Vysoké učení technické v Brně
Fakulta strojního inženýrství
Ústav konstruování

Brno University of Technology
Faculty of Mechanical Engineering
Institute of Machine and Industrial Design

VZNIK KVÍLIVÉHO HLUKU V KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE S MODIFIKOVANÝMI TŘECÍMI VLASTNOSTMI

Ing. Václav Navrátil

Pojednání ke státní doktorské zkoušce

Discourse on the Dissertation Thesis

BRNO 2021

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VZNIK KVÍLIVÉHO HLUKU V KONTAKTU KOLA A KOLEJNICE S MODIFIKOVANÝMI TŘECÍMI VLASTNOSTMI
SQUEAL NOISE GENERATION IN THE WHEEL-RAIL CONTACT WITH MODIFIED FRICTION

POJEDNÁNÍ KE STÁTNÍ DOKTORSKÉ ZKOUŠCE
DISCOURSE ON THE DISSERTATION THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. Václav Navrátil
AUTHOR

ŠKOLITEL — doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.
SUPERVISOR

BRNO 2021

OBSAH

1 ÚVOD 6

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE 7

3 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ 10

3.1 Vliv TOR produktů na adhezi a hluk 10

3.2 Mechanismy vzniku kvílivého hluku 15

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE 31

4.1 Vliv složení TOR produktu na hluk 31

4.2 Vliv provozních parametrů na hluk 32

4.3 Mechanismus vzniku kvílivého hluku 32

4.4 Nezmapovaná oblast poznání 33

5 VYMEZENÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ 35

5.1 Zaměření dizertační práce 35

5.2 Cíl dizertační práce 35

5.3 Způsob řešení a použité vědecké metody zkoumání 37

5.3.1 Laboratorní experimenty 37

5.3.2 Terénní měření 39

5.3.3 Plán publikací 40

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE 43

7 ZÁVĚR 50

BIBLIOGRAFIE 51

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ 56

SEZNAM TABULEK 58

SEZNAM PUBLIKACÍ 59

1 ÚVOD

Železnice je považována za k nejekologičtější z konvenčních způsobů dopravy. Avšak má i své nedostatky. Mezi ty nejvážnější patří kvílivý hluk, který vzniká při průjezdu kolejového vozidla ostrým traťovým obloukem. Tento hluk má silný tonální charakter a je velmi hlasitý, ale doba jeho trvání je krátká. Hladiny akustického tlaku, kterých kvílivý hluk dosahuje, jsou obvykle vyšší než 90 dB. V obydlených oblastech tak dochází k překračování hygienických limitů, a proto se vědci snaží přijít s řešením, které by vznik hluku potlačilo, nebo alespoň zmírnilo četnost jeho projevů. V současné době existují dvě možnosti, jak vzniku kvílivého hluku předcházet. První možností je tzv. tlumení kola. Součástí kola je pryžová vložka, která má za úkol zabraňovat vybuzení vlastních frekvencí kola. Toto řešení je vhodné zejména pro nově konstruované vozy, u starších vozů je výměna kol příliš nákladná. Proto existuje druhá možnost, která používá tzv. TOR produkty, které se aplikují do kontaktu kola a kolejnice a mají za úkol upravit míru adheze v kontaktu tak, aby nedošlo k hlukovým projevům. Tato technika se jeví jako perspektivní, avšak stále se objevují případy, kdy se kvílivý hluk projeví i po aplikaci TOR produktů do kontaktu kola a kolejnice. Tento problém pravděpodobně souvisí se samotným mechanismem vzniku kvílivého hluku.

Ten je však stále předmětem debat. Mezi vědci panuje shoda na tom, že příčinou vzniku hluku je třecí nestabilita v kontaktu kola a kolejnice. V době před nástupem TOR produktů dostatečně vysvětloval vznik kvílivého hluku mechanismus „klesajícího tření“. Ten hlavní roli připisuje třecí síle od příčného skluzu, který v traťovém oblouku vzniká. Tato síla je normálová na rovinu kola a pohání nestabilní oscilace kola. Tento mechanismus ale selhává v případě kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi. Proto byl v poslední době navržen mechanismus „propojení módů“, který spočívá v propojení oscilací normálové a třecí síly. Fázový posuv mezi těmito oscilacemi má za následek nárůst energie vibrací a vybuzení vibračních módů kola. Nejnovějším přístupem je myšlenka koexistence obou mechanismů vedle sebe. Vybuzení jednoho z mechanismů ale závisí na okamžitých provozních parametrech a okolních podmínkách. Tato oblast však doposud není dostatečně experimentálně zmapována.

Předložené pojednání ke státní doktorské zkoušce se zabývá vznikem kvílivého hluku v kontaktu kola a kolejnice. Zvláštní pozornost je věnována kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi. Motivací pro řešení práce je zmírnění negativních dopadů železniční dopravy na životní prostředí v okolí železničních tratí.

2 VYMEZENÍ ŘEŠENÉ PROBLEMATIKY A PŘEDBĚŽNÉHO CÍLE DISERTAČNÍ PRÁCE

Kvílivý hluk je jedním z největších problémů kolejové dopravy. K jeho projevům dochází během průjezdu vozidla ostrým traťovým obloukem. Tento hluk má silný tonální charakter a je velmi hlasitý [1]. Hladiny akustického tlaku, kterých kvílivý hluk dosahuje, jsou obvykle vyšší než 90 dB. Z tohoto důvodu je kvílivý hluk velmi nepříjemný v obydlených oblastech. Müller a Oertli [2] vypočítali, že v hustě osídlených oblastech v okruhu 250 metrů od zdroje kvílivého hluku může být ovlivněno až 1000 obyvatel.

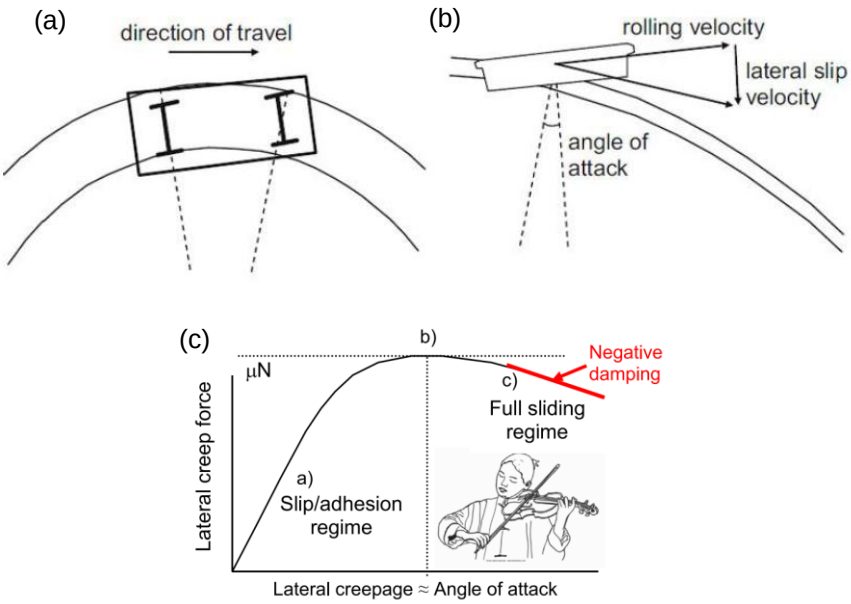
Kvílivý hluk obecně vzniká v důsledku oscilací kola vyvolaných silami vzniklými vlivem příčného skluzu [3, 4], které vznikají při průjezdu vozidla obloukem. Proto je možné snižovat kvílivý hluk dvěma způsoby: tlumením kola [5, 6] a přizpůsobením třecích vlastností kontaktu kola a kolejnice [7, 8]. Přídavné tlumení kola může snížit hladinu akustického tlaku až o 15 dB [9]. Avšak toto řešení je limitováno úzkým frekvenčním pásmem, na které je tlumení naladěno. Úprava třecích vlastností v kontaktu je možná aplikací různých produktů na temeno hlavy kolejnice. Tzv. top-of-rail (TOR) produkty zahrnují modifikátory tření na vodní bázi a TOR maziva na olejové bázi. Tyto produkty umožňují udržovat pozitivní trend trakční křivky a součinitel tření na vhodných hodnotách. Tlumení kol dává smysl při vývoji nových vozidel, ale pro stávající vozidla je výměna všech kol nákladná. Proto se zejména na tramvajových tratích využívají mazací systémy aplikující TOR produkty.

Přítomnost TOR produktů v kontaktu může změnit trend trakční křivky za bodem saturace z negativního na neutrální nebo pozitivní, čímž dojde k prevenci vzniku stick-slip oscilací a třecí nestability v kontaktu [10, 11]. Složení TOR produktů se postupně vyvíjelo [12–14]. Obecně se TOR produkty skládají ze základové báze, pojiva, částic pro modifikaci tření a tuhého maziva [15]. Podle typu báze pak lze TOR produkty rozdělit na *TOR maziva*, což jsou směsi na olejové bázi, a na *modifikátory tření*, ve kterých se jako báze používá voda. Ta se po aplikaci na kolejnici odpařuje, čímž dochází k vysychání modifikátoru, zatímco olejová maziva zůstávají polotekutá, a tak mohou být roznesena na delší vzdálenosti.

Laboratorní výzkum na několika testovacích zařízeních prokázal schopnost TOR produktů měnit negativní trend trakční křivky na pozitivní [16–18]. Meehan a Liu [19] pomocí testovacího zařízení a matematického modelu ukázali, že existuje hranice součinitele adheze, pod kterým je kvílivý hluk efektivně eliminován pro všechny úhly náběhu. Galas [15] a Fasihi [20] studovali vliv složení jednotlivých komponentů TOR produktů na adhezi a opotřebení, avšak v jejich práci chybí hlubší popis dopadů na hluk. Zároveň proběhlo několik terénních studií, které zkoumaly vliv TOR produktů na hluk. Eadie [3, 4] testoval TOR produkty na tratích v různých evropských zemích a došel k závěru, že při použití TOR produktů dochází k redukci hluku až o 12 dB. Galas [21] mimo vlivu na hluk sledoval také

vliv na brzdnou dráhu vozidla. Výsledky ukázaly, že je složité efektivně redukovat hluk bez značného ovlivnění brzdné dráhy. Několik dalších studií se také zabývalo vlivem TOR produktů na opotřebení kontaktních těles [15, 18] nebo na formování vlnkovitosti kolejí [22, 23], což je další nechtěný jev, ke kterému dochází v obloucích s malým rádiusem.

Některé terénní testy a zkušenosti se systémy pro úpravu třecích vlastností v kontaktu však ukazují, že snižování hluku není vždy tak úspěšné, jak se očekává. Curley [24] uvádí, že aplikace TOR produktů může být za určitých provozních podmínek neúčinná. Jeho výsledky prokazují dobré snížení hluku při použití lubrikantů okolku, zatímco při použití TOR modifikátorů tření nebylo dosaženo téměř žádného snížení hluku. Nejednoznačnými výsledky snižování hluku pomocí modifikátorů tření se zabýval Galas [21], Jiang [25] nebo Anderson [26], avšak doposud nebylo formulováno žádné jasné vysvětlení. Pro efektivní potlačení hluku je tak třeba lépe pochopit mechanismus jeho vzniku v kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi.



Obr. 2-1 (a) Průjezd vozidla traťovým obloukem; (b) vznik příčného skluzu; (c) trakční křivka [1, 8]

Mezi vědci [1, 27–29] panuje shoda v tom, že původcem kvílivého hluku je třecí nestabilita mezi kolem a kolejnicí. Rudd [30] stanovil základní teoretický přístup pro studium a simulaci tohoto fenoménu. Popsal tzv. „wheel crabbing“ jako efekt způsobující vznik kvílivého hluku. Tento efekt se objevuje, když vozidlo s aspoň dvěma pevnými, rovnoběžnými nápravami projíždí traťovým obloukem. Kolo se nemůže zarovnat ke kolejnici, což má za následek vznik třecí síly od příčného skluzu, viz **Obr. 2-1(a-b)** [31–33]. Vzhledem k rovině kola je tato třecí síla normálová a jejím vlivem se z kola stává zdroj hluku [34], především pokud je sklon trakční křivky negativní, viz **Obr. 2-1(c)**. Rudd také prohlásil, že se tato třecí síla chová jako síla s negativním tlumením, a tak pohání nestabilní oscilace kola. Tento koncept se nazývá „klesající tření“ (angl. falling friction) a popisuje většinu projevů kvílivého hluku. Většina z nedávných simulačních

modelů kvílivého hluku jsou založeny na Hecklově výzkumu [35–37]. Na jeho práci navázali například Talotte [29], Brunel [38], De Beer [39], Monk-Steel [40] nebo Chiello [41][30]. V nedávné době se tomuto problému věnovali Meehan a Liu [8, 19, 42–44], kteří vyvinuli analytický model pro predikci amplitudy kvílivého hluku. Ve svých studiích došli k závěru, že je model platný v oblasti s negativním sklonem křivky. V režimu pozitivního tření byly výsledky smíšené.

