

Utjecaj elastičnog pričvršćenja željezničkog kolosijeka na širenje buke i vibracija

Ivančev, Mate; Haladin, Ivo

Source / Izvornik: **5. simpozij doktorskog studija građevinarstva, 2019, 105 - 116**

Conference paper / Rad u zborniku

Publication status / Verzija rada: **Published version / Objavljena verzija rada (izdavačev PDF)**

<https://doi.org/10.5592/CO/PhDSym.2019>

Permanent link / Trajna poveznica: <https://um.nsk.hr/um:nbn:hr:237:835756>

Rights / Prava: [In copyright](#)/[Zaštićeno autorskim pravom.](#)

Download date / Datum preuzimanja: **2025-03-13**

Repository / Repozitorij:

[Repository of the Faculty of Civil Engineering,
University of Zagreb](#)



Utjecaj elastičnog pričvršćenja željezničkog kolosijeka na širenje buke i vibracija

Mate Ivančev¹, doc.dr.sc. Ivo Haladin²

¹Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, mivancev@grad.hr

²Sveučilište u Zagrebu, Građevinski fakultet, ihaladin@grad.hr

Sažetak

Problem buke i vibracija nastalih prometovanjem željezničkih vozila najizraženiji je u urbanim sredinama, a sustavno rješavanje tog problema započinje detekcijom izvora, određivanjem intenziteta i mehanizama širenja buke i vibracija. Uloga kolosijeka u emisiji buke i vibracija je predmet mnogih istraživanja, kao i utjecaj elastičnog pričvršćenja na vibroakustična svojstva željezničkog sustava. U radu su dane neke od metoda koje se primjenjuju u Europskoj uniji. Njima se određuju dinamička svojstva kolosiječne konstrukcije i optimiziraju elementi kolosijeka koji utječu na širenje buke i vibracija.

Ključne riječi: buka, vibracije, kolosijek, elastični kolosiječni pribor, dinamička svojstva kolosiječne konstrukcije

Impact of elastic rail fastening system on noise and vibration emissions

Abstract

The issue of noise and vibrations caused by the use of rail vehicles is most relevant in urban areas. A systematic approach to the noise and vibration mitigation starts with the detection of their source, and with the determination of their intensity and propagation mechanisms. The contribution of rail tracks to the emission of noise and vibrations, and the impact of elastic fastening devices on vibroacoustic properties of railway systems, have been in the focus of many research projects. Some of the methods used in the European Union are presented and analysed in the paper. These methods are used to determine dynamic properties of the rail track structure, and to optimise components of rail track elements, the aim being to contribute to the noise and vibration abatement.

Key words: noise, vibrations, rail track, elastic fastening system, dynamic track properties

1 Uvod

1.1 Problematika buke i vibracija prilikom prometovanja željezničkih vozila

Sve veći broj ljudi koji živi u gradskim i prigradskim zonama izložen je raznim negativnim utjecajima koji su posljedica života na takvim područjima. U urbanim sredinama problemi buke i vibracija od tračničkog prometa naglašeni su zbog blizine željezničke infrastrukture i okolnih građevina u kojima ljudi žive i rade. Potrebno je odrediti glavne izvore i mehanizme širenja buke i vibracija te načine njihove eliminacije ili smanjenja do prihvatljivih granica. Izvori buke i vibracija pri prometovanju tračničkih vozila mogu se odrediti numeričkim simulacijama međudjelovanja kotača i tračnica, provođenjem eksperimentalnih ispitivanja ili kombinacijom tih dviju metoda [1]. Prilikom kretanja vozila po kolosijeku kotač je u interakciji s tračnicom, što dovodi do pojave horizontalnih i vertikalnih vibracija. Proces nastanka vibracija od tračničkog prometa, njihovo širenje okolnim tлом te utjecaj na građevine i ljude vrlo je kompleksan zbog velikog broja parametara koji na njega utječu te, unatoč brojnim istraživanjima, još uvijek nije u potpunosti razjašnjen. U Republici Hrvatskoj dosad nisu donesene norme ni propisi koji se odnose na karakteristične i granične vrijednosti vibracija kojima ljudi smiju biti izloženi, no neke zemlje Europske unije, primjerice, Njemačka, Švedska, Norveška, Danska imaju definirane norme koje propisuju te vrijednosti [2]. U Europskoj uniji na snazi je uredba Europske komisije br. 1304/2014 [3] koja propisuje maksimalne razine buke koje željeznička vozila smiju emitirati. Uredbom je propisana norma HRN EN ISO 3095:2013 [4] prema kojoj je potrebno odrediti maksimalnu razinu buke pri prolasku vlaka. Stanje kolosijeka na kojem se ispituje buka pri prolasku vozila mora zadovoljiti normu HRN EN 15610:2009 [5] koja se odnosi na neravnost vozne površine tračnice te HRN EN 15461:2011 [6] koja se odnosi na stupanj prigušenja vibracija kolosiječne konstrukcije. Određivanjem tih parametara kolosiječne konstrukcije moguće je odrediti udio kolosijeka u ukupnim razinama buke pri prolasku vlaka. Motori vozila, aerodinamična buka pri velikim brzinama te kontakt kotača vozila i tračnice glavni su izvori buke i vibracija. Brzina prometovanja glavni je parametar koji utječe na dominantne izvore buke, pa je buka od motora vozila prevladavajuća pri brzinama do 20 km/h, kotrljanja kotača po tračnicama od 20 km/h do 250 km/h, dok je pri višim brzinama dominantan izvor aerodinamična buka [7].

