

Vibracije od saobraćaja:
nastanak, merenje, predviđanje i procena
njihovog dejstva na objekte i ljude

Urednik
Mira Petronijević

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Akadska misao

Beograd 2017.

Vibracije od saobraćaja: nastanak, merenje, predviđanje i procena njihovog dejstva na objekte i ljude

Urednik

Prof. dr Mira Petronijević

Recenzenti

Prof. Emeritus dr Radimir Folić

Fakultet Tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Prof. u penziji, dr Stanko Brčić

Građevinski fakultet, Univerzitet u Beogradu

Prof. dr Đorđe Ladinović

Fakultet tehničkih nauka, Univerzitet u Novom Sadu

Izdavači

Građevinski fakultet Univerziteta u Beogradu

Akadska misao, Beograd

Dizajn naslovne strane

Zorica Marković, akademski slikar

Štampa

Akadska misao, Beograd

Tiraž

200 primeraka

ISBN 978-86-7466-704-0

Predgovor

Monografija *Vibracije od saobraćaja: nastanak, merenja i procena njihovog dejstva na objekte i ljude* je rezultat dugogodišnjeg rada na projektu TR36046: "Istraživanje dejstva vibracija na ljude i objekte u cilju održivog razvoja gradova", Ministarstva prosvete, nauke i tehnološkog razvoja Republike Srbije. Svi autori su članovi Katedre za tehničku mehaniku i teoriju konstrukcija i Katedre za građevinsku geotehniku, Građevinskog fakulteta Univerziteta u Beogradu.

Problem vibracija od saobraćaja u gradovima postaje sve veći. Nastao je kao rezultat ubrzanog razvoja gradova što je automatski dovelo do porasta, kako drumskog tako i železničkog saobraćaja u njima. Vibracije od saobraćaja, kao niskofrekventni poremećaji, malog intenziteta, ne mogu izazvati rušenje objekata niti gubitke ljudskih života, ali mogu izazvati sitna oštećenja, naročito istorijskih objekata i mogu veoma neprijatno delovati na ljude i osetljivu opremu u objektima. U cilju sprečavanja nepovoljnog dejstva vibracija od saobraćaja u gradovima potrebno je definisati kriterijume za dozvoljene vibracije i preduzeti određene mere da se vibracije zadrže u dozvoljenim granicama. U tome veoma važnu fazu predstavlja merenje vibracija. Vibracije od saobraćaja su stohastičkog karaktera i rezultati merenja u mnogome zavise od doba dana kada je izvršeno merenje, frekvencije saobraćaja, kao i drugih spoljašnjih faktora. Sve navedene faktore treba uzeti u obzir kod definisanja protokola za merenje vibracija. Takođe, stohastički karakter ove pobude zahteva primenu odgovarajućih metoda u analizi.

Navedeni problemi i nedoumice naveli su istraživače u nizu razvijenih zemalja (Velika Britanija, Nemačka, Norveška, Švedska, SAD, Japan) da se intenzivno bave ovim problemom u poslednjih 20-tak godina. Kao rezultat istraživanja nastali su propisi kojima se definiše način merenja vibracija od saobraćaja, postupci analize signala i metode procena dejstva vibracija na objekte u zgradarstvu, ljude i osetljivu opremu u njima.

Sa druge strane, u našoj zemlji ne postoji odgovarajuća regulativa, a problemu vibracija od saobraćaja se pridaje relativno mali značaj. Žalbe građana u gradovima i problemi koje vibracije prouzrokuju u objektima sa osetljivom opremom se rešavaju sporadično, od slučaja do slučaja.

Cilj istraživanja na projektu je bio da se prouče postojeći međunarodni standardi i da se na osnovu toga daju odgovarajuće preporuke za merenje

i analizu vibracija od saobraćaja, kao i da se razviju sopstvene empirijske i numeričke metode za predviđanje vibracija u zgradama.

