

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Dzelzceļa transporta institūts

Andrejs BARANOVSKIS

Doktora studiju programmas „Transporta datorvadības, informācijas un elektroniskās sistēmas” doktorants

**DZELZCEĻA TRANSPORTA TROKŠŅA SPEKTRU MODELĒŠANA
UN EKSPERIMENTĀLIE PĒTIJUMI**

Promocijas darba kopsavilkums

Zinātniskais vadītājs
Dr. habil. phys., profesors
V. POPOVS

Rīga 2013

UDK 656.2.053.7(043.2)
Ba 534 d

Baranovskis A. Dzelzceļa transporta trokšņa spektru modelēšana un eksperimentālie pētījumi. Promocijas darba kopsavilkums. - R.: RTU, 2012. - 47 lpp.

Iespiests saskaņā ar RTU promocijas padomes „RTU P-20” 2012. gada 20. novembra lēmumu, protokols Nr. 4/2012



Šis darbs izstrādāts ar Eiropas Sociālā fonda atbalstu projektā «Atbalsts RTU doktora studiju īstenošanai».

ISBN 978-9934-10-402-2

**PROMOCIJAS DARBS IZVIRZĪTS
INŽENIERZINĀTŅU DOKTORA GRĀDA IEGŪŠANAI
RĪGAS TEHNISKAJĀ UNIVERSITĀTĒ**

Promocijas darbs inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai tiek publiski aizstāvēts 2013.g. 21. martā, plkst. 14:30, Rīgas Tehniskās universitātes Aeronautikas institūtā, Lomonosova ielā 1A, k-1, 218 auditorijā.

OFICIĀLIE RECENZENTI

Profesors, Dr. habil. sc. ing. Aleksandrs URBAHS
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, Dr. habil. sc. ing. Valerijs ZAGURSKIS
Rīgas Tehniskā universitāte, Latvija

Profesors, Dr. sc. ing. Žilvinas BAZARAS
Kauņas Tehnoloģiju universitāte, Lietuva

APSTIPRINĀJUMS

Apstiprinu, ka esmu izstrādājis doto promocijas darbu, kas iesniegts izskatīšanai Rīgas Tehniskajā universitātē inženierzinātņu doktora grāda iegūšanai. Promocijas darbs nav iesniegts nevienā citā universitātē zinātniskā grāda iegūšanai.

Andrejs BARANOVSKIS(Paraksts)

Datums:

Promocijas darbs ir uzrakstīts angļu valodā, satur ievadu, 7 nodaļas, slēdzienu, literatūras sarakstu, 24 pielikumus, 129 zīmējumus un ilustrācijas, kopā 204 lappuses. Literatūras sarakstā ir 95 nosaukumi.

SATURS

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS	5
Tēmas aktualitāte	5
Darba mērķis	5
Pētījumu metodika	5
Zinātniskā novitāte	5
Darba praktiskā vērtība	6
Aizstāvamās tēzes	6
Darba rezultātu aprobācija	6
Darba struktūra	8
1. DZELZCEĻA TROKŠŅA AVOTU ANALĪZE	10
2. STRUKTŪRU VIBRĀCIJU IZRAISĪTĀ SKAŅAS STAROJUMA ANALĪZE	12
3. DZELZCEĻA TROKŠŅA STAROJUMA UN IZPLATĪŠANĀS PROGNOZĒŠANAS METOŽU ANALĪZE	12
RMR oktāvu joslu metodes detalizēts apraksts	14
4. EKSPERIMENTĀLIE DZELZCEĻA TROKŠŅA PĒTĪJUMI	21
Mērījumu aparatūra	21
Mērījumu apstākļi	21
Vilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu atkarība no ātruma	23
Vilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektru analīze	25
Vilkmes troksnis	27
Bremzēšanas troksnis	28
Triecientroksnis sliežu savienojumu vietās	28
Salīdzinošā eksperimentālo pētījumu un modelēšanas, izmantojot RMR metodi, rezultātu analīze	29
RMR metodes pilnveidošana Latvijas dzelzceļa apstākļiem	32
Jaunu Latvijas vilcienu tipu definēšana RMR metodei	34
5. DZELZCEĻA TROKŠŅA KARTĒŠANA	36
Trokšņa kartēšanas rezultāti Latvijas dzelzceļā	36
6. TROKŠŅA AVOTU REDUKCIJA UN TROKŠŅU SAMAZINĀŠANA	40
7. LIKUMDOŠANAS UN NORMATĪVU BĀZES PILNVEIDOŠANAS IESPĒJAS AKUSTISKĀS EKOĻOĢIJAS JOMĀ	42
SLĒDZIENS	44
IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS	46

DARBA VISPĀRĒJS RAKSTUROJUMS

Tēmas aktualitāte

Dažādu transporta veidu, tai skaitā dzelzceļa transporta ātrumu un pārvadājumu apjoma pieaugums 20. gadsimta beigās un 21. gadsimta sākumā izraisīja strauju akustiskā smoga paaugstināšanos.

Šī problēma ir iemesls intensīviem zinātniskiem darbiem akustisko trokšņu spektru pētījumu jomā un rekomendāciju izstrādei nekaitīgiem un pieļaujamiem trokšņu līmeņiem vairākās pasaules valstīs

Pēdējo gadu laikā daudzās Rietumeiropas valstīs dzelzceļa transporta tehnoloģijas attīstījās un notika pastāvīga modernizācija, lai samazinātu trokšņa līmeņus plašā frekvenču diapazonā.

Diemžēl vairākas Austrumeiropas valstis joprojām atpaliiek šīs problēmas risināšanā. Pēc Latvijas iestāšanās ES, Latvijas dzelzceļam radās nepieciešamība veikt zinātniski pētnieciskus darbus trokšņa spektru modelēšanas un mērījumu jomā, veikt trokšņu kartēšanu un izstrādāt trokšņa spektrālo līmeņu samazināšanas metodes saskaņā ar ES rekomendācijām.

Darba mērķis

Darba **mērķis** ir Latvijas dzelzceļa transporta satiksmes rādīta trokšņa spektru eksperimentālā izpēte, moderno dzelzceļa trokšņa modelēšanas metožu analīze un ES ieteiktās RMR (Reken - en Meetvoorschrift Railverkeerslawaai) modelēšanas metodes lietojamības novertēšana Latvijas dzelzceļā.

Izvirzītā mērķa īstenošanas nolūkā darbā tiek atrisināti sekojoši **uzdevumi**:

1. Dzelzceļa trokšņa avotu un moderno dzelzceļa trokšņa modelēšanas metožu analīze.
2. Dažādu ritošā sastāva tipu garāmbraukšanas trokšņa spektru eksperimentālie mērījumi, ievērojot pašreizējo tehnoloģiju stāvokli Latvijas dzelzceļā.
3. Dažādu ritošā sastāva tipu garāmbraukšanas trokšņa spektru modelēšana, ievērojot pašreizējo tehnoloģiju stāvokli Latvijas dzelzceļā un salīdzinošā mērījumu un modelēšanas rezultātu analīze.
4. Jaunu Latvijas vilcienu tipu definēšana modelēšanai, izmantojot ES ieteikto metodi un rekomendāciju izstrāde trokšņa karšu sagatavošanai Latvijas dzelzceļā saskaņā ar ES prasībām.
5. Trokšņa avotu redukcijas un trokšņa samazināšanas iespēju analīze Latvijas dzelzceļā.

Pētījumu metodika

Trokšņa spektru eksperimentālie pētījumi tika veikti ar kalibrēto mēraparatūru, kas atbilst EN 61672-1 1 precizitātes līmeņa mēraparatūras prasībām un saskaņā ar LVS EN ISO 3095:2005. Mērījumu rezultāti tika analizēti un statistiski apstrādāti izmantojot Excel un Svantek izstrādāto SVAN PC programmnodrošinājumu.

Trokšņa spektru modelēšana veikta izmantojot MathCAD programmnodrošinājumu, CadnaA trokšņu kartēšanas programmnodrošinājumu un darba gaitā izstrādāto Train Noise Software (TNS) programmnodrošinājumu.

Trokšņa kartes tika izstrādātas ar CadnaA programmnodrošinājuma palīdzību.

Zinātniskā novitāte

Darba zinātniskā novitāte ir oriģinālos dzelzceļa transporta trokšņa izpētes rezultātos Latvijas dzelzceļā, kas ir nozīmīgs ieguldījums dzelzceļa transporta tehnoloģiju attīstībā.

Promocijas darba ietvāros tika veikta vairāku dzelzceļa transporta trokšņa modelēšanas metožu analīze un pilnveidota ES ieteiktā modelēšanas metode, ņemot vērā Latvijas dzelzceļa transporta īpatnības.

Darba praktiskā vērtība

Dažādu vilcienu tipu rādītā trokšņa eksperimentālās izpētes rezultāti Latvijas dzelzceļā var tikt izmantoti vilcienu atbilstības novērtēšanai savstarpējas izmantojamības tehniskām specifikācijām.

Pilnveidotā modelēšanas metode un praktiskās rekomendācijas tiks izmantotas trokšņa kartēšanas rezultātu precizitātes uzlabošanai un trokšņa samazināšanas rīcības plānu izstrādei Latvijas dzelzceļā.

Eksperimentāli izpētīts akustiskais efekts pēc sliežu atjaunošanas, izmantojot slīpēšanu, uzlabos nākamo sliežu atjaunināšanas darbu kvalitāti.

Darba rezultāti ir ieviesti Rīgas Tehniskās universitātes (Dzelzceļa transporta institūts) un Latvijas dzelzceļa kopīga projekta ietvaros:

- “Dzelzceļa ritošā sastāva trokšņa mērījumu rezultātu apstrādes un kartēšanas metodikas izstrāde un dzelzceļa darbinieku apmācība”, Nr. DFG-52/9669, 2011 – 2012;

Rīgas Tehniskās universitātes (Dzelzceļa transporta institūts), Latvijas dzelzceļa un Latvijas Republikas Izglītības un zinātnes ministrijas kopīgo projektu ietvaros:

- „Latvijas dzelzceļa ritošā sastāva trokšņa starojuma un izplatīšanās matemātiskā modelēšana un eksperimentālie pētījumi”, Nr. FLPP-2009/44, 2009;
- “Dzelzceļa objektu akustiskās emisijas modelēšana pilsētas intelektuālās transporta sistēmās”, Nr. R7327, 2008.

Darba rezultāti tika izmantoti apmācības moduļu izstrādāšanai dzelzceļa trokšņa jomā projekta TEMPUS MISCTIF ietvaros, 2009 - 2011.

Darbā iegūtie rezultāti tiek izmantoti Rīgas Tehniskās universitātes (Dzelzceļa transporta institūts) un Latvijas dzelzceļa kopīga projekta ietvaros:

- „Priekšlikumu VAS Latvijas dzelzceļš rīcības plānam trokšņu samazināšanai Rīgas pilsētā izstrāde”, 2012;

un EK LIFE+ programmas projekta LIFE11 ENV/LV/376 ISRNM “Innovative Solutions for Railway Noise Management” ietvaros, 2012 – 2015.

Aizstāvamās tēzes

- 1) Pētījumu rezultāti, kas parādīja relatīvi augstus Latvijas dzelzceļa ritošā sastāva trokšņa līmeņus plašā frekvenču diapazonā un deva iespēju noteikt spektru izmaiņu raksturu atkarībā no kustības ātruma, ritošā sastāva tipa un sliežu ceļa stāvokļa.
- 2) Trokšņa spektru modelēšanas rezultāti Latvijas dzelzceļam, kas deva iespēju noteikt ES Eiropas dzelzceļiem rekomendētās modelēšanas metodes ierobežotību.
- 3) Pilnveidota Eiropas modelēšanas metode pielietošanai Latvijas dzelzceļa apstākļos, balstoties uz programmatūrā realizētu dzelzceļa ritošā sastāva garāmbraukšanas trokšņa spektru aprēķinu algoritmu.

Darba rezultātu aprobācija

Promocijas darba rezultāti tika prezentēti un apspriesti šādās starptautiskās zinātniskajās **konferencēs**:

- 1) The 19th International Congress on Sound and Vibration (ICSV'19), Vilnius, July 08-12, 2012. Topic of presentation – *Experimental investigation of railway noise and railway noise mapping in Latvia*.
- 2) The 7th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2012), Panevezys, May 03-04, 2012. Topic of presentation – *Railway noise in Latvia*.
- 3) The 52nd International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Oct. 15, 2011. Topic of presentation – *Railway noise abatement at Plavinas gymnasium*.

- 4) The International Scientific Conference Signal and Image Processing and Applications (SIPA 2011), Crete, June 22-24, 2011. Topic of presentation – *Application of RMR method for noise prediction on Latvian railway.*
- 5) The 7th International Scientific Conference Transbaltica 2011, Vilnius, May 05-06, 2011. Topic of presentation – *Adaptation of RMR noise propagation prediction method for Latvian railway conditions.*
- 6) The 51st International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Oct. 11-15, 2010. Topic of presentation – *Update of CadnaA noise map based on measurement results.*
- 7) The 51st International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Oct. 11-15, 2010. Topic of presentation – *General overview of predictive acoustics for railway transport.*
- 8) The 5th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2010), Panevezys, June 03-04, 2010. Topic of presentation – *Comparison of five national noise emission calculation methods for rail traffic.*
- 9) The 50th International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Oct. 14-16, 2009. Topic of presentation – *Railway rolling stock noise experimental measurements.*
- 10) The 50th International Scientific Conference of Riga Technical University, Riga, Oct. 14-16, 2009. Topic of presentation – *Adequacy evaluation of railway rolling stock noise models.*
- 11) Rīgas Tehniskās universitātes 49. starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Okt. 13-15, 2008. Prezentācijas tēma – *Dzelzceļa trokšņa CRN matemātiskais modelis.*
- 12) Rīgas Tehniskās universitātes 49. starptautiskā zinātniskā konference, Rīga, Okt. 13-15, 2008. Prezentācijas tēma – *Dzelzceļa objektu radītā trokšņa eksperimentālie mērījumi.*

Latvijas dzelzceļā, balstoties uz promocijas darba rezultātiem tika sagatavotas, prezentētas un apspriestas **atskaites** pēc trim projektiem:

- 1) “Dzelzceļa ritošā sastāva trokšņa mērījumu rezultātu apstrādes un kartēšanas metodikas izstrāde un dzelzceļa darbinieku apmācība”, Nr. DFG-52/9669, 2012.
- 2) „Latvijas dzelzceļa ritošā sastāva trokšņa starojuma un izplatīšanās matemātiskā modelēšana un eksperimentālie pētījumi”, Nr. FLPP-2009/44, 2009.
- 3) “Dzelzceļa objektu akustiskās emisijas modelēšana pilsētas intelektuālās transporta sistēmās”, Nr. R7327, 2008.

Promocijas darba rezultāti tika prezentēti un apspriesti nolasītās **lekcijās** projekta TEMPUS MISCTIF ietvaros:

- 1) Dnepropetrovsk National University of railway transport named after academician V. Lazaryan, Feb. 24-25, 2011, 12 hours.
- 2) Kyrgyz State University of Construction, Transport and Architecture named after N. Isanov, May 16-17, 2011, 12 hours.
- 3) Kazakh academy of transport and communications named after M. Tynyshpayev, May 19-20, 2011, 12 hours.

Tika publicēti šādi promocijas darba rezultātus atspoguļojoši un ar darba tēmu saistīti raksti:

- 1) Baranovskii A. Experimental investigation of railway noise and railway noise mapping in Latvia // Proceedings of the 19th International Congress on Sound and Vibration (ICSV'19), Lithuania, Vilnius, July 08-12, 2012. – 8 pp. (CD-ROM)
- 2) Baranovskii A. Railway noise in Latvia // Proceedings of the 7th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2012), Lithuania, Panevezys, May 03-04, 2012. – 33 – 37 pp.
- 3) Baranovskii A. Railway noise abatement at Plavinas gymnasium // Scientific proceedings of RTU. Transport and engineering. Railway transport. – 2012. – Series 6, Vol. 34. – 3 pp. (accepted for publishing)
- 4) Baranovskii A. Computer simulation and experimental investigations of noise levels and spectra for railway transport // Automatic control and computer sciences. – 2011. - Vol. 45, Nr. 5. – 293-300 pp. (springerlink, scopus)
- 5) Барановский А. Компьютерное моделирование и экспериментальные исследования уровней и спектров шумов от железнодорожного транспорта // Автоматика и вычислительная техника. - 2011. - Н. 5. – 69-78 с. (viniti)
- 6) Baranovskii A. Application of RMR method for noise prediction on Latvian railway // Proceedings of the International Scientific Conference Signal and Image Processing and Applications (SIPA 2011), Greece, Hersonissos, June 22-24, 2011. - 33-38 pp. (actapress)
- 7) Baranovskii A. Adaptation of RMR noise propagation prediction method for Latvian railway conditions // Proceedings of the 7th International Scientific Conference TRANSBALTICA 2011, Lithuania, Vilnius, May 05-06, 2011. – 11-15 pp. (VGTU online library)
- 8) Balckars P., Baranovskii A., Popov V. General overview of predictive acoustics for railway transport // Scientific proceedings of RTU. Transport and engineering. Railway transport. – 2011. – Series 6, Vol. 33. – 3 pp. (accepted for publishing)
- 9) Baranovskii A. Comparison of five national noise emission calculation methods for rail traffic // Proceedings of the 5th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2010), Lithuania, Panevezys, May 03-04, 2010. – 7-12 pp. (scopus)
- 10) Попов В., Балцкарс П., Барановский А., Ильина Л. Экспериментальные исследования уровней шума железнодорожного подвижного состава // RTU zinātniskie raksti. Mašīnzinātne un transports. Dzelzceļa transports. – 2008. – Sējums 6, Sērija 30. – 29-37 lpp.
- 11) Попов В., Балцкарс П., Барановский А. Математическая модель CRN шума железнодорожного подвижного состава // RTU zinātniskie raksti. Mašīnzinātne un transports. Dzelzceļa transports. – 2008. – Sējums 6, Sērija 30. – 21-29 lpp.

Darba struktūra

Darbs sastāv no ievada, septiņām nodaļām, slēdziena, literatūras saraksta un pielikumiem.

- 1. nodaļā tiek analizēti galvenie dzelzceļa trokšņa avoti, īpaši ripošanas troksnis. Tiek apskatīti daži iespējamie vibrāciju modelēšanas veidi ripošanas trokšņu galvenajiem komponentu avotiem: sliedēm, riteņiem un gulšņiem.
- 2. nodaļā tiek analizēta skaņas izstarošana no parastiem avotiem un ripošanas trokšņa galvenajiem komponentu avotiem.
- 3. nodaļā tiek analizētas galvenās skaņas izplatīšanas īpašības gaisā; veikta dzelzceļa trokšņa izstarošanās un izplatīšanās determinēto, statistisko, pusempīrisko un empīrisko modeļu analīze un tiek detalizēti aprakstīta ES

rekomendētā metode RMR (Reken - en Meetvoorschrift Railverkeerslawaa) dzelzceļa trokšņa modelēšanai oktāvu joslās.

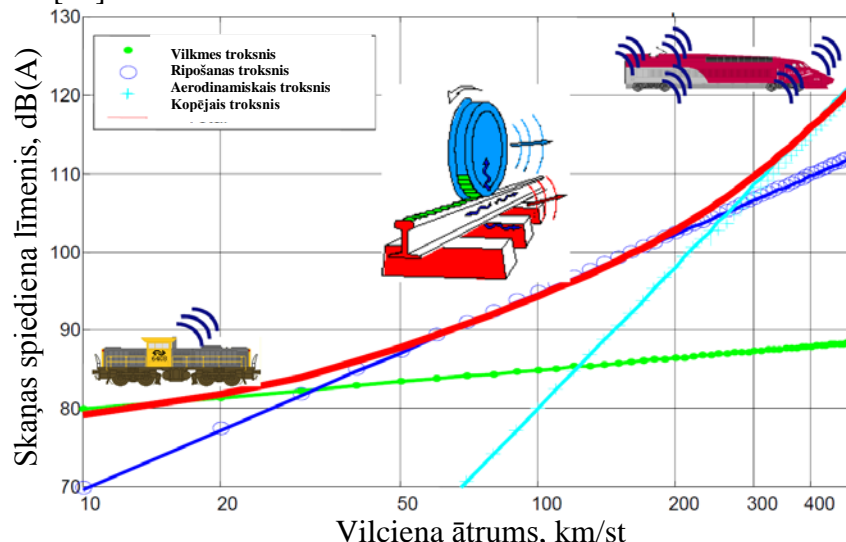
- 4. nodaļā ir analizētas modernās dzelzceļa trokšņa eksperimentālo pētījumu metodes; tiek veikta dzelzceļa trokšņa modelēšanas un eksperimentālo pētījumu rezultātu Latvijas dzelzceļā salīdzinošā analīze; tiek aprakstīts izstrādāts un programmatūrā realizēts (TNS – Train Noise Software) dzelzceļa ritošā sastāva garāmbraukšanas trokšņa spektru aprēķinu algoritms un tiek pilnveidota RMR metode pielietošanai Latvijas dzelzceļa apstākļos.
- 5. nodaļā trokšņu kartēšana, īpaši Rīgas aglomerācijai, ir analizēta un tiek piedāvāta pieeja trokšņa kartēšanas rezultātu precizitātes uzlabošanai Latvijas dzelzceļa apstākļos, izmantojot TNS.
- 6. nodaļā tiek analizētas modernās dzelzceļa trokšņa avotu samazināšanas un trokšņa līmeņu samazināšanas metodes.
- 7. nodaļā tiek analizētas likumdošanas un normatīvu bāzes pilnveidošanas iespējas akustiskās ekoloģijas jomā saistībā ar dzelzceļa troksni.

1. DZELZCEĻA TROKŠŅA AVOTU ANALĪZE

Dzelzceļa transports ir ļoti specifisks trokšņa avotu novērtēšanas un atdalīšanas ziņā. Trokšņu kontroles nolūkos ir ļoti svarīgi novērtēt vilciena un sliežu ceļa ietekmi uz kopējo trokšņa līmeni. Ņemot vērā problēmas sarežģītību, Eiropā, tikai 2002. gadā tika ieviestas pirmās atsevišķo dzelzceļa transportlīdzekļu radītā trokšņa robežvērtības, kas kļuva par daļu no "Technical specifications for interoperability, TSI" (Savietojamības tehniskās specifikācijas) [27].

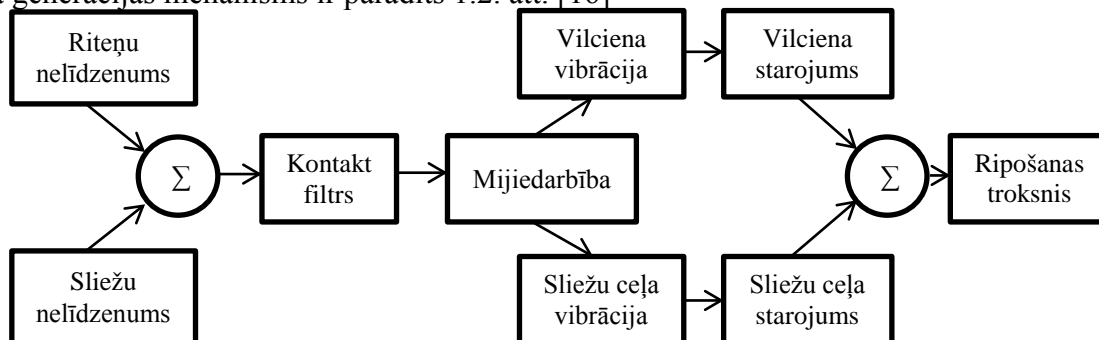
Pastāv vairāki dzelzceļa trokšņa avoti, un dominējošais avots var atšķirties dažādās situācijās. Tomēr parastos ekspluatācijas apstākļos, galvenais dzelzceļa trokšņa avots parasti ir ripošanas troksnis, ko izraisa sliežu un riteņu pāru mijiedarbība, vilcienam braucot pa taisnu sliežu ceļu. Citi svarīgi trokšņa avoti ir vilkmes un aerodinamiskais troksnis. Vilkmes troksnis ir mazāk atkarīgs no vilciena ātruma un parasti ir dominējošs nelielos ātrumos. Visvairāk atkarīgs no vilciena ātruma ir aerodinamiskais troksnis, kas kļūst dominējošs lielos ātrumos. Tādu trokšņa avotu rašanās, kā spiediena troksnis pagriezienos, bremsēšanas troksnis, triecientroksnis sliežu savienojumu vietās vai izrāvumu dēļ riteņu virsmā, kā arī vilcienu signāli var viegli paaugstināt kopējo trokšņa līmeni par 20-30 dB.

