

Primljen / Received: 3.12.2015.

Ispravljen / Corrected: 30.5.2016.

Prihvaćen / Accepted: 15.6.2016.

Dostupno online / Available online: 10.7.2016.

Mjerenje stupnja prigušenja vibracija na klasičnim kolosiječnim konstrukcijama

Autori:

Dr.sc. **Ivo Haladin**, dipl.ing.građ.Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za prometnice
ihaladin@grad.hrProf.dr.sc. **Stjepan Lakušić**, dipl.ing.građ.Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za prometnice
laki@grad.hr**Janko Koščak**, mag.ing.aedif.Sveučilište u Zagrebu
Građevinski fakultet
Zavod za tehničku mehaniku
jkoscak@grad.hr

Pregledni rad

Ivo Haladin, Stjepan Lakušić, Janko Koščak

Mjerenje stupnja prigušenja vibracija na klasičnim kolosiječnim konstrukcijama

U radu se ocjenjuje stupanj prigušenja vibracija na kolosijecima, jednog od ključnih svojstava pri određivanju utjecaja kolosijeka u ukupnim razinama buke i vibracija od prometovanja tračničkih vozila. Prikazan je i detaljan pregled znanstvenih istraživanja na temu dinamičkih svojstava kolosijeka, a navedene metode uspoređene su na dvije ispitne lokacije. Nadalje, u analizi rezultata mjerenja razmatra se metoda obrade podataka, različite pozicije akcelerometara i različiti tipovi modalnih čekića kao izvora pobude. Rezultati dobiveni različitim analizama međusobno su uspoređeni u svrhu što preciznijeg određivanja stupnja prigušenja vibracija.

Ključne riječi:

vibracije, stupanj prigušenja vibracija, dinamička svojstva kolosiječne konstrukcije, tipska mjerenja buke

Subject review

Ivo Haladin, Stjepan Lakušić, Janko Koščak

Measuring vibration damping level on conventional rail track structures

The rail-track vibration damping level, as one of key properties for determining proportion of rail track influence in the total rail traffic noise and vibration levels, is estimated in the paper. A detailed overview of research conducted so far on dynamic properties of rail tracks is given, and the methods presented are compared on two test sections. The data processing method, various accelerometer positions, and various types of modal hammers as excitation sources, are also considered in the analysis of measurement results. The results obtained by various analyses are compared to each other so as to increase accuracy in the determination of the vibration damping level.

Key words:

vibrations, vibration damping level, dynamic properties of a rail track structure, typical noise measurements

Übersichtsarbeit

Ivo Haladin, Stjepan Lakušić, Janko Koščak

Messungen des Dämpfungsgrades bei Vibrationen klassischer Gleiskonstruktionen

In dieser Arbeit wird der Vibrationsdämpfungsgrad bei Gleiskonstruktionen beurteilt. Dabei handelt es sich um einen der entscheidenden Parameter zur Ermittlung des Einflusses der Gleise auf den gesamten durch Eisenbahnverkehr entstehenden Lärm- und Vibrationspegel. Eine detaillierte Übersicht wissenschaftlicher Untersuchungen bezüglich dynamischer Gleiseigenschaften wird dargestellt. Die angegebenen Methoden werden für zwei Testorte gegenübergestellt. Des Weiteren werden bei der Analyse der Resultate verschiedene Bearbeitungsmethoden, Positionen der Beschleunigungsmesser und Modalhammertypen als Anregungsquelle betrachtet. Die Resultate verschiedener Analysen werden gegenübergestellt, um eine präzise Ermittlung des Vibrationsdämpfungsgrades zu ermöglichen.

Schlüsselwörter:

Vibrationen, Vibrationsdämpfungsgrad, dynamische Eigenschaften von Gleiskonstruktionen, typische Lärmmessungen

1. Uvod

Međudjelovanjem kotača tračničkih vozila i tračnica nastaju buka i vibracije koje negativno utječu na ljude i građevine u neposrednoj blizini željezničkih kolosijeka. Taj problem najizraženiji je u urbanim sredinama, a sustavno rješavanje problema buke i vibracija počinje detekcijom izvora, određivanjem intenziteta i mehanizama širenja buke i vibracija.

1.1. Buka i vibracije od željezničkog prometa

Od samih početaka željezničkih sustava, prometovanje željezničkih vozila prati neizostavna pojava buke i vibracija. Sustavno rješavanje problema buke i vibracija počinje se provoditi od 60-ih godina prošlog stoljeća te je buka okarakterizirana kao izvor nelagode u stambenim naseljima [1]. Tako se sve više otpora pri izgradnji željezničkih pruga javlja kao posljedica buke koju ona proizvodi svojim prometovanjem. Danas je u Europskoj uniji na snazi uredba Europske komisije br. 1304/2014 [2] koja propisuje maksimalne razine buke koje željeznička vozila smiju emitirati pri mirovanju, pri pokretanju, pri prometovanju konstantnom brzinom te razinu buke u upravljačnici. Shodno tome sva nova i rekonstruirana željeznička vozila koja namjeravaju prometovati na prugama Europske unije moraju zadovoljiti kriterije propisane uredbom, tablica 1.

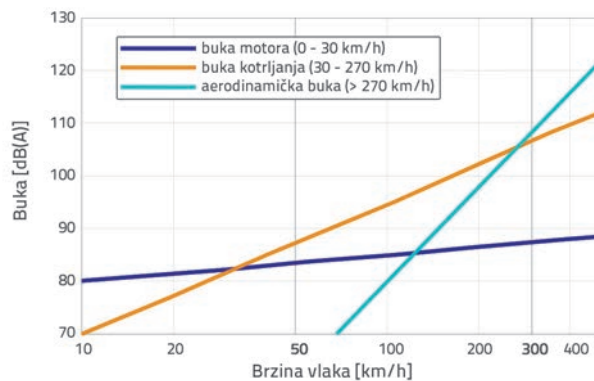
Tablica 1. Granična vrijednost za buku vozila u vožnji konstantnom brzinom [2]

| Kategorija podsustava željezničkih vozila | $L_{pAeq, Tp}$ (80 km/h) [dB] | $L_{pAeq, Tp}$ (250 km/h) [dB] |
|---|-------------------------------|--------------------------------|
| Električne lokomotive i pružna vozila s električnom vučom | 84 | 99 |
| Dizelske lokomotive i pružna vozila s dizelskom vučom | 85 | Nije primjenjivo |
| Elektromotorni vlakovi (EMV) | 80 | 95 |
| Dizel motorni vlakovi (DMV) | 81 | 96 |
| Putnički vagoni | 79 | Nije primjenjivo |
| Vagoni (normalizirano na APL = 0,225) | 83 | Nije primjenjivo |

Uredbom je propisana i norma HRN EN ISO 3095:2013 [3] prema kojoj je potrebno odrediti A-vrednovane ekvivalentne kontinuirane razine zvučnog tlaka pri brzini od 80 km/h i 250 km/h. Uredba [2] propisuje uvjete za ispitivanje buke željezničkih vozila te se ispitivanje provodi na referentnom kolosijeku definiranom u odjeljku 6.2 norme EN ISO 3095:2013 [3]. Međutim, dopušteno je provesti ispitivanje na kolosijeku koji nije u skladu s uvjetima referentnog kolosijeka u pogledu akustičke razine neravnosti tračnica i stopa prigušenja kolosijeka sve dok razine buke izmjerene u skladu s točkom 6.2.2.3.2. ne prelaze granične vrijednosti utvrđene u točki 4.2.3. U svakom se slučaju utvrđuju **akustička razina**

neravnosti tračnica (norma HRN EN 15610:2009 [4]) i **stupnja prigušenja kolosijeka** (norma HRN EN 15461:2011 [5]). Ako kolosijek na kojem se provode ispitivanje udovoljava uvjetima referentnog kolosijeka, izmjerene razine buke označavaju se kao "usporedive", a u suprotnom kao "neusporedive". U tehničkoj se dokumentaciji bilježi jesu li izmjerene razine buke "usporedive" ili "neusporedive". Izmjerene vrijednosti akustičke neravnosti tračnica ispitnog kolosijeka vrijede tijekom razdoblja koje počinje tri mjeseca prije mjerenja i završava tri mjeseca nakon mjerenja, pod uvjetom da u tom razdoblju nije izvršeno nikakvo održavanje kolosijeka koje bi moglo imati utjecaja na akustičku neravnost tračnica. Izmjerene vrijednosti stupnja prigušenja ispitnog kolosijeka vrijede tijekom razdoblja koje počinje godinu dana prije mjerenja i završava godinu dana nakon mjerenja, pod uvjetom da u tom razdoblju nije obavljeno nikakvo održavanje kolosijeka koje bi moglo imati utjecaja na stupanj prigušenja kolosijeka. Određivanjem ovih parametara kolosiječne konstrukcije može se odrediti udio kolosijeka u ukupnim razinama buke pri prolasku vlaka, odnosno, na dionicama koje zadovoljavaju navedene norme, može se zaključiti je li kolosijek dovoljno "tih" da se pri tipskom ispitivanju buke vozila mjerenjem dobivaju razine buke koje proizvodi samo vozilo, a nisu uzrok akustički loše kolosiječne konstrukcije.

Kao glavni izvori buke i vibracija mogu se identificirati motori vozila, aerodinamična buka pri velikim brzinama te kontakt kotača vozila i tračnice. Brzina prometovanja je glavni parametar koji utječe na dominantne izvore buke, pa je tako buka od motora vozila dominantna pri malim brzinama do 20 km/h, buka kotrljanja kotača po tračnicama od 20 km/h do 250 km/h, dok pri višim brzinama dominantan izvor postaje aerodinamična buka (slika 1.). Ove vrijednosti nisu jednake za sva vozila i u svim uvjetima, pa tako u literaturi nailazimo na različite raspone brzina za dominantan izvor buke od kotrljanja kotača po tračnicama: 50 - 270 km/h [6, 7], 40 - 250 km/h [8], a najnoviji izvori 20 - 250 km/h [9]. Udio buke od kotrljanja javlja se pri manjoj brzini ako vozila koriste modernije i tiše motore za pokretanje vozila, te ako su vozne površine kotača i tračnica na kontaktu neravnije.



Slika 1. Razine buke pojedinih izvora za različite brzine kretanja vlaka [10]

Upravo je potonji izvor dominantan u gradskom i prigradskom prometu, gdje brzina kretanja vozila nije dovoljno visoka da bi se komponenta aerodinamične buke uzela u obzir. U urbanim sredinama buka i vibracije predstavljaju ozbiljan problem za ljude i građevine koje se nalaze u blizini željezničkih pruga. Kretanjem vozila po tračnicama, uslijed vlastite težine vozila te dinamičkih sila koje su posljedica neravnosti vozne površine tračnica i kotača, dolazi do pojave oscilacija odnosno vibracija tračničkih vozila i kolosiječne konstrukcije. Neravnost tračnica različitih valnih duljina predstavlja različite posljedice za željezničku infrastrukturu. Neravnosti većih valnih duljina uzrokuje značajna dinamička naprezanja u tračnicama, stradanje pričvrstnog pribora, zastornog materijala te uranjeni zamor čelika na voznoj površini tračnica [11]. Naboranost malih valnih duljina, naziva se još i akustička neravnost tračnica, te izaziva visokofrekventne vibracije tračnica i kotača. Pri visokim se frekvencijama energija vibracija uzrokovanih kontaktom kotača i tračnica širi zrakom u obliku zvučnih valova (buke), dok se vibracije nižih frekvencija pronose preko tračnica na donje dijelove konstrukcije. Uslijed interakcije tračničkih vozila i kolosiječne konstrukcije, vibracije koje se šire u okolinu su u rasponu frekvencija 0-100 Hz, dok su frekvencije zrakom prenošenih zvučnih valova u granicama 30-5000 Hz [12].