1.2 Mehanizam širenja buke i vibracija na sučelju kotača i tračnice

Vožnja čeličnih kotača po čeličnim tračnicama predstavlja snažan izvor vibracija, a time i buke. Većina kotača nije savršeno okrugla, a dodatne nepravilnosti u njihovoj geometriji koje nastaju tijekom uporabe (razna oštećenja i stvaranje plosnatih

mjesta uslijed kočenja) uzrokuju pojavu periodičnih sila prilikom kontakta takve nepravilnosti s tračnicom koja je također neravna. Neravnosti većih valnih duljina uzrokuju značajna dinamička naprezanja u tračnicama, stradavanje pričvrsnog pribora, zastornog materijala te uranjeni zamor čelika na voznoj površini tračnica [8]. Naboranost malih valnih duljina naziva se još i akustična neravnost tračnica, te izaziva visokofrekvencijske 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. Vibracije i buka uslijed vibracija krutih struktura događaju se u granicama frekvencija 0-100 Hz, dok su frekvencije zrakom pronošenih zvučnih valova u granicama 30-5000 Hz, [9]. Vibracije tla uzrokovane željezničkim prometom ne mogu uzrokovati oštećenja građevina u blizini pruge, no već i male razine vibracija uzrokuju nelagodu kod ljudi.

1.3 Mjere za smanjenje buke i vibracija

Četiri su osnovne grupe mjera za smanjenje vibracija od željezničkog prometa: smanjenje vibracija na izvoru, smanjenje rasprostiranja vibracija, zaštita od vibracija na mjestu imisije i ekonomske mjere i regulative. Prva grupa predstavlja primarne (aktivne) mjere, a druge tri su sekundarne (pasivne) mjere zaštite od vibracija. Smanjenje vibracija na izvoru može se postići: odabirom odgovarajućeg tipa konstrukcije gornjeg ustroja, redovitim održavanjem vozne površine tračnica, eliminacijom diskontinuiteta na voznoj površini, odabirom odgovarajućeg tipa vozila te reprofiliranjem kotača vozila, smanjenjem brzine kretanja tračničkih vozila [2]. Pravilno projektiranje i odabir elemenata željezničkog gornjeg ustroja (pričvrsnog pribora, pragova, zastora) važna je mjera za smanjenje širenja vibracija (tablica 1). Optimizacijom elastičnosti tih elemenata, raste njihova sposobnost za prigušenje, upijanje ili raspršenje vibracija generiranih uslijed kontakta kotača i tračnice.

1.4 Uloga kolosijeka u ukupnoj razini buke i vibracija

Ukupna razina buke i vibracija sastoji se od komponenti koje emitiraju vozilo i kolosijek. Potrebno je razlučiti ukupnu razinu buke i vibracija koju izaziva vozilo i razinu kojoj je glavni razlog kolosijek. Da bi se udio buke i vibracija od kolosijeka i od vozila mogao razlučiti iz ukupne razine buke i vibracija, uvode se dodatni vibroakustični parametri: hrapavost kotača, hrapavost tračnica, kombinirana hrapavost, stupanj prigušenja kolosijeka, prijenosna funkcija buke kotrljanja, utjecaj razmaka pragova (pinned-pinned frekvencija). Buka i vibracije tračnice pri prometovanju vozila, osim o brzini, znatno ovise o sustavu pričvršćenja, krutosti tračničke podloške te neravnostima vozne površine kotača i tračnice.

