

# UTICAJ DINAMIČIH OPTEREĆENJA NA KARAKTERISTIKE KOMPRESIONIH STUBOVA JEDNOUŽADNIH ŽIČARA

Milomir Čupović<sup>1,\*</sup>, Mile Savković<sup>2</sup>, Nebojša Zdravković<sup>2</sup>, Desimir Jovanović<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Državni Univerzitet u Novom Pazaru

<sup>2</sup> Mašinski fakultet Kraljevo, University of Kragujevac;

<sup>3</sup> Zastava arms, Kragujevac

*Prolazak kopče na kompresionoj bateriji žičara praćen je serijom podrhtavanja stubnog mesta. Tom prilikom kopča stupa u kontakt sa točkom, prolazi ispod točka i gubi taj kontakt. Posledice te pojave na strukturu stuba su nedovoljno istražene.*

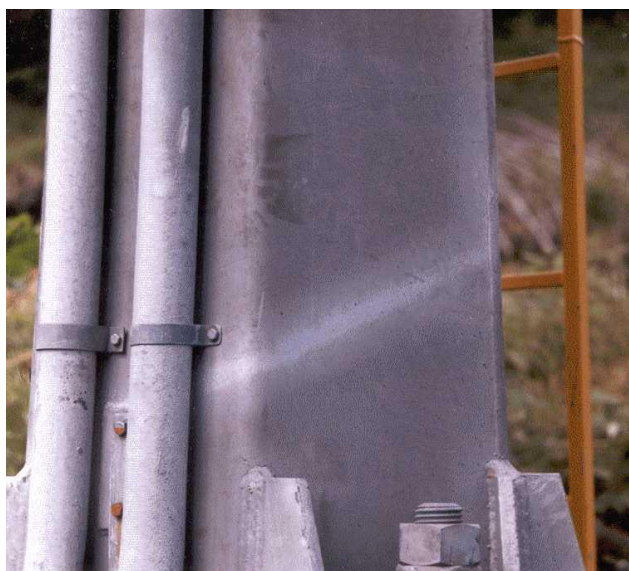
*U radu se istražuje ponašanje realne, već instalisane strukture u realnim uslovima eksploatacije. U laboratorijskim uslovima pobudno opterećenje predstavlja kombinaciju nekoliko osnovnih tipova signala. U istraživanjima sprovedenim u realnim okolnostima pobudno opterećenje je vrlo kompleksno. Iskorišćena je mogućnost da se složena priroda realne pobude modelira sa zadovoljavajućom prihvatljivošću. Prolazak sedišta, izaziva pojavu prinudnih prigušenih vibracija, koje mogu imati i naponske implikacije.*

*U radu je izvršena kompleksna identifikacija pobude, analiza načina oscilovanja stubne strukture kao i korelacionodnos pobude i naponskog odziva stuba.*

**Ključne reči:** kompresioni stub, jednoužetna žičara, udar, modalna analiza, FE model, validovani model, oscilacije, frekventni spektar, naponske posledice.

## 1. UVOD

Mnogi autori su se bavili problemom prolaska sedišta ispod baterije kompresionih kotura na jednoužetnim žičarama. U [1] do [13] su istraživani uticaji udarnog opterećenja na ponašanje same baterije koturova, bez odgovora stuba.



Sl. 1. Posledice razmene energije

Prolazak kopče preko baterije karakteriše proces prenosa energije. Deo kinetičke energije koja potiče od kretanja prevoznog sredstva povezanog sa užetom, prenosi se na bateriju. Deo kinetičke energije koji je prešao na bateriju uzrokuje kretanje članova baterije. Rotacije i pomeranja baterije u vertikalnom pravcu. Drugi deo se transformiše u energiju deformacije baterije i stuba. Posledice takve razmene energije, na strukturu stuba, su interes autora ovog rada (Slika 1).

