

Dr Mira PETRONIJEVIĆ, v. prof.¹
Mr Marija NEFOVSKA-DANILOVIĆ, asistent²

VIBRACIJE USLED SAOBRAĆAJA: MERENJE, PROCENA I PREDVIĐANJE

0352-2733, 44 (2011),p. 1-41

UDK: 656.1:534.13

UDK: PREGLEDNI NAUČNI ČLANAK

Rezime

U ovom radu dat je pregled postupaka za merenje, procenu i predviđanje vibracija izazvanih dejstvom saobraćaja, definisanih postojećim britanskim i nemačkim propisima. Procena i predviđanje dejstva vibracija od saobraćaja na objekte i ljude prikazan je na primeru vibracija od saobraćaja na 24 objekta u Bulevaru kralja Aleksandra u Beogradu.

Ključne reči: vibracije od saobraćaja, merenje, procena, predviđanje

¹ Građevinski fakultet, Beograd

² Građevinski fakultet, Beograd

TRAFFIC INDUCED VIBRATIONS: MEASUREMENT, ASSESSMENT AND PREDICTION

Summary

Procedures for measurement, assessment and prediction of traffic induced vibrations in buildings, according to the existing British and German standards, are presented in this paper. Analysis of effects of traffic induced vibrations on buildings and building residents, as well as vibration prediction is carried out on 24 buildings in Boulevard of King Alexander in Belgrade.

Key words: traffic induced vibration, measurement, assessment, prediction

1. UVOD

Vibracije izazvane dejstvom saobraćaja smatraju se danas jednim od najvećih zagađivača životne sredine i predstavljaju sve veći problem u velikim naseljenim gradovima, gde danonoćno deluju na zgrade, ljude u zgradama i ometaju rad opreme osetljive na vibracije. I dok su u prošlosti gradovi bili ređe naseljeni, sa znatno manjim intenzitetom saobraćaja, moderni gradovi danas

su prenaseljeni, sa gustom saobraćajnom infrastrukturom, sastavljenom od puteva na više nivoa, kao i podzemne i nadzemne železnice. Primena novih građevinskih materijala, dovela je do izgradnje visokih, fleksibilnih zgrada, koje su postale osetljivije na dejstvo vibracija izazvanih saobraćajem. Rezultat svega toga je sve intenzivnija izloženost zgrada i ljudi dejstvu vibracija, koja zahteva ozbiljnu analizu i preduzimanje mera za njeno sprečavanje.

Izvor vibracija, mehanizam prenošenja vibracija kroz tlo, dejstvo na ljude i njihovo zdravlje, dejstvo na objekte, kao i mere za njihovu redukciju su predmet istraživanja u mnogim zemljama (Nemačka, Francuska, Belgija, Švajcarska, Švedska, Japan, SAD i dr.), [1],[5], [6],[11],[12],[13]. Ta istraživanja su naročito postala aktuelna pojavom tzv. “brzih pruga”. Brzi vozovi već saobraćaju u mnogim evropskim zemljama, gde dostižu brzinu od oko 400 km/h. Pri ovako velikim brzinama, u zavisnosti od dinamičkih karakteristika tla, može doći do značajnog dinamičkog sadejstva između voza i tla, usled kog se u tlu generišu talasi koji mogu izazvati neprihvatljive vibracije u obližnjim objektima. Rezultat ovako opsežnih teorijskih i eksperimentalnih istraživanja je i čitav niz propisa i preporuka kojima se definišu dozvoljeni nivoi vibracija u zgradama, kao i prihvatljiv nivo izloženosti vibracija ljudi u zgradama.

Sa urbanim razvitkom i konstantnim širenjem Beograda, uticaj vibracija na životno i radno okruženje ljudi je postalo evidentno. Stanje pojedinih gradskih saobraćajnica i tramvajskih šina je takvo da pojačava stepen vibracija izazvanih saobraćajem. U Srbiji, sistematsko istraživanje problema dejstva vibracija od saobraćaja na objekte i ljude do sada nije sprovedeno, ali su urađena pojedinačna istraživanja, koja su, na prvom mestu, bila posvećena rešavanju nekog određenog problema.

U ovom radu će biti dat pregled postupaka definisanih važećim standardima za merenje, ocenu i procenu vibracija od putnog saobraćaja.

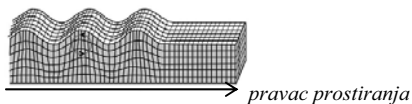
2. VIBRACIJE OD SAOBRAĆAJA

2.1 Uzrok vibracija

Vibracije od saobraćaja su niskofrekventni poremećaji koji izazivaju dinamičko kretanje objekata i ljudi u njima. One su najčešće posledica kretanja teških vozila, kao što su autobusi, kamioni i tramvaji, dok su putnički automobili retko uzrok značajnijih vibracija objekata. Vibracije nastaju usled delovanja dinamičkih i oscilatornih sila točka. Dinamičke sile su sile udara koje se javljaju u kontaktu točka sa neravninama na površini puta. One generišu vibracije u tlu čije predominantne

frekvencije odgovaraju svojstvenim frekvencijama oscilovanja tla. Oscilatorne sile su posledica oscilacija osovine točkova. Te sile generišu vibracije čija frekvencija zavisi od načina ovešenja, razmaka točkova, mase i brzine kretanja vozila.

Vibracije od saobraćaja se prenose kroz tlo putem zapreminskih i površinskih talasa. Amplitude talasa opadaju sa rastojanjem od izvora usled geometrijskog i materijalnog prigušenja.



Slika 1. *Rayleigh-evi talasi*

Kod površinskih Rayleigh-evih talasa čestice osciluju po površini u vidu retrogradnih elipsi, Slika 1, zbog čega je gubitak energije usled prostiranja talasa manji nego kod zapreminskih talasa. Rayleigh-evi talasi imaju niske frekvencije, pa je i materijalno prigušenje manje. Sve to utiče da Rayleigh-evi talasi stižu na određenu destinaciju sa amplitudama vibracija većim od zapreminskih talasa, noseći najveću energiju.

Funkcija opadanja amplituda vibracija (atenuacija) za Rayleigh-eve talase je data izrazom

$$v = v_0 \left(\frac{r}{r_0} \right)^{-0.5} e^{-\alpha(r-r_0)} \quad (1)$$

gde je:

v - brzina čestica na izvoru,

r_0 - rastojanje od izvora vibracija do referentne tačke,

r - rastojanje od izvora vibracija do posmatrane tačke,

0.5 - stepen geometrijskog prigušenja,

α - faktor materijalnog prigušenja tla, dat u tabeli 1.