Také Curley [24] vypozoroval, že koncept klesajícího tření selhává ve vysvětlení projevů kvílivého hluku v režimu pozitivního nebo konstantního tření. Proto v poslední době několik autorů [45, 46] navrhlo jiný koncept, tzv. „propojení módů“ (angl. mode-coupling). Hoffmann [47, 48] tento mechanismus popisuje jako jev, kdy oscilace normálové síly způsobují oscilace třecí síly, která je tečná ke kolu. Fázový posuv mezi relativním posunutím v třecím kontaktu v tečném směru a oscilacemi síly vedou k nárůstu energie vibrací. To vede k nestabilitě typu propojení módů, která se může objevit i v režimu pozitivního nebo konstantního tření. První simulační model postavený na mechanismu propojení módů představil Glocker [45], který model založil na Kalkerově metodě [31]. Na jeho práci následně navázali Pieringer [46] a Zenzerovic [49]. Ding [50, 51] se zabýval možností, zda oba zmíněné mechanismy mohou koexistovat vedle sebe. Meehan [52] vyvinul analytický model pro predikci vzniku kvílivého hluku a jeho amplitudy, jehož pomocí prokázal, že mechanismus propojení módů může vedle způsobování kvílivého hluku vést také k jeho snížení a eliminaci. Jeho práce je zatím ale spíše teoretická a je nutné hlubší experimentální ověření.

I přes velké množství numerických i experimentálních studií, které se problematikou zabývaly v průběhu relativně dlouhé doby, nebyly doposud všechny otázky zodpovězeny. Z předchozích odstavců vyplývá, že mechanismus vzniku kvílivého hluku není uspokojivě vysvětlen. Obzvláště případy výskytu hluku v případě pozitivního tření nejsou zcela vysvětleny. Předběžným cílem dizertační práce je proto experimentálně objasnit vznik kvílivého hluku v kontaktu kola a kolejnice s modifikovanými třecími vlastnostmi.

3 SHRNUTÍ SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

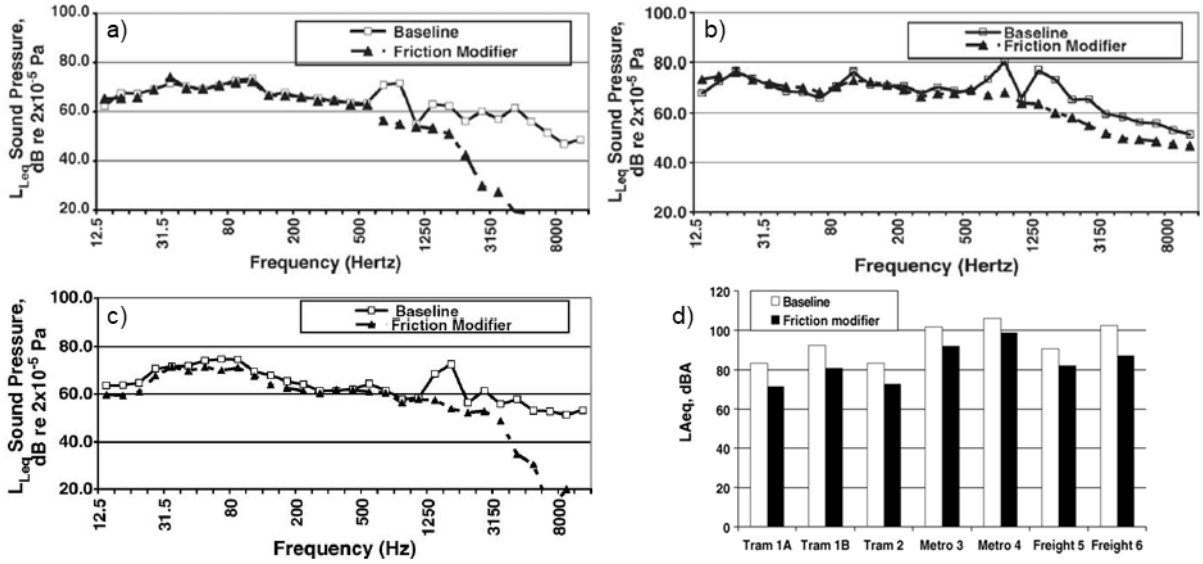
3.1 Vliv TOR produktů na adhezi a hluk

[3] EADIE, D. T., M. SANTORO, J. KALOUSEK. Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: changes in sound and vibration spectral distributions in curves.

[4] EADIE, D. T., M. SANTORO. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction.

Uvedené práce se zabývají vlivem TOR produktů na frekvenční pásma, na kterých se kvílivý hluk projevuje. První studie proběhla na systémech, které byly rozděleny do třech skupin. Jmenovitě šlo o (1) tramvaje v Evropě a Japonsku a železnice v Severní Americe se zatížením na nápravu 9-11 t; (2) evropské metro a železnice se středním zatížením 11-15 t v Severní Americe; (3) těžké nákladní vlaky se zatížením náprav v rozmezí 20-35 t. Druhá studie probíhala na pěti různých převážně tramvajových evropských systémech.

Výsledky



Obr. 3-1 Frekvenční pásma kvílivého hluku (a) Tramvaj 1A, (b) Tramvaj 1B; (c) Tramvaj 2; (d) Porovnání hladin akustického tlaku před a po aplikaci TOR produktu [3]

Pro všechny experimenty byl použit jeden TOR produkt na vodní bázi, a to produkt KELTRACK®. Ten po odpaření vody poskytuje střední hodnoty součinitele adheze v rozmezí 0.30-0.35. Na těchto hodnotách adheze nedochází k problémům vozidel s brzděním nebo trakcí. Měřené frekvenční pásma byla porovnávána ve stavu bez TOR produktu se stavem po aplikaci TOR produktu. Jak je vidět z **Obr. 3-1(a-c)**, rozdíl mezi těmito dvěma stavy byl pro tramvajové systémy výrazný ve frekvenčních pásmech

mezi 1-5kHz. Z naměřených hladin akustického tlaku také autoři došli k závěru, že je možné pomocí TOR produktů dosáhnout redukce hluku od 7.3 do 15.5 dB, průměrně tedy téměř 11 dB, viz **Obr. 3-1(d)**.

Z výsledků vyplývá, že TOR produkty jsou schopny redukovat kvílivý hluk pro různé systémy. Ukázalo se, že aplikací TOR produktů lze ovlivnit také hluk od okolku, který v ostrých traťových obloucích také vzniká. Tento pokles hluku od okolku je pravděpodobně způsoben tím, že je TOR produkt vytlačen i na kontaktní plochu okolku a snižuje zde součinitel adheze na optimální hodnoty.

Následující článek potvrdil výsledky první studie. Jak bylo zmíněno výše, TOR produkty byly efektivní v redukci kvílivého hluku. Během měření na tratích s nižším zatížením nápravy docházelo ke snížení hluku v rozmezí 6.3-22.8 dB, průměrně bylo dosaženo redukce kolem 12 dB. Byly zde však pozorovány i některé mírné rozdíly. Frekvenční pásma, na kterých byly viditelné změny, se pro kvílivý hluk pohybovaly v rozmezí 500 Hz-5 kHz.

Závěr

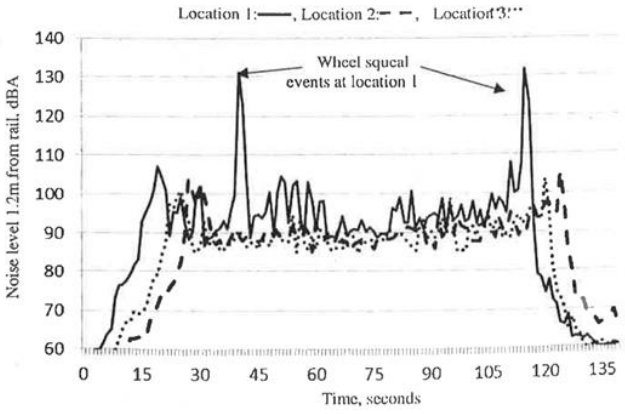
Tyto dvě studie jsou jedny z prvních studií provedených na reálné trati. Z uvedených výsledků vyplývá, že kvílivý hluk se pohybuje ve frekvenčním rozsahu mezi 500-5000 Hz. TOR produkt na vodní bázi KELTRACK® snižoval hluk napříč různými železničními systémy. Autoři tak prokázali, že je aplikace TOR produktů efektivní cestou, jak docílit snížení hlukového znečištění.

---

[24] CURLEY, D., D. C. ANDERSON, J. JIANG, D. HANSON. Field Trials of Gauge Face Lubrication and Top-of-Rail Friction Modification for Curve Noise Mitigation.

Tato studie vyhodnocuje různé techniky modifikace tření, které byly zkoumány po dobu sedmi měsíců v Sydney na trati pro osobní a nákladní vlaky. Testovány byly různé TOR produkty a lubrikanty pojezdové plochy, jak samostatně, tak v kombinaci. Tyto produkty byly aplikovány v různém množství a na různá místa oblouku.

Výsledky



Obr. 3-2 Časový záznam hladin akustického tlaku pro průjezd nákladního vlaku. [24]

Obr. 3-2 ukazuje časový průběh měřených hladin akustického tlaku v testovacím oblouku a porovnává tři měřící body. V bodě 1 nebyla kolejnice nijak ošetřena, v bodě 2 a 3 byl aplikován TOR produkt. Při porovnání naměřených dat jsou viditelné dva ostré peaky, které značí projevy kvílivého hluku.

Obecně lze říci, že oba způsoby – jak TOR produkty, tak lubrikanty pojezdové plochy – jsou vhodné pro redukci hluku, který v traťových obloucích vzniká. Výsledky testů ale přinesly dva závěry, které jsou v rozporu s teorií a výsledky předchozích experimentů. První konflikt se týká závěru, že lubrikant pojezdové plochy kolejnice má větší vliv na redukci kvílivého hluku než TOR produkt. Druhým konflikt vyplývá ze závěru, že aplikace TOR produktu na vnitřní kolejnici nepřináší žádné benefity. Tento závěr je v rozporu s teorií, která říká, že kvílivý hluk vzniká v důsledku sil od příčného skluzu a třecí nestability na vnitřní kolejnici.

Závěr

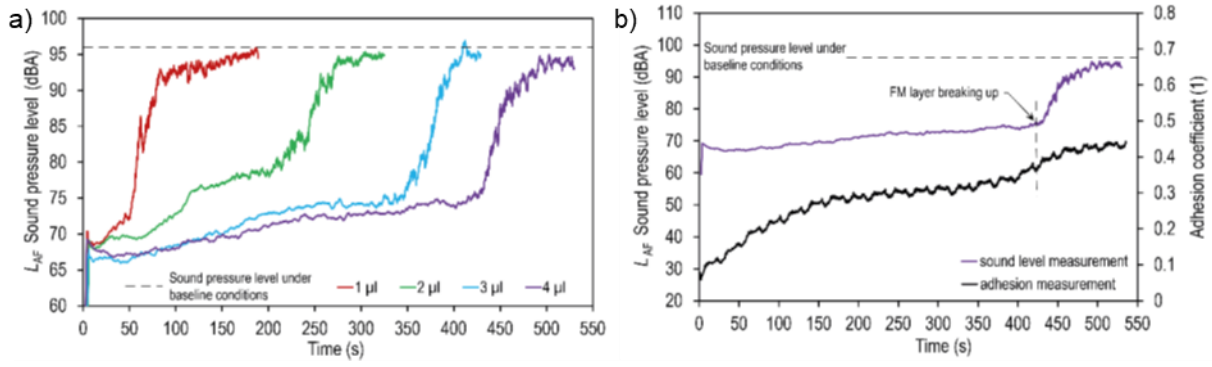
Tato studie ukazuje nejednoznačnosti ve výsledcích experimentů s TOR produkty na reálné trati. Ze studie vyplývá, že existují podmínky na trati, kdy je modifikace třecích vlastností v kontaktu neúčinná. Z tohoto důvodu je nutný další výzkum v oblasti parametrů, které vznik kvílivého hluku ovlivňují.