Monografija obuhvata 6 poglavlja. U okviru svakog od njih je dat pregled najznačajnijih istraživanja i spisak literature. U prvom poglavlju, Vibracije od saobraćaja, daje se kratak osvrt na nastanak vibracija i postupak merenja vibracija. Drugo poglavlje, Dinamičke karakteristike tla, se bavi ponašanjem tla pri cikličnom dinamičkom opterećenju i određivanjem dinamičkih karakteristika tla: modula smicanja i prigušenja. Treće poglavlje, Procena dejstva vibracija na objekte i ljude, bavi se analizom i ocenom vibracija primenom nemačkih standarda: DIN 4150-1, DIN 4150-3 i DIN 45669, kao i britanskih standarda: BS 7538 i BS 6472. Četvrto poglavlje daje prikaz postojećih empirijskih modela za procenu vibracija. Na osnovu merenja na objektima duž trase lakog metroa, definisane su transfer funkcije za objekte niske, srednje i visoke spratnosti, ponaosob, koje mogu da posluže za empirijsko određivanje vibracija u objektima različite spratnosti. Peto poglavlje, Numerički modeli, daje pregled postojećih numeričkih modela, kao i originalne numeričke modele za predviđanje vibracija dobijene primenom dinamičke analize u frekventnom domenu. Autori su koristeći metodu integralne transformacije i metodu spektralnih elemenata razvili jednodimenzionalni model (1D), kao i 2D i 3D modele za predviđanje vibracija zgrada. Vibracije određene primenom numeričkih modela verifikovani su upoređivanjem sa vibracijama dobijenim merenjima na realnim objektima. Šesto poglavlje se bavi modeliranjem sile točka, koja nastaje kretanjem vozila po neravnomernoj podlozi. Primenom MATLAB modula *Simulink* sračunate su sile točka za različite modele: 1/4 vozila sa 2 stepena slobode pomeranja (2DOF), 1/2 vozila sa 2DOF i 4DOF. U okviru poglavlja prikazan je postupak generisanja profila puta primenom standarda ISO 8608.

Urednik ove monografije želi posebno da se zahvali GEOZAVODU (Geološki institut Republike Srbije) i Geofizičkom institutu NIS-a, sa kojima je učestvovao u realizaciji projekta "Geodinamička analiza osetljivosti objekata na dejstvo vibracija prema postojećim standardima i procena njihove osetljivosti na dejstvo lakog metroa" u Beogradu. Merenja vibracija od saobraćaja, koja su sprovedena na preko 50 objekata duž trase budućeg lakog metroa od strane Geofizičkog instituta NIS-a, predstavljala su bazu za formulisanje empirijskog modela za predviđanje vibracija, sa jedne strane, a sa druge strane, omogućila su verifikaciju numeričkih modela prikazanih u Monografiji.

Urednik

Sadržaj

Predgovor

iii

M. Petronijević, M. Nefovska Danilović

1	Nastanak i dejstvo vibracija od saobraćaja na objekte i ljude	1
1.1	Nastanak vibracija	1
1.1.1	Faktori koji utiču na intenzitet i frekventni sastav vibracija	3
1.2	Merenje vibracija	5
1.2.1	Merni instrumenti i akvizicija podataka	5
1.2.2	Procedura merenja	7

M. Marjanović, S. Jocković, M. Vukićević

2	Dinamičke karakteristike tla	11
2.1	Uvod	11
2.2	Ekvivalentni linearni dinamički parametri tla	13
2.2.1	Kelvin-Voight-ov model materijala	13
2.2.2	Modul smicanja	14
2.2.3	Relativno prigušenje	16
2.3	Određivanje dinamičkih karakteristika tla	18
2.3.1	Terenske metode	18
2.3.2	Laboratorijske metode	20
2.3.3	Empirijske formule	21
2.4	Dinamički i statički modul smicanja	26
2.5	Primer proračuna dinamičkih karakteristika tla	27
2.5.1	Tangentni modul smicanja G_0	28
2.5.2	Kriva redukcije modula smicanja G/G_0	29
2.5.3	Kriva prigušenja	30

