



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

<https://doi.org/10.26552/spkv.Z.2023.2.43>

VLIV POVĚTRNOSTNÍCH PODMÍNEK NA HLUKOVÉ PROJEVY A SOUČINITEL TRAKCE V TRAŤOVÝCH OBLOUČÍCH MALÝCH POLOMĚRŮ

INFLUENCE OF WEATHER CONDITIONS ON THE NOISE AND THE TRACTION COEFFICIENT IN CURVES WITH A SMALL RADIUS

Martin VALENA, Milan OMASTA, Martin HARTL^{*)}

1 ÚVOD

Kolejová doprava je velmi rozšířený způsob přepravy nejen cestujících, ale i nákladu, a to zejména kvůli její nízké energetické náročnosti a velkým přepravním kapacitám. Má ovšem i své stinné stránky. Jednou z nich je hluk generovaný při průjezdu traťovým obloukem, tzv. kvílivý hluk. Ten může pocházet z kontaktu na temeni kolejnice (tzv. squealing) nebo z kontaktu na pojižděné hraně kolejnice (tzv. flanging). Kvílivému hluku je vystaveno 12 % obyvatel Evropy, tedy 1,5 milionu lidí.

Kvílivý hluk ovlivňuje velké množství parametrů, což zapříčiňuje jeho obtížnou predikci, a to, že se objevuje pouze s určitou pravděpodobností [1]. Mezi hlavní parametry, které jej ovlivňují, patří teplota, vlhkost, rychlost vozidla, geometrie trati a opotřebení kola a kolejnice [2]. Jedním z mechanismů vzniku je tzv. „stick-slip“ efekt, který je způsoben negativní trakční křivkou – pro nízké skluzy součinitel trakce roste a po dosažení bodu saturace začne klesat. Po dosažení maximální trakce, kterou je kontakt schopen přenést, dojde k prokluzu, čímž se sníží i trakce pod maximum a kolo se znovu začne odvalovat. Periodické střídání fáze skluzu a lpění způsobí vibrace kola, které se dále šíří ve formě hluku.

Výzkum provedený v Rakousku studoval vliv teploty a relativní vlhkosti na četnost výskytu kvílivého hluku a jeho akustický výkon [3]. Z výsledků vyplývá, že četnost klesá s rostoucí teplotou a tento vliv je markantnější u hluku od okolku. Akustický výkon rovněž klesá. Vliv vlhkosti není monotónní a maximum četností výskytu se objevuje v okolí 70 % vlhkosti. Po překročení této hodnoty četnost klesá ve všech případech. Při vlhkosti pod 70 % teplota kolejnice definuje, jestli četnost výskytu bude rostoucí nebo klesající. Obecně lze říci, že akustický výkon roste se zvyšující se vlhkostí, pokud teplota kolejnice přesahuje 10 °C. Z výsledků studie [4] vyplývá, že rostoucí vlhkost zvyšuje šanci výskytu hluku, pokud je teplota nad 10 °C a v případě nižší teploty je tomu obráceně.

^{*)} **Ing. Martin VALENA**, Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno, Česká republika, Tel.: +420 541 143 209, e-mail: Martin.Valena@vut.cz.

Ing. Milan OMASTA, Ph.D., Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Tel.: +420 541 143 323, e-mail: omasta@fme.vutbr.cz.

prof. Ing. Martin HARTL, Ph.D., Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Tel.: +420 541 142 769, e-mail: Martin.Hartl@vut.cz.

Vliv povětrnostních podmínek na součinitel trakce je studován zejména v laboratoři na zařízeních s čistě skluzovým nebo valivě-skluzovým kontaktem. Studie [5] ukazuje, že součinitel trakce klesá se zvyšující se relativní vlhkostí u všech testovaných teplot (1-50 °C). Testy byly provedeny na očištěných vzorcích. V reálném provozu jsou na kolejnici přítomny částice opotřebení, které se simulují přidáním oxidů železa do kontaktu [6]. Tyto oxidy taktéž vedou na nižší součinitel tření za vyšších vlhkostí. Byl zde i zkoumán vliv teploty a ukázalo se, že došlo ke snížení součinitele tření, pokud se zvýšila teplota okolí.

