



**26. MEDZINÁRODNÁ KONFERENCIA
„SÚČASNÉ PROBLÉMY V KOLAJOVÝCH
VOZIDLÁCH - PRORAIL 2023“
20. – 22. septembra 2023, Žilina, Slovensko**

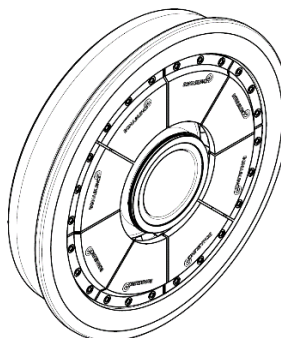
<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.1.01>

MĚŘENÍ KVÍLIVÉHO HLUKU TRAMVAJE V OSTRAVĚ MEASUREMENT OF SQUEALING TRAM NOISE IN OSTRAVA

Vít BĚHÁLEK, Tomáš BOHÁČ^{*)}

1 ÚVOD

Společnost BONATRANS GROUP a.s., dále jako „BONATRANS“, se v letech 2019 až 2022 účastnila společně s Centrem pokročilých inovačních technologií při VŠB-Technické univerzitě Ostrava, dále jako „CPIT“, grantového programu EPSILON, který vyhlásila Technologická agentura ČR. Projekt č. TH04010468 nesl název *Snižování hlukových emisí kolejových vozidel* a byl zaměřen na vývoj tzv. tichých železničních kol pro vozidla kolejové dopravy, tzn. nákladní, osobní městské a příměstské (meziměstské) dopravy. Jedním z požadovaných výsledků projektu byla aplikace tlumiče hluku pro vozidla městské dopravy. Tento cíl byl naplněn díky spolupráci s Dopravním podnikem Ostrava a.s., dále jako „DPO“, který provozuje tramvajové jednotky STADLER Tango NF2 osazené pryží-odpruženými koly výrobce BONATRANS. Aplikace tlumiče hluku obnášela jeho samotný návrh, viz **obr. 1**, vyhotovení výrobní dokumentace, dále pak zajištění výroby potřebného počtu kusů pro osazení jedné tramvaje a rovněž organizaci a zajištění provozního měření na vybraném úseku z tratí DPO, dále též jako „hluková kampaň“, o které tento článek pojednává.



Obr. 1 Kolo s listovým tlumičem

Fig. 1 Wheel with leaf damper

^{*)} **Ing. Vít BĚHÁLEK**, BONATRANS GROUP a.s., oddělení V a V, Revoluční 1234, 73594, BOHUMÍN, Česká Republika. Tel.: +420 597 082 027, M.: +420 777 455 304, e-mail: Vít.Behalek@ghh-bonatrans.com. 33 let. Pracovník V a V, zabývá se měřením hluku a vibrací, experimentální modální analýzou dvojkolí.

Ing. Tomáš BOHÁČ, BONATRANS GROUP a.s., oddělení V a V. Tel. +420 597 082 814, M.: +420 724 708 546, e-mail: tomas.bohac@ghh-bonatrans.com. 52 let, Pracovník V a V – senior, zabývá se vibracemi a hlukem železničních kol (numerické simulace, experimenty, aplikace).

2 MĚŘENÍ KVÍLIVÉHO HLUKU

Pro účely hlukové kampaně, při uvážení možností její praktické realizace, byla po dohodě s DPO zvolena lokalita Hranečnick, a to Terminál Hranečnick a jeho severovýchodní oblouk. Rozhodujícím faktorem pro volbu Terminálu Hranečnick byl výskyt kvílivého hluku. Severovýchodní část obratiště se skládá ze 3 samostatných kolejových oblouků, viz **obr. 2**. Kvílivý hluk byl slyšitelný u všech tří kolejí při některých průjezdech. Výskyt kvílení ovlivňovaly v tomto konkrétním případě tyto faktory: typ tramvaje, rychlost průjezdu, míra ojetí kol či zatížení kolejí od stojící tramvaje na konci oblouku. Benefity Terminálu Hranečnick pro měření hluku byly: Nízká úroveň nočního provozu, a to jak tramvaj, tak i autobusů. Dostupnost zázemí, tzn. el. přípojka. Rovinatý terén a prostor kolem tratě pro umístění mikrofónů.