M. Petronijević, M. Nefovska Danilović

3 Procena dejstva vibracija na objekte i ljude	35
3.1 Procena dejstva vibracija na zgrade	36
3.1.1 Procena dejstva vibracija na zgrade prema BS 7385: Part2:1993	36
3.1.2 Procena dejstva vibracija na zgrade prema DIN 4150- 3:1999-02	37
3.2 Procena dejstva vibracija na ljude u zgradama	39
3.2.1 Procena dejstva vibracija na ljude u zgradama prema BS 6472-1:2008	41
3.2.2 Procena dejstva vibracija na ljude u zgradama prema DIN 4150-2:	45
3.3 Zaključak	50

M. Petronijević, M. Radišić

4 Empirijski modeli za predviđanje vibracija	53
4.1 Železnički saobraćaj	54
4.2 Drumski saobraćaj	55
4.3 Empirijski model za predviđanje vibracija od saobraćaja u zgradama različite spratnosti u Beogradu	57

M. Petronijević, M. Nefovska Danilović, M. Radišić, D. Kovačević

5 Numerički modeli za predviđanje vibracija	67
5.1 Metoda spektralnih elemenata	68
5.1.1 Dinamička matrica krutosti aksijalno napregnutog štapa	68
5.1.2 Dinamička matrica krutosti Euler-Bernoulli-eve grede	70
5.1.3 Dinamička matrica krutosti složeno napregnute grede	73
5.1.4 Dinamička matrica krutosti Levy-jeve ploče	73
5.1.5 Dinamička krutost ploče prema Auersch-u	79
5.2 Dinamička krutost temelja fundiranog na elastičnom polu- prostoru	81
5.2.1 Rešenje talasne jednačine primenom ITM	82
5.2.2 Dinamički odgovor krutog temelja na poluprostoru . .	86
5.3 Jednostavni numerički modeli za predviđanje vibracija od sa- obraćaja AB skeletnih konstrukcija	92

5.3.1	Model zid-fleksibilna ploča-tlo	93
5.3.2	Verifikacija numeričkog modela	100
5.4	Numerički model za procenu vibracija ravnih okvirnih konstrukcija	112
5.4.1	Vibracije okvira usled dejstva saobraćaja	113
5.4.2	Vertikalne vibracije 3D okvira usled dejstva pokretne sile	122

M. Jočković, A. Šarkić Glumac, M. Petronijević

6	Modeliranje sile točka	131
6.1	Matematički modeli vozila	131
6.1.1	Statički model vozila	131
6.1.2	Dinamički model vozila	132
6.2	Primena Simulink-a za modeliranje pokretne sile točka . . .	136
6.2.1	Rešenje diferencijelnih jednačina i validacija Simulink modela	138
6.3	Definisanje profila puta	141

1 Nastanak i dejstvo vibracija od saobraćaja na objekte i ljude

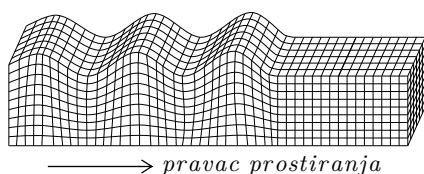
M. Petronijević, M. Nefovska Danilović

1.1 NASTANAK VIBRACIJA

Vibracije od saobraćaja su niskofrekventni poremećaji koji nastaju kretanjem drumskih ili šinskih vozila.

U oba slučaja, vibracije nastaju usled delovanja dinamičkih i oscilatornih sila točkova vozila. Dinamičke sile su sile udara koje se javljaju na kontaktu točka sa neravninama na površini puta ili na površini šine. One generišu vibracije u tlu čije predominantne frekvencije zavise od svojstvenih frekvencija oscilovanja tla. Oscilatorne sile su posledica oscilacija osovine točkova vozila. Te sile generišu vibracije čija frekvencija zavisi od načina vešanja, razmaka točkova, mase i brzine kretanja vozila.

