

Doc. dr. Nebojša ĐURANOVIĆ dipl. ing.

Podgorica

ISPITIVANJE VIBRACIJA PJEŠAČKIH MOSTOVA

SAŽETAK

Članak se bavi problemom vibracija pješačkih mostova. U njemu je prikazana relevantna tehnička regulativa iz oblasti projektovanja i ispitivanja mostovskih konstrukcija, pri čemu je posebno prikazana regulativa koja se tiče vibracija konstrukcija. Data su i upoređenja više propisa iz raznih zemalja širom svijeta. U radu su prikazana i tri, po današnjim saznanjima najefikasnija načina rješavanja problema vibracija kod pješačkih mostova čije vibracione karakteristike ne zadovoljavaju uslove upotrebljivosti propisane važećom tehničkom regulativom. Ti načini su dodatno ojačanje (ukrućenje) mosta, povećavanje prigušenja u mostu i postavljanje (ugrađivanje u most) absorbera vibracija. U tom smislu, članak prikazuje i dinamičko eksperimentalno ispitivanje jednog pješačkog mosta raspona 13.0 + 78.0 + 13.0 m, sprovedeno nakon sanacije i ojačanja objekta. Most premašćava 60 m (niske vode) duboki kanjon rijeke Morače i nalazi u samom centru Podgorice. Dinamička ispitivanja obuhvatila su utvrđivanje amplituda dinamičkih pomjeranja i sopstvenih učestanosti konstrukcije za oscilovanje u tri pravca; utvrđivanje koeficijentat prigušenja i stvarne vrijednosti dinamičkog koeficijenta uvećanja.

1. UVOD

Pješački mostovi su konstrukcije kod kojih problemi vibracija, tj. graničnog stanja upotrebljivosti po vibracijama mogu biti veoma izraženi. U većini slučajeva problem vibracija pješačkog mosta izazvan je koraćanjem pješaka preko mosta. U tom smislu, poznato je da se većim grupama ljudi, uključujući i vojne jedinice, ne dozvoljava prelazak mosta "u korak". Smatra se da ovo pravilo vodi porijeklo još iz 1831. godine, kada je došlo do rušenja čeličnog mosta u Broughton-u, u Engleskoj, kada je rezonancu i kolaps konstrukcije izazvalo kretanje 60 vojnika marševskim korak [1]. Međutim sve do danas, veoma malo informacija o vibracijama pješačkih mostova uslijed kretanja pješaka našlo je svoje mjesto u tehničkoj regulativi iz ove oblasti, kako kod nas tako i u svijetu. Kao posledica toga često se širom svijeta pojave primjeri pješačkih mostova [2], koji su prilično "živahni", što zatim neminovno zahtijeva primjenu mjera za smanjivanje njihovih vibracija.

Uobičajena frekvencija ljudskog koraka je oko 2 Hz - za standardnu devijaciju od 0.175 Hz. To znači da oko 50% pješaka hoda u taktu 1.9 Hz do 2.1 Hz, ili, prikazano kroz veću vjerovatnoću, 95 % pješaka hoda taktom 1.65 Hz do 2.35 Hz, tj. koraka u sekundi. Međutim, kako je dužina mosta ograničena (pa samim tim i vremenski period predavanja pobude od koračanja mostu), čak ni most koji ima sopstvenu frekvenciju upravo u ovim granicama neće se se obično dovesti u stanje beskonačnih amplituda (što bi dovelo do kolapsa konstrukcije). To znači da su i vibracije mosta koje su posledica hodanja po njemu privremene, i obično se brzo priguše.

Pored toga, neki mostovi su često izloženi ljudskom trku, uobičajene frekvencije do oko 3.5 Hz, a poznato je i da je frekvencija drugog i trećeg tona normalnog ljudskog hoda između 4 i 6 Hz, što sve zajedno definiše područje nepoželjnih sopstvenih frekvencija samog pješačkog mosta - područje koje treba, ukoliko je to moguće, izbjeći.

Međutim, ako se sopstvene vibracije mosta nalaze unutar ovih granica, vibracije koje se hodom pojačavaju proizvode kod pješaka osjećaj ugroženosti tokom prelaska mosta - koji može ponekad ići i do toga nivoa da se jednostavno izbjegava korišćenje takvog objekta. Čak i u takvim situacijama stvarna opasnost od loma konstrukcije je veoma mala, budući da su i tada deformacije obično 10 - 1000 puta manje od onih koje bi se ostvarile tokom loma konstrukcije. U svakom slučaju ovaj psihološki aspekt problema vibracija predstavlja značajno pitanje za projektanta i zbog toga se ponašanje čovjeka na vibracije, u smislu nelagodnosti, zabrinutosti i konačno straha od vibriranja mosta mora uzimati u obzir prilikom projektovanja.

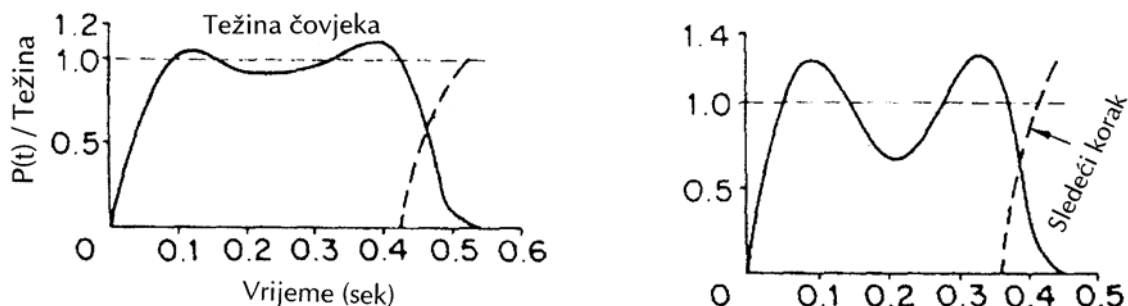
Inače, nivo vibracija koje čovjek može osjetiti je istraživao od strane brojnih autora [3].. Opšti je zaključak da, u principu, u domenu frekvencija od 1 do 10 Hz nivo osjetljivosti zavisi od ostvarenog ubrzanja konstrukcije, dok je u domenu od 10 do 100 Hz osjećaj neugodnosti povezan sa brzinom oscilovanja same konstrukcije. U tom smislu, u cilju opisa osjećaja koji kod čovjeka izaziva vibriranje pješačkog mosta, indikativne su vrijednosti prezentirane u tabeli 1., a koje se odnose na čovjeka koji se ne kreće, i izložen je harmonijskim vertikalnim vibracijama.

Opis nivoa osjećaja kod korisnika	Frekventni opseg od 1 do 10 Hz	Frekventni opseg od 10 do 100 Hz
	Najveće ubrzanje konstrukcije (mm/sek ²)	Najveće brzine konstrukcije (mm/sek)
jedva osjetne vibracije	34	0.5
jasno osjetne vibracije	100	1.3
neprijatne vibracije	550	6.8
nepodnošljive vibracije	1.800	13.8

Tabela 1. Granice osjetljivosti na vibracije u zavisnosti od frekvencije (učestanosti), ubrzanja i brzine vibriranja konstrukcije

Takođe, kaže se da ljudski organizam može osjetiti amplitude pomjeranja do nivoa od 0.001 mm, jagodice prstiju su čak i 20 osjetljivije.

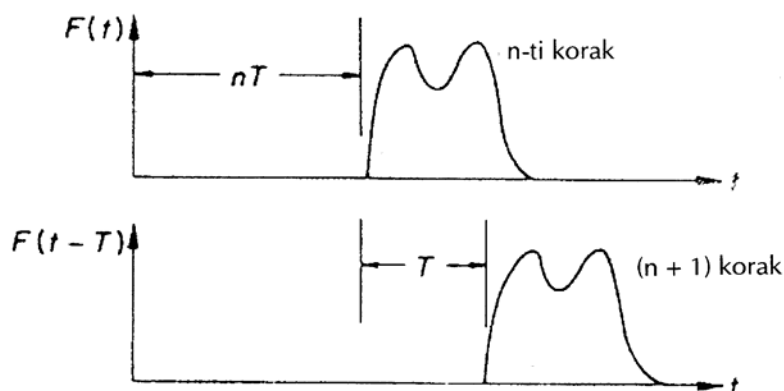
Dvije tipične vremenske funkcije nanese sile ostvarene uobičajenim hodom prikazane su na slici 2.