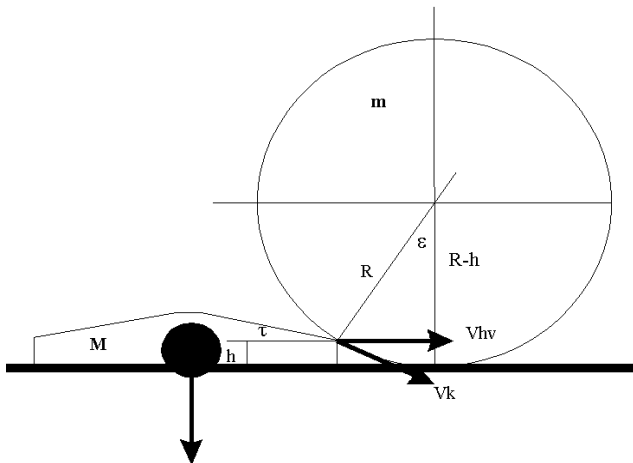
## 2. PROLAZAK KOPČE ISPOD KOMPRESIONE BATERIJE

Kod negativne baterije kopča hvataljke nailazi sa donje strane kotura. Prolaskom ispod baterije koturova, njena gornja površina, koja ima geometriju proizašlu iz proračuna čvrstoće, se  $n$  puta nalazi u kontaktu sa koturom i isti broj puta taj kontakt gubi ( $n$  – broj koturova u bateriji). Prolazak kopče, najčešće je praćen serijom podrhtavanja stuba. Vozeći se u prevoznom sredstvu, putnik ima osećaj vožnje po putu punom sitnih rupa, [4,14].

Sa slike 2. jasno se uočavaju elementi koji kontakt kopče i kotura definišu kao sudar dva tela. Razlika u masi je višestruko na strani kopče (redukovana masa sedišta sa putnicima  $M \gg m$ ), a postoji i razlika u brzinama u tački sudara.

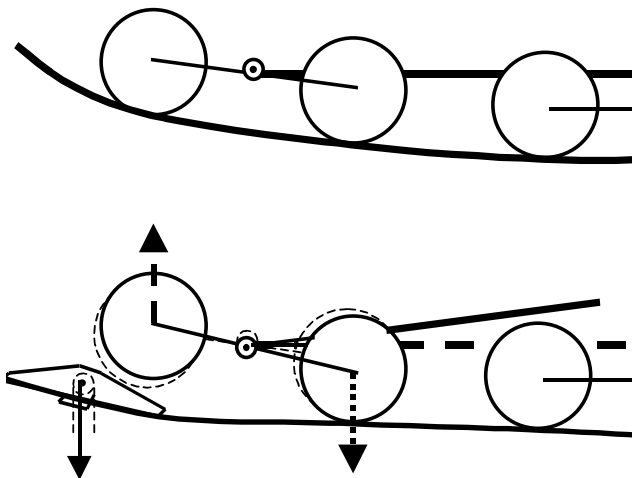
Postoji i razlika u materijalima. Obloga kotura je od gume, a kopča je urađena od kovanog čelika. U trenutku sudara javlja se udarni impuls, koji po svom intenzitetu može i nekoliko puta da nadmaši statičku silu koja deluje

po jednom koturu, a po vremenu trajanja definiše se kao trenutna vrednost.



Sl. 2. Kontakt kopče i točka

Posledica pojave udarnog impulsa je preraspodela opterećenja. U momentu udara udarni impuls se prenosi na uže posredstvom drugog kotura, para udarenom koturu.



Sl. 3. Prenos udarnog impulsa

Učestalost ove pojave se može izračunati:

$$f = \frac{1}{l} \left[ \frac{v}{v} \right] \quad (1)$$

gde je:  $l$  – razmak između koturova  
 $v$  – linijska brzina žičare

Za dimenzione odnose koji se najčešće susreću, za žičare sa fiksnom kopčom, ona se kreće u rasponu  $f = 4 - 12 \text{ Hz}$ . Učestalost pojave je relativno niska i preti opasnost njenog poklapanja sa sopstvenom frekvencijom stuba. U statičkim razmatranjima konstrukcije, ove pojave se

obuhvataju uvećanjem vertikalne sile za dvostruku vrednost mase punog prevoznog sredstva.

