

3 Procena dejstva vibracija na objekte i ljude

M. Petronijević, M. Nefovska Danilović

Zbog sve veće naseljenosti gradova i gustine saobraćaja u njima vibracije od saobraćaja su sve izraženije. Ukoliko amplitude vibracija od saobraćaja prekorače određene granice, izazvaju negativno dejstvo na objekte, ljude i osetljivu opremu u njima. U poslednjih 30-tak godina sprovedena su brojna istraživanja sa ciljem da se definišu granice dopuštenih vibracija. Na osnovu toga su u nizu zemalja, kao npr. u Nemačkoj, Velikoj Britaniji, Švajcarskoj, Japanu, Norveškoj, SAD i dr., doneti propisi kojima se definiše način merenja, postupak analize i ocene dejstva vibracija na:

- objekte,
- ljude u objektima i
- osetljivu opremu u objektima.

Internacionalna organizacija za standarde (International Standard Organisation - ISO), je takođe donela odgovarajuće standarde za merenje i ocenu vibracija od saobraćaja. Međutim, kod nas, u Srbiji ne postoji standard koji definiše dozvoljeni nivo vibracija u zgradama, tako da se za njihovu procenu može koristiti samo neki od dostupnih standarda.

Nemački, švajcarski i norveški standardi definišu dopuštene granične vrednosti na osnovu izmerenih brzina vibracija, dok britanski standard i ISO 2631 koriste izmerena ubrzanja. Veliki broj standarda definiše procedure i način merenja ali ne definiše dopuštene vrednosti izmerenih veličina. U narednom delu teksta biće dat kratak pregled i analiza sledećih standarda:

- Nemački: DIN 4150-2 [1], DIN 4150-3 [2] i DIN 45669 [3];
- Britanski: BS 7385 [4], BS 6472 [5].

Mada je standardima propisano merenje vibracija u 3 ortogonalna pravca, za procenu dejstva vibracija na ljude i objekte najčešće je dovoljno meriti samo vertikalne vibracije. Naime, iako transverzalne komponente vibracija prenose najveći deo energije vibracija, vertikalne komponente vibracija

imaju veće amplitude i mnogo se efikasnije prenose sa tla na fundament objekta i dalje kroz konstrukciju. Takođe, vertikalne vibracije imaju veće nepovoljno dejstvo na objekte i ljude u njima.

3.1 PROCENA DEJSTVA VIBRACIJA NA ZGRADE

Vibracije od saobraćaja su malih 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, koji uzimaju u obzir magnitudu, frekvenciju i trajanje izmerenih vibracija, kao i tip zgrade izložene vibracijama.

Britanski standard BS 7385-2:1993 [4] i nemački standard DIN 4150-3 [2], za procenu dejstva vibracija na zgrade koriste maksimalnu brzinu vibracija PPV (*peak particle velocity*) izmerenu u fundamentu objekta pri kratkotrajnom dejstvu vibracija. U njima se definiše PPV pri kojoj mogu nastati kozmetička oštećenja zgrada u zavisnosti od frekvencije oscilovanja i tipa konstrukcije.

3.1.1 Procena dejstva vibracija na zgrade prema BS 7385: Part2:1993

Britanski standard BS 7385:Part2 *Procena i merenje vibracija u zgradama: Deo 2: Upustvo za određivanje nivoa oštećenja zgrada usled vibracija tla*, [4], definiše nivo vibracija iznad kojih se mogu javiti oštećenja u zgradama usled različitih izvora: eksplozija, bušenja, probijanja tunela, rada mašina i saobraćaja. U tu svrhu BS 7385:2 klasifikuje oštećenja kao

- kozmetička (pojava prslina veličine vlasi kose),
- minorna (pojava većih prslina) i
- velika (oštećenja konstruktivnih elemenata),

i definiše granične vrednosti za kozmetička oštećenja, zidova i tavanica za kratkotrajne vibracije (*transient vibration*). Procena se vrši na osnovu maksimalne vrednosti PPV i frekvencije izmerene u osnovi zgrade na strani prema izvoru vibracija. Merenja se vrše za sve tri ortogonalne komponente. U Tabeli 3.1 prikazane su granične vrednosti za PPV u zavisnosti od frekvencije i tipa zgrade, prema BS 7385:2. Ako je maksimalna izmerena brzina u osnovi objekta veća od dopuštene mogu se očekivati kozmetička oštećenja objekata.

3. Procena dejstva vibracija na objekte i ljude

Analizom graničnih vrednosti definisanih u Tabeli 3.1, i na osnovu dosadašnjeg iskustva, može se zaključiti sledeće:

- a) 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 uobičajenog saobraćaja u gradovima.
- b) Za nearmirane zgrade, rezidencijalne, ili lake komercijalne zgrade granična vrednost brzine može biti dostignuta samo u izuzetnim slučajevima. To se može dogoditi jedino pri niskim frekvencijama, od 4 – 15 Hz, za koje je maksimalne dopuštena brzina vibracija 15 – 20 mm/s.