Tablica 1. Smanjenje razine buke i vibracija u ovisnosti o izboru mjere [10]

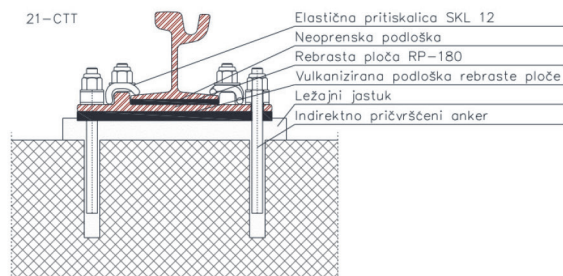
Mjera smanjenja na izvoru	Učinak smanjenja buke [dB]	Učinak smanjenja vibracija [dB]
Elastični pričvrсни pribor	3-6	5-10 (20)
Prigušivači tračnica	5-6	7-9
Zastorni tepih	8-18	10-15
Elastična podloška ispod praga	0-3	8-15

Elastični pričvrсни pribor povezuje tračnice s pragovima te prenosi opterećenja vozila s tračnica na donje dijelove konstrukcije gornjeg ustroja. Njegova uloga također je prigušenje vibracija koje se prilikom interakcije vozila i kolosijeka generiraju na njihovom sučelju. Standardni elastičan pričvrсни pribor ima relativno veliku vertikalnu krutost, obično oko 36 MN/m, no za razliku od krutog pričvrsnog pribora osjetno smanjuje vibracije. Specijalni elastični pričvrсни pribor, vertikalne krutosti od približno 5,4 MN/m, omogućuje smanjenje vibracija za 5 do 10 dB pri frekvencijama iznad 30 i 40 Hz, [11]. Svojestvo prigušenja buke i vibracija pričvrsnog pribora moguće je optimizirati pravilnim projektiranjem i modeliranjem elemenata pričvršćenja, vodeći pri tom računa o predviđenom intenzitetu i frekvencijskom karakteru vibracija koje su očekivane na kolosijeku.

Neki od visokoelastičnih pričvrsnih pribora u primjeni su Vanguard, Cologne Egg i Zagreb 21-CTT sustavi. Cologne Egg sustav pričvršćenja radi na principu da je tračnica pričvršćena na ovalnu podlogu preko tijela podloške. Efekt je smanjenje vibracija do 7 dB za frekvencije od 31.5 do 45 Hz i 18 dB za frekvencije 63-80 Hz [12]. U slučaju Vanguard sustava elastičnog pričvršćenja, tračnica je poduprta elastičnim klinovima ili trakama priljubljenima uz vrat tračnice koje omogućuju da nožica tračnice ostane slobodna te nema izravnog kontakta između nožice tračnice i praga. Mala vertikalna krutost elemenata Vanguard sustava omogućava vrlo dobro prigušenje, apsorpciju i smanjenje prijenosa dinamičkih sila (vibracija) s tračnice na podlogu, [13]. Visokoelastični pričvrсни pribori Vanguard i Cologne Egg su vrlo složeni za proizvodnju te su samim tim usprkos kvalitetnim vibroakustičnim svojstvima pogodni samo u specifičnim slučajevima.

Zagreb 21-CTT sustav pričvršćenja (slika 1.) je razvijen na Građevinskom fakultetu Zagreb te je svojim vibroakustičnim svojstvima i jednostavnim procesom proizvodnje i ugradnje kvalitetno rješenje za smanjenje buke i vibracija nastalih tračničkim prometom. Tračnica je oslonjena preko neoprenske podloške debljine 10 mm na čeličnu podložnu ploču. Kod ovog sustava pričvršćenje tračnice je ostvareno T-vijcima i SKL-12 pritiskalicama na podložnu ploču, a sidrenje ploče ostvaruje se neovisno preko zasebnog sidrenog vijka i zasebne elastične podloške posebno projektirane za taj sustav. Čelična podložna ploča se oslanja na ležajni jastuk preko elastične podloš-

ke. Elastična podloška je vulkanizirana na donju stranu čelične podložne ploče i pri ugradnji se uranja u ležajni jastuk koji je napravljen od posebno projektiranog sintetičkog mikrobetona. Uz dodatnu elastičnost, prednost je CTT-a potpuna izolacija sidrenog vijka, tako da ne postoji kontakt čelik-čelik između sidrenog vijka i čelične podložne ploče. Time se smanjuje utjecaj lutajućih struja na čelične komponente kolosijeka [14].



