

VYUŽITIE AKUSTICKEJ KAMERY PRI ANALÝZE HLUKU KOĽAJOVÝCH VOZIDIEL

USE OF ACOUSTIC CAMERA IN ROLLING STOCK NOISE ANALYSIS

Peter ZVOLENSKÝ¹, Ján ĎUNGEL²

Abstrakt

Parametre hluku koľajových vozidiel sa jednoznačne podieľajú na ich kvalite a sú osobitne sledované na základe neustále sa sprísňujúcich limitov TSI alebo environmentálnych predpisov všeobecne. Fundamentom pre možnosti znižovania hluku vozidiel je podrobná analýza zdrojov a ciest šírenia hluku. Príspevok prezentuje cenné výsledky a nové poznatky z akustických experimentov pri prevádzke vlakov na ŽSR s využitím akustickej kamery.

Kľúčové slová

hluk koľajových vozidiel, akustická kamera

Abstract

The noise parameters of railway vehicles clearly contribute to their quality and are specifically monitored in accordance with the ever-tightening limits of TSIs or environmental regulation in general. The basis for the possibilities of reducing vehicle noise is a detailed analysis of noise sources and paths. The paper presents valuable results and new findings from acoustic experiments from the operation of trains at ŽSR using an acoustic camera.

Keywords

railway vehicles noise, acoustic camera

1 ÚVOD

Na znižovanie hluku v doprave je osobitne dôležité identifikovať čo najobjektívnejšie jeho zdroje. Na to je potrebné vykonať akustické merania, následne ich spracovať a zanalyzovať. Pri meraní môžeme v súčasnosti využívať celý rad zariadení ako sú napríklad zvukomery, analyzátory, akustické kamery, najrôznejšie softvéry technickej akustiky a môžeme samozrejme použiť hlavne kombináciu viacerých metód k vytváraniu k multilevel meracích systémov.

Zo zariadení, najrozšírenejšie je používanie zvukomerov. V súčasnosti moderné zvukomery ponúkajú množstvo funkcií ako napríklad meranie viacerých veličín hluku a vibrácií, FFT analýzu zvuku a vibrácií, analýzu hluku v reálnom čase v pásmach 1/1 a 1/3 oktávy a mnohé ďalšie. Tieto merania a analýzy je možné ďalej spracovávať pomocou rôznych softvérov, ktoré ponúkajú aj samotní výrobcovia zvukomerov. Zvukomer patrí jednoznačne medzi základné zariadenia, potrebné pre merania hluku a v súčasnosti so všetkými nástrojmi, ktoré ponúka, dokáže zásadne urýchliť a spresniť merania. Moderné zvukomery je možné pripraviť už pred samotným meraním, vytvorením

¹ **prof. Ing. Peter Zvolenský, CSc.**, Žilinská univerzita v Žiline, Strojnícka fakulta. Katedra dopravnej a manipulačnej techniky, Univerzitná 8215/1, 010 26 Žilina, SR. Tel.: +421 41 513 2559, e-mail: peter.zvolensky@fstroj.uniza.sk

² **Ing. Ján Ďungel, PhD.**, Asseco CEIT, a. s., Oddelenie AVES. Univerzitná 8661/6A, 010 08 Žilina, SR. Tel.: +421 41 513 7463, e-mail: jan.dungel@asseco-ceit.com

rôznych tzv. meracích šablón na základe požiadaviek a podmienok merania, čo zároveň aj uľahčuje a významne precizuje samotné merania.

