



[1] 2013 1[1]

AGG+ časopis za arhitekturu, građevinarstvo, geodeziju i srodne naučne oblasti
ACEG+ Journal for Architecture, Civil Engineering, Geodesy and other related scientific fields

268-277

Stručni rad | Professional paper

UDK | UDC 624.041.042.7

DOI 10.7251/AGGPLUS1301268M

Rad primljen | Paper received 16/11/2013

Rad prihvaćen | Paper accepted 12/12/2013

Ognjen Mijatović

*Arhitektonsko-građevinski fakultet Univerziteta u Banjaluci, Vojvode Stepe
Stepanovića 77/3, Banjaluka*

Manuel Desančić

*Arhitektonsko-građevinski fakultet Univerziteta u Banjaluci, Vojvode Stepe
Stepanovića 77/3, Banjaluka*

Aleksandar Borković

*Arhitektonsko-građevinski fakultet Univerziteta u Banjaluci, Vojvode Stepe
Stepanovića 77/3, Banjaluka*

RAZVOJ DVOOSNOG
POBUĐIVAČA
HARMONIJSKIH VIBRACIJA

DEVELOPMENT OF 2-AXIS
HARMONIC SHAKING
TABLE

Stručni rad

Professional paper

Rad primljen | Paper accepted

12/12/2013

UDK | UDC

624.041.042.7

DOI

10.7251/AGGPLUS1301268M

Ognjen Mijatović*Архитектонско-грађевински факултет Универзитета у Бањалуци, Војводе Степе Степановића 77/3, Бањалука***Manuel Desančić***Архитектонско-грађевински факултет Универзитета у Бањалуци, Војводе Степе Степановића 77/3, Бањалука***Aleksandar Borković***Архитектонско-грађевински факултет Универзитета у Бањалуци, Војводе Степе Степановића 77/3, Бањалука, aborkovic@agfbl.org***RAZVOJ DVOOSNOG POBUĐIVAČA HARMONIJSKIH VIBRACIJA****APSTRAKT**

U radu se daje kratak prikaz razvoja uređaja za harmonijsku pobudu modela građevinskih konstrukcija. Uređaj je razvijen u namjeri približavanja eksperimentalne dinamičke analize konstrukcija studentima i inženjerima građevinarstva.

Osnovni pogonski mehanizam uređaja su elektromotori čije se rotaciono kretanje prevodi u translatorno. Ovo omogućava da se modelima mogu zadati harmonijski poremećaji koji i jesu među najčešćim u eksperimentalnoj analizi konstrukcija.

U skladu sa skromnim materijalnim sredstvima, cilj je postavljen tako da uređaj bude izvodiv a istovremeno i primjenljiv za određene tipove eksperimenata, u čemu se i uspjelo.

Ključne riječi: *harmonijski pobuđivač vibracija, eksperimentalna dinamička analiza konstrukcija.*

DEVELOPMENT OF 2-AXIS HARMONIC SHAKING TABLE**ABSTRACT**

Development of device for harmonic excitation of engineering structures is presented. Device is developed in order to introduce experimental dynamic analysis of structures to students and engineers.

Basic drive mechanisms of device are electric motors whose rotational motion is transferred into translational. This enables possibility for excitement of structural models with harmonic force, which is the one of the most used in experimental analysis.

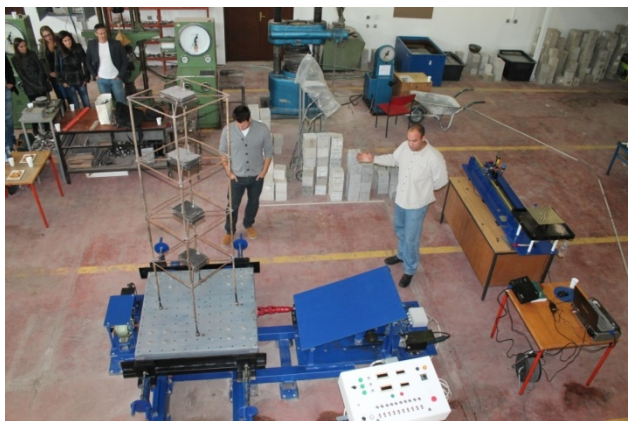
In accordance with modest financial funds, aim is posed in such a way that device must be feasible and also applicable for a range of experiments. This aim is successfully achieved.

