrim klasifikatorom. Ta pravila generiraju osnovna saznanja i pokazuju kako stručnjak koristi tumačenje promjena u frekvenciji u svrhu otkrivanja oštećenja.

Nakon definiranja pravila za optimalizaciju funkcija pripadnosti koristi se GA koji se bitno razlikuje od tradicionalnih metoda. U ovom se algoritmu projektirani prostor treba pretvoriti u genetički prostor. Dakle, GA se koristi s nizom kodiranih varijabli. Taj se algoritam u ovom radu koristi za nalaženje srednjih točaka i standardnog odstupanja određenih neizrazitih Gaussovih funkcija. Za to se treba najprije definirati funkcija troška kako bi se pronašao minimum. Objektivna funkcija može se definirati i opisati kako slijedi:

$$FF = \frac{\sum_{i=1}^{27} \sum_{j=1}^9 (\alpha_{ij} - \beta_{ij})^2}{27 \times 9} \quad (19)$$

gdje je  $\alpha$  optimalna izlazna vrijednost neizrazitog sustava a  $\beta$  je stvarna izlazna vrijednost neizrazitog sustava. Optimalna izlazna vrijednost pretpostavljena je kako slijedi: ako se podaci iz neizrazitog sustava primijene na neki slučaj oštećenja, odgovarajućim se pravilom za spomenuto oštećenje generira vrijednost jedan, dok su druga pravila jednaka nuli.

Tablica 6. Izlaz neizrazitih pravila s podacima za različite frekvencije

| Izlaz pravila 7 | Izlaz pravila 6 | Izlaz pravila 5 | Izlaz pravila 4 | Izlaz pravila 3 | Izlaz pravila 2 | Izlaz pravila 1 | Ozbiljnost oštećenja | Lokacija oštećenja |
|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|----------------------|--------------------|
| 0,32            | 0,97            | 0,08            | 0,63            | 0,76            | 0,34            | 1               | sigurno              | sigurno            |
| 0,16            | 0,21            | 0,76            | 0,13            | 0,54            | 1               | 0,34            | 50 %                 | Šteta na 50 cm     |
| 0,26            | 0,28            | 0,21            | 0,11            | 1               | 0,32            | 0,34            | 80 %                 |                    |
| 0,43            | 0,06            | 0,11            | 1               | 0,42            | 0,41            | 0,25            | 50 %                 | Šteta na 100 cm    |
| 0,32            | 0,08            | 1               | 0,42            | 0,27            | 0,42            | 0,31            | 80 %                 |                    |
| 0,14            | 1               | 0,31            | 0,59            | 0,44            | 0,54            | 0,13            | 50 %                 | Šteta na 150 cm    |
| 1               | 0,19            | 0,23            | 0,60            | 0,54            | 0,68            | 0,12            | 80 %                 |                    |

Kako bi se proizvela nova generacija na bazi vrijednosti dobivenih iz objektivne funkcije, najbolja populacija sadašnje generacije kopira se po stopi od jedan. Međutim, za proizvodnju ostalog dijela populacije trebaju se koristiti genetski dijelovi algoritma. Operator križanja koji se koristi za kombiniranje genetičke informacije od dva roditelja kako bi se generiralo novo potomstvo, sastoji se od tri radnje:

- nasumce se odabire par nizova
- odabire se točka križanja na nizu
- u trećem se koraku kreira potomstvo zamjenom vrijednosti nizova na bazi točke križanja.

U ovom radu za proizvodnju "djeteta" definirana je stopa koja iznosi 8. Drugi operator u GA je mutacijski operator, tj. nasumična izmjena "djeteta" kroz populaciju, pri čemu je kao stopa ovog operatora u ovom radu odabran broj 2. Dakle, optimalna vrijednost neizrazitih srednjih točaka i standardnog odstupanja postiže se nakon stotinu ponavljanja pri čemu vrijednost objektivne funkcije iznosi 0,69.

Vrijednosti razlike u frekvenciji koriste se u ocjeni pouzdanosti projektiranog neizrazitog sustava za definiranje ulaznih podataka sustava. Za definiranje izlaznih podataka neizrazitog sustava koristi se srednja točka nizova koji odgovaraju izlaznim podacima od 90 razlika u frekvenciji, kako je to prikazano u tablici 6. Prema toj tablici, neizraziti sustav može proizvesti maksimalnu vrijednost od jedan u svakom slučaju oštećenja. To znači da projektirani sustav udovoljava preliminarnim zahtjevima za predviđanje lokacije i ozbiljnosti oštećenja.