Galveno dzelzceļa trokšņa avotu ātruma atkarību un to ietekmi uz kopējo trokšņa līmeni ilustrē 1.1. att. [29].



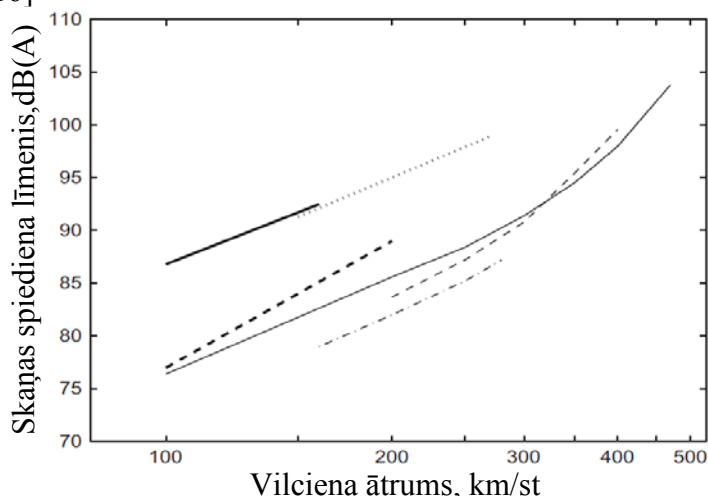
1.1. att. Dzelzceļa trokšņa avoti un to tipiskā atkarība no vilciena ātruma

Attēlā 1.1. ir redzams, ka ripošanas troksnis ir galvenais trokšņa avots, ja vilciena ātrums nepārsniedz 250 km/st. Ripošanas troksnis ir atkarīgs no riteņu pāru un sliežu nelīdzenumiem un rievojuma. Vilciena garāmbraukšanas laikā, nelīdzenumi riteņu un sliežu kontakta vietā izraisa vilciena un sliežu ceļa vertikālās vibrācijas. Vienkāršots ripošanas trokšņa ģenerācijas mehānisms ir parādīts 1.2. att. [16]



1.2. att. Ripošanas trokšņa ģenerācijas mehānisms

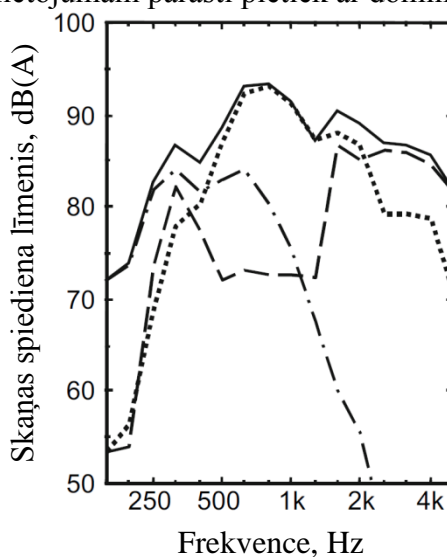
Ripošanas troksnis ir platjoslas trokšņa avots ar dažādām rezonanses frekvencēm riteņiem, sliedēm, gulšņiem, ratiņiem, u.c. Ripošanas troksnis ir atkarīgs no ātruma, jo riteņu un sliežu nelīdzenumi atbilst dažādām trokšņa frekvencēm, mainoties vilciena ātrumam. Galvenais ripošanas troksni ietekmējošais nelīdzenumu viļņa garumu diapazons ir no 5 mm līdz 500 mm. Attēlā 1.3. ir parādīti nomērīti 25 m attālumā no sliežu ceļa centra dažādu vilciena tipu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu piemēri. Rezultātos ir redzams, kā pēc ripošanas trokšņa vilcieni var tikt sadalīti divās grupās: vilcieni ar čuguna kļu bruģiem un vilcieniem ar cita tipa bruģu sistēmu. Atšķirība trokšņa līmeņos starp divām grupām ir no 8 dB(A) līdz 10 dB(A). [16]



1.3. att. Dažādu vilcieni tipu garāmbraukšanas trokšņa mērījumu rezultāti

Ar kļu bruģiem: —, BR Mk II pasažieru vagoni; ·····, TGV-PSE; Ar disku bruģiem: ---, BR Mk III pasažieru vagoni; —, TGV-A, Duplex and Thalys; ---, ICE/V; · - · - ·, Talgo (bruģu bruģis)

No akustiskā viedokļa vilciena/sliežu ceļa sistēma ir ļoti sarežģīta sistēma, kas sastāv no daudziem neatkarīgiem avotiem, kuriem piemīt individuālās fizikālās un akustiskās īpašības. Ir praktiski neiespējams analītiski aprakstīt visu sistēmu kopumā, ņemot vērā visus komponentu avotus un visus starojumu ietekmējošus parametrus. Tomēr, ņemot vērā to, kā rezultējošs skaņas spiediena līmenis uztveršanas punktā veidojās, enerģētiski summējot visu avotu starojumus, praktiskam pielietojumam parasti pietiek ar dominējošo avotu aprakstu.



1.4. att. TWINS simulācijas rezultātu piemērs

— rezultējošs, 100 dB(A); --- riteņi, 94.4 dB(A), ····· sliedes, 98.3 dB(A); - · - · gulšņi, 87.2 dB(A)

Svarīgākie ripošanas trokšņa avoti ir riteņi, sliedes un gulšņi. Gulšņi ir nozīmīgākais avots zemo frekvenču diapazonā, sliedes vidējo frekvenču diapazonā un riteņi augsto frekvenču diapazonā. TWINS (train wheel interaction software) simulēšanas rezultātu piemērs ir parādīts 1.4. att. rezultējošs, riteņu, sliežu un gulšņu troksnis. Simulācija tika veikta kravas vilcienam ar ātrumu 100 km/st uz ceļa ar relatīvi mīkstu sliežu starpliku (200 MN/m). [16]

Tā kā ripošanas troksnis ir komponentu avotu vibrāciju produkts, pirmais solis ripošanas trokšņa modelēšanā ir saistīts ar avota vibrācijas noteikšanu. Dažādas vienkāršotas un vairāk detalizētas metodes ir pieejamas ripošanas trokšņa komponentu avotu vibrācijas modelēšanai. Dažas no šīm metodēm ir apspriestas disertācijas 1. nodaļā.

2. STRUKTŪRU VIBRĀCIJU IZRAISĪTĀ SKAŅAS STAROJUMA ANALĪZE

Skaņas jaudu, kuru izstaro vibrējošā struktūra, var aprakstīt ar starojuma rādītāju. Starojuma rādītājs ir atkarīgs no avota izmēriem un tiecas uz vienotību, kad avota izmērs ir liels, salīdzinot ar skaņas viļņa garumu. Lai aprakstītu skaņas starojuma jaudas sadalījumu telpā, izmanto vērsuma koeficientu.

Dominējošie ripošanas trokšņa komponenti avoti: riteņi, sliedes un gulšņi var tikt adekvāti aprakstīti kā vienkārši starotāji ar zināmiem starojuma rādītājiem un vērsuma koeficientiem, piemēram: monopoles, dipoles, multipoles un lineārie avoti. Šajā disertācijas nodaļā tiek apskatīti vienkāršie starotāji un to izmantošana ripošanas trokšņa komponentu avotu aprakstīšanai.

3. DZELZCEĻA TROKŠŅA STAROJUMA UN IZPLATĪŠANĀS PROGNOZĒŠANAS METOŽU ANALĪZE

Kad avota izstarotā skaņas jauda ir zināma, ir iespējams noteikt skaņas līmeni uztveršanas punktā. Tomēr, lai noteiktu skaņas spiediena līmeni uztveršanas punktā, ir nepieciešams ņemt vērā vairākas skaņas viļņu izplatīšanās īpašības vidē. Dzelzceļa trokšņa izplatīšanos ietekmē zemes virsma, atmosfēras absorbcija, vēja un temperatūras gradienti, šķēršļi (atstarojošie vai absorbējošie) un augi izplatīšanās ceļā, u.c. Turklāt, situāciju sarežģī avota (vilciens) pārvietošanās.

Dažādi analītiski modeļi un metodes, ar noteiktiem ierobežojumiem, var tikt izmantoti, lai aprakstītu skaņas izplatīšanos dažādos apstākļos ar salīdzinoši augstu precizitātes līmeni, tomēr augsts precizitātes līmenis bieži prasa ievērojamus skaitļošanas resursus. Daži no plaši izmantotajiem modeļiem un metodēm skaņas izplatīšanās prognozēšanai gaisā ir aprakstīti 3.1. tabulā: Euler - linearizētais Eilera modelis; BEM - robeželementu metode; METBEM - Meteo-BEM; PE - paraboliskā vienādojuma metode; GTPE - vispārinātā reljefa PE; FFP - ātra lauka programma; SRAY – taisno staru modelis bez refrakcijas atmosfērā; CRAYL – izklidēto staru modelis ar refrakciju atmosfērā, izmantojot linearizētus skaņas ātruma profilus; STAT - dažādi statistiskie izkliedes modeļi. [12]

HARMONOISE projekta [14] ietvaros veiktā 3.1. tabulā aprakstīto modeļu un metožu izpēte parādīja, ka Euler, BEM, un PE metodes (PE un GTPE) ir precīzas, vairumā gadījumu. No šīm pamata metodēm tikai Euler un PE metodes var ņemt vērā reālus meteoroloģiskus apstākļus. Galvenā problēma, izmantojot Euler modeli, ir ļoti liels skaitļošanas noslogojums. Divdimensiju PE metode ir laba alternatīva precizitātes un skaitļošanas noslogojuma ziņā.

Situācijās, kad PE metodes izmantošana nav iespējama un kad refrakciju var neņemt vērā, var izmantot SRAY vai BEM. Principā, BEM ir izmantojama visās situācijās.

Tomēr tiek rekomendēts pēc iespējas izmantot SRAY mazāka skaitļošanas noslogojuma dēļ.

Statistiskus izkļiedes modeļus var izmantot skaņas izplatīšanās modelēšanai mežos un pilsētās. [15]

3.1. tabula

Skaņas izplatīšanas modeļi un metodes

Modelis	Lietojamības ierobežojumi	Skaitļošanas resursi
EULER	nav ierobežojumu, neieskaitot tuvināto virsmas impedances attēlošanu	ļoti daudz
BEM	neņem vērā atmosfēras refrakciju	daudz
METBEM	tikai lineārie skaņas ātruma profili	daudz
PE	simetrisks starojums, izplatīšanās leņķi no 35 līdz 70 grādiem, vienvirziena izplatīšanās, taisnstūrveida šķēršļi un līdzena virsma	daudz
GTPE	līdzīgi PE, bet tiek ņemtas vērā virsmas izmaiņas ar slīpumu ne vairāk kā 30 grādi	daudz
FFP	simetrisks starojums, kārtaina atmosfēra, nav šķēršļu un līdzena viendabīga virsma	daudz
SRAY	neņem vērā atmosfēras refrakciju, šķēršļu izmēri lielāki par viļņa garumu ar līdzenu virsmu	maz
CRAY	līdzīgi SRAY, bet ņem vērā atmosfēras refrakciju	maz
STAT	neņem vērā atmosfēras refrakciju un gadījuma veidā izvietoti izkļiedes objekti ar izmēriem, mazākiem par viļņa garumu	maz

Praktiskā lietošanā, piemēram, trokšņu kartes izstrādei, faktiski nav iespējams ņemt vērā visus nepieciešamos parametrus aprēķinu veikšanai, izmantojot tikai analītiskus vibrācijas, skaņas starojuma un izplatīšanās modeļus. Tāpēc tiek izmantoti skaņas starojuma un izplatīšanās tuvināti un statistiski vidēji empīriskie modeļi.

Dzelzceļa trokšņa modelēšanai daudzās ES dalībvalstīs tika izstrādātas un jau ilgāk nekā divas dekādes tiek pielietotas nacionālās metodes. Tabulā 3.2. ir apkopoti sekojošu metožu salīdzinošās analīzes rezultāti [3]: RMR (Nīderlande, ES pagaidu metode) [9, 24, 25], Schall 03 (Vācija) [9, 25] ON S5011 (Austrija), [9, 25], CRN (Apvienotā Karaliste) [11, 17], NMPB (Francija) [9], NMT (Ziemeļvalstīs) [9, 25], Nord2000 (jaunās paaudzes metode Ziemeļvalstīs) [9, 25], HARMONOISE inženieru metode [13].

Ir svarīgi pieminēt, ka nacionālās metodes daudzās valstīs tiek regulāri pārskatītas un uzlabotas, tāpēc veikta analīze kaut kādā mērā varēja zaudēt savu aktualitāti ierobežotās informācijas pieejamības dēļ. Autoram pieejamā informācija liecina, ka franču un vācu metodes nesen tika uzlabotas.

Par visdetalizētāko no salīdzinātām metodēm var uzskatīt HARMONOISE projekta ietvāros izstrādāto metodi. HARMONOISE projekta mērķis bija izstrādāt vienotu visiem ES dalībvalstīm modelēšanas metodi, tomēr daudzas valstis ir apmierinātas ar savām nacionālajām metodēm un nav motivētas investēt HARMONOISE metodes kā jaunās nacionālās metodes ievēšanai, tāpēc šī metode netika oficiāli apstiprināta. Vēl viens HARMONOISE projektā gūto rezultātu apstiprināšanas ilgstoša procesa iemesls ir tehnisko līdzekļu, piemēram, trokšņa kartēšanas programmatūras, trūkums metodes izmantošanai. Visvairāk HARMONOISE projekta pieredzi pārņēma Ziemeļvalstis, aktīvi iesaistoties projekta realizācijā un paralēli izstrādājot Nord2000 nacionālo metodi.

Par otro detalizētāko metodi var uzskatīt Nīderlandes nacionālo RMR metodi, kuru EK Vides trokšņa direktīvā 2002/49/EK par trokšņa novērtēšanas un pārvaldības kārtību ieteic kā pagaidu Eiropas metodi dzelzceļa trokšņa modelēšanai ES dalībvalstīs. [26] No detalizācijas pakāpes viedokļa RMR metodei seko NMT ar rupjāko sliežu ceļa ietekmes aprakstu, ONS5011 un NMPB ar mazāku avotu augstumu skaitu un CRN ar SCHALL 03, kas neparedz iespēju aprēķināt starojuma spektru.

Nemot vērā salīdzinošās analīzes rezultātus un EK rekomendācijas, promocijās darbā detalizētai izpētei tika izvēlēta RMR metode.

3.2. tabula

Atšķirības starp nacionālām dzelzceļa trokšņa modelēšanas metodēm

Īpašības	Metode			
	SCHALL03	ONSS011	CRN	NMPB
Pamata trokšņa radītājs	LAeq 25 m attālumā un 4 m augstumā, balstoties uz mērījumiem, starojums ir funkcija no vilciena kategorijas, garuma, disku bremžu procentuālās attiecības un ātruma	Skaņas jaudas līmeni oktāvu joslās, aprēķināti pēc mērījumiem dažādos attālumos un augstumos; starojums ir funkcija no vilciena kategorijas un ātruma	LAeq 25 m attālumā un 1.2 m - 4 m augstumā, aprēķināts uz SEL pamata; starojums ir funkcija no vilciena kategorijas, ātruma un vagonu skaita	Skaņas jaudas līmeni oktāvu joslās nomēriti 25 m attālumā un 3.5 m augstumā
Spektrs	-	63 Hz - 8 kHz oktāvu joslās	-	125 Hz - 4 kHz oktāvu joslās
Avota izvietojums	Viens avots sliežu virsmas līmenī	Viens avots 0.3 m virs sliežu virsmas līmeņa	Viens avots sliežu virsmas līmenī	5 cm un 80 cm virs sliežu virsmas līmeņa
Atkarība no ātruma	A-izsvārotiem līmeņiem	Katrai oktāvu joslai	SEL un A-izsvārotiem līmeņiem	Katrai oktāvu joslai
Sliežu ceļa ietekme	4 dažādas klases, nav atkarīgas no ātruma	3 dažādas klases, nav ātruma atkarības	6 dažādas klases, nav ātruma atkarības	-
Sliežu savienojumu, krustojumu, pārbrauktuvju un tiltu ietekme	-	-	Neatkarīgo no ātruma korigējošo koeficientu tabula	-
Specifiskie parametri	-	-	-	-
Īpašības	Metode			
	RMR	NMT	Nord2000	HARMONOISE
Pamata trokšņa radītājs	Skaņas jaudas līmeni oktāvu joslās katram avotam attiecībā pret 1 m sliežu garuma, ka funkcija no vilciena tipa, ātruma un satiksmes intensitātes	Skaņas jaudas līmeni oktāvu joslās attiecībā pret 1 m vilciena garuma, aprēķināti pēc mērījumiem dažādos attālumos un augstumos	Skaņas jaudas līmeni 1/3 oktāvu joslās attiecībā pret 1 m vilciena garuma, aprēķināti pēc mērījumiem dažādos attālumos un augstumos	Skaņas jaudas līmeni 1/3 oktāvu joslās kustīgiem punktu starotājiem 5 augstumos
Spektrs	63 Hz - 8 kHz	63 Hz - 8 kHz	25 Hz - 10 kHz	25 Hz - 10 kHz
Avota izvietojums	Līdz 4 avotiem dažādos augstumos: sliežu virsmas līmenī, 0.5 m, 2 m, 4 m un 5 m virs sliežu virsmas līmeņa	Viens avots katrai oktāvu joslai ar specifisku augstumu	0.01 m, 0.35 m un 0.7 m virs sliežu virsmas līmeņa ripošanas troksnim un noteiktos augstumos aerodinamiskam un vilkmes trokšņiem	5 avoti dažādos augstumos: sliežu virsmas līmenī, 0.5 m, 2 m, 3 m un 4 m virs sliežu virsmas līmeņa
Atkarība no ātruma	Katram avotam un oktāvu joslai	Katram avotam un oktāvu joslai	Katram avotam un 1/3 oktāvu joslai	Katram avotam un 1/3 oktāvu joslai
Sliežu ceļa ietekme	8 dažādas klases, korigēšana atkarīgā no ātruma	Korigēšana no -6 dB līdz +6 dB, bet nav specifiski klasificēta un nav atkarīga no ātruma	4 sliežu ceļa kategorijas sadalītas 3 apakškategorijās pēc sliežu nelīdzenumu vērtībām	Liela datu bāze ar atkarīgiem no ātruma un frekvences korigējošiem koeficientiem
Sliežu savienojumu, krustojumu, pārbrauktuvju un tiltu ietekme	Tabula ar atkarīgiem no ātruma korigējošiem koeficientiem	Tabula ar neatkarīgiem no ātruma korigējošiem koeficientiem	Tabula ar neatkarīgiem no ātruma korigējošiem koeficientiem	Liela datu bāze ar atkarīgiem no ātruma un frekvences korigējošiem koeficientiem
Specifiskie parametri	Vietējās riteņu un sliežu nelīdzenumu vērtības, bremzēšanas, aerodinamiskais un vilkmes troksnis	Temperatūras gradienti un vēja ietekme	Meteoroloģiskie apstākļi un vilciena paātrinājums	Vietējās riteņu un sliežu nelīdzenumu vērtības 1/3 oktāvu joslās, vairāki atsevišķi avoti, sarežģīti meteoroloģiskie apstākļi, difrakcija un izkliede koku ietekmē, paātrinājums, bremzēšana un bremzēšanas spiediena troksnis, Frenēļa zonas

RMR oktāvu joslu metodes detalizēts apraksts

Pašlaik Latvijas dzelzceļā operē trīs vilcienų tipu kategorijas, kas atbilst aprakstītām RMR metodē (pavisam 11): elektrovilcieni – RMR 1 kategorija, dīzeļvilcieni – RMR 6 kategorija un kravas vilcieni – RMR 4 kategorija, tāpēc aprēķināšanas metodes apraksts tiks ierobežots šo kategoriju ietvaros.

Šiem trim vilcienu kategorijām RMR tiek izdalīti 2 avotu augstumi: L_{bs} – sliežu galvas līmenī, kas attēlo sliežu ceļa izstaroto troksni un $L_{as} - 0.5$ m virs sliežu galvas līmeņa, kas attēlo riteņu ripošanas troksni.

Nebremzējošo (indekss nr) c kategorijas vilcienu izstaroto skaņas jaudas līmeni, dB(A), oktāvu joslā i stundas periodam aprēķina izmantojot sekojošo pamat sakarību [25]:

$$E_{nr,i,c} = a_{i,c} + b_{i,c} \log_{10} \left(\frac{v_{nr}}{v_0} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{Q_{nr}}{Q_0} \right) + C_{bb,m,i}, \quad (3.1)$$

kur $a_{i,c}$ un $b_{i,c}$ – 3.3. tabulā definētie starojuma radītāji katrai vilcienu kategorijai c un katrai oktāvu joslai i; v_{nr} – vidējais vilcienu ātrums, km/st; v_0 – normēšanas vērtība, 1 km/st; Q_{nr} – satiksmes intensitāte, t.i. vilcienu skaits stundā, h^{-1} ; Q_0 – normēšanas vērtība, 1 h^{-1} ; $C_{bb,m,i}$ – korekcija pēc sliežu ceļa tipa bb 3.5. tabulā un sliežu savienojumu klases m 3.6. tabulā.

3.3. tabula

Starojuma radītāji a un b trim vilcienu kategorijām astoņās oktāvu joslās

Vilcienu kategorija c	Starojuma radītājs	Oktāvu joslas centrālā frekvence, Hz un kārtas numurs i							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	a	20	55	86	86	46	33	40	29
	b	19	8	0	3	26	32	25	24
4	a	30	74	91	72	49	36	52	52
	b	15	0	0	12	25	31	20	13
6	a, $v < 60$	54	50	66	86	68	68	45	39
	b, $v < 60$	0	10	10	0	10	10	20	20
	a, $v \geq 60$	36	15	66	68	51	51	27	21
	b, $v \geq 60$	10	30	10	10	20	20	30	30
6 dzinējs	a, $v < 60$	72	88	85	51	62	54	25	15
	b, $v < 60$	-10	-10	0	20	10	20	30	30
	a, $v \geq 60$	72	35	50	68	9	71	1	-3
	b, $v \geq 60$	-10	20	20	10	40	10	40	40

Līdzīgā veidā veic aprēķinu bremsējošiem vilcieniem (indekss r) [25]:

$$E_{r,i,c} = a_{i,c} + b_{i,c} \log_{10} \left(\frac{v_r}{v_0} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{Q_r}{Q_0} \right) + C_{bb,m,i} \quad (3.2)$$

Bremzēšanas troksni ņem vērā izmantojot sekojošu sakarību [25]:

$$E_{brake,i,c} = a_{i,c} + b_{i,c} \log_{10} \left(\frac{v_r}{v_0} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{Q_r}{Q_0} \right) + C_{brake,i,c}, \quad (3.3)$$

kur $C_{brake,i,c}$ – bremsēšanas trokšņa korekcija vilcienu kategorijai c oktāvu joslā i no 3.4. tabulas.

3.4. tabula

Korekcijas koeficienti $C_{brake,i,c}$ kā funkcija no oktāvu joslas i un vilcienu kategorijas c

Oktāvu josla i	$C_{brake,i,c}$	
	c = 1, 4	c = 6
1	-20	-20
2	-20	-20
3	-20	-20
4	-2	-20
5	2	-20
6	3	-20
7	8	-20
8	9	-20

Dīzeļvilcieniem papildus var tikt piemērota korekcija dzinēja troksnim, līdzīgā veidā, gan nebremzējošiem, gan bremzējošiem vilcieniem [25]:

$$E_{engine,i,c} = a_{engine,i,c} + b_{engine,i,c} \log_{10} \left(\frac{v}{v_0} \right) + 10 \log_{10} \left(\frac{Q}{Q_0} \right) \quad (3.4)$$

3.5. tabula

Korekcijas koeficienti $C_{bb,i}$ kā funkcija no sliežu ceļa tipa bb un oktāvu joslas i

Oktāvu josla i	$C_{bb,i}$							
	bb=1	bb=2	bb=3	bb=4	bb=5	bb=6	bb=7	bb=8
1	0	1	1	6	6	-	6	5
2	0	1	3	8	8	-	1	4
3	0	1	3	7	8	-	0	3
4	0	5	7	10	9	-	0	6
5	0	2	4	8	2	-	0	2
6	0	1	2	5	1	-	0	1
7	0	1	3	4	1	-	0	0
8	0	1	4	0	1	-	0	0

Sliežu savienojumu klases $m=1$ gadījumā (bezsavienojumu sliedes), korekcijas koeficientu $C_{bb,i,m}$ ņem no 3.5. tabulas. Citiem savienojumu klasēm 3.6. tabulā, korekcijas koeficientu $C_{bb,i,m}$ aprēķina izmantojot [25]:

$$C_{bb,i,m} = C_{3,i} + 10 \log_{10} (1 + f_m A_i), \quad (3.5)$$

kur $C_{3,i}$ – koriģējošās vērtības no 3.5. tabulas priekš $bb=3$; f_m – definēts 3.6. tabulā; A_i – definēts 3.7. tabulā.