Nakon što je ustanovljeno kako uslijed neravnosti vozne površine na kontaktu kotača i tračnice pri prometovanju željezničkih vozila dolazi do pojave oscilacija, odnosno vibracija kotača vozila i tračnica, kritična je pojava širenja vibracija kroz kolosiječnu konstrukciju i komponente vozila. Titranjem komponenata kolosijeka i vozila uslijed vibracija izazvanih interakcijom kotača i tračnica, u zrak se emitiraju zvučni valovi koje ljudsko uho percipira kao buku. Kotač kao konačni element s niskim svojstvima prigušenja ima jasan skup oblika titranja koji su vrlo važni za karakterizaciju njegovih vibracija. Za razliku od kotača, tračnica kao beskonačni element dopušta jedan ili više oblika titranja, a time omogućava dobru propagaciju strukturnih valova. Vlastito prigušenje vibracija puno je veće na kolosijeku nego na kotaču vozila. Iako kolosiječna rešetka inducira ponašanja koja se mogu opisati oblicima titranja na nižim frekvencijama, tračnica nema ista rezonantna svojstva kao i kotač. U tračnici se za istu frekvenciju mogu identificirati različiti strukturni valovi koji se njome šire. Pri nižim frekvencijama to je vertikalno i horizontalno savijanje, torzija i longitudinalni valovi, ali na višim frekvencijama dolazi do dodatnih valova koji uključuju i deformaciju poprečnog presjeka tračnice [1]. Svi ovi oblici titranja tračnice prenose se na okolni medij - zrak - te stvaraju zvučni tlak koji ljudsko

uho percipira kao buku. Vibracije tračnice pri prometovanju vozila, osim o brzini, uvelike ovise o krutosti tračničke podloške, odnosno sustavu pričvršćenja te neravnosti vozne površine kotača i tračnice. Tablica 2. prikazuje utjecaj najznačajnijih faktora na ukupne razine buke od kotrljanja vozila [13]. Temperatura tračnice, koja se može značajno razlikovati od temperature zraka zbog zračenja topline, može utjecati na temperaturu podloške, a time i na njenu krutost, pa je potrebno voditi računa o temperaturi tračnice kako bi se mogla procijeniti krutost podloške [14]. Najvažniji parametri koje je potrebno uzeti u obzir kako bi se poboljšala ponovljivost i reproduktivnost mjerenja buke jesu:

- 1. mjerena veličina**, u smislu jasnog definiranja tipa mjerene razine buke, perioda mjerenja i vremena usrednjavanja. A-vrednovana razina zvučnog tlaka je prikladna
- 2. ponašanje tračničke podloške**, u smislu ponašanja materijala, opterećenja i utjecaja temperature
- 3. kombinacija kotača i tračnica** koje se nalaze na promatranoj mjernoj dionici i pobude uzrokovane neravnošću koja se treba uzeti u obzir mjerenjem A-vrednovanih vibracija glave tračnice, što je uz primjenu akcelerometara vrlo lako ponovljivo, a uz pravilno određivanje neravnosti tračnice, može se i dobro reproducirati
- 4. efekt prijenosa zvuka na mjernom poligonu**, osobito na udaljenosti 25 m od izvora buke, u kombinaciji s utjecajem vjetera i temperature, može smanjiti ponovljivost mjerenja, pa je stoga preporuka mjeriti na udaljenosti 7,5 m od izvora
- 5. brzina vozila**, pri većim brzinama mogu nastati i veća odstupanja razine buke ako nije mjerena dovoljno precizno [13].

1.2. Mjerne veličine vibracija i buke

S obzirom na to da je dinamički raspon vrijednosti spektra vrlo širok, buka i vibracije uglavnom se prezentiraju na logaritamskoj skali izraženi u decibelima [dB] prema izrazu

$$L [dB] = 20 \log \frac{p_1}{p_2} \quad (1)$$

Vrijednosti spektra snage se uglavnom računaju kao efektivne (R.M.S.) vrijednosti i to u tercnim pojasevima (1/3 oktave). U nižem frekvencijskom području, koje povezujemo s vibracijama, ubrzanja se često integriraju kako bi se dobile brzine vibracija [12]. Kad se vrijednosti izražavaju u decibelima, potrebno im je dati referentnu vrijednost. Vrijednosti buke se izražavaju

Tablica 2. Varijacija utjecajnih parametara na razinu buke od kotrljanja vozila za uobičajene kolosiječne konstrukcije [13]

| Parametar | Vrijednost parametra za minimalnu razinu buke | Vrijednost parametra za maksimalnu razinu buke | Razlika razine buke za minimalni i maksimalni parametar |
|---------------------------|---|--|---|
| Statička krutost podloške | $5 \cdot 10^9$ [N/m] | $1 \cdot 10^8$ [N/m] | 5,9 dB(A) |
| Prigušenje podloške | 0,5 | 0,1 | 2,6 dB(A) |
| Tip pragova | Dvodijelni AB pragovi | Drveni pragovi | 3,1 dB(A) |
| Hrapavost kotača | Najglada površina | Najhrapavija površina | 8,5 dB(A) |
| Brzina vlaka | 80 [km/h] | 160 [km/h] | 9,4 dB(A) |

u odnosu na referentnu vrijednost od $20 \cdot 10^{-6}$ Pa. Ljudsko poimanje buke karakterizira se A-vrednovanim filtrom zvučnog tlaka. On uklanja gotovo sav doprinos buke frekvencije niže od 200 Hz. Razine buke se najčešće prikazuju s primijenjenim A filtrom, a tada se označavaju sa dB(A).

Ekvivalentna razina energije L_{eq} izražena u dB(A) može se izračunati integriranjem kvadratnog zvučnog tlaka prema formuli (2)

$$L_{eq} = 10 \log \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{p_A(t)}{p_0} \right]^2 dt \tag{2}$$

gdje je:

$p_0 = 20 \cdot 10^{-6}$ Pa,

$p_A(t)$ - A-vrednovana razina buke

T - period integriranja [12].

Općenito, vibracije se definiraju kao oscilatorno gibanje koje se može opisati pomoću pomaka "d" [mm], brzine pomaka "v" [mm/s] ili ubrzanja tijela u stanju vibriranja "a" [mm/s²]. Pomak se definira kao udaljenost promatrane točke od početnog položaja koji je imala u stanju mirovanja, pod brzinom se smatra trenutna brzina pomaka promatrane točke, a ubrzanje predstavlja stupanj promjene te brzine. Budući da je ovdje riječ o oscilatornom gibanju, prosječne vrijednosti svih navedenih opisnih parametara jednake su nuli. Odnos između navedenih veličina (ubrzanja, brzine i pomaka), uz pretpostavku da se vibracije mogu izraziti kao sinusoidno (harmonično) gibanje neke čestice, dan je izrazom (3), [15]:

$$a = v(2f\pi) = d(2f\pi)^2 \tag{3}$$

gdje je f frekvencija promatranih vibracija. Razine vibracija također se mogu izraziti pomoću logaritamske skale u decibelima [dB], na sličan način kao i buka okoliša, i to primjenom izraza (4) i (5), [15]:

$$L_a = 20 \log \frac{a}{a_0} [dB] \tag{4}$$

$$L_v = 20 \log \frac{v}{v_0} [dB] \tag{5}$$

gdje su:

L_a - razina ubrzanja vibracija u dB

L_v - razina brzine vibracija u dB

a - ubrzanje vibracija

a_0 - referentna vrijednost ubrzanja (10^{-6} prema ISO 1683 [16])

v - brzina vibracija

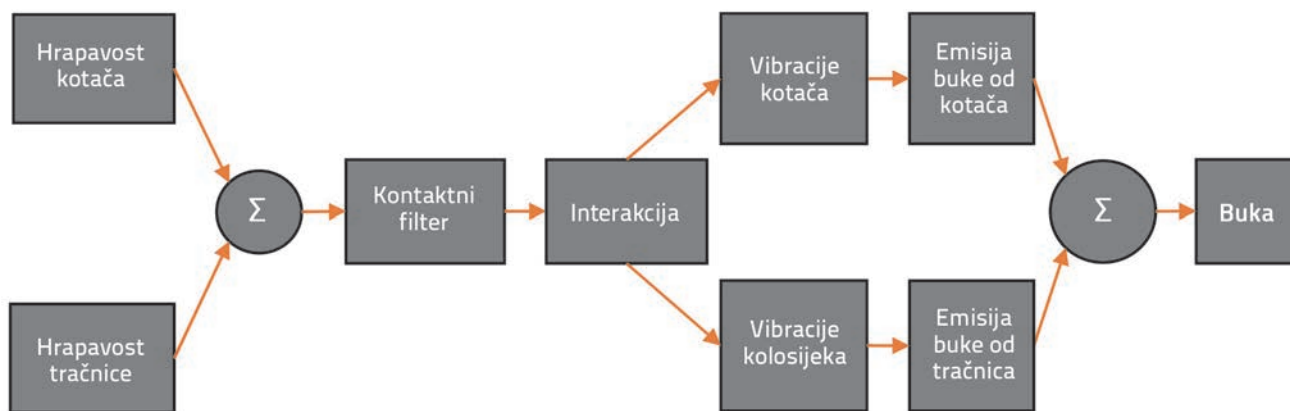
v_0 - referentna vrijednost brzine (10^{-9} prema ISO 1683 [16]).

2. Pregled dosadašnjih istraživanja

Istraživanje buke i vibracija na željeznicama vrlo je rašireno i dinamično područje. Problem buke i vibracija utvrđen je ubrzo nakon puštanja u promet prvih željezničkih kompozicija. Vožnja čeličnih kotača po čeličnim tračnicama predstavlja vrlo snažan izvor vibracija, a posljedično i buke. Što je neravnija površina kotača i tračnice, to će se generirati veće razine vibracija, a time i buke. Kako bi se takve pojave sustavno okarakterizirale, kako bi se razumjeli i simulirali mehanizmi njihova nastajanja i širenja te naposljetku kako bi se takve pojave eliminirale, reducirale ili barem svele u razumne okvire, znanstvenici diljem svijeta provode brojna istraživanja na temu buke i vibracija od kotrljanja tračničkih vozila.

2.1. Buka od kotrljanja vozila

Najvažniji izvor buke pri prometovanju željezničkih vozila jest buka od kotrljanja. Ona nastaje na kontaktu kotača i tračnice, čija interakcija izaziva vibracije. Neravnost kotača i vozne površine tračnica generira vertikalne vibracije kotača i kolosijeka ovisno o njihovim dinamičkim svojstvima. Slika 2. prikazuje mehanizme širenja vibracija na kontaktu kotača i tračnica. Glavne valne duljine neravnosti koje su odgovorne za nastajanje buke pri kotrljanju vozila jesu od 5 do 500 mm. Vibracije se prenose na kotače te na kolosijek čiji elementi služe kao "radijatori" buke. Često su značajne i vibracije kolosijeka te vibracije kotača u ukupnoj razini buke koja se emitira u okoliš. Buka od kotrljanja vozila ima širok spektar frekvencija, a važnost viših frekvencija raste s porastom brzine prometovanja vozila.