Nakon etape osposobljavanja, provedene i potvrđene u okviru prvih deset eksperimenata, predložena se metoda primjenjuje za sljedećih deset ispitivanja koja nisu bila uključena u etapu osposobljavanja. Najznačajnija je točka da su svi signali u toj etapi kontaminirani šumom kako bi se zadovoljili realni uvjeti signala popraćenog šumom. U tom smislu, iz pokusa izvedena svojstva, parametri i brojevi klasa smatraju se ulazom, tj. izlazom neizrazitog sustava. Uspoređivanje ovog broja klase s ispravnim brojem klase u svakoj simulaciji omogućuje izračun stope uspješnosti. Ona se izračunava kako slijedi:

$$S_R = \left( \frac{N_C}{N} \right) \times 100 \quad (20)$$

gdje je  $N$  ukupan broj simuliranih uzoraka, a  $N_c$  je broj točno detektiranih uzoraka u odgovarajućoj klasi u tablici 5. Vrijednost stope uspješnosti za svaki slučaj oštećenja te prosječna stopa uspješnosti također su prikazani u tablici 5. Kako bi se analizirao utjecaj izmjerenog šuma, razni su postoci šuma primijenjeni na izvedena svojstva, te je nakon toga za svaku klasu prikazana stopa uspješnosti. Očito je da šum može uzrokovati pogrešku u izmjerenim podacima. Iako je primjenom moderne opreme razina šuma smanjena, on se ipak ne može u potpunosti eliminirati. Zato se sustav za otkrivanje pogrešaka ne smije isključivo bazirati na idealnim vrijednostima te treba moći funkcionirati i u prisutnosti podataka s izraženim šumom. U ovom su radu nesigurnosti u modeliranju i mjerenju šuma dodane vrijednostima razlika u frekvenciji. Za te je potrebe definirana jednadžba (21) u kojoj je odabran nasumični broj  $u$  u rasponu od  $\{-1, 1\}$ , a  $\alpha$  označava razinu šuma [19]:

$$\Delta\omega_{\text{noisy}} = \Delta\omega + \alpha u \quad (21)$$

Parametar  $\alpha$  predstavlja maksimalnu varijablu između vrijednosti  $\Delta\omega$  i simulirane vrijednosti  $\Delta\omega_{\text{noisy}}$ . Na primjer, ako je  $\alpha = 0.1$ , tada se vrijednost  $\Delta\omega_{\text{noisy}}$  može razlikovati od vrijednosti  $\Delta\omega$  za deset posto. Zato se parametar  $\alpha$  koristi za kontroliranje razine šuma u ulaznim podacima neizrazitog sustava.

Tablica 7. Veličine stope uspješnosti (eng. *success rate - S<sub>r</sub>*)

| $\alpha = 0,3$ | $\alpha = 0,2$ | $\alpha = 0,1$ | $\alpha = 0,05$ | Pravilo |
|----------------|----------------|----------------|-----------------|---------|
| 81,9           | 88,3           | 91,2           | 98,3            | 1       |
| 76,4           | 81,3           | 89,4           | 99,3            | 2       |
| 70,3           | 74,3           | 81,3           | 97,4            | 3       |
| 69,9           | 76,6           | 85,5           | 98,5            | 4       |
| 71,1           | 86,6           | 90,4           | 96,8            | 5       |
| 61,2           | 71,2           | 88,4           | 92,5            | 6       |

## LITERATURA

- [1] Lotffolahi-Yaghin, M.A., Koohdaragh, M.: Examining the function of wavelet packet transform (WPT) and continues wavelet transform (CWT) in recognizing the crack specification. *KSCE Journal of Civil Engineering*, 15 (2011) 3, pp. 497–506, doi: 10.1007/s12205-011-0925-2
- [2] Araki, Y., Miyagi, Y.: Mixed integer nonlinear least-squares problem for damage detection in truss structures, *Journal of Engineering Mechanics*, 131 (2005) 7, pp. 659–667, doi: 10.1061/(ASCE)0733-9399(2005)131:7(659)
- [3] Ge, M., Lui, E.: Structural damage identification using system dynamic properties, *Computers & Structures*, 83 (2005) 27, pp. 2185–2196, doi: 10.1016/j.compstruc.2005.05.002
- [4] Jiang, L., Wang, K.: An enhanced frequency-shift-based damage identification method using tunable piezoelectric transducer circuitry, *Smart Materials and Structures*, 15 (2006) 3, pp. 799–808, doi: 10.1088/0964-1726/15/3/016
- [5] Lu, Z.R., Liu, J.K., Huang, M., Xu, W.H.: Identification of local damages in coupled beam systems from measured dynamic responses, *Journal of Sound and Vibration*, 326 (2009) 2, pp. 177–189, doi: 10.1016/j.jsv.2009.04.028
- [6] Lina Ding, Z., Hong Hao, R., Xinqun Zhu, I.: Evaluation of dynamic vehicle axle loads on bridges with different surface conditions, *Journal of Sound and Vibration*, 323 (2009) 4, pp. 826–848, doi: 10.1016/j.jsv.2009.01.051

Kako bi se za svaku razinu šuma ocijenila učinkovitost sustava za detekciju oštećenja, šum se dodaje u podatke o frekvenciji grede pomoću jednadžbe (21). Zatim se podaci o šumu unose u neizraziti sustav i izračunava se točnost rezultata o otkrivanju oštećenja. Točnost rezultata u ovisnosti o raznim razinama šuma iskazana je u tablici 5. Prema tablici 7., pri razini šuma od 0,05, oštećenje se otkriva djelotvorno za sve kategorije oštećenja te je u velikoj mjeri uspješno. Kao što se moglo i očekivati, s porastom razine šuma smanjuje se sposobnost predložene metode za uspješno detektiranje klasa oštećenja, ali se oštećenje svejedno može detektirati, što dokazuje djelotvornost i visok stupanj učinkovitosti predložene metodologije.