Keywords: *harmonic shaking table, experimental dynamical analysis of structures.*

1. UVOD

S ubrzanim tehnološkim razvojem, eksperimentalna dinamička analiza konstrukcija sve više dobija na važnosti. Naime, savremene građevinske konstrukcije se usljed estetskih i ekonomskih zahtjeva izvode s malom sopstvenom težinom uz neophodan stepen krutosti koji će zadovoljiti potrebnu nosivost. Zbog nepovoljnog odnosa krutost/masa, ove konstrukcije su posebno osjetljive na dinamičke uticaje. S druge strane, numeričko modeliranje, koliko god da je moćan aparat u rukama inženjera, još uvijek ne može da potpuno izbací iz upotrebe eksperiment kao mjerilo stvarnosti.

Često korišten tip ispitivanja jeste primjenom vibro-platfomi na koje se postavljaju modeli konstrukcija koje se onda pobuđuju određenim poremećajem te se posmatra njihov odgovor. U radu se upravo opisuje izrada jednog takvog mehaničkog pobuđivača vibracija, oznake MK 20 (XY), slika 1.



Slika 1. Ispitivanje modela konstrukcija na razvijenom uređaju

Standardni dinamički princip mjerenju sastoji se u tome da se pomoću inercijalne šeme pravi koordinatni sistem u kome se mjere pomjeranja tijela koje osciluje [1]. Poznavanjem odnosa karakteristika inercijalne šeme i posmatranog tijela, prelazi se sa relativnog pomjeranja na pomjeranje definisano u nekom nepokretnom koordinatnom sistemu, odnosno nalaze se stvarna pomjeranja. Pri razvoju predstavljenog uređaja, zbog nedostatka opreme za mjerenje pomjeranja i ubrzanja, akcenat je stavljen na uočavanje svojstvenih oblika konstrukcije koji će se formirati pri rezonantnim stanjima.

Kako su ispitivanja na platformama vrlo skupa, ona su ograničena na važne naučnoistraživačke zadatke. Ispitivanja na platformama su važna za tipske konstrukcije koje se izvode u serijama [2]. Na platformama se može ispitati i seizmička otpornost industrijske opreme: transformatora, keramičkih izolatora, pumpi i sl. Za industrijsku opremu takav eksperiment je važniji od računskog dokaza zasnovanog na nesigurnim pretpostavkama.

Ispitivanjem modela građevinskih konstrukcija na vibro-platfomi mogu se dobiti važni podaci o krutosti i prigušenju konstrukcije za različite nivoe pobude. Takođe se mogu utvrditi lokacije i način apsorpcije energije, kritična mjesta u pogledu stabilnosti, sigurnost na prevrtanje, sadejstvo različitih elemenata itd. [1] Rezultati ispitivanja na vibro-platfomi su osnovni podaci za matematičko modeliranje konstrukcije koje treba tako podesiti da odgovor matematičkog modela za zadatu pobudu bude što sličniji odgovoru stvarnog modela na platformi.

Vibro-platforme su neophodan instrument za ispitivanje i utvrđivanje kvaliteta konstrukcija u svim trusnim područjima svijeta. Ovakvih uređaja, sa radnom platformom dimenzija većih od 2 x 2 m ili nosivosti preko 4 t, samo je 115 u svijetu, od čega 20 u Evropi [3]. U regionu postoji hidraulička vibro-platforma u makedonskom institutu "IZIIS" u Skoplju, te skoro napravljena improvizovana vibro-platforma u Splitu.

S obzirom na to da Banjaluka leži na trusnom tlu, i već je doživljavala katastrofalne zemljotrese, od velike je važnosti izvođenje seizmički otpornih konstrukcija. Konačan cilj predstavljenog rada jeste da se kroz proces izrade jednostavne vibro-platforme pokrene osnivanje laboratorije za dinamičko ispitivanje konstrukcija u Banjaluci.

S obzirom na to da je izgradnja hidrauličke vibro-platforme izuzetno skupa, zbog cijene hidrauličkih cilindara i servo-ventila koji regulišu pritisak a tim i pomjeranje i brzinu, odlučeno je da se pobuda ostvaruje mehaničkim putem.

U radu su date specifikacije izvedenog mehaničkog pobuđivača vibracija, detaljno su opisane sve njegove komponente te način rada i funkcija uređaja. Kratka prezentacija uređaja se može pogledati na www.youtube.com, za pretragu "mehanički pobuđivač vibracija".