Slika 2. Funkcije opterećenja od ljudskog koraka

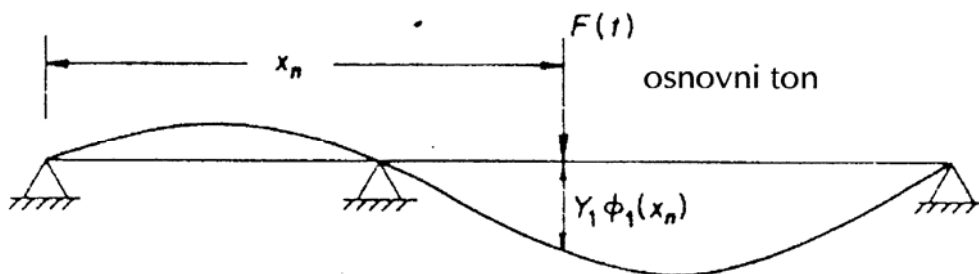
Dva maksimuma koji se pokazuju na dijagramima predstavljaju spuštanje pete (pri spustanju stopala na most, lijevi vrh) i podizanje prstiju (pri odizanju stopala od mosta, desni vrh). Neka ispitivanja su pokazala da se najnepogodnija situacija (pri hodu frekvencije koja se poklapa sa osnovnom frekvencijom oscilovanja samog pješačkog mosta), ostvaruje za korak dužine od oko 90 cm.

Dalje, funkcija pobude ljudskim hodom se može predstaviti kao niz predhodno prikazanih opterećenja koja su nanijeta u uzastopnim vremenskim intervalima - jednakim periodu oscilovanja (ponavljanja, koračanja) T , kako je prikazano na slici 3.



Slika 3. Definisanje stvarne vremenske funkcije koračanja

Teoretsko rješenje problema može se potražiti ako se ovako prikazana funkcija ljudskog koraka aproksimira sa funkcijom opterećenja prikazanom na slici 4.



Slika 4. Analitička aproksimacija funkcije opterećenja

Odgovarajuća funkcija pomjeranja v može biti napisana kao:

$$v(x, t) = Y_1(t) \cdot \phi_1(x)$$

gdje je $\phi_1(x)$ - ton oscilovanja. Ako u daljnjem razmatranju pođemo od jednačine prinudnih oscilacija grede, koja glasi:

$$m \frac{\partial^2 v}{\partial t^2} + EI \frac{\partial^4 v}{\partial x^4} = p(x, t)$$

može se pokazati da će jednačina kretanja za ovakvu prinudnu silu biti:

$$Y_1'' + \omega_1^2 \cdot Y_1 = \frac{1}{M_1} \cdot \sum_{n=1}^N \phi_1(x_n) \cdot F(t - nT)$$

gdje su ω_1 - osnovni period oscilovanja pješačkog mosta, i M_1 (generalisana) masa konstrukcije. Jasno je da je predhodnu jednačinu najlakše riješiti numeričkim metodama.

2. O DINAMIČKIM ISPITIVANJIMA MOSTOVA PREMA TEHNIČKOJ REGULATIVI

Pogledajmo što se relevantno o tematici samog ispitivanja vibracija mostova (uključujući i pješačke) nalazi u tehničkoj regulativi.

Kao prvo definišimo koje mostove treba ispitivati i kontrolisati, kako u pogledu vibracija tako i u pogledu ostalih parametara ukupnog ponašanja. Prema propisu [4], neophodno je ispitivati sve mostove raspona preko 15 m, a ako je most željeznički onda sve mostove raspona preko 10 m. Isto propisuje i [5] po kome je predviđeno i ispitivanje mostova manjih raspona neuobičajenih koncepcija; i to poslije težih udesa na objektu; ili većih elementarnih nepogoda; kao i kada je kod provizornih ili starih mostova potrebno utvrditi uticaj starosti, zamora materijala, korozije, deformacija i slično na stabilnost konstrukcije.

Dalje, kaže se da se mostovske konstrukcije uvijek prvo ispituju statičkim probnim opterećenjem, a zatim, ako je neophodno, tj. propisano, i dinamičkim probnim opterećenjem - koje i služi za sagledavanje problema vibracija. Pri tome, probno dinamičko opterećenje svojom brzinom kretanja i ostalim karakteristikama mora odgovarati najnepovoljnijim uticajima kojima je ispitivana konstrukcija podvrgnuta u eksploataciji.

Veoma je značajno napomenuti da [6] propisuje da je ispitivanje konstrukcije pod dinamičkim opterećenjem, u cilju određivanja dinamičkih karakteristika konstrukcija, neophodno sprovesti za sve inženjerske objekte van kategorije koji se grade u zonama seizmičkog intenziteta VIII i IX stepena. To se posebno odnosi kako na visoke brane (svih tipova po konstrukciji i materijalu), industrijske dimnjake visine $H \geq 120$ m, rashladne tornjeve visine $H \geq 80$ m, vodotornjeve kapaciteta $Q_v \geq 2000$ m³, tako i, što je za nas ovdje od posebnog značaja, na mostove (uključujući pješačke) i vijadukte raspona $L \geq 50$ m ili visine stubova $H \geq 30$ m, kao i na ostale objekte složenih konstrukcionih sistema (složene konstrukcije ili složeni uslovi fundiranja). Pri tome ta ispitivanja se sprovode na samim, gotovim, konstrukcijama, znači u prirodnoj veličini i in-situ. To praktično znači da se svi pješački mostovi u praksi moraju provjeriti probnim opterećenjem, kako bi se eventualni propusti iz faze projektovanja mogli u potpunosti sagledati kroz fazu ispitivanja.

Međutim, što se tiče mostova, standard [4] još je stroži. On kaže da se mostovi koje treba ispitivati uvijek testiraju i statičkim i dinamičkim opterećenjima, sem kada se radi o izuzetnim probnim opterećenjima, kada se dinamičko opterećenje ne sprovodi, jer se specijalni tereti preko konstrukcije prevode malom brzinom.

Eksperimentalno određivanje vibracionih i ostalih dinamičkih karakteristika ovakvih konstrukcija izvodi se ili prinudnim ili ambijentnim vibracijama, koje ne smiju da izazovu oštećenja konstrukcije.

Inače, kod dinamičkih ispitivanja brzina kretanja probnog opterećenja ne treba da bude manja od 10 km/h i treba je povećavati po pravilu po 20 km/h - ili manje ako se radi o kritičnim brzinama sa pojavama rezonancije (posebno rezonancije u glavnim podužnim, i poprečnim nosačima mosta) - sve do maksimalne brzine na tom dijelu konstrukcije, predviđene projektom, [5]. Pri tome odstupanje od propisane brzine ne smije biti veće od ± 5 km/h. Za svaku mjernu tačku, za svaku brzinu i za svako opterećenje za koje se konstrukcija ispituje, moraju se predvidjeti bar 4 prelaska preko mosta, od kojih po dva za oba smjera vožnje. Ove klauzule iz propisa su relevantne i za ispitivanje pješačkih mostova, jer obično ispitivač mosta nije u mogućnosti da obezbijedi projektno opterećenje od 5 kN/m² svuda po površini mosta na drugi način sem da i pješački most ispituje korišćenjem teških vozila, obično kamiona - na taj način dobijajući ekvivalentno opterećenje.

Informacije radi, predhodno pomenuti pravilnik propisuje čak i redoslijed nanošenja opterećenja na konstrukciju. Tako, na primjer, na dvokolosječnim željezničkim mostovima opterećenja treba da se kreće prvo na jednom kolosjeku, dok drugi kolosjek ostaje neopterećen; u drugoj kombinaciji probno opterećenje prolazi prvim kolosjekom, a na drugom kolosjeku se nalazi opterećenje u stanju mirovanja, dok u trećoj kombinaciji opterećenja prolaze mostom istovremeno i sa istim smjerom kretanja na oba kolosjeka.

U principu, eksperimentalno određivanje vibracionih karakteristika obuhvata određivanje perioda oscilovanja, forme (tonova) oscilovanja i prigušenja u konstrukciji, kako je i navedeno u [6]. Iako se to eksplicitno ne kaže, podrazumijeva se da se prate ne samo vertikalne, već i horizontalne vibracije konstrukcije.