---

[21] GALAS, R., M. OMASTA, M. KLAPKA, S. KAEWUNRUEN, I. KRUPKA a M. HARTL. Case study: The influence of oil-based friction modifier quantity on tram braking distance and noise.

Cílem této práce bylo sledovat vliv množství aplikovaného TOR produktu na brzdnou dráhu vozidla a vyzářený hluk. Studie byla rozdělena na laboratorní a terénní část. Pro laboratorní část práce bylo využito dvoudiskové zařízení. Terénní experimenty probíhaly na tramvajové trati v Brně.

Výsledky

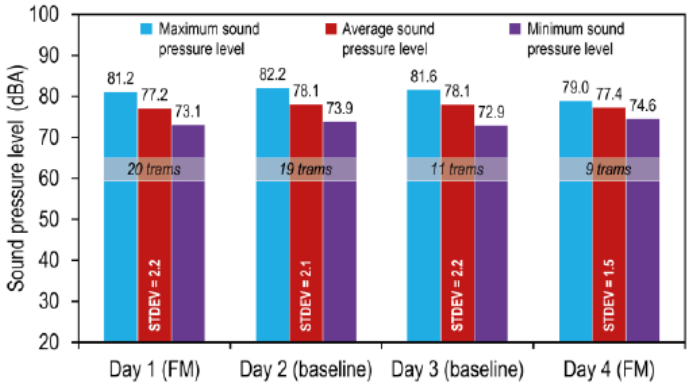


Obr. 3-3 (a) Efekt množství TOR produktu na hluk; (b) Porovnání měření adheze a hluku [21]

Autoři pro testy použili TOR produkt na olejové bázi NLGI 1, který obsahuje rostlinný olej, zahušťovadlo a vločky Cu a Zn. Tento TOR produkt poskytuje střední úroveň

adheze a pozitivní charakteristiku tření. Laboratorní testy spočívaly ve stanovení aplikovaného množství TOR produktu. Testovány byly čtyři dávky: 1, 2, 3 a 4 µl. Všechna testovaná množství redukovala hluk z 97 dBA na hladiny mezi 64-68 dBA ihned po aplikaci, viz **Obr. 3-3(a)**. Poté, co součinitel adheze dosáhl hodnot větších než 0.35, došlo k postupnému nárůstu hladin akustického tlaku, viz **Obr. 3-3(b)**. Z grafů také vyplývá, že testovaná množství 2, 3 a 4 µl dokážou redukovat hluk efektivně. Množství 1 µl neposkytuje dlouho trvající efekt a po několika desítkách cyklů jeho efekt odezní.

Terénní testy proběhly s množstvím 1, 2 a 4 g/kolejnici. Nejprve proběhly testy brzdné dráhy, které ukázaly, že aplikace množství 2 a 4 g/kolejnici vede ke značnému prodloužení brzdné dráhy vozidla. Použití těchto množství v běžném provozu by tak mohlo snížit bezpečnost na trati. Testy s množstvím 1 g vedly k uspokojivějším výsledkům, protože brzdná dráha byla ovlivněna minimálně, a proto autoři přistoupili k měření hluku. TOR produkt byl aplikován první a čtvrtý den měření, druhý a třetí den měření probíhalo bez aplikace TOR produktu. Jak je vidět na **Obr. 3-4**, aplikace množství 1 g/kolejnici neměla žádný výrazný efekt na redukci vyzářeného hluku. Tyto výsledky korespondují s laboratorními měřeními, kdy byl vliv nejmenšího aplikovaného množství také zanedbatelný.



Obr. 3-4 Měření hladin ak. tlaku pro modifikovaný kontakt a za suchých podmínek [21]

Závěr

Laboratorní a terénní experimenty ukázaly, že je velmi těžké dosáhnout efektivní redukce hluku, aniž by byla výrazně ovlivněna brzdná dráha vozidla vlivem kriticky nízké adheze. Také testované množství 1 g nemělo žádný pozitivní vliv na redukci hluku, ačkoliv bylo pozorováno roznesení TOR produktu po kolejnici.

---

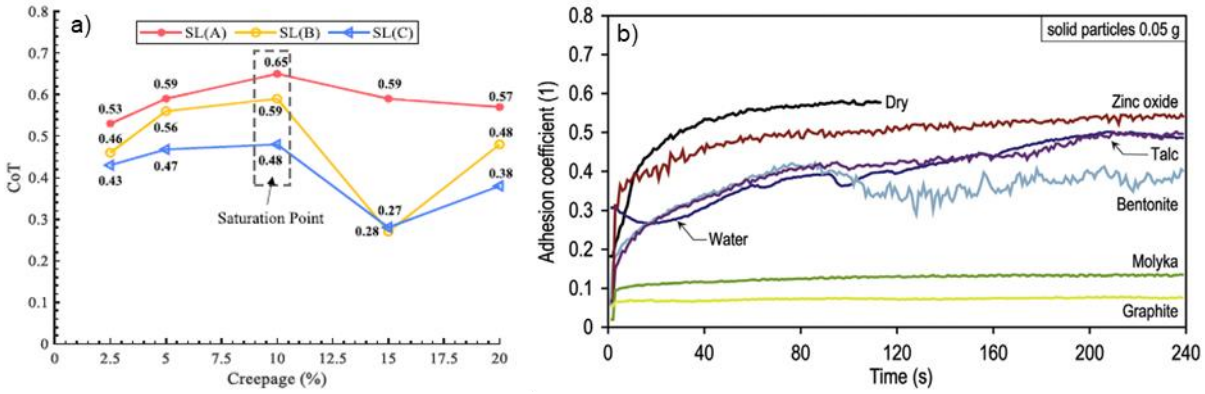
[15] GALAS, R., D. KVARDA, M. OMASTA, I. KRUPKA, M. HARTL. The role of constituents contained in water-based friction modifiers for top-of-rail application.

[20] FASIHI, P., O. KENDALL, R. ABRAHAMS, P. MUTTON, Q. LAI, C. QIU, W. YAN. Effect of graphite and MoS2 based solid lubricants for application at wheel-rail interface on the wear mechanism and surface morphology of hypereutectoid rails.

Uvedené studie se zaměřují na výzkum vlivu složení TOR produktu na adhezi a opotřebení v kontaktu kola a kolejnice. Fasihi a kol. [20] porovnávali produkty, které jako tuhé mazivo obsahovaly grafit nebo disulfid molybdenu a v menším množství i hliník a měď. Galas [15] zkoumal roli jednotlivých složek produktu. Jmenovitě šlo o vliv bentonitu, částic oxidu zinečnatého a mastku, disulfidu molybdenu a grafitu. Obě studie proběhly na dvoudiskovém zařízení.

Výsledky

Obr. 3-5(a) ukazuje porovnání experimentů se třemi produkty. Produkt SL(A) se skládal dominantně z disulfidu molybdenu s příměsí grafitu a hliníku. Zbylé produkty byly tvořeny grafitem s příměsí 5-7 hm. % mědi. Ve všech případech došlo ke snížení průměrného součinitele adheze v mazaném kontaktu oproti podmínkám v suchém kontaktu. Z grafu je zřejmé, že produkty SL(B) a SL(C), které obsahovaly zejména grafit, dosahovaly lepších výsledků, nejmarkantnější rozdíl se objevil při skluzu 15 %. Produkt SL(C) byl schopen redukovat součinitel adheze o 96 % po aplikaci a o zhruba 55 % po ustálení.



Obr. 3-5 (a) Trakční křivky testovaných kompozic [20], (b) Třecí křivky jednotlivých komponentů [15]

Na obrázku **Obr. 3-5(b)** je uvedeno porovnání jednotlivých složek TOR produktu na vodní bázi. Je patrné, že tuhá maziva, v tomto případě grafit a disulfid molybdenu, velmi výrazně snižují součinitel adheze v kontaktu. Hodnota součinitele adheze pro bezpečné zastavení je dle Fulforda [53] 0.09. Disulfid molybdenu dosahuje hodnot lehce nad touto hranicí, grafit se pohybuje dokonce pod ní. Tyto výsledky značí, že by v reálném kontaktu mohlo být dosaženo kriticky nízké adheze.

Autoři dále testovali různé kombinace těchto částic od jednodušších kompozic po složitější. Testovány byly „mokré“ filmy a filmy po odpaření základové báze. Na základě dosažených výsledků lze konstatovat, že kompozice obsahující vodu a bentonit poskytují střední úroveň adheze a nezpůsobují problémy s nízkou adhezí. Vysoké množství mastku v substancích vedlo k dosažení kriticky nízké adheze, což by mohl být problém na reálné trati. Proto by TOR produkt měl obsahovat méně než 10 hm. %. Výsledky kompozic byly také ovlivněny odpařením základového média. Například kompozice obsahující mastek

dosahovaly výrazně lepších výsledků po odpaření vody. Naproti tomu kompozice obsahující oxid zinečnatý dosahovaly stabilnějších hodnot součinitele adheze před odpařením vody.

Závěr

Obě studie se zaměřili na roli složení TOR produktů na hodnoty součinitele adheze. Bohužel ani v jedné práci nebyl zohledněn vliv složení na hluk. Studie ale poskytují základní poznatky, které mohou být využity při výběru vhodného TOR produktu pro účely experimentů v rámci dizertační práce. Výsledky experimentů ukázaly, že množství tuhého maziva v TOR produktu bude mít značný vliv na redukci adheze. V reálném provozu by tak mohlo dojít k problémům s brzděním vozidel, což je nepřípustné.

3.2 Mechanismy vzniku kvílivého hluku

[46] PIERINGER, A. A numerical investigation of curve squeal in the case of constant wheel/rail friction.

Tato páce se zabývá vývojem detailního dynamického modelu kontaktu kola a kolejnice v časové oblasti, který uvažuje propojení mezi normálovým a tečným směrem dynamiky kola. Základním předpokladem práce je, že stick/slip oscilace v režimu konstantního tření jsou projevem propojení normálového a tečného směru dynamiky kola.

Výsledky

Pro vývoj modelu je zvolen mechanismus propojení módů. Z důvodu snížení výpočetní náročnosti modelu kontaktu kola a kolejnice bylo vozidlo a trať reprezentovány funkcemi impulzní odezvy derivovanými z detailních MKP modelů. Model kontaktu je implementací Kalkerova modelu CONTACT [31], což je 3D nestabilní model valivého kontaktu založený na předpokladu, že kolo a kolejnice mohou být lokálně aproximovány pružnými poloprostory. Implementace modelu spočívá v zahrnutí vlivu drsností povrchů kola a kolejnice. Za předpokladu, že jsou kolo a kolejnice vyrobeny ze stejného materiálu, může být normálový a tečný kontaktní problém řešen odděleně. Normálový kontaktní problém spočívá ve výpočtu místních vertikálních posunutí a kontaktního tlaku v každém elementu kontaktní oblasti. Tečný kontaktní problém spočívá v určení toho, které elementy jsou ve stick nebo slip režimu a výpočtu místních tečných posunutí a tečných napětí na povrchu.