Tabela 1. *Vrednost faktora α*

Tip tla	Koeficijent α [m^{-1}]
vodom zasićena tla	0.04-0.12
les	0.10
pesak i prašina	0.04

2.2 Faktori koji utiču na nivo i frekvenciju vibracija

Intenzitet vibracija izazvanih dejstvom saobraćaja zavisi od sledećih faktora:

- izvora vibracija (tramvaj, autobus, itd.),
- stanja kolovoza,
- rastojanja objekta od saobraćajnice,
- tipa konstruktivnog sistema i međuspratne tavanice objekta,

- geoloških karakteristika tla na kome je objekat fundiran, kao i načina fundiranja.

Što se tiče samog izvora vibracija, na predominantne frekvencije i amplitude vibracija u velikoj meri utiču: težina vozila, tip ovešanja i brzina kretanja vozila. Načelno, što je kolovoz sa više neravnina i što je veća brzina kretanja vozila, amplitude vibracija su veće. Uticaj sistema ovešanja zavisi od neravnina puta i brzine kretanja vozila. Na neravnom putu pri većoj brzini kretanja efekat vešanja je veći. Tako npr. pri brzini kretanja od 50 km/h na neravnom putu autobus prouzrokuje dva puta veće amplitude vibracija nego kamion iste težine, dok su amplitude vibracija prouzrokovane kretanjem oba vozila brzinom od 25 km/h iste.

Nivo vibracija zavisi od tipa tla i njegove slojevitosti. Što je manja krutost i materijalno prigušenje u tlu, veće su vibracije. Pri tome, svojstvena frekvencija tla ima važnu ulogu u prostiranju vibracija zbog mogućnosti pojave rezonance. Svojstvena frekvencija f nadsloja tla debljine H iznad osnovne stene zavisi od krutosti tla i debljine sloja, i izražena je relacijom:

$$f = \frac{c_s}{4H} \text{ [Hz]} \quad (2)$$

U jednačini (2) je:

$$c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}} \text{ - brzina smičućih talasa,}$$

G - modul smicanja,

ρ - gustina.

Vibracije od saobraćaja su najizraženije u slučaju mekog sloja tla, debljine od 7 do 15 metara. Svojevrsne frekvencije takvog sloja mogu da se poklope sa svojevrsnim frekvencijama zgrade, što bi moglo da dovede do znatnog pojačanja (amplifikacije) vibracija.

3. MERENJA

3.1 *Merni instrumenti i akvizicija podataka*

Merenje vibracija predstavlja veoma važan deo u procesu procene i predviđanja vibracija izazvanih dejstvom saobraćaja. Generalno, ceo proces merenja i obrade podataka može se podeliti u 4 faze, [2]:

- prikupljanje podataka, odnosno merenja,
- snimanje merenih veličina,
- priprema i ocena podataka za obradu,
- analiza merenja.

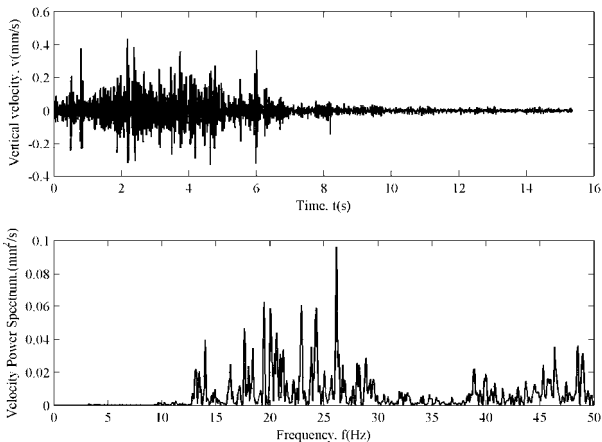
Pod prikupljanjem podataka podrazumeva se upotreba odgovarajućeg mernog instrumenta kako bi se neka fizička pojava transformisala u analogni signal, koji

je povezan sa nekom fizičkom veličinom (najčešće je to napon). Kao merni instrumenti mogu se koristiti akcelerometri, koji mere ubrzanja, ili geofoni koji mere brzine. Prilikom izbora mernog instrumenta treba voditi računa o njegovoj osetljivosti, odnosno opsegu koji je moguće izmeriti tim instrumentom. Na slici 2 prikazan je trokomponentni geofon L-22-3D/E francuske kompanije SERCEL, koji je korišćen pri merenju vibracija od saobraćaja duž buduće trase lakog metroa u Beogradu 2006. godine, [17].



Slika 2. Aparatura za merenje vibracija

Merne instrumente treba postaviti tako da budu isključene moguće smetnje pri merenju. Npr. uz sam kolovoz mogu se postaviti vreće sa peskom da instrumente zaštite od prekomernih vibracija.

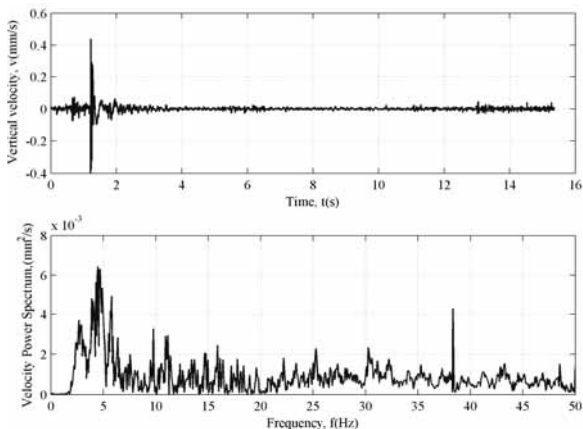


Slika 3. Vremenska istorija i spektar snage vertikalnih vibracija izazvanih tramvajskim saobraćajem

Nakon izvršenog merenja, potrebno je izvršiti snimanje signala. Merenja se obično registruju na magnetnim trakama, ili na hard disku računara. Od tipa uređaja za snimanje zavisi maksimalan broj merenja koje je moguće odjednom snimiti pomoću uređaja za merenje.

Priprema podataka za analizu podrazumeva konverziju analognog u digitalni signal, kao i otklanjanje „smetnji“, koje mogu nastati prilikom merenja vibracija. Ova faza je obično obuhvaćena fazom prikupljanja poda-

taka, odnosno merenja. Rezultat ove faze su vremenske istorije brzine ili ubrzanja.



Slika 4. Vremenska istorija i spektar snage vertikalnih vibracija izazvanih prolaskom kamiona preko gumene prepreke

Na Slikama 3 i 4 prikazane su vremenske istorije i odgovarajući spektri snage brzine vertikalnih vibracija tla merenih na rastojanju od oko 11 m od tramvajskih šina, odnosno saobraćajnice u Bulevaru kralja Aleksandra (tačka 2 na slici 5), [17].