Tabela 3.1. BS 7385:2: Granične vrednosti kratkotrajnih vibracija za kozmetička oštećenja zgrada (PPV - maksimalna brzina vibracija u fundamentu objekta, u mm/s)

Tip zgrade	PPV [mm/s]		
	Frekvencija [Hz]		
	4-15	15-40	iznad 40
1 AB zgrade, industrijske i masivne komercijalne zgrade	50	50	50
2 Nearmirane zgrade, rezidencijalne ili lake komercijalne zgrade	15-20	20-50	50

3.1.2 Procena dejstva vibracija na zgrade prema DIN 4150-3:1999-02

Nemački standard DIN 4150-3:1999-02: *Efekat vibracija na zgrade*, [2], definiše dopuštene vrednosti kratkotrajnih vibracija za zgradu u celini.

One su dobijene empirijski, na osnovu dugotrajnih merenja i baziraju se na maksimalnim apsolutnim vrednostima brzine izmerene u fundamentu objekta za sve tri komponente (x, y ili z).

Granične vrednosti vibracija u osnovi zgrade, prema DIN 4150-3:1999-02, prikazane su u Tabeli 3.2. Za rezidencijalne zgrade u zoni niskih frekvencija ($f < 10$ Hz), dopuštena maksimalna komponentalna brzina vibracija u fundamentu objekta je 5 mm/s.

DIN1450-3, omogućava da se procena dejstva vibracija na zgrade izvrši i na osnovu izmerenih horizontalnih komponenata vibracija na najvišem spratu zgrade, na mestu spoljašnjeg zida. Ukoliko se posmatra pomeranje na najvišem nivou zgrade, granične vrednosti horizontalnih komponenata brzina

za zgrade tipa I, II i III (Tabela 3.2) su redom: 40 mm/s, 15 mm/s i 8 mm/s.

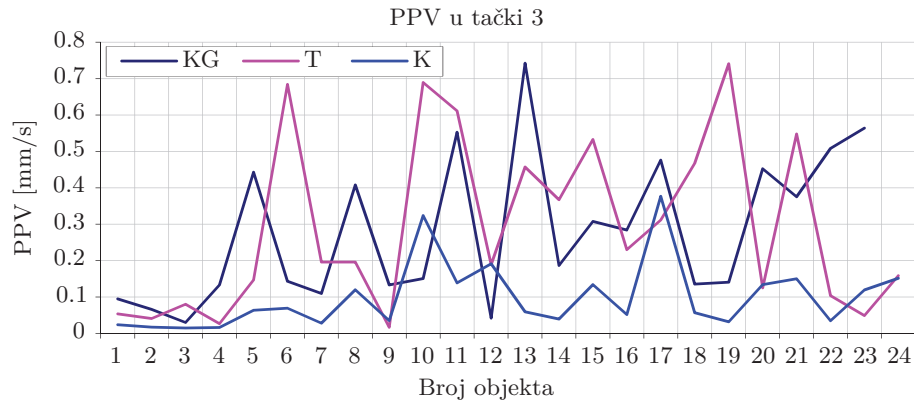
Upoređivanjem navedenih standarda uočava se velika razlika u propisanim graničnim vrednostima, što govori o tome da je primena ovih graničnih vrednosti za kozmetička oštećenja diskutabilna. Zbog toga, lice koje vrši procenu dejstva vibracija treba da poseduje određeno iskustvo u primeni propisa kako bi se dobila ispravna procena.

Tabela 3.2. DIN 4150-3: Granične vrednosti brzine vibracija u fundamentu objekta, u mm/s, za procenu dejstva kratkotrajnih vibracija na zgrade

		PPV [mm/s]		
		Frekvencija [Hz]		
Tip zgrade		<10	10-50	50-100
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

Primena navedenih propisa biće ilustrovana na merenjima koja su izvedena na 24 objekta u Beogradu, od strane Geofizičkog instituta NIS-a i Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu [6]. Izvršena su merenja i dobijene brzine vibracija u 5 karakterističnih tačaka na svakom objektu usled kretanja najmanje 3 tipa vozila. Radi lakše analize podataka načinjena je baza podataka u programu Excel. Baza podataka je omogućila jednostavan pristup rezultatima merenja, tj. vremenskom zapisu brzine vibracija u određenoj tački, i to na osnovu tipa objekta, tipa vozila i mernog mesta.

Na slici 3.1 prikazane su maksimalne brzine vibracija (PPV_{max}) izmerene u osnovi 24 objekta u Bulevaru kralja Aleksandra u Beogradu, usled prolaska T-tramvaja, K-kamiona i KG-kamiona preko gumene prepreke. Kod najvećeg broja zgrada PPV_{max} se javlja pri kretanju tramvaja, a zatim kamiona preko gumene prepreke. PPV_{max} usled kretanja kamiona su manjeg intenziteta nego od tramvaja. Nijedna od izmerenih vrednosti ne prelazi najmanju dopuštenu vrednost za rezidencijalne zgrade, čak ni za zgrade sa osetljivom opremom, prema navedenim standardima. Na osnovu toga se može izvesti veoma važan zaključak, da su vibracije od postojećeg saobraćaja u Bulevaru kralja Aleksandra takvog intenziteta da ne mogu izazvati oštećenja rezidencijalnih objekata.