2.1 Návrh koncepce měření

Návrh koncepce měření kvílivého hluku vycházel z metodiky popsané v dokumentu [1]. Ta doporučuje měřený úsek rozdělit na několik rovnoměrně dlouhých úseků, viz **obr. 3**.

Ve stavebních výkresech tratě, které poskytli DPO k nahlédnutí, jsou uvedeny tyto poloměry zakřivení oblouků (poloměr střednice mezi dvěma kolejnicemi): vnější oblouk 40.0 m, střední oblouk 36.4 m, vnitřní oblouk 35.5 m. Proložení kružnic do leteckého snímku severovýchodního oblouku pomocí sw. Autocad, s korekcí měřítka, bylo nakresleno schéma, viz **obr. 4**. Pro měření kvílivého hluku byl zvolen prostřední oblouk. Bylo tak učiněno hlavně z praktického důvodu, a to kvůli možnosti umístění mikrofónů mimo vozovku tak, aby nebyl blokován provoz autobusů. Poloměr zakřivení středního oblouku, jako jeden z hlavních vstupních faktorů, je sice o 0.9 m větší než u vnitřního oblouku, ale tento rozdíl je zanedbatelný, s ohledem na fakt, že kvílení se vyskytovalo u obou oblouků.

Počet mikrofónů pro jednu stranu oblouku byl zvolen dle vztahu:

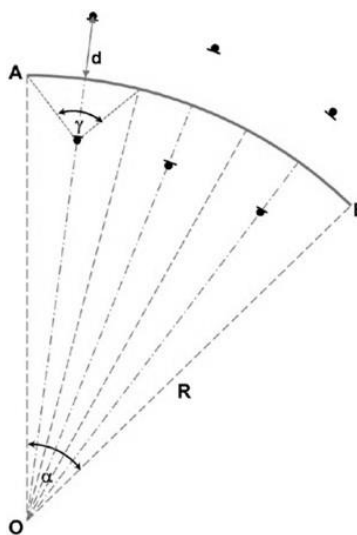
$$n = (\alpha / 360) \cdot \pi \cdot R / d, \quad (1)$$

kde n je počet mikrofónů. Úhel α je u severovýchodního oblouku 90° . Vzdálenost mikrofónu d od osy tratě je 7.5 m dle standardu TSI. Po dosazení do vzorce vychází počet



Obr. 2 Severovýchodní oblouk Hranečnick (zdroj Mapy.cz)

Fig. 2 Northeast arc of Hranečnick (origin Mapy.cz)



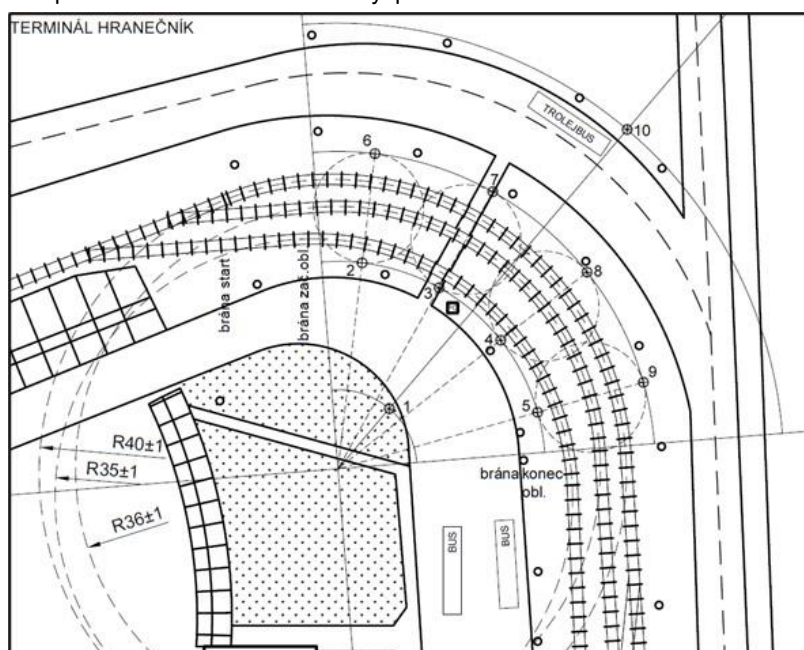
Obr. 3 Geometrický návrh rozmístění mikrofónů (zdroj [1])