Slika 2. Model generiranja buke pri kotrljanju željezničkih vozila [1]

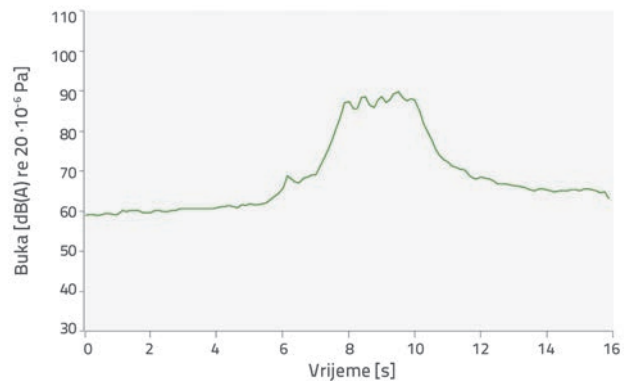
Važna karakteristika vibracija induciranih kotrljanjem tračnica jest ta da su vibracije izazvane kombiniranom neravnošću voznih površina i kotača i tračnice. Na tipičnom primjeru kotača sa blok-kočnicama, vozna površina ima neravnost valnih duljina između 40 do 80 mm. Za vozilo pri brzini od 100 km/h ta neravnost pobuđuje frekvencije pri kojima kolosijek emitira najviše buke. U takvoj situaciji teško je odrediti komponentu koja je uzročnik širenja buke u okoliš. Ovdje je važno napomenuti kako buka izazvana udarima kotača o tračnicu na mjestima diskontinuiteta vozne površine, kao što su sastavi tračnica, plosnata mjesta na kotačima neće biti razmatrana iako, ako su prisutna, imaju značajan doprinos ukupnim razinama buke pri prolasku tračničkih vozila.

Ako se promotri zvučni zapis pri prolasku jednog elektromotornog vlaka s pet postolja, od kojih je prvo i zadnje pogonsko, koji prometuje na hrvatskim prugama na koridoru RH1 (Paneuropski koridor X, Salzburg - Solun), mogu se primijetiti određene pojave na temelju izmjenjenog zvučnog tlaka. Primjerice, prije nego vlak nailazi, tlak zraka se povećava, a nakon prolaska vlaka, on se smanjuje. To se povećanje objašnjava "pjevanjem tračnice" uslijed vibracija koje se u njoj generiraju. Maksimalni iznos tlaka postiže se pri prolasku svakog postolja pored mikrofona, što sugerira kako su kotači značajan izvor buke. S udaljenosti 7,5 m od kolosijeka mogu se identificirati postolja, ali približavanjem mikrofona bliže izvoru mogli bi se identificirati i pojedini kotači na postolju. Vozne površine kotača i tračnice nisu idealno glatke, pa stoga neravnine uzrokuju relativne pomake kotača u odnosu na tračnicu. Ako se val valne duljine λ nalazi na tračnici (ili kotaču), a vozilo se kreće brzinom V , sinusoidne vibracije generiraju se pri frekvenciji

$$f = \frac{V}{\lambda} [\text{Hz}] \quad (6)$$

Rezultirajuće vibracije visokih frekvencija prenose se u oba elementa - tračnicu i kotač, a njihove vibracije zrakom se prenose u obliku zvučnih valova (slika 3.). Valne duljine značajne za generiranje buke mogu se odrediti iz jednadžbe (6), a pokrivaju raspon od desetine centimetra do veličine

kontaktne površine (oko 1cm). Takva neravnost vozne površine uobičajeno se naziva neravnost. Pojam neravnosti može biti neprikladan u ovom kontekstu jer se neravnost inače odnosi na neravnine valnih duljina u rasponu od milimetra ili manje (mikroneravnost). Dok je mikroneravnost vrlo važna za adheziju (trenje pri pokretanju i kočenju), dulje valne duljine (makroneravnost) nisu poželjne.



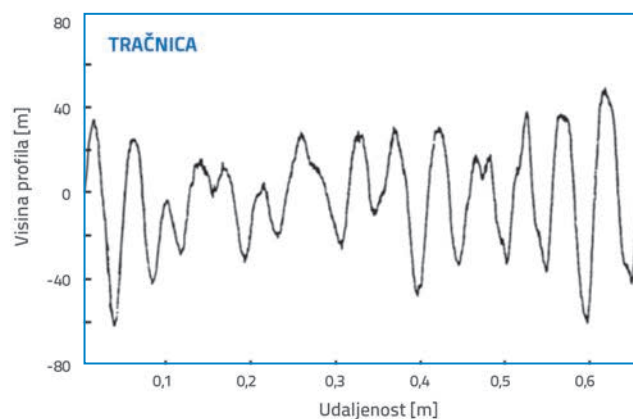
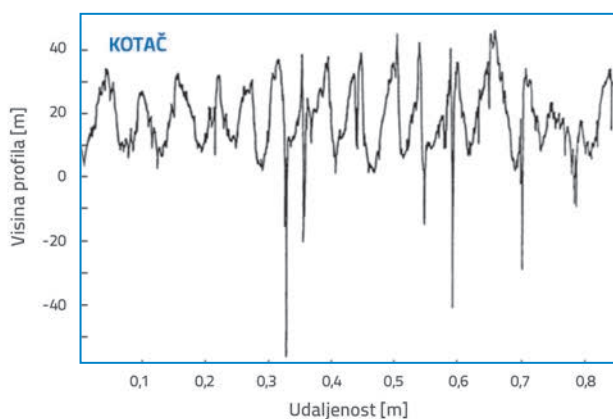
Slika 3. Vremenski zapis zvučnog tlaka pri prolasku EMV-a brzinom od 160 km/h

2.1.1. Utjecaj brzine vožnje i neravnosti vozne površine

Buka od kotrljanja vozila povećava se s brzinom vozila. A-vrednovana razina zvučnog tlaka obično se uzima proporcionalno logaritmu brzine prema jednadžbi

$$L_p = L_{p0} + N \log_{10} \left(\frac{V}{V_0} \right) \quad (7)$$

gdje L_{p0} predstavlja zvučni tlak pri referentnoj brzini V_0 . Vrijednosti eksponenta brzine N , koja se određuje terenskim mjerenjem na bazi linearne regresije, uglavnom se nalaze u rasponu između 25 i 35, a tipična vrijednost je 30. Iz tako postavljene jednadžbe vidimo da udvostručenje brzine odgovara povećanju A-vrednovane razine buke 8 do 10 dB [1].



Slika 4. Profili neravnosti vozne površine: kotača vozila sa čeličnim kočnim papučama (lijevo), tračnice s prisutnim naboranim istrošenjem (desno)

Ako se promotre željeznički kotači s obzirom na emitiranu buku, mogu se podijeliti u dvije kategorije - s kočionim papučama na voznoj površini kotača i bez kočionih papuča (npr. s disk-kočnicama). Razlika u razinama buke između tih dviju skupina kotača otprilike su 8 do 10 dB neovisno o brzini. Razlog tome su neravnosti vozne površine kotača s kočionim papučama koje imaju izraženu valnu duljinu od otprilike 50 mm (slika 4.). Kotači bez kočionih papuča su znatno glađi. Posljedice takvih neravnina pri brzini prometovanja od 160 km/h (44 m/s) jesu vibracije visoke frekvencije od 900 Hz, prema jednadžbi (6). Pomak vibracija za 50 μm od vrha do vrha (efektivno 17 μm R.M.S.) pri toj frekvenciji jednako je efektivnoj (R.M.S.) brzini vibracija od 0,1 m/s i efektivnom (R.M.S.) ubrzanju vibracija od 560 m/s². Treba napomenuti kako kompozitne kočione papuče manje utječu na neravnost kotača pa su time povoljnije za primjenu od čeličnih kočionih papuča.

Ako promotrimo tračnicu, ona također sadrži periodičke neravnosti i naboranost nastale tijekom korištenja (slika 4.). Naboranosti tračnica mogu dovesti do povećanja buke od 10 dB za vozila s čeličnim kočionim papučama, odnosno čak do 20 dB za inače mnogo tiša vozila s disk-kočnicama [1]. Na neravnim / naboranim tračnicama vozila s disk-kočnicama i kočionim papučama imaju slične razine buke, što dokazuje pretpostavku da pobudu određuje suma neravnosti kotača i tračnica.

2.1.2. Izvor buke - tračnica ili kotač?

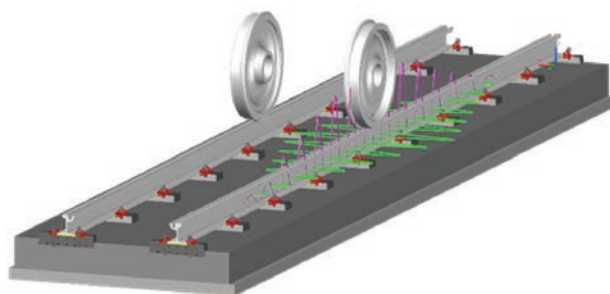
Kako bi se ostvarilo smanjene buke bilo kojeg sustava, najvažnije je odrediti izvor vibracija, odnosno ako je izvora više, koja je njihova relativna važnost. U suprotnom, veliki se napori mogu uložiti u smanjenje komponente buke izvora koji daje malo smanjenje ukupne razine buke. Zbog toga je za buku od kotrljanja vozila važno odrediti koja od komponenata, tračnica i kotač u kojem omjeru pridonosi ukupnoj emitiranoj razini buke. Do sada je ustanovljeno kako obje komponente imaju značajan utjecaj, ali konkretni rezultati mogu varirati od slučaja do slučaja. Najranija istraživanja ovog fenomena sežu u 1984. godinu kad je u Ujedinjenom Kraljevstvu provedeno mjerenje buke i vibracija na šest mjernih pozicija na kotačima, te deset mjernih pozicija na tračnicama, a mijenjali su se uvjeti neravnosti vozni površina i brzina (od 40 km/h do 160 km/h). Dobiven je raspon A-vrednovanih razina zvučnog tlaka veći od 40 dB [7]. Samim mjerenjima vrlo je teško ustanoviti konkretan udio buke od određenih komponenti, pa je osim prikupljanja mjernih podataka, trebalo izraditi pouzdane modele širenja buke od kotača i tračnica.

2.2. Stupanj prigušenja vibracija kolosijeka

Jedno od ključnih svojstava pri određivanju utjecaja kolosijeka u ukupnoj razini buke i vibracija od tračničkog prometa jest stupanj prigušenja vibracija. To je vibroakustično svojstvo koje opisuje koliko je vibracija kolosijek u stanju apsorbarati, tj. koliko daleko vibracije putuju tračnicom od izvora pobude prije nego

budu prigušene. Što je dulja dionica tračnice koja vibrira, emitira se više buke pri prolasku vozila [12]. Kolosijek s većim stupnjem prigušenja vibracija tijekom prolaska vozila apsorbarat će veću energiju vibracija te će prenositi manje vibracija na okolno tlo i manje buke u okoliš (slika 5.).