Slika 3.1. PPV u mm/s izmerene u fundamentu objekata usled kretanja T-tramvaja, K-kamiona i KG-kamiona preko gumene prepreke

3.2 PROCENA DEJSTVA VIBRACIJA NA LJUDE U ZGRADAMA

Vibracije od saobraćaja mogu imati uznemiravajuće delovanje na ljude zbog neprijatnih fizičkih senzacija i buke. Sposobnost 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 vibracija na ljude u objektima usled različitih uzroka (ISO 2361-1 [7], DIN 4150-2 [1], BS 6472-1:2008 [5], i dr.). Pri tome, gotovo nijedan standard ne definiše jasno gde spadaju vibracije od saobraćaja, tako da je procena u velikoj meri zasnovana na veštini i iskustvu onog ko je vrši. Prema propisima, vibracije se u odnosu na vreme trajanja mogu svrstati u 3 grupe:

- ustaljene,
- naizmjenične i
- povremene.

Prema amplitudama, vibracija mogu biti:

- konstante,
- promenljive ili
- impulsne.

Ustaljene vibracije su one koje traju kontinuirano u određenom vremenskom periodu:

- dnevne, 16^h, od 7 do 22^h;
- noćne, 8^h, od 22 do 7^h,

i imaju skoro konstantne amplitude. Mogu biti izazvane radom mašina, ustaljenim drumskim saobraćajem, i sl.

U *naizmjenične vibracije* spadaju ustaljene vibracije koje se javljaju sa prekidima, impulsne vibracije koje se ponavljaju u određenim periodima ili ustaljene vibracije čije amplitude znatno variraju sa vremenom. Nastaju prilikom bušenja šipova, usled prolaska vozova, ili drumskog saobraćaja koji se javlja sa prekidima.

Povremene vibracije traju kratko, do 2 s, i velikih su amplituda. Javljaju ne više od 3 puta u posmatranom periodu. Uzrok tih vibracija su eksplozije i sl.

Različiti standardi koriste različite vrednosti za ocenu dejstva vibracija na ljude u zgradama. DIN-4150-2, norveški i švajcarski standard za ocenu osetljivosti ljudi na vibracije koriste brzinu vibracija, dok BS 6472-1 i ISO2631-1 koriste ubrzanje. Uporedni pregled standarda prikazan je u Izveštaju International Union of Railways (UCI), RIVAS [8].

Tehnički priručnik za procenu vibracija [9], koji se uglavnom zasniva na BS6472-1, predlaže da se za ocenu ustaljenih vibracija koristi $a_{w,rms}$, tj. *root-mean-square* ubrzanja koje je pomnoženo težinskim faktorom W , a_w . Ako je ubrzanje dato u vidu diskretnih vrednosti, onda je $a_{w,rms}$ jednako kvadratnom korenu srednje vrednosti kvadrata $a_{w,i}$:

$$a_{w,rms} = \sqrt{\frac{1}{N} \left(\sum_{n=1}^N a_{w,i}^2 \right)} \quad (3.1)$$

Težinski faktor W zavisi od frekvencije i pravca delovanja vibracija.

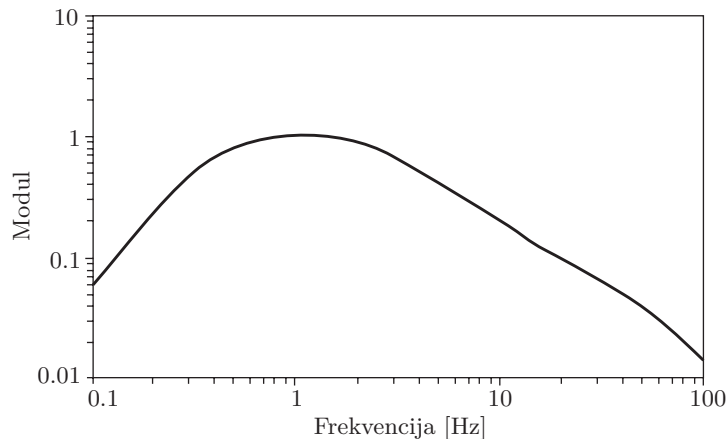
Za ocenu povremenih vibracija takođe se predlaže procena na osnovu ubrzanja, dok se za ocenu naizmjeničnih vibracija predlaže procena vibracija na osnovu VDV (*vibration dose value*), tj. veličine koja predstavlja meru za ukupnu energiju vibracija. Ovo upustvo daje i alternativno rešenje za procenu vibracija primenom maksimalne izmerene brzine vibracija, tj. PPV (*peak-particle-velocity*).

U narednom delu teksta biće prikazana analiza dejstva vibracija na ljude primenom dva najčešće korišćena standarda BS 6471-1 i DIN 4150-2 .

3.2.1 Procena dejstva vibracija na ljude u zgradama prema BS 6472-1:2008

Britanski standard BS 6472-1:2008 *Vodič za procenu izloženosti ljudi vibracijama u zgradama, Deo 1: Izvor vibracija različit od eksplozija*, [5], zajedno sa BS 6472-2:2008, zamenjuje prethodni standard BS 6472:1992. Standard definiše vrednosti za poželjne i maksimalne vrednosti vibracija kojima su izloženi ljudi u zgradama.