Medzi ďalšie účinné nástroje pri identifikácii údajov a najmä zdrojov vyžarovania hluku patrí akustická kamera. Akustická kamera je zariadenie, ktoré umožňuje vizualizáciu hluku. Farebné polia na čiernobielych akustických snímkach znázorňujú zdroje hluku. Akustická kamera je vybavená objektívom, ktorý zaznamenáva obraz, a sieťou smerových mikrofónov, ktoré zaznamenávajú zvuk. Pomocou rôznych algoritmov potom kamera dokáže vypočítať a zobrazíť hlukové polia. Pri meraní je možné pomocou softvéru ďalej odfiltrovať nežiaduce frekvencie a tak sa zamerať na podrobnú špecifikáciu sledovaného zdroja hluku. Týmto spôsobom môžeme identifikovať rôzne zdroje zvuku a dokonca je možné takto odhaliť aj netesnosti vo vysokotlakových systémoch prípadne poruchy ložísk alebo motorov. Akustická kamera tak nie je limitovaná len na odhaľovanie zdrojov hluku, ale aj pri identifikácii technického stavu objektu pri údržbe strojov a zariadení.

Akustické kamery môžeme rozdeliť do dvoch skupín – analógové akustické kamery a digitálne akustické kamery. Obidva typy kamier majú svoje výhody a oblasti použitia.

Analógové akustické kamery dokážu lepšie diagnostikovať nízke frekvencie, sú však spravidla väčšie a potrebujú aj viac príslušenstva ako napríklad rôzne analógovo-digitálne prevodníky, elektronické karty, softvéry, aby bolo možné namerané dáta preniesť do počítača a následne s nimi pracovať. Akustické kamery pomerne často umožňujú (v závislosti od použitého softvéru) aj offline analýzu, kedy je možné hľadať jednotlivé zdroje a cesty šírenia hluku v konkrétnych vzdialenostiach.

Digitálne akustické kamery sú spravidla menšie a nevyžadujú žiadne dodatočné príslušenstvo na ich obsluhu. To znamená, že je jednoduchšie ich použitie v teréne. Tieto kamery je preto možné relatívne rýchlo a jednoducho nastaviť na požadované podmienky merania.

V rámci riešenia aplikovaného výskumu sme predpokladali ciele využívanie akustickej kamery, ktorá predstavuje v súčasnosti jeden z najdokonalejších nástrojov identifikácie hluku a ciest jeho šírenia.

Medzi ďalšie zariadenia, ktoré je možné použiť pri znižovaní hluku v doprave sú rôzne skenery hluku, ktoré dokážu odfiltrovať a zosilniť požadované frekvencie.

2 ALGORITMY AKUSTICKEJ KAMERY

Akustická kamera na dopyčovanie zvukových polí využíva rôzne algoritmy. V závislosti od požiadaviek merania je možné vybrať z množstva rôznych algoritmov podľa toho či vykonávame online analýzu alebo offline analýzu. Jednotlivé algoritmy sa líšia od seba citlivosťou a hustotou vytváraných zvukových polí a vhodnosťou usporiadania mikrofónového poľa.

2.1 Beamforming

Algoritmus Beamforming je možné používať pri online aj offline analýze. Týmto algoritmom je možné určovať v podstate akékoľvek zdroje hluku, ale jeho nevýhoda spočíva v tom, že ak sa nachádza viacero zdrojov hluku vo vzájomnej blízkosti tak beamforming ich nedokáže spoľahlivo rozlíšiť. Silnou stránkou tohto algoritmu je že dokáže rýchlo zobrazíť hlukové polia, preto sa najčastejšie používa v online analýze [4].