Vibracije od saobraćaja na površini terena se prenose na sve strane od izvora kroz tlo putem Rejljevih (Rayleigh) talasa. To su površinski talasi koji se generišu na površini terena i koji se u literaturi nazivaju još i R-talasi.



Slika 1.1. Rejljevi talasi

Na slici 1.1 prikazano je kretanje čestica na površini tla pri prostiranju R-talasa, koje se odvija u vidu retrogradnih elipsi. Amplitude R-talasa opadaju sa rastojanjem od izvora usled geometrijskog i materijalnog prigušenja. Posledica toga je da se sa porastom rastojanja od izvora vibracija smanjuje intenzitet vibracija. Funkcija opadanja amplitude brzine vibracija sa rastojanjem, tj. funkcija atenuacije za R-talase, na rastojanju R , koje je veće od referentnog rastojanja R_1 , definisana je u standardu DIN-4150-1 [1]

sledećim izrazom:

$$v = v_1 \left(\frac{R_1}{R} \right)^n D \quad (1.1)$$

gde je:

- v - amplituda brzine oscilovanja na rastojanju R , u mm/s;
- v_1 - amplituda brzine oscilovanja na rastojanju R_1 , u mm/s;
- R_1 - referentno rastojanje, u m;
- R - aktuelno rastojanje od izvora, u m;
- n - koeficijent geometrijske atenuacije,
- D - faktor za materijalno prigušenje.

Referentno rastojanje definisano je kao granica između *near field*¹ i *far field*²

$$R_1 = \frac{a}{2} + \lambda_R \quad (1.2)$$

gde je

a - dimenzija izvora u pravcu koji je paralelan sa pravcem prostiranja talasa;

λ_R - talasna dužina R-talasa.

Geometrijska atenuacija je rezultat opadanja energije talasa sa rastojanjem od izvora. Koeficijent geometrijskog prigušenja n zavisi od tipa izvora (linijski ili tačkasti) i tipa talasa (zapreminski ili površinski). Prema Bahmanu [2], za R-talase u slučaju linijskog, impulsnog izvora vibracija, može se usvojiti da je koeficijent $n = 0.5$.

Faktor D je definisan izrazom

$$D = e^{-\alpha(R-R_1)} \quad (1.3)$$

gde je α koeficijent materijalnog prigušenja, u m^{-1} :

$$\alpha = \frac{2\pi\xi}{\lambda}. \quad (1.4)$$

Koeficijent materijalnog prigušenja zavisi od relativnog prigušenja za tlo, ξ , i talasne dužine, $\lambda = c/f$, gde je c brzina prostiranja relevantnih talasa, u m/s, a f frekvencija, u Hz. DIN 4150-1 preporučuje da vrednost ξ ne bude veća od 0.01. Vrednosti koeficijenta α u zavisnosti od tipa tla prikazane su u Tabeli 1.1.

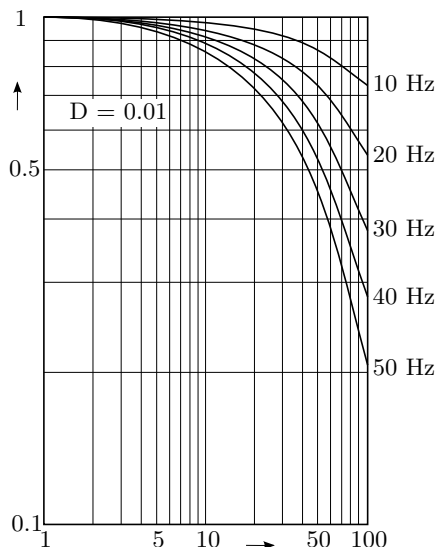
Zavisnost odnosa v/v_1 sa promenom rastojanja R/R_1 prikazana je na slici 1.2.