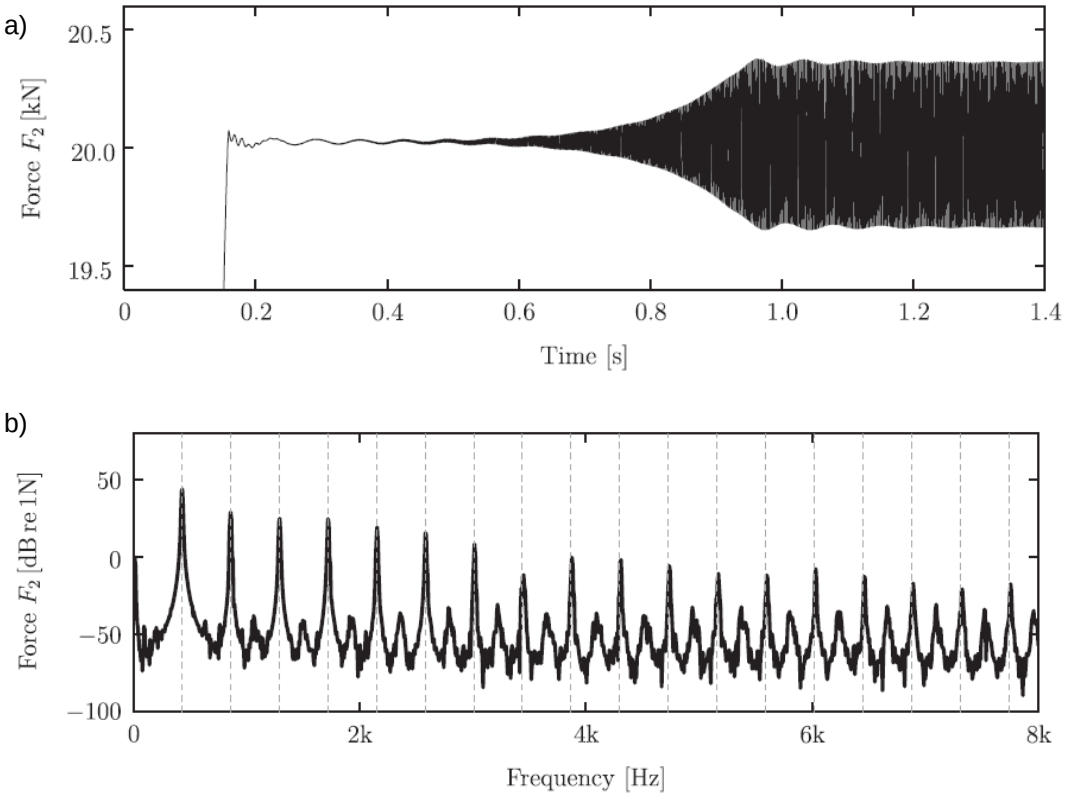
Dynamické simulace byly počítány pro různé vstupní parametry tak, aby byly objeveny případné nestability. Každá simulace trvala 3,5 s, zatížení a skluzy byly aplikovány postupně během prvních 0,14 s simulace. Zda dochází ke stick/slip oscilacím bylo vyhodnocováno na základě hladiny L_{F_2}:

$$L_{F_2} = 20 \cdot \log \frac{F_{2,rms}}{1\ N}. \quad (1)$$

Ta je vypočítána z efektivní hodnoty laterální síly $F_{2,rms}$ *(N)*.

$$L_{2,rms} = \sqrt{\frac{1}{T}\int_{t_1}^{t_1+T}(F_2(t) - \bar{F}_2)^2 \mathrm{d}t}, \quad (2)$$

kde $\bar{F}_2$ je průměrná hodnota síly v uvažovaném časovém intervalu. Efektivní hodnota je vypočítávána z časového okna 0,15 s. Během simulací je zaznamenáván průběh laterální síly F_2, viz **Obr. 3-6(a)** a také odpovídající frekvenční spektrum oscilací, viz **Obr. 3-6(b)**. Z druhého grafu lze vyčíst hlavní frekvenční složku signálu. Během simulací při různých podmínkách autor stanovil tři různé hlavní frekvence, na kterých docházelo ke stick/slip oscilacím, viz **Tabulka 3-1**, a přiřadil jim nejbližší módy kola.



Obr. 3-6 (a) Časový průběh laterální síly v kontaktu; (b) Odpovídající frekvenční spektrum laterální síly [46]

Tabulka 3-1 Hlavní frekvenční složky simulací [46]

Frekvence (Hz)	Nejbližší mód kola	Simulace
434	(2,0,a)	I-X, XIV
5235	(7,0,a), (2,c)	XI, XII
1146	(3,0,a)	XIII

Závěr

Simulace potvrdily, že během stick/slip efektu může během průjezdu traťovým obloukem dojít nejen v případě klesajícího tření, ale také v případě konstantního tření. Projevy stick/slip efektu autor připisuje propojení mezi vertikální (normálovou) a tečnou dynamikou. Studie tak prokazuje, že je možné simulovat kvílivý hluk, který vznikne mechanismem propojení módů. Model byl verifikován na základě porovnání s Kalkerovým předchozím modelem, nikoliv však experimentálně.

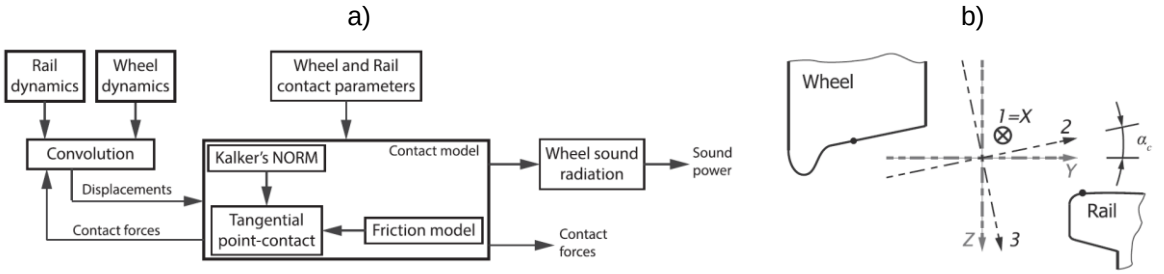
---

[49] ZENZEROVIC, I., W. KROPP, A. PIERINGER. Influence of spin creepage and contact angle on curve squeal: A numerical approach.

Cílem této práce bylo vyvinout simulační model kvílivého hluku rozšířený o vliv velikosti kontaktního úhlu a spinu, aby bylo možné zkoumat, jaký dopad mají hodnoty těchto parametrů na kvílivý hluk. Simulační model byl vyvinut na základě rozšíření předchozí práce Pieringera [46].

Výsledky

Model se skládá ze tří hlavních podmodelů, viz **Obr. 3-7(a)**, a to z modelu kola, kolejnice a valivého kontaktu. Rozšíření modelu spočívá v zahrnutí vlivu velikosti kontaktního úhlu a spinu kola. Velikost kontaktního úhlu je v modelu zanesena transformací souřadného systému v bodě kontaktu do souřadného systému kola a kolejnice, viz **Obr. 3-7(b)**. Spin je považován za parametr kontaktu a je zahrnut v předpočítané regulované trakční křivce. Tyto křivky jsou stanoveny pro každý součinitel tření, kontaktní případ a několik hodnot spinu. Výsledkem je regulovaná třecí mapa, která může být interpolována tak, aby bylo možné získat trakční křivku pro okamžitou hodnotu spinu.



Obr. 3-7 (a) Schéma vývoje modelu kvílivého hluku; (b) s. s. v bodě kontaktu (123) a s. s. kola a kolejnice [49]

Pomocí vyvinutého modelu byly provedeny dvě teoretické studie. První se zaměřila na vliv kontaktního úhlu a druhá na kombinovaný vliv kontaktního úhlu a spinu kola. Vliv velikosti kontaktního úhlu byl sledován pro tři kontaktní případy, pro hodnoty součinitele tření 0,3 a 0,6, při příčném skluzu -0,01 a spinu 0 po dobu 5 s. Velikost kontaktního úhlu byla variabilní v rozmezí 0-10° při kroku změny 1°. Pro různé konfigurace kvílivý hluk s rostoucím kontaktním úhlem mizel, nebo se naopak objevoval, pro jeden případ došlo dokonce ke změně vybuzeného frekvenčního módu kola. Druhá studie probíhala za stejných

podmínek s tím rozdílem, že spin γ_ω byl závislý na velikosti kontaktního úhlu α_c dle rovnice (3):

$$\gamma_\omega = \frac{1}{R}\cos\alpha_c - \frac{1}{r_0}\sin\alpha_c, \tag{3}$$

kde R = 120 m je poloměr traťového oblouku a r_0 = 0,39 m je nominální poloměr kola. Ve většině konfigurací bylo dosaženo velmi podobných výsledků jako při první studii, z čehož vyplývá, že dominantní vliv na vznik kvílivého hluku má velikost kontaktního úhlu.

Závěr

Tato studie prokázala, že velikost kontaktního úhlu má značný vliv na vznik kvílivého hluku, a to z toho důvodu, že přímo ovlivňuje dynamiku kontaktu. Naproti tomu spin kvílivý hluk ovlivňuje méně. Nemá vliv na vybuzený frekvenční mód kola, ale ovlivňuje amplitudu laterální síly.

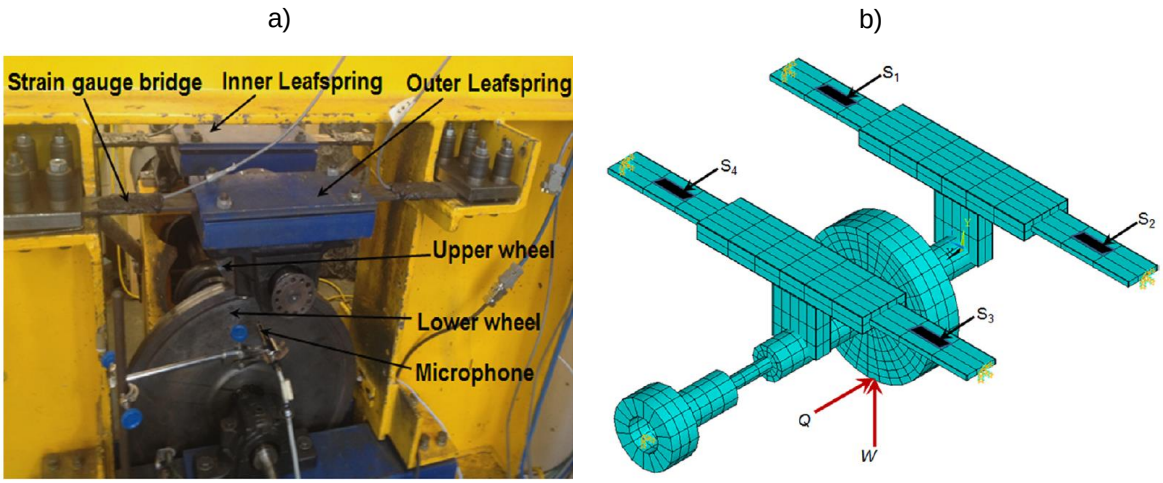
---

[43] LIU, X., P. A. MEEHAN. Wheel squeal noise: A simplified model to simulate the effect of rolling speed and angle of attack.

Tato práce se věnuje vývoji matematického modelu kvílivého hluku v časové oblasti, který umožňuje simulovat rychlost vibrací kola v závislosti na valivé rychlosti a úhlu náběhu kola. Tento model je postaven na mechanismu klesajícího tření.

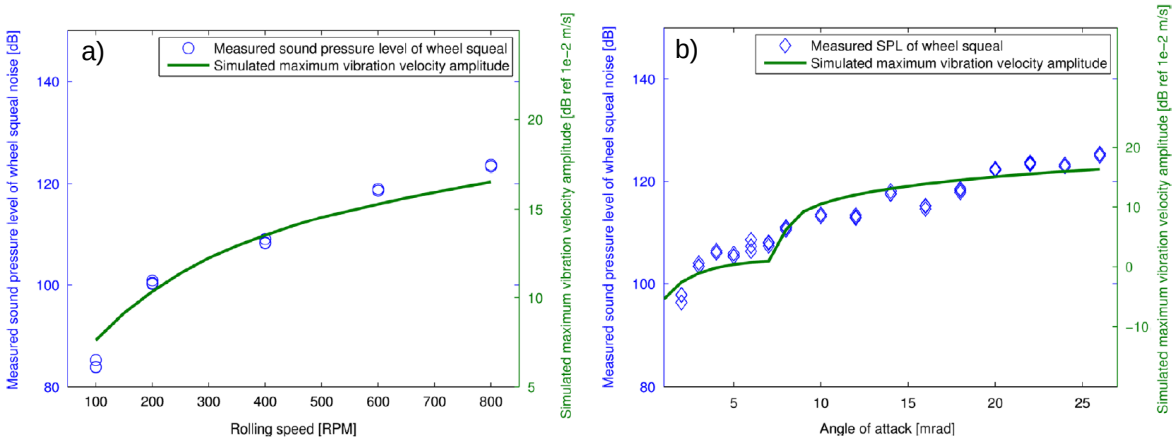
Výsledky

Při průjezdu traťovým obloukem určitou valivou rychlostí, vzniká vlivem příčného skluzu laterální rychlost, tzv. „crabbing velocity“, viz **Obr. 2-1(b)**. Vlivem této laterální rychlosti vzniká v kontaktu laterální síla, která způsobuje oscilace kola. Vliv této rychlosti byl zahrnut v simulačním modelu. Výsledky simulace byly porovnávány s experimentálními daty naměřenými na testovací soupravě, viz **Obr. 3-8**.