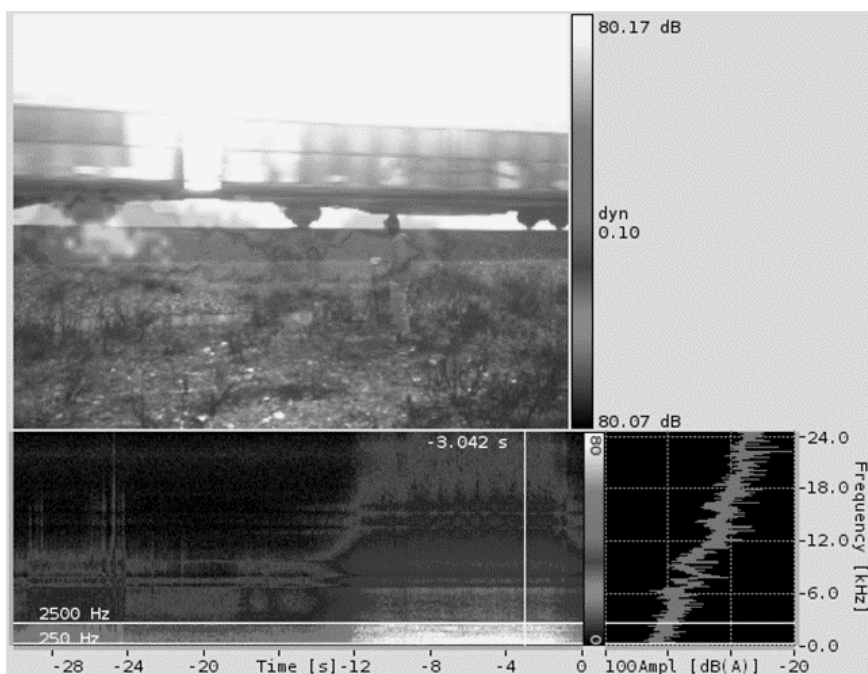
Akustická kamera SoundCam je prvá akustická kamera na trhu, určená na používanie „do ruky“, čo zaručuje veľmi jednoduché používanie v teréne. Rovnako táto kamera obsahuje širokú paletu nastavení, ktoré je možné prispôbovať požiadavkám merania.

V nasledujúcich častiach príspevku budú prezentované niektoré výsledky akustických meraní priamo v prevádzke na ŽSR, ktoré dokladujú experimentálne možnosti a systémovosť vyhodnotenia parametrov hluku koľajových vozidiel s využitím akustickej kamery. Základom presnosti a objektívnosti meraní je správne zvolenie meracích miest a metód meraní podľa požadovanej legislatívy a samozrejme navolenie okrajových podmienok činnosti a požadovaných funkcií

používanej akustickej kamery. V prípade týchto prezentovaných výsledkov sme používali digitálnu akustickú kameru SoundCam.

Pre vhodné nastavenie funkcií kamery sa často musíme oprieť už o vykonanú frekvenčnú analýzu daného zdroja hluku, a to hlavne preto, aby sme napr. pri prejazde vlakov identifikovali dominantný zdroj hluku. Pre zvolený príklad bola kamera nastavená na rozsah frekvencií 250 až 2500 Hz. Zo záznamov akustickej kamery bolo možné určiť aj okamžitú rýchlosť vlakov, ktorá výrazne ovplyvňuje vyžarovaný celkový hluk.

Výstupom z akustickej kamery je čiernobiely záznam prejazdu vlaku s farebnými hlukovými poľami (obr. 1), ktoré sú zobrazované v reálnom čase tak, ako sa hluk šíri od svojho zdroja. Hluk, ktorý zobrazovaný týmito farebnými hlukovými poľami je ohraničený nastavenou frekvenciou. Tým sa docieli, že na zázname je len dominantný hluk šíriaci sa od zdroja a nie všetky odrazy a iné zvuky ktoré nie sú dominantné.



Obr. 1 Záznam hluku prejazdu nákladného vlaku

Ďalej je výstupom zo záznamu akustickej kamery spektrogram, na ktorom je možné vidieť frekvencie zvuku s danými hladinami. Na spektrografe sú znázornené všetky frekvencie, ktoré dokáže kamera zachytiť, avšak nastavený interval preferovaných frekvencií je zvýraznený. Pri prejazde vlaku je ďalej možné vidieť jednotlivé vagóny a aj ich dosahované frekvencie hluku.

Meraniami bolo prirodzene preukázané, že zdroj dominantného hluku závisí od rýchlosti koľajového vozidla, druh koľajového vozidla – hnacie alebo hnané dráhové vozidlo a akým druhom pohonu disponuje. Pri väčšine osobných vlakov pri rýchlostiach s rozsahom 60 km.h⁻¹ až 100 km.h⁻¹ boli dominantným zdrojom hluku podvozky.