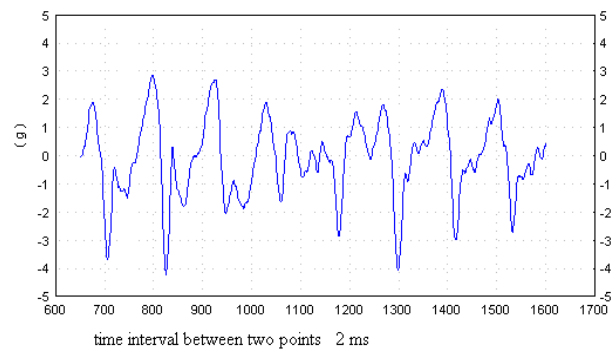
### 3. METODOLOGIJA ISTRAŽIVANJA

Da bi istražili posledice opisane pojave na dinamičko ponašanje strukture stuba, koristili smo eksperimentalnu modalnu analizu i validovani FE model stuba. Uobičajeno je da se ispitivanja vezana za modalnu analizu sprovode u laboratorijskim uslovima na prototipovima modela. U tom slučaju potrebno je rešiti problem pričvršćivanja strukture, i to na način koji se poklapa sa realnim uslovima. Zavisno od vrste struktura, ovaj korak je najčešći izvor neslaganja eksperimentalnih uslova sa realnim.

U radu se istražuje ponašanje realne, već instalisane strukture u realnim uslovima eksploatacije. U istraživanjima sprovedenim u realnim okolnostima pobudno opterećenje je ono koje u svojoj svojoj kompleksnosti utiče na strukturu. Kada je u pitanju stub žičare, ne može se njegovo ponašanje posmatrati bez uticaja krutosti užeta. Istraživanje u ovom radu je rađeno za ustaljeni režim rada, u kome sile inercije nemaju velikog značaja.

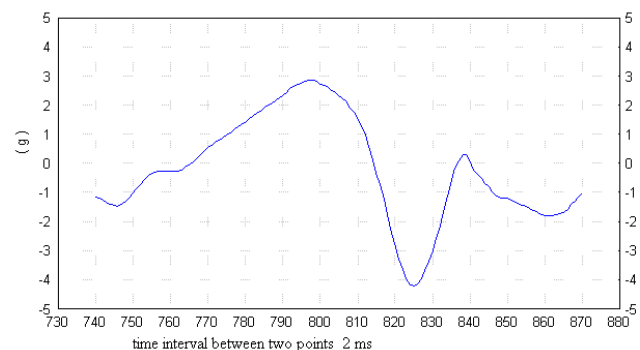
#### 3.1 Pobudno opterećenje

Senzor ubrzanja, je prikačen za konstrukciju sedišta, i na slici 4 je prikazan signal ubrzanja meren u vertikalnom pravcu. Na slici se jasno uočava trenutak nailaska sedišta na bateriju koturova (650) i trenutak gubljenja kontakta kopče sa baterijom koturova (1600).