Kod mostovskih i sličnih konstrukcija dinamičko ispitivanje se najčešće sprovodi u potpunosti u skladu sa pomenutim standardom [4]. Tokom dinamičkog ispitivanja mostova predhodno pomenute dinamičke karakteristike određuju se mjerenjem amplituda i cijelog vremenskog toka vertikalnih ugiba u sredini izabranih raspona glavnog nosača, u toku prelaska i neposredno nakon uklanjanja probnog opterećenja, pri čemu se mjere i brzine (u našoj situaciji to bi bila brzina ljudskog hoda) kojom to probno opterećenje prelazi preko konstrukcije. Ako se programom ispitivanja traži, mjere se i dinamičke deformacije na mjestima očekivanih ekstremnih uticaja, poprečna i podužna pomjeranja u sredini izabranih raspona, ali i ostale relevantne dinamičke karakteristika konstrukcije. Iz ove oblasti značajan je i [5], koji propisuje i određivanje dinamičkih napona u konstrukciji, pri čemu se njihovo određivanje ne ograničava samo na glavni nosač, već se dinamička mjerenja proširuje i na druge elemente konstrukcije. Kod mjerenja horizontalnih vibracija standard preporučuje mjerenja u ravni kolovoza, odnosno na onom pojasu glavnog nosača koji je bliži kolovozu.

Pri dinamičkom ispitivanju mosta, da bi konstrukcija bila proglašena tehnički ispravnom moraju biti ispunjeni sledeći kriterijumi [4]:

- da vibracije ne stvaraju kod korisnika osjećaj neugodnosti (pojave podrhtavanja, rezonance, amplitude pomjeranja i frekvencija koji izaziva osjećaj neugodnosti i t. sl.);
- da se dinamički koeficijent uvećanja $K_{d,izm}$ (određen iz rezultata ispitivanja) kreće u granicama onog predviđenog projektom, $K_{d,pred}$:

$$K_{d,izmj} \approx K_{d,rač}$$

- da se izmjerene periode slobodnih oscilacija $t_{o,izmj}$ nalaze u granicama teoriskih vrijednosti $t_{o,rač}$, to jest:

$$t_{o,izmj} \approx t_{o,rač}$$

Jedino [5], daje kriterijum za kontrolu veličinu amplitude (zbir maksimalnog udaljena u jednom, $u_{d,max,+}$, i u drugom pravcu, $u_{d,max,-}$, oscilovanja posmatrane tačke konstrukcije - u odnosu na ravnotežni položaj) koja se može tolerisati prilikom dinamičkog ispitivanja i, što je zanimljivo, ona se odnosi na horizontalno pomjeranje konstrukcije. Taj kriterijum je da polovina amplitude horizontalne oscilacije u sredini čeličnih glavnih nosača po pravilu ne smije premašiti 1/10000 dio raspona konstrukcije L:

$$0,5 (u_{d,max,+} + u_{d,max,-}) \leq 0.00001 L$$

Pri tome, ovaj Pravilnik kaže da za mostove u krivini treba voditi računa i o bočnom ugibu uslijed uticaja centrifugalne sile.

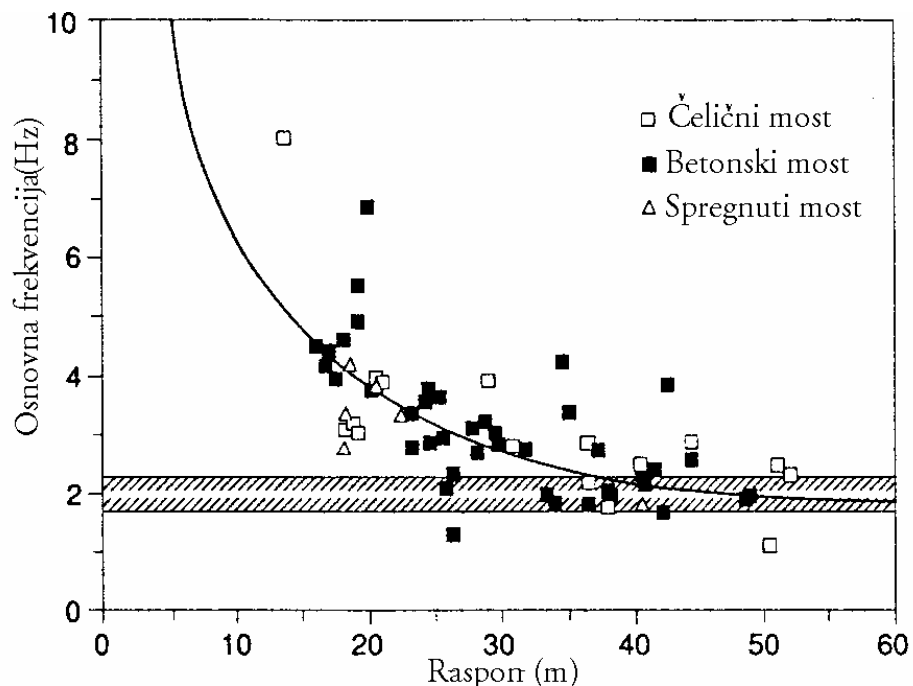
Način sračunavanja predhodno pomenutih dinamičkih karakteristika iz izvršenih mjerenja pod dinamičkim opterećenjem nekad je moguće izvršiti na više načina. Te načine propisi čak ni implicitno ne definišu.

Sada pogledajmo malo detaljnije zahtjeve iz tehničke regulative koji se još direktnije tiču vibracija pješačkih mostovskih konstrukcija. Tako, na primjer propisima [7], je zahtijevano da, da bi bili zadovoljena "funkcionalnost mosta", sopstvene frekvencije konstrukcije pješačkog mosta bez opterećenja ne smiju da se nađu u opsegu od 0,8 Hz do 5,5 Hz, što pri ispitivanju konstrukcije treba obavezno provjeriti.

Kao što se vidi, uslov dat u ovom propisu je veoma jasan i proizilazi iz iskustva brojnih izgrađenih pješačkih mostova, kod kojih je primijećeno da su mostovi koji imaju frekvencije u ovom rasponu veoma neprijatni za upotrebu. Ti problemi upotrebljivosti, izraženi kroz nelagodnosti kod korisnika mosta, su uglavnom psihološke prirode (neprijatnost od "ljuljanja" mosta), a samo rijetko mogu postati i problemi nosivosti.

Inače, kao napomena, u vrijeme projektovanja [8], mosta čije je ispitivanje sprovedeno i na ovom mjestu prikazano, ovaj uslov u tehničkoj nije postojao, a da je postojao bilo bi veoma teško zadovoljiti - zbog raspona konstrukcije.

Zadnja rečenica je napisana da bi se sagledalo da stvarni problemi nastaju kada se uvidi činjenica da je, bez obzira na primijenjene konstruktivne mjere, određeni pješački most - sa praktično zadatim rasponom (prelaz preko rijeke, raskrsnica, uvala i t. sl.), veoma teško projektovati da mu frekvencija izađe iz propisima zabranjenih granica, jer je upravo raspon nosne konstrukcije glavni faktor od koga zavisi frekvencija. U tom smislu korisno je pogledati sliku 5, koja prikazuje vezu osnovne frekvencije 67 ispitivanih pješačkih mostova iz cijelog svijeta i njihovih raspona (koji se nalaze u rasponu od 15 do 50-ak m), sa koje se jasno vidi da je u principu veoma teško (gotovo nemoguće) izaći iz granica za frekvenciju osnovnog tona koje su u propisima označene kao nepogodne, i koje treba izbjeći.