Na obr. 2 je zobrazený prejazd rýchlika rýchlosťou 100 km.h⁻¹. Tento vlak bol ťahaný lokomotívou Siemens Vectron a tvorilo ho ďalších 13 vozňov (Ampeer, ARpeer, Bdghmeer, Bpeer, 3x Bmpeer, 3x Bmz a 3x Bmeer). Pre lokomotívu a príslušné vozne je rovnako možné určiť a uchovať tiež exponované spektrografy. prejazdu vlaku. Pri prejazde vlaku bolo nameraná ekvivalentná hladina hluku na úrovni 84,6 dB(A). Peaková hodnota hluku dosahovala 109,8 dB(A).



Obr. 2 Prejazd osobného vlaku rýchlosťou 100 km.h-1

Akustická diagnostika technického stavu koľajových vozidiel je pomerne jednoduchá metóda, ktorú je možné použiť na odhalenie prípadných porúch na zariadeniach ktoré vykonávajú rotačný pohyb ako sú motory, kolesá, prevodovky, hriadele, ventilátory, kompresory a podobne. V prípade možnej poruchy na takomto zariadení je sprievodným príznakom prítomnosť dominantnej frekvencie, ktorá nebola prítomná na novom zariadení, prípadne pri poslednom meraní.

Výhodou tejto metódy diagnostikovania technického stavu je, že je bezdemonťážna a je možné detegovať širokú škálu parametrov základných rotujúcich komponentov. Medzi vybavenie potrebné na vykonanie akustickej diagnostiky koľajových vozňov patrí jednoznačne zvukomer s viacerými vstupmi (aby bolo možné si jednotlivé údaje medzi sebou porovnať, prípadne štatisticky vyhodnotiť). Na prípadnú lokalizáciu konkrétneho zdroja je výhodné použiť akustickú kameru so správnym nastavením frekvenčného rozsahu, ktorá pomerne podrobne vizualizuje, kde sa konkrétny zdroj nachádza.

Na diagnostikovanie porúch na kolesách a ďalšom pohonnom ústrojenstve je potrebný prejazd koľajového vozidla okolo zvukomeru alebo akustickej kamery. V prípade, že je cieľom skontrolovať alebo diagnostikovať poruchu na príslušenstve ako kompresory, ventilátory a podobne postačuje meranie aj na stojacom vozidle.

V železničnej doprave sa kladie dôraz na znižovanie hluku železničných vozidiel. Okrem samotných železničných vozidiel majú na hluk vplyv aj parametre trate, ako sú typy podvalov spôsob upevnenia koľajnice, ktorých zmena môže mať za následok veľký vplyv na hlučnosť prevádzky železničného vozidla. Výsledky experimentálneho merania boli realizované na koridorovej trati na kalibračnom úseku kde boli splnené podmienky podľa EN ISO 3095.

V prípade samotných železničných vozidiel existuje niekoľko zdrojov hluku - hluk valenia kolesa po koľajnici, vibrácie konštrukcie vozidla, hluk trakčných a prídavných agregátov, hluk z brzdenia, aerodynamický hluk. Najväčší vplyv na celkovú hlučnosť železničného vozidla tvorí hluk valenia, vzniká pri každom konvenčnom druhu vlaku. Zvýšenú hladinu hluku valenia vytvárajú často železničné vozidlá s nedostatočnou údržbou a z toho vyplývajúcim horším skutočným technickým stavom najmä pojazdu koľajových vozidiel. Dôvodov môže byť niekoľko, napríklad prebrzdené dvojkoľesia, poškodené plochy dvojkoľesí alebo tiež vysoký kilometrický priebeh vozidla.