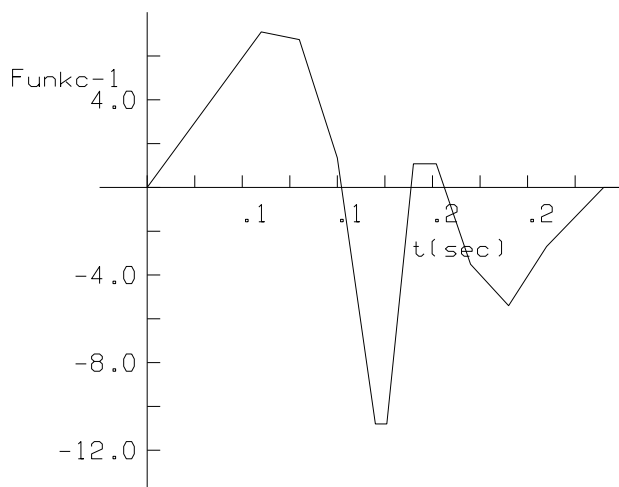


Sl. 4. Vertikalna komponenta ubrzanja sedišta na bateriji od 8 točkova

Izdvojen je segment (slika 5.) koji je iskorišćen za modeliranje dinamičke pobude sa aproksimacijom u 12 tačaka.



Sl. 5. Segment funkcije ubrzanja korišćen za modeliranje opterećenja



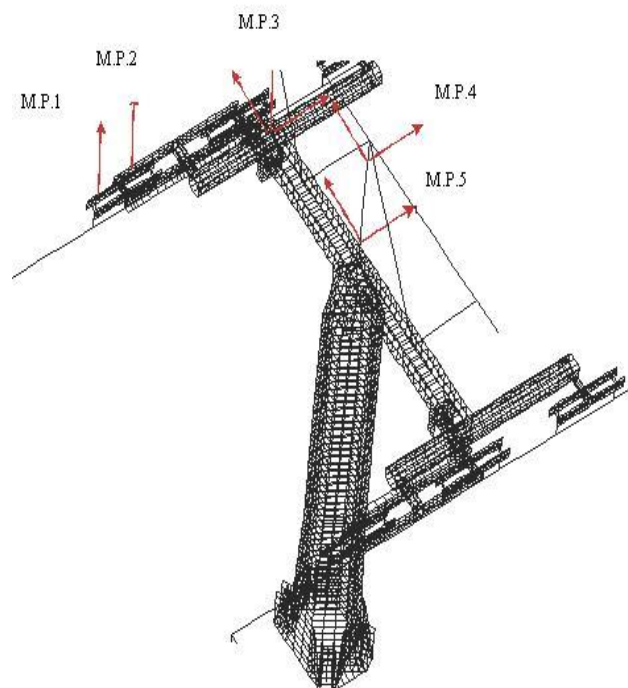
Sl. 6. Model pobudnog opterećenja

Na slici 6. prikazan je oblik pobudnog opterećenja, sila [kN] u funkciji vremena [sec]. Ovako modelirano opterećenje obuhvatilo je ukupan vremenski interval u kome je kopča u kontaktu sa koturom. Ako na bateriji ima  $n$  koturova, ovakav oblik opterećenja će se u proračunskom modelu pojaviti  $n$  puta. Sprovedena spektralna analiza realnog i modelskog opterećenja pokazuje korelaciju višu od 80 %, što je opravdalo našu pretpostavku modela sa 12 interpolacionih tačaka.