Obr. 3-8 (a) Testovací souprava; (b) MKP model testovací soupravy [43]

Vliv valivé rychlosti na kvílivý hluk byl zkoumán při úhlu náběhu 24 mrad. Bylo prokázáno, že měřená hladina akustického tlaku se zvyšuje s rostoucí valivou rychlostí, viz **Obr. 3-9(a)**. Stejně tak hladina akustického tlaku roste s rostoucím úhlem náběhu, viz **Obr. 3-9(b)**, přičemž zlom v závislosti při velikosti úhlu 8 mrad je připisován efektu negativního tlumení.



Obr. 3-9 (a) Simulované amplitudy rychlosti vibrací a měřené hladiny akustického tlaku pro úhel náběhu 24 mrad při různých valivých rychlostech; (b) Simulované amplitudy rychlosti vibrací a měřené hladiny akustického tlaku při valivé rychlosti 800 ot-1 pro různé úhly náběhu [43]

Závěr

Autor došel k závěru, že vyšší valivá rychlost způsobuje vyšší rychlost vibrací, což má za následek zvýšení hladiny akustického tlaku. Při zvyšování velikosti úhlu náběhu dochází posunu příčného skluzu mimo pozitivní sklon trakční křivky, což opět vede ke zvýšení rychlosti vibrací a zvýšení hladiny akustického tlaku. Také byla zavedena metodika, kdy jsou simulované výsledky validovány na základě experimentálních dat.

---

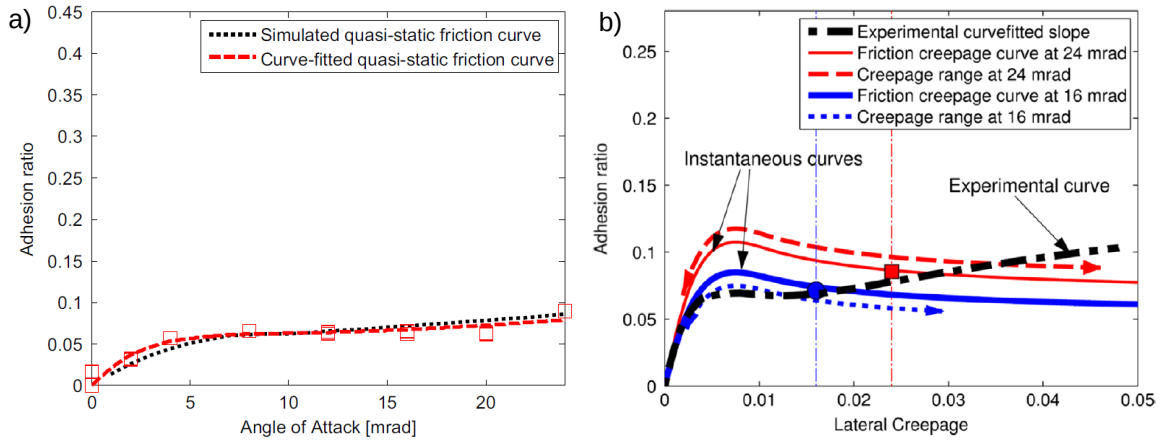
[44] LIU, X., P. A. MEEHAN. Investigation of squeal noise under positive friction characteristics condition provided by friction modifiers.

Cílem práce bylo vyvinout simulační model, který pomůže objasnit, proč dochází k projevům kvílivého hluku v kontaktu kola a kolejnice s modifikovanými třecími vlastnostmi. Je jednou z prvních studií, která se tímto problémem zabývá. Pro vývoj modelu pro predikci výskytu kvílivého hluku byl využit mechanismus klesajícího tření v časové oblasti.

Výsledky

V této práci byly sledovány součinitel adheze a hladina akustického tlaku při různých rychlostech a úhlech náběhu kola za suchých podmínek a při aplikaci TOR produktů na vodní a olejové bázi. Po aplikaci TOR produktů došlo ke snížení sil od příčného skluzu, přičemž větší pokles byl zaznamenán u TOR produktů na olejové bázi. Ukázalo se, že TOR produkty mají tendenci eliminovat nebo značně redukovat negativní sklon trakční křivky. Kvílivý hluk ale ve všech případech eliminován nebyl. **Obr. 3-10(a)** ukazuje, že simulovaná

trakční křivka koreluje s křivkou naměřenou pro TOR produkty na olejové bázi. Křivka má kvůli efektu rostoucí skluzové rychlosti při vyšších úhlech náběhu pozitivní sklon.



Obr. 3-10 (a) Simulovaná trakční křivka v kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi; (b) proces stanovení experimentální trakční křivky z průměrných součinitelů adheze při 800 ot^{-1} [44]

Dále byly pro jednotlivé úhly náběhu zjišťovány průměrné součinitele adheze, na jejichž základě byla stanovena experimentální trakční křivka, která má pozitivní sklon, viz **Obr. 3-10(b)**. Z grafu lze ale vyčíst, že okamžité trakční křivky pro jednotlivé úhly náběhu mají sklon negativní. Zde autoři vidí důvod toho, proč ke kvílivému hluku dochází, i když je sklon experimentální trakční křivky pozitivní. Toto chování může být vysvětleno tím, že laterální rychlost při vyšších úhlech náběhu vede k nárůstu teploty v kontaktu, který způsobuje nárůst součinitele tření. To se může projevit pozitivním sklonem trakční křivky, který je ale v reálu stále negativní.

Závěr

Tato studie potvrzuje fakt, že se kvílivý hluk projevuje, i když jsou třecí vlastnosti kontaktu kola a kolejnice modifikovány. Autoři také poskytují odpověď na otázku, jak je možné, že k hlukovým projevům dochází. Měřené okamžité trakční křivky pro různé úhly náběhu mají totiž negativní sklon. Kvílivý hluk tím pádem může vznikat mechanismem klesajícího tření.

---

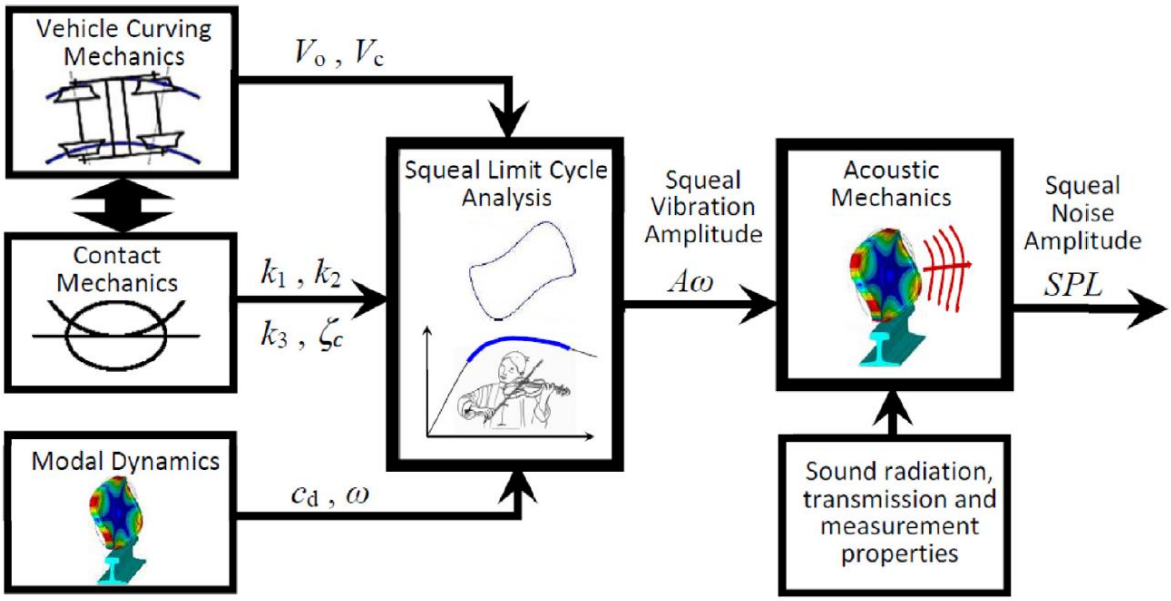
[42] MEEHAN, P. A., X. LIU. Modelling and mitigation of wheel squeal noise amplitude

Cílem uvedené studie bylo vyvinout matematický model, který by umožnil účinně predikovat amplitudy kvílivého hluku. Do predikce byly zahrnuty provozní parametry jako úhel náběhu a valivá rychlost. Na základě těchto predikcí by bylo možné předvídat, za jakých podmínek k hlukovým projevům dojde a bylo by tak možné je efektivněji redukovat.

Výsledky

Pro simulaci kvílivého hluku byl využit stejný model jako v předchozích pracích [43, 44]. Analytický model je dále rozšířen o analýzu kvílivého hluku, díky které

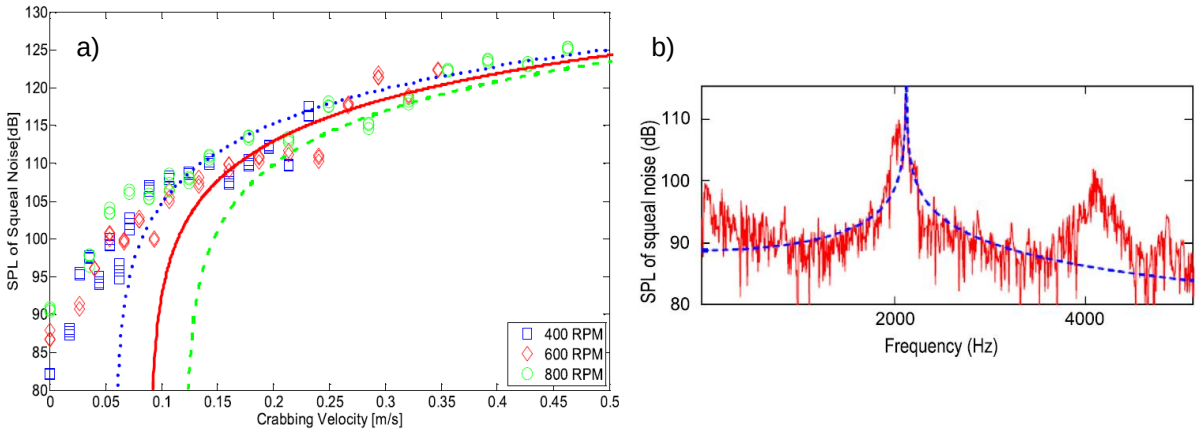
lze predikovat jeho amplitudu. Koncepce modelu je ilustrována blokovým diagramem, viz **Obr. 3-11**. Diagram ukazuje k výpočtu amplitudy vibrací a hladiny hluku model potřebuje pouze malý počet parametrů z komplexní mechaniky vozu projíždějícího obloukem, mechaniky valivého kontaktu a vibrační modální dynamiky.



Obr. 3-11 Blokový diagram analytického modelu [42]

Za účelem validace modelu proběhla terénní měření na australské železnici, během kterých byla sledována hladina hluku, úhel náběhu kola, laterální pozice a rychlost každého projetého kola. **Obr. 3-12(a)** ukazuje, že predikce hladiny akustického tlaku je přesná pro „crabbing velocities“ větší než 0,15 m/s. Při nižších rychlostech je přesnost nízká, protože při těchto rychlostech byly při experimentech dominantnější jiné zdroje hluku, jako například valivý hluk. Dále byl sledován vliv úhlu náběhu a valivé rychlosti na hladinu akustického tlaku. Autoři došli k závěru, že vyšší úhly náběhu vedou k vyšším hladinám akustického tlaku konzistentněji než vyšší valivé rychlosti.