Znanstvenici se s definiranjem problema prigušenja vibracija kolosijeka počinju baviti u fazi definiranja osnovnih teorijskih modela širenja buke od prometovanja željezničkih vozila u okoliš [17, 18]. Vodeći znanstvenik na ovom području, D.J. Thompson navodi u svom radu iz 1997. godine [19] osnove teorijskih modela i eksperimentalnih mjerenja propagacije valova kroz tračnicu i njihovo prigušenje.



Slika 5. Ilustracija prigušenja vibracija uzduž tračnice u horizontalnom i vertikalnom smjeru pobuđenih prolaskom vozila

Stupanj prigušenja vibracija kolosijeka koristi se kako bi se okarakteriziralo dinamičko ponašanje kolosijeka. Iskazuje se u vertikalnom i horizontalnom smjeru u odnosu na poprečni presjek tračnice. Prigušenje vibracija kolosijeka, iako mnogo značajnije od prigušenja kotača, ne utječe mnogo na frekvencijski odziv konstrukcije, čije su vibracije u rasponu frekvencija iznad 500 - 1000 Hz, kada se vibracije šire tračnicom.

Prigušenje vibracija ima dva izvora, a to su: gubici energije vibracija na elastičnim sustavima pričvršćenja (tračničke podloške, prigušivači vibracija i sl.) i gubici energije prenesene na pragove i okolno tlo koji također utječu na ukupno prigušenje vibracija tračnice [1]. Dodatno, komponente gornjeg ustroja sprečavaju prijenos vibracija niskih frekvencija uzduž tračnice. Iako to rezultira visokim stupnjem prigušenja vibracija, takva pojava ne promatra se kao direktno prigušenje vibracija. Tračnica se ponaša kao beskonačni nosač na elastičnoj podlozi. Zbog toga se njeno prigušenje karakterizira prostornim prigušenjem valova u longitudinalnom smjeru. Iako se kroz tračnicu šire različiti oblici valova (valovi savijanja, longitudinalni i torzijski valovi), njeno titranje može se opisati vertikalnim (dominantnim) i horizontalnim stupnjem prigušenja vibracija.

Ako se polje brzina dijela tračnice sastoji od krutih vertikalnih i horizontalnih pomaka amplitude v_{val} s odgovarajućim vertikalnim i horizontalnim valovima savijanja uključenim u jednostavni model kolosijeka, zvučna snaga pojedinog vala vertikalnih ili horizontalnih gibanja može se izraziti kao

$$W_{val} = \tilde{W}_{val} \int_{-\infty}^{\infty} |v_{val}(z)|^2 dz \quad (8)$$

gdje je zvučna snaga po jedinici duljine koja se generira vertikalnom ili horizontalnom brzinom titranja tračnice. $v_{val}(z)$ predstavlja varijaciju vertikalnog ili horizontalnog vala kroz tračnicu. Pretpostavka je da valovi kroz tračnicu eksponencijalno opadaju s udaljenosti z od mjesta pobude (kontakt kotača i tračnice) pa je tako, gdje je konstanta prigušenja specifična za val. Zvučna snaga uslijed horizontalnih ili vertikalnih valova vibracija u tračnici može se opisati kao

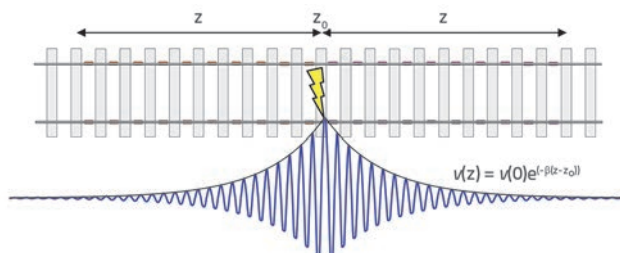
$$W_{val} = \bar{W}_{val} \int_{-\infty}^{\infty} v_{val}^2(0) e^{-2\beta_{val}|z|} dz = 2\bar{W}_{val} v_{val}^2(0) \int_0^{\infty} e^{-2\beta_{val}z} dz = 2\bar{W}_{val} v_{val}^2(0) \frac{1}{2\beta_{val}} \quad (9)$$

a može se zamijeniti stupnjem prigušenja izražen u dB po metru, u daljnjem tekstu DR (od eng. *decay rate*), prema izrazu:

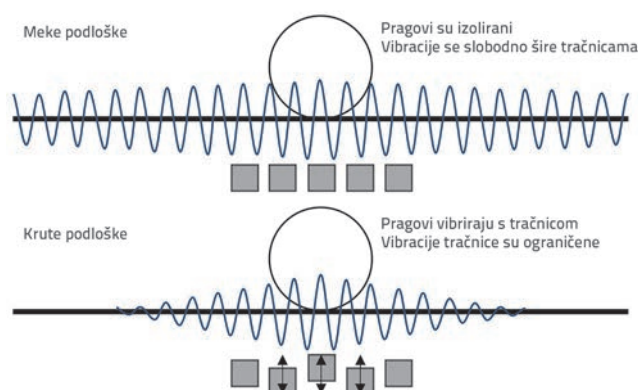
$$DR = 20 \log_{10} \left(e^{\beta_{val}} \right) \approx 8,686 \beta_{val} \quad [\text{dB/m}] \quad (10)$$

Jednadžba (9) dokazuje da vertikalni i horizontalni stupanj prigušenja vibracija direktno utječe na količinu buke koja se generira prilikom prolaska željezničkog vozila [20]. Dvostruko povećanje stupnja prigušenja vibracija dovodi do smanjenja buke od 3 dB koju tračnica emitira u okoliš [21].

Slika 6. daje idealizirani prikaz eksponencijalnog stupnja prigušenja vibracija na udaljenosti z od mjesta pobude vibracija. Konkretna situacije znatno odstupaju od ovog osnovnog modela zbog raznih faktora koji utječu na propagaciju vibracija kroz tračnicu.



Slika 6. Shematski prikaz prigušenja vibracija ovisno o udaljenosti od mjesta pobude [22]



Slika 7. Ilustracija utjecaja krutosti tračničke podloške na kontaktu praga i tračnice te na prigušenje vibracija kroz tračnicu [1]

Na prigušenje vibracija i na spregu tračnice i praga znatno utječe krutost tračničke podloške (slika 7.). O utjecaju tračničke podloške na stupanj prigušenja vibracija kolosijeka, uspoređujući modele i terenska mjerenja, detaljno je u razradio T. Graupeter pod mentorstvom J.C.J. Jonesa, a odnosi se na ovisnost frekvencija i krutosti tračničke podloške pri računanju stupnja prigušenja vibracija [23]. Amplituda vibracija kroz tračnicu smanjuje se približno eksponencijalno s udaljenosti uzduž tračnice. Što su bolja svojstva prigušenja, to vibracije brže opadaju. Parametar koji se koristi kako bi se opisalo prigušenje izražava se u dB/m i uglavnom se prikazuje na logaritamskoj skali. Primjena stupnja prigušenja vibracija kolosijeka višestruka je. Navest će se samo neki od primjera:

- određivanje dinamičkih svojstava kolosijeka u svrhu tipskih mjerenja buke (za potrebe ISO 3095 [3]), tj. određivanje pogodnosti kolosijeka za izvođenje tipskih mjerenja,
- dinamički parametar pri separaciji izvora buke od vozila i kolosijeka [24],
- određivanje indirektnih neravnosti kotača tračničkih vozila [24],
- parametar za evaluaciju primijenjenih sustava za prigušenje vibracija [21, 25].

Iskustva numeričkog modeliranja dinamičkih svojstava kolosijeka upućuju na to da su najvažniji parametri: geometrija tračnice i materijal, statička i dinamička krutost podloške i faktor prigušenja, tip pričvršćenja, geometrija, materijal i razmak pragova. Ako su poznati svi ovi podaci, stupanj prigušenja može se odrediti primjenom teoretskih modela poput TWINSa [13]. S obzirom na to da stupanj prigušenja vibracija ovisi o velikom broju parametara koji variraju na konkretnim dionicama kolosijeka, ovisno o geometriji trase, starosti i održavanju, preporučuje se izravno mjerenje stupnja prigušenja na terenu.

Parametar se može odrediti eksperimentalno mjerenjem funkcija frekvencijskog odaziva (FRF) primjenom modalnog čekića kao izvora pobude uzduž tračnice i akcelometara za mjerenje vibracija [20]. Stupanj prigušenja također je moguće mjeriti akcelometrima uslijed prolaska željezničkih vozila [26]. Funkcije frekvencijskog odaziva zatim se usrednjavaju u frekvencijske pojaseve (najčešće terčne pojaseve) iz kojih se određuje prigušenje vibracija ovisno o udaljenosti od mjesta pobude, aproksimativnim krivuljama (određivanjem nagiba pravca) ili numeričkim postupcima. Eksperimentalne metode bit će kasnije detaljnije objašnjene i analizirane u ovom radu.

3. Eksperimentalno istraživanje

Eksperimentalni dio istraživanja predstavlja fazu prikupljanja relevantnih podataka terenskih mjerenja stupnja prigušenja vibracija. Direktnim terenskim mjerenjem prikupljeni su podaci s prethodno odabranih dionica standardne željezničke pruge. Prikupljanje podataka provedeno je u skladu s propisanim uvjetima za odabir ispitnih dionica prema [3, 5].

3.1. Opis ispitnih dionica

3.1.1. Dionica Vrpolje - Ivankovo

Ispitni poligon na željezničkoj pruzi odabran je na dvokolosiječnoj magistralnoj pruzi M105 Zagreb GK - Tovarnik - DG, na dionici Vrpolje-Ivankovo u 183+900 km. Dionica je na vrlo pristupačnoj lokaciji, brzina prometovanja je do 160 km/h te se na njoj izvode tipska mjerenja buke novokonstruiranih vlakova [27]. Željeznička pruga Vrpolje - Ivankovo nalazi se na RH1 koridoru i izvedena je kao dvokolosiječna pruga s razmakom osi kolosijeka od 4.0 m. Radi se o klasičnoj kolosiječnoj konstrukciji tj. gornji ustroj kolosijeka sastoji se od tračnica, armiranobetonskih pragova, elastičnog pričvršćenja te zastorne prizme od drobljenca (slika 8).



Slika 8. Dvokolosiječna željeznička pruga Vrpolje - Ivankovo (km. položaj: 183+900) (lijevo) i ugrađena tračnica na istoj dionici (desno)

prilikom rekonstrukcije ili kod novogradnje u razdoblju od 1980. do 1990. godine.

Tračnice

Na navedenoj dionici pruge ugrađene su tračnice tipa 60 E1 (prema EN 13674 - 1), odnosno UIC 60 (prema UIC Code 860). Ugrađene tračnice imaju oznaku ZENICA 89 IV UIC 60 П—, što je vidljivo na slici 8. Na temelju te oznake zaključuje se da je riječ o tračnicama otpornih na trošenje (minimalna vlačna čvrstoća: 880 N/mm², tvrdoća: 260 do 300 HB), proizvedenih u travnju 1989. u čeličani ZENICA.

