

1 Nastanak i dejstvo vibracija od saobraćaja na objekte i ljude

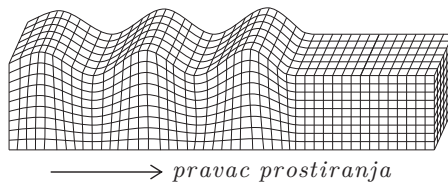
M. Petronijević, M. Nefovska Danilović

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.

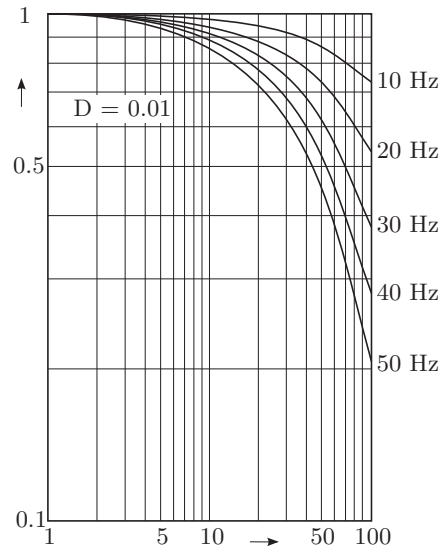
Zavisnost odnosa v/v_1 sa promenom rastojanja R/R_1 prikazana je na slici 1.2.

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 ($\zeta = 0.01$, 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 :

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

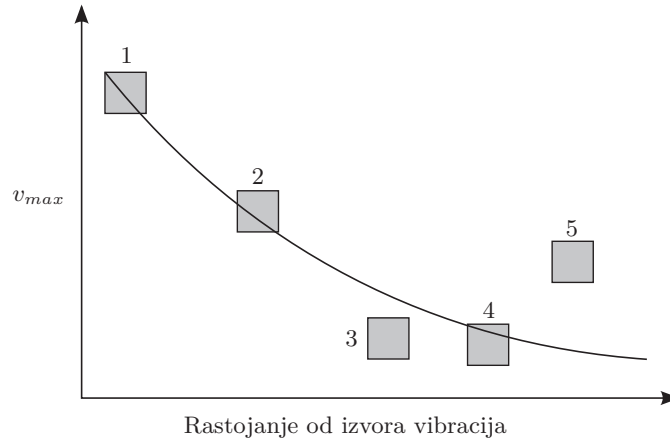
Brzina smičućih talasa zavisi od modula smicanja tla G i gustine ρ i jednaka je $c_s = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$.

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 amplifikacije 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

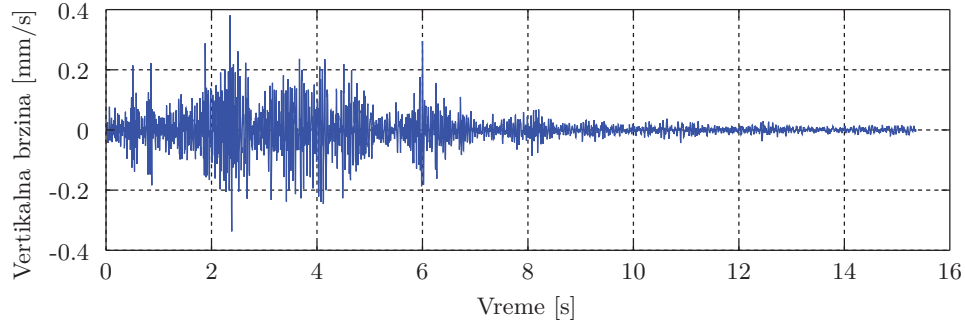
Na slici 1.4 prikazan je trokomponentni geofon L-22-3D/E francuske kompanije SERCEL, koji je korišćen pri merenju vibracija od saobraćaja u Beogradu i njegov položaj uz saobraćajnicu.

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.

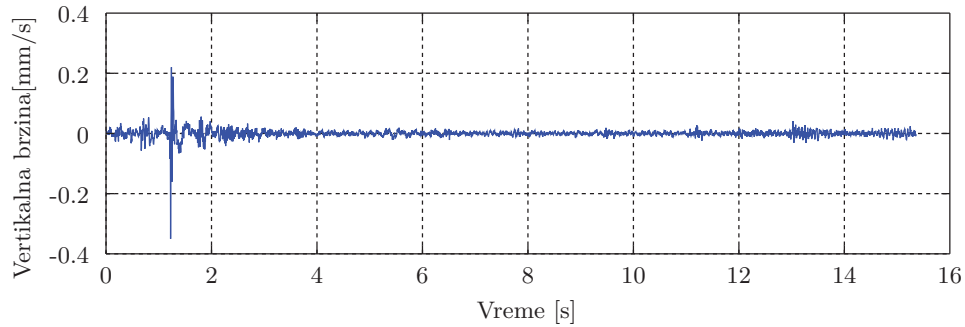
Jedno merenje ne može dati tačnu predstavu o vibracijama nastalim od saobraćaja. Zbog toga je potrebno vršiti merenja jedan duži vremenski period. Vremenski zapis se može prihvatiti kada se pokaže da je konzistentan.

