

## ЕКСПЕРИМЕНТАЛНА МОДАЛНА АНАЛИЗА ВИБРАЦИЈА

Огњен Мијатовић<sup>1</sup>  
Мануел Десанчић<sup>2</sup>  
Драган Д. Милашиновић<sup>3</sup>

УДК: 534.1:001.891.5

DOI: 10.14415/konferencijaGFS2014.057

**Резиме:** У раду се даје кратак приказ развоја уређаја за хармонијску побуду и испитивања извршених њиховом употребом у оквиру експерименталне динамичке анализе конструкција. Први уређај је електромагнетни побуђивач вибрација. Основни погонски механизам јесте електромагнет који ствара вибрације титрањем соленоида у магнетном пољу. Струјни импулс који долази до електромагнета се задаје уз помоћ рачунара што омогућава врло прецизно задавање хармонијске побуде. Погонски механизам другог уређаја (механичког побуђивача вибрација) су електромотори чије се ротационо кретање преводи у транслаторно. Ово омогућава да се моделима могу задати хармонијски поремећаји, најчешће примјењени у експерименталној анализи вибрација. На поменутих уређајима вршена су испитивања вибрација гредних система, површинских носача и просторних конструкција, а резултати су поређени са аналитичким и нумеричким добијеним у SAP2000.

**Кључне ријечи:** Хармонијски побуђивач вибрација, експериментална динамичка анализа вибрација

### 1. UVOD

Pri dinamičkom djelovanju na konstrukciju dolazi do aktiviranja inercijalnih sila koje uzrokuju njihov odziv zavisano od vremena. Tačna teorijska rješenja koja opisuju ponašanje konstrukcije pri dinamičkom djelovanju moguće je dobiti samo za jednostavne i idealizovane slučajeve. U stvarnosti se mnogi dinamički problemi moraju eksperimentalno vrjednovati. Na raspolaganju je više različitih postupaka koji se biraju zavisno od objekta koji se ispituje i raspoložive opreme [1]. Najčešće se izmjereni odziv konstrukcije upoređuje sa teorijski sračunatim [2]. Za eksperimentalna ispitivanja se primjenjuju uređaji i mašine pri prinudnim vibracijama. U ovom radu se prikazuju dvije

<sup>1</sup> Ognjen Mijatović, dipl. inž. građ., student master studija, tel: +387 65 765 484, e – mail: [mijatovicognjen@yahoo.com](mailto:mijatovicognjen@yahoo.com)

<sup>2</sup> Manuel Desančić, dipl. inž. građ., student master studija, tel: +387 65 497 002, e – mail: [manueldesancic@yahoo.com](mailto:manueldesancic@yahoo.com)

<sup>3</sup> Prof. dr Dragan D. Milašinović, dipl.inž. građ., University of Novi Sad, Faculty of Civil Engineering Subotica, Kozaračka 2a, Subotica, Serbia, tel: +381 24 554 300, e – mail: [ddmil@gf.uns.ac.rs](mailto:ddmil@gf.uns.ac.rs)

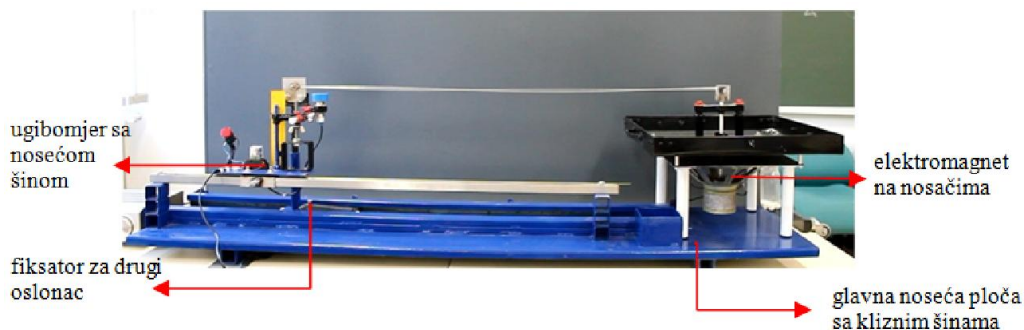
mašine, koje su napravljene da omoguće harmonijsku analizu konstrukcija. Kako fabrički proizvedene mašine na tržištu imaju visoku cijenu, autori su samostalno razvili mašine radi korištenja prvenstveno u edukativne svrhe, a i za ispitivanja u saradnji sa privredom.