Cílem studie je stanovit vliv povětrnostních podmínek na hluk generovaný při průjezdu tramvaje traťovým obloukem o malém poloměru a také na součinitel trakce měřený přímo na místě. Dále budou stanoveny korelační součinitele pro hlavní závislosti a vazba mezi součinitelem trakce a délkou trvání hluku z temena kolejnice, jakožto hlavním parametrem charakterizující hluk.

2 MATERIÁL A METODY

2.1 Měřicí místo

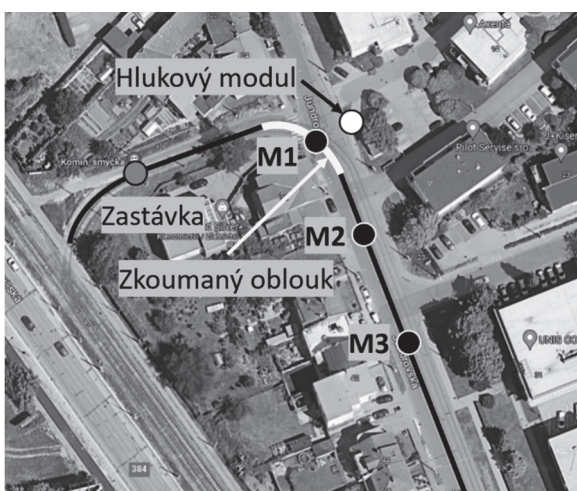
Předmětem studie byla tramvajová smyčka v městské části Brno-Komín, zejména tedy její oblouk na vjezd do zastávky, který má poloměr 21 m a částečně leží ve vozovce, jak je vidět na *obr. 1*. V době provádění měření v období od 27. 4. do 29. 4. 2023 byla linka obsluhována obousměrnou tramvají KT8, jež místem projížděla v 15minutových intervalech, vždy po levé koleji (vnitřní oblouk). Konkrétní vozidlo zde jezdilo po celou dobu měření, každý den od 4:45 do 22:45.

Komunikace, ve které je umístěn tramvajový pás, byla vytížena minimálně. Z toho důvodu nedocházelo k téměř žádnému ovlivnění měření.

Nájezdová rychlost, která je dostupná z tachografu kolejového vozidla, nebyla v této studii vyhodnocována. V předmětném oblouku je její odchylka obecně relativně malá.

2.2 Stanovení trakčních podmínek na trati

Ke studiu trakčních podmínek na trati byl využit nově vyvinutý traťový tribometr (BUT Rail Tribometer, viz. *obr. 2 a*), který umožňuje stanovit trakční křivku (viz. *obr. 2 b*). Traťový tribometr pracuje na principu řízeného brzdného momentu, jež ovlivňuje skluz v kontaktu, který je měřen dvojicí enkodérů. Průběh brzdného momentu závisí na nastaveném měřicím módu – konstantní, rostoucí rampa, klesající rampa a pulzní. Zařízení umožňuje provádět měření za kontaktního tlaku 0,8 – 1 GPa, který je vytvářen hmotností měřicího modulu a závaží. Traťový tribometr se skládá z rámu s lineárním vedením, jehož konce jsou osazeny magnetickými základnami, pomocí kterých se zařízení připevňuje ke kolejnici. Další hlavní součástí je měřicí modul obsahující měřicí kolo, brzdu a momentový snímač zaznamenávající brzdný moment.