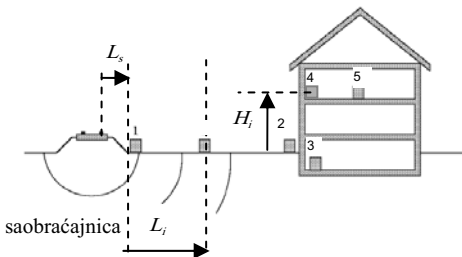
Prilikom analize podataka prikupljenih merenjem, koriste se metode i procedure, koje su propisane odgovarajućim Standardima. Na osnovu vremenske istorije dobijene u prethodnoj fazi, može se dobiti odgovarajući spektar merene veličine, srednja vrednost, r.m.s. vrednost i sl.

3.2 Procedura merenja

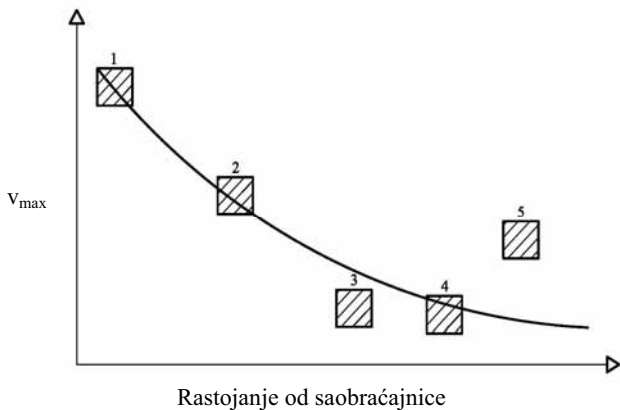
Vibracije izazvane dejstvom saobraćaja prostiru se kroz tlo, a zatim kroz objekat – od podruma, preko zidova do međuspratnih tavanica.

Na slici 5 shematski je dat prikaz mernih mesta u svakom objektu, kao i zavisnost nivoa vibracija od rastojanja od izvora, slika 6. Od saobraćajnice do spoljašnjeg zida objekta dolazi do atenuacije (prigušenja) vibracija kao posledica radijacijskog i materijalnog prigušenja tla (tačke 1 i 2 na slici 5). Od spoljašnjeg zida do podruma (tačka 3) dolazi do dodatne redukcije vibracija, koje se zatim kroz vertikalne elemente prostiru do viših etaža objekata (tačka 4) i međuspratnih tavanica (tačka 5), pri čemu može doći do povećanja ili smanjenja nivoa vibracija u zavisnosti od dinamičkih karakteristika međuspratnih tavanica.

U svakoj mernoj tački potrebno je meriti tri komponente vibracija – vertikalnu i dve horizontalne (u pravcu saobraćajnice i upravno na pravac saobraćajnice).



Slika 5. Merna mesta



Slika 6. Osobine prostiranja vibracija od saobraćaja od izvora do objekta

4. PROCENA VIBRACIJA

4.1 Ocena nivoa vibracija

Vibracije od drumskog saobraćaja se prenose kroz tlo do objekta gde se pojačavaju i negativno deluju na objekte, ljude i osetljivu opremu u njima.

Istraživanja su pokazala da putni sobraćaj generiše vibracije čije su frekvencije između 5 i 25 Hz. Amplitude brzina se kreću od 0.05 do 25 mm/s, a amplitude ubrzanja od 0.005-2.0 mm/s².

Pojedine zemlje, kao Nemačka, Velika Britanija, Švajcarska, Norveška, i dr., kao i Internacionalna organizacija za standarde (International Standard Organisation - ISO), su donele standarde kojima se definišu merenje i ocena dejstva vibracija na:

- ljude,
- objekte i
- osetljivu opremu.

Međutim, u Srbiji ne postoji standard koji definiše dozvoljeni nivo vibracija od saobraćaja.

U narednom delu teksta analiziraće se odredbe sledećih standarda:

- Nemački standardi DIN 4150-2 [8], DIN 4150-3 [9] i DIN 45669 [10],
- Britanski standardi BS 7385[3], BS 6472 [4].

Oba standarda koriste brzinu izmerenu na objektu za procenu mogućeg oštećenja zgrade i efekta na ljude u zgradama. Nivo vibracija od saobraćaja i ocena potencijalnih oštećenja zgrada tj. nepovoljnog dejstva na ljude primenom ovih standarda biće ilustrovana u slučaju 24 objekta u Bulevaru kralja Aleksandra u Beogradu.

U najvećem broju slučajeva, za procenu je dovoljno meriti samo vertikalne vibracije. Iako i horizontalne komponente mogu biti prenosnik velikog dela energije vibracija, vertikalne komponente imaju veće amplitude i mnogo se efikasnije prenose u fundament, a zatim kroz objekat, od horizontalnih komponenata vibracija.

4.1.1. Efekat vibracija na zgrade

Vibracije od saobraćaja su nedovoljno velikih amplituda da bi mogle izazvati oštećenja objekata. Međutim, one mogu doprineti procesu propadanja objekta i doprineti tzv. kozmetičkim oštećenjima pretežno starih zgrada. Za procenu dejstva vibracija na zgrade različiti standardi definišu različite kriterijume. Britanski standard BS 7385: Part 2:1993 i nemački standard DIN 4150: Part 3, za procenu dejstva vibracija na zgrade koriste maksimalnu brzinu vibracija (*PPV-peak particle velocity*) izmerenu u fundamentu objekta. U njima se dopuštena vrednost maksimalne brzine definiše u funkciji frekvencije oscilovanja i tipa konstrukcije.

U tabeli 2 prikazane su granične vrednosti PPV u nivou fundamenta zgrade definisane u BS 7385:2. Ako je maksimalna brzina veća od dopuštene mogu se očekivati kozmetička oštećenja objekata.

Tabela 2: Referentne vrednosti iznad kojih se očekuju za kozmetička oštećenja zgrada u funkciji maksimalne brzine vibracija PPV (mm/s) prema BS 7385:2

		PPV (mm/s)		
frekvencija		4 - 15 Hz	15-40 Hz	iznad 40 Hz
	tip zgrade			
1	AB zgrade, industrijske i masivne komercijalne zgrade	50	50	50
2	Nearmirane zgrade, rezidencijalne ili lake komercijalne zgrade	15-20	20-50	50

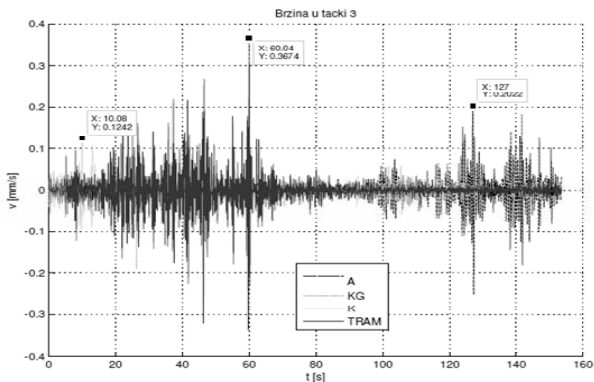
Granična vrednost brzine vibracija od 50 mm/s za komercijalne i industrijske zgrade je veoma visoka i mala je verovatnoća da se može javiti usled saobraćajnog opterećenja. Za nearmirane zgrade, rezidencijalne ili lake komercijalne zgrade granična vrednost brzine usled dejstva saobraćaja, izuzetno može biti dostignuta, u zoni niskih frekvencija, 4-15 Hz, gde prema BS 7385:2 maksimalna dopuštena PPV iznosi 15 mm/s.