2. UOPŠTENO O IZRAĐENOM MEHANIČKOM POBUĐIVAČU VIBRACIJA

2.1. OSNOVNE KARAKTERISTIKE

Taksativno se daju osnovne karakteristike izvedenog uređaja:

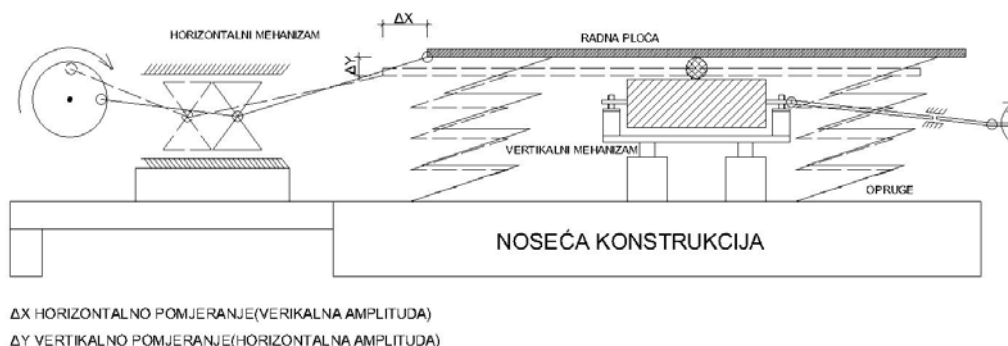
- Težina: 980 kg
- Dimenzije u osnovi: 310 cm x 250 cm
- Vrsta pogonskih motora: monofazni kolektorski elektromotor
- Broj pogonskih motora: 2
- Elektromotor horizontalnog mehanizma:
 - Snaga: 2,2 kW
 - Broj obrtaja: 6.200 obr/min
- Elektromotor vertikalnog mehanizma:
 - Snaga: 2.0 kW
 - Broj obrtaja: 6.000 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

2.2. NAČIN RADA I FUNKCIJA

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* [4]. Prilikom tog kretanja u sistemu dolazi do stalnog pretvaranja kinetičke energije u potencijalnu i obrnuto. 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.

Mehanički pobuđivač vibracija proizvodi dinamičku silu tako što se mehanički rad motora prenosi preko određenih mehaničkih sklopova do radne platforme na kojoj se nalazi model konstrukcija koja se ispituje.



Slika 2. Šematski prikaz mehaničkog pobuđivača vibracija

Pri dinamičkim ispitivanjima realnih građevinskih konstrukcija horizontalne vibracije su dominantne u odnosu na vertikalne. S obzirom na to da su stvarna dinamička opterećenja, kao što je pomjeranje tla usljed zemljotresa, proizvoljnog pravca, naravno da postoje i vertikalne komponente oscilacija. Ipak, tim komponentama se posvećuje manja pažnja jer objekti koji su dimenzionisani na više od 1 g vertikalnog ubrzanja (vlastita težina), obično bez problema podnose vertikalno ubrzanje usljed zemljotresa. Treba imati na umu da vertikalne oscilacije obično imaju više frekvencije od horizontalnih.

Prva komponenta mašine je horizontalni mehanizam koji proizvodi i zadaje 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 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.

Radna platforma je ploča na koju se postavljaju i fiksiraju modeli za ispitivanje. Ona je povezana za noseću konstrukciju mašine sa četiri opruge koje omogućavaju proizvoljno kretanje radne platforme. Vibro-platforma ima mrežu od 10 x 10 otvora koji su raspoređeni u dva ortogonalna pravca na po 10 cm, što omogućava znatnu fleksibilnost u postavljanju i vezivanju oslonaca modela. Radna platforma je fiksirana sa obje bočne strane, tj. sa strana paralelnih ulaznoj horizontalnoj sili pobude. Ovo je izvedeno pomoću dva podesiva fiksatora.

Kada fiksiramo platformu, dozvoljeno je pomjeranje samo u pravcu poremećajne sile tj. nema odstupanja po drugoj osi. Međutim, kada otpustimo fiksatore, ploča se translira i rotira proizvoljno u horizontalnoj ravni.

Treba još navesti da, zbog skraćenja nosećih opruga, pri pobudi radne platforme dolazi do male rotacije oko njene horizontalne ose. Slijedi da platforma, u opštem slučaju, kao stepene slobode ima tri translacije i dvije rotacije, od kojih su samo dvije translacije determinističke.