¹tlo u okolini izvora

²tlo na dovoljno velikom rastojanju od izvora vibracija

Tabela 1.1. Vrednost faktora α

Tip tla	Vrednost koeficijenta α [m^{-1}]
vodom zasićena tla	0.004 – 0.12
les	0.10
pesak i prašina	0.04



Slika 1.2. Opadanje amplitude brzine sa rastojanjem u funkciji frekvencije ($\xi = 0.01$, brzina smičućih talasa $c_s = 200$ m/s), [1]

1.1.1 Faktori koji utiču na intenzitet i frekventni sastav vibracija

Na intenzitet vibracija izazvanih dejstvom saobraćaja utiče veoma mnogo faktora, od kojih su najznačajniji sledeći:

- tip vozila, načina vešanja i brzina kratanja vozila,
- stanje kolovoza,
- geološke karakteristike tla,
- rastojanje objekta od saobraćajnice,
- tip konstruktivnog sistema i međuspratnih tavanica zgrade,
- način fundiranja objekta.

Drumska i šinska vozila izazivaju vibracije različitog opsega frekvencija, koje su u principu niže za drumska vozila. Težina vozila je takođe značajan faktor

koji utiče na vibracije od saobraćaja. Što je vozilo teže, amplitude vibracija su veće. U slučaju drumskog saobraćaja, važi pravilo da što je kolovoz sa više neravnina i što je veća brzina kretanja vozila, amplitude vibracija su veće. Vozila iste težine i brzine kretanja mogu izazvati vibracije različitog intenziteta usled različitog sistema vešanja. Uticaj sistema vešanja zavisi od neravnina puta i brzine kretanja vozila. Ako je kolovoz ravan a brzina kretanja vozila mala, uticaj vešanja je zanemarljiv, dok na neravnom putu pri većoj brzini kretanja efekat vešanja postaje značajniji. Hunaidi u radu [3] navodi rezultate eksperimenta u kome su potvrđene navedene činjenice. Analizirao je uticaj vešanja i brzine kretanja na primeru dva različita vozila iste težine: autobusa i kamiona. Pri brzini kretanja vozila od 50 km/h na neravnom putu amplitude vibracija usled kretanja autobusa bile su dva puta veće nego usled kretanja kamiona, dok su prilikom kretanja oba vozila brzinom od 25 km/h dobijene iste amplitude vibracija.

Intenzitet 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 prenošenju vibracija zbog mogućnosti pojave rezonance. Svojstvena frekvencija f nadsloja tla iznad osnovne stene zavisi od krutosti tla i debljine sloja H . Ona je proporcionalna brzini smičućih talasa c_s (tj. modulu smicanja G), a obrnuto proporcionalna debljini sloja H :

$$f = \frac{c_s}{4H} \quad [\text{Hz}] \quad (1.5)$$

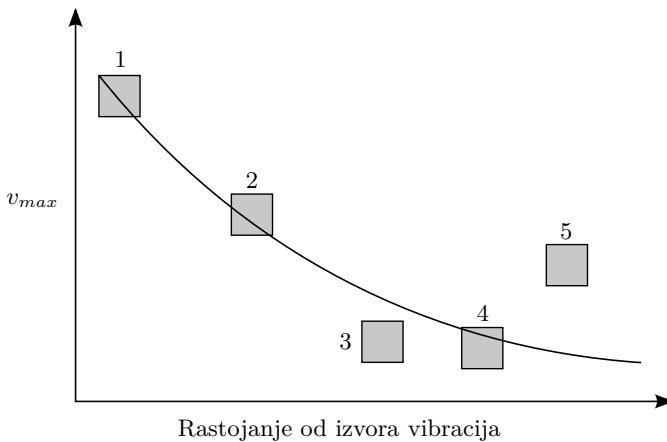
Brzina smičućih talasa zavisi od modula smicanja tla G i gustine ρ i jednaka je $c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$.