Fig. 3 Geometric design of microphones location (origin [1])

mikrofonů rovne 3.81, tedy 4 mikrofony na jedné straně oblouku. Tzn. 8 mikrofonů celkem z vn j  a vnitřní strany. Dále byly do osy úhlu α umist ny 2 mikrofony, vně a zevnitř oblouku, do vzdálenosti 25 m od osy trat  a výšky 3.5 m. (Pozn.: Z důvodu orientace ve výsledcích jsou zavedena  slna mikrofonů: 1 ař 5 pro mikrofony uvnitř oblouku a  slna 6 ař 10 pro mikrofony vně oblouku, viz **obr. 4**.)

2.2 Připrava měřeného vozu

DPO rezervovalo za  clem hluvn  kampan  v z Stadler Tango NF2,  slna **1705**. Dle informací dostupných na www.dpo.cz se jedná o jeden z prvnick  provozovaných vozů z celkového poctu 40 ks. První v z 1701 byl provozovan  od 04/2018.



Obr. 4 Schéma měření (rozměry v [m])

Fig. 4 Measurement scheme (dimensions in [m])

DPO přistavilo v z 1705 na mont jn  kanál, kde BONATRANS a CPIT provedli připravn  práce, včetně změření průměrů kol. Provozovan  kola prvnick  podvozku měla průměr přiblizn  560 mm. (Pozn.: Jmenovit  průměr nových kol je 610 mm.) V depu byla později provedena i samotn  mont ř tlumič hluku. Tlumič je uchycen pomocí šroubů k v enci kola z vnitřní strany.

Vzhledem k potřebe sledovat polohu tramvaje při jízdě obloukem a potřebe měřit rychlost, bylo prvnick  dvojkolí osazeno ot kov m čidlem. Právě kolo (ve směru jízdy) prvnick  dvojkolí bylo osazeno telemetrickou aparaturou za  clem identifikovan  kola jako zdroje kvilivého hluku. Technick  literatura uvádí a praxe potvrzuje, ře největ  vliv na hladinu kvilivého hluku m  právě prvnick  vnitřní kolo v oblouku. (Pozn.: Kolo je označeno jako 1R.) Telemetrick  aparatura umořňuje měření některých veličin (teploty, deformace...) za rotace a v tomto připadá byla využita pro měření vibrací pomocí akcelerometrů.

Dále byl ke kařd mu ze 4 kol prvnick  podvozku umist n mikrofon, ve vzdálenosti 10 cm od čela kola, za  clem vzájemného porovnání frekvencnick  spekter ziskann ch měřením pomocí akcelerometrů a mikrofonů. (Pozn.: Ostatn  kola prvnick  podvozku, resp. mikrofony u kol, jsou označeny podobn : 1L, 2R, 2L.)

Pro spouštění měření byl využit systém průjezdových optických bran. Ten zajistil start měření ve stejném okamžiku, jak na externím stanovišti, tak i v jedoucí tramvaji. Zároveň díky systému bran byla podchycena identická délka měřeného úseku pro každou jízdu, a na to návazně i měření rychlosti dané jízdy. Pro svou obsáhlost zde není systém bran podrobně popisován.