3 DIAGNOSTIKOVANIE STAVU VOZŇOV

Meranie bolo vypracované na základe normy ČSN EN ISO 3095:2013 Železničná aplikácia – Akustika – Meranie hluku vyžarovaného koľajovými vozidlami“. Meracie miesta M1-M3 boli rozmiestnené rovnomerne vedľa trate vo výške 1,2 m nad temenom koľajnice a 7,5 m od osí koľaje. Na meranie bolo použité meracie zariadenie B&K Pulse 3560B, digitálna akustická kamera Soundcam a zvukomer B&K 2250. Meranie sa vykonávalo na vybranom úseku koridorovej trati. Limitná hodnota TSI pre vonkajší hluk pri 160 km/h je ekvivalentná hladina hluku 79 dB(A).



Obr. 3 Príprava meracieho miesta pri železničnej trati

Tab. 1 Namerané hodnoty LAeq vozňov rýchliku č.1

Typ vozňa	M1	M2	M3	Priemerná hodnota	Limit hluku TSI
Typ1	83,8	83,0	83,3	83,4	Nespĺňa
Typ1	78,9	78,5	78,6	78,6	Spĺňa
Typ2	79,8	79,8	79,5	79,7	Nespĺňa
Typ2	81,3	81,4	80,9	81,2	Nespĺňa
Typ2	78,2	77,8	77,7	77,9	Spĺňa
Typ4	78,0	77,7	77,8	77,8	Spĺňa
Typ5	79,3	79,4	79,2	79,3	Spĺňa

Tab. 2 Namerané hodnoty LAeq vozňov rýchliku č.2

Typ vozňa	M1	M2	M3	Priemerná hodnota	Limit hluku TSI
Typ1	83,5	83,3	83,6	83,4	Nespĺňa
Typ1	83,0	83,2	82,9	83,0	Nespĺňa
Typ1	86,5	85,8	85,5	85,9	Nespĺňa
Typ1	82,3	82,9	81,6	82,3	Nespĺňa
Typ3	85,5	85,2	84,3	85,0	Nespĺňa
Typ4	87,3	86,4	86,3	86,6	Nespĺňa
Typ6	79,8	79,8	79,2	79,6	Nespĺňa

Z výsledkov meraní (tab.1) je zrejmé, že technický stav jednotlivých typov vozňov má výrazný vplyv na celkovú ekvivalentnú hladinu hluku, kde pre Typ1 bol rozdiel hladín hluku medzi vozňami viac ako 4 dB (tab. 1, tab. 2).

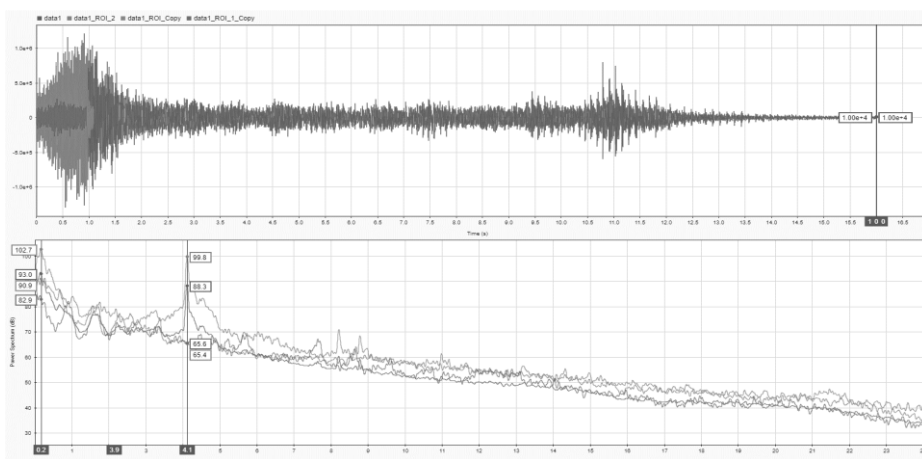
3.1 Diagnostikovanie stavu dvojkoľesí

Hluk valenia je dominantným zdrojom hluku približne od 40 km/h po 200 km/h, čo je zároveň ideálne rozpätie rýchlosti na diagnostikovanie stavu dvojkoľesí. V tabuľkách 1 a 2 sú zaznamenané pomocou troch mikrofónov prejazdu dvoch regionálnych rýchlikov s rýchlosťou 160 km/h. Vlaky