## 2. ISPITIVANJE MODALNIH OBLIKA

Za ispitivanje modalnih oblika grednih i površinskih nosača raznih oblika i tipova oslanjanja koristi se elektromagnetni pobuđivač vibracija MK-20. Gredni i površinski nosači koji se ispituju na elektromagnetnom oscilatoru predstavljaju dinamičke modele sa prigušenjem, koji su pobuđeni sa prinudnom harmonijskom silom. U ovoj fazi ispitivanja i proračuna stvarni dinamički sistemi su uprošćeni i posmatraju se kao dinamički sistemi koji slobodno osciluju.

Elektromagnetni pobuđivač vibracija se sastoji od četiri bitne komponente:

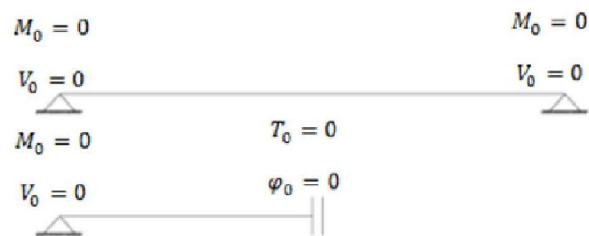
- elektromagnet na nosačima koji pobuđuje vibracije u jednom osloncu
- fiksator za drugi oslonac
- ugiбомjer sa nosećom šinom
- glavna noseća ploča sa kliznim šinama



Slika 1. Elektromagnetni oscilator

### a) Simetrični modalni oblici proste grede

Pobudna sila se zadaje u jednom osloncu, čime su narušeni konturni uslovi proste grede. Radi usklađivanja konturnih uslova sa načinom unošenja sile pobude analiziran je model pola proste grede na slici 2.




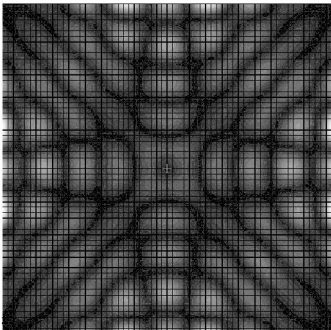
Slika 2. Prosta greda sa konturnim uslovima

Tabela 1 prikazuje poređenje svojstvenih kružnih frekvencija dobivenih eksperimentalno sa teorijskim rezultatom i numerički rezultatom primjenom programa SAP2000. Očigledno je odlično slaganje rezultata.

Tabela 1. Rezultati dobijeni za pola proste grede

Ton oscilovanja	EO MK-20 [Hz]	Rješenje DJ kretanja štapa [Hz]	SAP2000 [Hz]	Relativna greška
1	1.30	1.35	1.35	0,5-1%
3	9.3	9.35	9.35	
5	26	25.99	25.99	
7	50.8	50.95	50.95	

### b) Modalni oblici ploče

Elektromagnetni oscilator MK-20		SAP2000	
			
Ton: 116	Frekvencija: 2516 Hz	Ton: 116	Frekvencija: 2543 Hz
Relativna greška: 1%			

Slika 3. Ploča uklještena u centru

Ploča na slici 3 za koju su ispitani svojstveni oblici oscilovanja je uklještena u svom težištu pomoću dvije matice koje je pritežu tako da su joj onemogućena pomjeranja i rotacije u bilo kom pravcu. Pobuda koja dolazi sa elektromagneta prenosi se preko osovine na ploču u njenom težištu te ploča počinje da osciluje frekvencijom koja je zadana u softveru preko računara.

### 3. MODALNI OBLICI TRODIMENZIONALNIH KONSTRUKCIJA

Ispitivanja prostornih (većih) konstrukcija vršena su na dvoosnom mehaničkom pobuđivaču vibracija koji ima mogućnost proizvoljnog podešavanja amplitude i frekvencije oscilovanja.