Nemački standard DIN 4150:3, definiše znatno niže vrednosti dopuštenih vibracija, tabela 3. Za rezidencijalne zgrade u zoni niskih frekvencija ($f < 10$ Hz), dopuštena maksimalna komponentalna brzina vibracija u fundametu je 5 mm/s.

Tabela 3: Referentne vrednosti iznad kojih se očekuju za kozmetička oštećenja zgrada u funkciji maksimalne brzine vibracija PPV (mm/s) prema DIN 4150:3

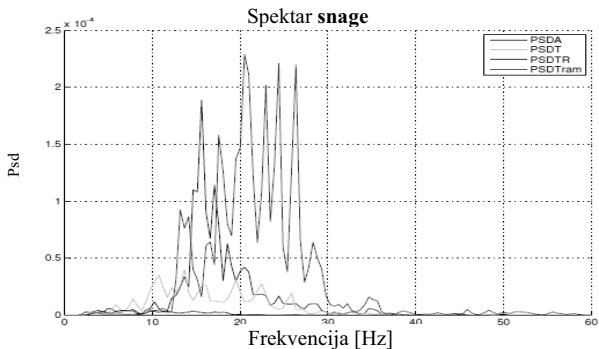
tip zgrade \ frekvencija		PPV (mm/s)		
		<10 Hz	10 - 50 Hz	50 -100 Hz
I	Komercijalne i industrijske zgrade	20	20-40	40-50
II	Rezidencijalne i sl. zgrade	5	5-15	15-20
III	Ostale zgrade osetljive na vibracije	3	3-8	8-10

Ukoliko se posmatraju vibracije na najvišem nivou zgrade, granične vrednosti brzina su redom 40 mm/s, 15 mm/s i 8 mm/s za zgrade tipa I, II i III definisane u tabeli 3.



Slika 7. Vremenska istorija vertikalnih vibracija izmerenih u tački 3 usled dejstva A-ambijentalnih vibracija, KG-kamiona preko gume, K-kamiona i T-tramvaja

Na slici 7 prikazane su vremenske istorije brzina koje su izmerene u tački 3 (Slika 5) objekta u Bulevaru kralja Aleksandra usled: A - ambijentalnih vibracija, K - kamiona od 14 t, KG - kamiona od 14 t preko gumene prepreke i T - tramvaja. Najveća izmerena brzina $PPV=0.367$ mm/s je usled kretanja tramvaja. Njena vrednost je daleko ispod propisanog limita za rezidencijalne zgrade, Tabele 2 i 3.



Slika 8. Spektralna gustina vertikalnih vibracija izmerenih u tački 3 usled dejstva A-ambijentalnih vibracija, T-kamiona preko gume, TR-kamiona i Tram-tramvaja

Na slici 8 prikazana je spektralna gustina (PSD) vertikalnih vibracija sa slike 7. Spektralna gustina daje raspored snage, tj. energije vibracija, posmatranog signala po frekvencijama. On nam pokazuje pri kojim frekvencijama će vibracije usled kretanja vozila biti najveće. Na osnovu procene svojstvenih frekvencija objekata u blizini saobraćajnice možemo približno zaključiti kakav će biti uticaj vibracija od saobraćaja na objekte.

PSD određujemo na osnovu Fourier-ove transformacije signala $v(t)$. Naime, svaki signal se primenom inte-

gralne Fourier-ove transformacije može prikazati kao beskonačna suma harmonika, različitih frekvencija:

$$v(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} v(t)e^{i\omega t} dt \quad (3)$$

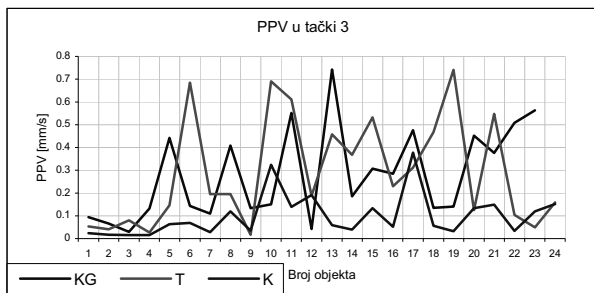
Spekter snage (gustine) jednak je kvadratu Fourier-ove transformacije brzine vibracija:

$$PSD = \left| \int_{-\infty}^{\infty} v(t)e^{i\omega t} dt \right|^2 \quad (4)$$

Fourier -ova transformacija signala se može odrediti primenom programa Matlab i numeričkog postupka poznatog kao brza Fourier -ova transformacija (FFT).

Na osnovu slike 8, vibracije usled kretanja tramvaja su najveće u opsegu frekvencija od 18-30 Hz, dok ambijentalne vibracije imaju predominantne frekvencije oko 15 Hz. Vibracije od kamiona i kamiona preko gumene prepreke nose manje energije i to na nižim frekvencijama nego prethodne. Energija ambijentalnih vibracija je najmanja. Te vibracije, verovatno, potiču od putničkih vozila i pošto su znatno manjeg intenziteta, neće dalje biti razmatrane.

Na slici 9 date su PPV izmerene u osnovi 24 objekta u Bulevaru kralja Aleksandra u Beogradu, usled prolaska T-tramvaja, K-kamiona i KG-kamiona preko prepreke. Kod najvećeg broja zgrada tramvaj izaziva maxPPV, a zatim kamion sa preprekom. PPV od kamiona su najmanjeg intenziteta. Nijedna od izmerenih vrednosti ne prelazi dopušteni prag vertalnih vibracija za reziden-cijalne zgrade, čak ni za zgrade sa osetljivom opremom. Na osnovu toga se može izvesti veoma važan zaključak, da vibracije od postojećeg saobraćaja u Bulevaru kralja Aleksandra ne mogu izazvati oštećenja objekata.