U ovom standardu dejstvo vibracija na ljude se određuje na osnovu izmerenog ubrzanja $a(t)$. Ubrzanje se meri u zgradi na mestu koje je najnepovoljnije po ljude u sva tri ortogonalna pravca, x, y i z . Izmereno ubrzanje se množi težinskim faktorima W_b za vertikalne i W_d za horizontalne vibracije. Postupak dobijanja težinskih funkcija definisan je u BS6841:1987, [10]. Na slici 3.2 prikazana je težinska funkcija W_b za ubrzanje u z -pravcu.



Slika 3.2. Kriva težinske funkcije W_b u vertikalnom pravcu, BS6472-1:2008

Na osnovu tako dobijenog "otežanog" ubrzanja određuje se VDV (*vibration dose value*), koji predstavlja meru za ukupnu energiju vibracija u posmatranom periodu. Vrednost VDV se dobija na osnovu relacije:

$$VDV = \sqrt[4]{\int_0^T a_w(t)^4 dt} \quad (3.2)$$

gde je:

- VDV - ukupna doza vibracija, u $\text{ms}^{-1.75}$;
 $a_w(t)$ - ubrzanje pomnoženo težinskom funkcijom W_b ili W_d , za vertikalne i horizontalne vibracije, u m/s^2 ;
 T - period trajanja vibracija, u s.

VDV služi za procenu verovatnoće pojave nepovoljnog komentara ljudi izloženih vibracijama u zgradama. Na očekivani komentar utiču, takođe, vreme izloženosti vibracijama tokom dana (dan ili noć), kao i vrsta objekta: rezidencijalni objekti, kancelarije, škole, bolnice, i sl. VDV daje realnu procenu svih tipova vibracija i korelaciju sa odgovorom subjekta.

Kriterijum za ocenu vibracija koje deluju na ljude u zgradama zavisi od frekvencije i pravca delovanja vibracija. Ako je jedan pravac vibracija dominantan, onda je dovoljno odrediti VDV samo za taj pravac. Ako se vibracije regularno ponavljaju ili su konstantne, onda je dovoljno izvršiti merenje ubrzanja samo za jedan reprezentativan uzorak, čije je vreme trajanja u s, označeno sa t_r . Dnevna doza vibracija u tom slučaju je:

$$VDV_d = \left(\frac{t_{day}}{t_r} \right)^{0.25} \times VDV_r \quad (3.3)$$

gde je t_{day} vreme dnevne izloženosti vibracijama u s, a VDV_r vrednost doze vibracija za reprezentativni uzorak, dobijena primenom jednačine 3.2.

Ako postoji N epizoda u trajanju od t_n s, čije su pojedinačne doze VDV_{t_n} , onda je ukupna doza vibracija

$$VDV_d = \left(\sum_{n=1}^N VDV_{t_n}^4 \right)^{0.25} \quad (3.4)$$

Na osnovu vrednosti $VDV_{d/n}$, koja je određena za period dana (d) ili noći (n), procenjuje se efekat vibracija na ljude u zgradama prema Tabeli 3.3.

Tabela 3.3. BS4672-1: Ocena dejstva vibracija na ljude prema VDV

Nepovoljni komentari			
Vreme i mesto	Mala verovatnoća $\text{m s}^{-1.751}$	Mogući $\text{m s}^{-1.75}$	Verovatni $\text{m s}^{-1.752}$
Rezidencijalne zgrade 16^h dan	0.2-0.4	0.4-0.8	0.8-1.6
Rezidencijalne zgrade 8^h noć	0.1-0.2	0.2-0.4	0.4-0.8

3. Procena dejstva vibracija na objekte i ljude

Za kancelarije i industrijske hale, u slučaju dnevnih vibracija koje traju 16^h , vrednosti VDV koje su date u tabeli 3.3, treba pomnožiti faktorom 2, odnosno 4.

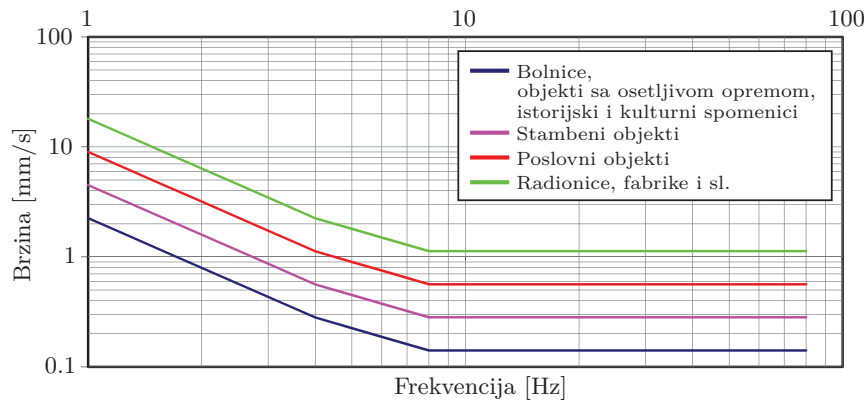
U slučaju ustaljenih vibracija, kod kojih nema velikih varijacija u amplitudama, moguće je VDV proceniti na osnovu izraza:

$$eVDV = 1.4 \times a_{w,rms} \times t^{0.25} \quad (3.5)$$

gde je:

- eVDV - procenjena vrednost doze vibracija, u $\text{ms}^{-1.75}$;
- $a_{w,rms}$ - rms ubrzanja koje je korigovano težinskom funkcijom, u ms^{-2} ;
- t - vreme trajanja izloženosti vibracijama, u s.