3.6. tabula

Sliežu savienojumu klases m apraksts

Apraksts	m klase	f_m
Ceļš ar savienojumiem	2	1/30
1 pārmija	2	1/30
2 pārmijas uz 100 m	3	6/100
Vairāk par 2 pārmijām uz 100 m	4	8/100

3.7. tabula

Korekcijas koeficients A_i kā funkcija no oktāvu joslas i

Oktāvu josla i	A_i
1	3
2	40
3	20
4	3
5, 6, 7, 8	0

Pirmajā nodaļā tika noteikts, ka ripošanas troksnis ir tieši atkarīgs no sliežu un rīteņu pāru nelīdzenumiem. RMR metodē, korekcijas koeficienti $C_{bb,i,m}$ jau ietver vidējo Nīderlandes nacionālajam dzelzceļa tīklam sliežu un rīteņu nelīdzenumu vērtību ietekmi uz ripošanas troksni. Savienoto sliežu gadījumā, nelīdzenumi ir mazāk svarīgi, jo noteicošs ir triecientroksnis savienojumu vietās, taču bezsavienojumu sliežu gadījumā ($m=1$), ripošanas trokšņa līmeņi var būtiski atšķirties lokālo un valsts vidējo sliežu un rīteņu nelīdzenumu vērtību atšķirību dēļ. Tāpēc bezsavienojumu sliedēm $C_{bb,i}$ precīzē izmantojot sakarību [25]:

$$C_{c,bb,i} = C_{c,bb,i} - (L_{i,rr,ni}(\lambda_i) \oplus L_{i,rveh,ni,c}(\lambda_i)) + (L_{i,rr,loc}(\lambda_i) \oplus L_{i,rveh,loc,c}(\lambda_i)), \quad (3.6)$$

kur $C_{bb,i}$ – vērtības no 3.5. tabulas; $L_{i,rr,ni}(\lambda_i)$ un $L_{i,rr,loc}(\lambda_i)$ – attiecīgi valsts vidējā un lokālā sliežu nelīdzenumu vērtībās, dBmkm; $L_{i,rveh,ni,c}(\lambda_i)$ un $L_{i,rveh,loc,c}(\lambda_i)$ – attiecīgi valsts vidējā un lokālā rīteņu nelīdzenumu vērtībās vilcienu kategorijai c, dBmkm; λ_i – nelīdzenumu garums, m; \oplus - enerģētiskas summēšanas operators.

Nelīdzenumu novērtēšanai var izmantot dažādas tiešo un netiešo mērījumu metodes, kas tiek apspriestas 4 nodaļā.

Elektrovilcienu un dīzeļvilcienu trokšņa starojumu, avotu augstumos L_{bs} un L_{as} aprēķina, kā [25]:

$$E_{bs,nr,i,c} = E_{bs,r,i,c} = E_{nr,i,c} - 1 \quad (3.7)$$

$$E_{as,nr,i,c} = E_{as,r,i,c} = E_{nr,i,c} - 7 \quad (3.8)$$

Kravas vilcienu trokšņa starojumu, avotu augstumos L_{bs} un L_{as} aprēķina, kā [25]:

$$E_{bs,nr,i,c} = E_{bs,r,i,c} = E_{as,nr,i,c} = E_{as,r,i,c} = E_{nr,i,c} - 3 \quad (3.9)$$

Korigējošās konstantes norāda, kā Nīderlandes sliežu ceļu tīklam dominējošais ripošanas trokšņa avots elektrovilcienu un dīzeļvilcienu gadījumos ir sliežu ceļš. Kravas vilcienu gadījumā sliežu ceļš un riteņi līdzvērtīgi ietekmē ripošanas trokšņa līmeņus.

Nebremzējošo un bremzējošo n vilcienu kategoriju izstarotu skaņas jaudas līmeni, dB(A), avotu augstumos L_{bs} un L_{as} oktāvu joslā i stundas periodam aprēķina [25]:

$$L_{E,i}^{bs} = 10 \log_{10} \left(\sum_{c=1}^n 10^{E_{bs,nr,i,c}/10} + 10^{E_{bs,r,i,c}/10} \right) \quad (3.10)$$

$$L_{E,i}^{as} = 10 \log_{10} \left(\sum_{c=1}^n 10^{E_{as,nr,i,c}/10} + 10^{E_{as,r,i,c}/10} + 10^{E_{brake,i,c}/10} + 10^{\frac{E_{engine,nr,i,c} \oplus E_{engine,r,i,c}}{10}} \right) \quad (3.11)$$

Izteiksme (3.11) parāda, kā RMR dzinēja un bremzēšanas trokšņa avotu augstums ir noteikts 0.5 m virs sliežu galviņas.

A-izsvarots skaņas spiediena spektrs uztveršanas punktā tiek noteikts aprēķinot skaņas spiediena līmeni katrā oktāvu joslā i, katram no avotiem n [25]:

$$\Delta L_{eq,i,n} = L_{E,n} + L_{GU} - L_{OD} - L_{SW} - L_R - 58.6, \quad (3.12)$$

kur $\Delta L_{eq,i,n}$ - skaņas spiediena līmenis uztveršanas punktā, dB(A); $L_{E,n,i}$ - avota n izstarotās skaņas jaudas līmenis oktāvu joslā i (3.10, 3.11), dB(A); L_{GU} - attāluma vājinājums, dB; L_{OD} - izplātīšanas vājinājums, dB; L_{SW} - ekranēšanas efekts, ja pastāv, dB; L_R - atstarošanas efekts, ja pastāv, dB.

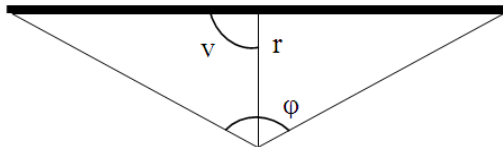
Konstanta vērtība 58.6 ietver dažādas korekcijas, tādas, kā atskaites vērtības un pāreju no skaņas jaudas uz skaņas spiedienu.

Ekvivalentais A-izsvarots skaņas spiediena līmenis (dB(A)) uztveršanas punktā tiek aprēķināts enerģētiski summējot visu N avotu spiedienus visās oktāvu joslās i [25]:

$$L_{Aeq} = 10 \log_{10} \sum_{n=1}^N \sum_{i=1}^8 10^{\frac{\Delta L_{eq,i,n}}{10}} \quad (3.13)$$

$$L_{GU} = 10 \log_{10} \left(\frac{(\varphi / \varphi_0) \sin v}{r / r_0} \right), \quad (3.14)$$

kur φ un v - leņķi 3.1. att.; φ_0 - normēšanas vērtība, 1° ; r - attālums no sliežu ceļa centra līdz uztveršanas punktam, m; r_0 - normēšanas vērtība, 1 m.



3.1. att. Leņķi φ , v un mērījuma attālums r Izplātīšanās vājinājumu aprēķina [25]:

$$L_{OD} = D_L + D_B + C_M, \quad (3.15)$$

kur D_L – gaisa absorbcijas ienestais vājinājums, dB; D_B – virsmas efekta ienestais vājinājums, dB; C_M – meteoroloģisko apstākļu koriģēšanas koeficients, dB.

$$D_L = r \delta_{air}, \quad (3.16)$$

kur δ_{air} – gaisa absorbcijas koeficients saskaņā ar ISO 9613-2 [81].

$$C_M = C_0 \left(1 - 10 \frac{h_h + h_w}{r_0} \right) \quad \text{kad} \quad r_0 > 10(h_h + h_w)$$

$$C_M = 0 \quad \text{kad} \quad r_0 \leq 10(h_h + h_w), \quad (3.17)$$

kur h_h – avota augstums virs reljefa vidējā līmeņa avota zonā, m; h_w – uztveršanas punkta augstums virs reljefa vidējā līmeņa uztveršanās zonā, m; r_0 – horizontāli nomērīts attālums starp avotu un uztveršanas punktu, m; C_0 – konstante, atkarīga no lokālajiem vēja ātruma un virziena un temperatūras gradientu statistiskajiem radītājiem, ar tipiskām vērtībām diapazonā no 0 dB līdz 5 dB.

Virsmas efekta ienestā vājinājuma D_B noteikšanai, horizontāli nomērīts attālums starp avotu un uztveršanas punktu tiek sadalīts trīs zonās: avota zona, vidēja zona un uztveršanās zona. Avota zona ir 15 m gara un uztveršanās zona - 70 m gara. Atlikušā attāluma r_0 daļa starp avotu un uztveršanas punktu veido vidējo zonu.

Ja attālums r_0 ir mazāks par 70 m, tad uztveršanas zonas garums ir vienāds ar attālumu r_0 .

Ja attālums r_0 ir mazāks par 15 m, abu, avota un uztveršanās zonu attālumi ir vienādi ar attālumu r_0 .

Virsmas absorbcijas koeficients tiek aprēķinātām visām trim zonām.

Aprēķinot virsmas vājinājumu tiek ņemti vērā sekojoši parametri: r_0 , h_h , h_w , B_b – virsmas absorbcijas koeficients avota zonā, B_m – virsmas absorbcijas koeficients vidējā zonā, B_w – virsmas absorbcijas koeficients uztveršanās zonā, S_w – virsmas vājinājuma efektivitāte uztveršanās zonā, S_b – virsmas vājinājuma efektivitāte avota zonā. Ja h_h vērtība ir mazāka par nulli, tad h_h tiek piešķirta nulles vērtība, šis noteikums attiecas arī uz h_w .

Virsmas vājinājums tiek aprēķināts izmantojot formulas no sekojošās tabulas [25]:

3.8. tabula

Virsmas vājinājuma noteikšana, kā funkcija no oktāvu joslas i

i	Virsmas vājinājums, dB			
1		$-3\gamma_0(h_h + h_w, r_0)$	-6	
2	$[(S_h\gamma_2(h_h, r_0) + 1)B_b]$	$-3(1 - B_m)\gamma_0(h_h + h_w, r_0)$	$[(S_w\gamma_2(h_h, r_0) + 1)B_w]$	-2
3	$[(S_h\gamma_3(h_h, r_0) + 1)B_b]$	$-3(1 - B_m)\gamma_0(h_h + h_w, r_0)$	$[(S_w\gamma_3(h_h, r_0) + 1)B_w]$	-2
4	$[(S_h\gamma_4(h_h, r_0) + 1)B_b]$	$-3(1 - B_m)\gamma_0(h_h + h_w, r_0)$	$[(S_w\gamma_4(h_h, r_0) + 1)B_w]$	-2
5	$[(S_h\gamma_5(h_h, r_0) + 1)B_b]$	$-3(1 - B_m)\gamma_0(h_h + h_w, r_0)$	$[(S_w\gamma_5(h_h, r_0) + 1)B_w]$	-2
6	B_b	$-3(1 - B_m)\gamma_0(h_h + h_w, r_0)$	$+ B_w$	-2
7	B_b	$-3(1 - B_m)\gamma_0(h_h + h_w, r_0)$	$+ B_w$	-2
8	B_b	$-3(1 - B_m)\gamma_0(h_h + h_w, r_0)$	$+ B_w$	-2

Funkcijas $\gamma(x, y)$ 3.8. tabulā tiek noteiktās izmantojot (3.18 – 3.22) [25].

$$\gamma_0(x, y) = 1 - 30 \frac{x}{y} \quad \text{kad} \quad y \geq 30x$$

$$\gamma_0(x, y) = 0 \quad \text{kad} \quad y < 30x \quad (3.18)$$

$$\gamma_2(x, y) = 3 \left(1 - e^{-\frac{-y}{50}} \right) e^{-0.012(x-5)^2} + 5.7 \left(1 - e^{-2.8 \cdot 10^{-6} y^2} \right) e^{-0.09 x^2} \quad (3.19)$$

$$\gamma_3(x, y) = 8.6 \left(1 - e^{-\frac{-y}{50}} \right) e^{-0.09 x^2} \quad (3.20)$$

$$\gamma_4(x, y) = 14 \left(1 - e^{-\frac{-y}{50}} \right) e^{-0.46 x^2} \quad (3.21)$$

$$\gamma_4(x, y) = 5 \left(1 - e^{-\frac{-y}{50}} \right) e^{-0.9 x^2} \quad (3.22)$$

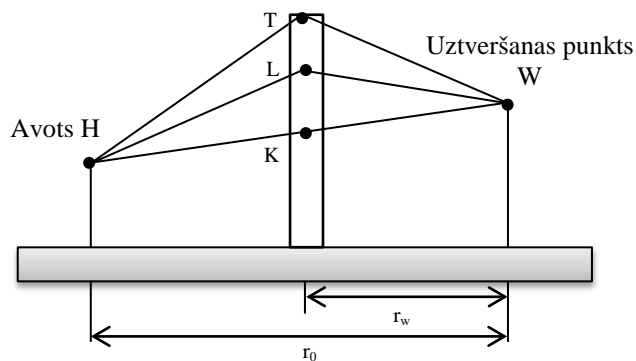
Ja starp avotu un uztveršanas punktu neatrodas barjera, abu S_w un S_h vērtības ir vienādas ar 1. Pretējā gadījumā S_w atrod izmantojot (3.24) un S_h izmantojot (3.25).

Gadījumā kad skaņas izplatīšanos ceļā no avota līdz uztvērējam atrodas objekti, kas ietekmē skaņas izplatīšanos, tiek ņemts vērā ekranēšanas efekts L_{sw} . Formula objekta ienestā vājinājuma aprēķināšanai satur divus parametrus. Pirmais parametrs apraksta ekvivalentās ideālas barjeras (šaura vertikāla plakne) ienesto vājinājumu. Augšējā barjerās mala atbilst augstākai reāla šķēršļa malai.

Otrais parametrs ir svarīgs tikai šķēršļiem, kuru profili atšķiras no ideālas barjeras profila. Profilu definē kā skaņas līmeņu vājināšā šķēršļa šķērsgriezumu. Šķēršļa ienestais vājinājums ir vienāds ar ekvivalentās barjeras ienesto vājinājumu un korekcijas koeficienta C_p , kas ir atkarīgs no šķēršļa profila, starpību. Gadījumā kad skaņas izplatīšanos ietekmē vairāki šķēršļi, tiek ņemta vērā tikai tā šķēršļa ietekme, kas atsevišķi nodrošinātu vislielāko vājinājuma vērtību.

Zemāk norādīto barjeras ienestā vājinājuma aprēķinu vienādojumu lietojamība ir ierobežota ar barjeru augstumu līdz 4 m, kas ir izvietoti ne tuvāk par 4.5 m no sliežu ceļa centra. Parējos gadījumos ekranēšanas efekts var tikt pārvērtēts.

Situācija ar ideālo barjeru starp avotu un uztveršanas punktu ir parādīta 3.2. att.



3.2. att. Ideāla barjera starp avotu un signāla uztveršanas punktu

Lai aprēķinātu šķēršļa ienesto vājinājumu, sekojoši parametri tiek ņemti vērā: r_0 , m; r_w , m; r – attālums starp avotu un uztveršanas punktu, m; h_h , m; h_w , m; z_h – avota augstums virs sliežu galviņas, m; z_w – uztveršanas punkta augstums virs sliežu galviņas, m; h_T – ideālas barjeras augšējās malas augstums attiecībā pret vidējo reljefa augstumu 5 m rādiusā apkārtnē barjerai; šķēršļa profils.

Attēlā 3.2. K apzīmē barjeras un tiešās redzamības līnijas starp avotu un uztvērēju krustpunktu; L apzīmē barjeras krustpunktu ar izliekta skaņas staru, kas nonāk uztveršanas punktā no avota uz uztvērēju vēja virziena gadījumā un T apzīmē augšējo barjeras malu.

Ja punktu T, L un K augstumus virs sliekšņu galviņas attiecīgi apzīmē ar Z_T , Z_L un Z_K , tad attālumu starp punktiem K un L, m aprēķinā [25]:

$$Z_L - Z_K = \frac{r_w(r_0 - r_w)}{26r_0} \quad (3.23)$$

$$S_w = 1 - \frac{r_0 - r_w}{r_0} \frac{3h_e}{3h_e + h_w + 1} \quad \text{kad } h_e > 0 \quad (3.24)$$

$$S_h = 1 - \frac{r_w}{r_0} \frac{3h_e}{3h_e + h_h + 1} \quad \text{kad } h_e > 0, \quad (3.25)$$

kur $h_e = Z_T - Z_L$ - efektīvs barjeras augstums, m.

Vājināšanas parametru L_{SW} aprēķinā [25]:

$$L_{SW} = HF(N_f) - C_p, \quad (3.26)$$

kur $H = 0.25h_T 2^{i-1}$ - ekranēšanas efektivitātes radītājs un i - oktāvu joslas kārtas numurs; C_p - šķēršļa profila atkarīgā korekcija, dB (promocijas darba 12. pielikums); $F(N_f)$ - funkcija no Frenēļa skaitļa N_f , definēta 3.9. tabulā.

Frenēļa skaitļa noteikšanai izmanto [25]:

$$N_f = 0.37\varepsilon 2^{i-1}, \quad (3.27)$$

kur ε - akustiskais ceļš, m.

$$\begin{aligned} \varepsilon &= (HT + TL) - (HL + LW) & \text{kad } Z_T \geq Z_K \\ \varepsilon &= 2r - (HT + TL) - (HL + LW) & \text{kad } Z_T < Z_K \end{aligned} \quad (3.28)$$

3.9. tabula

Funkcijas $F(N_f)$ definēšana

N_f intervāls		$F(N_f)$
no	līdz	
$-\infty$	-0.314	0
-0.314	-0.0016	$-3.682 - 9.288 \log_{10} N_f - 4.482 \log_{10}^2 N_f - 1.170 \log_{10}^3 N_f - 0.128 \log_{10}^4 N_f $
-0.0016	0.0016	5
0.0016	1	$12.909 + 7.945 \log_{10} N_f + 2.612 \log_{10}^2 N_f + 0.073 \log_{10}^3 N_f - 0.184 \log_{10}^4 N_f - 0.032 \log_{10}^5 N_f$
1	16.1845	$12.909 + 10 \log_{10} N_f$
16.1845	$+\infty$	25

Atstarošanās efekts L_R ņem vērā skaņas enerģijas zudumus, skaņas stara izplatīšanās laikā no avota līdz uztvērējam un tiek aprēķināts [25]:

$$L_R = N_{ref} \delta_{ref}, \quad (3.29)$$

kur N_{ref} - atstarošanas skaits; δ_{ref} - atstarošanas zudumi, dB.

$$\delta_{ref} = 10 \log_{10}(p), \quad (3.30)$$

kur $p = 1 - \alpha$ ir atstarošanas koeficients un α ir absorbcijas koeficients.

Rekomendētā δ_{ref} vērtība ēkām ir 0.8 dB un 1.0 dB visiem pārējiem objektiem, proti ja nav apstiprināts kā objekts ir skaņu absorbējošs.

RMR metodes empīriskā rakstura dēļ ir skaidrs, ka metodes pielietojamība citos nekā Nīderlandes valsts dzelzceļa apstākļos ir jāizvērtē un nepieciešamības gadījumā jauni starojuma parametri ir jādefinē [26].

4. EKSPERIMENTĀLIE DZELZCEĻA TROKŠŅA PĒTĪJUMI

Dzelzceļa trokšņa modelēšana ir vienmēr cieši saistīta ar dzelzceļa trokšņa eksperimentālajiem pētījumiem. Daudzos gadījumos fiziski nav iespējams atrisināt problēmas saistībā ar dzelzceļa troksni, izmantojot tikai modelēšanu. Mērījumu rezultāti vienmēr vai nu veido pamatu modelēšanai, vai tiek izmantoti modelēšanas rezultātu verificēšanai, vai abos nolūkos. Lai arī mērījumi parasti sniedz labāku informāciju par esošo situāciju, tomēr modelēšanu var izmantot, lai prognozētu iespējamo situāciju.

Lai izvērtētu esošo akustisko situāciju Latvijas dzelzceļā un pārbaudītu ES ieteiktās RMR metodes pielietojamību, tika veikti vairāki garāmbraukšanas trokšņa spektru mērījumi visiem vilcienu tipiem, kas tiek ekspluatēti Latvijas dzelzceļā. Lielāka uzmanība tika veltīta ripošanas trokšņa izpētei visiem vilcienu tipiem sliežu ceļā ar sametinātām bezsavienojumu sliedēm, tomēr, vilkmes troksnis, bremzēšanas troksnis un triecientroksnis tika novērtēts tur, kur tas bija iespējams. Turklāt daži ilglaicīgi A-izsvartoto trokšņa līmeņu mērījumi tika veikti trokšņa kartēšanas vajadzībām un ir apspriesti 5. nodaļā.

Mērījumu aparatūra

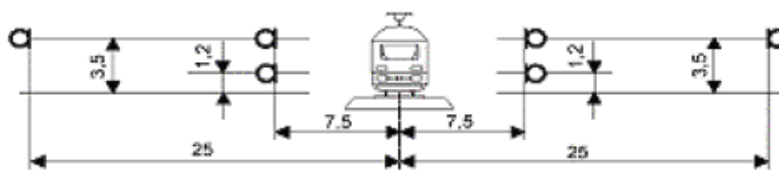
Visu mērījumu veikšanai tika izmantota šāda aparatūra: analizators SVAN 947 Ser. N. 6862; priekšpastiprinātājs SV12L Ser. N. 10602; mikrofons SV22 Ser. N. 4012051 ar pretvēja uzgali. Kalibrēšana tika veikta ar Svantek SV30A kalibrātoru Ser. N. 10593. Visa mēraparatūra atbilst 1. tipam saskaņā ar standartu IEC 61672 and IEC 61260 prasībām.

Mērījumu apstākļi

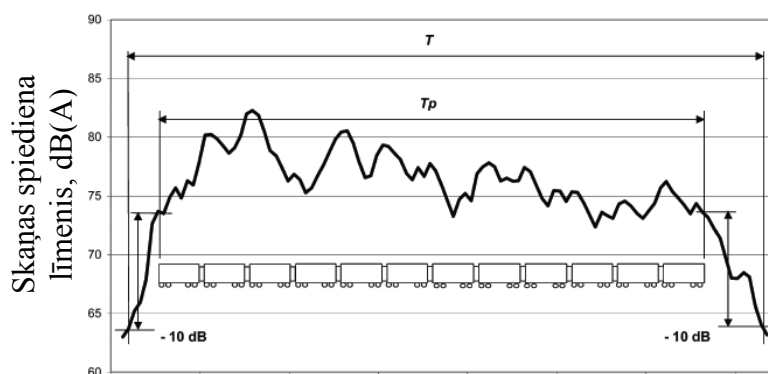
Saskaņā ar ISO 3095 [20] un RMR mērīšanas ieteikumiem, mērījumi jāveic brīva lauka apstākļos. Augsnei jābūt brīvai no šķēršļiem un skaņu atstarojošiem objektiem (sienas, ēkas, nogāzes, tilti, u.c.), jāatrodas vismaz 3 reizes lielākā attālumā no uztvērēja par attālumu starp avotu un uztvērēju. Zemes virsmai jābūt pēc iespējas līdzenākai, ar augstuma atšķirību no 0 m līdz (-1) m attiecībā pret sliežu virsmas līmeni. Augsnei ir jābūt tīrai no absorbējošām virsmām, tādām kā sniegs, augsta zāle; vai stingri atstarojošām virsmām, piemēram, ūdens.

Mērījumi jāveic laika apstākļos bez nokrišņiem un vēja ātrumam mikrofona augstumā nepārsniedzot 5 m/s.