Slika 1. Presjek Zagreb 21-CTT pričvršnog sustava [15]

1.5 Potreba za ispitivanjem “DIV” elastičnog pričvršnog pribora

Građevinski fakultet iz Zagreba i DIV d.o.o. kroz program “Povećanje razvoja novih proizvoda i usluga koji proizlaze iz aktivnosti istraživanja i razvoja” provode projekt razvoja novog tipa elastičnog pričvršćenja za željezničke kolosijeka, koji će objediniti jake strane poznatih sustava za pričvršćivanje tračnica te implementirati inovacije u pogledu jednostavne montaže, antivandalske zaštite i poboljšanih svojstava prigušenja buke i vibracija. U procesu razvoja elastične pritiskalice posebna pažnja posvećuje se njenim vibroakustičnim svojstvima. Potrebno je ostvariti optimalne karakteristike vibroakustičnih svojstava razvojem numeričkih modela, te ih dokazati primjenom laboratorijskih i terenskih ispitivanja. U sklopu projekta, nakon razvoja 9 numeričkih modela i odabira 3 najbolja modela, predviđena su opsežna laboratorijska ispitivanja novih tipova pričvršćenja te, konačno, ispitivanje odabranog rješenja na ispitnoj dionici željezničkog kolosijeka tijekom 12 mjeseci. Praćenje vibroakustičnih svojstava pri razvoju pričvršćenja zahtijeva niz standardiziranih i naprednih postupaka ispitivanja koji će biti ovdje prikazani.

2 Pregled prethodnih istraživanja

Za određivanje vibroakustičnih svojstava pričvršćenja tračnice potrebno je primarno razumjeti mehanizme nastajanja i širenja buke i vibracija kroz kolosijek. Buka od kotrljanja kotača je najvažniji izvor buke pri prometovanju tračničkih vozila. Nastaje

na kontaktu kotača i tračnice čije međudjelovanje izaziva vibracije. Neravnost kotača i vozne površine tračnica generira vertikalne vibracije kotača i kolosijeka ovisno o njihovim dinamičkim svojstvima. Glavne valne duljine neravnosti, odgovornih za nastajanje buke pri kotrljanju kotača, u rasponu su od 5 do 500 mm. Nastale vibracije se dalje prenose na kotače i na kolosijek čiji elementi služe kao radijatori buke [1]. **Ekperimentalna ispitivanja** vibroakustičnih svojstava željezničkog kolosijeka mogu se podijeliti na laboratorijska i terenska (na ispitnoj dionici kolosijeka tijekom uporabe). Laboratorijska ispitivanja moguće je provoditi u skladu sa standardiziranim metodama za željezničku opremu prema normi za izradbu elastičnog pričvrsnog pribora za prigušenje vibracija (HRN ENV 13481-6/AC:2005 - Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Zahtjevi za izradbu kolosiječnog pričvrsnog pribora – 6. dio: Kolosiječni pričvrсни pribor za prigušenje vibracija [16]), te je moguće odrediti stupanj prigušenja kolosiječne konstrukcije primjenom metode modalnog čekića [17]. Terenska ispitivanja kolosijeka sastoje od mjerenja zvučnog tlaka i ubrzanja određenih dijelova kolosijeka pri prolasku tračničkih vozila (opisano u radnoj uputi [18]). Iz tako prikupljenih podataka moguće je razlučiti ukupnu razinu buke i vibracija koju izaziva prolazak vozila po kolosijeku. Kako bi se osim stupnja prigušenja vibracija odredio točan utjecaj koji u ukupnim razinama buke emitira vozilo, a koji kolosijek, potrebno je mjeriti i hrapavost vozne površine tračnica i kotača. Postoji izravna i neizravna metoda mjerenja hrapavosti.

Izravna metoda mjerenja hrapavosti ima nekoliko nedostataka (dugotrajnost, zahtjeva izravan pristup tračnicama, ovisi o pozicioniranju linije mjerenja hrapavosti na voznoj površini tračnice ili kotača u poprečnom smjeru, uređaji za direktno mjerenje hrapavosti kontaktnom metodom koriste ticalo malog radijusa, a ta je hrapavost drugačija od one ostvarene kontaktom kotača i tračnice.

Indirektna metoda mjerenja hrapavosti koristi mjerenja vertikalnih vibracija akcelerometrima smještenima ispod nožice tračnice i definirana je tehničkom uputom HRI CEN/TR 16591:2016 [18]. Indirektnim se mjerenjima hrapavosti određuje efektivna hrapavost na izravnom kontaktu kotača i tračnice pri prolasku vozila.