Pošto određivanje VDV zahteva dosta napora i poznavanje analize signala, efekat vibracija na ljude prema [9] može se odrediti i na osnovu brzine vibracija izmerene u izabranoj tački. Za frekvencije iznad 8 Hz dovoljno dobra procena o dejstvu vibracija na ljude se dobija na osnovu maksimalne izmerene brzine, PPV (*peak-particle-velocity*) u sredini ploče na posmatranoj etaži gde se očekuju najveće vibracije.



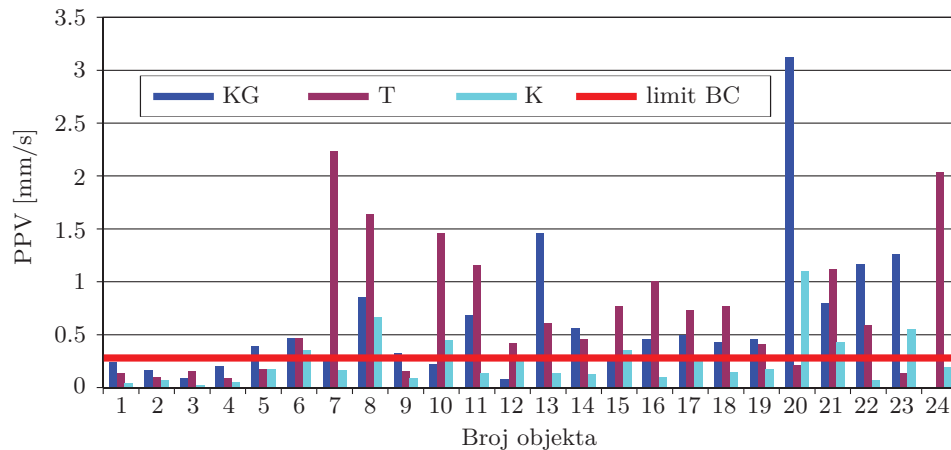
Slika 3.3. Dozvoljene amplitude vertikalnih vibracija, u mm/s, prema BS 6472:1992

Na slici 3.3 prikazan je prag vibracija, tj. maksimalna dopuštena brzina za vertikalne vibracije u funkciji od tipa objekta i frekvencije, prema BS 6472, koji preporučuje *Department of Environment and Conservation* [9]. 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.

Ova preporuka je iskorišćena da se proceni dejstvo vibracija na ljude u 24 izabrana objekata u Bulevaru kralja Aleksandra u Beogradu. Na slici 3.4 prikazane su PPV vertikalnih vibracija, izmerenih u tačkama na sredini ploče na poslednjoj etaži svakog od objekata, usled kretanja sledećih vozila:

- T - tramvaj,
- K - kamion težine 5 t,
- KG - kamion preko gumene prepreke.



Slika 3.4. PPV za vertikalne vibracije na ploči poslednje etaže, usled kretanja T-tramvaja, K-kamiona i KG-kamiona preko prepreke, u mm/s

Horizontalna linija na dijagramu definiše graničnu vrednost PPV za rezidencijalne objekte za frekvencije veće od 8 Hz prema BS 6472:1992. Limit za PPV je prekoračen kod 16 od 23 objekta u slučaju kretanja tramvaja, kod 15 od 22 objekta u slučaju kamiona preko gumene prepreke i kod 8 od 24 objekta u slučaju kamiona. Dobijeni rezultati ukazuju na činjenicu da su ljudi u zgradama duž Bulevara kralja Aleksandra izloženi vibracijama od saobraćaja iznad dozvoljene granice. Pošto su analizirani samo navedeni događaji, potrebno je sprovesti dodatna ispitivanja, koja bi, pre svega, obuhvatila duži vremenski period i statističkom analizom dala bolju procenu efekta vibracija.

3.2.2 Procena dejstva vibracija na ljude u zgradama prema DIN 4150-2:

Nemački standard DIN 4150-2: *Izloženost ljudi vibracijama u zgradama*, [1], koristi vremensku istoriju brzine vibracija $v(t)$ za ocenu dejstva vibracija na ljude. Standard propisuje maksimalnu "otežanu" snagu vibracija $KB_{Fmax} = \max[KB_F(t)]$, gde je $KB_F(t)$ *running rms* (root-mean-square) signala $KB(t)$.

$KB(t)$ predstavlja signal brzine $v(t)$ normiran i "otežan" frekventno zavisnim faktorom koji je definisan u standardu DIN 45669 [3]. $KB(t)$ se može odrediti na dva načina, [11]. Jedan način, podrazumeva analizu u frekventnom domenu uz primenu funkcije transformacije definisanu u DIN 45669.