2.3 Průběh hlukové kampaně

Vzhledem k nutnosti realizace hlukové kampaně za běžného provozu, bez možnosti jeho omezení, byl stanoven termín měření tramvaje s koly bez tlumičů hluku na noc 23. - 24. 10. 2022. Měření tramvaje s koly s namontovanými tlumiči hluku bylo realizováno v noci 26. - 27. 10. 2022. Samotnému měření hluku předcházela příprava měřicího stanoviště, kdy byla zaměřena délka oblouku, jeho začátek a konec, tj. pozice bran, a dále pak pozice mikrofonů.

Měření kvilivého hluku netlumených a tlumených kol byla realizována při rychlosti jízdy v oblouku přibližně 15 km/h. Změřeno bylo 10 platných jízd pro obě varianty. Z důvodu zajištění bezpečnosti probíhaly všechny jízdy za přítomnosti dispečera DPO.

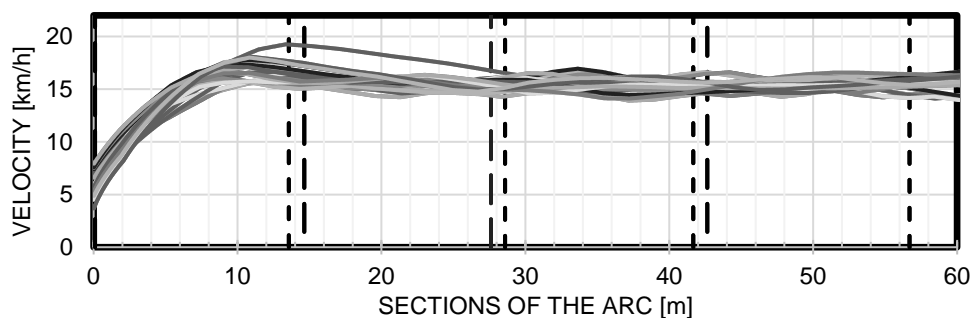
Během obou nočních měření byly zachovány meteorologické podmínky. Teplota byla stabilní, v rozmezí 8 až 9 °C. Relativní vlhkost vzduchu se pohybovala mezi 89 až 94 %. Hodnoty barometrického tlaku byly 1017 až 1025 hPa. Panovalo bezvětří, bez výskytu dešťových srážek. Meteorologické podmínky byly monitorovány poloprofesionální stanicí DAVIS Vantage PRO2.

3 VÝSLEDKY MĚŘENÍ KVILIHÉHO HLUKU

Jednotlivé jízdy, resp. data z měření byla zaznamenávána do rekordéru softwaru BK Connect (Brüel & Kjær), kterým BONATRANS disponuje. Vzhledem k počtu jízd, dvěma variantám měření a množství použitých mikrofonů se jedná o rozsáhlý soubor dat. Jejich zpracování je časově náročné a prezentace všech výsledků je nad rámec příspěvku. Z tohoto důvodu je zde uvedena pouze část výsledků.

3.1 Průběhy rychlosti jízdy v oblouku

Na **obr. 5** jsou uvedeny průběhy rychlosti jednotlivých měřených jízd, tj. 10 jízd s netlumenými koly a 10 jízd s koly s tlumiči hluku. Z obrázku je zřejmé, že v prvním úseku oblouku se teprve tramvaj rozjížděla na požadovanou rychlost 15 km/h, což bylo způsobeno délkově krátkým úsekem mezi výhybkou a obloukem. Ve zbývajících 3 úsecích oblouku se tramvaj pohybovala přibližně požadovanou rychlostí (Pozn.: úseky se částečně překrývají, cca o 1 m).