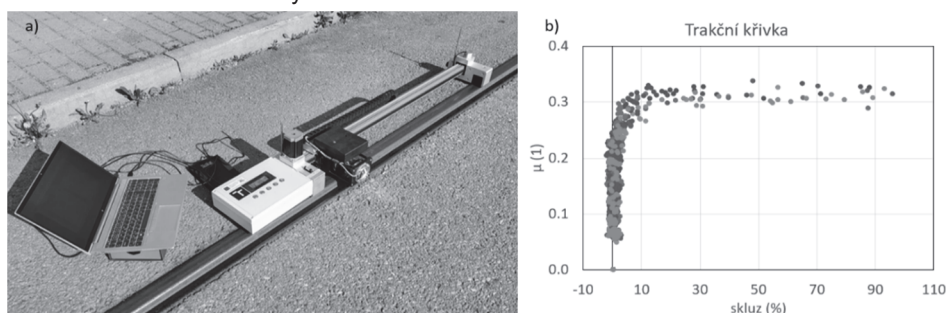


Obr. 1 Měřicí místo

Fig. 1 Place of interest

Byla zvolena tři měřicí místa M1–M3 (viz. **obr. 1**) na levé koleji vzdálená 30 m od sebe a jedno referenční na pravé koleji (stejná pozici jako M1), kde se provedlo měření na za atku a konci dne. Na v eich místech bylo měření prováděno na levé i pravé kolejnici, a to z důvodu zaznamenání p ıpadn ych rozdílů mezi kolejnici. Měřicí kolo traťového tribometru bylo před prvním měřením o iřteno; v průběhu dne již  iřten ı neprobíhalo. Ve v eich měřeních byl využit mód „rostoucí rampa“ a měřicí modul prováděl pohyb v obou směrech. Pokaždé tedy bylo provedeno 12 p ıjezd  (6 v každém směru), ze kterých byla složena výsledná trakční k ıvka. Typická trakční k ıvka je zobrazena na **obr. 2 b**).

Pro snaz ı porovnaní výsledků byla z každé trakční k ıvky stanovena p ırodn ı hodnota součinitele trakce, a to jako medián v intervalu skluzu 5 a  15 %, což odpovída oblasti saturace trakční k ıvky.



Obr. 2 a) Traťov ı tribometr, **b)** Trakční k ıvka

Fig. 2 a) BUT Rail Tribometer, **b)** Traction curve

2.3 Měření a hodnocení hlukových projev 

Pro autonomní monitorování hlukových projev  byl pou it hlukov ı modul, kterí byl umístěn na sloupu trolejového vedení ve vzdálenosti 11 m od středu oblouku a v ıšce 4 m. Hlukov ı modul obsahoval IEPE mikrofon t ıdny 2 a p ımyslov ı automat, kterí v reálném čase zpracovával FFT analýzu dat pro rozlišení ve frekvenční oblasti. Akustick ı tlak byl automaticky vyhodnocován v následujících frekvenčních pásmech, která byla stanovena na základě referenčních měření pí p ıjezdu vozidla:

-  irokop asmov ı hluk – 20 Hz – 10 kHz
- Hluk z temene („kvílení“) – 500 – 650 Hz
- Hluk od okolku („sk ıp n ı“) – 3800 – 5800 Hz

K vytvoření zápisu v každém frekvenčním pásmu došlo pokaždé, pokud byla překročena jistá prahová hodnota (hluk od temene 60 dB a od okolku 50 dB) a doba trvání hluku 0,3 s. V jednotlivých frekvenčních pásmech byla vyhodnocena střední efektivní hladina akustického tlaku, maximální hladina akustického tlaku a doba trvání hlukového projevu.

Vedle hlukových dat modul každou minutu zaznamenával pov etnostn ı podmínky, tedy teplotu a relativní vlhkost vzduchu a p ıtomenost deště. Dále byly využity informace o p ıjezdech tramv ıj z monitorovacího zařizení v ıhybky předřazené 200 m před obloukem. Z dat byl stanoven  as p ıjezdu, íslo tramv aje a kolej, po které souprava proj ızd ela.

Po získání dat bylo nutn e propojit jednotliv e p ıjezdy tramv ıj s u daji o hluku a pov etnostn ıch podmínkách. Nejprve byla ke každému hlukovému záznamu p ıřazena teplota, relativní vlhkost a de ř podle nejbli ıh o času. Maximální rozdíl, kterí mohl nastat, je 30 s, což je z pohledu v yoje počasí zanedbateln e. Po p ıjezdu tramv aje v ıhybkou bylo stanoveno 5minutov e okno a všechny hlukov e záznamy spadající do tohoto okna byly p ıřazeny danému p ıjezdu. Standardně jeden p ıjezd obsahoval několik hlukových