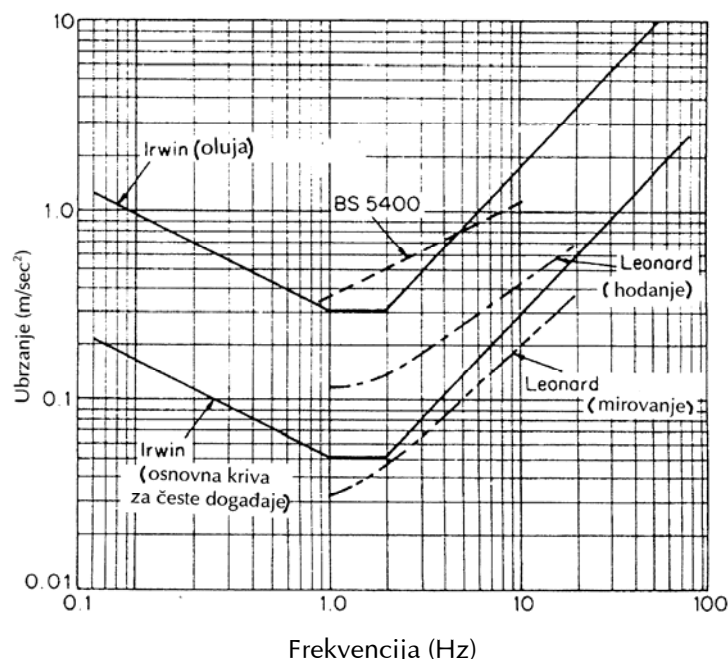
Slika 5. Zavisnost frekvencije i raspona testiranih mostova [9]

Inače, šrafurom je, kao posebno osjetljiva, označena oblast frekvencije ljudskog hoda, dok crna linija predstavlja statistički dobijenu vezu frekvencije osnovnog tona f_1 i raspona mosta L , datu kroz izraz: $f_1 = 33.6 \times L^{-0.73}$. I sa slike je jasno da se granica od 5,4 Hz teško može prevazići (samo dva mosta od 67 posmatranih), a gotovo nemoguće je ići i ispod granice od 0,8 Hz (nijedan most od 67), bez obzira na materijal od koga je izrađen objekat i bez obzira koji je konstruktivni sistem primijenjen.

Po stranim propisima i iskustvima problem vibracija pješačkih mostova izbjegava se tako što se most projektuje da mu frekvencija nikako ne smije biti u rasponu 1,6 do 2,4 Hz, a treba izbjegavati i cijeli raspon od 3,5 do 4,5 Hz [10].

Međutim, problem kvaliteta upotrebljivosti pješačkih mostova danas se posmatra i uvođenjem u razmatranje i dodatnog faktora - ostvarenih ubrzanja i brzina mosta. Do istraživanja u tom pravcu se došlo analizom pješačkih mostova kod kojih je uočena pojava neprijatnih vibracija. Ispitivanja su pokazala da neki mostovi izazivaju više nelagodnosti od drugih, iako imaju iste ili veoma slične vrijednosti sopstvenih frekvencija. Na taj način se došlo do zaključka da se kombinacijom frekvencije oscilovanja i ostvarenih ubrzanja mosta - prvenstveno u vezi sa dinamičkim prigušenjem u mostu i krutošću mosta, mogu za određeni pješački most "izabrati" ubrzanja koja se, u kombinaciji sa datom frekvencijom, manje "osjećaju", pa će i kriterijum upotrebljivosti biti posrednim putem zadovoljen.

U tom smislu indikativan je i pokušaj definisanja nivoa prihvatljive kombinacije sopstve frekvence oscilovanja i ubrzanja pješačkih mostova (iz više raznih izvora), koji je prikazan na slici 6.



Slika 6. Granice oblasti prihvatljivih vibracija kod pješačkih mostova [3]

Sve vrijednosti kombinacije ovih faktora koje se nalaze iznad graničnih linija smatraju se neprihvatljivim.

Za sada je samo mali broj zemalja svijeta u svoje propise unio odredbe koje definišu dopuštene vrijednosti ubrzanja konstrukcije u funkciji sopstvenih frekvencija, koje bi služile kao kriterijum za ispunjavanje zahtjeva upotrebljivosti po pitanju vibracija. U takvim (rijetkim) propisima, kao kriterijum se uzimaju gornja granice dopuštenih ubrzanja (pri određenim frekvencijama osnovnog tona f_1) koje ne utiču na čovječiji organizam, tj. ne izazivaju neprijatan osjećaj kod pješaka prilikom prelaska mosta.

Tako su te najveće vrijednosti ubrzanja $max a$, koje kod korisnika pješačkog mosta ne izazivaju nelagodnost, date u britanskim [11], prva vrijednost, i kanadskim propisima [12], za mostove (druga vrijednost) i one iznose:

$$max a = 0,5 \times f_1^{0,5} [m/s^2] \quad \text{tj.} \quad max a = 0,25 \times f_1^{0,78} [m/s^2]$$

Na, za pješačke mostove najosjetljivijoj frekvenciji (frekvenciji ljudskog hoda od 2 Hz), ove formule propisuju ograničenja ubrzanja od 0,7 tj. 0,43 $[m/s^2]$. I [13] preporučuje da pri ovoj frekvenciji granica ubrzanja bude 0.59 $[m/s^2]$, a u području vibracija od 4 do 8Hz da najveće ubrzanje most bude do 0.42 $[m/s^2]$. Iz predhodnog se vidi da tu granicu treba držati oko nivoa 0.50 $[m/s^2]$.

Pored toga, kanadski propisi za mostove [11], za potrebe preciznijeg proračuna, za pješačke mostove do 3 raspona ubrzanje (u m/sec^2) ograničavaju i na:

$$a = 4\pi^2 \cdot f_1^2 \cdot y \cdot K \cdot \psi$$

gdje je:

- f_1 - osnovni period oscilovanja mosta (Hz);
- y - ugib (u m) mosta za vrijednost sile u sredini polja od 700 N (sila koju izaziva 1 čovjek);
- K - koeficijent koji zavisi od broja raspona (1 za 1 raspon, 0.7 za dvorasponsku konstrukciju, i 0.6 - 0.9 za tro rasponski most)

ψ - koeficijent dinamičkog uticaj (koji nije isto što i koeficijent dinamičkog uvećanja, od koga inače zavisi) koji iznosi od 4.5 do 18.

Inače najefikasniji način provjere ostvarenih ubrzanja mosta je direktno, putem experimenta.

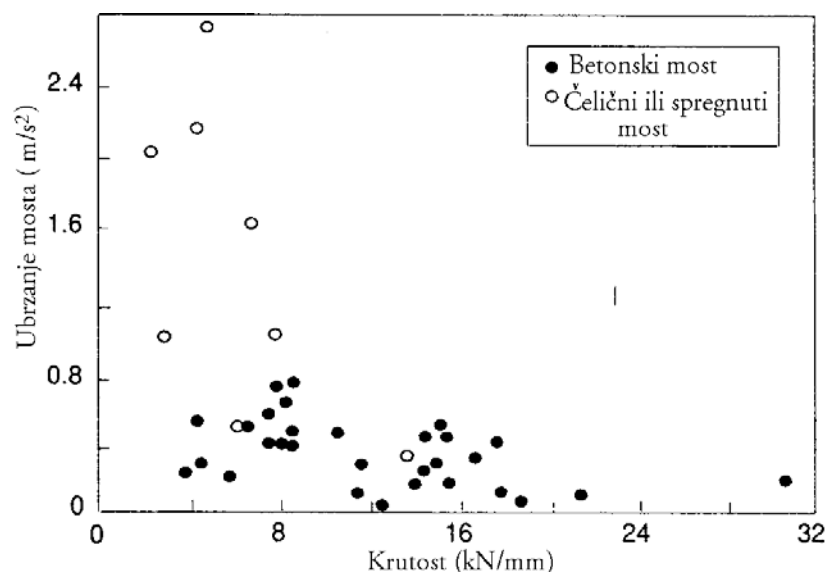
3. RJEŠAVANJE PROBLEMA VIBRACIJA KOD IZGRAĐENIH I NOVIH PJEŠAČKIH MOSTOVA

Kao što se može prepoznati iz predhodnog teksta, problemi sa vibracijama mosta mogu se javiti još u fazi projektovanja mosta, kada se pokušava izbjeći područje neugodnih sopstvenih vibracija, ali još je češća situacija, koja se posebno analizira u ovom članku - sretanja sa problemom vibracija kod izgrađenih pješačkih mostova, tj. situacija kada se projektant nađe pred sanacijom ili rekonstrukcijom pješačkog mosta koji je projektovan i izveden u vrijeme kada znanje iz ove oblasti nije bilo na današnjem nivou i kada ograničenja frekvencija nisu ni postojala, kako u našim tako ni u stranim propisima. U takvim situacijama od projektanta se obično traži da riješi "ljuljanje" mosta. Inače, kao napomena, većina starijih pješačkih mostova ima osnovnu frekvenciju unutar najnepogodnije oblasti frekvencija, oko 2 Hz.

Danas su poznata najmanje tri načina eliminisanja ili ublažavanja problema vibracija pješačkih mostova. To su **dodatno ojačanje** (ukrućenje) mosta, **povećavanje prigušenja** u mostu i postavljanje (ugrađivanje u most) **absorbera vibracija**.