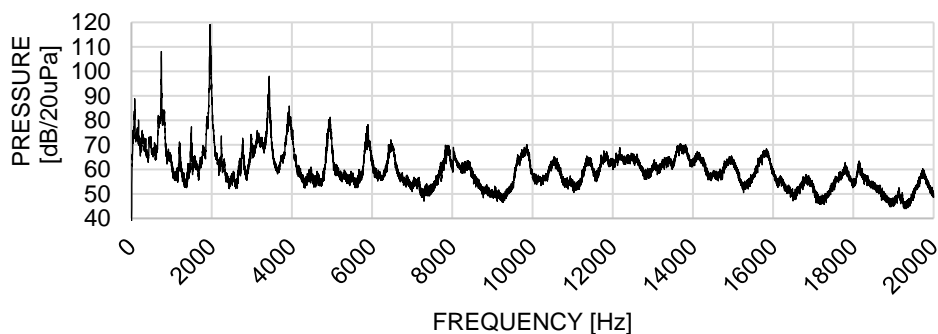


Obr. 5 Rychlosti v oblouku
Fig. 5 Velocity profile in the arc

3.2 Vymezení frekvenční oblasti

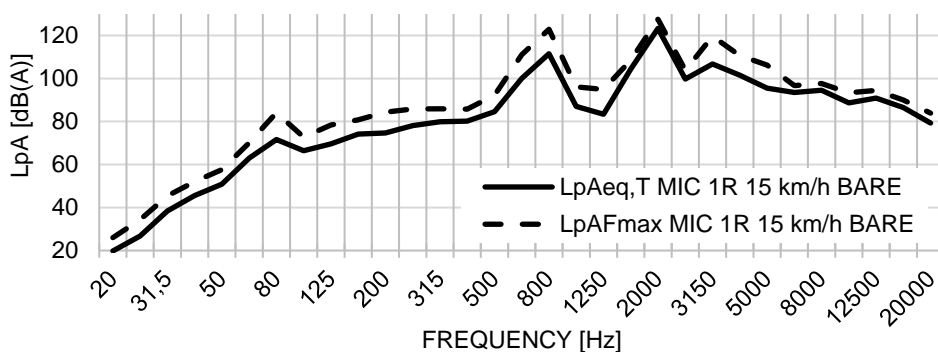
Na **obr. 6** je uvedeno frekvenční spektrum akustického tlaku v rozsahu 0 až 20 kHz a na **obr. 7** je uvedeno v tomtéž frekvenčním rozsahu třetino-oktávové spektrum hluku pro 1. jízdu netlumeného kola, kde $L_{pAeq,T}$ je ekvivalentní trvalá vážená hladina akustického tlaku A, kde T je časový interval měření, a L_{pAFmax} je maximální vážená hladina akustického tlaku AF v průběhu časového intervalu měření T, kde F je časové vážení fast. (Pozn.: V grafech a tabulkách výsledků autoři uvádí jednotku dB s označením (A) úmyslně duplicitně, aby bylo zcela zřejmé, že se jedná o A-vážené hladiny hluku. Netlumená kola jsou dále ve výsledcích označena jako „BARE“ a kola s tlumiči jako „DAMP“.)

Ze spekter na **obr. 6 a 7** naměřených mikrofonem u zmíněného kola 1R je patrné, že významné frekvenční špičky akustického tlaku se nachází v oblasti do cca 6 kHz. Na základě výše uvedeného byla hluková analýza zaměřena na frekvenční oblast do 6400 Hz, která je z hlediska kvilivého hluku v tomto případě podstatná.