Mikrofonu izvieto 7.5 m attālumā no sliežu ceļa centra un 1.2 m augstumā virs sliežu virsmas līmeņa. Ja ir jāņem vērā avotus, augstākus par 0.5 m virs sliežu virsmas līmeņa, ir jāizvieto papildus mikrofons 3.5 m augstumā, 4.1. att. [20]



4.1. att. Mikrofona izvietojums mērījumu vietā, attālumi un augstumi apzīmēti metros



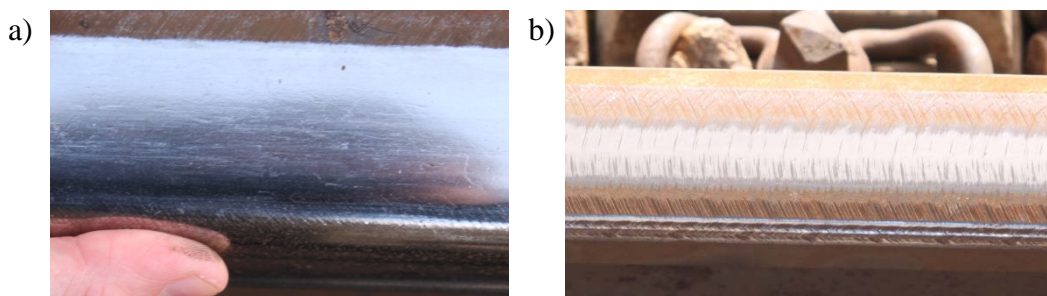
4.2. att. Mērījuma laiks

Fona troksni mēra vismaz 60 sekundes un tās līmenim jābūt vismaz 10 dB zemākam par mērāmā avota līmeni.

Pirms un pēc katras mērījumu sesijas visa mērījuma ķēde tiek kalibrēta. Ja kalibrēšanas faktors starp divām pēc kārtas veiktām kalibrēšanas reizēm atšķirās vairāk par 0.5 dB, tad visi mērījumu sesijas rezultāti tiek noraidīti.

Garāmbraukšanas trokšņa mērījuma laiku T izvēlas tā, lai A-izsvartais trokšņa spiediena līmenis mērījuma sākumā būtu par 10 dB(A) zemāks par līmeni, kad vilciena sākums ir pretī mikrofonam. Mērījumu beidz, kad A-izsvartais trokšņa spiediena līmenis ir par 10 dB(A) zemāks par līmeni, kad vilciena beigas ir pretī mikrofonam, 4.2. att. [20]

Mērījumu veikšanai tika izvēlētas divas vietas dzelzceļa līnijā Rīga - Aizkraukle. Pirmā mērījumu vieta bija starp dzelzceļa stacijām "Dārziņi" un "Dole", aptuveni 800 m attālumā no stacijas "Dārziņi" stacijas "Dole" virzienā. Otrā vieta – stacija „Dole”. Šīs vietas tika izvēlētas šādu iemeslu dēļ: vides apstākļi maksimāli atbilst prasībām; šī dzelzceļa līnija ir ar lielāko satiksmes intensitāti; var tikt izpētīti visi Latvijā ekspluatētie vilcienu tipi; stacijā ir iespējams izmērīt bremzēšanas troksni un ar paātrinājumu braucošo vilcienu troksni; fona trokšņu līmenis pastāvīgi bija zemāks par 40 - 45 dB(A) visās oktāvu joslās. Turklāt šī dzelzceļa līnija sastāv no diviem sliežu ceļiem, kas nodrošināja mērījumu rezultātu salīdzināšanas iespēju. Abi sliežu ceļi sastāv no vienādiem elementiem: UIC-60 sliedēm; Vossloh SKL-14 sliežu stiprināšanas sistēmas un Vossloh dzelzceļa starplikām; betona monobloka gulšņiem. Pirmais sliežu ceļš tika pārbūvēts 2003. gadā, otrais 2001. gadā. Galvenā atšķirība ir tā, ka pirmā sliežu ceļa sliedes tika atjaunotas, izmantojot slīpēšanu 6 mēnešus pirms mērījumu veikšanas, bet otrā – 3.5 gadus pirms mērījumu veikšanas. Tas deva iespēju novērtēt sliežu slīpēšanas ietekmi uz ripošanas troksni. Abu sliežu ceļu bildes ir parādītas 4.3. att. [5]

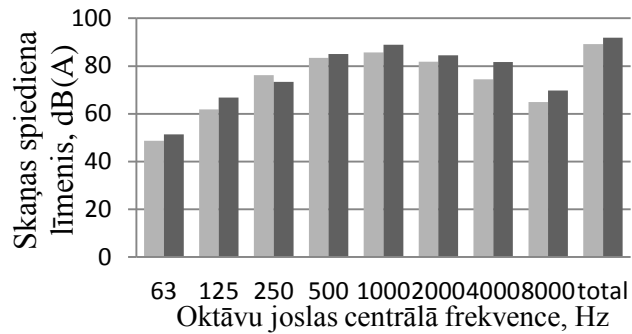


4.3. att. Abu sliežu ceļu bildes mērījumu vietās
a, neslīpēts ceļš; b, slīpēts ceļš

Šeit ir svarīgi pieminēt, ka daudzās Eiropas valstīs par labu praksi ripošanas trokšņa samazināšanai ir sliežu slīpēšanas izmantošana, tomēr Latvijā sliežu slīpēšanas akustiskais efekts nekad netika kvalitatīvi novērtēts. Var redzēt, ka dziļas slīpēšanas akmeņu pēdas tika atstātas uz sliežu virsmas, 4.3. att., b.

Atklājās, ka sliktas kvalitātes sliežu slīpēšanas dēļ garāmbraukšanas trokšņa līmenis visiem vilcienu veidiem visos ātrumos tika paaugstināts visās oktāvu joslās. Diemžēl mērījumu laikā nebija pieejams testa vilciens, tomēr mērījumu rezultātu korelācija starp diviem sliežu ceļiem tika novērtēta ar elektrovilciena palīdzību: bija iespējams veikt mērījumus vienam un tam pašam elektrovilcienam, kas brauc tajā pašā vietā un tajā pašā ātrumā tajā pašā dienā, bet dažādos virzienos (dažādos sliežu ceļos). Elektrisko vilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektru piemēri abiem sliežu ceļiem pie ātruma 70 km/st, ir parādīti 4.4. att.

Nemot vērā to, ka mērījumi tika veikti saskaņā ar ISO 3095 un RMR ieteikumiem, turpmāk tiks izskatīti A-izsvartie spektri. Zemo frekvenču signāli ir ievērojami novājināti, tāpēc tikai oktāvu joslas no 63 Hz līdz 16 kHz tiks apskatītas (augstākā frekvence, ko ņem vērā RMR metode, ir 8 kHz).



4.4. att. Elektrovilciena garāmbraukšanas trokšņa spektri, tumšs-slīpēts, gaišs-neslīpēts ceļš

Redzams, ka trokšņa līmeni tumšākajā spektrā, kas ir nomērīts slīpētajam sliežu ceļam, pārsniedz cita sliežu ceļa līmeņus visās oktāvu joslās, izņemot 250 Hz. Parasti 250 Hz frekvence ir gulšņu vibrācijas rezonanses frekvence. Tāpēc, paaugstināts trokšņa līmenis šajā oktāvu joslā, iespējams, norāda uz slikti piestiprinātu gulšni, bet, lai noteiktu patieso iemeslu, ir nepieciešama papildus izmeklēšana. Lielākā atšķirība spektros šajā gadījumā ir 7.2 dB(A) 4 kHz oktāvu joslā. Nelīdzenumu viļņa garums 4 kHz frekvencē pie ātruma 70 km/st ir apmēram 5 mm, kas atbilst slīpēšanas akmeņu pēdu viļņa garumam 4.3. att.

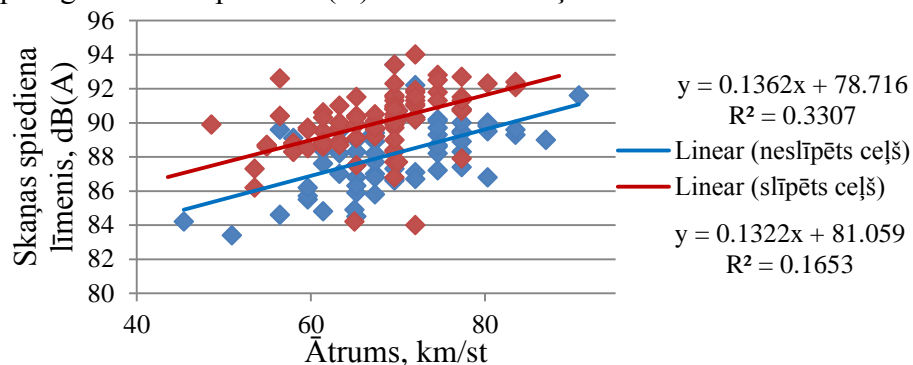
Sliktas kvalitātes slīpēšanas galvenais iemesls parasti ir izmaksu/kvalitātes attiecības jautājums. Lai samazinātu uzturēšanas izmaksas, slīpēšanas reižu skaits sliežu sektorā tiek samazināts. Lai panāktu vienmērīgāku ripošanas virsmu, būtu jāpalielina slīpēšanas reižu skaits un jāsamazina slīpēšanas ātrums, vismaz pēdējā gaitā. Latvijas dzelzceļā ritošajam sastāvam ir koniska riteņu forma, slīpēšanas procesā galvenā uzmanība tiek pievērsta salīdzinoši nelielam riteņu un sliežu kontakta zonas laukumam un, lai palielinātu slīpēšanas ātrumu, atlikušo dzelzceļa virsmas daļu atstāj vēl nelīdzena. Ir jāņem vērā, ka sliežu virsma ar laiku nolietojas un vēlāk riteņi mijiedarbosies ar slikti apstrādātām sliežu sānu daļām, samazinot sliežu un riteņu ekspluatācijas laiku un izraisot paaugstinātus ripošanas trokšņa līmeņus.

Šī informācija tika pievienota kā atskaites daļa [8], un nosūtīta uzņēmumam, kas veica sliežu atjaunošanas darbus. Uzņēmums nosūtīs komisiju un pēc sliktas slīpēšanas kvalitātes iemeslu noteikšanas, sliežu ceļš atkārtoti tiks atjaunots bez maksas.

Vilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu atkarība no ātruma

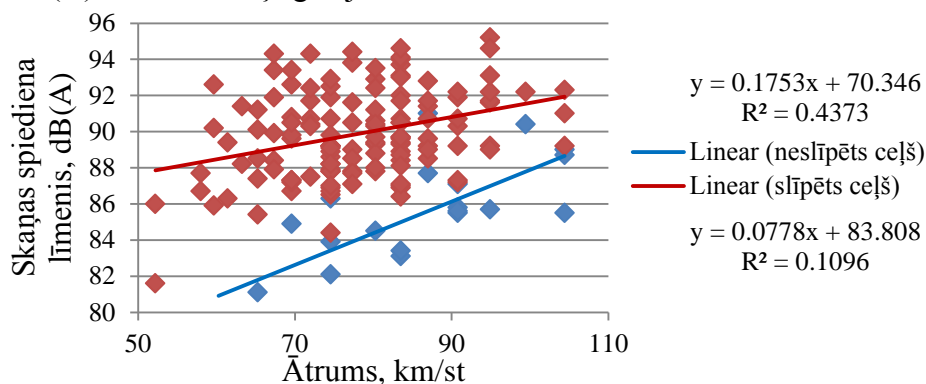
Apskatīsim eksperimentāli iegūtas garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarības visiem vilcienu tipiem abos sliežu ceļos no 4.3. att. Ekvivalenti A-izsvartie trokšņa nebremzējošo vilcienu līmeņi katra vilciena tipam tika nomērīti dažādos ātrumos un garāmbraukšanas trokšņa līmeņa ātruma atkarības tika attēlotas ar mazāko kvadrātu lineārās regresijas līnijām (MKLRL), izmantojot Excel lineārās regresijas analīzi.

Elektrovilcienu gadījumā ir redzama pastāvīga 2 dB(A) liela starpība trokšņa līmeņos starp diviem sliežu ceļiem, 4.5. att. Ātruma palielināšana no 45 km/st līdz 90 km/st izraisa trokšņa līmeņu paaugstināšanos par 6 dB(A) abos sliežu ceļos.



4.5. att. Elektrovilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarība

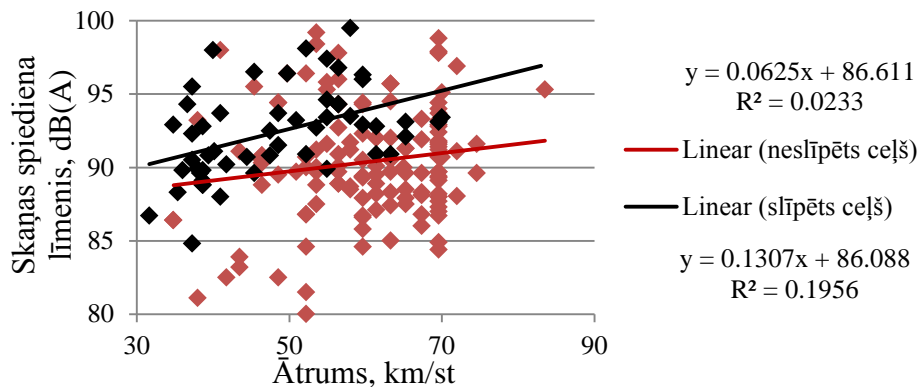
Dīzeļvilcienu ar disku bremžu sistēmu gadījumā atšķirība garāmbraukšanas trokšņa līmeņos starp diviem sliežu ceļiem ir lielāka, 4.6. att. Ātrumu palielināšana no 60 km/st līdz 100 km/st izraisa trokšņa līmeņu paaugstināšanos par aptuveni 3.5 dB(A) nelīdzenā ceļa gadījumā un 7 dB(A) līdzenāka ceļa gadījumā.



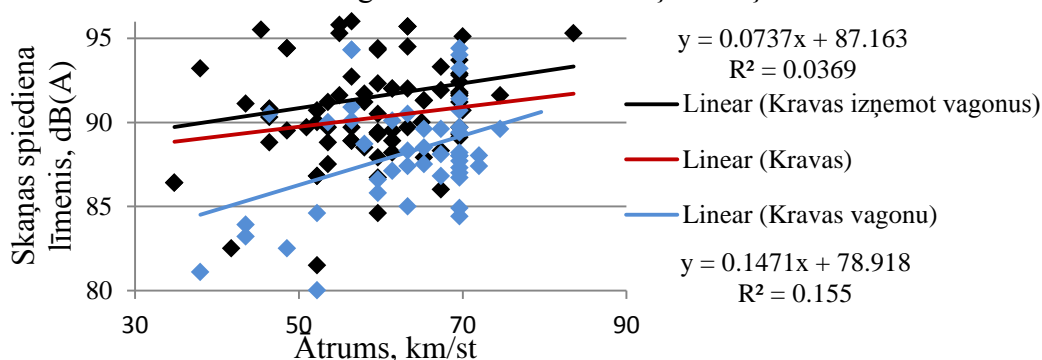
4.6. att. Dīzeļvilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarība

Ja sliežu nelīdzenumu vērtības pārsniedz riteņu nelīdzenumu vērtības, ripošanas trokšņa līmeņi vilcieniem ar kluču un disku bremžu sistēmām var būt līdzīgi. Ripošanas trokšņa līmeņi dīzeļvilcieniem un elektrovilcieniem uz slīpētā ceļa ir gandrīz vienādi pie ātruma 50 km/st, bet pie ātruma 90 km/st dīzeļvilcieni rada par 2 dB(A) zemāku trokšņa līmeni, 4.5. un 4.6. att. Šī atšķirība, iespējams, rodas elektrovilcienu nelīdzeno riteņu dēļ. Līdzenākā sliežu ceļā ripošanas trokšņa līmeņi var mainīties aptuveni 10 dB(A) robežās riteņu nelīdzenumu vērtību atšķirības dēļ. Konkrētā gadījumā vilcieni ar disku bremzēm un gludākiem riteņiem izstaro aptuveni 5 dB(A) mazākus trokšņa līmeņus nekā vilcieni ar kluču bremzēm pie ātruma 90 km/st, 4.10. att.

Šeit nelīdzenums nozīmē sliedes (vai riteņa) nomērītās kustības virzienā ripošanas virsmas amplitūdas deviācijas vidējo kvadrātisko vērtību, noteiktā sliedes (vai riteņa) garumā, izteiktu μm [20].



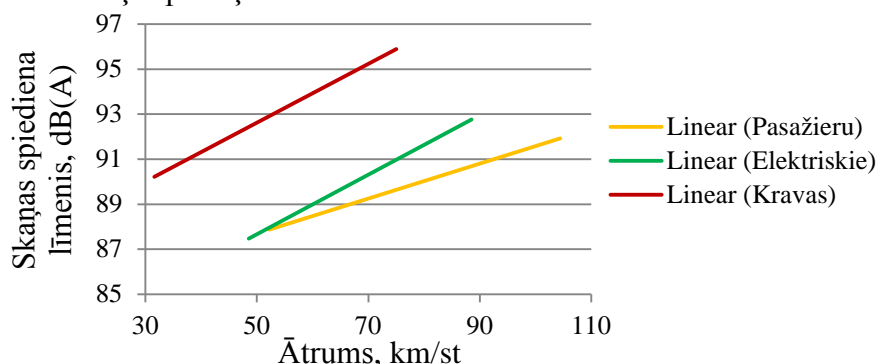
4.7. att. Kravas vilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarība



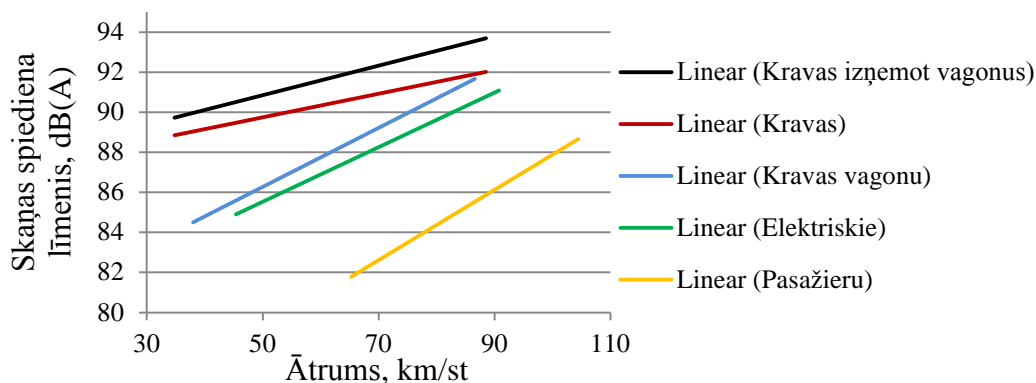
4.8. att. Kravas vilcienu apakšskategoriju garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarība

Kravas vilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma attiecības ir parādītas 4.7. att. Ātrumu palielināšana no 60 km/st līdz 100 km/st izraisa trokšņa līmeņu paaugstināšanos par aptuveni 4 dB(A) nelīdzenā ceļa gadījumā un tikai 2 dB(A) līdzenāka ceļa gadījumā. Attēlā 4.7. visi kravas vilcieni ir sagrupēti vienā kategorijā saskaņā ar RMR aprakstu, taču pētījumu laikā tika atklāts, ka kravas vilcienus ir svarīgi sadalīt apakškategorijās pēc akustiskā starojuma. Ir ieteicams veidot vismaz trīs apakškategorijas: kravas vilcieni, kas sastāv tikai no vagoniem; kravas vilcieni, kas sastāv tikai no cisternām un jauktie kravas vilcieni. Pagaidām pietrūkst datu, lai akustiski aprakstītu kravas vilcienus, kas sastāv tikai no cisternām. Jaukto kravas vilcienu kategorijai piemīt trokšņa līmeņu atkarība no ātruma, kas ir līdzīga kravas vilcieniem 4.7. att., ar par 1 dB(A) paaugstinātiem līmeņiem visos ātrumos. Kravas vilcieniem, kas sastāv tikai no vagoniem, trokšņa līmeņu atkarība no ātruma ir līdzīga elektrovilcieniem, ar augstākiem par 1 dB(A) līmeņiem. Tas pierāda kravas vilcienu kategorizēšanas nepieciešamību. Kravas vilcienu sadalīšana apakškategorijās ir nozīmīgāka līdzenākiem sliežu ceļiem un ir parādīta 4.8. att.

Visu veidu vilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātrumu atkarības, ar apakškategorijās sadalītiem kravas vilcieniem līdzenāka sliežu ceļa gadījumā ir parādītas 4.9. un 4.10. att. [5]. No 4.9. un 4.10. att. izriet, ka neviena no Latvijas dzelzceļā ekspluatācijā esošām vilciena kategorijām neatbilst TSI prasībām [28]. Finanšiāli ir neiespējami uzlabot visus Latvijas dzelzceļa ritošus sastāvus vai pasūtīt pilnīgi jaunus, lai arī jaunie pasažieru vilcieni jau ir pasūtīti. Turklāt, kravu ritošā sastāva galvenā daļa nāk no kaimiņu valstīm (Krievija un Baltkrievija), tādēļ īpašs gadījums trokšņa robežvērtībām Latvijā (un pārējās Baltijas valstīs) pašlaik tiek apspriests, un dotās izpētes rezultāti tiks izmantoti, lai novērtētu esošo situāciju Latvijas dzelzceļā, lai ierosinātu ieteikumus par pieļaujamiem trokšņa līmeņiem Latvijas dzelzceļa apstākļos.



4.9. att. Vilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarība slīpētā sliežu ceļā

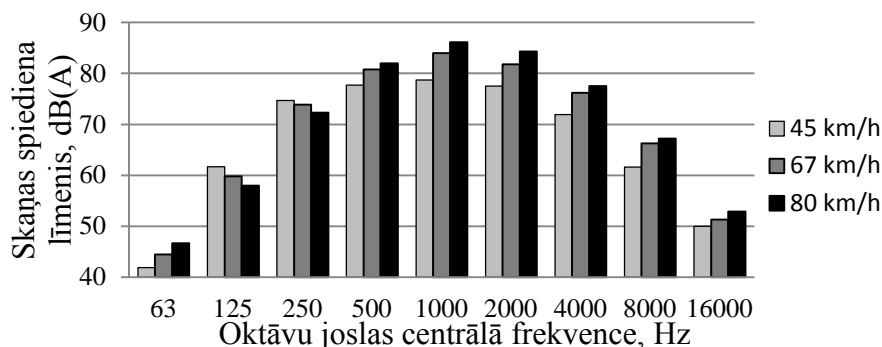


4.10. att. Vilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarība neslīpētā sliežu ceļā

Vilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektru analīze

Paaugstinātās sliežu virsmas nelīdzenumu vērtības pēc slīpēšanas šajā konkrētajā gadījumā nav tipiska situācija visam dzelzceļa tīklam Latvijā, tāpēc mēs galvenokārt

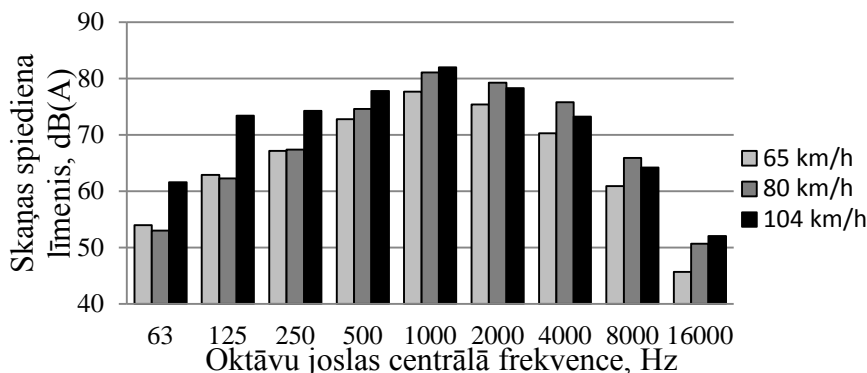
pievērsīsim uzmanību garāmbraukšanas trokšņa spektriem līdzenākā ceļā, pieņemot, ka tāds sliežu ceļš atspoguļo vidējo sliežu ceļa stāvokli Latvijas dzelzceļa līnijās. Analīzei tika ņemti mērījumu rezultāti, kas ir MKLRL punkti (vai atrodas ļoti tuvu tām) 4.10. att.