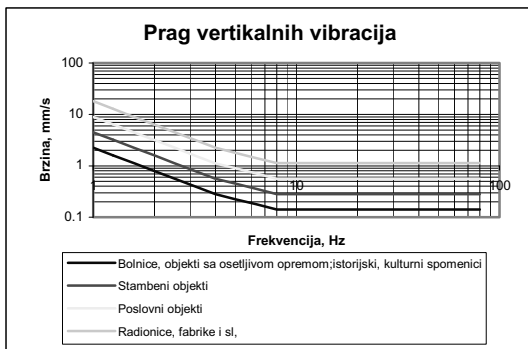


Slika 9. PPV vertikalnih vibracija izmerenih u tački 3 usled dejstva T-tramvaja, K-kamiona i KG-kamiona preko prepreke

4.1.2 Efekat vibracija na ljude

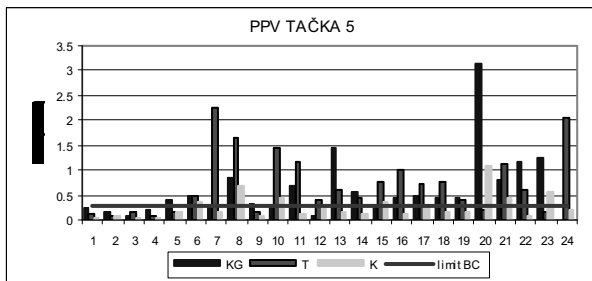
Vibracije od saobraćaja mogu imati uznemiravajuće delovanje na ljude zbog neprijatnih fizičkih senzacija i buke. Spособnost ljudi da oseti vibracije je direktno proporcionalna brzini i frekvenciji vibracija. Internacionalna organizacija za standarde (ISO) kao i više zemalja u svetu donele su standarde koji propisuju procenu dejstva stalnih, povremenih i prolaznih vibracija na ljude u objektima (ISO 2361 [14], DIN 4150-2 [8], BS 6472 [3], i dr.).

BS 6472:1992



Slika 10. Dozvoljene amplitude vertikalnih vibracija, BS 6472

Britanski standard BS 6472 definiše dozvoljene vertikalne i horizontalne vibracije za ljude u objektima u zavisnosti od PPV. Na slici 10 prikazan je prag vibracija, tj. maksimalna dopuštena brzina za vertikalne vibracije u funkciji od tipa objekta i frekvencije, prema BS 6472. Za sve frekvencije iznad 8 Hz prag vibracija je isti za isti tip objekta, dok za frekvencije ispod 8 Hz prag osetljivosti ima veće vrednosti. Što se tiče objekata, najmanje vibracije se dozvoljavaju u bolnicama i objektima sa osetljivom opremom, a najviše u radionicama i fabrikama.



Slika 11. PPV u tački 5 od T, KG i K

Na slici 11 su prikazane PPV registrovane u tačkama na sredini ploče poslednje etaže objekata u Bulevaru kralja Aleksandra usled T - tramvaja, KG - kamiona preko gumene prepreke i K - kamiona. Horizontalna linija

definiše prag za rezidencijalne objekte za frekvencije veće od 8 Hz, prema BS 6472. Tramvaj izaziva PPV veće od limita kod 16 od 23 objekta, kamion preko rampe kod 15 od 22 objekta, a kamion kod 8 od od 24 objekta.

DIN 4150-Part 2

Nemački standard DIN 4150-2 koristi vremensku istoriju brzine vibracija $v(t)$ za ocenu dejstva vibracija na ljude. Standard propisuje maksimalni intenzitet percepcije $KB_{Fmax} = \max[KB_F(t)]$, gde je $KB_F(t)$ *running rms* (root-mean-square) signala $KB(t)$:

$$KB_F(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\xi=0}^t e^{-\frac{t-\xi}{\tau}} KB^2(\xi) d\xi} \quad (5)$$

gde je $\tau = 0.125$ s, a ξ vremenska promenljiva.

$KB(t)$ predstavlja signal brzine $v(t)$ normiran i korigovan frekventno zavisnim faktorom koji je definisan standardom DIN 45669. $KB(t)$ se dobija tako što se signal $v(t)$ propušta kroz *high pass* i *low pass* 2-polni Butterworth-ov filter (*high pass* frekvencija je 0.8 Hz, a *low pass* frekvencija je 80 Hz). Funkcija filtera je definisana kompleksnom transfer funkcijom:

$$H_{unom}(if) = \frac{1}{\left[1 - i\sqrt{2} \frac{0.8\text{Hz}}{f} - \left(\frac{0.8\text{Hz}}{f}\right)^2\right] \left[1 + i\sqrt{2} \frac{0.8\text{Hz}}{f_{\max}} - \left(\frac{0.8\text{Hz}}{f_{\max}}\right)^2\right]} \quad (6)$$

u kojoj je $f_{\max} = 80$ Hz. Ljudi različito reaguju na vibracije u zavisnosti od položaja tela i pravca vibracija, pa se zbog toga filtrirani signal „otežava“ primenom frekventno zavisne kompleksne funkcije:

$$H_{Bnom}(if) = \frac{1}{1 - i \frac{5.6\text{Hz}}{f}} \quad (7)$$

gde je f frekvencija u Hz, a $i = \sqrt{-1}$. Težinske krive su različite za horizontalne i vertikalne vibracije i za telo u stojećem položaju, ležećem položaj ili nedefinisanim položaju.

$KB_{F_{\max}}$ je moguće odrediti primenom odgovarajućeg postupka u frekventnom ili vremenskom domenu. $KB(f)$, $KB_F(t)$ i $KB_{F_{\max}}$ datog signala $v(t)$ je najjednostavnije sračunati primenom programa Matlab i postupka za obradu signala. Tako dobijena vrednost $KB_{F_{\max}}$ poredi se sa pragom vibracija datim u tabeli 4:

- Ako je $KB_{f_{\max}} \leq A_u$ vibracije su ispod propisanog praga; propis je zadovoljen,

- Ako je $KB_{fmax} \geq A_o$ propis nije zadovoljen, i moraju se preduzeti mere za smanjenje uticaja vibracija.