Ojačavanje konstrukcije izgrađenog pješačkog mosta treba preduzimati ako krutost mosta nije veća od 8 kN/mm [9]. Pod pojmom krutosti pješačkog mosta ovdje se podrazumijeva količnik sile nanese u posmatranoj tački mosta i ostvarenog ugiba za tu istu tačku. Putem ovog ojačanja kroz povećavanje krutosti praktično se dolazi u situaciju da se umjesto direktne kontrole frekvencije kontroliše ostvareno ubrzanje mosta, o čemu je predhodno bilo više riječi.

Do granice krutosti od 8 kN/mm se došlo koristeći vrijednosti očitane sa dijagrama veze krutosti i izmjerenih ubrzanja mosta, slika 7., pri čemu je kao gornja granica ubrzanja usvojena vrijednost od 0,7 [m/s²].



Slika 7. Veza krutosti i ubrzanja za ispitivane mostove [9]

Sa ove slike, koja predstavlja sintezu rezultata sa eksperimentalnih ispitivanja brojnih pješačkih mostova, očito je da svako daljnje povećanje krutosti dovodi do smanjenja ubrzanja mosta, tj. do manjih nelagodnosti za korisnike - pri istoj frekvenciji mosta. Osnovni nedostatak ovog pristupa je da će praktična rješenja obično biti veoma skupa za sprovođenje.

Povećanje prigušenja i absorpcije energije, ponovo u cilju smanjenja ostvarenih ubrzanja mosta, je obično najekonomičnije rješenje kojim se kod korisnika mosta izbjegava stvaranje utiska nelagodnosti zbog "ljuljanja" mosta. Ono se postiže se cijelim nizom mjera, počev od presvlačenja pješačke staze mosta slojem "mekog" asvalta, do uticanja na oslonce i ležišta kako bi se tim mjestima postiglo veće prigušenje. Ovo rješenje obično je veoma praktično, ali kako obično samo po sebi nije dovoljno, najčešće se upotrebljava u kombinaciji sa nekim drugim rješenjem.

Danas najveća istraživanja iz ove oblasti idu u pravcu postavljenje **absorbera vibracija**. Ovaj metod se zasniva na dodavanju konstrukciji pješačkog mosta novog oscilatornog sistema (obično sistema sa jednim stepenom slobode) čiji period osnovne vibracije (prvi ton) treba da bude sračunat u odnosu na frekvenciju samog pješačkog mosta - u cilju njihovog međusobnog poništavanja. Znači princip njegovog rada je korišćenje kombinovanja oscilacija dva oscilatorna sistema kako bi se "umirila" tj. smanjila ubrzanja i amplituda samog mosta. Računicom se može doći do veličine potrebne mase takvog amortizacionog sistema m_a . Ona se obično kreće od 0,05% do 1 % mase samog pješačkog mosta m_m . Pri tome optimalna frekvencija absorbera vibracija f_a zavisi i od frekvencije mosta f_m i dobija se kao:

$$f_a = \frac{f_m}{1 + \frac{m_a}{m_m}}$$

Za ovako sračunatu potrebnu frekvenciju absorbera f_a i usvojenu masu absorbera m_a iz izraza:

$$f_a = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{k_a}{m_a}}$$

može se odrediti potrebna krutost k_a opruge absorbera.

Obično se sem opruge kao dio absorbera vibracija preporučuje i postavljanje posebno prigušivača. Optimalno prigušenje ξ_{opt} takvog elementa treba da bude:

$$\xi_{opt} = \sqrt{\frac{3(m_a / m_m)}{8 \cdot (1 + m_a / m_m)^3}}$$

Učinak absorbera vibracija manje zavisi od razlike između stvarnog prigušenja u konstrukciji i optimalnog prigušenja absorbera, nego od razlike njihovih frekvencija oscilovanja. To znači da je za proces "umirivanja" vibracija pješačkog mosta od ključne važnosti da se frekvencija absorbera kvalitetno podesi (i tokom vremena kontroliše, i eventualno koriguje) kako bi bila što bliža neophodnoj.

Na ovaj način amplitude odgovora mosta se značajno umanjuju, pri čemu se mora obratiti pažnja na činjenicu da absorber vibracija poboljšava ponašanje mosta jedino na svojoj optimalnoj frekvenciji, dok na ostale frekvencije mosta utiče u zanemarljivom iznosu. Ovaj pristup ima prednost jeftinog rješenja, ali mu je uobičajeni problem ne samo projektovanje absorbera sa (obično) velikim hodom pridodate mase, već i obezbjeđenje

potrebnog prostora koji treba ostaviti za vibracije tog dodatog oscilatornog sistema, o čemu treba voditi računa još prilikom njegovog projektovanja.

Prilikom izrade i korišćenja predhodno opisanih absorbera u razmotranje treba uzeti i sledeće:

- Primjena absorbera je moguća kad god je teško izbjeći probleme vibracija, posebno kada je komplikovano i/ili skupo postići povećanje krutosti konstrukcije.
- Primjena absorbera se pokazuje naročiti efikasnom u slučaju jednodimenzionalnih konstrukcija poput pješačkih mostova, ali se može primijeniti i za ostale slične sisteme, poput dimnjaka, pilona mostova sa kablovima itd.. Za slučaj ravanskih konstrukcija poput velikih ploča u sportskim i drugim dvoranama, morao bi se postaviti cijeli niz absorbera, što postaje prilično komplikovano.
- Predhodno opisani absorberi su veoma efikasni samo u uskom opsegu frekvencija i kada su podešeni veoma precizno prema frekvenciji same konstrukcije. Oni ne daju dobre rezultate kod konstrukcija koje imaju nekoliko tonova oscilovanja sa približno istim ili bliskim frekvencijama, a koje se sve nalaze u domenu koji može biti pobuđen od istog dinamičkog opterećenja - u situaciji pješačkog mosta - od ljudskog hoda.
- Absorber je efikasniji što je:
 - veća masa absorbera u poređenju sa masom same konstrukcije, jer se tako redukuje potrebna amplituda njegovih oscilacija, i
 - manje prigušenje u samoj konstrukciji.

U tom smislu absorberi posebno dobre rezultate pokazuju kada se koriste na lakim mostovskim konstrukcijama i kod konstrukcija sa malim sopstvenim prigušenjem, dok se za velike mostovske konstrukcije, sa velikom masom i jakim vibracijama, bez obzira što su obično i prigušenja takve konstrukcije značajna, dobijaju slabiji rezultati.

- U preliminarim proračunima potrebnog absorbera odnos mase absorbera i mase konstrukcije mosta može se uzeti između $1/15$ i $1/50$, zavisno i od ukupne mase mosta i željenog nivoa "umirenja" vibracija. Treba znati da nakon dostizanja određene mase absorbera svako daljnje povećanje donosi samo minimalno smanjenje amplituda oscilovanja samog mosta.
- Tokom proračuna dinamička pomjeranja absorbera treba obavezno precizno sračunati.
- Zamor opruge absorbera treba takođe pažljivo razmotriti.
- Prilikom projektovanja i izvođenja absorbera vibracija posebno treba obratiti pažnju na:
 - eventualnu neophodnost promjene opruge i mase absorbera poslije određenog vremenskog perioda, i
 - sroćavanje situacije da se absorber otkači i padne, uslijed popustanja njegove opruge.

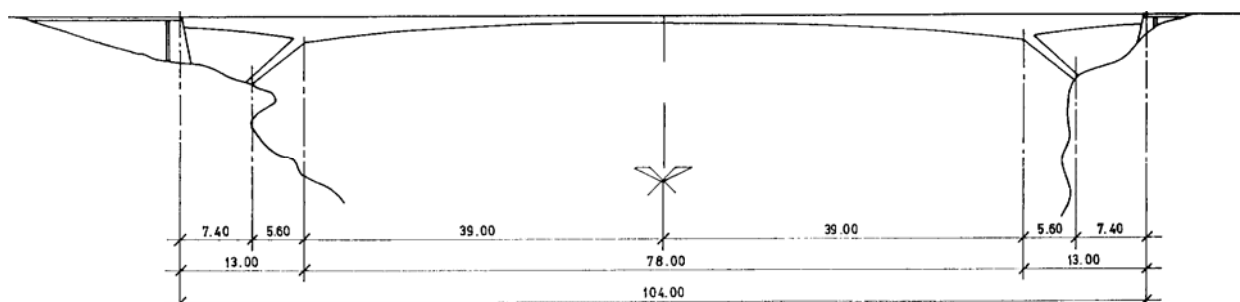
- Treba znati da su u mnogim situacijama pogodniji absorberi koji rade na pritisak nego oni koji rade na zatezanje.
- Konačno, proračun dinamičkih karakteristika same konstrukcije mosta kao i absorbera vibracija nije dovoljan za konačno određivanje karakteristika absorbera. U tom smislu, bolje je vibracione karakteristike mosta odrediti mjerenjima in-situ, a načinom izrade i projektovanjem absorbera obezbijediti njegovo fino podešavanje - nakon postavljanja u projektovani položaj. U principu, to je jednostavnije uraditi izmjenom njegove mase nego karakteristika opruge.