nemali celkom identické radenie ale v obidvoch sa nachádzal aj rovnaký typ a rovnaké lokomotívy. Na druhom vlaku boli vozne, ktoré boli hlučnejšie, pričom dominantným zdrojom hluku bol hluk valenia, preto je možné predpokladať, že druhá vlaková súprava mala dvojkoľesia vozňov v horšom technickom stave, čo možno ďalšími cieľenými sledovaniami presnejšie špecifikovať.



Obr. 4 Lokalizácia zdroju hluku od podvozku pomocou akustickej kamery



Obr. 5 Spracovanie signálu prejazdu vlaku v softvéri Matlab

Na obr. 5 je znázornený hluku od prejazdu rýchlika rýchlosťou 101,5 km/h. Na grafe je možné rozlíšiť lokomotívu a jednotlivé vozne. Najhlučnejšia časť vlaku bola lokomotíva a predposledný jedálenský vozeň, pričom ostatné vozne dosahovali nižšie hodnoty hluku. Mnohé nedostatky na vozňoch sa prejavujú akusticky len pri konkrétnych rýchlostiach preto je vhodné monitorovanie vozňov pri viacerých rýchlostiach.

3.2 Diagnostikovanie stavu pohonného ústrojenstva

Rovnakým spôsobom je možné merať stav odozvy pohonného ústrojenstva, čo nám dáva vysoký predpoklad, že je možné na ňom týmto spôsobom diagnostikovať rôzne typy porúch. Pre objektivitu je vhodné, že merania s akustickou kamerou je ideálne vykonávať pri rýchlosti do 40 km/h. Na obr. 6 je záznam z akustickej kamery prejazdu rušňa rýchlosťou 36 km/h. Na zázname je pri danej rýchlosti rušňa vidieť dominantný zdroj hluku z pohonného ústrojenstva – motora.



Obr. 6 Príklad použitia akustickej kamery pri identifikácii hluku pohonného ústrojenstva malého vozidla nezávislej trakcie

3.3 Lokalizácia hluku pantografu

Ako ďalší príklad využitia vlastností a funkcií akustickej kamery pri podrobnej analýze hluku koľajových vozidiel je uvedené zistenie hluku pantografu pri prejazde elektrickej motorovej jednotky.



Obr. 7 Lokalizácia hluku od zberača elektrickej jednotky radu 671 pri 120 km/h

Na zázname z akustickej kamery pri prejazde elektrickej jednotky 671 rýchlosťou 160 km/h je vidieť, že dominantným zdrojom pri pohľade zhora je pantograf. Pri tomto pohľade nie je vidieť podvozky a sú odfiltrované aj frekvencie hlukov odrazu valivého hluku od zeme. Pri zázname boli zaznamenávané len frekvencie aerodynamického hluku. Tento typ merania je vhodný pri posudzovaní akustických bariér, ak je ich výška nedostatočná a najmä v noci sa stáva hluk od zberača trakčného vozidla rušivým do okolia železničných tratí v blízkosti obytných zón.