Kombinirana efektivna hrapavost kotača i tračnica određuje se indirektno iz tercnih pojaseva spektra prikupljenih vibracija u rasponu od 100 do 5000 Hz mjerenjem razine vibracija $L_{a,meas}(f_{to})$ prosječnih ubrzanja tijekom prolaska jednog kotača u intervalu T_x . Iz tog spektra, računa se spektar ubrzanja glave tračnice $L_{a,head}(f_{to})$, a poslije i spektar ubrzanja u točki kontakta kotača i tračnice $L_{a,contact}(f_{to})$. Ubrzanja se pretvaraju u pomake $L_{x,contact}(f_{to})$ u točki kontakta. Posljednji je korak konverzija pomaka u kombiniranu efektivnu hrapavost. Navedeni koraci opisani su prema sljedećem izrazu [18]:

$$L_{r,tot}(V/f_{to}) = L_{a,meas}(f_{to}) - A_1(f_{to}) - A_2(f_{to}) - A_4(f_{to}) - 40 \log_{10}(2\pi f_{to})$$

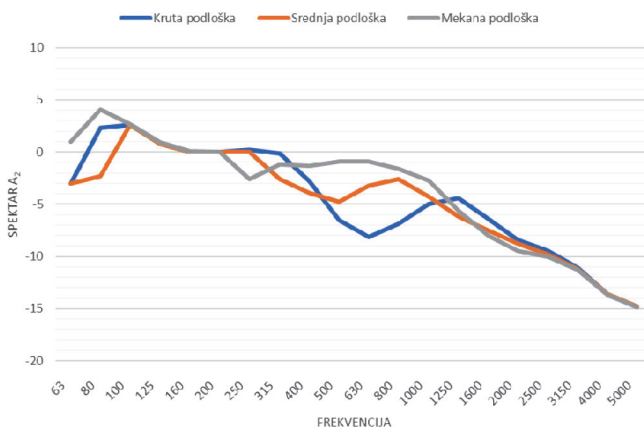
$40\log_{10}(2\pi f_{to})$ konverzija je iz ubrzanja $L_{a,contact}(f_{to})$ u pomake $L_{x,contact}(f_{to})$; f_{to} su središnje frekvencije proizvoljnih pojaseva u frekvencijskoj domeni (npr. terčni pojasevi); V je brzina vozila (m/s), $L_{r,tot}(V/f_{to})$ frekvencijski spektar kombinirane efektivne hrapavosti vozila i kotača; $L_{a,meas}(f_{to})$ frekvencijski spektar izmjerenih ekvivalentnih razina vertikalnih ubrzanja tračnice usrednjenih u intervalu prolaska jednog kotača T_x , $A_1(f_{to})$ je razlika razine između usrednjenih ubrzanja u točki mjerenja (ispod nožice tračnice) i na glavi tračnice (jer je akcelerometar nemoguće pri prometovanju vozila postaviti na voznu površinu tračnice):

$$A_1(f_{to}) = L_{a,meas}(f_{to}) - L_{a,head}(f_{to})$$

Razlika razine $A_2(f_{to})$ između pomaka vibracija u točki kontakta $L_{x,contact}(f_{to})$ na glavi tračnice i kombinirane efektivne hrapavosti $L_{r,tot}(f_{to})$ koja opisuje do koje mjere hrapavost izaziva vibracije tračnice kao posljedicu međudjelovanja kotača i tračnica.

$$A_2 = L_{x,contact}(f_{to}) - L_{r,tot}(f_{to})$$

Svojstvo koje najviše utječe na parametar A_2 jest krutost tračničke podloške. Prema normi CEN 13146-9 [19] moguće je mjeriti niskofrekvencijsku dinamičku krutost tračničke podloške. Varijacije parametra A_2 za terčne pojaseve od 63 do 5000 Hz za različite krutosti tračničke podloške prikazuje slika 2.



Slika 2. Utjecaj krutosti podloške na A_2

Ugradnja elastičnih podloški između nožice tračnice i praga je jedna od mjera za smanjenje niskofrekvencijskih vibracija. Što su veća elastična svojstva materijala od kojeg je podloška izrađena, to je veće i prigušenje vibracija. Debljina podloški ne bi

trebala biti veća od 10 mm kako bi se izbjegle deformacije tračnice uslijed vlastite težine.

$A_4(f_{to})$ je razlika razine vibracija u točki dodira i razini prosječnih vibracija u intervalu prolaska kotača:

$$A_4(f_{to}) = L_{a,head}(f_{to}) - L_{a,contact}(f_{to})$$

Spektar konverzije $A_4(f_{to})$ predstavlja razliku razine između vibracija u točki kontakta $L_{a,contact}(f_{to})$ i prosječne razine vibracija prolaska kotača $L_{a,head}(f_{to})$ te ovisi o stupnju prigušenja vibracija kolosijeka, odnosno prigušenju prostornih vibracija koje se izražava u dB/m.