Primećeno je da su vibracije od saobraćaja u porodičnim zgradama najveće pri kretanju vozila iznad mekog sloja tla, kao što je npr. glina, debljine od 7 do 15 metara. U tom slučaju svojstvene frekvencije nadsloja mogu da se poklope sa svojstvenim frekvencijama vibracija tipičnih porodičnih zgrada, tj. njihovih tavanica. Posledica toga je povećanje tj. amplifikacija amplituda vertikalnih vibracija od saobraćaja.

Amplitude vibracija opadaju eksponencijalno sa rastojanjem, Eq. (1.1), tako da je na dovoljno velikoj udaljenosti objekta od saobraćajnice (>40 m) uticaj vibracija od saobraćaja neznatan.

Istraživanja Hunaidija [3] su pokazala da putni tj. drumski saobraćaj u gradovima generiše vibracije čije su frekvencije između 5 i 25 Hz. Pri tome, amplitude izmerenih brzina se kreću od 0.05 do 25 mm/s, dok se amplitude ubrzanja kreću u opsegu od 0.005 do 2.0 mm/s².

Na slici 1.3 prikazana je zavisnost maksimalne brzine vibracija od položaja



Slika 1.3. Karakter prostiranja vibracija od izvora do objekta, [4]

merne tačke prema Ziegleru, [5]. Amplitude vibracija, izazvanih drumskim saobraćajem, usled prolaska kroz tlo opadaju od mesta nastanka (tačka 1) do objekta (tačka 2). Atenuacija (opadanje) vibracija je posledica radijacijskog i materijalnog prigušenja u tlu. Od spoljašnjeg zida objekta (tačka 2) do podruma (tačka 3) obično dolazi do dodatnog smanjenja vibracija, koje se zatim kroz vertikalne elemente prostiru do vrha konstrukcije. Pri tome, amplitude vibracija se sa zidova prenose na međuspratne tavanice izazivajući dodatne vibracije istih. Prolaskom kroz elemente konstrukcije, amplitude vibracija se mogu povećavati ili smanjivati. U zgradama najčešće dolazi do amplifikacija tj. povećanja vibracija usled saobraćaja.

1.2 MERENJE VIBRACIJA

1.2.1 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 3 faze, [6]:

- prikupljanje podataka, odnosno merenje,
- priprema i ocena podataka za obradu,
- analiza merenja.

Pod prikupljanjem podataka podrazumeva se upotreba odgovarajućeg mernog instrumenta kako bi se određena fizička pojava transformisala u analogni signal. Analogni signal je povezan sa nekom fizičkom veličinom - naj-

češće je ta veličina napon. Kao merni instrumenti mogu se koristiti akcelometri, kojima se mere ubrzanja, ili geofoni kojima se mere brzine. Prilikom izbora mernog instrumenta treba voditi računa o njegovoj osetljivosti, odnosno opsegu frekvencija koji je moguće izmeriti tim instrumentom.



Slika 1.4. Položaj i snimak odozgo geofona L-22-3D/E, SERCEL

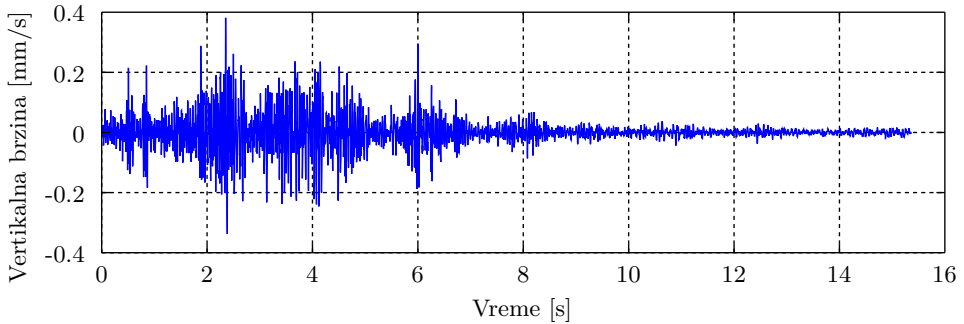
Na slici 1.4 prikazan je trokomponentni geofon L-22-3D/E francuske kompanije SERCEL, koji je korišćen pri merenju vibracija od saobraćaja u Beogradu i njegov položaj uz saobraćajnicu.