Kolosiječni pribor

Za povezivanje tračnice s betonskim pragovima na dionici željezničke pruge Vrpolje-Ivankovo primijenjena je elastična pritiskalica oznake SKL-8 s odgovarajućim čeličnim rebrom za oslanjanje o betonski prag te izolatorom između čeličnog rebra i betonskog praga (slika 9.). Pritiskalica je izrađena prema licenci tvrtke VOSSLOH (danas se gotovo ne primjenjuje), a zadržala se jedino na onim kolosijecima gdje je ugrađena

Pragovi

Na promatranj dionici željezničke pruge Vrpolje - Ivankovo ugrađeni su poprečni jednodijelni armiranobetonski pragovi. Pregledom kolosijeka ustanovljeno je da su ugrađeni pragovi tipa PB85, godina proizvodnje 1989, proizvođača "Graditelj" i PB 85K, godina proizvodnje 2005, proizvođača "Vibrobeton" iz Vinkovaca (slika 9.).

Zastorna prizma

Na dionici željezničke pruge Vrpolje - Ivankovo izvedena je klasična zastorna prizma od drobljenca, kao što se može vidjeti na prethodnim slikama. Pregledom kolosijeka vidljivo je da se radi o dobro popunjenoj zastornoj prizmi, što svakako pridonosi bočnoj stabilnosti kolosijeka. Zastorna prizma je izvedena na nasipu visine 1 do 2 m (slika 9.), a prema podacima iz projektne dokumentacije, između nasipa i zastorne prizme nalazi se zaštitni sloj (tampon) debljine 40 cm.



Slika 9. Pričvršćenje tračnice elastičnom pritiskalicom SKL-8 (lijevo), armiranobetonski pragovi na ispitnoj dionici (sredina) i prikaz zastorne prizme od drobljenca (desno)

3.1.2. Dionica Koprivnica - Križevci

Za drugu ispitnu dionicu odabran je paneuropski koridor V.c (RH3), na pruzi M201 (DG - Botovo - Dugo Selo), između Koprivnice i Križevaca, koja je rekonstruirana 2010. godine, netom prije obavljanja ispitivanja stupnja prigušenja vibracija [28]. Ta dionica također je na vrlo pristupačnoj lokaciji s brzinom prometovanja do 160 km/h. Željeznička pruga Koprivnica - Križevci izvedena je kao jednokolosiječna te se ispitna dionica nalazi u pravcu. Kolosiječna konstrukcija, tj. gornji ustroj kolosijeka sastoji se od tračnica (60E1), armiranobetonskih pragova, elastičnog pričvršćenja (SKL-14) te zastorne prizme od drobljenca (slika 10.).



Slika 10. Jednokolosiječna željeznička pruga Koprivnica - Križevci (lijevo) i ugrađena tračnica 60E1 (desno)

Tračnice

Na ovoj dionici pruge ugrađene su tračnice tipa 60 E1 (prema EN 13674 - 1). odnosno UIC 60 (prema UIC Code 860), slika 11.

Kolosiječni pribor

Za povezivanje tračnice s betonskim pragovima na dionici željezničke pruge Koprivnica - Križevci primijenjena je elastična pritiskalica oznake SKL-14 s odgovarajućim plastičnim rebrom za oslanjanje o betonski prag (slika 11.).

Pragovi

Na promatranoj dionici željezničke pruge Koprivnica - Križevci ugrađeni su poprečni jednodijelni armiranobetonski pragovi. Pregledom kolosijeka ustanovljeno je da su ugrađeni pragovi tipa PB 85K, proizvođača "Vibrobeton" iz Vinkovaca (slika 11.).

Zastorna prizma

Na dionici željezničke pruge Koprivnica - Križevci izvedena je klasična zastorna prizma od drobljenca. Pregledom kolosijeka vidljivo je da se radi o dobro popunjenoj zastornoj prizmi.

3.2. Prikupljanje podataka

Mjerenje stupnja prigušenja vibracija regulirano je u sklopu norme HRN EN 15461:2011. Korištena oprema u potpunosti zadovoljava potrebe mjerenja. Određivanje prigušenja vibracija uzduž tračnice može se provesti na terenu na konkretnoj dionici kolosijeka upotrebom modalnog čekića i akcelometara. Mjerenjima se određuju vertikalni i horizontalni valovi kao funkcija udaljenosti na temelju funkcija frekventijskog odziva za određeni raster mjernih mjesta uzduž tračnice.

Ispitna dionica mora zadovoljiti osnovne uvjete da bi se moglo provoditi mjerenje. Ti uvjeti podrazumijevaju nepromjenjive parametre kolosijeka koji mogu utjecati na mjerenje stupnja prigušenja vibracija uzduž ispitne dionice kao što su poprečni presjek tračnice, krutost tračničke podloške, nadvišenje kolosijeka i osni razmak oslonaca (pragova) ako se radi o diskretno oslonjenoj tračnici. Tračnice također moraju biti zavarene u dugi trak i bez prijelaznih naprava.

Moguća su dva pristupa mjerenju: da se postavi akcelometar na fiksnu poziciju uz pomicanje čekića kao izvora pobude po rasteru mjernih točaka, ili da se čekićem udara po fiksnoj poziciji na tračnici pomičući akcelometre po rasteru mjernih

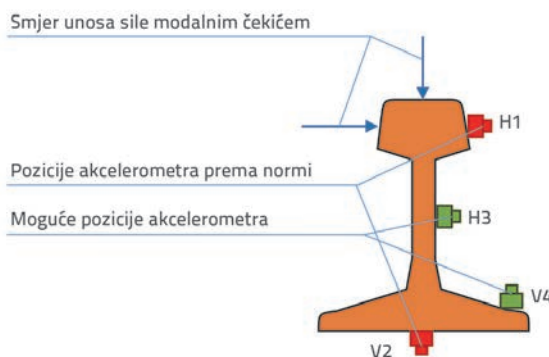


Slika 11. Jednokolosiječna elastična pritiskalica SKL-14 (lijevo), pragovi tipa HŽ - PB85-K (sredina) i zastorna prizma od drobljenca (desno)

točaka. Prvo rješenje, koje je odabrano u okviru ovog rada, pokazalo se mnogo praktičnije u većini slučajeva, makar treba napomenuti da su rezultati mjerenja bez obzira na pristup identični. Pristup s fiksnom pozicijom akcelerometra uvršten je u normu za mjerenje dinamičkog odaziva kolosiječne konstrukcije [5]. Akcelerometar na fiksnoj poziciji treba zadovoljiti sljedeće uvjete na ispitnoj dionici:

- mora se nalaziti na polovici raspona između dva diskretna oslonca (praga)
- mora biti na udaljenosti većoj od 3 m od loše podbijenih pragova (koji nisu dobro ugrađeni u zastorni materijal)
- pričvršni pribor na pragovima u neposrednoj blizini akcelerometra ne smije biti oštećen ili loše pritegnut
- mora se nalaziti na udaljenosti većoj od 5 m od zavera tračnica
- mora biti udaljen minimalno 40 m od prijelazne naprave na kolosijeku, ako ona postoji.

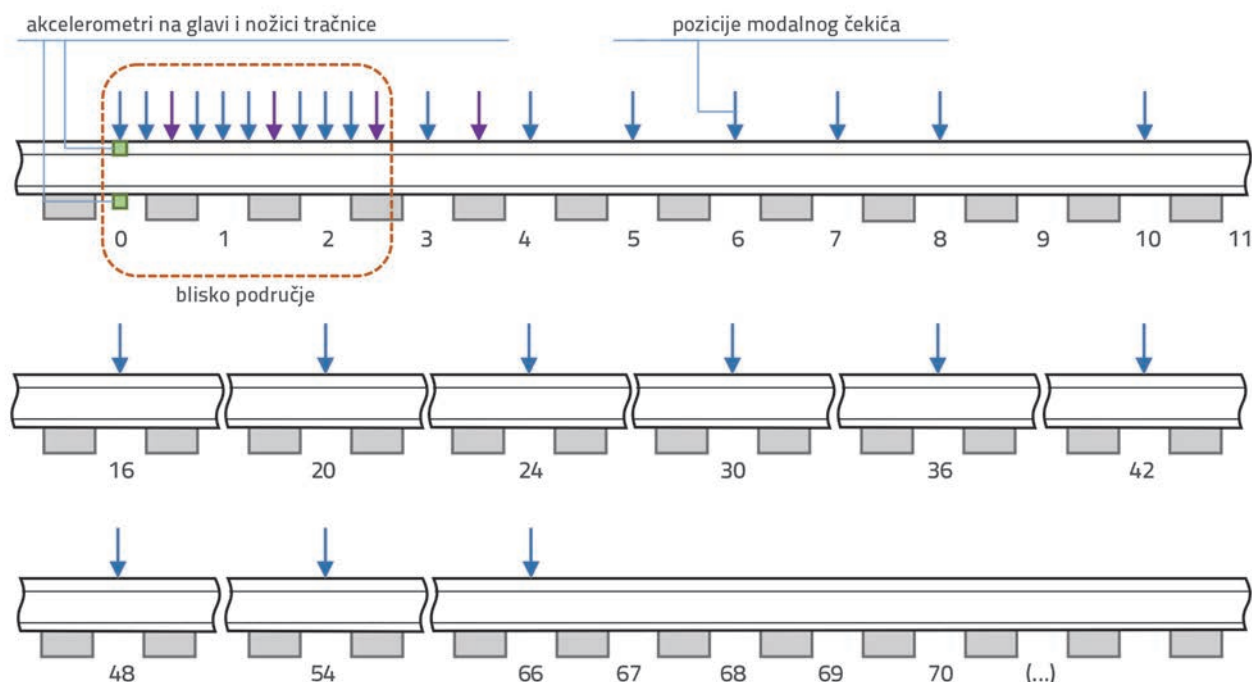
Akcelerometri se pričvršćuju na tračnicu i to u vertikalnom i horizontalnom smjeru u odnosu na poprečni presjek tračnice. Pozicija akcelerometra u vertikalnom smjeru treba biti na sredini glave ili na sredini nožice tračnice (ako nije moguće postaviti akcelerometar na glavu tračnice, što je čest slučaj kad se mjerenja izvode na dionici kolosijeka pod prometom). U horizontalnom smjeru akcelerometar treba postaviti na vanjski rub glave tračnice, (slika 12., crveno označeni akcelerometri). U



Slika 12. Pozicije akcelerometara na poprečnom presjeku tračnice za mjerenje stupnja prigušenja vibracija, te smjer unosa sile u horizontalnom i vertikalnom smjeru

okviru provedenih ispitivanja, osim na način koji zahtijeva norma, akcelerometri su postavljani na način kao što je prikazano na slici 12. (zeleno označeni akcelerometri). Ove pozicije akcelerometra su odabrane kako bi se usporedili rezultati za različiti položaj akcelerometara u svrhu budućih mjerenja kolosiječnih konstrukcija s određenim sustavom zatvaranja do vozne površine tračnice, gdje često nismo u mogućnosti postaviti akcelerometre u položaj definiran normom. Takve konstrukcije često se javljaju u urbanim sredinama gdje se isprepleću vozne površine tračničkih i cestovnih vozila (metro, laka gradska željeznica, tramvaj).