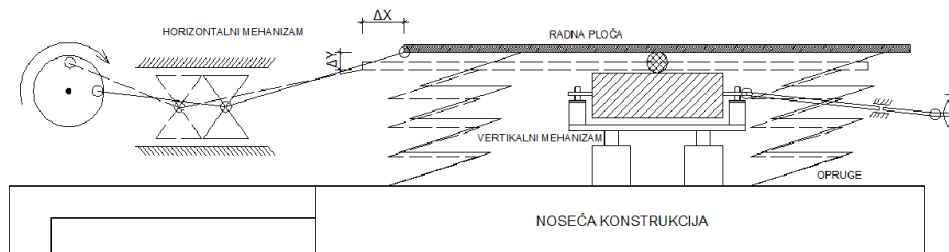
#### a) Način rada dvoosnog mehaničkog pobuđivača

Prilikom dejstva harmonijske sile na konstrukciju, uspostavlja se "naprijed-nazad" kretanje oko ravnotežnog položaja. Takvo kretanje se naziva *periodično kretanje*, *harmonijsko kretanje*, *oscilovanje* ili *vibriranje*. Prilikom tog kretanja u sistemu dolazi

do stalnog pretvaranja kinetičke energije u potencijalnu i obrnuto [3]. Pri prolasku kroz ravnotežni položaj konstrukcija ima maksimalnu kinetičku, a u amplitudnim položajima maksimalnu potencijalnu energiju. Najnepovoljniji način djelovanja opterećenja na konstrukciju jeste rezonancija. To je slučaj kada se frekvencija pobude poklopi sa sopstvenom frekvencijom sistema. Tada sistem akumulira više energije nego što može da otpusti i može doći do sloma. Izrađeni uređaj je moguće koristiti za detektovanje sopstvenih oblika i ispitivanje ponašanja konstrukcije pri najnepovoljnijem slučaju djelovanja dinamičkih sila - rezonanciji.

Prva ključna komponenta mašine prikazane na slici 4 je horizontalni mehanizam koji proizvodi i prenosi horizontalnu silu pobude radnoj platformi. Horizontalna sila pobude nastaje pretvaranjem obrtnog kretanja osovine motora u translatorno kretanje u ravni radne platforme. Ovo pretvaranje se ostvaruje pomoću zgloba sa promjenljivim ekscentrom i klizača sa jednim stepenom slobode pomjeranja u pravcu paralelnom sa ravni radne platforme.

Druga ključna komponenta mašine je vertikalni mehanizam koji proizvodi vertikalnu silu pobude. Ona nastaje obrtanjem ekscentričnog valjka koji je u kontaktu sa valjkom pričvršćenim za platformu, pri čemu su ose ova dva valjka međusobno upravne. Sila pobude djeluje u centru radne platforme.



$\Delta X$  HORIZONTALNO POMJERANJE (VERTIKALNA AMPLITUDA)

$\Delta Y$  VERTIKALNO POMJERANJE (HORIZONTALNA AMPLITUDA)

Slika 4. Šematski prikaz dvoosnog mehaničkog pobuđivača vibracija

#### b) Opšte karakteristike pobuđivača

Ovdje se daju samo osnovne karakteristike izvedenog uređaja:

- Težina: 980 kg
- Dimenzije u osnovi: 310 cm x 250 cm
- Vrsta pogonskih motora: monofazni kolektorski elektromotor
- Broj pogonskih motora: 2
- Elektromotor horizontalnog mehanizma:  
Snaga: 2.2 kW  
Broj obrtaja: 6200 obr/min
- Elektromotor vertikalnog mehanizma:  
Snaga: 2.0 kW  
Broj obrtaja: 6000 obr/min
- Način veze platforme sa podlogom: pomoću četiri opruge
- Maksimalna nosivost platforme: 450 kg

- Opseg zadavanja amplitude u horizontalnom pravcu: od 8mm do 45 mm
- Amplituda u vertikalnom pravcu 10 mm
- Opseg zadavanja frekvencije u horizontalnom pravcu: od 1Hz do 4Hz sa preciznošću od 0.2 Hz
- Opseg zadavanja frekvencije vertikalnom pravcu: od 1Hz do 4Hz sa preciznošću od 0.2 Hz
- Dimenzije vibro-platforme: 106 x 106 cm

**с) Prikaz ispitivanja trodimenzionalne konstrukcije i rezultati**



*Slika 5. Dinamička ispitivanja na napravljenim uređajima, (IMK RS)*

Prikaz ispitivanja koja su napravljena u Institutu za materijale i konstrukcije Republike Srpske (IMK RS) dat je na slikama 5 i 6.