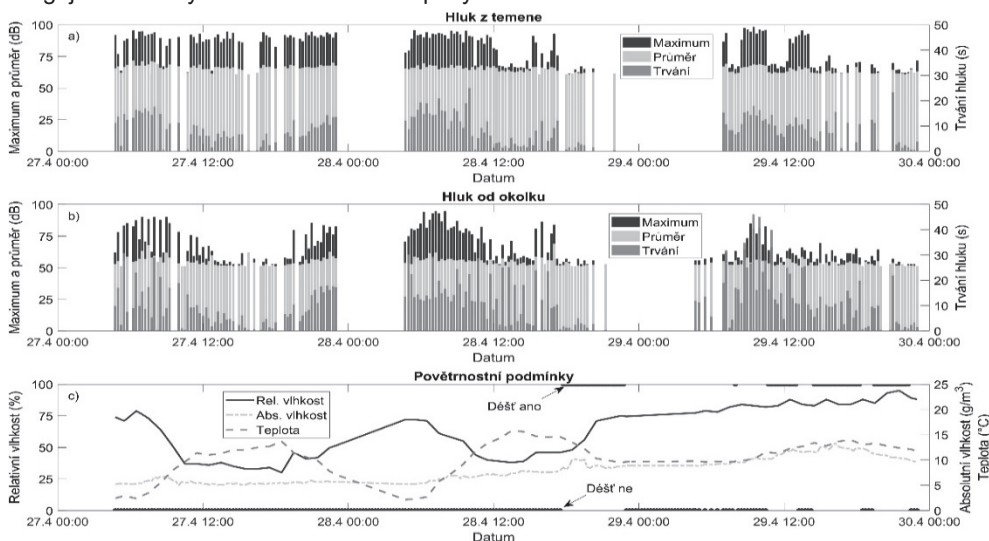
záznamů, neboť hluk není generován nepřetržitě po celý čas průjezdu obloukem, ale pouze v jistých oddělených intervalech.

Záměrem bylo vytvořit jeden záznam, který bude odpovídat jednomu průjezdu tramvaje, a proto byla využita agregace dílčích hlukových záznamů. Sloučené parametry teplota, vlhkost a déšť byly aritmetickým průměrem dílčích. Celková doba trvání tvořila součet jednotlivých dob trvání. Maximální efektivní hladina akustického tlaku byla získána výběrem nejvyšší hodnoty této hladiny ze všech záznamů. Průměrná efektivní hladina akustického tlaku byla stanovena kvadratickým průměrem hladin jednotlivých záznamů.

3 VÝSLEDKY A DISKUSE

3.1 Vliv povětrnostních podmínek na hluk

Obr. 3 zobrazuje zaznamenané parametry v průběhu tří dnů a dává ucelenou představu o tom, jak se v průběhu dne vyvíjí. Horní graf a) odpovídá hluku z temene, prostřední b) hluku z okolku a spodní c) zobrazuje povětrnostní podmínky. Průměrná efektivní hladina akustického tlaku se v obou případech téměř nemění a nelze ji považovat za vhodný parametr charakterizující hluk. Oproti tomu, délka projevu se jeví lépe, neboť reaguje na změny povětrnostních podmínek. U hluku od okolku se mění i maximální efektivní hladina akustického tlaku. V případě hluku z temene dochází k výrazné redukci maximálních hodnot za deště a k jejich okamžitému zvýšení, jakmile déšť ustane, což je patrné z grafu a) den 29.4. Hluk od okolku ovšem nemá tak silnou závislost na dešti, ale reaguje na změny relativní vlhkosti a teploty.



Obr. 3 Vývoj sledovaných parametrů v čase a) hluk z temene, b) hluk od okolku, c) povětrnostní podmínky

Fig. 3 Development of parameters in time a) squeal noise, b) flange noise, c) weather conditions

Porovnáním výsledků získaných v průběhu tří dnů s dlouhodobým monitoringem Malého [3] lze nalézt jistou podobnost. Malý totiž sledoval akustický výkon a nikoli hladiny akustického tlaku a doby trvání. Pokud ale přijmeme předpoklad, že se jedná o charakteristické parametry hluku, tak lze konstatovat, že závislosti na teplotě a relativní vlhkosti jsou shodné z pohledu monotónnosti.