Funkcija filtera definisana je kompleksnom transfer funkcijom:

$$H_{unom}(if) = \frac{1}{\left[1 - i\sqrt{2}\frac{0.8Hz}{f} - \left(\frac{0.8Hz}{f_{max}}\right)^2\right] \left[1 + i\sqrt{2}\frac{0.8Hz}{f} - \left(\frac{0.8Hz}{f_{max}}\right)^2\right]} \quad (3.6)$$

u kojoj je $f_{max} = 80 Hz$.

Ljudi različito reaguju na vibracije u zavisnosti od frekvencije vibracija, položaja tela i pravca vibracija. Zbog toga se filtrirani signal dodatno modifikuje primenom frekventno zavisne kompleksne funkcije:

$$H_{Bnom}(if) = \frac{1}{1 - i\frac{5.6Hz}{f}} \quad (3.7)$$

gde je f frekvencija u Hz, a $i = \sqrt{-1}$.

Drugi način određivanja $KB(t)$ se zasniva na analizi signala u vremenskom domenu. Izmereni signal $v(t)$ propušta se kroz *high pass* i *low pass* 2-polni *Butterworth*-ov filter, gde je *high pass* frekvencija je $0.8 Hz$, a *low pass* frekvencija $80 Hz$.

Kada se odredi $KB(t)$ vrednost $KB_F(t)$ se dobija ili kao *running rms* od $KB(t)$

$$KB_F(t) = \left[\frac{1}{\tau} \sqrt{\int_{\xi=0}^t KB(\xi)^2 d\xi} \right]^2 \quad (3.8)$$

ili na osnovu uprošćenog izraza, koji je dat u DIN 4150-2:

$$KB_F(t) = \sqrt{\frac{1}{\tau} \int_{\xi=0}^t e^{-\frac{t-\xi}{\tau}} KB^2(\xi) d\xi} \quad (3.9)$$

U jednačinama 3.8 i 3.9 veličina τ predstavlja vreme u kome se vrši osrednjavanje signala, a ξ vremensku promenljivu. DIN 4150-2 koristi tzv. *fast running rms*, za koji je $\tau = 0.125\text{s}$, pa otuda i oznaka KB_F . Za razliku od DIN 4150-2, ostali standardi koriste duže periode osrednjavanja, najčešće je $\tau = 1\text{ s}$.

Potprogram za određivanje KB_{Fmax}

```
% FUNKCIJSKI PODPROGRAM ZA SRACUNAVANJE KBf PREMA DIN 45669-1
% Potrebno je: 1) Ucitati vektor brzine v(t)
%              2) Uneti vremenski korak zapisa dt
%              3) Sracunati Nyquistovu frekvenciju fs=1/dt

% Butterwordov filter 2-polni filter
f1 = 0.8; % cut off frequencu high pass
f2 = 100; % cut off frequencu low pass
nyq = fs/2; % Nyquist frequency, gde je fs=1/dt

% 1) bandlimiting filter
[bl,al] = butter(2,f2/nyq,'low'); %low pass filter
[bh,ah] = butter(2,f1/nyq,'high'); %high pass filter

% 2) frequency weighting filter
Bf = [1 0];
Af = [1 11.2*pi];
[bf af] = bilinear(Bf,Af,fs,10);

% Odredjivanje KB(t)
KB = filter(bf,af,filter(bh,ah,filter(bl,al,v)));

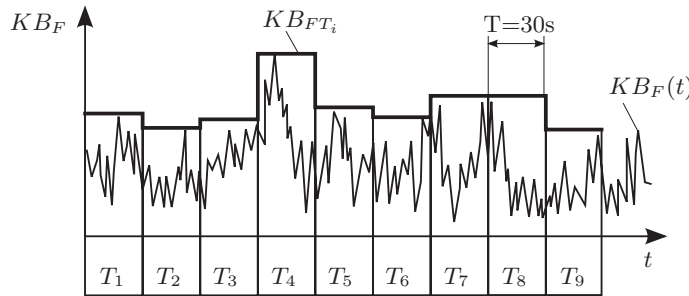
% Izracunavanje KBf
% KBf = running root-mean-square od KB(t)
tau = 0.125; %vremenska konstanta za running RMS u DIN-u

KBf = zeros(nv,1);
pom = zeros(nv,1);
for i=1:nv
    pom(i)=(KB(i).^2)*(exp(t(i)/tau));
end
for i=2:nv
    pom1=trapz(t(1:i),pom(1:i));
    KBf(i)=sqrt((1/tau)*exp(-t(i)/tau)*pom1);
end

% Odredjivanje KBfm
KBfm = max(KBf);
index=find(KBf==max(KBf));
```

U okviru istraživanja napisan je program za sračunavanje $KB(t)$, $KB_F(t)$ i maksimalne vrednosti $KB_{Fmax} = \max(KB_F(t))$ primenom programa MATLAB [12]. Funkcijski potprogram je prikazan u prethodnom delu teksta.