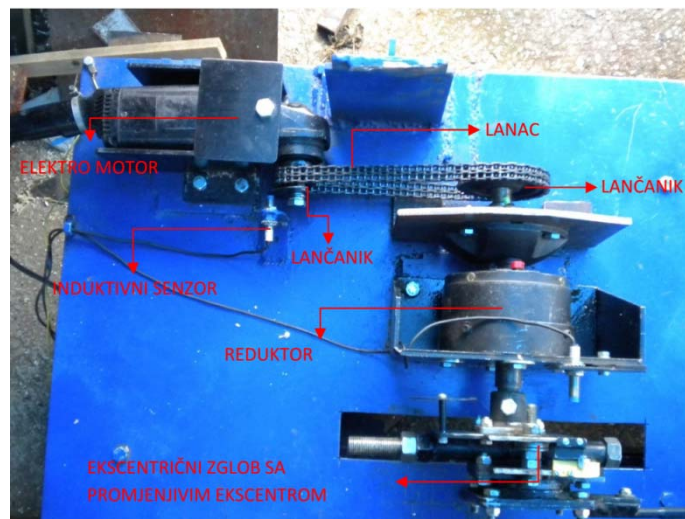
3. HORIZONTALNI MEHANIZAM

3.1. OSNOVNE KARAKTERISTIKE

Horizontalni mehanizam proizvodi i prenosi horizontalnu silu na vibro-platfomu pretvaranjem obrtnog kretanja u translatorno uz pomoć određenih mehanizama i sklopova, slika 3.

Horizontalni mehanizam se sastoji od sljedećih dijelova:

- Noseća konstrukcija
- Elektromotor 2,2 kW, 6.200 obr/min
- Dva lančanika odnosa 2:1
- Dvoredni lanac
- Reduktor prenosa 10:1
- Ekscentrični zglob sa promjenljivim ekscentrom
- Horizontalni klizač sa sfernim zglobom
- Nosač horizontalnog klizača
- Dupli kardanski zglob za sprečavanje udarnih transverzalnih sila
- Priključni limovi za vezu kardanskog zgloba sa radnom platformom



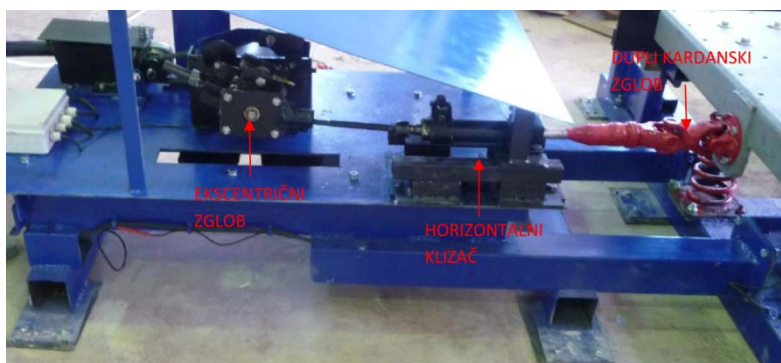
Slika 3. Horizontalni mehanizam (prenosni mehanizam i ekscentrični zglob)

NAČIN RADA HORIZONTALNOG MEHANIZMA

Obrtno kretanje elektromotora snage 2 kW i obrtnog momenta 50 Nm, pretvara se u translatorno kretanje. Elektromotor sa 6.200 obr/min je povezan sa reduktorom prenosa 10:1 i dva lančanika prenosa 2:1. Lančanike povezuje dvoredni lanac, tako da ovaj sistem redukuje brzinu obrtaja, a s njom i izlaznu snagu, dvadeset puta. Tako se na izlaznoj osovini motora dobija 2,2 kW, dok na izlaznoj osovini reduktora imamo oko 40 kW, odnosno 6.200 obr/min na osovini motora, a 310 obr/min na izlaznoj osovini reduktora.

Za izlaznu osovinu reduktora spojen je zglob sa promjenljivim ekscentrom, uz čiju pomoć se može korigovati amplituda oscilovanja. Zglob sa promjenljivim ekscentrom je povezan preko sfernog zgloba za klizač koji ima jedan stepen slobode pomjeranja u horizontalnom pravcu, slika 4. Uloga sfernog zgloba je da spriječi prenošenje momenta torzije sa konstrukcije na zglob sa promjenljivim ekscentrom, jer u slučaju da se torzioni moment prenese sa konstrukcije na zglob, može doći do njegovog oštećenja. Tako na izlazu iz klizača dobijamo čistu aksijalnu silu, koja se potom prenosi na radnu platformu.