4. EKSPERIMENTALNO ISPITIVANJE

Kao primjer na kome se mogu provjeriti predhodna rješenja koristiće se informacije dobijene tokom ispitivanje jednog mosta u Podgorici, sprovedene nakon neophodne sanacije objekta. Osnovni razlog za sprovođenje sanacije (ojačanja) mosta je bio da se smanje naponi u kosim nogama mosta, koji su bili na granici dozvoljenih vrijednosti za jednu od mogućih kombinacija opterećenja i da se u određenoj mjeri ublaži problem vibracija koje, prilikom prelaska pješaka preko mosta, izazivaju osjećaj nelagodnosti.

Sanaciono rješenje je obuhvatilo ojačanje kosih nogu mosta čeličnim lamelama, sa betoniranjem betonske ploče u donjoj lameli glavnog nosača u dužini od 5.20 m lijevo i desno od mjesta uključenja kosih nogu u glavni nosač.

Most koji je ispitivan služi za pješački saobraćaj, a preko njega su prevedene kolektorske cijevi za otpadne vode, sa jedne na drugu obalu rijeke Morače, slika 8.



Slika 8. Dispozicija ispitivanog mosta

Čelični glavni nosač mosta je sistema kosog podupirala. Otvori mosta su 13.0+78.0+13.0 m. Kose "noge" konstrukcije vezane su za betonske fundamente sa pretpostavkom punog uklještenja na mjestu oslanjanja. Krajnja ležišta horizontalne noseće grede izvedena su kao pokretna, ali tako da omogućavaju prijem izraženih negativnih reakcija.

Poprečni presjek konstrukcije je sandučast, trapezastog oblika sa konstantnom širinom gornje ploče, koja iznosi 3,0 m. Pošto su bočne strane sanduka pod istim uglom, a intrados mosta je kvadratna parabola, donja ploča je promjenljive širine. Visina sandučastog poprečnog presjeka u sredini mosta i na njegovim krajevima iznosi 140cm, a na mjestu spajanja sa kosim "nogama" 280 cm. Gornja ploča sandučastog presjeka ima debljinu 12 mm i ojačana je podužnim rebrima. Na taj način kolovozna tabla formirana je kao ortogonalno anizotropna ploča.

Kosi bočni limovi također su ukrućeni podužnim ukrućenjima, koja su raspoređena na trećinama visine presjeka. Širina donje ploče glavnog nosača na mjestu krute veze sa kosim "nogama" iznosi 160 cm. Da bi se obezbijedila bočna stabilnost objekta, kose "noge" su na mjestima oslanjanja na armiranobetonske fundamente razmaknute, tako da njihovo međusobno rastojanje iznosi 3.00 m.

Osnovni cilj i svrha samog ispitivanja sastojao se u sljedećem:

- Utvrđivanje ponašanja objekta u realnim uslovima;
- Utvrđivanje napona i deformacija, kao i veličina koje karakterišu dinamičko ponašanje sistema;
- Utvrđivanje i verifikacija računskog modela konstrukcije;
- Donošenje pouzdanih i eksplicitnih zaključaka o eksploatacionoj upotrebljivosti mosta i
- Predlog za način održavanja mosta i način eventualnih intervencija.

U okviru statičkog ispitivanja konstrukcije mosta izvršeno je registrovanje opštih i lokalnih deformacija. Statičko probno opterećenje izvršeno je pomoću 4 (četiri) teretna vozila marke FAP, pojedinačne mase od oko 9.0 t.

Teretna vozila tokom statičkog ispitivanja bila su raspoređivana po fazama tako, da se u karakterističnim presjecima konstrukcije i mjernim mjestima izazovu približno ekstremni uticaji.



Slike 9 i 10. Položaj probnog opterećenja u toku ispitivanja konstrukcije

Maksimalna vrijednost pozitivnog momenta savijanja izazvana je u sredini raspona konstrukcije i ona iznosi: $M_{isp} = 1732,10 \text{ kNm}$. Kako odgovarajuća vrijednost usljed računskog projektovanog opterećenja, od $p = 5.0 \text{ kN/m}^2$, iznosi $M_{rac} = 2.880 \text{ kNm}$, to koeficijent efikasnosti "U" iznosi 61,2%. Saglasno važećem [4], taj koeficijent za ovu vrstu ispitivanja treba da bude $0.5 < U < 1.0$. Rezultati statičkih ispitivanja mosta na ovom mjestu neće biti detaljnije razmatrani.

Dinamičkim ispitivanjem na ovom pješačkom mostu obuhvaćeno je registrovanje sledećih parametara:

- Amplituda pomjeranja u vertikalnom, horizontalnom-poprečnom i horizontalnom - podužnom pravcu;
- Sopstvenih učestanosti konstrukcije za oscilovanje u tri naprijed pomenuta ortogonalna pravca;
- Koeficijenta prigušenja; i
- Stvarnih vrijednosti dinamičkog koeficijenta.

Amplitude pomjeranja, vrijednosti sopstvenih učestanosti i koeficijenti prigušenja registrovani u sredini i oko četvrtine raspona mosta. Ove veličine registrovane su simultano u tri ortogonalna pravca, tako da se u svakom trenutku može odrediti ostvareni vektor pomjeranja. Stvarna vrijednost dinamičkog koeficijenta registrovana je u presjeku u sredini raspona konstrukcije.

Dinamičko ispitivanje izvršeno je za sledeće uticaje:

- Kretanja jednog teretnog vozila po mostu;
- Vještački izazvanog efekta udara pri kretanju jednog teretnog vozila po mostu;
- Kočenja jednog teretnog vozila (horizontalna podužna pobuda);
- Vertikalne pobude (kretanje jednog i više pješaka);
- Horizontalne poprečne pobude;
- Ambijentalnih vibracija (blagi uticaj vjetera) i
- Normalne eksploatacije, u uslovima intenzivnog pješačkog saobraćaja.

Efekat udara je izazvan tako što se kamionom prešlo preko izbočenja (prepreke) na putu. Prepreka je bila drvena daska, visoka oko 5 cm.

Horizontalna poprečna pobuda izazvana je otpuštanjem zategnute čelične sajle pričvršćene za most, pomoću koje je most bio izveden iz ravnotežnog položaja u obadva pravca, i horizontalnom i vertikalnom.

Za zapisivanje dinamičkih efekata vibriranja konstrukcije mosta korišćeni su portabl mjerači vibracija *Vibration measuring unit - SMU 31*, proizvod firme HBM, Germany [14],. Ovi uređaji mjere amplitude vibracija, brzine i ubrzanja. Uređaj se sastoji od sonde i indikatorske jedinice. Sonda u sebi ima ugrađen oscilatorni sistem masa - opruga koji daje signal proporcionalan brzini vibriranja testirane konstrukcije. U cilju dobijanja amplitude pomjeranja dobijeni signal se automatski (u samoj indikatorskoj jedinici) integriše, a za dobijanje ubrzanja konstrukcije signal se na isti način diferencira. Indikatorska jedinica takođe omogućava povezivanje uređaja sa AD konverterom odakle se digitalizovani signal šalje u personalni kompjuter na daljnju obradu. Proces dobijanja (određivanja) frekvencija oscilovanja je dalje automatizovan upotrebom "in house"