Obr. 6 Frekvenční autospektrum MIC_1R

Fig. 6 Frequency autospectrum of MIC_1R



Obr. 7 Třetino-oktávové spektrum 1. jízdy, netlumené kolo 1R

Fig. 7 One-third octave band spectrum, 1. ride, Bare wheel 1R

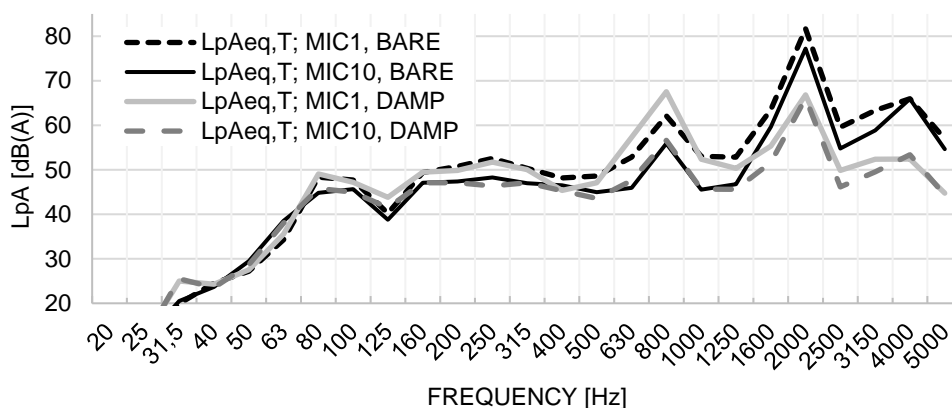
3.3 Hladiny akustického tlaku

V následující **TAB. 1** jsou uvedeny celkové hodnoty $L_{pAeq,T}$ a L_{pAFmax} pro první jízdu s netlumenými koly a první jízdu s koly s tlumiči. Hladiny jsou uvedeny pro všechny použité stacionární mikrofony. Tabulka obsahuje výsledné redukce hladin mezi koly netlumenými a tlumenými (porovnání pouze prvních jízd).

TAB. 1 Redukce hluku (porovnání pouze prvních jízd)

TABLE 1 Noise reduction (comparison of first rides)

1. RIDES	MIC	BARE	DAMP	Reduction	BARE	DAMP	Reduction
		LpAeq,T [dB(A)]	LpAeq,T [dB(A)]	Δ LpAeq,T [dB(A)]	LpAFmax [dB(A)]	LpAFmax [dB(A)]	Δ LpAFmax [dB(A)]
INNER MICRO- PHONES	1	81.8	70.9	-10.9	90.2	82.5	-7.7
	2	92.6	79.8	-12.8	100.6	87.4	-13.2
	3	96.0	86.2	-9.8	103.3	94.9	-8.4
	4	92.2	87.9	-4.3	96.6	95.8	-0.8
	5	91.4	84.2	-7.2	98.3	94.0	-4.3
OUTER MICRO- PHONES	6	88.4	72.1	-16.3	94.8	77.9	-16.9
	7	87.1	73.8	-13.3	92.3	79.3	-13.0
	8	87.6	76.9	-10.7	92.6	82.2	-10.4
	9	84.9	77.0	-7.9	89.6	85.8	-3.8
	10	77.9	67.4	-10.5	84.6	81.4	-3.2



Obr. 8 Porovnání hladin akustického tlaku, 1. jízdy, mikrofony 1 a 10

Fig. 8 Comparison of sound pressure levels, 1. rides, Microphones 1 and 10

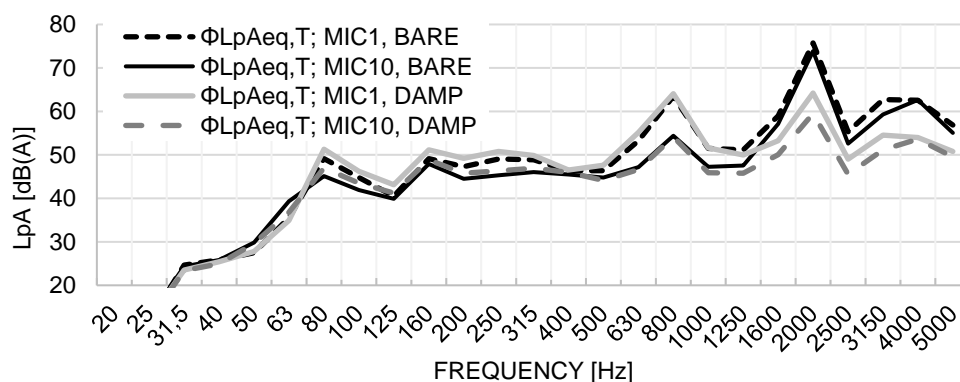
V následující **TAB. 2** jsou uvedeny průměrné celkové hodnoty LpAeq,T a LpAFmax z 10 jízd tramvaje s netlumenými a tlumenými koly. Hladiny jsou opět uvedeny pro všechny použité stacionární mikrofony. Tabulka také obsahuje výsledné redukce hladin mezi koly netlumenými a tlumenými.