Stupanj prigušenja kolosijeka je jedno od ključnih svojstava pri određivanju utjecaja kolosijeka u ukupnoj razini buke i vibracija od tračničkog prometa kojim se opisuje koliko je vibracija kolosijek u stanju apsorbirati, 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 [9]. Kolosijek s većim stupnjem prigušenja vibracija tijekom prolaska vozila apsorbirat će veću energiju vibracija i prenositi manje vibracija na okolno tlo te manje buke u okoliš. Prigušenje vibracija kolosijeka, iako mnogo značajnije od prigušenja kotača, ne utječe mnogo na frekvencijski odaziv 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.) te gubici energije prenesene na pragove i okolno tlo koji također utječu na ukupno prigušenje vibracija tračnice [1]. Normom HRN EN ISO 3095:2013 [4] određena je 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. Detaljni postupak metoda određivanja stupnja prigušenja kolosijeka obrađen je u doktorskom radu (Haladin 2016) [15].

Određivanje prijenosne funkcije buke i vibracija nastalih kotrljanjem vozila po tračnicama

Ako je buka kotrljanja jedini značajan izvor tijekom prolaska vozila (uz odsutnost aerodinamičke buke ili udarnih zvukovnih izvora), tada se ukupna prijenosna funkcija buke kotrljanja određuje iz ekvivalentne razine buke i kombinirane hrapavosti pri brzini v :

$$L_{HPRtot,ni}(f_c) = L_{eq,tp}(f_c) - L_{Rtot}(f_c, v) - 10\log(N_{ax}/I)$$

Ukupna prijenosna funkcija $L_{HppR,TOT,ni}(f_c)$ je neovisna o hrapavosti, duljini vozila i broju osi. Ona karakterizira vibroakustična svojstva vozila, kolosijeka i načine širenja

buke i vibracija. Prijenosna funkcija može biti definirana u skladu sa zvučnom snagom za definiranu duljinu kolosijeka ili vozila i normalizirana prema broju osovina:

$$L_{HWR_{tot}}(f_c) = L_W(f_c) - L_{R_{tot}}(f_c, v) - 10 \log(N_{ax})$$

$L_W(f_c)$ je razina zvuka nastala prolaskom vozila (ovisna o duljini). Ako je prijenosna funkcija određena kroz nekoliko mjerenja, srednje vrijednosti se računaju aritmetički. Ukupna prijenosna funkcija može biti razdvojena na komponentu uzrokovanu vozilom i na komponentu uzrokovanu kolosijekom pomoću metoda baziranih na proračunu, referentnim vozilima ili kolosijecima, i stacionarno recipročnim mjerenjima. Također je moguće odvojiti buku kotrljanja od ostalih izvora buke, primjerice aerodinamičnu buku od buke kotrljanja ili buku vozila od buke kotrljanja [18].

Utjecaj razmaka pragova na širenje buke i vibracija

Razmak pragova kolosijeka utječe na emisiju buke i vibracija koje se šire tračničkim prometom. "Pinned-pinned" frekvencije korespondiraju s valovima čije su nultočke smještene na mjestima podupiranja pragova. Prve dvije "pinned-pinned" frekvencije nalaze se približno oko 950 i 2200Hz (za tračnicu UIC60 i udaljenost pragova od 0.6 m). Za smanjenje vibracija u rasponu između pragova, moguće je koristiti prigušivače uz vrat tračnice koji ostvaruju prigušenje veće od 5 dB/m za određene frekvencijske pojaseve [20].

Za optimalan razvoj elastične "DIV" pritiskalice potrebna su uz određivanja hrpavosti i stupnja prigušenja kolosijeka, dodatna istraživanja vezana za krutost tračničke podloške, prijenosne funkcije, utjecaj razmaka pragova na širenje buke i vibracija, i kvalitetniju separaciju pojedinih izvora buke i vibracija.