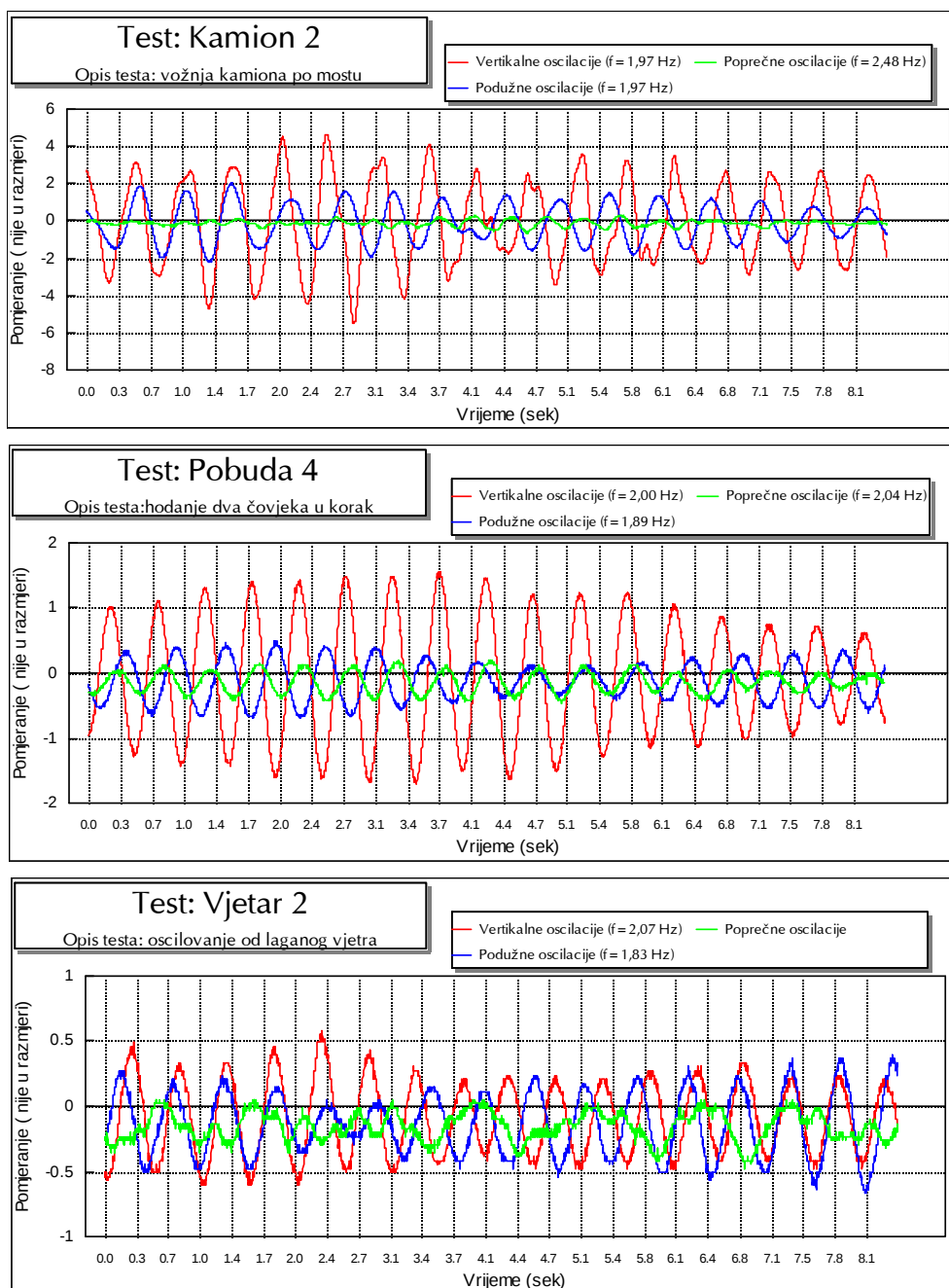
softvera, koji primjenjuje Furijerovu analizu signala za određivanje dominantnih frekvencija.

U toku testiranja ova vibrosonda je pomoću izolir - trake bila fizički spojena sa konstrukcijom.

Cio postupak ispitivanja je, vjerovatno i zbog "konstruktivne jasnoće" konstrukcije, dao izuzetno kvalitetne rezultate.

5. REZULTATI I ANALIZA ISPITIVANJA I KVALITET SANACIONOG RJEŠENJA

Dijagrami dinamičkih odgovora konstrukcije za karakteristične faze ispitivanja prikazani su na narednim dijagramima, slika 11.

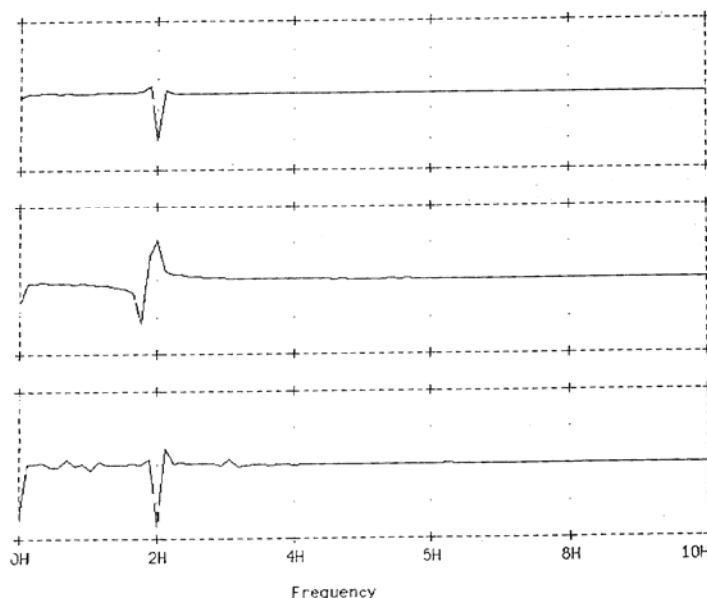


Slika 11. Dijagrami vrijeme - pomjeranja korišćeni za određivanje frekvencija oscilovanja i ostalih dinamičkih karakteristika konstrukcije

Za sve prikazane rezultate mjerni uređaji su bili raspoređeni na sredini mosta, i to tako da registruju vertikalne, horizontalne poprečne i horizontalne podužne vibracije.

Ispitivanjem se potvrdilo da je najrelevantniji kriterijumom sa stanovišta dinamičke provjere ovog mosta, onaj koji traži da vibracije mosta ne stvaraju kod korisnika osjećaj neugodnosti, izraženo kroz pojavu podrhtavanja mosta, rezonance i određenog odnosa amplitude, ubrzanja i frekvencije.

U tom cilju za svaki od 7 ispitivanih slučajeva dinamičkog opterećivanja posmatranog pješačkog mosta izvršena je Furijeova analiza zapisanog signala, uz pomoć koje su određene frekvencije oscilovanja konstrukcije, slika 12.



Slika 12 - Tipični rezultat Furijeove analiza signala sa tri mjerna mjesta, sa kojih se vidi vrijednost dominantne frekvencije oscilovanja ispitivanog mosta

Tako vrijednost sopstvene frekvencije (učestanosti) oscilovanja konstrukcije u vertikalnoj ravni iznosi:

$$f_{0\text{mer}} = 2.0 \text{ Hz}$$

dok odgovarajuća računaska vrijednost, dobijena primjenom programskog paketa SAP2000 iznosi:

$$f_{0\text{rac}} = 1.92 \text{ Hz}$$

Ovdje se posebno naglašava da se ove vrijednosti odnose na oscilovanje konstrukcije u prvom osnovnom, u ovom slučaju simetričnom tonu.

Na osnovu analize frekventne jednačine [15] dovoljno tačno utvrđen je odnos:

$$\sqrt{\frac{\max \delta_{rac}}{\max \delta_{mjer}}} = \frac{f_{0\text{mer}}}{f_{0\text{rac}}},$$

pa koristeći tu korekciju analitičkih rezultata frekvencija pomoću odnosa analitički određenih i eksperimentalno izmjerenih statičkih ugiba, kako je:

$$\sqrt{\frac{\max \delta_{rac}}{\max \delta_{mjer}}} = \sqrt{\frac{47.5}{42.7}} = 1.0547,$$

sljedi da $f_{0\text{mer}}$ treba da iznosi 2,02 Hz, što potvrđuje izuzetnu tačnost mjerenja.

Maksimalna vrijednost dinamičkog koeficijenta $K_{d,max}$ registrovana pri efektu vještački izazvanog udara prelaskom jednog vozila preko prepreke ($h=5$ cm) i ona iznosi:

$$K_{d,max} = 1.23$$

Vrijednosti koeficijenta prigušenja nijesu mogle pouzdano da se odrede pošto se konstrukcija veoma sporo prigušuje, što ukazuje na okolnost da je logaritamski dekrement jako nizak.