4.11. att. Elektrovilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektri dažādos ātrumos

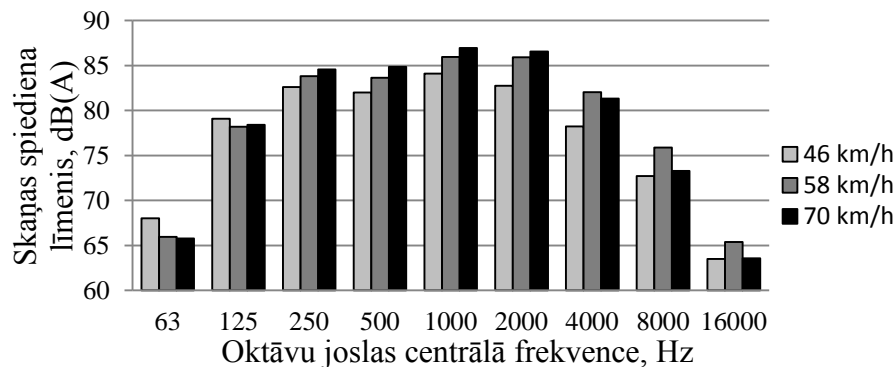
Interesants atklājums redzams 4.11. att., ka trokšņa līmeņi 125 Hz un 250 Hz oktāvu joslās samazinās, palielinoties ātrumam, tas ir izskaidrojams ar paaugstinātiem vilkmes trokšņa līmeņiem zemās frekvencēs vilciena paātrinājuma laikā vai ar atšķirībām starp vilcieniem. Visās pārējās oktāvu joslās trokšņa līmeņi paaugstinās, paaugstinoties ātrumam.

Dīzeļvilcieniem trokšņa līmeņi pirmajās trīs oktāvu joslās nav atkarīgi no ātruma, ja tas ir zems, bet, ātrumam tuvojoties maksimālajam, parādās ievērojams trokšņa līmeņu pieaugums zemās frekvencēs, kas var būt saistīts ar izplūdes un dzinēja troksni, 4.12. att. Visās pārējās oktāvu joslās trokšņa līmeņi paaugstinās, paaugstinoties ātrumam, zemāki trokšņa līmeņi augstās frekvencēs ātrākam vilcienam var būt izskaidroti ar atšķirībām starp vilcieniem.



4.12. att. Dīzeļvilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektri dažādos ātrumos

Kravas vilcienu trokšņa spektru atkarība no ātruma ir parādīta uz jauktā tipa vilcienu piemēra 4.13. att.

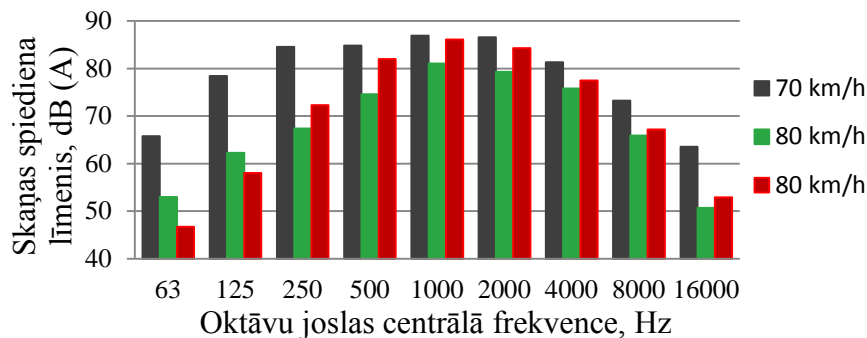


4.13. att. Jaukto kravas vilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektri dažādos ātrumos

Kravas vilcienu spektrus ir grūti analizēt ievērojamo atšķirību dēļ starp vilcieniem, tomēr ir skaidri redzams, ka, palielinoties ātrumam, trokšņa līmeņi visvairāk paaugstinās

oktāvu joslās no 250 Hz līdz 4 kHz. Trokšņa līmeņi 63 Hz un 125 Hz oktāvu joslās nav atkarīgi no ātruma, neņemot vērā vislēnāko vilcienu (vilkmes troksnis). Augstās frekvencēs trokšņa līmenis paaugstinās, paaugstinoties ātrumam, izņemot ātrāko vilcienu.

Elektrovilciena (sarkans) un dīzeļvilciena (zaļš) pie ātruma 80 km/st un jauktā kravas vilciena (melns) pie ātruma 70 km/st garāmbraukšanas trokšņa spektri ir apkopotī 4.14. att.



4.14. att. Dažādu vilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektri

melns – kravas vilciens, zaļš – pasažieru dīzeļvilciens, sarkans - elektrovilciens

Ir redzams, ka izmērītie skaņas spiediena līmeņi 4 kHz, 8 kHz un 16 kHz oktāvu joslās ir līdzīgi dīzeļvilcieniem un elektrovilcieniem. Dīzeļvilcieni rada troksni ar zemākiem līmeņiem vidējo frekvenču diapazonā, bet ar augstākiem līmeņiem zemās frekvencēs, 4.12. att. Salīdzinot ar citiem vilcienu tipiem, jauktie kravas vilcieni pat zemākā ātrumā izstaro augstākus trokšņa līmeņus visās frekvenču oktāvu joslās. Nozīmīgākais zemo frekvenču starojums ir kravas vilcieniem. Tas ir saistīts ar lielākām dinamiskām slodzēm kravas vilcienu garāmbraukšanas laikā, kas izraisa trokšņu starojuma palielināšanos no sliedēm un gulšņiem. Kravas vilciena riteņi arī ir visnelīdzsvarotākie. Nav šaubu, ka kravas vilcieni izraisa ievērojamās zemes vibrācijas, kas kopā ar trokšņa starojumu zemās frekvencēs var izplatīties lielos attālumos ar ļoti mazu vājinājumu. Tika atklāts, ka daudzi kravas vilcieni, kas sastāv no tukšiem vagoniem, izstaro zemākus trokšņa līmeņus, tomēr ir grūti spriest par tiešu starojuma līmeņu atkarību no vilciena svara, vājas mērījumu rezultātu korelācijas dēļ.

Vēl viena nozīmīga kravas vilcienu trokšņa starojuma īpašība ir lielā trokšņa līmeņu deviācija starp viena vilciena dažādiem vagoniem, 4.15. att. Šāds kravas vilcienu trokšņa starojuma augsts dinamiskais diapazons padara to par ļoti kaitinošu. "Kairinājuma" pakāpi neregulē nekādi standarti, taču ir konstatēts, ka avots ar mainīgo starojuma intensitāti rada vairāk traucējumu, salīdzinot ar avotu ar pastāvīgu starojumu pat ar augstāku līmeni. Šis fakts ir jāņem vērā, plānojot vilcienu kustības grafiku, īpaši nakts laikā.

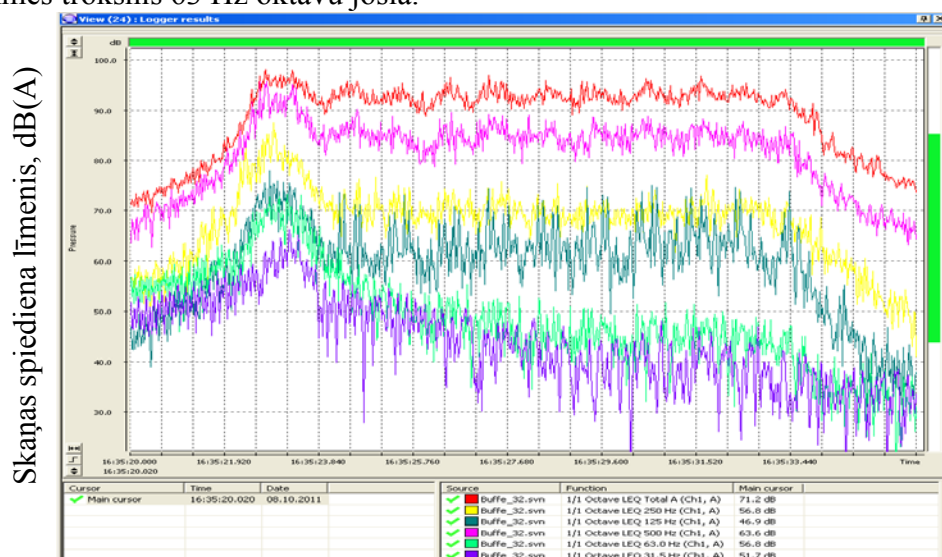


4.15. att. Jaukta kravas vilciena garāmbraukšanas trokšņa līmenis laika domēnā

Vilkmes troksnis

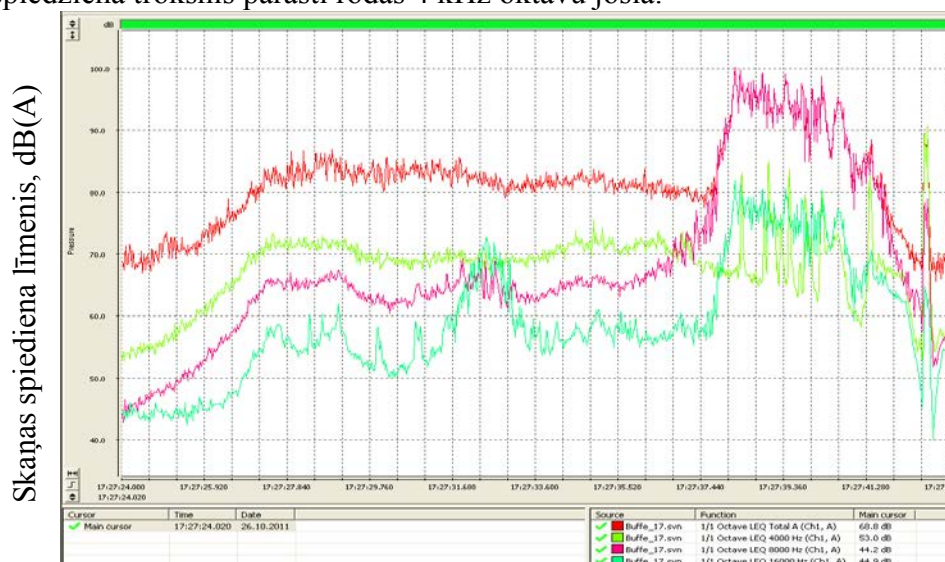
Pa cik vilkmes troksni elektrovilcieniem nomāc ripošanas troksnis, ir grūti noskaidrot patieso vilkmes trokšņa līmeni. Savukārt dīzeļvilcieniem un kravas vilcieniem lokomotīvēm vilkmes troksnis ir stipri izteikts. Dīzeļvilciena garāmbraukšanas trokšņa līmeņi zemās frekvencēs un rezultējošs A-izsvartais līmenis ir parādīti 4.16. att. Ir redzams, ka mērījuma

sākumā (kreisajā pusē), kad lokomotīve ir pretī mikrofonam, skaņas spiediena līmeņi 31.5 Hz, 63 Hz, 125 Hz, 250 Hz un 500 Hz oktāvu joslās ir augstāki salīdzinājumā ar pārējo ritošā sastāva daļu (10 vagoni, pie ātruma 84 km/st). Kravas vilcienu lokomotīvēm ir augsts zemo frekvenču vilkmes troksnis 63 Hz oktāvu joslā.



4.16. att. Dīzeļvilciena garāmbraukšanas trokšņa līmeņi laika un frekvenču domēnā
Bremzēšanas troksnis

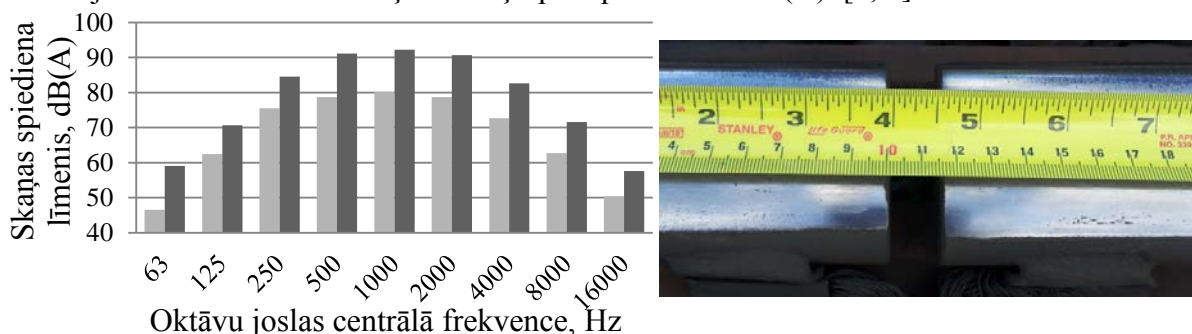
Bremzēšanas troksnis tika mērīts, elektrovilcieniem apstājoties dzelzceļa stacijās. Tika atklāts, ka augsta līmeņa izteikti tonāla spiediena trokšņa rašanās ir atkarīga no bremzēšanas intensitātes. Sākot bremzēt vilcienu laicīgi ar zemu bremzēšanas spēku, ir iespējams apturēt vilcienu bez manāma trokšņa līmeņu pieauguma. Elektrovilcienu augsta līmeņa tonāls bremzēšanas spiediena trokšņa piemērs ir redzams 8 kHz oktāvu joslā, palielinot summāro trokšņa līmeni par aptuveni 10 dB(A), 4.17. att. Dažos gadījumos trokšņa līmeņi visvairāk var paaugstināties 4 kHz un 16 kHz oktāvu joslās. Eiropas ritošiem sastāviem ar kluču bremzēm, bremzēšanas spiediena troksnis parasti rodas 4 kHz oktāvu joslā.



4.17. att. Elektrovilcienu bremzēšanas trokšņa līmeņi laika un frekvenču domēnā
Triecientroksnis sliežu savienojumu vietās

Katrā sliežu savienojuma vietā ir sprauga. Ripošanas trokšņa līmeņa paaugstināšanās ir lielā mērā atkarīga no spraugas platuma un atšķirības savienoto sliežu virsmu augstumos. Zināmā problēma ir saistīta ar to, ka saskaņā ar fizikas likumiem un dzelzceļa uzturēšanas instrukciju, sliežu savienojumu ģeometriskie parametri (spraugas platums var mainīties no 0

mm līdz 31 mm), var mainīties laikā. Tādējādi triecientroksnis dzelzceļa savienojumu vietās ir jāvērtē katrā gadījumā atsevišķi. Elektrovilciena garāmbraukšanas trokšņa paaugstināšanās piemērs sliežu savienojumu vietā ir parādīts 4.18. att. Trokšņa līmeņi paaugstinājās visās oktāvu joslās ar summārā līmeņa izmaiņu par aptuveni 12 dB(A). [7, 8]

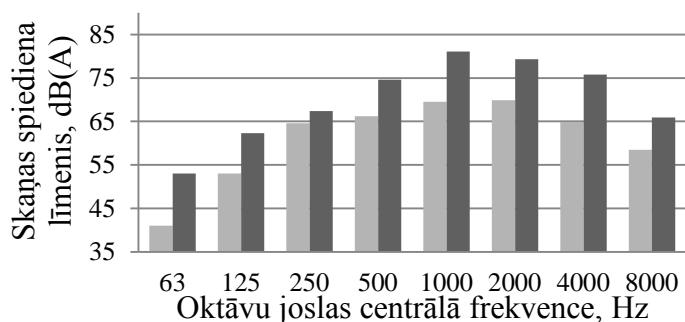


4.18. att. Elektrovilciena garāmbraukšanas trokšņa spektri
gaišs – bezsavienojuma ceļš, tumšs – ceļš ar sliežu savienojumu

Salīdzinošā eksperimentālo pētījumu un modelēšanas, izmantojot RMR metodi, rezultātu analīze

Darba sākumā vienkāršos gadījumos skaitliskie aprēķini pēc RMR metodes tika veikti ar MathCAD palīdzību, bet vēlāk Latvijas dzelzceļa līdzfinansētā projekta ietvaros, Dzelzceļa transporta institūts iegādājās CadnaA trokšņa kartēšanas programmatūru. Papildus darba gaitā tika izstrādāts programmnodrošinājums garāmbraukšanas trokšņa spektra aprēķināšanai uztveršanas punktā, izmantojot RMR oktāvu joslu metodi – Train Noise Software (TNS), kas tika izmantots CadnaA aprēķinu rezultātu novērtēšanai un RMR metodes pilnveidošanai, ņemot vērā specifiskus Latvijas dzelzceļa apstākļus. Vispirms salīdzināsim eksperimentālo pētījumu rezultātus ar CadnaA modelēšanas rezultātiem. Analīzei tika ņemti mērījumu rezultāti, kas ir MKLRL punkti (vai atrodas ļoti tuvu tām) 4.10. att.

Attēlos 4.19. – 4.22. ir attiecīgi parādīti nomērīti un CadnaA aprēķinātie garāmbraukšanas trokšņa spektri dīzeļvilcienam, elektrovilcienam, kravu vilcienam no vagoniem un jauktam kravu vilcienam, pieņemot, ka zemes virsmas absorbcijas koeficients ir vienāds ar 0.5. [5]



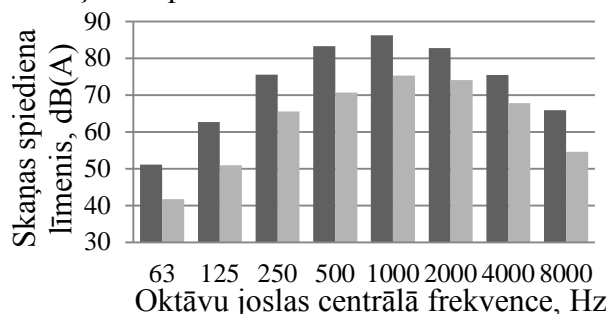
4.19. att. Nomērīts (tumšs) un CadnaA aprēķināts (gaišs) dīzeļvilciena garāmbraukšanas trokšņa spektrs

vilciena ātrums - 80 km/st, mērījuma laiks - 5.7 s, RMR vilciena tipa kategorija 6

Nomērītie trokšņa līmeņi pārsniedz aprēķinātos visās oktāvu joslās par 2.8 dB(A) (250 Hz) – 11.6 dB(A) (1 kHz). Summāro līmeņu starpība ir 9.8 dB(A).

Maksimums nomērītajā spektrā ir 1 kHz oktāvu joslā, bet aprēķinātajā spektrā – 2 kHz oktāvu joslā. Nomērītajā spektrā nav dzinēja izraisīta zemu frekvenču maksimuma 250 Hz oktāvu joslā, kas ir redzams aprēķinātajā spektrā. Ja modelēšanai tiek izmantots RMR metodes dīzeļvilcienu tips ar dzinēja troksni, tad summāra starpība samazinās par 3 dB(A), taču spektru kontūrlīnijas atšķiras vairāk, jo maksimumi aprēķinātā spektrā 250 Hz un 2 kHz

oktāvu joslā kļūst vēl izteiktāki. Kā izriet no 4.12. att., dzinēja trokšņa korekcija dīzeļvilcieniem Latvijas dzelzceļā ir nepieciešama tikai lielos ātrumos un zemās frekvencēs.

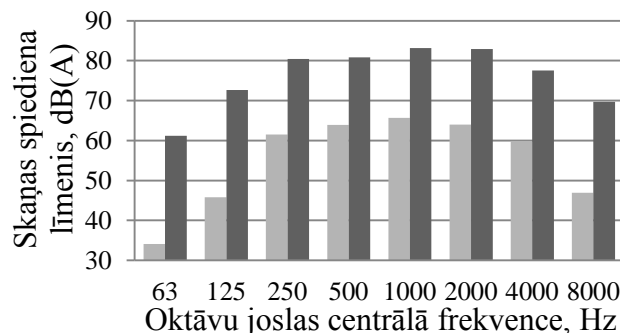


4.20. att. Nomērīts (tumšs) un CadnaA aprēķināts (gaišs) elektrovilciena garāmbraukšanas trokšņa spektrs

vilciena ātrums - 77 km/st, mērījuma laiks - 5.9 s, RMR vilciena tipa kategorija 1

Nomērītie elektrovilcienu trokšņa līmeņi 4.20. att. pārsniedz aprēķinātos visās oktāvu joslās par 7.6 dB(A) (4 kHz) – 12.6 dB(A) (500 Hz). Summāro līmeņu starpība ir 10.3 dB(A).

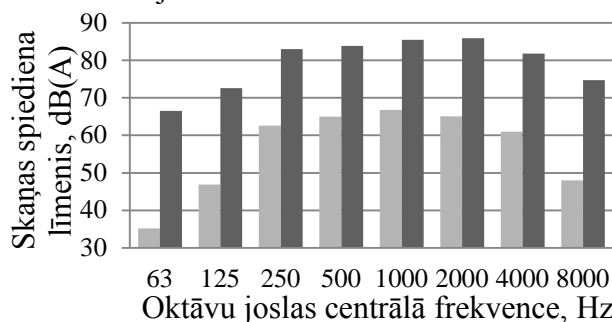
Salīdzinot ar dīzeļvilcieniem, summāro trokšņa līmeņu starpība palielinājās tikai par 0.5 dB(A). Aprēķinātā spektra kontūrlīnija labi sakrīt ar mērījumu rezultātiem.



4.21. att. Nomērīts (tumšs) un CadnaA aprēķināts (gaišs) kravas vilciena, kas sastāv tikai no vagoniem, garāmbraukšanas trokšņa spektrs

vilciena ātrums - 65 km/st, mērījuma laiks – 46.5 s, RMR vilciena tipa kategorija 4

Nomērītie trokšņa līmeņi pārsniedz aprēķinātos visās oktāvu joslās par 17.4 dB(A) (1 kHz) – 27.1 dB(A) (63 Hz). Summāro līmeņu starpība ir 18 dB(A). Lielāka starpība pirmās divās oktāvu joslās ir izskaidrojama ar vilkmes troksni un lielāku slodzi uz ass. Aprēķinātā spektrā nav maksimuma 2 kHz oktāvu joslā.



4.22. att. Nomērīts (tumšs) un CadnaA aprēķināts (gaišs) jauktā kravas vilciena garāmbraukšanas trokšņa spektrs

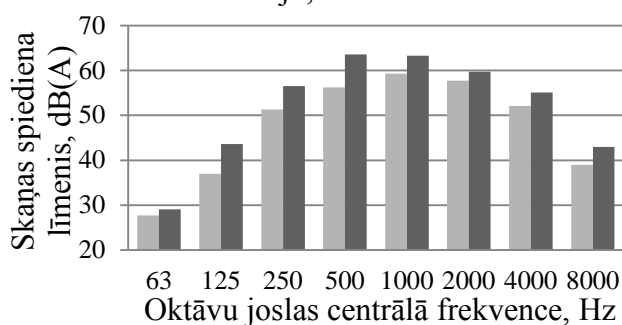
vilciena ātrums - 65 km/st, mērījuma laiks – 36.5 s, RMR vilciena tipa kategorija 4

Nomērītie trokšņa līmeņi pārsniedz aprēķinātos visās oktāvu joslās par 18.6 dB(A) (1 kHz) – 31.3 dB(A) (63 Hz). Summāro līmeņu starpība ir 19.7 dB(A).

Kopumā, aprēķināto trokšņa spektru kontūrlīnijas samērā precīzi seko nomērīto spektru kontūrlīnijām, bet nomērītie trokšņa līmeņi ir ievērojami augstāki visās oktāvu joslās. Lielākā atšķirība starp nomērītiem un aprēķinātiem trokšņa līmeņiem ir kravas vilcienu

gadījumā. Zemākā starpība starp aprēķinātajiem un nomērītajiem summārajiem ekvivalentiem A-izsvartotiem trokšņa līmeņiem ir dīzeļvilcienu gadījumā.

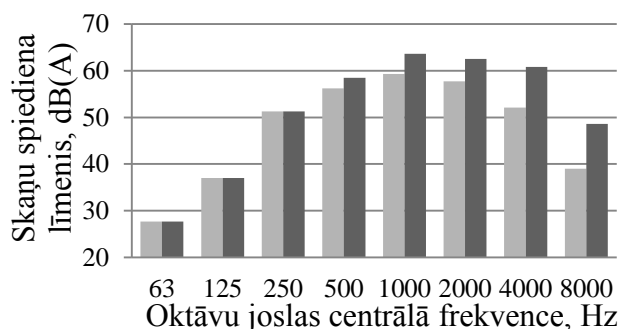
Vēl viens svarīgs secinājums ir saistīts ar RMR īpašību - aprēķinātie trokšņa līmeņi ir atkarīgi no satiksmes intensitātes, bet nav tiešā sakarībā ar vilciena garumu. Salīdzināsim aprēķinātos kravas vilcienu spektrus 4.21. un 4.22. att. Vienīgā starpība aprēķinos ir satiksmes intensitāte, kas ir atkarīga no mērījuma laika (vilciena garuma). Reālajā situācijā, mērījuma laiks neietekmē nomērītu ekvivalentu skaņas līmeņa vērtību atsevišķam statistiski konstantam avotam. Bet sakarā ar empīrisko RMR metodes raksturu, mēs ieguvām dažādus spektrus dažādiem mērījumu laikiem. Tagad salīdzināsim aprēķinātos kravas vilcienu spektrus ar elektrovilcienu un dīzeļvilcienu spektriem - prognozētie trokšņa līmeņi kravas vilcieniem ir zemāki nekā prognozētie trokšņa līmeņi elektrovilcieniem un dīzeļvilcieniem. Kravas vilcieni ir garāki, tāpēc garāmbraukšanas laiks ir ilgāks, rezultātā - mazāks vilcienu skaits (zemāka satiksmes intensitāte), tiek izmantots aprēķinos, salīdzinot ar elektrovilcieniem un dīzeļvilcieniem. Tas ir pretrunā ar reālo situāciju, 4.9. un 4.10. att.