Graf na **obr. 9** zobrazuje třetino-oktávová spektra LpAeq,T průměrované z 10 platných změřených jízd pro netlumené a tlumené kolo a mikrofon 1 (uvnitř oblouku) a mikrofon 10 (vně oblouku).

Zajímavý pohled na provedené měření hluku poskytuje **obr. 10**, který ukazuje frekvenční spektra akustického tlaku, získaná měřením pomocí mikrofonů, a zároveň spektra zrychlení, změřená pomocí akcelerometrů za rotace kola. Z **obr. 10** je patrné, že dominantním zdrojem kvilivého hluku v oblouku je bezesporu železniční kolo. Ve spektrech akustického tlaku se nenachází žádná výrazná špička, která by neodpovídala frekvenční špičce ve spektru zrychlení, které představuje přímo vlastní frekvence kmitání kola. Mezi spektry je zachována „frekvenční shoda“. To znamená, že ve spektru akustického tlaku se nenachází jiný významný zdroj hluku, než je tramvajové kolo.

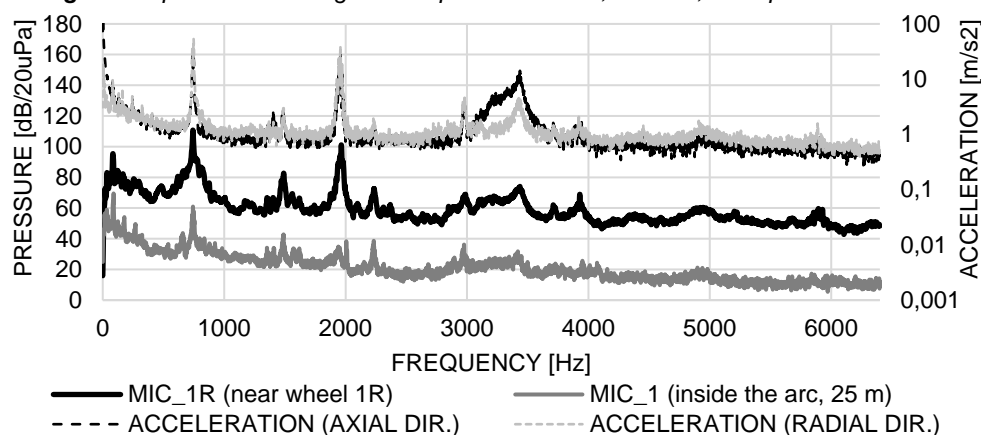
TAB. 2 Redukce hluku (porovnání všech jízd)
TABLE 2 Noise reduction (comparison of all rides)