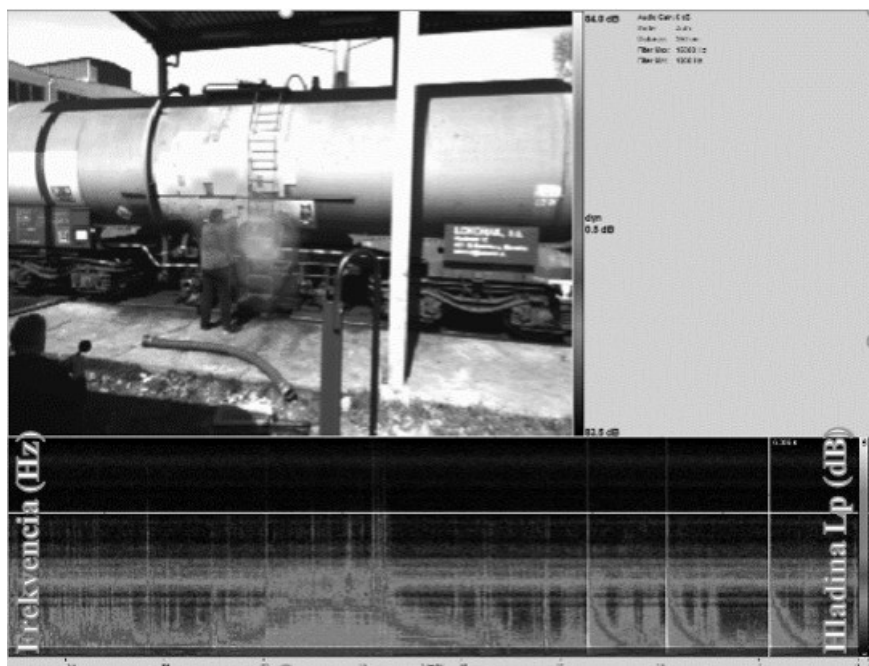
3.4 Ďalšie možné využitie akustickej kamery pri znižovaní hlučnosti nákladných vozňov

Osobitne výhodné je používanie akustickej kamery pri hľadaní ciest a možností znižovania hluku pri nákladných vozňoch. Kamera veľmi presne zobrazuje miesta a veľkosť vyžarovania hluku pri cielených budeniach vibrácií na skríni či iných konštrukčných častiach nákladných vozňov. Uvádame praktický jednoduchý príklad šírenia a vyžarovania hluku pri železničnej cisterne radu Zaes.



Obr. 8 Záznam vybudenia cisterny a vyžarovania jej hluku

Konštrukcia železničnej cisterny sa po vybudení nominálnym úderom správala ako ozvučnica s dozvukom 4,5 sekundy. Počas jazdy vlaku konštrukcia prázdnej cisterny je zdrojom nadmerného hluku. Verifikačným experimentom sme na skutočnom cisternovom vozni overovali, či je možné pomocou izolácie zníženie vyžarovania hluku cisterny ako ozvučnice. Výsledok je zrejмый z obrázku 9, kde je plocha vyžarovania viac ako polovicu menšia po aplikácii izolácie.



Obr. 9 Moment vybudenia úderom do cisterny s izoláciou

4 ZÁVER

Akustická kamera umožňuje veľmi podrobnú analýzu hladín a frekvencií hluku pri koľajových vozidlách. Objektívizuje identifikáciu zdrojov hluku, a cesty šírenia hluku. Výrazne spresňuje možnosti, šance a riziká znižovania hluku, čo dáva reálne predpoklady efektívnych krokov pri znižovaní hluku pre konštruktérov, technológov a údržbárov koľajových vozidiel.

V našom výskume sme dosiahli tieto výstupy:

Výstupy simulácií a počítačového modelovania akustických dejov boli verifikované pomerne rozsiahlymi akustickými experimentmi priamo v železničnej prevádzke.

Boli vytvorené a uchované veľmi rozsiahle databázy akustických parametrov sledovaných železničných vozidiel. Tým je vytvorený objektívny fundament pre potreby výskumu zameraného na vývoj a zdokonaľovanie konštrukcie a funkcie koľajových vozidiel. Spracované sú konkrétne námety na znižovanie hluku vedeného najmä konštrukciou koľajového vozidla. V meraniach boli identifikované akustické vlastnosti rôznych materiálov v konštrukcii koľajových vozidiel, pričom bolo prakticky vždy realizované porovnávanie očakávaných vlastností podľa pragmatických kritérií – napr. hrúbka materiálov, hygienické parametre, bezpečnostné kritériá, dostupnosť, progresívnosť vlastností, ekonomické aspekty.