Akcelerometrima se mjere ubrzanja ili (ako postoji analogna integracija) pomaci tračnica. Važno je mjerenja provesti na dovoljnom broju mjernih mjesta uzduž tračnice prema prethodno zadanom rasteru točaka. Broj mjernih pozicija i



Slika 13. Shema mjernih mjesta uzduž tračnice definirana projektom NOEMIE i prihvaćena normom [5]

njihov raspored istraživani je i definiran u sklopu projekata NOEMIE [29], a kasnije je prihvaćen normom [5] (slika 13.). Kritike takvog rastera mjernih točaka dane su kasnije kroz istraživanja u sklopu projekta STARDAMP [22], gdje se navodi kako blisko polje treba proširiti na minimalno tri razmaka među pragovima kako bi se postigla preciznija karakterizacija prigušenja vibracija, dok se u projektu QUIET-TRACK [30] razmatra prorjeđivanje sheme mjernih točaka radi pojednostavljenja mjerenja ali sa zadržavanjem točnosti dobivenih rezultata. Gusta shema točaka u bliskom polju potrebna je kako bi se pouzdano odredio stupanj prigušenja vibracija kod niskih frekvencija vibracija koje u prosjeku imaju stupanj prigušenja od 10dB/m. Za niže stupnjeve prigušenja koji se javljaju pri višim frekvencijama, lokacije udarača čekičem dalje od početne pozicije postaju važne.

Za udaljenije točke nije potrebno mjeriti vibracije u svakom razmaku među pragovima pa se stoga s porastom udaljenosti prorjeđuje mreža mjernih točaka. Na diskretno oslonjenim kolosiječnim konstrukcijama presudno je da se koriste ekvivalentne pozicije čekiča zbog varijacije odaziva između oslonaca u blizini i iznad prve rezonantne frekvencije tračnice oslonjene na pragove na jednakoj međusobnoj udaljenosti od 0,6 m.

Funkcija frekvencijskog odaziva vibracija tračnice na udarce modalnim čekičem u vertikalnom smjeru mjeri se akcelerometrima na voznoj površini ili nožici tračnice, a u horizontalnom smjeru akcelerometrima na voznom rubu glave tračnice. Funkcije se prezentiraju u tercnim pojasevima spektra u minimalnom rasponu od 100 Hz do 5000 Hz. Pri mjerenju funkcije frekvencijskog odaziva, za svako mjerno mjesto podaci se usrednjavaju za minimalno četiri uzastopna udarača čekičem, a potrebno je voditi računa i o koherenciji rezultata mjerenja za svaku mjernu poziciju.

Nakon prikupljanja podataka na terenu, rezultati su obrađeni i interpretirani pomoću dviju metoda - određivanjem stupnja prigušenja vibracija direktnim postupkom preko nagiba pravca prigušenja ili analitičkim proračunom koji predlaže norma [5].

3.3. Obrada prikupljenih podataka

U svrhu usporedbe rezultata mjerenja, prikupljeni podaci obrađeni su na dva načina, što će se opširnije opisati poslije. Nadalje, dobiveni rezultati potom su uspoređeni radi provjere točnosti pojednostavljene metode stupnja prigušenja iz nagiba pravca. Predložena metoda zahtijeva manji utrošak vremena na analitičke i numeričke proračune prilikom određivanja stupnja prigušenja.

3.3.1. Određivanje stupnja prigušenja standardiziranom metodom

U praksi se pokazalo da će metoda za određivanje stupnja prigušenja vibracija biti pouzdana ako se direktnom numeričkom procjenom zbroje frekvencijski odgovori prikazani u jednadžbi

(9). Ako A predstavlja funkciju ubrzanja ili brzine vibracija, onda je

$$\frac{1}{2\beta} = \int_0^{\infty} \frac{|A(z_i)|^2}{|A(0)|^2} dz \approx \sum_{z_i=0}^{z_{max}} \frac{|A(z_i)|^2}{|A(0)|^2} \Delta z_i \quad (11)$$

gdje je z_{max} najudaljenija točka mjerenja, a zbrajaju se sve mjerne lokacije. Poput određivanja integrala pravilom srednjih vrijednosti intervala, gdje intervali nisu konstantni, za svaku lokaciju u zbroju predstavlja udaljenost između središnjih točaka intervala do kraja intervala sa svake strane. Utjecaj intervala na mjernom mjestu z_{max} treba biti najmanji, ali mora biti simetričan oko z_{max} a Δz_0 se mora računati od $z = 0$. Stoga je

$$DR(f_c) \approx \frac{4.343 |A(0)|^2}{\sum_{z_i=0}^{z_{max}} |A(z_i)|^2 \Delta z_i} \quad (12)$$

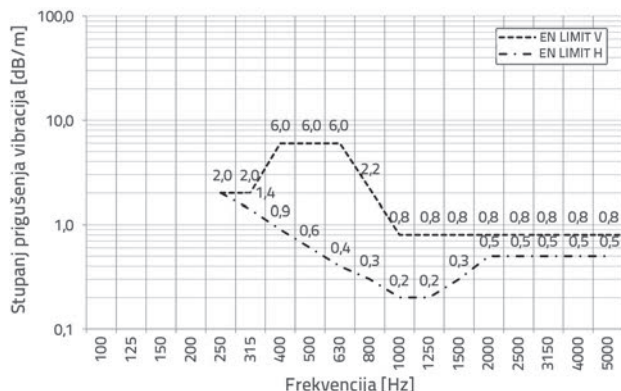
DR se određuje u frekvencijskom području za pojedine terčne pojaseve oko centralne frekvencije f_c , uobičajeno u rasponu od 100 Hz do 5000 Hz. Uočljivo je kako je mjerenje $A(0)$ od iznimne važnosti jer se pojavljuje kao konstantan faktor u jednadžbi. Zbog toga je vrlo važno dobro odrediti $A(0)$ prilikom mjerenja, što je posebno naglašeno u istraživanju [22]. Može se reći da je ovo jedan od nedostataka numeričkog pristupa mjerenja stupnja prigušenja vibracija, koji nema toliki utjecaj u metodi aproksimacije nagiba pravca. Zbroj frekvencijskih odgovora prema (12) je, za razliku od metode aproksimacije nagiba ako je $A(0)$ precizno određen, mnogo robusnija metoda koja naglašava veće vrijednosti frekvencijskog odgovora u kojima ima manje smetnji od drugih vrsta valova u tračnici. Određivanje stupnja prigušenja može se pogrešno odrediti ako se praktična vrijednost z_{max} skрати integral u bilo kojem tercnom pojasu prije nego nastupi dovoljno prigušenje vibracija. Iz (13) se može izraziti minimalna vrijednost stupnja prigušenja za određenu vrijednost z_{max} uz pretpostavku da nema prigušenja funkcije A , tj. da je $A(z)$ jednako $A(0)$, prema:

$$DR_{min}(f_c) = \frac{4,343}{z_{max}} \quad (13)$$

Numerički dobiveni stupanj prigušenja vibracija treba se usporediti s ovom vrijednosti i ako je manji od nje ili vrlo blizu, procjena stupnja prigušenja može se smatrati nesigurnom [20]. Tako opisana metoda propisana je 2011. godine kao europska norma za mjerenje dinamičkih svojstava kolosijeka pod nazivom HRN EN 15461:2011 Oprema za željeznice - Emisija buke - Određivanje dinamičkih svojstava za dionicu pruge kojom prolazi vlak pri mjerenju buke (HRN EN 15461:2008+A1:2010) [5]. Prvo izdanje te norme bilo je 2008. godine, a dopunjeno je 2011. godine. Norma je objavljena u okviru Tehničkih specifikacija za interoperabilnost - TSI Noise, čija je zadnja inačica izdana 2014. godine [31]. U skladu s Tehničkim specifikacijama mjerenje buke

novih i rekonstruiranih željezničkih vozila regulirano je normom HRN EN ISO 3095:2013 Akustika - Oprema za željeznice - Mjerenje buke koju proizvode željeznička vozila (ISO 3095:2013; EN ISO 3095:2013) [3], koja se pak za potrebe odabira ispitne dionice poziva na navedenu normu [5] i normu vezanu za neravnost vozne površine tračnica [4].

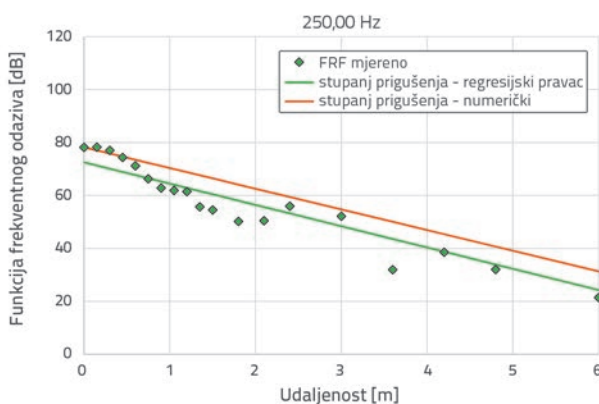
Normom HRN EN ISO 3095:2013 [3] određena je i donja granična krivulja za horizontalni i vertikalni stupanj prigušenja vibracija, koji kolosijek mora zadovoljavati kako bi bio pogodan za provođenje tipskih mjerenja buke pri prolasku željezničkih vozila (slika 14.).



Slika 14. Donja granična krivulja stupnja prigušenja vibracija kolosijeka u svrhu tipskih mjerenja buke prema [3]

3.3.2. Određivanje stupnja prigušenja iz nagiba pravca

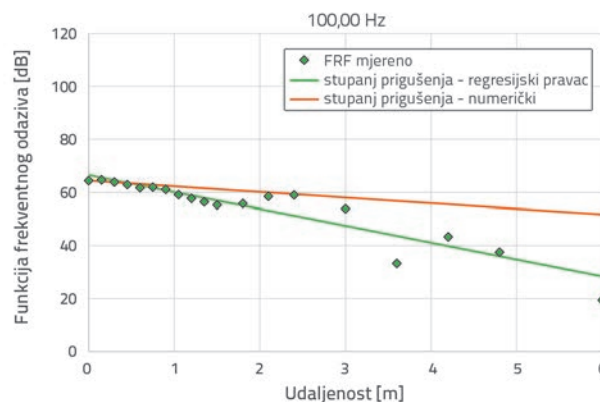
Jedna od metoda ocjene stupnja prigušenja vibracija jest određivanje nagiba iz dijagrama frekvencijskih odaziva dB ovisno o udaljenosti od pozicije akcelerometra za pojedine terčne pojaseve frekvencija (od 100 Hz do 5000 Hz). Tu metodu predložili su D.J. Thompson, B. Hemsworth i N. Vincent [18, 32].