3 Utjecaj tri tipa pričvršćenja na razinu buke i prigušenja vibracija - Savska ulica u Zagrebu

3.1 Sustavi pričvršćenja na ispitnoj dionici u Savskoj cesti

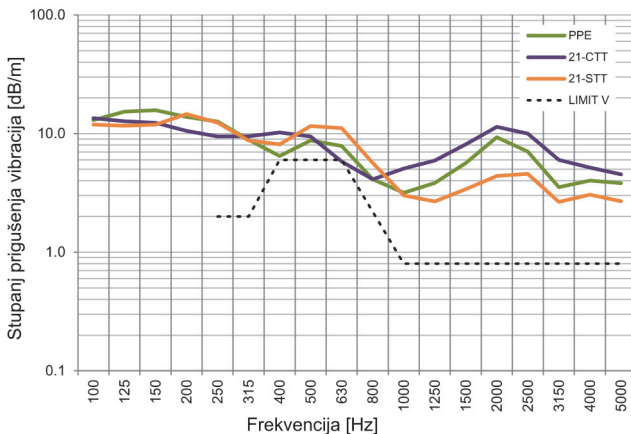
Dionica tramvajskog kolosijeka u Savskoj na kojoj se mjerenje izvršilo podijeljena je u tri poddionice. Prvi dio je referentan te je na tome dijelu primijenjen PPE sustav pričvršćenja kao uobičajeni na području grada Zagreba. Na drugome dijelu primijenjen je sustav pričvršćenja Zagreb 21-CTT, a na trećem dijelu je izveden sustav pričvršćenja naziva Zagreb 21-STT. PPE je skraćeni naziv za "pričvršni pribor povećane elastičnosti". Prema tom sustavu tračnica se oslanja na pojedinačne ležajeve koji se nalaze na betonskoj podlozi. CTT je skraćeni naziv za "Classic Tram Track" i njegove osnovne karakteristike su prikazane u uvodu. STT je skraćeni naziv za "Slab Tram Track", koji predstavlja novi sustav za tramvajske kolosijeke u Hrvatskoj čiju osnovu čine dvodijelni betonski pragovi na koje se tračnica oslanja preko elastične podloške.

3.2 Postupak ispitivanja kolosijeka

Na ispitnoj dionici određivan je stupanj prigušenja vibracija primjenom metode prolaska tračničkih vozila. Mjerenjima buke (razina zvučnog tlaka) na ispitnoj dionici, mogao se odrediti utjecaj stupnja prigušenja vibracija na konačne razine buke emitirane u okoliš. Analiza provedena na ispitnoj dionici na Savskoj cesti u kontroliranim uvjetima (tramvaj TMK2266, brzina 30 km/h, mjerenja u noćnim satima zbog smanjivanja utjecaja okolne buke), pokazala je kako visok stupanj prigušenja vibracija pridonosi smanjivanju razina buke pri prolasku tramvajskih vozila [15].

3.3 Rezultati ispitivanja tri tipa sustava pričvršćenja u Savskoj ulici

Stupanj prigušenja kolosijeka za niže frekvencijske pojaseve sličan je za sva tri tipa pričvršnog kolosiječnog pribora (slika 3.).



Slika 3. Stupanj prigušenja kolosijeka u vertikalnom smjeru za 3 tipa pričvršnog pribora [21]

Za frekvencijski pojas od 1000 Hz do 5000 Hz najučinkovitije smanjenje buke i vibracija je u primjeni 21-CTT pričvršnog sustava. 21-STT pričvršni sustav ima najmanje vrijednosti stupnja prigušenja vibracija zbog vlastite konstrukcije koja sadrži samo jednu elastičnu tračničku podlošku i općenito je to sustav veće krutosti od sustava pričvršćenja 21-CTT. Prema tablici 2 vidljivo je da isto referentno vozilo prolazeći konstantnom brzinom od 30 km/h emitira drugačije razine buke za razne tipove pričvršćenja. Niže vrijednosti buke su zabilježene na dijelu kolosijeka koji ima 21-CTT pričvršćenje, što je u korelaciji s podacima o najvišem stupnju prigušenja koje taj tip pričvršćenja ima.

Tablica 2. Ekvivalentna razina buke pri prolasku tramvajskog vozila TMK 2266 ($v = 30 \text{ km/h}$) [21]

Tip pričvršćenja	$L_{pAeq,Tp}$ [dB]	SD
PPE	84.5	0.3
21-CTT	80.9	1.4
21-STT	82.9	0.8