Klizač je vezan za radnu platformu preko duplog kardanskog zgloba koji sprečava prenos transverzalne sile sa radne platforme na pogonski sistem, slika 5. Ovo je bilo neophodno uraditi jer bi u slučaju prenošenja transverzalne sile sa radne platforme na horizontalni klizač došlo do njegovog oštećenja.



Slika 4. Horizontalni mehanizam



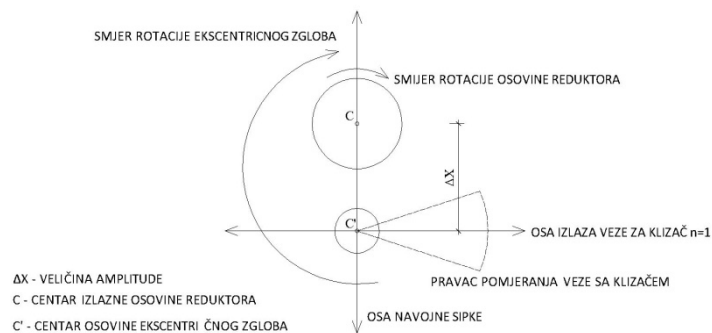
Slika 5. Detalj ekscentričnog zgloba i horizontalnog klizača

3.2. ZGLOB SA PROMJENLJIVIM EKSCENTROM

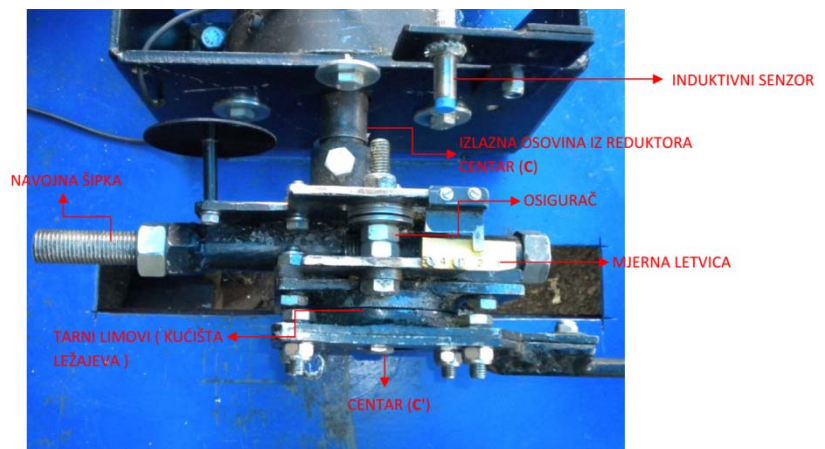
Zglob sa promjenljivim ekscentrom omogućava mijenjanje amplitude oscilovanja radne platforme u opsegu od 4 mm do 40 mm. S obzirom na to da ga je bilo neophodno konstruisati tako da omogući precizno korigovanje amplitude, lako rukovanje i otpornost na udarna opterećenja, u pitanju je najkomplicovaniji element uređaja.

Amplitudu oscilovanja mijenjamo povećavanjem razmaka između centara C i C', odnosno povećavanjem ekscentra obrtnog kretanja ekscentričnog zgloba, slika 6. Mijenjanje ekscentra se ostvaruje uz pomoć dvije komponente: pokretne i nepokretne, slika 7. Nepokretna komponenta je fiksirana za izlaznu osovinu reduktora, a pokretna je preko navojne šipke vezana za nepokretnu. Tako pokretna komponenta klizi po nepokretnoj okretanjem navojne šipke. Pokretni dio ekscentričnog zgloba se sastoji od izlaznog lima koji se veže sa

horizontalnim klizačem preko priključnog lima. Izlazni lim je zavaren za tarne limove koji su ujedno i kućišta kuglastih ležajeva koji sprečavaju trenje. Tarni limovi su povezani osovinom 20 mm, tako da im je omogućeno okretanje bez izbočavanja za vrijeme obrtanja kompletnog ekscentričnog zgloba. Slijedi da pomjeranjem pokretne komponente u odnosu na nepokretnu, postizemo povećavanje razmaka između centra izlazne osovine reduktora C i centra osovine zgloba C'.