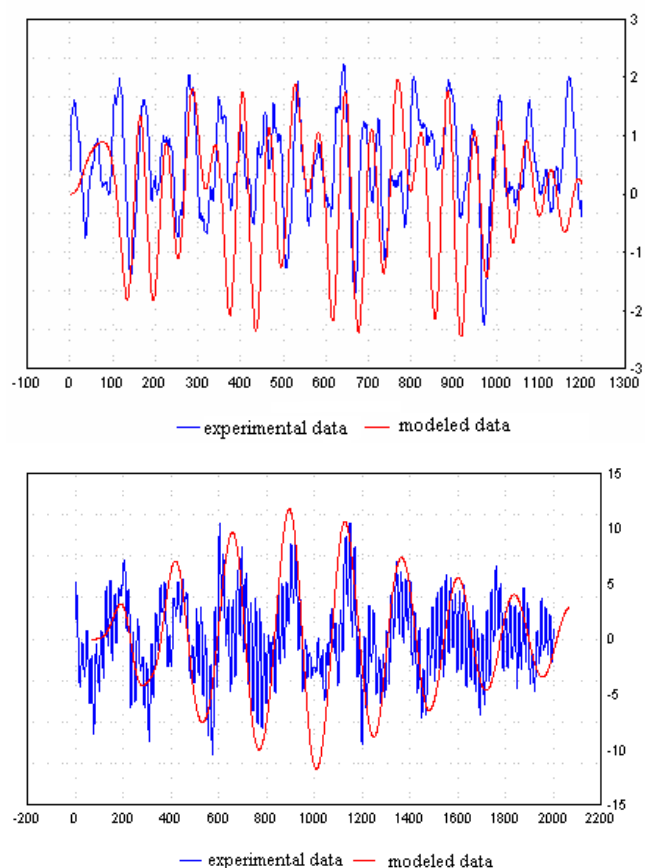
### 3.2 Validacija numeričkog modela

Za potrebe istraživanja formiran je pločasto gredni model. Model je formiran sa kinematskim slobodama svih elemenata baterije koturova. Izvršena je validacija modela na način da su poređeni oblici oscilovanja realne strukture i oblici oscilovanja numeričkog modela, sa zadatom modelovanom pobudom. Merna mesta su prikazana na slici 7, ujedno su to i tačke odziva modela.

Stepen korelacije podataka je procenjen kao viši od 80 %. (primer za M.P.1 i M.P.5). Za ovakvu vrstu ispitivanja, u realnim uslovima okruženja, može smatrati dovoljnim (slika 8.).



Sl. 7. Merna mesta



Sl. 8. Primer korelacije eksperimentalnih i modelskih podataka – validacija modela

### 3.3 Identifikacija dinamičkog ponašanja validovanog modela

U prva dva moda, na frekvencijama  $\omega = 4,25$  Hz i  $\omega = 9,6$  Hz, primarne su oscilacije jarma u podužnom i bočnom pravcu. Amplitude tih oscilovanja su visoke i u vrhu jarma se kreću i do 60 mm. U trećem modu oscilovanja na frekvenciji  $\omega = 12,7$  Hz, osciluje stablo stuba zajedno sa jarmom i to u podužnoj ravni, sa znatno manjim amplitudama od 5,4 mm. Ostala tri moda predstavljaju oscilovanje baterije koturova, zajedno sa stablom stuba. Oscilovanje baterije koturova ne predstavlja problem, jer to njihova kinematika dopušta, ali je za očekivanje da pomeranja stabla stuba imaju naponske implikacije.

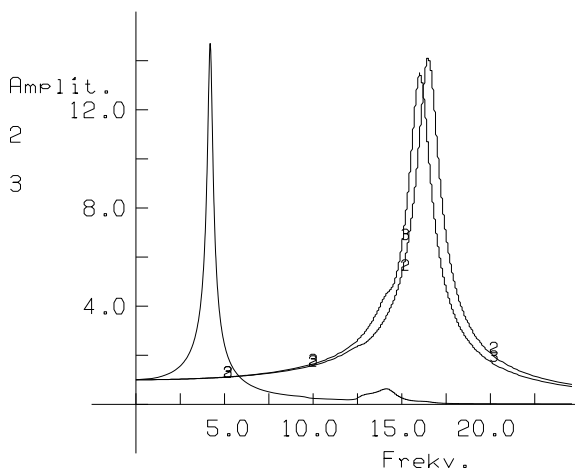
Bliskost sopstvenih frekvencija oscilovanja na prva tri moda oscilovanja i frekventnog spektra pobude ukazuje na moguća rezonantna stanja.