Slika 15. Prikaz funkcije frekvencijskog odaziva za terčni pojas oko 250 Hz pri ispitivanju stupnja prigušenja vibracija standardne kolosiječne konstrukcije na tucaničkom zastoru

Slika 15. prikazuje funkcije frekvencijskog odaziva u frekvencijskom području za terčni raspon oko centralne

frekvencije 250 Hz. Frekvencijski odazivi mjereni su na kolosiječnoj konstrukciji s betonskim pragovima koji se nalaze u tucaničkom zastoru. Prikazani su odazivi za mjerna mjesta do 6 m udaljena od pozicije akcelerometra (0 m) te je vidljivo iz nagiba regresijskog pravca da vibracije frekvencije 250 Hz padaju približno 46 dB na udaljenosti od 6 m, što odgovara stupnju prigušenja vibracija od 7,7 dB/m. Vidljivo je kako je u ovom slučaju numerički dobiven stupanj prigušenja (7,81 dB/m) vrlo sličan nagibu pravca dobivenog regresijom mjernih točaka. Takav pristup zahtijeva iskustvo voditelja ispitivanja zato što nije moguće automatizirati proces pridruživanja pravca regresijom provedenih mjerenja. Problem kako ocijeniti rezultate jest u tome što se pri pobudi tračnice modalnim čekićem ne javljaju samo vibracije u horizontalnom i vertikalnom smjeru. Naime, u stvarnosti postoje valovi bliskog područja opisani jednostavnim modelom kolosijeka, sprezanje između horizontalnih i vertikalnih valova, torzijski valovi i valovi modova titranja poprečnog presjeka [20]. U idealnom slučaju eksponencijalnog smanjenja vibracija (slika 6.) također se javljaju poremećaji zbog periodičnosti oslonaca tračnice i promjenjivosti odaziva kroz polja između oslonaca, osobito oko prve dvije rezonantne frekvencije tračnice oslonjene na pragove razmaka 0,6 m koje obično iznose 950 Hz i 2200 Hz [32].



Slika 16. Prikaz funkcije frekvencijskog odaziva za terčni pojas oko 100 Hz pri ispitivanju stupnja prigušenja vibracija standardne kolosiječne konstrukcije na tucaničkom zastoru

Slika 16. prikazuje rezultate mjerenja na ispitnoj dionici, ali za terčni pojas oko centralne frekvencije 100 Hz. Iz nagiba krivulje ovdje bi se moglo zaključiti kako je stupanj prigušenja veći nego što je dobiveno numeričkim izračunom. Naime, osobito kod nižih frekvencija, treba uzeti u obzir da udaljene lokacije ne daju posve pouzdane rezultate zbog navedenih pojava, već je potrebno dati veću važnost odazivima bližim akcelerometru. Tako bilježimo numerički stupanj prigušenja od 2,12 dB/m, a iz nagiba pravca regresijom mjernih točaka do 6 m, moglo bi se zaključiti da je stupanj prigušenja vibracija 6,34 dB/m.

Zbog navedenih nedostataka ručnog određivanja stupnja prigušenja, uvedena je numerička analiza rezultata frekvencijskih odaziva.

Tablica 3. Imenovanje pojedinih mjerenja stupnja prigušenja vibracija

| Ispitna dionica | Redni broj mjerenja | Metoda obrade podataka | Pozicija akcelerometra | Tračnica | Tip čekića |
|-----------------|---------------------|------------------------|------------------------|----------|------------|
| KŽK_VRP-IVA | 01 | MC_RE | H1 | STR | TČ |
| KŽK_KOP-KRIŽ | 02 | MC_NA | V2 | JTR | MČ |
| | ... | | H3 | | |
| | | | V4 | | |

3.4. Analiza rezultata ispitivanja

U radu se detaljno opisuje procedura obrade prikupljenih podataka na ispitnim dionicama. Procedure obrade podataka razlikuju se s obzirom na pristup obradi (automatizirana numerička metoda i ručna metoda određivanja nagiba pravca) i s obzirom na izvor podataka koji se obrađuju (podaci prikupljeni mjerenjem stupnja prigušenja vibracija udarnim čekićem i podaci prikupljeni pri prolasku tračničkih vozila).

Na dionicama željezničkog kolosijeka Vrpolje-Ivankovo i Koprivnica - Križevci provedeno je mjerenje stupnja prigušenja vibracija na ukupno šest različitih pozicija mjerenja. Na dionici Koprivnica - Križevci mjereno je na sjevernoj tračnici mekšim čekićem (8208), a na južnoj tračnici tvrdim čekićem (8206), a vibracije su prikupljane pomoću dva akcelerometra na svakoj tračnici u smjeru H1 i V2. Obradom rezultata primjenom dviju opisanih metoda dobiveno je ukupno osam rezultata stupnja prigušenja vibracija na dionici.

Na dionici Vrpolje-Ivanovo provedeno je mjerenje tvrdim i mekšim čekićem na četiri pozicije, a vibracije su bilježene pomoću četiri akcelerometra na svakoj mjernoj poziciji u smjeru H1, V2, H3 i V4 (slika 12.). Obradom rezultata pomoću dvije opisane metode dobivena su ukupno 32 rezultata stupnja prigušenja vibracija.

Dionice su imenovane prema sljedećim karakteristikama: kratica dionice, redni broj ispitivanja, metoda obrade podataka, smjer akcelerometra, orijentacija tračnice, tip čekića, a to sve u

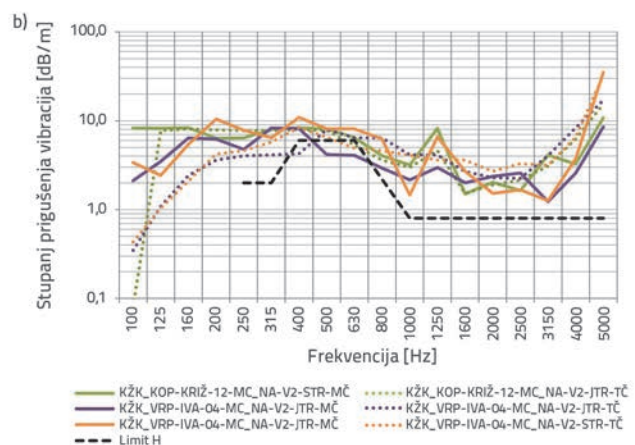
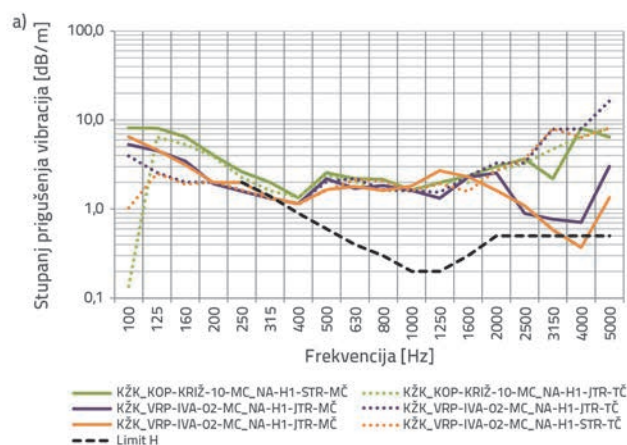
konačnici daje zapis oblika: KŽK_VRP-IVA-01-MC_RE-H1-JTR-TČ. Ako je na kraju izostavljena pozicija tračnice i čekića, radi se o srednjoj vrijednosti svih mjerenja navedenom metodom na jednoj mjernoj poziciji (koja uključuje mjerenja pomoću oba čekića). Tada zapis mjerenja primjerice glasi KŽK_VRP-IVA-01-MC_RE-H1.

3.4.1. Utjecaj tipa modalnog čekića kao izvora pobude

Kao pokretačka sila za stvaranje vibracija upotrebljava se udarni čekić (slika 17.) koji mora imati primjereno čvrst vrh. Udarni čekić kao i akcelerometri spaja se s jedinicom za prikupljanje i obradu podataka kako bi se osigurala kvalitetna mjerenja i postigla tražena frekvencija. Preporučuje se koristiti manji, modalni čekić s tvrdim vrhom za pobuđivanje viših frekvencija, a s mekšim vrhom za pobuđivanje nižih vibracija [9].



Slika 17. Udarni čekići - 8208 s tvrdim plastičnim vrhom i 8206 sa vrhom od aluminija



Slika 18. Usporedba čekića 8208 i 8206 kao izvora pobude vibracija na promatranim dionicama izražena stupnjem prigušenja vibracija: a) horizontalni smjer; b) vertikalni smjer

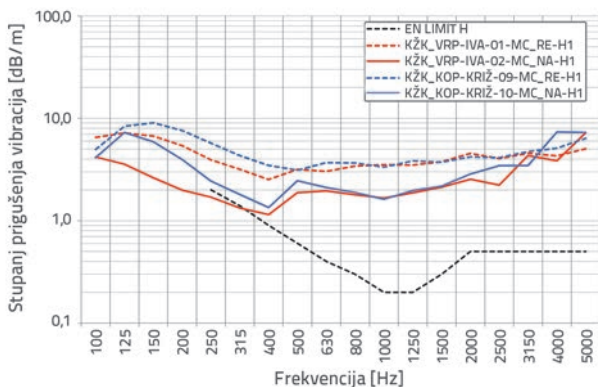
Za mjerenja na ispitnim dionicama najprije je trebalo odlučiti kojim će se čekićem pobuditi vibracije u određenom frekventijskom pojasu. Mjerenjem stupnja prigušenja vibracija ustanovljeno je kako je za ispitivanje dostatan čekić Brüel&Kjær 8208 s tvrdim plastičnim vrhom. Ispitivanja su provedena i s tvrdim čekićem Brüel&Kjær 8206 s aluminijskim vrhom, no iz usporednih ispitivanja na oba mjerna poligona ustanovljeno je kako taj čekić teško može pobuditi niže frekvencije vibracija (slika 18.). Iz dijagrama je vidljivo kako u vertikalnom smjeru nanošenja pobude pomoću čekića s tvrdim vrhom nije moguće dovoljno pobuditi tračnicu pri niskim frekvencijama (od 100 Hz do 250 Hz) te je stupanj prigušenja vibracija niži od onog dobivenog čekićem s mekšim vrhom. Srednje područje frekventijskog raspona (od 315 Hz do 2000Hz) jednako je bez obzira na vrstu čekića, u oba smjera. U horizontalnom smjeru pri višim frekvencijama (2500 Hz do 4000 Hz) također je vidljivo razilaženje u rezultatima s obzirom na tvrdi i mekši čekić, gdje mekši izvor pobude (čekić 8028) daje nešto niže rezultate stupnja prigušenja vibracija.

3.4.2. Usporedba metoda za obradu podataka

Na ispitnim dionicama, na šest različitih pozicija određen je stupanj prigušenja vibracija primjenom dviju različitih metoda obrade podataka, pa će se opširnije opisati njihova usporedba. Rezultati stupnja prigušenja vibracija uzeti su kao srednje vrijednosti mjerenja provedenih tvrdim i mekšim čekićem na pozicijama akcelometara H1 i V2. Rezultati pokazuju kako obje metode nemaju značajnih odstupanja, ali je uočeno da je nešto veće standardno odstupanje na obje dionice u horizontalnom smjeru (tablica 4.).