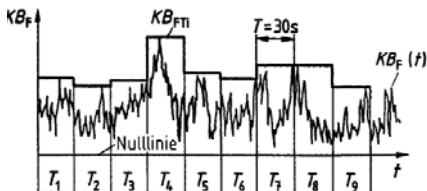
Tabela 4: *Prag za procenu efekta vibracija na komfor ljudi prema DIN 4150-2*

Izloženost Mesto	Dan			Noć		
	A_u	A_o	A_r	A_u	A_o	A_r
Komercijalni objekti	0.4	6	0.2	0.3	0.6	0.15
Pretežno komercijalni objekti	0.3	6	0.15	0.2	0.4	0.10
Mešovita zona	0.2	5	0.1	0.15	0.3	0.07
Pretežno rezidencijalne zgrade	0.15	3	0.07	0.1	0.2	0.05
Osetljiva zona, npr. bolnice	0.1	3	0.05	0.1	0.15	0.05

Postupak je opisan za jedan događaj. Međutim, vibracije od saobraćaja sastoje od niza događaja koji se ponavljaju u nepravilnom razmaku. Ta činjenica se mora uzeti u obzir. Za učestale događaje, ako je $A_u \leq KB_{Fmax} \leq A_o$ potrebno je sračunati KB_{FTm} prema jednačini (8) i uporediti sa A_r :

$$KB_{FTr} = KB_{FTm} \sqrt{\frac{T_e}{T_r}}, \quad KB_{FTm} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N KB_{FTi}^2}. \quad (8)$$

U jednačini (8) T_e je vreme izloženosti vibracijama, T_r je period merenja, propisan standardom, (DIN 45669: 16h tokom dana, 8h noću), a $KB_{FTi} = \max KB_F(t)$ u jednom taktu T_i , $i=1..N$. Taktom se smatra vreme od 30 sec, slika 12.

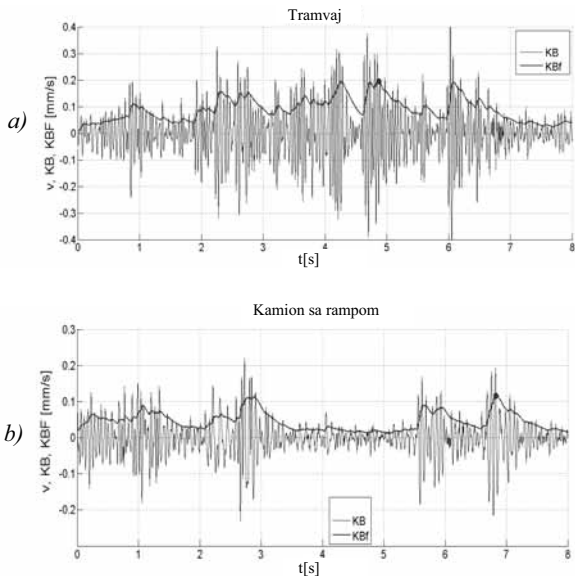


Slika 12. KB_{FTi}

Na slici 13 prikazana je vremenska zavisnost $KB(t)$ i $KB_F(t)$ za vertikalne vibracije tačke 5 (Slika 5), na poslednjoj etaži zgrade u Bulevaru kralja Aleksandra usled prolaska tramvaja, dok je na slici 14 prizan uticaj kamiona preko gumene prepreke.

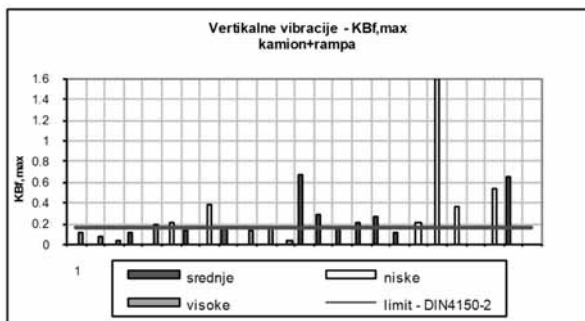
Na Slikama 14 i 15 prikazane su vrednosti $KB_{F,max}$ od tramvaja i kamiona preko gumene prepreke, za 24 objekta u Bulevaru. Objekti su grupisani u III kategorije:

- niske zgrade (≤ 3 sprat),
- srednje zgrade (3-7 spratova) i
- visoke zgrade (>7 spratova).

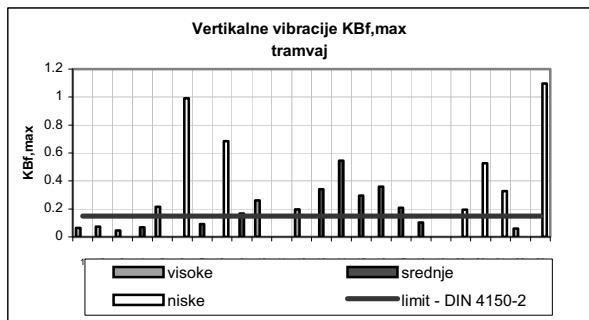


Slika 13. $KB(t)$ i $KB_F(t)$ u tački 5 usled kretanja tramvaja i kamiona preko rampe

Tramvaj izaziva najveće efekte na ljudima u niskim i srednjim zgradama, dok je efekat u visokim zgradama znatno manji. Pri tome, kod 15 od 22 zgrade, KB_{Fmax} je veće od praga definisanog standardom (slika 14). Od toga su 6 zgrada niske, 6 srednje i 3 visoke.



Slika 14. $KB_{F,max}$ u tački 5, za niske, srednje i visoke zgrade u Bulevaru, od tramvaja i prag vibracija prema DIN 4150-2



Slika 15. $KB_{F,max}$ u tački 5 od kamiona preko rampe za niske, srednje i visoke zgrade, i prag vibracija prema DIN 4150-2

Kamion preko gumene prepreke prouzrokuje vibracije za koje je $KB_{Fmax} > A_u$ u slučaju 13 od 23 zgrade, od čega su 6 niske, 5 srednje i 2 visoke zgrade, slika 14.

Očigledno je da vibracije od teškog saobraćaja prekoračuju dozvoljeni prag vibracija za dejstvo na ljude. Potrebno je sprovesti dodatna ispitivanja i anketiranje stanara da bi se procenio taj uticaj i eventualno preduzele mere za smanjenje efekta vibracija.

5. PREDVIĐANJE VIBRACIJA

Predviđanje vibracija je od velike važnosti u procesu odlučivanja i projektovanja novih saobraćajnica i pruga, kao i projektovanju zgrada u blizini istih. Poslednjih godina veliki broj autora se bavio ovim problemom (Zigler [16], Bahrekazemi [2], i mnogi drugi). Rezultat toga su različiti empirijski i numerički modeli za predviđanje vibracija od saobraćaja u različitim fazama projektovanja. Empirijski i poluempirijski modeli [16], [2] se koriste u fazi preliminarnog projektovanja. Međutim, danas se koriste složeni numerički modeli, zasnovani na talasnoj teoriji, graničnim elementima i konačnim elementima, za predviđanje efekta vibracija od saobraćaja na objekte, [7]. Njihova glavna mana, pored složene i vremenski zahtevne numeričke procedure, su nepouzdana podaci o karakteristikama materijala koji se koriste kao ulazni podatak u modelu.