#### Prinudne prigušene oscilacije u frekventnom domenu

Ankerna struktura: istraživanja su pokazala da amplitudno pojačanje za pobudu zadatu u vertikalnom pravcu, mereno u pravcu trase žičare, iznosi od 6 – 8 puta u frekventnom opsegu od 15 – 20 Hz. Dakle, za zadnja četiri oblika oscilovanja u kojima uzima učešće i stablo stuba. Značajnije amplitudno pojačanje se reflektuje uvek na ankeru koji je bliži izvoru pobude.

Stablo stuba: veoma visoke vrednosti amplitudnog pojačanja (12-25 puta) iskazuju, ako pobuda deluje na povratnoj strani, a odziv se prati na tačkama koje su dijagonalno suprotne. Znatno niže, ali još uvek neprihvatljivo visoke, vrednosti se iskazuju ako pobuda deluje sa vučne strane. Frekventni opseg u kome se pojavljuju iskazane pojave iznosi 10 – 20 Hz.

Jaram: Analiza ukazuje na to da jaram osciluje u rezonansi sa pobudom. Ostatak stuba, u ovom procesu igra ulogu dinamičkog apsorbera i to je osnovni razlog zbog kojeg ne dolazi do odvarivanja jarma od traverzne. U dijagramu raspodele frekvencija eksperimentalnog opterećenja, frekvencije od 4 – 5 Hz egzistiraju sa 2/3 učešća u frekventnom spektru.



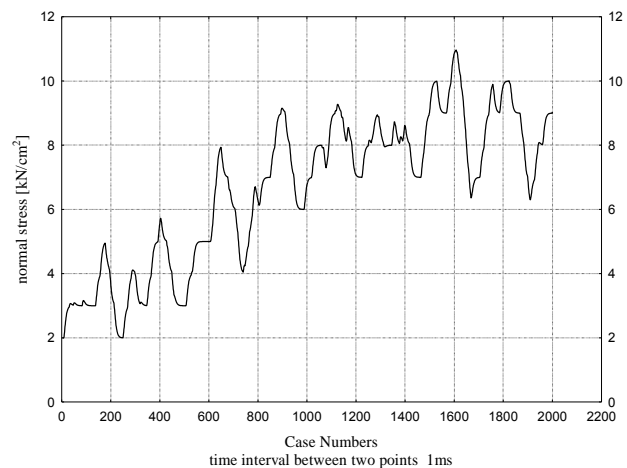
Sl. 9. Dijagram amplitudnog pojačanja vrha jarma

### 3.4 Naponske posledice prolaska sedišta



Sl. 10. Merno mesto br.1, merne trake

Za potrebe eksperimentalne verifikacije rezultata istraživanja, praćene su i naponske promene na stablu stuba. Merne trake (slika 10.), su postavljene oko svetle konture stabla.



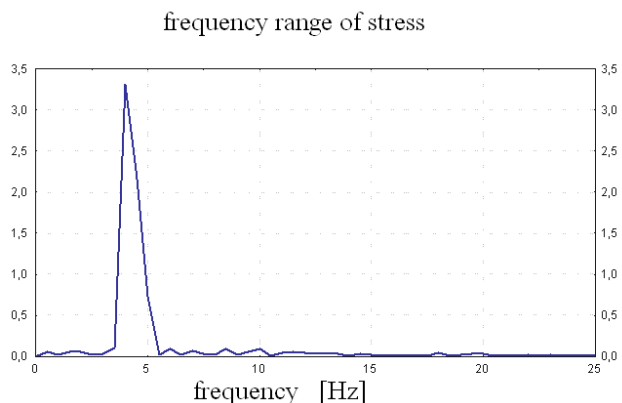
Sl. 11. Naponski signal sa mernih traka

Prolazak sedišta je registrovan je naizmeničnom promenom napona i porastom naponskog stanja (slika 11.) Poredeći signale sa Slike 4 i Slike 11, jasno se uočavaju korelativni odnosi. Naponski signal, na slici 11, predstavlja relativnu promenu napona. Merne trake su zalepljene na stubu koji je već bio opterećen uzeatom i praznim korpama ( u periodu remonta ). Očekivano je da se naponske promene vrše oko neke konstantne vrednosti. Na slici 11. to nije slučaj, jer na vrednost napona utiče raspodela opterećenja duž pripadajućeg dela lančanice, kao i opterećenje na suprotnoj strani. Iz tog razloga možemo govoriti o prosečnom porastu naponskog stanja izazvanog prolaskom sedišta.