TAB. 1 Korelační koeficienty hlavních závislostí
TABLE 1 Correlation coefficients of the main dependencies

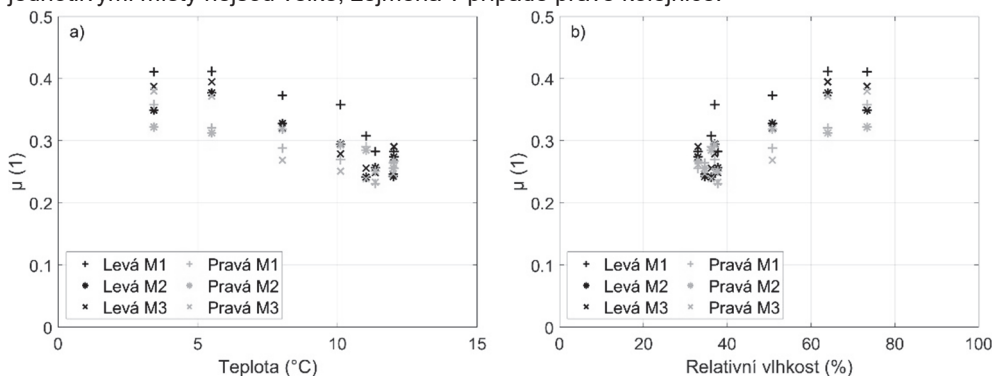
	Hluk z temene		Hluk od okolku	
	Doba trvání (s)	Maximální hladina (dB)	Doba trvání (s)	Maximální hladina (dB)
Relativní vlhkost (%)	0,6236	0,2540	0,3687	0,6437
Absolutní vlhkost (g/m ³)	-0,1674	-0,4547	0,1707	0,0248
Teplota (°C)	-0,6292	-0,4403	-0,2728	-0,5912

Povětrnostní podmínky (především vlhkost vzduchu) ovlivňují kromě samotné intenzity vznikajícího zvuku také jeho šíření do okolí. Proto byla vedle hladiny akustického tlaku hodnocena také doba trvání jednotlivých hlukových událostí, která je šířením zvuku prakticky nedotčena, a přitom je významná z hlediska negativního vnímání hluku.

Je třeba zdůraznit, že měření a vyhodnocení hluku neprobíhalo záměrně podle norem pro měření hluku vyzařovaného kolejovými vozidly (zejména ČSN EN ISO 3095 (280350)), a to zejména z pohledu použitých měřicích přístrojů, umístění mikrofonu a použití třetinooktávových pásem. Cílem bylo umožnit dlouhodobé autonomní monitorování hluku v místech, kde jsou tyto projevy negativně vnímány, a stanovit parametry vyjadřující intenzitu hlukových projevů s ohledem na tonální a často impulzní/krátkodobé působení.

3.2 Vliv povětrnostních podmínek na součinitel trakce

Obr. 4 a) zobrazuje součinitel trakce vykreslený v závislosti na teplotě a b) na relativní vlhkosti. Barevně jsou odlišeny koleje (levá a pravá) a symboly se liší jednotlivá místa měření. Levá kolej ve všech případech vykazovala vyšší součinitel adheze, což může být dané větším zajeťm z důvodu prokluzu vnitřního kola v oblouku. Rozdíly mezi jednotlivými místy nejsou velké, zejména v případě pravé kolejnice.