Slika 6. Šematski prikaz ekscentričnog zgloba sa promjenjivim ekscentrom



Slika 7. Ekscentrični zglob sa promjenjivim ekscentrom

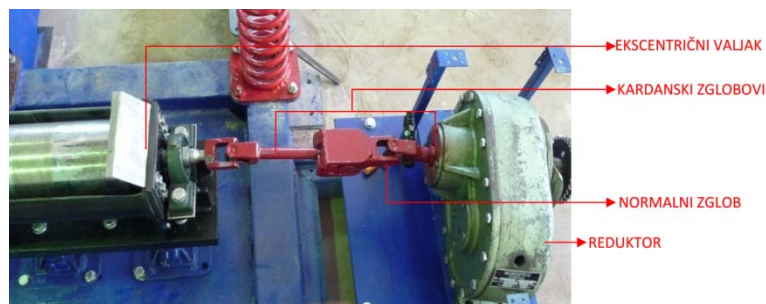
4. VERTIKALNI MEHANIZAM

Vertikalni mehanizam služi za harmonijsku pobudu radne platforme u vertikalnom pravcu, slika 8. Za razliku od horizontalnog mehanizma koji ima promjenjivu amplitudu, vertikalni mehanizam ima stalnu amplitudu. Ona je 10 mm i ne može se mijenjati iz funkcionalnih razloga

Vertikalni mehanizam se sastoji od sljedećih dijelova:

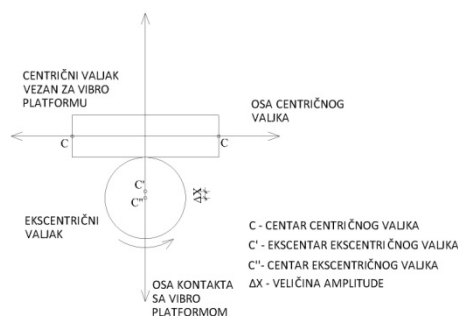
- Noseća konstrukcija
- Elektromotor 2,2 kW, 6.200 obr/min
- Dva lančanika odnosa 2:1
- Dvoredni lanac
- Reduktor prenosa 10:1
- Ekscentrični valjak

- Kuglasti ležajevi sa kućištem
- Posuda za mazivo
- Hidraulički cilindri
- Osovina sa kardanskim i normalnim zglobovima
- Centrični valjak vezan za vibro-platfomu

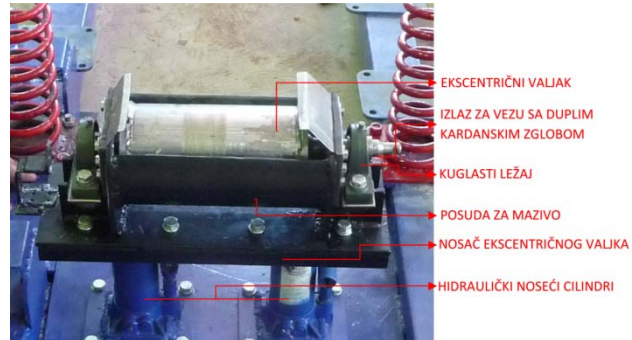


Slika 8. Vertikalni mehanizam

Vertikalni mehanizam vrši pobudu uz pomoć ekscentričnog valjka koji ima ekscentar od 10 mm. Osa ekscentričnog valjka je ortogonalna na osu valjka koji je vezan za radnu platformu. Tako se valjci dodiruju u jednoj tački što smanjuje trenje za vrijeme obrtanja, slike 9 i 10. Ekscentrični valjak se nalazi u posudi sa mazivom koja mu omogućava konstantno podmazivanje, slika 10. Valjak je spojen sa nosećom pločom preko dva kuglasta ležaja sa nosećim kućištima. Kompletan sistem je vezan za glavnu noseću konstrukciju preko dva hidraulička cilindra nosivosti 5 t, slika 10. Uloga nosećih cilindara jeste da odvoje ekscentrični valjak od valjka koji je fiksiran za radnu platformu. Odvajanje ekscentričnog valjka od radne platforme vrši se za vrijeme montiranja konstrukcije za ispitivanje na platformu, odnosno za vrijeme nanošenja opterećenja na radnu platformu. Tako se odvajanjem valjka od platforme sprečava unošenje sile u mehanički sistem vertikalnog mehanizma. Kompletno opterećenje preuzimaju noseće opruge i usljed toga se skraćuju od 10 mm do 45 mm u zavisnosti od težine koju nanosimo na platformu. Po završetku nanošenja opterećenja na platformu, odnosno kada opruge preuzmu opterećenje i skrate se, tada se, uz pomoć hidrauličkih cilindara, ekscentrični valjak može podići te ostvariti kontakt u jednoj tački sa valjkom vezanim za platformu. Ovim postupkom obezbjeđujemo da mehanizam bude opterećen samo pri pozitivnoj amplitudi a da pri negativnoj amplitudi opterećenje nose opruge.