Pošto su vibracije od saobraćaja stohastičkog karaktera, analizom jednog, nedovoljno reprezentativnog signala može se načiniti gruba greška. Zbog toga DIN 4150-2 preporučuje da se brzina vibracija meri duži vremenski period (16h danju, 8h noću), i da se dobijena vrednost za $KB_F(t)$ izdeli na taktove dužine trajanja $T=30$ s, slika 3.5.



Slika 3.5. KB_{FT_i}

Ako je maksimalna vrednost $KB_F(t)$ u jednom T_i , KB_{FT_i} , onda je srednja vrednost faktora jednaka

$$KB_{Fm} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N KB_{FT_i}^2} \quad (3.10)$$

gde je N broj taktova. Ako je u nekom taktu $KB_{FT_i} < 0.1$ onda se on izostavlja iz sume.

Maksimalna vrednost KB_F u relevantnom periodu procene, KB_{Fmax} , poredi se sa pragom vibracija datim u Tabeli 3.4, na sledeći način:

- a) Ako je $KB_{Fmax} \leq A_u$ vibracije su ispod propisanog praga;
- b) Ako je $KB_{Fmax} > A_o$ vibracije su veće od propisanog praga;
- c) Za retke, kratkotrajne vibracije standard je zadovoljen ako je $KB_{Fmax} < A_o$;
- d) Za učestale događaje, ako je $A_u < KB_{Fmax} < A_o$ potrebno je sračunati srednju snagu vibracija KB_{FT_r} prema jednoj od jednačina (3.11a) ili (3.11b) i uporediti je sa A_r iz Tabele 3.4. Ako je $KB_{FT_r} < A_r$ standard je zadovoljen.

Tabela 3.4. Prag za procenu efekta vibracija na komfor ljudi u zgradama prema DIN 4150:2

Izloženost	Dan			Noć		
Mesto	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	0.01	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

Ciklusi u kojima se javljaju vibracije mogu biti razdvojeni dužim vremenskim periodima bez vibracija, kao što je npr. slučaj sa prolaskom vozova. Tada je vreme izloženosti vibracijama, T_e , kraće od vremena evaluacije, T_r . Vreme evaluacije, T_r , je vreme koje obuhvata period od 6-22 h tokom dana, tj. od 22-6 h noću. Period mirovanja, tj. odmora, za dane od ponedeljka do subote, je od 6-7 h tj. 19-22 h, a nedeljom od 6-22 h. Da bi se uzeo u obzir period mirovanja, vrednost faktora KB_{FT} dobijena za period evaluacije T_r se dodatno "otežava". KB_{FT_r} za period mirovanja se određuje na osnovu jednog od dva navedena izraza, a u zavisnosti od broja perioda, T_e u signalu:

$$KB_{FT_r} = \sqrt{\frac{1}{T_r} \sum_j T_{e,j} KB_{FTm,j}^2} \quad (3.11a)$$

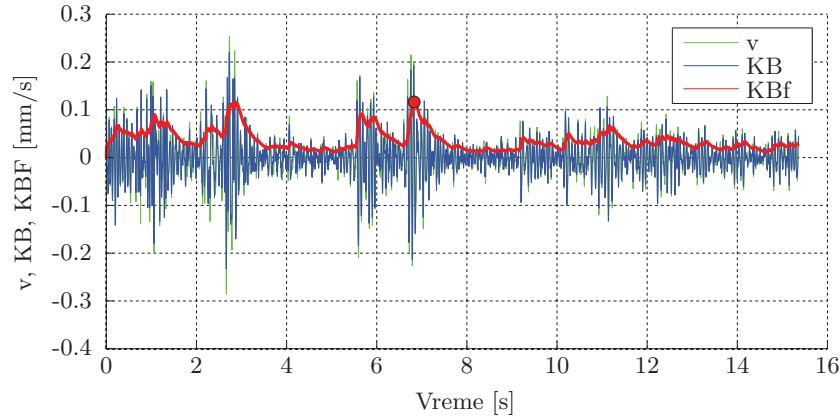
$$KB_{FT_r} = KB_{FTm} \sqrt{\frac{T_e}{T_r}} \quad (3.11b)$$

gde je:

- T_r - period evaluacije (DIN 45669: 16 h danju, 8 h noću),
- T_e - period izloženosti vibracijama, izvan perioda mira,
- $T_{e,j}$ - parcijalni period izloženosti vibracijama izvan perioda mira,
- KB_{FTm} - snaga vibracija za period T_e ,
- $KB_{FTm,j}$ - snaga vibracija za period $T_{e,j}$.

Jednačina (3.11a) se koristi kada imamo nekoliko perioda $T_{e,j}$ u signalu, dok jednačinu (3.11b) primenjujemo u slučaju samo jednog perioda T_e .

Primenom opisanog postupka napisan je program u MATLAB-u [12] za određivanje $KB_F(t)$ i KB_{Fm} , koji je dat u Dodatku poglavlja.