4.23. att. CadnaA aprēķinātie elektrovilciena garāmbraukšanas trokšņa spektri, ceļš ar savienojumiem (tumšs) un bezsavienojumu ceļš (gaišs)
vilciena ātrums 60 km/st, garāmbraukšanas laiks 7.2 s

Garāmbraukšanas trokšņa līmeņu paaugstināšanos aprēķināšanai sliežu savienojumu dēļ, RMR metode piedāvā koriģējošus koeficientus sliedēm ar savienojumiem. Šie koriģējošie koeficienti bija empīriski iegūti Nīderlandes sliežu ceļiem. Attēlā 4.23. ir parādīti CadnaA aprēķināti elektrovilciena garāmbraukšanas trokšņa spektri bezsavienojumu sliedēm un sliedēm ar savienojumiem. Ir redzams, ka galvenais trokšņa līmeņu pieaugums ir prognozēts zemu frekvenču diapazonā. [7, 8]

Bremzēšanas troksnis RMR metodē ir atkarīgs no vilciena tipa, ātruma un satiksmes intensitātes. CadnaA prognozētās elektrovilciena trokšņa līmeņu izmaiņas bremzēšanas dēļ ir parādītas 4.24. att.



4.24. att. CadnaA aprēķinātie garāmbraukšanas trokšņa spektri, bremzējošam (tumšs) un nebremzējošam elektrovilcienam (gaišs)
vilciena ātrums 60 km/st, garāmbraukšanas laiks 7.2 s

Konkrētajā gadījumā summārais trokšņa līmenis paaugstinājās par 4.5 dB(A), līdzīgi sliežu savienojumu gadījumam, bet galvenokārt izmaiņu dēļ augstu frekvenču diapazonā. Latvijas elektrovilcieni var tikt apturēti bez manāma trokšņa līmeņu pieauguma, bet var

parādīties spiediena troksnis 4 kHz, 8 kHz un pat 16 kHz oktāvu joslās. Modelēšanas precizitātes uzlabošanas nolūkos var izmainīt koriģējošus koeficientus 4 kHz un 8 kHz oktāvu joslām, bet 16 kHz oktāvu josla atrodas ārpus RMR metodes interešu loka. [7, 8]

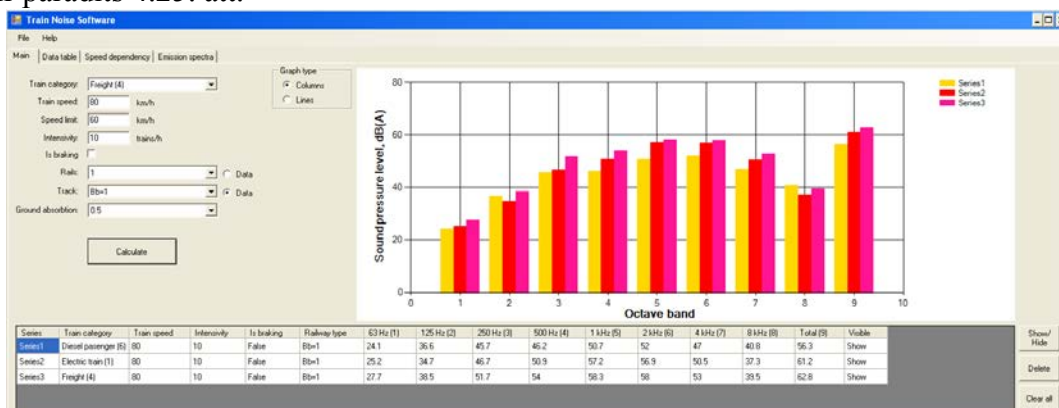
RMR metodes pilnveidošana Latvijas dzelzceļa apstākļiem

No vilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektru modelēšanas un mērījumu rezultātu salīdzinājuma, kā arī no [1, 2, 4] izriet, ka RMR metodes izmantošana dzelzceļa trokšņa modelēšanai Latvijas dzelzceļā bez atbilstošas pilnveidošanās radīs ievērojamas kļūdas. Prognozētie trokšņa līmeņi ir zemāki par reālajiem visās oktāvu joslās, visiem vilcienu tipiem un jebkuros apstākļos.

Šeit pilnveidošana nozīmē jaunu starojuma radītāju un korekcijas koeficientu definēšanu jauniem vilcienu tipiem un sliežu ceļam. Pašreiz tā ir ļoti sarežģīta problēma, jo riteņu un sliežu nelīdzenumu vērtības nav zināmas. Tomēr jaunus Latvijas vilcienu tipus un sliežu ceļu RMR metodei var definēt statistiski, izmantojot izpētes laikā gūtos rezultātus.

Diemžēl, neviens no autoram zināmiem trokšņa kartēšanas programnodrošinājumiem, kas pieejami tirgū, nepiedāvā lietotājam iespēju definēt jaunus vilcienu un sliežu ceļu tipus RMR metodei. Lai definētu jaunus Latvijas dzelzceļam atbilstošus vilcienu un sliežu ceļu tipus, tika izmantots darba gaitā izstrādāts TNS programnodrošinājums.

TNS ir ar vienkāršu un lietotājam draudzīgu interfeisu ar trim galvenajām iespējām: summāra garāmbraukšanas trokšņa līmeņa un spektra aprēķināšana uztveršanas punktā, trokšņa līmeņu ātruma atkarības vizualizēšana visās oktāvu joslās un starojuma spektra aprēķināšana. Aprēķinu pamatā ir RMR metodē noteikti izejas dati: vilcienu tips, vilciena ātrums, vilcienu skaits stundā, bremsēšanas esamība, sliežu ceļa tips un sliežu savienojumu klase. Visi starojuma radītāji, korekcijas koeficienti un citi nepieciešamie dati tiek saglabāti ārējā Excel tabulā. Izmantotos datus var apskatīt caur TNS interfeisu. Ja ir jāpievieno vai jāmaina izejas dati, tas ir viegli izdarāms Excel tabulā. TNS lietotāja grafiskā interfeisa piemērs ir parādīts 4.25. att.



4.25. att. TNS interfeiss – garāmbraukšanas trokšņa spektra aprēķins

TNS un CadnaA aprēķinu rezultātu deviācija ir 1.2 dB(A) robežās katrā no oktāvu joslām, uztveršanas punktam 7.5 m attālumā no sliežu ceļa centra un 1.2 m augstumā virs sliežu virsmas līmeņa, pilnīgi absorbējošas zemes virsmas gadījumā, 4.1. tabula. Pilnīgi atstarojošas zemes virsmas gadījumā rezultātu deviācija atsevišķās oktāvu joslās sasniedz 2.6 dB(A), taču tas ievērojami neietekmē summāro līmeņu starpību, jo tiek pielietota A-izsvarošanas funkcija.

TNS un CadnaA aprēķinu rezultātu deviāciju ir grūti kvalitatīvi novērtēt, jo CadnaA izejas kods nav pieejams. Kopumā mēs varam uzskatīt, ka deviācija 1.1 dB(A) robežās starp TNS un CadnaA aprēķinātiem summārajiem līmeņiem ļauj izmantot TNS garāmbraukšanas trokšņa spektra aprēķināšanai atskaites uztveršanas punktā. Tas arī norāda uz CadnaA īstenotu aprēķinu algoritmu pareizību.

4.1. tabula

TNS un CadnaA aprēķinu rezultātu salīdzināšana, pilnībā absorbējoša zemes virsma

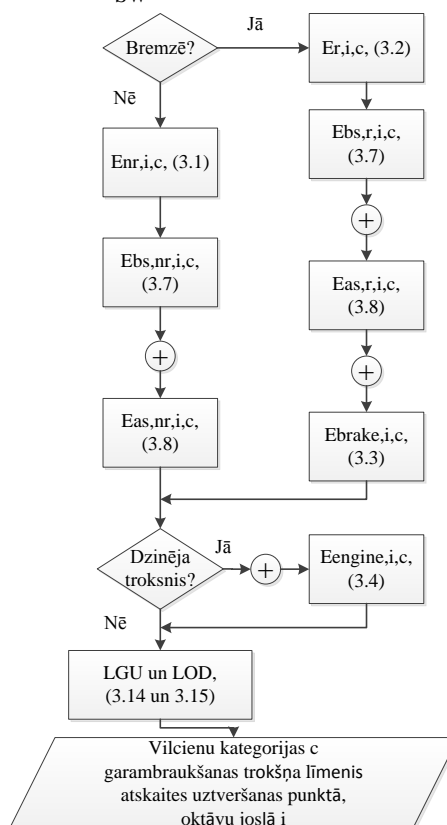
Vilciena tips	Oktāvu joslas centrālā frekvence, Hz								Total
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Elektro	1.1	1.1	1.2	1.2	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1
Dīzeļi	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1
Kravu	1.0	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.1	1.2	1.1

4.2. tabula

TNS un CadnaA aprēķinu rezultātu salīdzināšana, pilnībā atstarojoša zemes virsma

Vilciena tips	Oktāvu joslas centrālā frekvence, Hz								Total
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	
Elektro	1.1	2.6	1.4	0.7	0.7	1.1	1.1	1.2	0.9
Dīzeļi	1.1	2.6	1.4	0.7	0.8	1.1	1.1	1.2	1.0
Kravu	1.0	2.6	1.4	0.5	0.7	1.1	1.1	1.2	0.9

Attēlā 4.26. ir shematiski parādīts vilcienu kategorijas c garāmbraukšanas trokšņa līmeņa aprēķinu algoritms atskaites uztveršanas punktā, oktāvu joslā i. Aprēķins tiek atkārtots katrai no astoņām oktāvu joslām un summārais ekvivalentais trokšņa līmenis tiek noteikts, enerģētiski summējot visās oktāvu joslās aprēķinātos trokšņa līmeņus. Pašreizēja TNS versija tiek izmantota aprēķinu rezultātu salīdzināšanai ar mērījumu rezultātiem, kas tika veikti ievērojot RMR rekomendācijas, tāpēc daži no parametriem ir aprēķināti atsevišķi, tādi kā: L_{GU} – attāluma vājinājums, (3.14); D_L – gaisa absorbcijas vājinājums, (3.16); C_M – meteoroloģisko apstākļu koriģēšanas koeficients, (3.17). Virsmas efekta starpība diviem dažādiem avotu augstumiem ir relatīvi maza un netiek ņemta vērā. Īsākie ceļi starp avotiem un uztveršanas punktu tiek uzskatīti vienādi ar horizontāli nomērītu attālumu starp avotiem un uztveršanas punktu. Ekranēšanas efekts L_{SW} un atstarošanas efekts L_R netiek ņemti vērā.



4.26. att. TNS aprēķinu algoritms

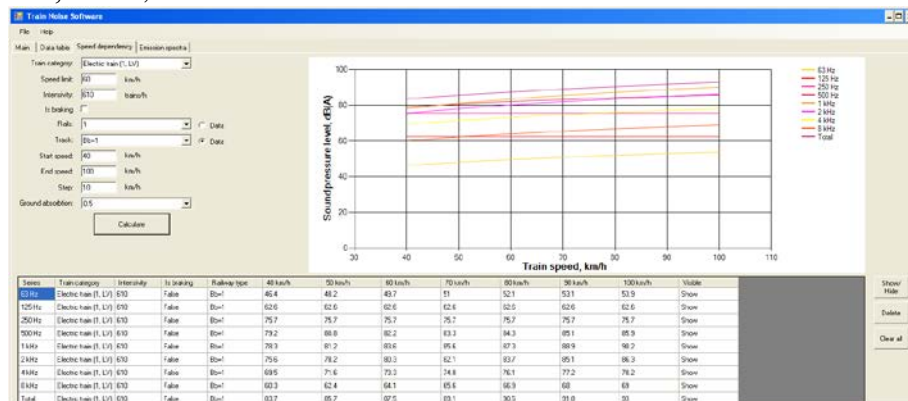
Jaunu Latvijas vilcienu tipu definēšana RMR metodei

Ir jāatzīmē, ka RMR metodi parasti izmanto trokšņa kartēšanas vajadzībām, kur tiek noteiktas vidējās starojuma vērtības ilgam laika periodam, nevis atsevišķa vilciena garāmbraukšanas trokšnis, tāpēc aprēķinu rezultāti ir jāsalīdzina ar statistiski vidējiem mērījumu rezultātiem. Izmantojot TNS, mēs noteiksim starojuma radītājus jauniem vilcienu tipiem, ņemot vērā galvenās trokšņu līmeņa ātruma atkarību īpašības oktāvu joslās, 4.11. – 4.13. att. un pieņemot, ka zemes absorbcijas koeficients ir vienāds ar 0.5.

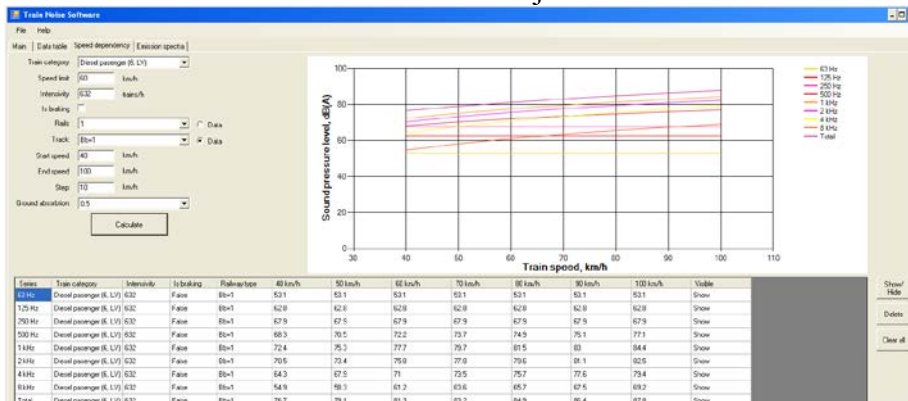
Pieņemsim, ka elektrovilcienu trokšņa līmeņi 125 Hz un 250 Hz oktāvu joslās nav atkarīgi no ātruma. Trokšņa līmeņi citās oktāvu joslās ir atkarīgi no ātruma. Vispirms mēs atradām N vērtības katrai oktāvu joslai, izmantojot (4.1) un zināmās trokšņa līmeņu izmaiņas, vilciena ātrumam palielinoties no 45 km/st līdz 80 km/st, 4.11. att. un tad, izmantojot TNS, atradām piemērotu starojuma radītāju a [24] tā, lai TNS aprēķinātais spektrs atbilst nomērītajam 4.20. att. Definētie starojuma radītāji a un b [24] Latvijas vilcieniem ir apkopoti 4.3. tabulā (vilciena kategorija 1). TNS aprēķinātās trokšņa līmeņu ātruma atkarības oktāvu joslās ir parādītas 4.27. att. Ir redzams, ka summārā trokšņa līmeņa ātruma atkarība ir tuva eksperimentāli iegūtajai 4.10. att.

$$L = L_{p0} + N \log_{10}(V/V_0), \quad (4.1)$$

kur L – A-izsvartais skaņas spiediena līmenis, dB(A); L_{p0} – A- izsvartais skaņas spiediena līmenis pie atskaites ātruma V_0 , dB(A); V – vilciena ātrums, km/st; V_0 – atskaites vilciena ātrums, km/st; N – konstantā vērtība.



4.27. att. TNS aprēķinātās Latvijas elektrovilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarības oktāvu joslās

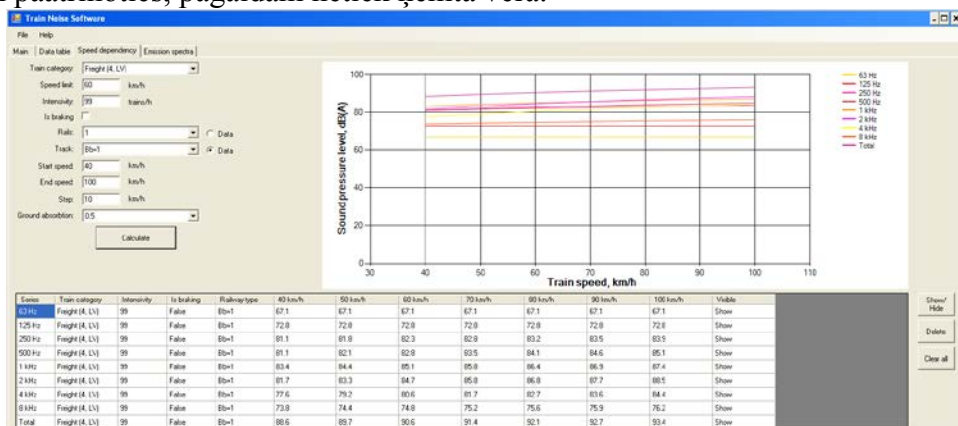


4.28. att. TNS aprēķinātās Latvijas dīzeļvilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarības oktāvu joslās

Dīzeļvilcienu gadījumā pieņemsim, ka trokšņa līmeņi 63 Hz, 125 Hz un 250 Hz oktāvu joslās nav atkarīgi no ātruma. Trokšņa līmeņi citās oktāvu joslās ir atkarīgi no ātruma. Līdzīgā veidā kā elektrovilcieniem, a un b starojuma radītāji tiek noteikti, izmantojot zināmās trokšņa līmeņu izmaiņas, vilciena ātrumam palielinoties no 65 km/st līdz 80 km/st un 104

km/st, 4.12. att. TNS aprēķinātais spektrs tiek salīdzināts ar eksperimentāli nomērīto 4.19. att. Definētie starojuma radītāji a un b Latvijas vilcieniem ir apkopoti 4.3. tabulā (c = 6). TNS aprēķinātās trokšņa līmeņu ātruma atkarības oktāvu joslās ir parādītas 4.28. att. Ir redzams, ka summārā trokšņa līmeņa ātruma atkarība ir tuva eksperimentāli iegūtai 4.10. att. Vilkmes trokšņa ietekme ātrumos tuvu maksimālajam pagaidām netiek ņemta vērā.

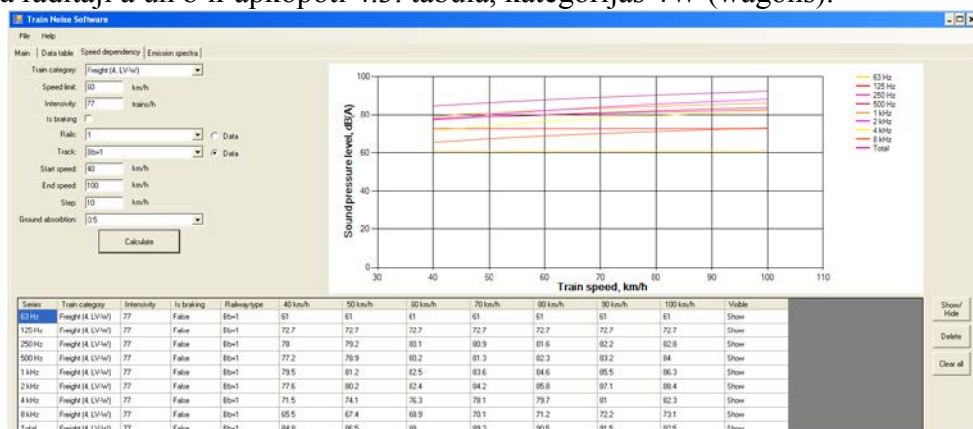
Jaukto kravas vilcienu gadījumā pieņemsim, ka trokšņa līmeņi 63 Hz un 125 Hz oktāvu joslās nav atkarīgi no ātruma. Trokšņa līmeņi citās oktāvu joslās ir atkarīgi no ātruma. Starojuma radītāji a un b tiek noteikti, izmantojot zināmās trokšņa līmeņu izmaiņas, vilciena ātrumam palielinoties no 46 km/st līdz 58 km/st un 70 km/st, 4.12. att. TNS aprēķinātais spektrs tiek salīdzināts ar eksperimentāli nomērīto 4.22. att. Definētie starojuma radītāji a un b Latvijas vilcieniem ir apkopoti 4.3. tabulā (c = 4). TNS aprēķinātās trokšņa līmeņu ātruma atkarības oktāvu joslās ir parādītas 4.29. att. Ir redzams, ka summārā trokšņa līmeņa ātruma atkarība ir tuva eksperimentāli iegūtajai 4.10. att. Lokomotīves vilkmes trokšņa ietekme, vilcienam paātrinoties, pagaidām netiek ņemta vērā.



4.29. att. TNS aprēķinātās Latvijas jaukto kravas vilcienu garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarības oktāvu joslās

Ātruma atkarības kravas vilcieniem, izņemot vilcienus, kas sastāv tikai no vagoniem, ir līdzīga jauktiem kravu vilcieniem, bet ar paaugstinātiem par apmēram 1 dB(A) starojuma līmeņiem, 4.3. tabula kategorija 4NW (non wagons).

Kravas vilcieniem, kas sastāv tikai no vagoniem, starojuma līmeņi un to ātruma atkarības ir atšķirīgas no citiem kravas vilcieniem un tiek parādītas 4.30. att. Noteiktie starojuma radītāji a un b ir apkopoti 4.3. tabulā, kategorijas 4W (wagons).



4.30. att. Latvijas jaukto kravas vilcienu, kas sastāv tikai no vagoniem, TNS aprēķinātās garāmbraukšanas trokšņa līmeņu ātruma atkarības oktāvu joslās

Sekojoš RMR metodes aprakstam, ir nepieciešams definēt korekcijas koeficientus sliežu ceļam $C_{bb,i}$ [24, 25], lai ņemtu vērā sliežu nelīdzenumu vērtību atšķirības, salīdzinot ar neslīpētu sliežu ceļu. Tomēr 4.9. un 4.10. att. ir redzams, ka trokšņa līmeņu palielināšanās

atšķiras dažādu vilcienu tipiem, tāpēc nav iespējams noteikt vienotās $C_{bb,i}$ vērtības visiem vilcienu tipiem, kā RMR. Kravu un dīzeļvilcienu starojuma līmeņu ātruma atkarības atšķiras arī diviem sliežu ceļiem. Pieņemot, ka tas nav parastais gadījums Latvijas dzelzceļa tīklam, starojuma radītāji un koriģējošie koeficienti pagaidām netika noteikti slīpētām sliežu ceļam. Bremzēšanas un triecientrokšņa ietekme tiks novērtēta kārtējā Latvijas dzelzceļa ierosinātā pētniecības projekta ietvaros [10].

4.3. tabula

Piecu Latvijas vilcienu kategoriju starojuma radītāji a un b astoņās oktāvu joslās

Vilcienu kategorija c	Starojuma radītājs	Oktāvu joslas centrālā frekvence, Hz un tās kārtas numurs i							
		63	125	250	500	1000	2000	4000	8000
		1	2	3	4	5	6	7	8
1	a	29	80	95	72	49	50	52	43
	b	19	0	0	17	30	27	22	22
4	a	88	98	97	93	94	80	76	90
	b	0	0	7	10	10	17	17	6
4NW	a	90	100	98	94	95	81	77	91
	b	0	0	7	10	10	17	17	6
4W	a	83	99	87	79	80	61	55	62
	b	0	0	12	17	17	27	27	19
6	a	66	80	87	53	43	40	21	15
	b	0	0	0	22	30	30	38	36

5. DZELZCEĻA TROKŠŅA KARTĒŠANA

Trokšņa karte reprezentē noteiktai teritorijai aprēķinātus trokšņa līmeņus divās vai trīs dimensijās. Saskaņā ar 2002/49/EK direktīvu par vides troksni, līdz 30.06.2005 bija jāizveido stratēģiskās trokšņa kartes aglomerācijās ar 250000 iedzīvotājiem, aglomerācijās ar 100000 iedzīvotājiem un galvenajās dzelzceļa līnijās, kur reisu skaits pārsniedz 300000 gadā, kartes bija jāizveido līdz 30.06.2012. Izstrādātās stratēģiskās trokšņa kartes ir jāaktualizē ik pēc pieciem gadiem.

Saskaņā ar [23], Latvijas teritorijā ir spēkā 5.1. tabulā apkopotie trokšņa robežlielumi.