Slika 9. Šematski prikaz vertikalnog mehanizma



Slika 10. Vertikalni mehanizam



Slika 11. Detalj kontakta ekscentričnog i centričnog valjka

Osovina ekscentričnog valjka je povezana sa reduktorom preko osovine sa dva kardanska zgloba i jednim normalnim zglobom. Funkcija normalnog zgloba koji se nalazi na sredini rastojanja između kardanskih zglobova jeste da spriječi skraćivanje osovine za vrijeme spuštanja ekscentričnog valjka. Reduktor je povezan sa elektromotorom na isti način kao i kod horizontalnog mehanizma.

5. UPRAVLJAČKI DIO POBUĐIVAČA VIBRACIJA

Promjenu frekvencije oscilovanja mehaničkog pobuđivača zadajemo korigovanjem obrtaja elektromotora tako što se mijenja jačina struje preko komandne table, slika 12.

Struja koja dolazi u komandnu tablu se pomoću niza potencijometara koriguje, te se dobija potrebna jačina struje, čime se reguliše broj obrtaja motora. Informacija o broju obrtaja motora se dobija pomoću induktivnih senzora. Preko njih se informacija o trenutnom broju obrtaja šalje na komandnu tablu, gdje se potom na displeju tahometra ispisuje ovaj podatak. Tako se za vrijeme rada mašine može proizvoljno mijenjati frekvencija oscilovanja i imati stalan uvid u broj obrtaja odnosno u frekvenciju oscilovanja.

Na komandnoj ploči se nalaze po jedan tahometar i voltmetar, posebno za svaki mehanizam. Kombinovanjem informacija o težini konstrukcije, veličini amplitude i željene frekvencije, može se izračunati jačina struje potrebna za postizanje određene frekvencije.

Na komandnoj tabli je omogućeno proizvoljno pokretanje posebno horizontalnog mehanizma, nezavisno od vertikalnog mehanizma. Takođe postoji mogućnost njihovog sinhronog pokretanja, čime se simulira pobuda u dva pravca u vertikalnoj ravni.



Slika 12. Komandna ploča mehaničkog pobuđivača vibracija

6. ZAKLJUČAK

Razvijeni uređaj posjeduje izuzetne karakteristike koje otvaraju mogućnost eksperimentalne dinamičke analize široke klase modela građevinskih konstrukcija. Dovođenjem modela konstrukcija u stanje rezonancije, mogu se identifikovati mnogi mehanički parametri.

Razvoj mehaničkog pobuđivača vibracija je izazvao veliko interesovanje među studentima i inženjerima, pa čak i u široj javnosti. Uređaj je izveden sa veoma skromnim finansijskim sredstvima, isključivo zahvaljujući entuzijazmu prva dva autora. S obzirom na to da živimo u izrazito trusnom području, sva istraživanja koja mogu dovesti do izvođenja bezbjednijih konstrukcija su dobrodošla.

Imajući na umu nezavidnu ekonomsku situaciju, naučnoistraživački rad u zemljama u razvoju se uspješno može odvijati samo nesebičnim angažovanjem sopstvenih snaga. Razvoj jednostavnih uređaja i softvera, koji mogu približiti pojedine kompleksne pojmove studentima, svakako će pozitivno uticati na proces obrazovanja inženjera, što će posredno doprinijeti i napretku društva.

Sljedeći korak ka osnivanju laboratorije za dinamička ispitivanja konstrukcija biće razvoj hidrauličke platforme velike nosivosti.

7. BIBLIOGRAFIJA

- [1] R. Vukotić, *Ispitivanje konstrukcija*. Beograd, Naučna knjiga, 1998.
- [2] D. Ančić, P. Fajfar, B. Petrović, A. Szavits-Nossan i M. Tomažević, *Zemljotresno Inženjerstvo*. Beograd: Građevinska knjiga, 1990.
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Earthquake_shaking_table