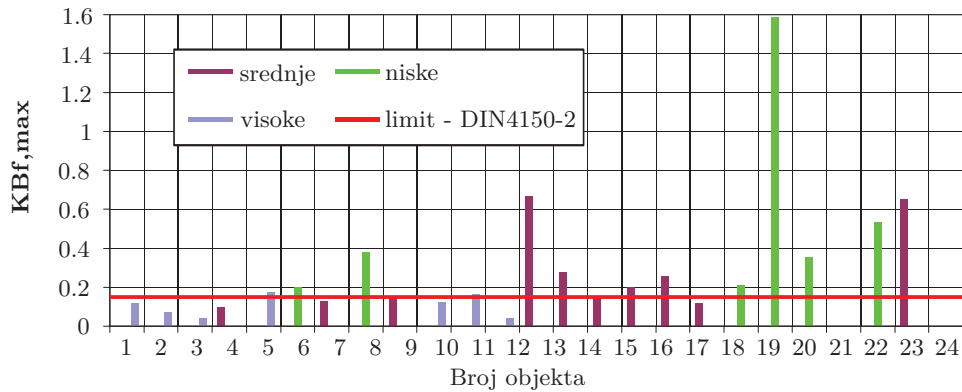
Slika 3.6. $v(t)$ i KB_F za kamion preko gumene prepreke

Primenom programa sračunate su vrednosti faktora $KB_F(t)$ i KB_{Fm} za vertikalne vibracije izmerene na sredini ploče na poslednjoj etaži zgrade u Bulevaru kralja Aleksandra. Na slici 3.6 prikazane su vremenske istorije brzine $v(t)$ i faktora $KB_F(t)$ za slučaj prolaska kamiona preko gumene prepreke.

Postupak je ponovljen na 23 objekta u Bulevaru kralja Aleksandra, tj. za sve vertikalne vibracije izmerene na vrhu zgrada sračunate su vrednosti navedenih faktora usled prolaska kamiona preko gumene prepreke. Dobijene vrednosti KB_{FTm} su prikazane na slici 3.7. Da bi se utvrdilo dejstvo prolaska kamiona preko gumene prepreke na objekte, u zavisnosti od njihove spratnosti, objekti su razvrstani u sledeće tri kategorije:

- niske zgrade (≤ 3 sprata),
- srednje zgrade (od 3 – 7 spratova) i
- visoke zgrade (≥ 7 spratova).

Kamion preko gumene prepreke izaziva vibracije za koje je $KB_{Fm} > A_u$ u slučaju 13 od 23 zgrade, od čega su 6 niske, 5 srednje i 2 visoke zgrade, slika 16. Očigledno je da, prema ovom standardu, vibracije od teškog saobraćaja prekoračuju dozvoljeni prag vibracija za dejstvo na ljude. Potrebno je sprovesti dodatna ispitivanja, tokom dužeg perioda, kao i anketiranje stana, da bi se na osnovu toga realnije procenio uticaj vibracija na ljude u posmatranim objektima.



Slika 3.7. KB_{FTm} usled kamiona preko gumene prepreke za 23 objekta u Bulevaru kralja Aleksandra

3.3 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. U ovom radu prikazana je 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 zainteresovanim da dopune svoje znanje i otklone eventualne nedoumice.

LITERATURA

- [1] DIN 4150-2:1999: *Structural vibration, Part 2: Human exposure to vibration in buildings*, German institution for standard, Berlin, Germany.
- [2] DIN 4150-3:1999: *Structural vibration, Part 3: Effects of vibration in structures*, German institution for standard, Berlin, Germany.

- [3] DIN 45669:1985: *Part 1: Measuring equipment*, German institution for standard, Berlin, Germany.
- [4] BS 7385:1993: *Evaluation and measurement for vibration in buildings. Part 2: Guide to damage levels from ground borne vibration*, British standard institution, London, UK.
- [5] BS 6472-1:2008: *Guide to Evaluation of human exposure to vibration in buildings, Part 1: Vibration sources other than blasting*, British standard institution, London, UK.
- [6] M. Petronijević, M. Nefovska-Danilović, *Geodinamička analiza osetljivosti objekata na dejstvo postojećih vibracija prema postojećim standardima i procena njihove osetljivosti na dejstvo lakog metroa*, tech. rep., Beograd, Srbija: GEOZAVOD i Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu, 2006.
- [7] ISO 2631-1:1997: *Mechanical vibration and shock - Evaluation of human exposure to whole-body vibration - Part 1: General requirements*, International standard organization, London, UK.
- [8] RIVAS - Railway Induced Vibration Abatement Solutions Collaborative Project, *Review of existing standards, regulations and guidelines, as well as laboratory and field studies concerning human exposure to vibration*, website: www.rivas-project.eu: International Unions for Railways, 2012.
- [9] EPA, *Assessing Vibration: a technical guideline*, tech. rep., Department of Environment and Conservation, 2006, p. 72.
- [10] BS 6841:1987: *Guide to Measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock*, tech. rep.
- [11] I. Turnen-Rise et al., "Vibration in dwellings from road and rail traffic - Part I: a new Norwegian measurement standard and classification system", *Applied Acoustic* 64 (2003), pp. 71–87.
- [12] MathWorks Inc. The Language of Technical Computing, *MATLAB 2013a*.