5.1. tabula

Trokšņa robežlielumi

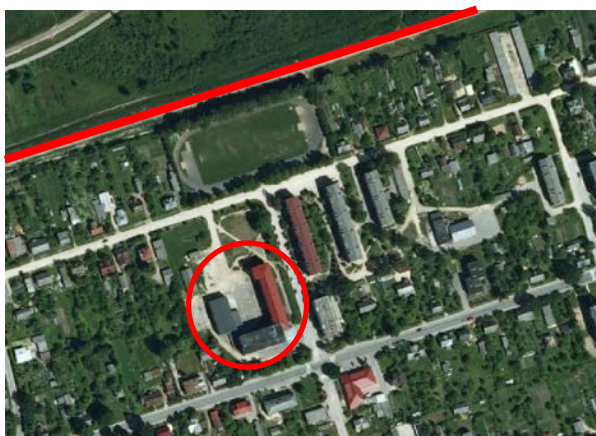
N	Teritorijas lietošanas funkcija	Trokšņa robežlielumi, dB(A)		
		L_d	L_e	L_n
1	Mazstāvu dzīvojamo ēku, kūrortu, slimnīcu, bērnu iestāžu un sociālās aprūpes iestāžu teritorija	50	45	40
2	Daudzstāvu daudzdzīvokļu dzīvojamo ēku teritorijas, kultūras, izglītības, pārvaldes un zinātnes iestāžu teritorija	55	50	45
3	Dažādu funkciju ēku (ar dzīvokļiem) teritorijas	60	55	45
4	Viesnīcu, darījumu, tirdzniecības un pakalpojumu, sporta un sabiedrisko iestāžu teritorija	60	55	50

Ja trokšņa kartēšanas rezultāti liecina, ka apdzīvotas vietas ir pakļautas trokšņa iedarbībai ar līmeņiem, kas pārsniedz 5.1. tabulā norādītos robežlielumus, atbildīgajām institūcijām ir jāgatavo un jāsteno stratēģiski rīcības plāni to samazināšanai. Trokšņa samazināšana var ietvert dažādus pasākumus, kas ir aprakstīti 6. nodaļā; 6 nodaļā ir aprakstīti arī galvenie punkti no Latvijas dzelzceļam sagatavotā stratēģiskā trokšņu samazināšanas rīcības plāna.

Trokšņa kartēšanas rezultāti Latvijas dzelzceļā

Latvijas dzelzceļa finansētā projekta ietvaros [8] tika izstrādāta trokšņa karte Pļaviņu ģimnāzijas teritorijai, 5.1. att. Izglītības iestādes, piemēram, skolas, institūti un universitātes ir

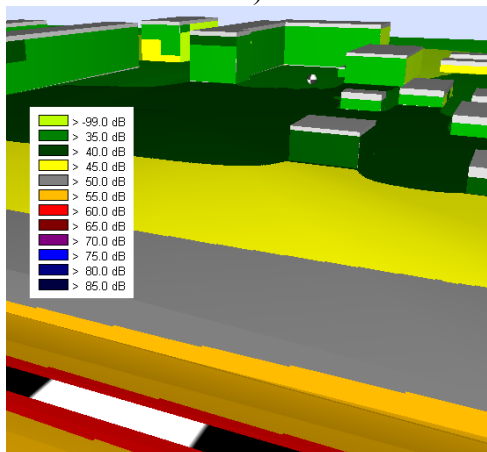
sensitīvas pret pakļaušanos paaugstināto trokšņa līmeņu iedarbībai, īpaši dienas laikā, kad notiek stundas un lekcijas. Skaļā vidē skolēniem un studentiem ir īpaši grūti apgūt jaunas zināšanas. Ja skola atrodas tuvu dzelzceļa līnijai vai autotrasei, reizēm kļūst neiespējams turpināt lekcijas [6]. Šajā konkrētajā gadījumā ģimnāzija atrodas 153 m attālumā no dzelzceļa līnijas, kas 5.1. att. ir apvilta ar sarkanu. Uzmanību tieši šim objektam izraisīja plānotā rekonstrukcija, kas sevī iekļauj papildus dzelzceļa līnijas būvniecību blakus jau esošajai. Tika nolemts izveidot trokšņu samazināšanas plānu, kas būtu jāīsteno vienlaicīgi ar rekonstrukcijas darbiem.



5.1. att. Pļaviņu ģimnāzijas teritorija

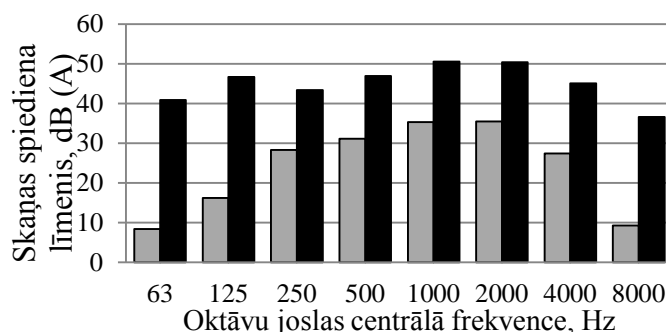
Ar mērķi objektīvi izvērtēt pašreizējo akustisko situāciju, autors veica 12 st ilgu trokšņu mērījumu pie ģimnāzijas. Mērījuma laikā nobrauca 23 kravas vilcieni, ar vidējo ātrumu 60 km/st un 20 pasažieru dīzeļvilcieni ar vidējo ātrumu 70 km/st, kas atbilst šās dzelzceļa līnijas vidējai satiksmes intensitātei.

Izmantojot zināmos ģimnāzijas izmērus un ar GPS palīdzību, manuāli tika izveidots digitāls ģimnāzijas teritorijas modelis CadnaA programmnodrošinājumā. Daļa no izveidotā digitālā modeļa 3D formātā ir attēlota 5.2. att. ar trokšņu līmeņiem, kas aprēķināti, izmantojot RMR metodi un satiksmes informāciju. Sliežu ceļš ir attēlots lejasdaļā kā melna un balta josla, pelēkais un baltais punkts reprezentē mērījuma veikšanas vietu. Dažādas krāsas atbilst dažādiem trokšņu līmeņiem, ar 5 dB(A) starpību. Noteiktiem trokšņu līmeņiem atbilstošu krāsu paskaidrojumi redzami attēlā. Trokšņa līmeņi horizontālā plaknē tika aprēķināti 4 m augstumā, zemes absorbcijas koeficients bija izvēlēts vienāds ar 0.5, ēkas tika uzskatītas par atstarojošām (1 dB(A) atstarošanas vājinājums). Kā redzams, balstoties uz RMR aprēķiniem, maksimālais trokšņa līmenis uz ģimnāzijas fasādes ir mazāks par 45dB(A) (faktiskais lielums ir 41 dB(A) augšstāvā dzelzceļam vistuvākā fasādē).



5.2. att. CadnaA Pļaviņu ģimnāzijas teritorijas trokšņa karte 3D formātā, aprēķināta, izmantojot RMR metodi un informāciju par vilcienu satiksmi

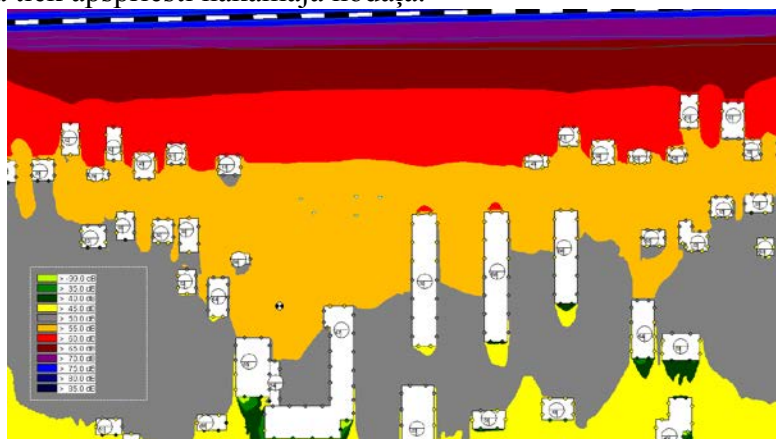
Kā bija apspriests 4. nodaļā, RMR metode sniedz nepareizus rezultātus Latvijas dzelzceļa apstākļiem. To var redzēt 5.3. att., kur ir parādīti A-izsvartotie nomērīti (tumšs) un aprēķināti (gaišs) trokšņa spektri atskaites uztveršanas punktā.



5.3. att. CadnaA aprēķinātie (gaišs) un nomērītie (tumšs) trokšņa spektri atskaites uztveršanas punktā

Kā bija gaidāms, nomērītie trokšņa līmeņi pārsniedz aprēķinātos visās oktāvu joslās. Atšķirība ir no 15.1 dB(A) 250 Hz oktāvu joslā līdz 32.5 dB(A) 63 Hz oktāvu joslā. Prognozētais summārais A-izsvartotais ekvivalentais līmenis ir 16 dB(A) zemāks par nomērīto. Šeit ir svarīgi atzīmēt, ka tik augsti zemo frekvenču līmeņi nav tipiski pat kravas vilcieniem, 4.13. att. Tik augsti līmeņi 63 Hz un 125 Hz oktāvu joslās ir izskaidrojami ar nevēlamo fona troksni. Tā bija pilsētas dzimšanas diena, un svinības kopā ar skaļu mūziku sākās pēcpusdienā. Svētku svinēšanas vieta bija tālu prom no mērījumu vietas, bet zemo frekvenču skaņas viļņi no jaudīgām akustiskām sistēmām varēja sasniegt mikrofonu.

Šajā projekta posmā TNS vēl nebija izstrādāts un trokšņa karte 5.2. att. tika koriģēta, izmantojot mērījumu rezultātus. Koriģētā trokšņa karte 2D formātā ir parādīta 5.4. att. Maksimālais trokšņa līmenis ģimnāzija fasādē pēc trokšņa kartes koriģēšanas sastāda 57 dB(A) un joprojām ir tikai 2 dB(A) augstāks par robežlielumu, 5.1. tabulā, bet ņemot vērā palielināto satiksmes intensitāti pēc otrās dzelzceļa līnijas uzbūvēšanas, trokšņu samazināšanas pasākumi joprojām ir aktuāli. Ierosinātie ieteikumi trokšņu samazināšanai šajā konkrētajā gadījumā tiek apspriesti nākamajā nodaļā.

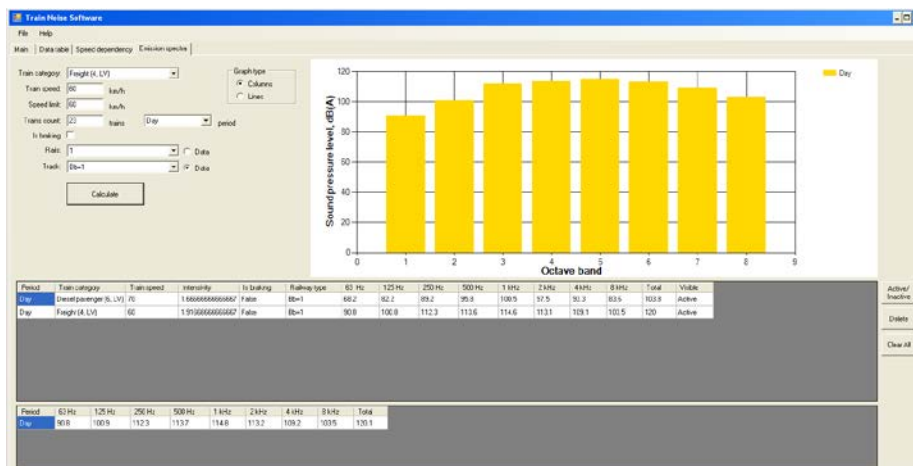


5.4. att. CadnaA Pļaviņu ģimnāzijas teritorijas trokšņa karte 2D formātā, aprēķināta, izmantojot RMR metodi un koriģēta pēc mērījumu rezultātiem

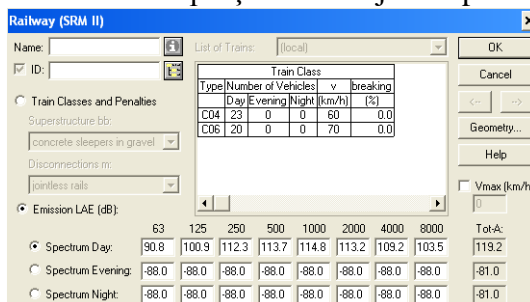
Direktīva par vides troksni 2002/49/EK nosaka, ka stratēģiska trokšņa karte ir jāveido, izmantojot modelēšanu, nevis mērījumu rezultātus. Tagad ir iespējams izmantot izstrādāto TNS programmatūru šādas problēmas risināšanai. Vispirms, izmantojot TNS, tiek aprēķināts starojuma spektrs, 5.5. att. un tad tas tiek izmantots avota aprakstam trokšņa kartēšanas programmatūrā, 5.6. att.

Attēlā 5.5. ir redzams, ka kravas vilcienu (jauktie vagoni) izstarotie trokšņa līmeņi ir ievērojami augstāki par dīzeļvilcienu trokšņa līmeņiem visās oktāvu joslās, tāpēc summārais

starojuma spektrs ir faktiski noteikts ar kravas vilcienu starojumu. Maksimālais dīzelvilcienu ieguldījums summārā starojuma spektrā irniecīgs un sastāda tikai 0.2 dB(A) 1 kHz oktāvu joslā.

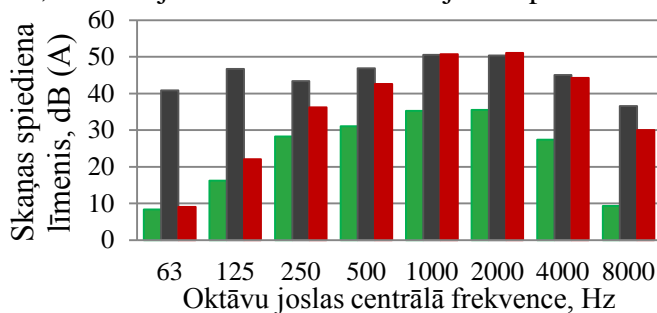


5.5. att. TNS aprēķināts starojuma spektrs



5.6. att. TNS aprēķināts starojuma spektrs kā izejas dati CadnaA aprēķiniem

Attēlā 5.7. ir parādīti trīs spektri, abi spektri no 5.3. att.: zaļš – CadnaA aprēķināts spektrs, izmantojot RMR metodi un satiksmes datus; melns – nomērīts spektrs un sarkans – CadnaA aprēķināts spektrs, izmantojot TNS noteiktu starojuma spektru.



5.7. att. CadnaA aprēķinātie un nomērītais spektri

Trokšņa līmeņu starpība zemo frekvenču joslās starp nomērīto un aprēķināto spektru pierāda, ka tā nav dzelzceļa saistīts starojums. Ērtākai salīdzināšanai abi spektri ir apkopoti 5.2. tabulā, TNS-CadnaA aprēķinātais spektrs N = 1 un nomērītais N = 2.

5.2. tabula

Nomērītā un TNS-CadnaA aprēķinātā spektra salīdzināšana

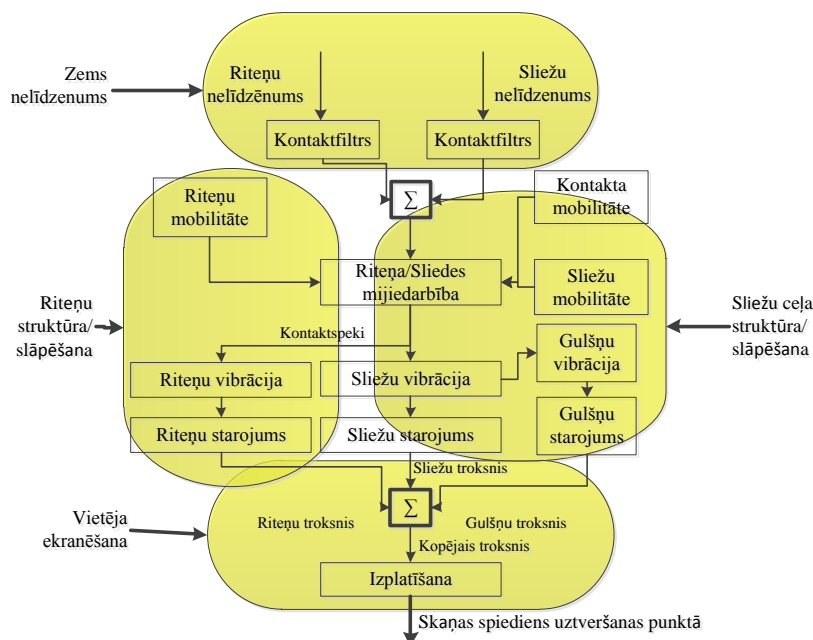
N	Oktāvu joslas centrālā frekvence, Hz								
	63	125	250	500	1000	2000	4000	8000	total
1	9.1	22.1	36.2	42.6	50.7	51.1	44.3	30	54.9
2	40.9	46.7	43.4	46.9	50.6	50.4	45.1	36.6	55.8
1-2	-31.8	-24.6	-7.2	-4.3	0.1	0.7	-0.8	-6.6	-0.9

Ir redzams, ka 1 kHz un 2 kHz oktāvu joslās, kur atrodas kravas vilcienu starojuma maksimumi, 4.13. att., līmeņu starpības ir minimālas, kā rezultātā summāro līmeņu starpība ir mazāka nekā 1 dB(A). Tas pierāda 4. nodaļā veikto pieņēmumu, ka neslīpētu sliežu ceļu var uzskatīt par vidējo Latvijas dzelzceļā (sliežu ceļa stāvoklis Pļaviņās bija līdzīgs 4. nodaļā aprakstītajam neslīpētajam sliežu ceļam). Tas arī pierāda, ka, izmantojot TNS aprēķinātu trokšņa starojuma spektru kā avota spektru trokšņa kartēšanas programmatūrā, var veidot Latvijas dzelzceļa apstākļiem atbilstošas trokšņa kartes.

6. TROKŠŅA AVOTU REDUKCIJA UN TROKŠŅU SAMAZINĀŠANA

Trokšņu samazināšanas pasākumus var iedalīt trīs daļās: trokšņu avotu redukcija - pasākumi, lai samazinātu trokšņu avota starojuma līmeņus; trokšņu samazināšana izplatīšanās vidē - trokšņu avotu atdalīšana no uztvērēja, izmantojot speciālas konstrukcijas, piemēram, trokšņu slāpējošas barjeras; trokšņa uztvērējzonas uzlabošana - galvenokārt, ēku izolācija.

Attēlā 6.1. ir parādīta shematiskā ripošanas trokšņa modeļa diagramma un trokšņa iespējamie samazināšanas veidi [16]. Ripošanas troksnis ir nozīmīgākais trokšņa avots Latvijas dzelzceļā.



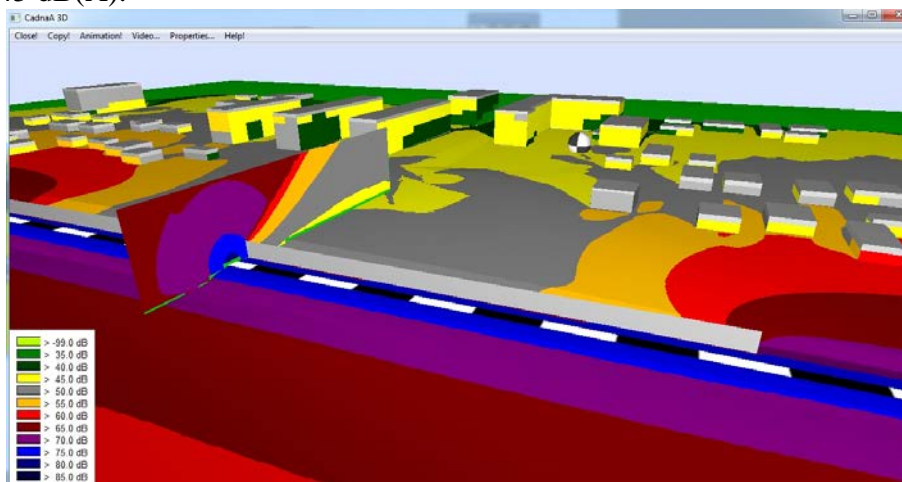
6.1. att. Ripošanas trokšņa modelis un iespējamie tā samazināšanas veidi

Dažādi dzelzceļa trokšņa samazināšanas līdzekļi un to akustiskie efekti ir apkopoti 6.1. tabulā. Šajā tabulā ir apskatāmas arī Eiropas tirgus vidējās izmaksas. [22]

Tirgū tiek piedāvāts liels klāsts trokšņa avotu redukcijas un mazināšanas pasākumu. Lai arī trokšņa barjeru cenas ir samērā augstas, tā joprojām ir vispopulārākā un universālākā lokāla dzelzceļa līnijas trokšņu avota mazināšanas metode. Apskatīsim tuvāk trokšņu barjeru plānošanas piemērus, ko autors ir izstrādājis Pļaviņu ģimnāzijai.

Pēc korektas trokšņu kartes izveides, 5.4. att., tika konstatēta trokšņa robežlieluma pārsniegšana par 2dB(A) pie visvairāk trokšņa iedarbībai pakļautās ģimnāzijas fasādes un tika izstrādātas rekomendācijas preventīvo trokšņa samazināšanas pasākumu īstenošanai dzelzceļa līnijas rekonstrukcijas laikā. Ar modelēšanas palīdzību tika novērtēts iespējamais akustiskais efekts, izvietojot trokšņa barjeras 3 m attālumā no sliežu ceļa un paralēli tam. Modelēšanas rezultāti parādīja, ka 200 m gara trokšņa barjera ar augstumu 2 m, 3 m un 4 m samazina trokšņa līmeni uz ģimnāzijas fasādes attiecīgi par 5 dB(A), 6 dB(A) un 7 dB(A). Attēlā 6.2. ir parādīts piemērs ar 4 m augsto barjeru.

Dažādas krāsas trokšņu kartē apzīmē dažādus trokšņu līmeņus ar starpību 5 dB(A). Zilā krāsā apzīmē trokšņu līmeni virs 75 dB(A); violetā - virs 70 dB(A); tumši sarkanā - virs 65 dB(A); sarkanā - virs 60 dB(A); tumši dzeltenā - virs 55 dB(A); pelēkā - virs 50 dB(A) un dzeltenā - virs 45 dB(A).



6.2. att. Trokšņa samazināšana ar 4 m augstu un 200 m garu trokšņa barjeru

Šajā konkrētajā gadījumā pilnīgi pietiktu ar trokšņa līmeņu samazināšanu par 5 dB(A), kas nozīmētu 2 m augstu trokšņa barjeru izmantošanu. Zemās barjeras ir daudz lētākas, turklāt šīs barjeras vizuāli ir pievilcīgākas. Tomēr, ir svarīgi ņemt vērā, ka zema barjera būs mazāk efektīva trokšņa samazināšanai no otrās dzelzceļa līnijas, kas būs tālāk no barjeras. Ņemot vērā sliežu avota redukcijas pasākumu efektivitāti, kas apskatāma 6.1. tabulā, labākā izmaksas/efektivitātes attiecība, iespējams, būtu sasniegta tieši 2 m augstās barjeras un dzelzceļa sliedēm piemērotu demferu gadījumā.