Za razmatranu strukturu stuba prosečan porast normalnih napona je  $4 \text{ kN/cm}^2$ , a tangencijalnih  $1.2 \text{ kN/cm}^2$ , za dato merno mesto. Posebnu pažnju treba obratiti na naizmeničnu prirodu promene napona.

Spektralna analiza (slika 12.) je pokazala grupisanje naponskog stanja na frekvenciji od 4 Hz, odnosno na frekvenciji pobude.



Sl. 12. Frekventni spektar napona

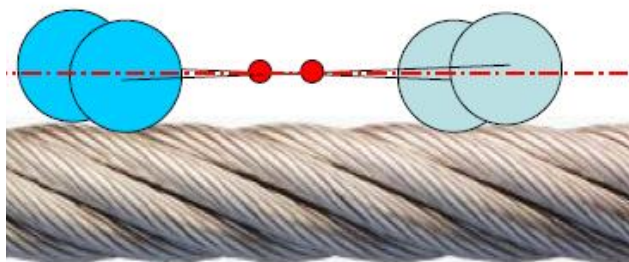
#### 4. OSTALI IZVORI DINAMIČKE POBUDE

U zavisnosti od opterećenja žičare je i geometrija izabranog užeta. Užad za jednoužetne žičare su uglavnom tipa  $6 \times (9+9+1)$ . Užad većeg prečnika imaju i veći prečnik strukova, a to za posledicu ima veću šupljinu između strukova. Naizmenično, za korak užeta, točak nailazi na vrh struka i silazi sa njega (slika 13.). Učestalost ove pojave se može izračunati:

$$f_{užeta} = \frac{v}{\frac{\lambda}{n}} \quad [\text{Hz}] \quad (2)$$

gde je:  $v$  – linijska brzina užeta (žičare)  
 $\lambda$  – korak užeta  
 $n$  – broj strukova

Za dimenzione odnose koji se najčešće susreću, za žičare sa fiksnom kopčom, ona se kreće u rasponu  $f = 50 - 130 \text{ Hz}$ .



Sl. 13. Uže kao izvor dinamičke pobude

Učestalost ove pojave je visoka i ne prethodi mogućnost rezonantnog stanja. Da bi se njene posledice svele na minimum, neophodno je voditi računa o rasporedu koturova u okviru baterije koturova.

Sledeći izvor pobude može biti sam linijski točak. Njegova geometrija u smislu ovalnosti. Ovalnost je posledica nepravilnog trošenja gumene obloge. I ova pojava se može sračunati:

$$f_{toč.} = \frac{v}{2 \cdot \pi \cdot R} \quad [\text{Hz}] \quad (3)$$

gde je:  $v$  – linijska brzina užeta (žičare)  
 $R$  – poluprečnik linijskog točka

Za dimenzione odnose koji se najčešće susreću,  $R = 450 \text{ mm}$ , za žičare sa fiksnom kopčom, ona se kreće u rasponu  $f = 2.8 - 4.2 \text{ Hz}$ . Učestalost ove pojave je relativno niska, pa je moguće njeno podudaranje sa sopstvenom frekvencijom stuba.

#### 5. ZAKLJUČAK

Kompresioni stubovi se ne mogu izbeći na trasi žičare. Istraživanja prezentovana u ovom radu su imala za cilj da ukažu na potrebu ozbiljnije analize dinamičkog ponašanja kompresionih stubova jednoužatnih žičara.