Merne instrumente treba postaviti tako da budu isključene moguće smetnje pri merenju. Radi obezbeđenja stabilnosti, ukoliko je potrebno, instrument treba postaviti na metalnu pločicu pričvršćenu za tlo, tj. element konstrukcije. U slučaju merenja vibracija velikih amplituda, neposredno uz kolovoz treba na instrument postaviti vreću sa peskom da bi se obezbedila regularnost merenja.

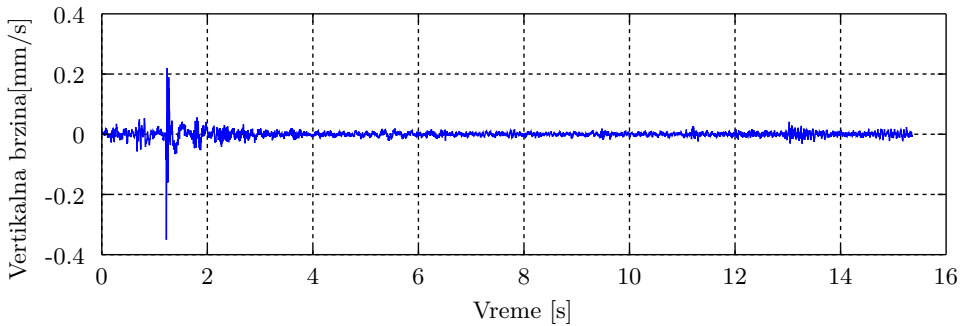
Jedno merenje ne može dati tačnu predstavu o vibracijama nastalim od saobraćaja. Zbog toga je potrebno vršiti merenja jedan duži vremenski period. Vremenski zapis se može prihvatiti kada se pokaže da je konzistentan.

Merenja su ranije beležena na magnetnim trakama, dok se danas ona snimaju na hard disku računara. Od tipa uređaja za snimanje zavisi maksimalan broj merenja koje je moguće odjednom snimiti.

Obrada podataka dobijenih merenjem podrazumeva konverziju analognog signala u digitalni signal, kao i otklanjanje smetnji, tzv. šumova, koji se mogu javiti prilikom merenja vibracija. Rezultat obrade izmerenih veličina su vremenske istorije brzine tj. ubrzanja.



Slika 1.5. Vremenska istorija brzine vertikalnih vibracija usled kretanja tramvaja (rastojanje od izvora $l = 11$ m)



Slika 1.6. Vremenska istorija brzine vertikalnih vibracija usled kretanja kamiona preko gumene prepreke (rastojanje od izvora $l = 11$ m)

Na slikama 1.5 i 1.6 prikazani su vremenski zapisi brzine vertikalnih vibracija izmerenih na 11 m od izvora usled kretanja tramvaja, odnosno kamiona preko gumene prepreke u Beogradu, [7]. Uočljiva je razlika u dužini trajanja i frekventnom sastavu vibracija nastalih usled jedne i druge pobude.

1.2.2 Procedura merenja

Procedura merenja vibracija od saobraćaja su rezultat dugogodišnjih istraživanja i definisana su u odgovarajućim standardima, kao što je BS 7385-1 [8] tj. ISO 4866-2010, [9].

Za analizu prostiranja vibracija, potrebno je izvršiti merenja u određenom broju tačaka, pri čemu je u svakoj mernoj tački potrebno meriti tri komponente vibracija: jednu vertikalnu i dve horizontalne. Od horizontalnih komponentata jedna je paralelna sa pravcem kretanja vozila, a druga upravna