Preduzetim sanacionim mjerama postignut je, u nekim presjecima, efekat smanjenja napona, ali samo od pokretnog opterećenja. Naponi od sopstvene težine, stalnog tereta, montaže, pa i od dodatnog tereta (betona i čeličnih sanacionih limova) ostaju kao rezidualni u konstrukciji, i oni odgovaraju stanju prije sanacije. Ukupni naponi od svih uticaja su u pojedinim presjecima neznatno smanjeni, tako da su efekti sanacije u ovom smislu zanemarljivi.

Preduzete sanacione mjere i dogradnja objekta nijesu doprinijele da vrijednosti sopstvenih učestanosti vibracija konstrukcije izađu van nedozvoljenog opsega koji je propisan trenutno važećim propisima za pješačke mostove. Vrijednosti sopstvenih učestanosti vibracija konstrukcije za oscilovanje u prvom osnovnom tonu (u vertikalnoj ravni) i prije i poslije sanacionih mjera iznosile su, a i sada iznose $_{stv}f_0 = 2.0$ Hz. Kao što se vidi, i nakon preduzetih ojačanja, frekvencije oscilovanja su i dalje u najnepogodnijem području, pa drugi razlog zbog koga je sprovedena sanacija nije zadovoljen, tj. pješaci i dalje osjećaju znatno "ljuljanje" mosta prilikom njegove upotrebe. Pri tome, krutost mosta nakon sanacije je ostala znatno ispod 8 KN/mm.

Prezentirani i ostali rezultati su pokazali da most može da se koristi u normalnoj eksploataciji, uz napomenu da će se pješaci prilikom prelaska preko mosta, zbog velikih amplituda oscilovanja od 1.7 mm, niskih vrijednosti sopstvenih učestanosti od 2.0 Hz i malog koeficijenta prigušenja, osjećati veoma neprijatno. Najveće vrijednosti amplituda oscilovanja i vibriranja mosta javljaju se pri prelasku malog broja pješaka (1, 2, 3), zbog toga što tada ne postoje dodatni efekti prigušenja, koji se pojavljuju kada preko objekta prelazi veći broj ljudi.

Interesantno je prokomentarisati eventualni daljnji pokušaj "umirivanja" mosta postavljanjem *absorbera vibracija*. Da bi se to postiglo, potrebno je postaviti dodatnu masu od, recimo, $m_a = 200$ kg, koja bi za konstrukciju mosta bila pričvršćena oprugom potrebne krutosti $k_a = 31,2$ KN/mm.

ZAKLJUČCI

Tehnička regulativa iz oblasti praćenja i kontrolisanja vibracija pješačkih mostova ne prati razvoj nauke u toj oblasti. Propisima, tamo gdje to nije urađeno, pored kontrolisanja frekvencije oscilovanja konstrukcije, treba obavezno obuhvatiti i kontrolu ostvarenih ubrzanja i brzina, čime bi se značajno olakšao posao projektantima - jer više ne bi bili u poziciji da utiču samo na frekvenciju, što je ponekad gotovo nemoguće, već i na ova dva druga parametra.

Danas su dostupna najmanje tri načina eliminisanja ili ublažavanja problema vibracija pješačkih mostova. To su dodatno ojačanje (ukrućenje) mosta, povećavanje prigušenja u mostu i postavljanje (ugrađivanje u most) *absorbera vibracija*. Ojačavanje konstrukcije treba preduzimati ako krutost mosta nije veća od 8 KN/mm. Povećanje prigušenja i absorpcije energije je obično najekonomičnije. Postiže se cijelim nizom mjera počev od

presvlačenja pješačke staze mekim slojem asvalta, do uticanja na oslonce i ležišta kako bi se postiglo veće prigušenje. Postavljenje *absorbera vibracija* se zasniva na dodavanju konstrukciji mosta novog oscilatornog sistema (obično sistem sa jednim stepenom slobode) čiji period osnovne vibracije (prvi ton) treba da bude takav da utiče na smanjenje vibracija same konstrukcije.

Na primjeru ispitivanog mosta u Podgorici, vidi se da preduzete sanacione mjere, koje nisu ispunile niti jedan od preporučenih načina ublažavanja problema vibracija, nijesu doprinijele da vrijednosti sopstvenih učestanosti vibracija konstrukcije izadu van nedozvoljenog opsega koji je propisan trenutno važećim propisima za pješačke mostove. Ublažavanje tj. eliminisanje problema vibracija mosta, sa obzirom na laku čeličnu konstrukciju od koje je most izgrađen, najekonmičnije i najefikasnije se može postići postavljanjem pravilno konstruisanog absorbera vibracija.

Računski model konstrukcije koji je korišćen prilikom izrade projekta sanacije ispitivanog mosta je u potpunosti verifikovan. On potpuno vjerno opisuje stvarno ponašanje konstrukcije pri dejstvu dinamičkog opterećenja. Konstrukcija mosta može da primi i prenese računsko propisano opterećenje. Njena lokalna i globalna stabilnost pod dejstvom računskog opterećenja nije ugrožena.

LITERATURA

- [1] Tilly, G. P. Cullington, D.W. i Eyre, R., *Dynamic behaviour of footbridges*, International Association for Bridge and Structural Engineering, IABSE, Periodica S-26/1984, str. 13-24.
- [2] Brown, C. W., *An engineer's approach to dynamic aspects of bridge design*, Symposium on dynamic Behaviour of Bridges, TRRL Supplementary report 275, Transport and Road Research Laboratory, Crowthorne, UK, 1977.
- [3] Smith, J.W., *Vibration of structures - Applications in civil engineering design*, Chapman and Hall, London, 1988.
- [4] Ispitivanje mostova probnim opterećenjima, JUS U.M1.046/84, Službeni list SFRJ 60/1984.
- [5] Pravilnik br. 315 o održavanju donjeg stroja pruga jugoslovenskih železnica, Jugoslovenske železnice, br. 1981/69, 1970.
- [6] nacrt Pravilnika o tehničkim normativima za projektovanje i proračun inženjerskih objekata u seizmičkim područjima, 1986.
- [7] Pravilnik o tehničkim normativima za određivanje veličine opterećenja mostova, Službeni list SFRJ broj 1/91, Beograd 1991.
- [8] Projekat pješačkog mosta Gazela, MIN Niš, 1969.
- [9] Vibration problems in structures - Practical Guidelines, grupa autora, izdavač: Birkhauser Verlag, Basel, 1995.
- [10] SIA 160 "Actions on structures", (Opterećenja na konstrukcijama) Schweizer Ingenieur - und Architekten - Verein, Zurich, 1989.
- [11] "Steel, Concrete and Composite Bridges: Specification for Loads", British Standard BS 5400, Part 2, Appendix C, London, 1978.

- [12] ONT 83, Ontario Highway Bridge Design Code, Ontario Ministry of Transportation, Toronto, Kanada, 1983.
- [13] "Bases for design of structures - Serviceability of Buildings against Vibration", draft ISO/DIS 10137, International standards organisation, Geneva 1991.
- [14] Vibration Measuring Unit (to DIN 45666 and DIN 45669 - FANAK) - Operating manual, HBM, Germany.
- [15] Vlajić, Lj., *Prilog analizi dijagrama dinamičkih uticaja sopstvene učestanosti konstrukcije sa gledišta odnosa teorija - eksperiment*, Zbornik radova Građevinskog fakulteta u Subotici, 1974-1984, str. 89 -97.

SUMMARY

This paper is about vibration problems of pedestrian bridges. It comments on existing technical regulation in the field of bridge engineering, particularly on provisions dealing with vibration aspects. Paper also describes three, according to current knowledge, the most effective ways for solving of the vibration problems in pedestrian bridges - problems in bridges whose vibration characteristics do not satisfy serviceability conditions defined in domestic, as well as foreign regulation. Those proposed solutions are additional strengthening of the bridge through additional stiffening, increase of vibration dumping and inclusion of vibration absorbers. In that respect paper describes dynamic testing of a three span (13m + 78m + 13m) pedestrian bridge located in the city center of Podgorica, Montenegro. The structural examination and testing was conducted after the repair and strengthening of the structure. The bridge crosses 60m deep (low water) Moraca river canyon. Dynamic testing involved establishment of dynamic movement amplitudes and frequencies, damping coefficient and real values of dynamic increase factor. Measurements were taken for three perpendicular directions. The bridge structure was dynamically excited in several different ways and response was recorded in each case.