6.1. tabula

Dzelzceļa trokšņa samazināšanas līdzekļu akustiskie efekti un to izmaksas

Līdzeklis	Ietekmētais avots	Efekts	Izmaksas
K – kluči	Ripošanas troksnis	līdz 10 dB(A)	4000-1000 Euro par vagonu
LL - kluči	Ripošanas troksnis	līdz 10 dB(A)	500-2000 Euro par vagonu
Sliežu slīpēšana	Ripošanas troksnis	līdz 20 dB(A)	Ir jāveic parastas ekspluatācijas laikā
Akustiskā sliežu slīpēšana	Ripošanas troksnis	1-4 dB(A) atkarībā no vietējām riteņu un sliežu nelīdzenumu vērtībām	
Disku bremzes	Ripošanas troksnis	līdz 10 dB(A)	Ir lielākai pasažieru vilcienu daļai
Riteņu demferi	Riteņu troksnis	2-7 dB(A)	3000-8000 Euro par riteņiem
Sliežu ceļu nomales barjeras un vilcienu sānu svārkī	Riteņu troksnis	8-10 dB(A)	
Sliežu demferi	Sliežu troksnis	3-7 dB(A)	300-400 Euro par metru
Sliežu starplikas	Sliežu troksnis	3-4 dB(A)	
Spiediena trokšņa samazināšana	Spiediena troksnis	līdz 20 dB(A)	
Pantogrāfu ekrānēšana	Aerodinamiskais troksnis	5-10 dB(A)	
2 m augstas barjeras	Visi avoti	10 dB(A)	1000 Euro par metru
3-4 m augstas barjeras	Visi avoti	15 dB(A)	1350-1700 Euro par metru
Izolētie logi	Visi avoti	10-30 dB(A)	

Liela mēroga projektiem, tādiem kā veselas dzelzceļa līnijas trokšņu mazināšanai labākais variants gan izmaksu ziņā, gan efektivitātes ziņā ir panākams, reducējot trokšņu avotu. Pēc ES rekomendācijām ripošanas trokšņa samazināšanai par vispiemērotāko gan pasažieru, gan kravas vilcieniem tiek piedāvāta bremžu kluču nomaiņa pret jauna tipa kompozītmateriālu bremžu klučiem. Kompozītmateriālu bremžu kluči nodrošina labāku bremzēšanu, samazina bremzēšanas troksni, bet, pats galvenais - riteņu ritošo virsmu saglabā gludu. ES pašreiz tiek aktīvi apspriestas iespējas rast finansējumu bremžu sistēmas modernizācijai Eiropas dzelzceļiem. Latvijas dzelzceļam situācija ir sarežģītāka, jo apmēram 60% Latvijas dzelzceļa satiksmes sastāv no kravas vilcieniem, kas nāk no kaimiņvalstīm Krievijas un Baltkrievijas, kas savukārt nav ES dalībvalstis. Šī iemesla dēļ Latvijas dzelzceļa modernizācija ir sarežģīts politisks jautājums. Taču, Latvija var sekot citu Eiropas dzelzceļa operatoru piemēram un paaugstināt dzelzceļa līniju izmantošanas izmaksas ārvalstu vilcieniem, kas rada paaugstinātus trokšņa līmeņus. Latvijas dzelzceļa elektrisko vilcienu bremžu sistēmas modernizācija būtu ļoti efektīva attiecībā uz ripošanas un bremzēšanas trokšņa samazināšanu.

Sliežu ceļa komponenta avota redukcija kopā ar trokšņa barjerām ir daudzsolšs risinājums Latvijas dzelzceļa līnijās radīto trokšņu samazināšanai. Jāuzrauga akustiskais efekts pēc sliežu ceļa atjaunošanas, izmantojot sliežu slīpēšanu, kā arī paliekoši sliežu savienojumi ir jāsametina vai jānomaina pret akustiski uzlabotiem.

7. LIKUMDOŠANAS UN NORMATĪVU BĀZES PILNVEIDOŠANAS IESPĒJAS AKUSTISKĀS EKOLOĢIJAS JOMĀ

Uzreiz pēc TSI 2011 [28] apstiprināšanas 2011. gada beigās, Eiropas transporta un vides federācija, ņemot vērā WHO (Pasaules Veselības Organizācija) rekomendācijas un dažādu dzelzceļa trokšņa samazināšanas projektu sasniegumus, piedāvāja pārskatīt TSI 2011 rekomendācijas. [21]

Tiks pārskatīti šādi pamataspekti: trokšņa robežlielumu samazināšana; infrastruktūras iekļaušana trokšņa regulās; transportlīdzekļu apkalpošanas un uzturēšanas prasību iekļaušana; TSI novērtējums par trokšņu izmaksām un ieguvumiem; nepārtrauktas robežlīnijas izmantošana kravas vagoniem (pašlaik soļu funkcija); papildus trokšņu avotu un tipu iekļaušana, piemēram, bremzēšanas un pagriezienu spiedzienu troksnis.

Visi šie aspekti ir svarīgi dzelzceļa trokšņa samazināšanai, bet Latvijas Republikas Satiksmes ministrijai ir savi plusi un mīnusi. No vienas puses, dzelzceļa trokšņa robežlielumu samazināšana rastu iespēju pieprasīt ES finansiālo atbalstu dzelzceļa infrastruktūras modernizācijai, kas ir ļoti pozitīvi. No otras puses, gadījumā, ja ES finansējums nebūs pieejams, Satiksmes ministrijai būs jāmeklē iekšējais finansējums TSI īstenošanai. Ņemot vērā pašreizējo Latvijas dzelzceļa infrastruktūras stāvokli, tas šķiet neiespējami. Lai izvairītos no potenciālām likumdošanas problēmām nākotnē, iespējams Latvijai (un citām Baltijas valstīm) vissaprātīgākais risinājums būtu ieviest īpašus nosacījumus TSI, kas būtu balstīti uz eksperimentāli iegūtās informācijas par pašreizējo akustisko situāciju. Var tikt izmantoti arī promocijas darbā iegūtie dati.

Autors ierosina Satiksmes ministrijai kopā ar Latvijas dzelzceļu, balstoties uz promocijas darbā iegūtajiem rezultātiem, iniciēt projektu oficiālai ES pagaidu dzelzceļa trokšņa modelēšanas metodes pilnveidošanai, ņemot vērā Latvijas dzelzceļa apstākļus.

Viens no iespējamajiem variantiem līdzekļu piesaistīšanai pētniecībai un attīstībai būtu izmantot Eiropas operatoru pieredzi - ieviest papildus maksu atkarībā no ritošā sastāva trokšņa starojuma līmeņa, bet jāatzīmē, ka tas ir ļoti sarežģīts politisks jautājums.

Daži svarīgi aspekti ir saistīti ar Latvijas Ministru Kabineta apstiprinātajiem noteikumiem Nr. 597 [23]. Tajos ir noteikts, ka trokšņa robežlielumi 5.1. tabulā ir uzskatāmi

par mērķlielumiem tām teritoriju daļām, kas atrodas tuvāk par 30 m no stacionāriem trokšņa avotiem. Autors uzskata, ka tas būtu attiecināms arī uz dzelzceļu, to apvienojot ar dzelzceļa atsvešināšanas zonu kā avotu.

Autors ir pārliecināts, ka nebūtu korekti izmantot tikai 4 m augstumu stratēģiskas trokšņa kartes sagatavošanai. Cilvēkus, kas pārvietojas intereses zonā, var uzskatīt par uztveres punktiem apmēram 1.5 m līdz 2 m augstumā no zemes. Trokšņu līmeņu atšķirības starp 1.5 līdz 2 m un 4 m augstumā var ietekmēt zonai apkārt esošais žogs. Ekvivalenta situācija ir vienstāvu ēkās, kur uztveres punkts (cilvēks) tieši tāpat atrodas 1.5 līdz 2 m augstumā. Balstoties uz augstākminēto, autors rekomendē atklātās teritorijās un dzīvojamajos rajonos, kuros ir vienstāvu mājas, trokšņu līmeni novērtēt 1.5 līdz 2 m augstumā.

Vilciena iekšējais troksnis un tā ietekme uz dzelzceļa darbiniekiem ir svarīga problēma, kas šajā darbā nav apskatīta. Ņemot vērā iegūtos vilcienu garāmbraukšanas trokšņa mērījumu rezultātus, ir pamats sagaidīt, ka vilcienu pasažieri cieš no paaugstināta trokšņa līmeņa brauciena laikā. Daudzi dzelzceļa darbinieki strādā vilcienos vai pie dzelzceļa līnijām, līdz ar to ir pakļauti paaugstināta trokšņa ietekmei lielāko darba maiņas daļu.

Visi pastāvošie standarti apskata A- izsvaroto trokšņa līmeni. Autors piekrīt daudziem zinātniekiem, ka šis uzskats ir aplams. Tika zinātniski pierādīts, ka skaņa ietekmē cilvēka organismu, pat ja tā ir ārpus dzirdamības diapazona. Ja A-izsvarotā funkcija nav piemērojama vilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektra mērījumiem, trokšņu līmeņi zemās frekvencēs var būt vienādi vai pat augstāki nekā skaņas diapazonā.

Katra cilvēka organisms no akustiskā viedokļa ir ārkārtīgi sarežģīta un specifiska oscilējošā sistēma ar atsevišķiem elementiem (orgāniem). Daudziem elementiem ir raksturīgas kompleksās svārstībās plašā frekvenču diapazonā, no infraskaņas līdz ultraskaņai. Cilvēku pakļaujot dažādu skaņas viļņu vai vibrāciju ietekmei, dažādās organisma daļās var parādīties rezonanses efekti. Šāda veida rezonanse var izraisīt gan pozitīvu, gan negatīvu ietekmi uz cilvēka veselību un labsajūtu.

Tāpēc ir svarīgi pievērst uzmanību infraskaņai, kas bieži nav sadzirdama, bet tā izplatās tālās distancēs ar ļoti zemu vājinājumu un var traucēt iedzīvotājus, īpaši nakts laikā.

Vēl viena svarīga problēma, kas pašreiz nav regulēta, ir „kairinājums”, ko rada garāmbraucošie vilcieni. Dažu pētījumu rezultāti liecina, ka miega laikā radītā „kairinājuma” reižu skaits, iespējams, ir nozīmīgāks nekā pakļaušanās paaugstinātam ekvivalentā trokšņa līmenim. Iedomājieties, ka garš kravas vilciens pabrauc garām vienreiz naktī, cilvēks pamostas pieaugošā trokšņu līmeņa dēļ, savukārt, ja vilciens ir sadalīts trīs daļās, ekvivalentais trokšņa līmenis nemainīsies, bet cilvēks, visticamāk pamodīsies trīs reizes nakts laikā.

SLĒDZIENS

Promocijas darbs ir veltīts dzelzceļa transporta trokšņa spektru modelēšanai un eksperimentāliem pētījumiem.

1. Dzelzceļa trokšņa avotu analīze parādīja, ka dominējošie trokšņa avotu tipi ātrumos līdz apmēram 250 km/st ir vilkmes un ripošanas troksnis. Ripošanas trokšņa līmeņus tieši ietekmē sliežu un riteņu ripošanas virsmas nelīdzenumu vērtības, kas tika pierādīts ar mērījumu rezultātiem.

Uz moderno dzelzceļa trokšņa modelēšanas metožu analīzes rezultātu pamata, ka arī ņemot vērā Eiropas Komisijas rekomendācijas, promocijas darbā detalizētai izpētei tika izvēlēta Nīderlandes modelēšanas metode RMR.

2. Latvijas vilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektru eksperimentālo pētījumu rezultāti parādīja:

- Relatīvi augstus trokšņa līmeņus visās oktāvu joslās visiem vilcienu tipiem. Tika noteikts visiem vilcienu tipiem vienots maksimums trokšņa spektros 1 kHz oktāvu joslā. Kravas vilcieniem ir arī otrs maksimums 2 kHz oktāvu joslā. Maksimumi, acīmredzot, ir saistīti ar sliežu ceļa starojumu.
- Pasažieru dīzeļvilcieni izstaro zemo frekvenču vilkmes troksni ar ievērojami augstākiem līmeņiem vilcienu pārvietošanās ātrumos, kas ir tuvi maksimālajam. Pie zemākiem ātrumiem dominējošais avots lokomotīvēm oktāvu joslās līdz 500 Hz ir vilkmes troksnis. Kravas vilcienu lokomotīvēm 63 Hz oktāvu joslā ir konstatēts ievērojams vilkmes trokšņa līmenis.
- Latvijas dzelzceļā visu vilcienu tipu summārie ekvivalenti A-izsvartie garāmbraukšanas trokšņa līmeņi neatbilst TSI prasībām. Latvijas dzelzceļam šis fakts ir jāņem vērā, lai sagatavotu ieteikumus īpašu nosacījumu ieviešanai 2013. gadā, kad plānots pārskatīt TSI.
- Pasažieru dīzeļvilcienu ar disku bremsēm trokšņa līmeņi uz relatīvi līdzena sliežu ceļa, pateicoties gludākai riteņu ripošanas virsmai, ir apmēram par 5 dB(A) zemāki nekā elektrovilciena ripošanas trokšņu līmeņi. Vislielāko ripošanas troksni rada kravas vilcieni.
- Latvijas dzelzceļā izmantotā kravas ritošā sastāva gadījumā ir svarīgi sadalīt kravas vilcienus apakškategorijās pēc trokšņa starojuma. Kravas ritošajā sastāvā, kurā ietilpst tikai vagoni, konstatēti ievērojami zemāki garāmbraukšanas trokšņa līmeņi, salīdzinot ar citiem kravas ritošā sastāva tipiem. Lai panāktu dzelzceļa līnijas trokšņa starojuma samazināšanu, vissvarīgākais ir samazināt kravas vilcienu starojumu.
- Ātrumam palielinoties par 40 km/st, garāmbraukšanas trokšņa līmeņi paaugstinās aptuveni par 5.5 dB(A) elektrovilcieniem; par 7 dB(A) pasažieru dīzeļvilcieniem un tikai par 2.5 dB(A) jaukto kravas vilcienu gadījumā. Tāpēc kravas vilcieniem kustības ātruma samazināšana ar nolūku samazināt ripošanas troksni ir mazāk efektīva.
- Summārais garāmbraukšanas trokšņa līmenis var paaugstināties par 10-12 dB(A) sliežu savienojumu vietās ar 15-20 mm platu spraugu. Tā kā trokšņa līmeņi paaugstinās visās oktāvu joslās, sliežu savienojumu vietās triecientroksnis visbiežāk būs dominējošais avots.
- Latvijas elektrovilcieniem bremsēšanas spiedziņa troksnis parādās augstākās frekvencēs nekā citu Eiropas valstu vilcieniem. Bremsēšanas spiedziens var paaugstināt summāro trokšņa līmeni par apmēram 10 dB(A). Bremsēšanas spiedziņa troksnis ir izteikti tonāls un ir kairinošs gan vilciena pasažieriem, gan cilvēkiem ārpus vilciena. Tomēr, sākot bremsēt vilcienu laicīgi ar zemu bremsēšanas spēku, ir iespējams apturēt vilcienu bez manāma trokšņa līmeņu pieauguma.

- Sliktas kvalitātes sliežu atjaunošana, izmantojot slīpēšanu, var ievērojami paaugstināt visu vilcienu tipu garāmbraukšanas trokšņa līmeņus visās oktāvu joslās un visos ātrumos. Latvijas dzelzceļš izmantoja izpētes rezultātus, lai pieprasītu bezmaksas atkārtotu sliežu atjaunošanu. Sliežu slīpēšanas kvalitāti var uzlabot, palielinot slīpēšanas reižu skaitu un samazinot slīpēšanas ātrumu, vismaz pēdējai reizei.

3. Salīdzinošā mērījumu un modelēšanas rezultātu analīze parādīja, ka izmērītie Latvijas vilcienu garāmbraukšanas trokšņu līmeņi vidējos sliežu ceļa apstākļos ir ievērojami augstāki visās oktāvu joslās nekā tie, kas modelēti, izmantojot ES ieteikto metodi. Summāro līmeņu starpība ir apmēram 10 dB(A) elektrovilcieniem un pasažieru dīzeļvilcieniem un līdz 20 dB(A) kravu vilcieniem. Tādējādi tika pierādīts, ka ES ieteiktā dzelzceļa trokšņa modelēšanas metode ir jāpilnveido pirms tās izmantošanas Latvijas dzelzceļa apstākļos.

4. Algoritms vilcienu garāmbraukšanas trokšņa spektru aprēķināšanai atskaites uztveršanas punktā tika izstrādāts un programmatūrā realizēts (TNS). Balstoties uz eksperimentālo pētījumu rezultātiem un izmantojot TNS, pieci jauni Latvijas vilcienu tipi tika definēti modelēšanai pēc RMR metodes Latvijas dzelzceļam vidējos sliežu ceļa apstākļos. Trokšņa kartēšanas rezultātu precizitātes līmenis ir ievērojami uzlabots, pielietojot TNS un definētus vilciena tipus.

Autors ierosina Satiksmes ministrijai kopā ar Latvijas dzelzceļu, balstoties uz promocijas darbā iegūtajiem rezultātiem, iniciēt projektu oficiālai ES pagaidu dzelzceļa trokšņa modelēšanas metodes pilnveidošanai Latvijas dzelzceļa apstākļiem.

5. Trokšņa avotu redukcijas un trokšņa samazināšanas iespēju analīze Latvijas dzelzceļā parādīja, ka Latvijas dzelzceļam ir sarežģīta situācija, jo apmēram 60% Latvijas dzelzceļa satiksmes sastāv no kravu vilcieniem, kas nāk no kaimiņvalstīm Krievijas un Baltkrievijas, kas savukārt nav ES dalībvalstis. Šī iemesla dēļ Latvijas dzelzceļa modernizācija ir sarežģīts politisks jautājums. Taču Latvija var sekot citu Eiropas dzelzceļa operatoru piemēram un paaugstināt dzelzceļa līniju izmantošanas izmaksas ārvalstu vilcieniem, kas rada paaugstinātus trokšņa līmeņus. Latvijas dzelzceļa elektrisko vilcienu bremžu sistēmas modernizācija būtu ļoti efektīva attiecībā uz ripošanas un bremzēšanas trokšņa samazināšanu.

Sliežu ceļa komponenta avota redukcija kopā ar trokšņa barjerām ir daudzsolīgs risinājums Latvijas dzelzceļa līnijās radīto trokšņu samazināšanai. Jāuzrauga akustiskais efekts pēc sliežu ceļa atjaunošanas, izmantojot sliežu slīpēšanu, kā arī paliekoši sliežu savienojumi ir jāsametina vai jānomaina pret akustiski uzlabotiem.

Turpmākais darbs

Nākamie pētījumi ietvers detalizētāku vilkmes, triecientrokšņa un līkumošanas spiedzienu trokšņa izpēti. Ir plānots izstrādāt automātisku daudzkanālu trokšņa monitoringa sistēmu, ņemot vērā specifiskās prasības dzelzceļa trokšņa mērījumiem.

Tiek īstenots Latvijas dzelzceļa pasūtīts projekts par oficiāla trokšņa samazināšanas rīcības plāna novērtēšanai un uzlabota plāna izstrādei 2012. gadā.

Tika apstiprināts un pašlaik tiek uzsākts 2011. gadā LDz, RTU DzTI un privāta Latvijas uzņēmuma Composite Constructions sagatavots projekts LIFE11 ENV/LV/376 ISRN „Inovatīvi risinājumi dzelzceļa trokšņa pārvaldīšanai” Eiropas "LIFE +" finansējuma programmas ietvaros. Projekts būs uzsākto pētījumu turpinājums un ir veltīts padziļinātai dzelzceļa trokšņa izpētei Latvijas dzelzceļā; ES rekomendētās dzelzceļa trokšņa modelēšanas metodes pilnveidošanai Latvijas dzelzceļa apstākļiem, jauna tipa trokšņa barjeru izstrādei un sliežu ceļa komponenta avota reducēšanai. Projektam ir ne tikai zinātniski praktiska, bet arī ekonomiska nozīme, jo visi trokšņa avotu redukcijas un trokšņa samazināšanas līdzekļi tiks ražoti Latvijā un vēlāk būs pieejami gan iekšējā tirgū, gan eksportam.

IZMANTOTĀS LITERATŪRAS SARAKSTS

1. Baranovskii A. Adaptation of RMR noise propagation prediction method for Latvian railway conditions // Proceedings of the 7th International Scientific Conference TRANSBALTICA 2011, Lithuania, Vilnius, May 05-06, 2011. – 11-15 pp.
2. Baranovskii A. Application of RMR method for noise prediction on Latvian railway // Proceedings of the International Scientific Conference Signal and Image Processing and Applications (SIPA 2011), Greece, Hersonissos, June 22-24, 2011. - 33–38 pp.
3. Baranovskii A. Comparison of five national noise emission calculation methods for rail traffic // Proceedings of the 5th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2010), Lithuania, Panevezys, May 03-04, 2012. – 7-12 pp.
4. Baranovskii A. Computer simulation and experimental investigations of noise levels and spectra for railway transport // Automatic control and computer sciences. – 2011. - Vol. 45, Nr. 5. – 293-300 pp.
5. Baranovskii A. Experimental investigation of railway noise and railway noise mapping in Latvia // Proceedings of the 19th International Congress on Sound and Vibration (ICSV'19), Lithuania, Vilnius, July 08-12, 2012. – 8 pp. (CD-ROM)
6. Baranovskii A. Railway noise abatement at Plavinas gymnasium // Scientific proceedings of RTU. Transport and engineering. Railway transport. – 2012. – Series 6, Vol. 34. – 3 pp. (accepted for publishing)
7. Baranovskii A. Railway noise in Latvia // Proceedings of the 7th International Scientific Conference Intelligent Technologies in Logistics and Mechatronics Systems (ITELMS'2012), Lithuania, Panevezys, May 03-04, 2012. – 33 – 37 pp.
8. Baranovskis A. Dzelzceļa ritošā sastāva trokšņa mērījumu rezultātu apstrādes un kartēšanas metodikas izstrāde un dzelzceļa darbinieku apmācība, projekta atskaite, LDz, Rīga, 2012.
9. Beek A., Beuving M., Dittrich M. and others. Rail sources, state of the art. Report on the task 1.2.1 of the Harmonoise Project, SNCF, France, 2002.
10. LDz, RTU IRT, Composite constructions. Innovative Solutions for Railway Noise Management, general description of LIFE11 ENV/LV/376 ISRN research project under Life+ 2011 program for Environment policy and governance, Riga, 2011.
11. Meehan P. A. Railway noise and control. The workbook for the course in engineering acoustics. – Queensland: The University of Queensland, 2006.
12. Noordhoek I.M., Salomons E.M. Choise of basic sound propagation models. Deliverable 14 of the Harmonoise project, TNO, Netherlands, 2002.
13. Nota R., Barelds R., Van Maercke D. Harmonoise WP 3 engineering method for road traffic and railway noise after validation and fine-tuning, DGMR, The Netherlands, 2005.
14. P. de Vos, M. Beuving, E. Verheijen. Harmonised accurate and reliable methods for the EU directive in the assessment and management of environmental noise. Deliverable 4 of the Harmonoise project, AEA Technology, Netherlands, 2005.
15. Salomons E.M., Heimann D. Description of the reference model. Deliverable 16 of the Harmonoise project, TNO, Netherlands, 2004.
16. Thompson D. Railway Noise and Vibration. – Oxford: Elsevier, 2009. – 518 pp.
17. Попов В., Балцкарс П., Барановский А., Ильина Л. Экспериментальные исследования уровней шума железнодорожного подвижного состава // RTU zinātniskie raksti. Mašīnzinātne un transports. Dzelzceļa transports. – 2008. – Sējums 6, Sērija 30. – 29-37 lpp.

18. Попов В., Балцкарс П., Барановский А. Математическая модель CRN шума железнодорожного подвижного состава // RTU zinātniskie raksti. Mašīnzinātne un transports. Dzelzceļa transports. – 2008. – Sējums 6, Sērija 30. – 21-29 lpp.
19. Попов В.И. Основы музыкальной акустики.- Рига: Издательство Рижского технического университета, 2010. - 427 с.
20. LVS EN ISO 3095:2005. Dzelzceļa aprīkojums. Akustika. Dzelzceļa ritošā sastāva radītā trokšņa mērīšana, Latvijas Valsts Standarts, 2005.
21. European Federation for Transport and Environment: Revision of EU rail noise standards (TSI 2011) / Internet. – www.transportenvironment.org
22. European parliament: Reducing railway noise / Internet.- <http://www.europarl.europa.eu/studies>
23. Latvijas Ministru kabinets: MK noteikumi Nr. 597. Trokšņa novērtēšanas un pārvaldības kārtība / Internet.- www.likumi.lv
24. Nederland Ministerie van Volkshuisvesting: Reken - en Meetvoorschrift Railverkeerslawaaai (1996) / Internet.- stillerverkeer.nl
25. Noise steering group: Adaptation and revision of the interim noise computation method for the purpose of strategic noise mapping / Internet.- circa.europa.eu
26. Noise steering group: Administrative arrangement between DG ENV and DG JRC on “Technical advice on the preparation of the common European assessment methods to be used by the EU Member States for strategic noise mapping after adoption as specified in the Directive 2002/49/EC” / Internet.- circa.europa.eu
27. Official journal of the European Union: Commission decision 2002/735/EC concerning the Technical specifications for interoperability (TSI) relating to the rolling stock subsystem of the trans-European high-speed rail system / Internet. – eur-lex.europa.eu
28. Official journal of the European Union: Commission decision 2011/229/EU concerning the Technical specifications for interoperability (TSI) relating to the rolling stock subsystem of the trans-European conventional rail system / Internet. – eur-lex.europa.eu
29. Official journal of the European Union: Position paper on the European strategies and priorities for railway noise abatement / Internet. – eur-lex.europa.eu