4 Zaključak

Smanjenje emisije buke i vibracija u urbanim područjima uvelike utječe na razinu ugodnosti i zdravstvene sigurnosti okolnog stanovništva, a također i na odabir željezničkog prometa kao oblika prijevoza. Cilj je ovog rada predstavljanje niza metoda koje pomažu u optimizaciji vibroakustičnih svojstava kolosijeka, u prvom redu elastičnih sustava pričvršćenja. Do važnih podataka o kolosijeku se dolazi pomoću metoda modeliranja ili eksperimentalnih metoda mjerenja vibroakustičnih svojstava. Za detaljnu karakterizaciju buke i vibracija koje emitira željezničko vozilo pri prolasku kolosijekom, potrebno je primijeniti napredne metode separacije, na temelju određenog stupnja prigušenja vibracija, indirektno hrapavosti tračnica te prijenosne funkcije na kontaktu kotača i tračnice. Na primjeru kolosijeka u Savskoj cesti vidljivo je kako je stupanj prigušenja vibracija jedno od najvažnijih vibroakustičnih svojstava kolosijeka te je u korelaciji s izmjerenim razinama buke pri prometovanju tramvajskog vozila kolosijekom. Primjenom navedenih metoda bit će moguće optimizirati vibroakustična svojstva nove elastične pritiskalice koja se razvija u sklopu zajedničkog projekta DIV d.o.o. i Građevinskog fakulteta.

Literatura

- [1] Thompson, D.: *Railway Noise and Vibrations*. Elsevier Ltd, 2009.
- [2] Ahac, M., Lakušić, S.: Vibracije od željezničkog prometa, *Dani prometnica 2009, Gospodarenje prometnom infrastrukturom*
- [3] 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.
- [4] HRN EN ISO 3095:2013 *Akustika – Oprema za željeznice – Mjerenje buke koju proizvode željeznička vozila* (ISO 3095:2013; EN ISO 3095:2013), 2013.
- [5] HRN EN 15610:2009 *Oprema za željeznice - Emisija buke - Mjerenje hrapavosti tračnica povezane sa stvaranjem buke pri vožnji željezničkih vozila*, 2009.

- [6] 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.
- [7] Haladin, I., Lakušić S., Koščak J.: Mjerenje stupnja prigušenja vibracija na klasičnim kolosiječnim konstrukcijama *GRAĐEVINAR* **68** (2016) 6, 461-476
- [8] 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>.
- [9] Esveld, C.: *Modern railway track*, Second edi. Delft: TU Delft, 2001
- [10] Lakušić S., Ahac M.: Rail traffic noise and vibration mitigation measures in urban areas
- [11] *Transit noise and vibration impact assessment*, Federal Transit Administration (FTA), 2006.
- [12] Zwolski, J.: *Railway track elements*, PhD CE, Wroclaw University of Technology
- [13] Lakušić, S., Ahac, M.: Mjere za smanjenje buke i vibracija od željezničkog prometa, *SABOR HRVATSKIH GRADITELJA 2008*, (ur. Simović, V.), Cavtat, Hrvatska, pp. 383-395, 06-08. studeni 2008.
- [14] Haladin, I., Lakušić S., Koščak J.: Izvještaj o monitoringu sustava pričvršćenja tramvajskog kolosijeka "Zagreb 21-CTT" i "Zagreb 21-STT" na Savskoj cesti u Zagrebu
- [15] Haladin, I.: Ocjena stupnja prigušenja vibracija tramvajskih kolosijeka primjenom metode prolaska tračničkih vozila, doktorski rad 2016, Sveučilište u Zagrebu
- [16] HRN ENV 13481-6/AC:2005; *Oprema za željeznice – Željeznički gornji ustroj – Zahtjevi za izradbu kolosječnog pričvrstnog pribora – 6. dio: Kolosiječni pričvrstni pribor za prigušenje vibracija* (ENV 13481-6:2002/AC:2004
- [17] Venghaus H, Thompson DJ, Toward M, Bumke D, Kitson P, Asmussen B, et al. Assessment of the efficiency of rail dampers using laboratory methods within the STARDAMP project. 38th Ger Annu Conf Acoust. 2012;22.
- [18] HRI CEN/TR 16591:2016; *Željeznički sustavi-Akustika-Metoda mjerenja za kombiniranu hrapavost, stupnjeve dotrajalosti željezničkog gornjeg ustroja i prijenosne funkcije*
- [19] HRN EN 13146-9:2012; *Željeznički sustavi-Željeznički gornji ustroj-Metode ispitivanja za kolosiječni pričvrstni pribor-9.dio: Određivanje krutosti* (EN 13146-9:2009+A1:2011)
- [20] Maes, J., Sol, H.: A double tuned rail damper—increased damping at the two first pinned—pinned frequencies, *Journal of Sound and Vibration*, vol. 267, no. 3, pp. 721–737, 2003, [http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X\(03\)00736-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0022-460X(03)00736-3).
- [21] Lakušić, S., Haladin, I., Ahac, M.: The Effect of Rail Fastening System Modifications on Tram Traffic Noise and Vibration, Hindawi Publishing Corporation, Shock and Vibration; Volume 2016, Article ID 4671302, 15 pages