V poslední části článku se autoři zabývají vlivem jednotlivých klíčových parametrů na hladinu hluku. Aby bylo možné jednotlivé vlivy porovnat, sledují, jak je nutné změnit daný parametr, aby došlo k poklesu amplitudy vibrací o 50 %, což odpovídá snížení hladiny akustického tlaku o 6 dB. Výsledky potvrzují, že amplituda vibrací je značně závislá na úhlu náběhu kola, stačí ho snížit pouze o 34 %. Valivou rychlost je pro stejný efekt potřeba snížit o 51 %. Relativně malou změnu, 73 a 50 %, vykazují i parametry křivky příčného skluzu k_2 a k_3. Ty lze upravovat pomocí TOR produktů. Naproti tomu koeficient tlumení kola je třeba změnit až o 280 %, aby bylo možné dosáhnout stejného efektu. Tento parametr prodlouží dobu vzniku kvílivého hluku, ale má minimální efekt na snížení hladiny hluku, dokud nepřekoná negativní tlumení systému, čímž dojde k eliminaci kvílivého hluku.



Obr. 3-12 (a) závislost hladiny ak. tlaku na crabbing velocity; měření v terénu (body), predikce (čáry); (b) frekvenční spektra hluku; terénní měření (červená), predikce (modrá) [42]

Závěr

Autoři v této práci stanovují kritické parametry, které ovlivňují vznik kvílivého hluku a pomocí vyvinutého prediktivního modelu kvantifikují míru jejich vlivu na kvílivý hluk. K verifikaci simulačního modelu jsou využita data z terénních měření, tento postup lze využít i v dizertační práci.

---

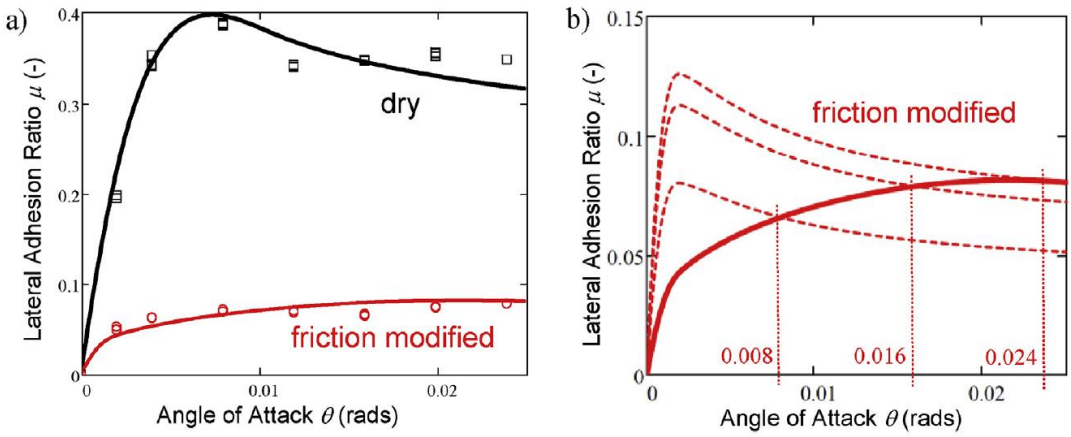
[8] MEEHAN, P. A., X. LIU. Modelling and mitigation of wheel squeal noise under friction modifiers

Tato studie navazuje na předchozí uvedené práce. Autoři navazují na poznatky o tom, že kvílivý hluk se projevuje i v kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi [44] a jako základ používají prediktivní model vzniku hluku v suchém kontaktu z předchozí uvedené práce [42]. Cílem bylo rozšířit prediktivní model pro kontakt s modifikovanými třecími vlastnosti a kvantifikovat vliv modifikace na vznik kvílivého hluku.

Výsledky

Pro měření okamžitých trakčních křivek pro podmínky suchého a modifikovaného kontaktu byla využita stejná testovací souprava jako v předchozí práci autorů [43, 44]. Parametry prediktivního modelu pro modifikovaný kontakt byly upraveny tak, aby simulované a měřené trakční křivky vykazovaly dobrou shodu, viz **Obr. 3-13(a)**.

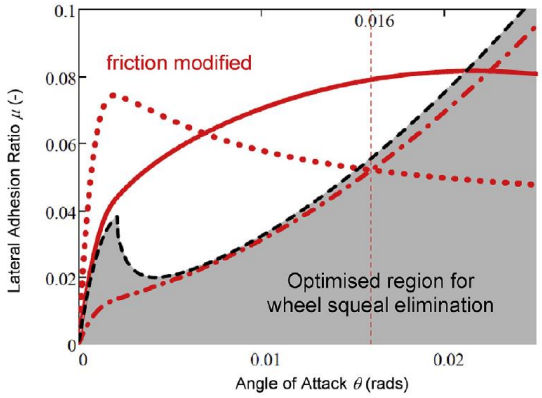
Obr. 3-13(b) ukazuje podobné výsledky, kterých autor dosáhl v předchozí práci [44]. Ty ukazují, že okamžité trakční křivky modifikovaného kontaktu mají oblast s negativním sklonem, jež je spojena s negativním tlumením systému, zatímco měřená trakční křivka tuto oblast s negativním sklonem nemá. Tento fakt vysvětluje, proč se kvílivý hluk projevuje, i když jsou třecí vlastnosti kontaktu modifikovány.



Obr. 3-13 (a) Simulované trakční křivky pro suchý (–) a modifikovaný (–) kontakt a experimentální data pro suchý (□) a modifikovaný (○) kontakt při valivé rychlosti 17,8 m/s; (b) simulované okamžité trakční křivky modifikovaného kontaktu pro úhly náběhu 8, 16 a 24 mrad [8]

Pro další verifikaci modelu, byla značně snížena valivá rychlost z 17,8 m/s na 2,225 m/s a výsledky byl znovu porovnávány s experimentálními daty. Pro tyto účely už neproběhla žádná korekce parametrů. Bylo dosaženo dobré predikce změn v trakčních křivkách, amplitudách i projevech kvílivého hluku. Pouze při vyšších úhlech náběhu docházelo k nesouladu, což autor připisuje nepřesnému měření modálního tlumení. Celkově je model hodnocen jako přesný a poskytuje náhled do problematiky kvílivého hluku v kontaktu kola a kolejnice s modifikovanými třecími vlastnostmi.

Model byl nakonec použit pro predikci optimalizované oblasti trakční křivky, ve které je dosaženo eliminace kvílivého hluku, viz **Obr. 3-14**. Pro konkrétní případ úhlu náběhu 16 mrad červená plná čára zobrazuje nemodifikovanou trakční křivku, kdy stále dochází k projevům kvílivého hluku, černá čárkovaná čára optimální trakční křivku modifikovaného kontaktu, červená čerchovaná čára trakční křivku, které je dosaženo úpravou třecích parametrů a červená tečkovaná čára značí okamžitou trakční křivku pro 16 mrad. Pro danou velikost úhlu je modifikovaná trakční křivka v šedé optimalizované oblasti a tím pádem je kvílivý hluk eliminován.



Obr. 3-14 Optimální trakční křivka modifikovaného kontaktu (– –) a optimalizovaná oblast pro eliminaci kvílivého hluku (šedě) pro valivou rychlost 17,8 m/s [8]

Závěr

Tato studie rozšiřuje předchozí práci autora, která potvrzuje fakt, že k projevům kvílivého hluku, i když jsou třecí vlastnosti kontaktu modifikovány. Zároveň je v prediktivním modelu zahrnut efekt TOR produktů na kvílivý hluk. Chybí však experimentální ověření výsledků.

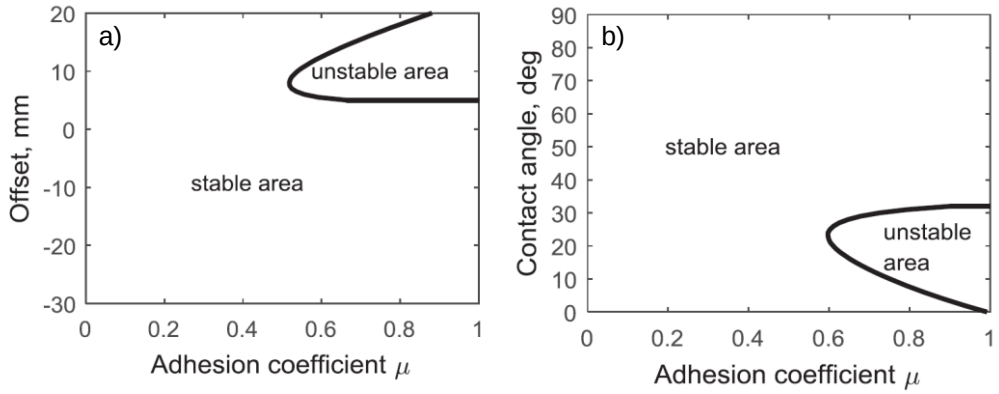
---

[50] DING, B., G. SQUICCIARINI, D. THOMPSON, R. CORRADI. An assessment of mode-coupling and falling-friction mechanism in railway curve squeal through a simplified approach

Základem této práce je myšlenka, že mechanismus propojení módů může být, vedle tradičního mechanismu klesajícího tření, dalším z možných příčin vzniku kvílivého hluku. Autoři si tak dali za cíl zhodnotit roli mechanismu propojení módů a mechanismu klesajícího tření při vzniku kvílivého hluku.

Výsledky

V práci byly využity dva modely. Pro výpočet hodnot do bodu saturace trakční křivky (pozitivní sklon) byl použit Kalkerův [54] algoritmus FASTSIM a pro simulaci za bodem saturace, tedy v oblasti klesajícího tření, byl použit Huangův [55] heuristický model. Za využití verze modelu ve frekvenční oblasti proběhla parametrická studie s hodnotami parametrů, které odpovídají hodnotám tramvajového kola. Sledovanými parametry byly laterální ofset pozice kontaktu, kontaktní úhel, tlumící poměr, a sklon třecí křivky. Pro každý parametr byly vytvořeny mapy stability, viz **Obr. 3-15**.

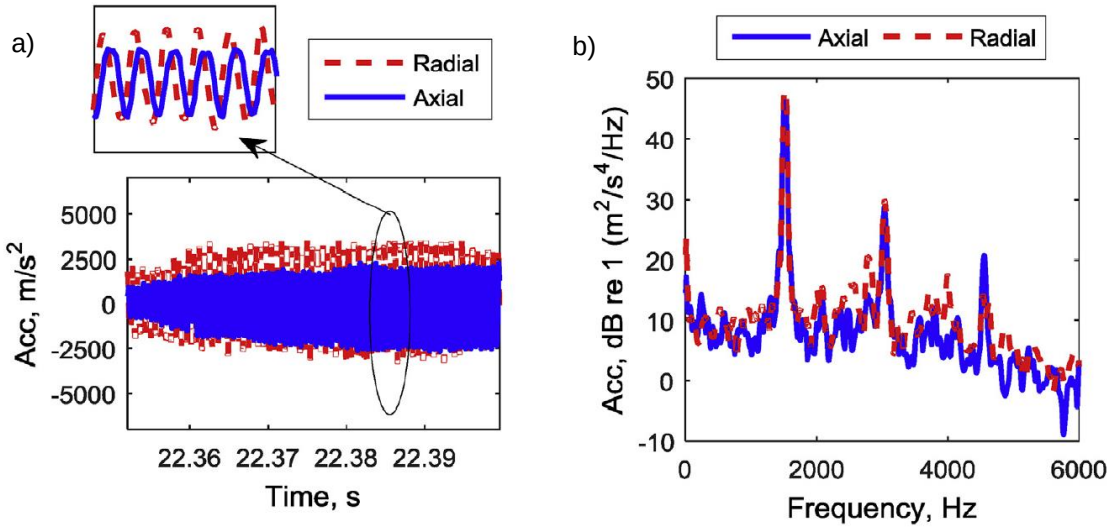


Obr. 3-15 (a) Mapa stability pro vnitřní kolo, efekt laterálního ofsetu pozice kontaktního bodu a součinitele adheze; (b) mapa stability pro vnější kolo, efekt kontaktního úhlu a součinitele adheze [50]

Ukázalo se, že první dva parametry mají vliv na kvílivý hluk, což prokazuje fakt, že jak na vnitřním, tak vnějším kole může dojít k projevům kvílivého hluku vlivem mechanismu propojení módů. Dále autoři zjistili, že hodnota tlumícího poměru může hrát důležitou roli. Zvyšování tlumení kola je často navrhováno jako možné řešení snižování kvílivého hluku, ale pokud je zvyšováno tlumení jednoho módu kola, nemusí vždy mít pozitivní efekt, naopak může vést k rychlejšímu vybuzení kvílivého hluku. Souběžné

zvyšování tlumení obou módů nemá žádný efekt, dokud není překročena určitá prahová hodnota. Pro studované módy kola byla tato hodnota tlumícího poměru mezi 0,1-0,8 %. Během analýzy systému za přítomnosti nestability typu propojení módů se ukázalo, že mezi dominantní frekvencí kvílivého hluku a vlastními frekvencemi módů kola je rozdíl. Navíc během studování odezvy v časové oblasti se projevil fázový posuv mezi vertikálním a laterálním směrem vibrací. Oba tyto projevy jsou charakteristické pro mechanismus propojení módů.