Obr. 4 Vliv povětrnostních podmínek na μ a) Teplota, b) Relativní vlhkost

Fig. 4 Effect of weather conditions on μ a) Temperature, b) Relative humidity

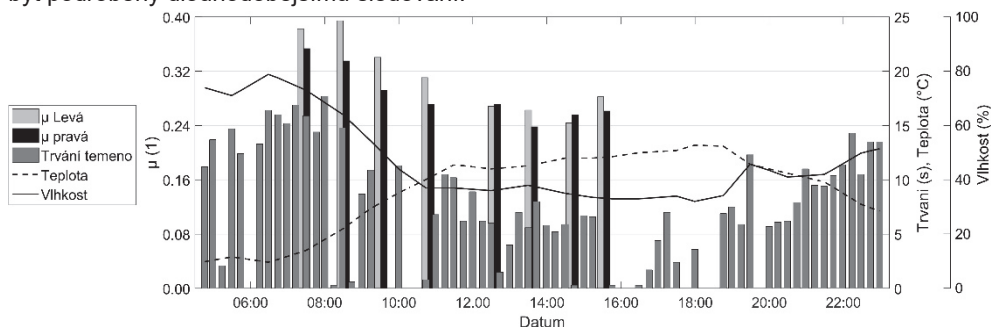
Graf a) ukazuje klesající závislost na teplotě, což je v souladu s pozorováními provedenými v laboratoři [5, 6]. Oproti tomu graf b) zobrazuje rostoucí součinitel trakce v závislosti na relativní vlhkosti. To je ovšem obrácený trend, než je popsán v literatuře [5, 6]. Ve studiích se ke zvýšení relativní vlhkosti využilo přidávání vodních par a tím došlo i ke zvýšení absolutní vlhkosti. V průběhu experimentů byla držena konstantní teplota. Z **obr. 3** a) je ovšem patrné, že absolutní vlhkost se v průběhu měření téměř neměnila, což je hlavní

rozdíl oproti uvedeným studiím. Na základě to lze vyvodit, že relativní vlhkost se mění v důsledku změny teploty, a proto vykazuje rozdílný trend. Z toho důvodu lze považovat změnu teploty jako hlavní příčinu změny součinitele trakce. Korelační koeficient pro závislost na teplotě je -0,835 a na vlhkosti 0.816.

3.3 Souvislost mezi součinitelem trakce a délkou trvání hluku z temene

Obr. 5 vykresluje průběh délku hluku od okolku spolu s teplotou, relativní vlhkostí a součinitelem trakce ze dne 27.04.2023. Doba trvání nejprve roste, kolem 8. hodiny dosáhne svého maxima a následně pozvolna klesá až do 16. hodiny. Tento pokles byl změřen i u součinitele trakce na obou kolejnicích. Na základě záznamů o přejezdech stanic [7] lze usuzovat, že součinitel trakce bude v časných ranních hodinách nižší, a tedy bude mít podobný průběh jako délka trvání. Vyšším součinitelem trakce vznikne větší příčná síla, která vybudí silnější vibrace kola, jež se projeví delším trváním hluku.

Jedná se pouze o jeden měřicí den, a závěry z něj mají omezenou platnost, což je největší limitace této studie. Na druhou stranu ukazuje zajímavé souvislosti, které by měly být podrobeny dlouhodobějšímu sledování.



Obr. 5 Denní záznam trvání hluku z temene a součinitele trakce

Fig. 5 Daily record of noise duration and traction coefficient

4 ZÁVĚR

Studie se zabývala vlivem povětrnostních podmínek na hluku z temene i okolku a na součinitel trakce. Ke sledování hluku, teploty a relativní vlhkosti, které probíhalo na konci dubna, byl využit hlukový modul. Součinitel trakce byl měřen pomocí traťového tribometru. Z výsledků plynou následující závěry:

- Hluk z temene je nejlépe charakterizovaný délkou projevu, která se s rostoucí relativní vlhkostí prodlužovala a zkracovala s rostoucí teplotou.
- Hluk od okolku je charakterizovaný i maximální hladinou akustického tlaku a vykazuje stejné trendy jako hluk z temene.
- Maximální hladina akustického tlaku z temene výrazně klesá za deště, ovšem u okolku tento jev není tak výrazný.
- Zásadnější vliv na hluk má teplota než relativní vlhkost, neboť absolutní vlhkost nevykazovala výraznější změny.
- Součinitel trakce klesal s rostoucí teplotou.
- Součinitel trakce vykazuje stejný trend jako délka trvání hluku z temene.