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

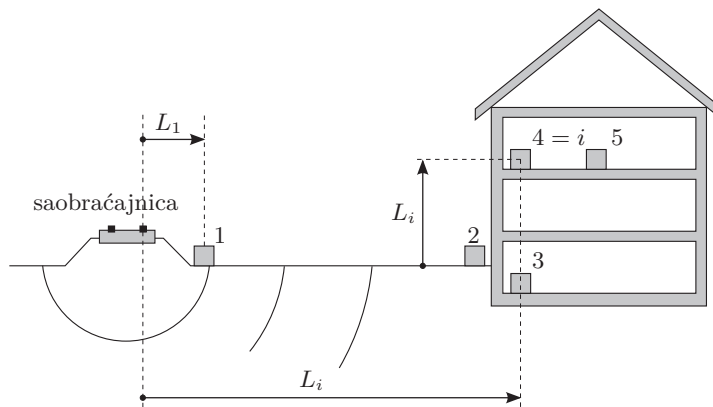
Procedura merenja vibracija od saobraćaja su rezultat dugogodišnjih istraživanja i definisana su u odgovarajućim standardima, kao što je BS 7385-1 [8] tj. ISO 4866-2010, [9].

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

na pravac kretanja vozila.

Smatra se da je za procenu dejstva vibracija na objekte i ljude potrebno meriti vibracije u najmanje 5 tačaka, [5], koje su prikazane na slici 1.7:

- tačka 1 - na tlu, neposredno uz saobraćajnicu;
- tačka 2 - na tlu, sa spoljašnje strane zida objekta koji je paralelan sa saobraćajnicom;
- tačka 3 - u podrumu objekta sa unutrašnje strane zida koji je paralelan sa saobraćajnicom;
- tačka 4 - sa unutrašnje strane zida objekta koji je paralelan sa saobraćajnicom;
- tačka 5 - na sredini međuspratne tavanice na poslednjem spratu objekta.



Slika 1.7. Raspored mernih mesta, [4]

Prema ISO 4866-2010, [9], ako je zgrada visine oko 10 m potrebno je izvršiti još jedno dodatno merenje u sredini objekta, dok je kod visokih zgrada potrebno vršiti dodatna merenja na svakih 12 m visine.

Prema standardu BS 7385-1, [8], vibracije od drumskog saobraćaja spadaju u grupu stalnih vibracija u odnosu na vreme trajanja, dok vibracije od železničkog saobraćaja spadaju u grupu povremenih vibracija. Na osnovu toga, za drumski saobraćaj preporučuje se vreme observacije $T_o = 1$ h i vreme merenja $T_m = 30$ s, dok se za železnički saobraćaj preporučuje vreme observacije $T_o = 1$ dan, dok je vreme merenja jednako vremenu trajanja događaja, tj. prolasku voza. Ovaj standard definiše i opseg frekvencija očekivanog odgovora konstrukcije, koji treba posmatrati samo okvirno, pošto različiti autori daju različite vrednosti. Za vibracije od saobraćaja (drum-

skog i železničkog), prema ISO 4866, [9], može se očekivati opseg izmerenih frekvencija vibracija konstrukcije od 0-100 Hz, opseg amplituda pomeranja 1-200 μm , brzina 0.2-50 mm/s i ubrzanja 0.2-1 mm/s^2 .

LITERATURA

- [1] DIN 4150-1:2001: *Structural vibration, Part 1: Predicting vibration parameters*, German institution for standard, Berlin, Germany.
- [2] H. Bachmann, *Vibration problems in structures: Practicle guidelines*, Basel-Boston-Berlin: Birkhaeuser Verlag, 1995.
- [3] O. Hunaidi, M. Tremblay, "Traffic induced building vibrations in Montreal", *Canadian Journal for Civil Engineering* 24 (1997), pp. 736–753.
- [4] H. Kuppelwieser, A. Ziegler, "A tool for predicting vibration and structure-borne noise Immissions caused by railways", *Journal of Sound And Vibration* 193 (1996), pp. 261–267.
- [5] H. Kuppelweiser, A. Ziegler, "A tool for predicting vibration and structure-borne noise Immissions caused by railways", *Journal of Sound and Vibration* 193 (1996), pp. 261–267.
- [6] M. Bahrekazemi, "Train-Induced Ground Vibration and Its Prediction", PhD thesis, Royal Institute of Technology, Stockholm, Sweden, 2004.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] ISO 4866:2010: *Mechanical vibration and shock - Vibration of fixed structures - Guidelines for the measurement of vibrations and evaluation of their effects on structures*, International standard organization, London, UK.