Φ	MIC	BARE	DAMP	Reduction	BARE	DAMP	Reduction
		LpAeq,T [dB(A)]	LpAeq,T [dB(A)]	ΔLpAeq,T [dB(A)]	LpAFmax [dB(A)]	LpAFmax [dB(A)]	ΔLpAFmax [dB(A)]
INNER MICRO-PHONES	1	76.5	69.0	-7.5	86.2	80.9	-5.3
	2	88.1	78.8	-9.3	96.9	88.9	-8.0
	3	86.9	79.4	-7.5	94.4	87.1	-7.3
	4	87.4	81.9	-5.5	95.2	90.7	-4.5
	5	88.0	82.0	-6.0	96.8	92.8	-4.0
OUTER MICRO-PHONES	6	82.4	73.2	-9.2	90.2	78.6	-11.6
	7	80.9	73.4	-7.5	88.8	79.4	-9.4
	8	82.7	74.3	-8.4	90.5	81.6	-8.9
	9	82.0	75.4	-6.6	90.4	85.0	-5.4
	10	74.7	64.0	-10.7	83.3	74.8	-8.5



Obr. 9 Porovnání průměrných hladin akustického tlaku, všechny jízdy, mikrofony 1 a 10

Fig. 9 Comparison of average sound pressure levels, all rides, microphones 1 and 10



Obr. 10 Porovnání frekvenčních spekter

Fig. 10 Comparison of frequency spectra

4 ZÁVĚR

Z naměřených výsledků je patrné, že **navržený tlumič hluku** pryží-odpruženého kola výrobce BONATRANS GROUP a.s. **reálně snižuje hlukovou emisi** při jízdě tramvaje v oblouku tratě. Vyjádřit výslednou redukci jednou „průměrnou“ hodnotou je sice možné, ale z pohledu autorů nedostatečné či zavádějící, protože takováto redukce neposkytuje relevantní informace o měřené situaci. Vzhledem k množství faktorů ovlivňující kvílení je jakákoliv hodnota redukce kvílivého hluku, na rozdíl od hluku valivého, pouze obtížně přenositelná na jiné případy. Druhotným smyslem tohoto článku je obeznámení odborné veřejnosti s problematikou provozního měření kvílivého hluku. Vzhledem k absenci normy je tento článek ukázkou, jakým způsobem je možné v budoucích případech k disciplině měření kvílivého hluku přistupovat.

Výzkum tlumičů hluku v BONATRANS, včetně realizace hlukové kampaně, byl podpořen grantovým projektem Technologické agentury České republiky č. TH04010468. Uvedené podpory pro účely výzkumu si velice vážíme.

Literatura

[1] **Dittrich, M.G., Jansen, H.W.:** Braking noise and Curving noise: corresponding indicators and measurement procedures (interim). Acoutrain report no. ACT-T1_2-D-TNO-001-04, TNO, 2013.



Resumé

V říjnu 2022 proběhlo měření kvílivého hluku tramvaje Stadler Tango NF2, provozovatele Dopravní podnik Ostrava a.s., na terminálu Hranečnick v Ostravě. Tato tramvaj je osazena listové tlumiče hluku v rámci grantového projektu EPSILON (TAČR). Během nočního provozu bylo provedeno 10 měřených jízd tramvaje v oblouku s koly bez tlumičů hluku a 10 měřených jízd tramvaje s koly s namontovanými tlumiči hluku. Hluk byl měřen 10 mikrofony rozmístěnými rovnoměrně po obou stranách oblouku. Rychlost jízdy v oblouku byla přibližně 15 km/h. Z naměřených dat je zřejmé, že tlumič hluku výrobce BONATRANS GROUP a.s. reálně snižuje kvílivý hluk.

Summary

In October 2022, the squealing noise of the tram Stadler Tango NF2, operated by Dopravní podnik Ostrava a.s., was measured at the Hranečnick terminal in Ostrava. This tram is equipped with resilient wheels of the manufacturer BONATRANS GROUP a.s., which has developed leaf dampers for these wheels within the EPSILON grant project (TAČR). During night operation, 10 measured runs of the tram in a curve with wheels without noise dampers and 10 measured runs of the tram with wheels with fitted noise dampers were carried out. The noise was measured with 10 microphones placed evenly on both sides of the curve. The speed of travel in the curve was approximately 15 km/h. It is clear from the measured data that the damper manufactured by BONATRANS GROUP a.s. actually reduces the squealing noise.