Další výzkum by měl být zaměřen na delší časové období, ve kterém bude hluk monitorován, tak aby obsáhl větší rozptýlení povětrnostních podmínek. Vedle toho by měl být sledován součinitel trakce v průběhu celého dne, což by pomohlo objasnit jeho vývoj v brzkých ranních a večerních hodinách. Pro ověření poznatků by bylo vhodné měření provést ve více dnech a ročních obdobích.

Výzkum byl realizován v rámci projektu *Národní centrum kompetence inženýrství pozemních vozidel Josefa Bořka* (TN02000054), který je spolufinancován se státní podporou Technologické agentury ČR v rámci Programu Národní centra kompetence

Literatura

[1] **Müller, B. a J. Oertli.**: Combating Curve Squeal: Monitoring existing applications. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, roč. 293,  . 3–5, s. 728–734. ISSN 0022-460X. [2] **Iwnicki, S., M. Spiriyagin, C. Cole a T. Mcsweeney.**: Handbook of Railway Vehicle Dynamics. B.m.: CRC Press, 2019. ISBN 9780429469398. [3] **Maly, T., F. Biebl a M. Ostermann.** The effects of weather conditions and wheel wear on curve squeal. *Proceedings of the International Congress on Acoustics*. 2019, s. 1559–1566. ISSN 24151599. [4] **Eriksson, O., P. Torstensson, A. Pieringer, R. Nilsson, M. H ojer, M. Asplund a A. Świerkoska.** Statistical analysis of curve squeal based on long-term onboard noise measurements. V: 21st Nordic Seminar on Railway at Technology Tampere University. 2022. [5] **Galas, R, M. Omasta, L. Shi, H. Ding, W. Wang, I. Krupka a M. Hartl.** The low adhesion problem: The effect of environmental conditions on adhesion in rolling-sliding contact. *Tribology International*. 2020, ro . 151. ISSN 0301679X. [6] **Lewis, S. R., R. Lewis, U. Olofsson, D. T. Eadie, J. Cotter a X. Lu.** Effect of humidity, temperature and railhead contamination on the performance of friction modifiers: Pin-on-disk study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013, ro . 227,  . 2, s. 115–127. ISSN 0954-4097. [7] **White, B. T., R. Nilsson, U. Olofsson, A. D. Arnall, M. D. Evans, T. Armitage, J. Fisk, D. I. Fletcher a R. Lewis.** Effect of the presence of moisture at the wheel-rail interface during dew and damp conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part F-Journal of Rail and Rapid Transit*. 2018, ro . 232,  . 4, s. 979–989. ISSN 0954-4097.



Resum e

*Hluk kolejov e dopravy je neř adouc im projevem, kter y sniřuje kvalitu řivota zejména v obydlen ych oblastech. P
edevř im tonální projevy, které vznikají p
i jízdě traťovým obloukem, jsou velmi negativně vnímány. Cílem této práce je objasnit vliv provozních a pov etnostn ich podmínek na hlukov e projevy v traťovém oblouku tramvajové dráhy a porovnat tyto výsledky s m řen m součinitele trakce. Hluk byl sledován dlouhodobě pomocí modulu zaznamenávající délku hluku a hladinu akustického tlaku ve dvou frekven n ich p asmech, které odpov idaj i hluku od okolku a temene. Sou initel trakce byl m řen v p
uběhu jednoho dne pomocí traťov eho tribometru. V p
 spěvku jsou diskutov ny jednotliv e vlivy na hluk z temena kolejnice a okolku, které jsou n sledn e korelov ny se sou initelem trakce.*

Summary

Railway noise is an unwanted side effect of rail transport that reduces the quality of life in populated areas. In particular, the tonal squeal, generated when a vehicle passes through a curve, is perceived negatively. The aim of this paper is to clarify the influence of operational and weather conditions on a noise from the tramway track curve and to compare these results with the measurement of the traction coefficient. The noise was monitored over a long period using a module that records the noise duration and sound pressure level in two frequency bands, corresponding to squeal and flange noise. The traction coefficient was measured during one day using a track tribometer. The paper discusses the individual effects on squeal and flange noise, which are then correlated with the traction coefficient.