Eksperimentalni modeli se zasnivaju na merenju vibracija od različitih izvora i definisanju transfer funkcije (TRF) između izvora vibracija i vibracija u objektu. Transfer funkcija se može odrediti na osnovu:

- maksimalne vrednosti izmerene veličine, tj. brzine $v(t)$, tj. PPV,
- rms (*root-mean-square*) vrednosti:

$$v_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N v_i^2}{N}} \quad (9)$$

- Fourier-ovog spektra, spektra snage, spektra oktave ili spektra 1/3 oktave .

Najjednostavnija transfer funkcija se dobija iz odnosa maksimalnih amplituda vibracija izmerenih u dve posmatrane tačke usled nekog izvora vibracija:

$$TRF = \frac{PPV_1}{PPV_2} \quad (10)$$

gde su tačke 1 i 2 tačke između kojih želimo da odredimo transfer funkciju.

Transfer funkcija se dobija sukcesivnim multiplikacijama tri transfer funkcije:

$$TRF = TRF_1 \cdot TRF_2 \cdot TRF_3 \quad (11)$$

gde je :

TRF_1 transfer funkcija za tlo, od izvora do objekta,

TRF_2 transfer funkcija između tačke na tlu, pored objekta i tačke u fundamentu objekta,

TRF_3 transfer funkcija između tačke u osnovi objekta i posmatrane tačke (npr. ploča na poslednjoj etaži).

Jednu od najčešće korišćenih empirijskih transfer funkcija od izvora do referentne tačke, koja važi za maxPPV usled kretanja kamiona preko neravnine na putu, definisao je Watts [19]:

$$PPV = 0.028 \cdot a \cdot \frac{v}{48} \cdot t \cdot p \cdot \left(\frac{r_0}{6} \right)^x \quad (12)$$

U jednačini (12) je:

a maksimalna visina neravnine na putu u mm,

v maksimalna očekivana brzina kamiona u km/h,

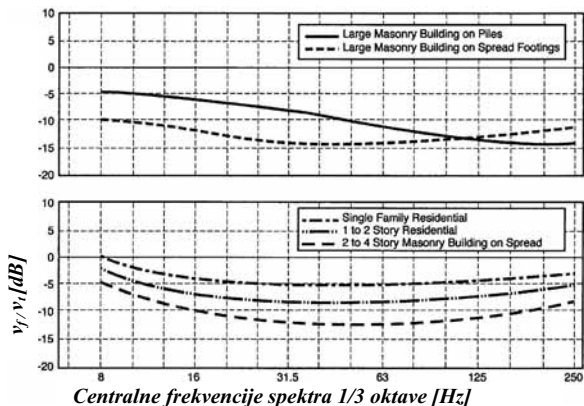
t faktor koji zavisi od tipa tla [19],

p koeficijent, $p=0.75$ ako postoji defekt samo ispod jednog točka, $p=1$ ako je defekt ispod oba točka,

r_0 rastojanje referentne tačke od defekta na putu u m,

x faktor atenuacije za tlo, dat u literaturi [19].

Na osnovu dobijene vrednosti maksimalne brzine na rastojanju r_0 od izvora, može se odrediti PPV u tlu na proizvoljnom rastojanju r , primenom izraza (1).



Slika 16. Vibracije fundamenta relativno u odnosu na tlo u [dB] za različite tipove zgrada

Atenuacija vibracija usled interakcije tla i objekta zavisi od tipa objekta i načina fundiranja. Na slici 16, je prikazan odgovor fundamenta, relativno u odnosu na vibracije u tlu za različite tipove zgrada i način fundiranja, [11]. Relativna brzina je data u decibelima, gde je

$$N(\text{dB}) = 20 \cdot \log_{10} \left(\frac{PPV}{PPV_{ref}} \right) \quad (13)$$

U jednačini (13) PPV je maksimalna brzina u fundamentu a PPV_{ref} je maksimalna brzina u tlu pored objekta. Vrednost nula znači da je $PPV=PPV_{ref}$. Za frekvenciju se koristi skala od 1/3 oktave. Oktava pokriva opseg frekvencija čiji je odnos 2. Ako je odnos

$$\frac{f_{\max}}{f_{\max}} = 2^{\frac{1}{3}} \quad (14)$$

onda je reč o skali od 1/3 oktave. ISO standard [14] definiše centralne frekvencije za obe skale.

Od fundamenta vibracije se prostiru kroz elemente zgrade do vrha objekta. Pri tome može doći do amplifikacije vibracija usled rezonance zidova i tavanica. Fundamentale frekvencije armirano betonskih ploča u modernim zgradama leže u opsegu od 20-30 Hz, a zidova od oko 40 Hz. Amplifikacija zavisi od tipa konstrukcije i posmatranog sprata. Istraživanja su pokazala da se kod visokih zgrada amplifikacija javlja između trećeg i sedmog sprata, a da su na ostalim spratovima vibracije niže od onih u fundamentu.

Analiza izmerenih vibracija u tačkama 1-4 na 24 lokacije u Bulevaru, pokazala je sledeće:

- atenuacija u tlu, (slika 5), tj. smanjenje maksimalno izmerene brzine PPV, između tačaka 2 i 1 iznosi između 25% i 50%. Rastojanje između dve merne tačke u Bulevaru je relativno malo i kreće se oko 10 m, što znači da je atenuacija relativno velika,
- amplifikacija, tj. odnos između PPV tačke 5 koja se nalazi na sredini ploče poslednje etaže i tačke 3 u osnovi objekta je pokazala zavisnost između spratnosti i izvora vibracija (predominantne frekvencije vibracija).

Srednja vrednost faktora amplifikacije za pojedine tipove zgrada prikazana je u tabeli 5.

Faktori amplifikacije za srednje i visoke zgrade imaju mala odstupanja od srednje vrednosti. Kod niskih zgrada su ta odstupanja znatno veća. Niske zgrade su plitko fundirane, sa drvenim ili sitnorebrastim tavanicama bez horizontalnih serklaža, kod kojih dolazi do osetnih vibracija tavanica. Odnos između PPV tački 5 u centru tavanice i PPV u tački 4 pored zida, kod tih zgrada, je između 0.8 i 4. Zbog toga niske zgrade imaju najveći faktor amplifikacije, bez obzira na tip vozila koje ga izazivaju. Maksimalna vrednost faktora amplifikacije za niske zgrade je 6 u slučaju vibracija usled prolaska tramvaja. Kod ostalih objekata amplifikacija između

tačkaka 5 i 4 je između 0.75 i 1.7. Samo kod malog broja novijih zgrada amplifikacija tavanice je manja od jedan.