Originálne výsledky boli získané s využitím softvéru COMSOL Multiphysics pri simulácii akustických pomerov [11], modernizovaných a nových konštrukcií železničných osobných vozňov. Boli zistené závažné nové skutočnosti šírenia a vyžarovania hluku osobných vozňov, identifikácia vyžarovania hluku počas jazdy vlakov po koridorovej trati ŽSR.

Vykonané experimenty s akustickou kamerou preukazujú nové možnosti veľmi podrobnej špecifikácie zdrojov hluku na železničných vozidlách pri ich jazde v príslušných vlakoch, boli definované tiež možnosti využitia akustických meraní v rozvoji metód tzv. akustickej diagnostiky.

„Táto publikácia vznikla vďaka podpore v rámci Operačného programu Integrovaná infraštruktúra 2014–2020 pre projekt: Inovatívne riešenia pohonných, energetických a bezpečnostných komponentov dopravných prostriedkov, s ITMS kódom projektu 313011V334, spolufinancovaný zo zdrojov Európskeho fondu regionálneho rozvoja“.



EURÓPSKA ÚNIA
Európsky fond regionálneho rozvoja
OP Integrovaná infraštruktúra 2014 – 2020



MINISTERSTVO
DOPRAVY A VÝSTAVBY
SLOVENSKEJ REPUBLIKY



Literatúra

- [1] THOMSON, D. *Railway Noise and Vibration: Mechanisms, Modelling and Means of Control*. Amsterdam, The Netherlands: Elsevier Science, 2008. ISBN 9780080451473.
- [2] *Rail Strategy 2030 and beyond for Environment, Energy and Sustainable Mobility*; Draft Version 3. Paris, France: UIC, 2009.
- [3] DECKÝ, M., LEITNER, B., et al. *Objektivizácia mechanického kmitania indukovaného cestnou dopravou*. Žilina: Žilinská Univerzita v Žiline, 2019. ISBN 978-80-554-1555-0.
- [4] CAE Software und Systems GmbH [online]. *SoundCam, Product data*. Brochure. [cit. 20. 10. 2020]. Dostupné z: https://www.cae-systems.de/fileadmin/CAEpage/Datenblaetter/Tech_Specs_SoundCam.pdf
- [5] BENDAT, J. S., PIERSOL, A. G. *Engineering Applications of Correlation and Spectral Analysis*. New York, USA: John Wiley & Sons, 1980. ISBN 0-471-05887-4.
- [6] NĚMEC, J., RANSDORF, J., ŠNEDRLE, M. *Hluk a jeho snižování v technické praxi*. Praha: SNTL, 1970. ISBN 04-222-70.

- [7] NOH, H. M. Wind tunnel test analysis to determine pantograph noise contribution on a high-speed train. *Advances in Mechanical Engineering*. 2019, **11**(10), DOI: 10.1177/1687814019884778.
- [8] ŠKODA TRANSPORTATION a.s. [online]. *Dvoupodlažní elektrická jednotka 671 Slovensko*. Produktový list. 2020 [cit. 21. 07. 2021] Dostupné z: <https://www.skoda.cz/data/catalog/6/25/325.pdf>
- [9] HE, Q., WANG, J., HU, F., KONG, F. Wayside acoustic diagnosis of defective train bearings based on signal resampling and information enhancement. *Journal of Sound and Vibration*. 2013, **332**(21), 5635-5649. DOI: 10.1016/j.jsv.2013.05.026.
- [10] NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Praha: ČVUT Praha, 2009. ISBN 80-01-02246-3.
- [11] COMSOL. *COMSOL-MULTIPHYSICS®* [online]. © 2021 by COMSOL [cit. 19. 10. 2020]. Dostupné z: <https://www.comsol.com/comsol-multiphysics>