Istraživanja su pokazala da frekventni spektar dinamičkih opterećenja uglavnom zavisi od konstruktivnih osobina baterije točkova. Frekventni opseg tog opterećenja je niskog nivoa, što za posledicu može imati rezonantno stanje stubne strukture. Amplitudne vrednosti takvog opterećenja zavise uglavnom od: linijske brzine žičare, mase punog i praznog sedišta i geometrijskih karakteristika kopče.

Deo dinamičkog opterećenja se može pojaviti kao posledica neusklađenosti konstrukcije užeta i rasporeda točkova u bateriji. Frekvencija i amplituda, same za sebe, ne predstavljaju izvor problema.

Fotografija iz uvoda je snimljena na prvom stubu, neposredno ispred pogona dvosedežne žičare. Žičare sa fiksnom vezom u svom dnevnom radu imaju više od 50 zaustavljanja i kretanja. Dalja istraživanja će se proširiti na merenje i modelovanje ovih pojava.

#### 6. LITERATURA

- [1] PADOVESE L.R.: "Étude des phénomènes dynamiques dans les pylônes compression des téléphériques monocâbles", *Thèse, Université Joseph Fourier, Grenoble*. 1992.
- [2] Padovese L .R., Terriez J.M., Martin N., «Etude des phénomènes dynamiques dans les pylônes compression des téléphériques monocâble », vol 48, n°4, Décembre 1995 .
- [3] F.Combet, P.Jaussaud & N. Martin " Motion estimation and pulse detection in a detachable chairlift station", *third workshop on Physics in Signal and Image Processing, Grenoble, France, 2003 Jan. 29-31, pp 49-52*

- [4] A.Kopanakis: “Schwingungen bei Seilbahnen”, *INTERNATIONALE SEILBAHN-RUNDSCHAU* 3/2010, WIEN
- [5] H. Renezeder, A. Steindl, H.Troger:”Three-Dimensional Simulation of a Circulating Monocable Ropeway”, *PAMM · Proc. Appl. Math. Mech.* 6, 327–328 (2006)
- [6] M. Čupović:“Relevantni faktori od uticaja na statičko i dinamičko modeliranje jednoužetnih žičara“, *Doktorska disertacija*, Beograd, 2003.
- [7] G.Chen: “FE Model validation for structural dynamics”, *Department of Mechanical Engineering Imperial College of Science, Tehnology and Medicine London*, Thesis, 2001.
- [8] Savković, M., Gašić, M., Zdravković N. *Prilog poboljšanju veze užetnjače sa stubom okretne stanice žičare, The fourth symposium with international participation TIL 2011*, p.p. 125-130, ISBN 978-86-6055-014-1, 2011.
- [9] ŠTOLLMANN, V, ILČIK, Š, *Assessment of the current theory for projecting cableway routes in term of the risk level in overloading*, *Res. Arg. Eng.*, 55,2009 (1):35-38.
- [10] HOFFMAN, K, *Recent Developments in Cable-Drawn Urban Transport System*, *FME Transactions.*, 34,2006:205-212.
- [11] MAPELI, C, BARELLA, S, *Failure analysis of a cableway rope*, *Engineering Failure Analysis.*, 16,2009:1666-1673.
- [12] NAN, C, MEYER-PIENING, H.R, DECKING, C, *Dynamic behaviour of cable supporting roller batteries:basic model*, *Computers&Structures*, 69,1998:95-104.
- [13] SUCH, M, JIMENEZ-OCTAVIO, J.R, CORNICRO, A, LOPEZ-GARCIA, O, *An approach based on the catenary equation to deal with static analysis of three dimensional cable structures*, *Engineering Structures*, 31,2009:2162-2170.
- [14] Bojić, N., Jugović, Z., Popović, M. (2010) *Uticaj oblika otvora na naponsko stanje delova mašinskih konstrukcija pri jednoosnom zatezanju ploča*, *IMK-14 - Istraživanje i razvoj*, vol. 16, br. 2, str. 17-22.