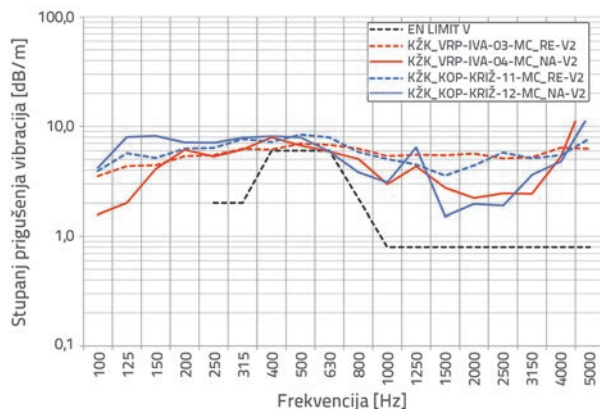
Tablica 4. Standardno odstupanje metoda MC_NA i MC_RE na ispitnim dionicama

| Dionica | Standardno odstupanje (vertikalni smjer) [dB/m] | Standardno odstupanje (horizontalni smjer) [dB/m] |
|--------------|---|---|
| KŽK_VRP-IVA | 1,08 | 1,35 |
| KŽK_KOP-KRIŽ | 1,13 | 1,30 |



Slika 19. Usporedba metoda za određivanje stupnja prigušenja vibracija u horizontalnom smjeru

Iz rezultata se može zaključiti kako metoda MC_RE u odnosu na metodu MC_NA precjenjuje vrijednost stupnja prigušenja vibracija (slike 19. i 20.).

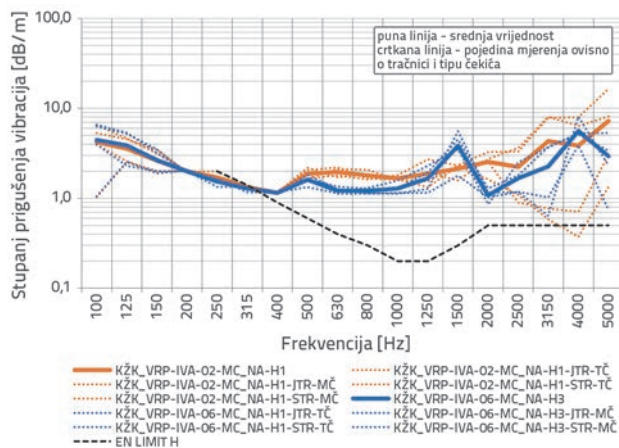


Slika 20. Usporedba metoda za određivanje stupnja prigušenja vibracija u vertikalnom smjeru

3.4.3. Utjecaj pozicije akcelometara na rezultate ispitivanja

Stupanj prigušenja vibracija na ispitnim dionicama određivan je iz vremenskog signala ubrzanja tračnice pomoću akcelometara pričvršćenih na tračnicu u horizontalnom ili vertikalnom smjeru u odnosu na njen poprečni presjek.

Na dionici KŽK_VRP-IVA, gdje je postojao potpuno slobodan pristup tračnici, provedena je usporedba mjernih pozicija akcelometara: H1 i H3 u horizontalnom, odnosno V2 i V4 u vertikalnom smjeru, od kojih su H1 i V2 postavljeni prema normi [5] (slika 12.). a ispitnoj dionici KŽK_VRP-IVA stupanj prigušenja vibracija mjereno je na sjevernoj i južnoj tračnici južnog kolosijeka uz pomoć tvrdog i mekšeg čekića kao izvora pobude, na mjernim pozicijama H1, V2, H3 i V4, što daje vrlo dobar uvid o utjecaju primijenjenog mjernog mjesta na izmjereni stupanj prigušenja (slike 21. i 22.).



Slika 21. Usporedba stupnja prigušenja vibracija u horizontalnom smjeru na dvije pozicije akcelometara (H1 i H3)

LITERATURA

- [1] Thompson, D.: *Railway Noise and Vibrations*. Elsevier Ltd, 2009.
- [2] COMMISSION REGULATION (EU) No 1304/2014 of 26 November 2014 on the technical specification for interoperability relating to the subsystem 'rolling stock - noise', Official Journal of the European Union. p. 17, 2014.
- [3] HRN EN ISO 3095:2013 Akustika - Oprema za željeznice - Mjerenje buke koju proizvode željeznička vozila (ISO 3095:2013; EN ISO 3095:2013), . 2013.
- [4] HRN EN 15610:2009 Oprema za željeznice - Emisija buke - Mjerenje hrapavosti tračnica povezane sa stvaranjem buke pri vožnji željezničkih vozila, . 2009.
- [5] HRN EN 15461:2011 Oprema za željeznice - Emisija buke - Određivanje dinamičkih svojstava za dionicu pruge kojom prolazi vlak pri mjerenju buke (HRN EN 15461:2008+A1:2010), . 2011.
- [6] Block, J., Jones, R.: *IMAGINE - Progress Towards a Comprehensive Description of Railway Noise Sources*, European Conference on Noise Control - Euronoise 2006, p. 6, Tampere, Finland, 2006.
- [7] Diehl, R.J., Holm, P.: Roughness measurements-Have the necessities changed?, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 293, no. 3-5, pp. 777-783, Jun. 2006, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.046>.
- [8] Hemsworth, B.: *STAIRRS - Strategies and Tools to Assess and Implement Noise Reducing Measures for Railway Systems - Final technical report*, 2003.
- [9] Desanghere, G.: *Quiet Tracks for Sustainable Railway Infrastructures (QUIET-TRACK)*, 2013, Available: <http://www.quiet-track.eu/>. [Accessed: 20-Aug-2015]. .
- [10] Lakušić, S., Dragčević, V., Ahac, M., Ahac, S.: *Zaštita od buke željezničkih kolodvora*, in *Projektiranje prometne infrastrukture*, Zagreb: Sveučilište u Zagrebu Građevinski fakultet, 2011, pp. 105-132.
- [11] Jovanović, S., Božović, D., Tomičić-Torlaković, M.: *Railway infrastructure maintenance planning based on condition measurements and analysis*, *GRADEVINAR*, 66 (2014) 4, pp. 347-358, <http://dx.doi.org/10.14256/JCE.959.2013>.
- [12] Esveld, C.: *Modern railway track*, Second edi. Delft: TU Delft, 2001.
- [13] Wirnsberger, M., Dittrich, M.G., Lub, J., Pollone, G., Kalivoda, M., Buchem, P.v., Hanreich, W., Fodiman, P.: *The METARAIL project - final report for publication. Methodologies and Actions for Rail Noise and Vibration Control*, pp. 105, 1999.
- [14] Carrascal, I.A., Casado, J.A., Polanco, J.A., Gutiérrez-Solana, F.: *Dynamic behaviour of railway fastening setting pads*, *Engineering Failure Analysis*, 14 (2007) 2, pp. 364-373, <http://dx.doi.org/10.1016/j.engfailanal.2006.02.003>.
- [15] Eitzenberger, A.: *Train-induced Vibrations in Tunnels - A Review*, 2008.
- [16] HRN EN ISO 1683:2015 Akustika - Preporučene referentne vrijednosti za akustičke i vibracijske razine (ISO 1683:2015; EN ISO 1683:2015), . 2015.
- [17] Remington, P.J.: *Wheel/rail rolling noise, I: Theoretical analysis*, *The Journal of the Acoustical Society of America*, 81 (1987) 6, pp. 1805-1823, <http://dx.doi.org/10.1121/1.394746>.
- [18] Thompson, D.J., Hemsworth, B., Vincent, N.: *Experimental Validation of the Twins Prediction Program for Rolling Noise , Part 1 : Description Of The Model And Method*, *Journal of Sound and Vibration*, 193 (1996) 1, pp. 123-135, <http://dx.doi.org/10.1006/jsv.1996.0252>.
- [19] Thompson, D.J.: *Experimental Analysis of Wave Propagation in Railway Tracks*, *Journal of Sound and Vibration*, 203 (1997) 5, pp. 867-888, <http://dx.doi.org/10.1006/jsvi.1997.0903>.
- [20] Jones, C.J.C., Thompson, D.J., Diehl, R.J.: *The use of decay rates to analyse the performance of railway track in rolling noise generation*, *Journal of Sound and Vibration*, 293 (2006) 3-5, pp. 485-495, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.060>.
- [21] Betgen, B., Bouvet, P., Squicciarini, G., Thompson, D.J.: *The STARDAMP Software : An Assessment Tool for Wheel and Rail Damper Efficiency A few words on rolling noise The principles of rail and wheel dampers*, *AIA-DAGA 2013 Conference on Acoustics*, p. 4, no. 1, Merano, Italy, 2013.
- [22] Venghaus, H., Thompson, D.J., Toward, M., Bumke, D., Kitson, P., Asmussen, B., Starnberg, M.: *Assessment of the efficiency of rail dampers using laboratory methods within the STARDAMP project*, 38th German Annual Conference on Acoustics, p. 22, Darmstadt, 2012.
- [23] Graupeter, T.: *Investigation of Frequency Dependent Pad Stiffness for Calculation of Track Decay Rates*, 2007.
- [24] Janssens, M.H.a., Dittrich, M.G., de Beer, F.G., Jones, C.J.C.: *Railway noise measurement method for pass-by noise, total effective roughness, transfer functions and track spatial decay*, *Journal of Sound and Vibration*, 293 (2006) 3-5, pp. 1007-1028, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.070>.
- [25] Thompson, D.J., Jones, C.J.C., Waters, T.P., Farrington, D.: *A tuned damping device for reducing noise from railway track*, *Applied Acoustics*, 68 (2007) 1, pp. 43-57, <http://dx.doi.org/10.1016/j.apacoust.2006.05.001>.
- [26] Dittrich, M. G., Létourneaux, F., Dupuis, H.: *Background for an New Standard on Pass-By Measurement of Combined Roughness, Track Decay Rate and Vibroacoustic Transfer Functions*, *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*, pp. 197-204, vol. 126, Udevalla: Springer Berlin Heidelberg, 2013, <http://dx.doi.org/10.1007/978-3-662-44832-8>.
- [27] Lakušić, S., Bogut, M., Haladin, I.: *Influence of train type and rail surface roughness on railway traffic noise*, *Mechanics, Transport, Communications*, vol. 3, pp. 90-96, 2011.
- [28] Haladin, I., Damjanović, D., Bogut, M., Lakušić, S.: *Analysis of railway track dynamic properties for pass by noise measurements*, *Proceedings of the 20th International Congress on Sound and Vibration*, p. 8, Bankok, Tajland: International Institute of Acoustics and Vibration, 2013.
- [29] Fodiman, P., Staiger, M.: *Improvement of the noise Technical Specifications for Interoperability: The input of the NOEMIE project*, *Journal of Sound and Vibration*, 293 (2006) 3-5, pp. 475-484, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsv.2005.08.036>.
- [30] Venghaus, H., Petz, M.: *Quiet Tracks for Sustainable Railway Infrastructures - D1 - Monitoring of rail roughness, track dynamic properties and average wheel roughness: Investigation of Track Decay Rates (TDR) of embedded rails*, 2014.
- [31] Vincent, N., Thompson, D.J.: *Track Dynamic Behaviour at High Frequencies. Part 2: Experimental Results and Comparisons with Theory*, *Vehicle System Dynamics*, 24 (1995) 1, pp. 100-114, <http://dx.doi.org/10.1080/00423119508969618>.
- [32] Maes, J., Sol, H.: *A double tuned rail damper-increased damping at the two first pinned-pinned frequencies*, *Journal of Sound and Vibration*, 24 (1995) 1, pp. 721-737, [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00736-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00736-3).