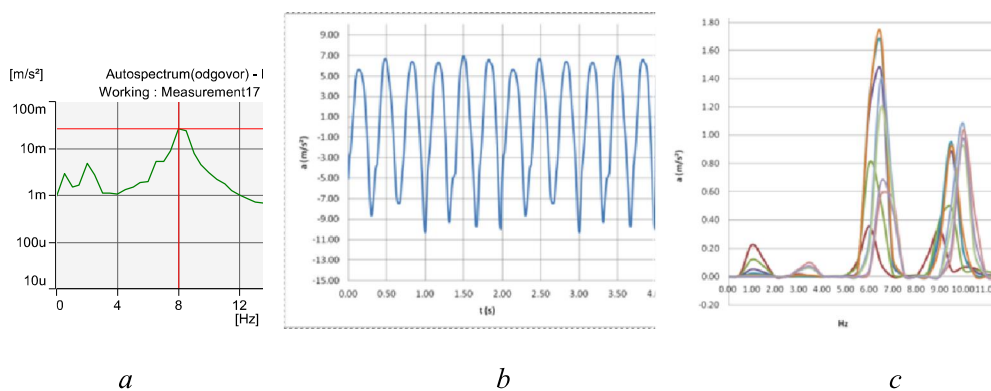


*Slika 6. Modalni oblici i mjerenja odziva konstrukcije*



Ispitivana prostorna konstrukcija predstavlja ramovski sistem sa četiri tavanice i masama ( $m=12.8$  kg) koncentrisanim u njihovom nivou. Sastoji se iz četiri stuba (punog pop. pr.  $\varnothing 10$ ) oslonjenim na nepokretnim osloncima što je obezbeđeno sfernim zglobovima. Ukrućenje tavanica obezbeđeno je šipkama (punog pop. pr.  $\varnothing 8$ ).

Cilj ispitivanja je bio da se uporede modalni oblici konstrukcije sa modalnim oblicima dobijenim u programu SAP2000. Ispitivanje je obavljeno pomoću mjernog sistema višenamjenski 4-kanalni analizator Portabl PULSE tip 3560 C (proizvođač Bruel&Kjaer), DeltaTron® akcelerometri tip 4507 i 4508 (jednoosni) za strukturnu i modalnu analizu (proizvođač Bruel&Kjaer) i modalni čekić model 2302-10 (ENDEVCO za impulsnu pobudu malih do srednje velikih konstrukcija).



Slika 7. (a) Odziv usljed pobude modalnim čekićem, (b) Odziv za pobudu od 3Hz, (c) Odziv konstrukcije u nivou prve tavanice za pobudu od 3Hz

Rezultati mjereni predhodno opisanim mjernim sistemom se približno poklapaju sa rezultatima dobijenim u programu SAP2000. Odgovori konstrukcije daju najveće vrijednosti u područjima dominantnih modalnih oblika (Slike 7 a, c), te se vidi da je odgovor pobuđivača približno harmonijski (Slika 7 b).

## LITERATURA

- [1] Vukotić, R.: *Ispitivanje konstrukcija*, Beograd, Naučna knjiga, 1998.
- [2] Ančić, D., Fajfar, P., Petrović, B., Szavits, N. A., Tomažević, M.: *Zemljotresno Inženjerstvo*, Beograd, Građevinska knjiga, 1990.
- [3] Brčić, V.: *Dinamika konstrukcija*, Beograd, Građevinska knjiga, 1981.

## EKSPERIMENTAL MODAL ANALYSIS OF VIBRATION

**Summary:** *This work provides a short overview development of devices for harmonic excitation and tests where they are used for the experimental dynamic analysis of*

*structures. The first device is an electromagnetic vibration exciter. The main drive mechanism is an electromagnet that creates a vibration of the solenoid in magnetic field. Electric impulse go from the computer to the electromagnet and that allows very precise setting of harmonic excitation. Drive mechanism of the another device ( mechanical shaker ) are electric motors whose rotation is converted to translational motion. In this way we are given harmonic disturbances to our models. Harmonic disturbances is usually applied in the experimental vibration analysis. On the mentioned devices we tested beam vibration system, surface carriers and spatial structure, and the results were compared with analytical and numerical results in SAP2000.*

**Keywords:** *Harmonic vibration exciter, experimental dynamic analysis of vibrations*