Nakonec proběhla terénní měření, jejichž účelem bylo porovnání simulace s reálnými podmínkami. Naměřené výsledky korespondovaly se simulovanými daty, protože prokazovaly dvě důležité charakteristiky mechanismu propojení módů: dominantní frekvence se liší od vlastních frekvencí vybuzených módů kola a je přítomen fázový posun mezi radiálním a axiálním směrem vibrací, viz **Obr. 3-16**. Tato porovnání potvrzují domněnku, že propojení módů je možným mechanismem vzniku kvílivého hluku.



Obr. 3-16 Vibrace kola při kvílivém hluku na frekvenci 1515 Hz, (a) časová data, (b) frekvenční spektrum [50]

Závěr:

Tato studie prokazuje fakt, že propojení módů je možným mechanismem vzniku kvílivého hluku. Navíc se autorům podařilo potvrdit, že se tento mechanismus může objevovat společně s mechanismem klesajícího tření.

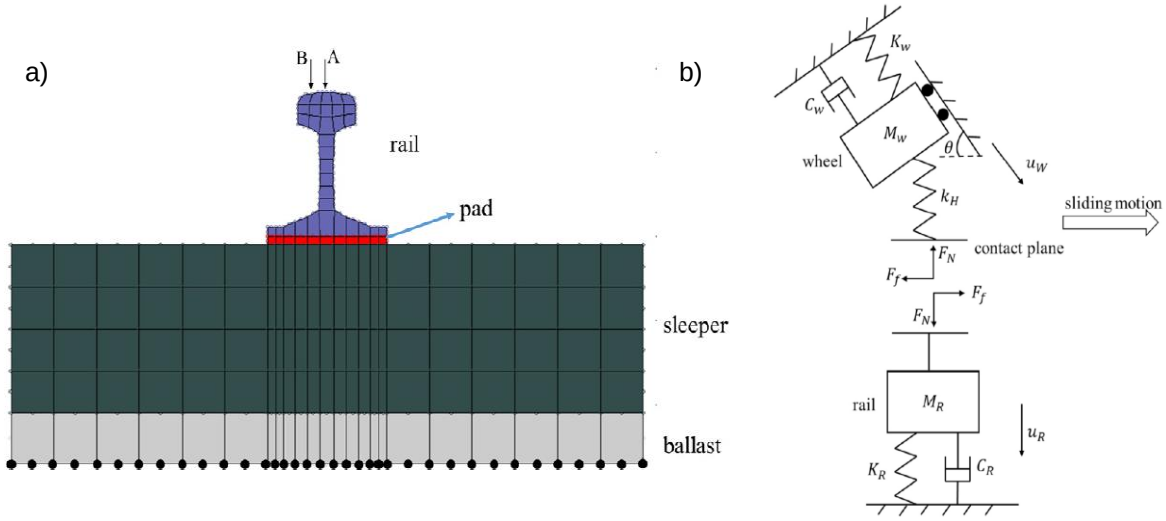
---

[51] DING, B., G. SQUICCIARINI, D. THOMPSON. Effect of rail dynamics on curve squeal under constant friction conditions

Práce se zabývá rolí, kterou hraje dynamika kolejnice při vzniku kvílivého hluku při situacích s konstantním součinitelem tření. Pro účely práce byl využit prediktivní model pracující ve frekvenční oblasti. Kolejnice byla modelována pomocí metody konečných prvků jako kolej na dvouvrstvém elastickém základu, viz **Obr. 3-17(a)**.

Výsledky

V rámci studie proběhly simulace kontaktu ve frekvenční oblasti, které stanovily čtyři nestabilní frekvence a jim odpovídající módy kola, viz **Tabulka 3-2**. Autoři ale zjistili, že pokud je kolejnice během simulací považována za tuhou, systém se stane stabilním, což vede k myšlence, že dynamika kolejnice má značný vliv na výskyt kvílivého hluku.



Obr. 3-17 (a) MKP mesh kolejnice a jejího uložení; (b) schéma modelu kontaktu kola a kolejnice [51]

Následně byl studován vliv různých parametrů kolejnice, které mohou způsobit odrazy vln v kolejnici, či vybudit určité rezonanční módy kolejnice. Zkoumán byl vliv laterálního ofsetu pozice kontaktu na kolejnici, deformace průřezu kolejnice, uchycení kolejnice, přítomnosti dalších kol, které jsou součástí podvozku vozidla a vliv tuhosti podložky kolejnice. Jednotlivé vlivy byly zahrnuty v simulačním modelu, ale výsledky simulací ukázaly, že ani jeden z parametrů nemá výrazný vliv na vybuzené frekvenční módy kolejnice.

Tabulka 3-2 Nestabilní frekvence a jim odpovídající rezonanční módy kola [51]

Nestabilní frekvence *(Hz)*	149,1	418,4	1102,0	1977,0
Loop gain	1,35	7,67	4,06	1,64
Zapojený mód kola *(Hz)*	149,4	418,3	1102,0	1976,2
Mód kola *(n, m)*	(1, 0, a)	(2, 0, a)	(3, 0, a)	(4, 0, a)

Na konec je v práci navržen zjednodušený model kontaktu kola a kolejnice, viz **Obr. 3-17(b)**. Předpokládá se, že systém reprezentující kolo klouže doprava rychlostí o stejné velikosti, jako je velikost laterální rychlosti při průjezdu traťovým obloukem. Při analýze modelu je kolejnice reprezentována pouze podmínkami hmotnosti, tuhosti nebo tlumení. Pro každý z těchto tří případů byly vypočítány vlastní hodnoty pro součinitel tření v rozmezí hodnot 0 až 1. Analýza výsledků ukázala, že při podmínkách hmotnosti a tlumení může dojít

ke vzniku nestabilit typu propojení módů mezi kolem a kolejnicí. Když je kolejnice reprezentována hmotností, dochází k projevům, které jsou srovnatelné s již pozorovanými projevy mechanismu propojení módů. Pro reprezentaci kolejnice jako tlumiče je však situace mírně odlišná. Forma nestability se liší od klasického mechanismu propojení módů, které normálně obsahují dva módy struktury. V tomto případě sériově zapojený tlumič s konstantní tuhostí nepřidává žádný další mód.

Závěr

Tato studie odhaluje vliv dynamiky kolejnice na vznik kvílivého hluku. Autoři došli k závěru, že forma nestability v kontaktu, pokud je kolejnice reprezentována tlumičem, je odlišná od klasického propojení módů. Toto chování kolejnice by mohlo být dalším možným mechanismem vzniku kvílivého hluku vedle zavedených mechanismů klesajícího tření a propojení módů.

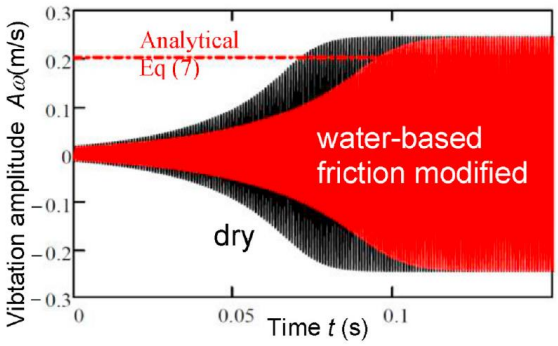
---

[19] MEEHAN, P. A., X. LIU. Wheel squeal noise control under water-based friction modifiers based on instantaneous rolling contact mechanics.

Tato studie je zaměřena na simulaci a predikci efektu TOR produktů na vodní bázi na amplitudu kvílivého hluku. Pro účely práce byla využita stejná testovací souprava jako v autorových předchozích pracích [8, 42]. Také byl zvolen stejný přístup k simulaci kvílivého hluku a predikci jeho vzniku a amplitudy.

Výsledky

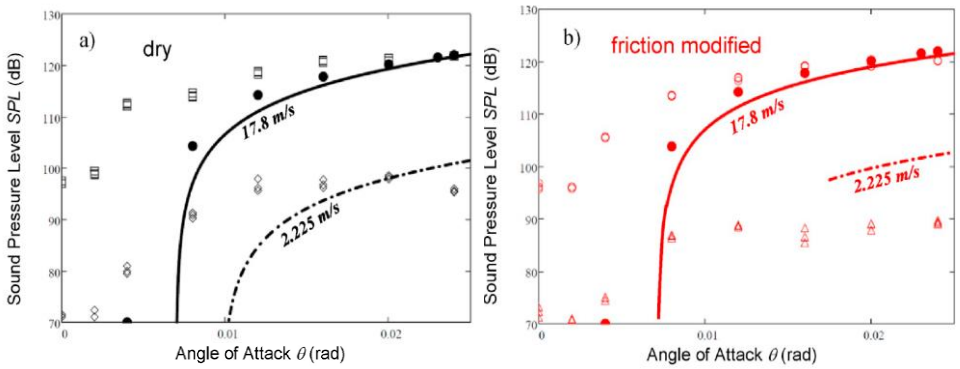
Parametry modelu byly upraveny dle experimentálních měření tak, aby odpovídaly podmínkám v kontaktu, který je modifikován pomocí TOR produktů na vodní bázi, a to pro rychlosti 17,8 a 2,225 m/s. Při vyšší rychlosti se kvílivý hluk projevoval zhruba na stejných amplitudách jak za suchých, tak modifikovaných podmínek, viz **Obr. 3-18**. Podobně tomu bylo v předchozí studii s TOR produkty na olejové bázi.



Obr. 3-18 Analytická predikce a numerická verifikace vibrací kvílivého hluku za suchých a modifikovaných podmínek [19]

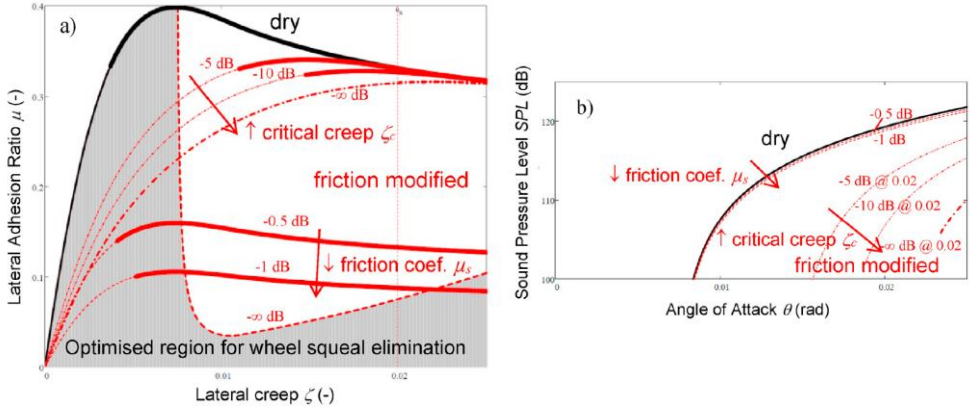
Při nižší rychlosti byla hladina kvílivého hluku redukována až o 20 dB a při použití TOR produktů na vodní bázi byl kvílivý hluk při nižších úhlech náběhu eliminován celkově, viz **Obr. 3-19(b)**. Lze tak sledovat, že TOR produkty na vodní bázi jsou schopny redukovat

hladinu kvílivého hluku, ale při vyšších úhlech náběhu nejsou schopny tento jev úplně eliminovat.