U tablici 7. prikazani su rezultati drugog niza od deset pokusa, uključujući i različite razine šuma. Rezultati prikazani u gornjim redovima tablice prikazuju točnost i robusnost predloženog postupka.

## 8. Zaključak

U ovom se radu prikazuje novi prenosivi mehanički sustav za otkrivanje oštećenja konstrukcije grede pomoću algoritma FGA. Predloženom metodom može se odrediti lokacija i razina oštećenja. Kako bi se definirala obilježja signala, koristi se metoda EMD za dijeljenje podataka o osnovne komponente, pri čemu svaka ima zaseban raspon frekvencija. Zatim se koristi brza Fourierova transformacija za izvođenje dominantne frekvencije svakog IMF-a kao obilježja algoritma FGA. Sustavom za otkrivanje oštećenja može se odrediti lokacija i razina oštećenja u svim scenarijima, a to je jedna od prednosti ovog istraživanja u odnosu na prethodna. Za izradu budućih studija predlaže se sljedeće:

- korištenje sveobuhvatnijeg sustava pokretnog opterećenja (masa i opruga) s više stupnjeva slobode, jer se tako poboljšava učinkovitost modeliranja i omogućuje točnija analiza dinamičnog odziva sustava;
- dodatne inovativne metode mogle bi se koristiti za izvođenje vlastitih frekvencija iz dijagrama ubrzanja što bi omogućilo detaljniju analizu ovog vibracijskog sustava.

- [7] ean-Charles Wyss, H.O., Di Su, J., Yozo Fujino, T.: Prediction of vehicle-induced local responses and application to a skewed girder bridge, *Engineering Structures*, 3 (2011) 1, pp. 1088–1097, doi: 10.1016/j.engstruct.2010.12.020
- [8] Wu, S.Q., Law, S.S.: Vehicle axle load identification on bridge deck with irregular road surface profile, *Engineering Structures*, 33 (2011) 3, pp. 591–601, 2011.doi: 10.1016/j.engstruct.2010.11.017
- [9] Neves, S.G.M., Azevedo, A.F.M., Calçada, R.: A direct method for analyzing the vertical vehicle–structure interaction, *Engineering Structures*, 34 (2012) 12, pp. 414–420, Doi: 10.1016/j.engstruct.2011.10.010
- [10] Wu, S.Q., Law, S.S.: Evaluating the response statistics of an uncertain bridge–vehicle system, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 27 (2012) 11, pp. 576–589, doi: 10.1016/j.ymsp.2011.07.019
- [11] Na, C., Kim, S., Kwak, H.: Structural damage evaluation using genetic algorithm, *Journal of Sound and Vibration*, 330 (2011) 12, pp. 2772–2783, doi: 10.1016/j.jsv.2011.01.007
- [12] Marano, G., Quaranta, G., Monti, G.: Modified genetic algorithm for the dynamic identification of structural systems using incomplete measurements, *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 26 (2011) 2, pp. 92–110, doi: 10.1111/j.1467-8667.2010.00659.x
- [13] Mosquera, V., Smyth, A., Betti, R.: Rapid evaluation and damage assessment of instrumented highway bridges, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 41 (2012) 4, pp. 755–774, doi: 10.1002/eqe.1155
- [14] Loh, C., Mao, C., Huang, J., Pan, T.: System identification and damage evaluation of degrading hysteresis of reinforced concrete frames, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 40 (2010) 6, pp. 623–640, doi: 10.1002/eqe.1051
- [15] Ganguli, R.: A fuzzy logic system for ground based structural health monitoring of a helicopter rotor using modal data, *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 12 (2001) 6, pp. 397–407, doi: 10.1106/104538902022598
- [16] Xianfeng, F., Mingzuo, J.: Gearbox fault detection using empirical mode decomposition, *ASME International Mechanical Congress and Exposition*, 12 (2004) 4, pp. 456–467, doi: 10.1016/j.ymsp.2005.02.003
- [17] Dejie, Y., Junsheng, Z., Cheng, Y., Yang Y.: Application of EMD method and Hilbert Spectrum to the fault diagnosis of roller bearings, *Mechanical System and Signal Processing*, 19 (2003) 3, pp. 259–270, doi: 10.1016/S0888-3270(03)00099-2
- [18] Huang, N.E.: The empirical mode decomposition and Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis, *Proceedings of the Royal Society A*, 454 (2002) 5, pp. 903–995, doi: 10.1098/rspa.1998.0193
- [19] Beena, P., Gangul, R.: Structural damage detection using fuzzy cognitive maps and Hebbian learning, *Journal of Applied Soft Computing*, 12 (2010) 3, pp. 132–144, doi: 10.1016/j.asoc.2010.01.023