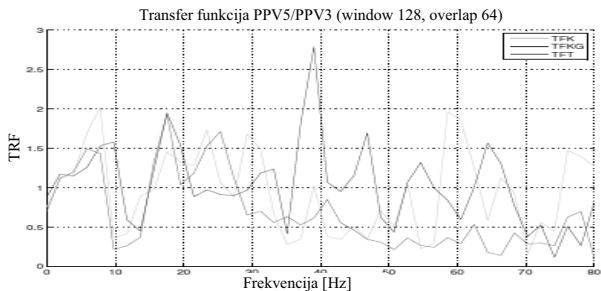
Tabela 5: Srednja vrednost faktora amplifikacije

Srednja vrednost faktora amplifikacije - PPV5/PPV3			
	niske zgrade	srednje zgrade	visoke zgrade
Tramvaj	6	2.314	2.209
Kamion sa preprekom	3.334	2	1.884
Kamion	5.054	2.654	2.1

Pouzdaniji podatak o transfer funkciji brzine između dve tačke dobija se primenom stohastičkih metoda. Transfer funkcija predstavlja količnik:

$$T_{xy} = \frac{P_{xy}}{P_{xx}} \quad (15)$$

gde je P_{xy} kros-korelacijska funkcija, a P_{xx} auto-korelacijska funkcija brzine $v(t)$.



Slika 17. Transfer funkcija za objekat na Bulevaru usled kretanja kamiona-K, kamiona preko rampe-KG i tramvaja-T

Na slici 17 prikazane su vrednosti transfer funkcija za objekat u Bulevaru kralja Aleksandra usled kretanja tramvaja, kamiona i kamiona preko gumene prepreke. Transfer funkcije su dobijene primenom programa Matlab i funkcije *tfestimate*. Na slici se jasno uočava zavisnost TRF od frekvencije. Za grubu procenu vibracija usled nekog izvora može poslužiti i ovako dobijena TRF-funkcija, međutim, pravilno bi bilo odrediti TRF analizom više signala. Naime, vibracije su stohastička pojava i za njihovu analizu u principu treba koristiti statističke metode. To znači da vibracije od saobraćaja treba meriti tokom dužeg vremenskog perioda ili usled više prolazaka karakterističnog vozila i rezultate obraditi statističkim metodama.

6. ZAKLJUČAK

Vibracije izazvane dejstvom saobraćaja postaju sve veći problem u velikim gradovima. One retko izazivaju oštećenja objekata, ali uznemirujuće deluju na ljude. Zbog toga se sve češće javlja potreba za merenjem i ocenom postojećih vibracija, kao i procenom nekih budućih vibracija izazvanih kretanjem vozila. Postupak merenja, procene i predviđanja vibracija od saobraćaja definisan je u standardima mnogih zemalja (DIN, British Standard, ISO, itd.). Sama primena tih standarda nije jednostavna. Naime, zbog stohastičke prirode vibracija od saobraćaja, merenje i analiza su složeni postupci koji zahtevaju poznavanje više disciplina, pre svega teorije vibracija i obrade signala, koje nisu bliske našim građevinskim inženjerima. Zbog toga je u ovom radu prikazana primena britanskih i nemačkih propisa za merenje i ocenu vibracija, na primeru 24 objekta u Bulevaru kralja Aleksandra u Beogradu. Priloženi spisak literature će pomoći zainteresovanima da dopune svoje znanje i otklone eventualne nedoumice.

7. LITERATURA

- [1] AMERICAN NATIONAL STANDARD INSTITUTE : *Guide to the Evaluation of Human Exposure to Whole Body Vibrations*, ANSI S3.18-1979, (1979).
- [2] BAHREKAZEMI, M.: *Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction*, Phd Thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, (2004)
- [3] BRITISH STANDARD INSTITUTION: *Guide to evaluation of human exposure to vibration in buildings (1-80 Hz)*: BS 6472: 1992, London, (1992)
- [4] BRITISH STANDARD INSTITUTION: *Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part 2: Guide to damage levels from ground borne vibration*: BS 7385: 1993, London, (1993)
- [5] CLIFORNIA DEPARTMENT OF TRANSPORTATION. *Transportation Related Earthborne Vibrations*, Technical Advisory, Report TAV-96-01-R9201, June 1996 (1996)
- [6] CRISPINI M., D'APUZO M.: *Measurement and prediction of traffic-induced vibrations in a heritage building*. Journal of Sound and Vibration, 246 (2), 319-335 (2001)

- [7] FIALA, P., DEGRANDE, G., AUGUSZTINOVICZ F.: *Numerical modelling of ground-borne noise and vibration in buildings due to surface rail traffic*. Journal of Sound and Vibration 301, 718–738 (2007)
- [8] GERMAN INSTITUTION FOR STANDARD, DIN 4150:2 *Vibration in Building Construction* (1984)
- [9] GERMAN INSTITUTION FOR STANDARD, DIN 4150:3 Efekti vibracija na konstrukcije, *Vibration in Building Construction* (1984)
- [10] GERMAN INSTITUTION FOR STANDARD, DIN 45669-Part 1: *Measuring equipment* (1995)
- [11] H. J. SAURENMAN, J. T. NELSON, G. P. WILSON: *Handbook of Urban Rail Noise and Vibration Control*, US Department of Transportation, Report No. UMTA-MA-06-0099-82-2 (1982)
- [12] HIROSE S. AND CHOW N.: *Human-induced vibrations and their design regulations for structures*, Proceeding 18th Australian Conf., Perth, 1-3 Dec., 2004 (2004)
- [13] HUNAIDI O. AND TREMBLAY M.: Traffic-induced building vibrations in Montreal, Can.J. Civ. Eng. 24, 736-753 (1997)

- [14] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, ISO 2631-1:1997
- [15] INTERNATIONAL STANDARD ORGANIZATION, ISO 2631-2:2003
- [16] KUPPELWIESER H., ZIEGLER A.: *A Tool For Predicting Vibration And Structure-Borne Noise Immissions Caused by Railways*, Journal of Sound And Vibration, Vol. 193(1), pp. 261-267 (1996)
- [17] PETRONIJEVIĆ M., NEFOVSKA-DANILOVIĆ M.: *Geodinamička analiza osetljivosti objekata na dejstvo postojećih vibracija prema postojećim standardima i procena njihove osetljivosti na dejstvo lakog metroa*, GEOZAVOD i Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu (in Serbian) (2006)
- [18] PETRONIJEVIĆ M., NEFOVSKA-DANILOVIĆ M.: *Ongoing Research in Structural Dynamics at the University of Belgrade*, Symposium Structural Dynamic and Vibration Measurement, Duebendorf, Zuerich, 16.06-18.06.2011. (2011)
- [19] WATTS G. R.: *Traffic Induced Vibrations in Buildings*, Research Report 246, Transport and Road Research Laboratory, Department of Transport, UK, (1990)