Obr. 3-19 Predikce hladin kvílivého hluku pro různé rychlosti a úhly náběhů (a) v suchém kontaktu; (b) v kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi [19]

Následně byl model použit pro identifikaci modifikací trakční křivky, které by vedly k nejvýraznějšímu potlačení kvílivého hluku. Konkrétně byly zvažovány možnosti úpravy součinitele tření a kritického skluzu. Jak je patrné z **Obr. 3-20(a)**, velké snížení součinitele tření vede pouze k malému snížení hladin kvílivého hluku, avšak za předpokladu, že dosáhne nízkých hodnot (v šedé oblasti), může eliminovat kvílivý hluk celkově. Naproti tomu úpravou kritického skluzu lze dosáhnout značné redukce hladiny kvílivého hluku. Velikost redukce je ale závislá na velikosti úhlu náběhu, jak ukazuje **Obr. 3-20(b)**. Pro nižší úhly náběhu je hluk redukován více než při vyšších úhlech náběhu. To vysvětluje, proč jsou TOR produkty na vodní bázi schopné eliminovat kvílivý hluk pouze při nižších úhlech náběhu.



Obr. 3-20 Vliv TOR produktů na vodní bázi na snížení kvílivého hluku [19]

Závěr

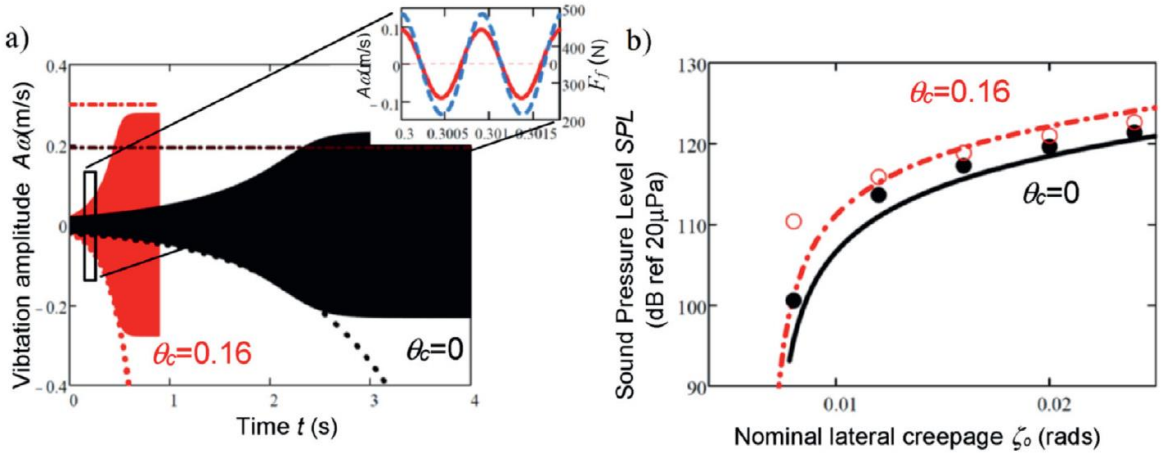
Práce vysvětluje vliv TOR produktů na vodní bázi na kvílivý hluk a navrhuje za využití predikce možné způsoby redukce a eliminace tohoto jevu. Důležitým poznatkem je vliv velikosti úhlu náběhu na schopnost TOR produktů na vodní bázi účinně redukovat kvílivý hluk.

[52] MEEHAN, P. A. Prediction of wheel squeal noise under mode coupling

Cílem této studie bylo vyvinout analytický model pro predikci výskytu kvílivého hluku a jeho amplitudy vzniklého mechanismem propojení módů. Pro verifikaci analytického modelu pro predikci vzniku kvílivého hluku byl použit stejný simulační model, jako v předchozích autorových studiích [8, 19, 42].

Výsledky:

Pro predikci jsou použity výkonný matematický model nelineárního limitního cyklu a komplexní analýza vlastních módů. Tato analýza se používá ke stanovení podmínek propojených módů vyjádřených jako prediktivní uzavřená forma řešení pro systém modálního tlumení a amplitudu hluku jako funkce kritických strukturálních a skluzových parametrů. Pomocí analytického modelu byl následně zkoumán vliv viskózního a tuhostního propojení módů.

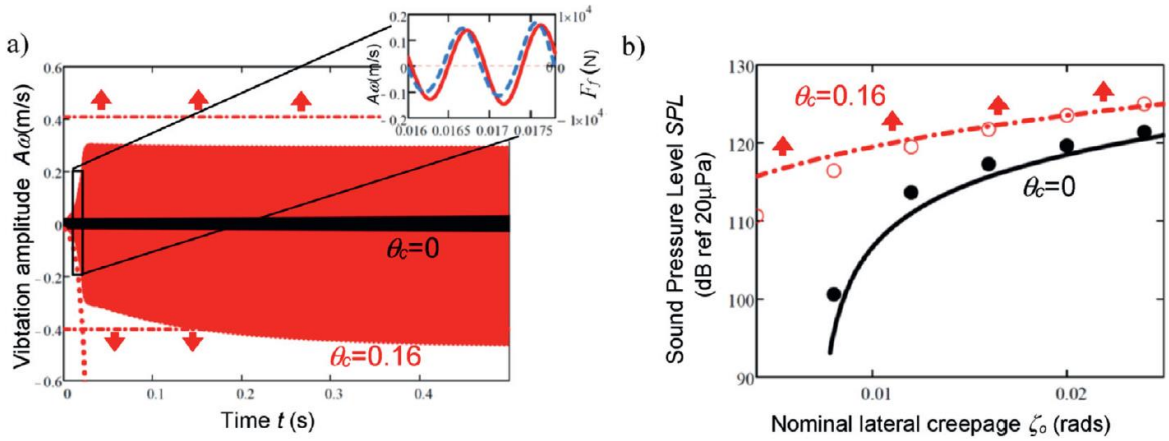


Obr. 3-21 (a) Simulovaný časový průběh nárůstu kvílivého hluku bez propojení módů (černá) a s maximálním viskózním propojením módů (červená) a jim odpovídající analytické predikce; (b) závislost hladiny ak. tlaku na příčném skluzu, srovnání analytických (čára) a numerických (body) výsledků [52]

Z **Obr. 3-21(a)** je patrné, že při viskózním propojení módů dojde k nárůstu hluku rychleji a ustálí se na vyšších amplitudách. Kvílivý hluk, který se objeví vlivem negativního sklonu okamžité trakční křivky, je zesílen viskózním propojením módů zhruba o 5 dB. Rozdíly mezi predikovaným nárůstem amplitud a numericky simulovaným nárůstem, viz **Obr. 3-21(b)**, jsou způsobeny linearizovanou reprezentací sklonů trakční křivky a nelineárními změnami součinitele tření. I přesto analytický model poskytuje přesnou predikci růstu amplitudy kvílivého hluku. Dále bylo prokázáno, že viskózní propojení módů z kolejnice značně redukuje nebo eliminuje kvílivý hluk pro vnitřní i vnější kola při vyšších úhlech náběhu a také zesiluje nebo způsobuje vznik hluku při vysokém tlumení kolejnice pro vnější kolo.

Následně byl na základě simulací a predikcí zkoumán vliv tuhostního propojení módů. Z **Obr. 3-22** vyplývá, že analyticky predikovaný model růstu amplitudy hluku

souhlasí s numerickými simulacemi, dokud se neobjeví nelineární oscilace kolem 0,02 s. Po této době se, vlivem nelineárního tvaru trakční křivky na vyšších amplitudách blízko negativního kritického skluzu, objevuje nelineární růst nižší amplitudy vibrací. Tento růst se ustálí kolem doby 0,5 s. Bylo zjištěno, že tuhostní propojení módů způsobuje kvílivý hluk s velmi vysokými amplitudami pouze v malém rozsahu úhlů náběhu. Díky negativnímu tlumení z komplexní tuhosti systému, která je mnohonásobně větší než pozitivní tlumení v oblasti pozitivního tření, byly predikovány amplitudy větší než 125 dB.



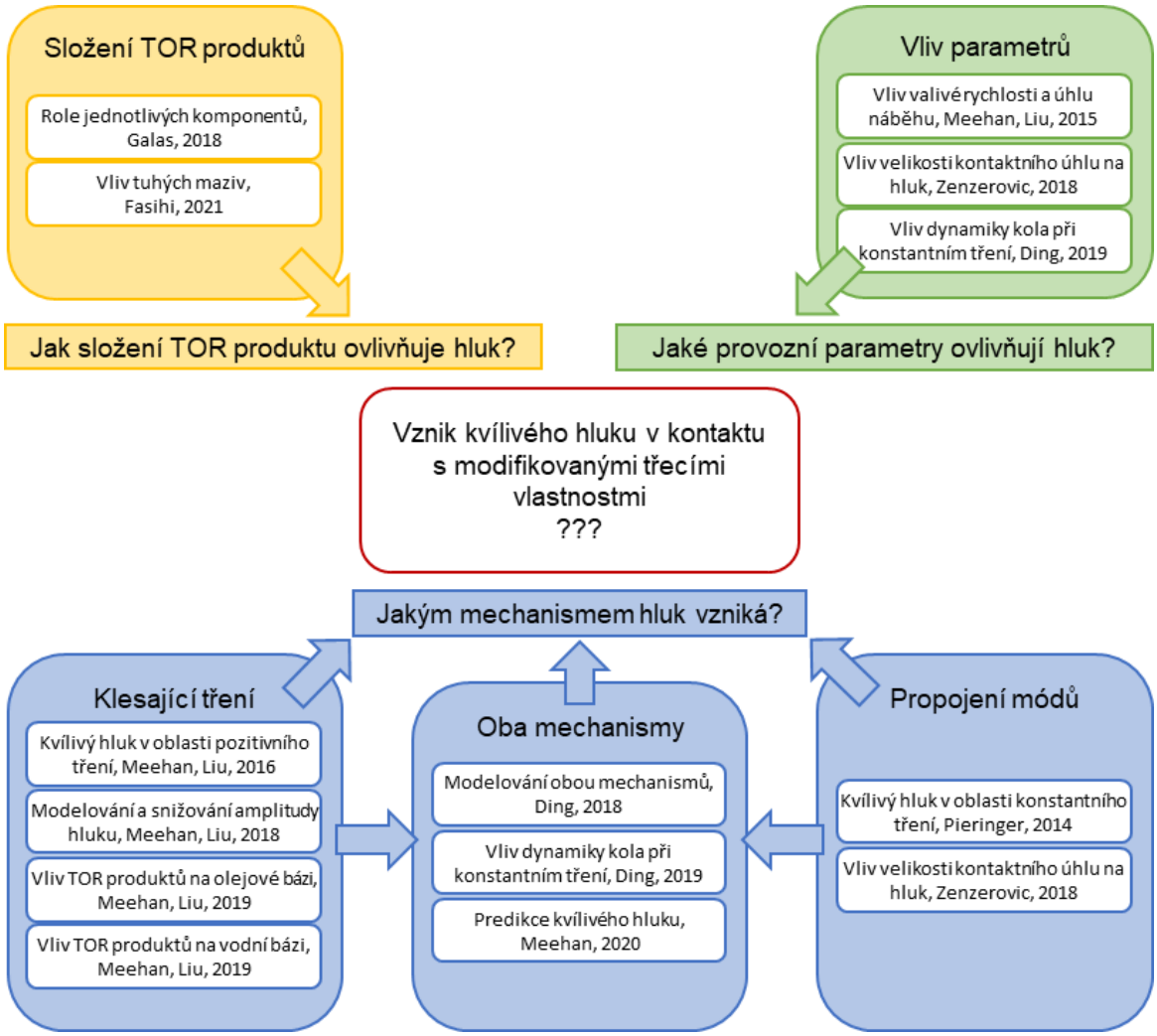
Obr. 3-22 (a) Simulovaný časový průběh nárůstu kvílivého hluku bez propojení módů (černá) a s maximálním tuhostním propojením módů (červená) a jim odpovídající analytické predikce; (b) závislost hladiny ak. tlaku na příčném skluzu, srovnání analytických (čára) a numerických (body) výsledků [52]

Proběhla také identifikace a kvantifikace tuhostního a viskózního mechanismu propojení módů s kolejnicí reprezentovanou jen hmotou nebo tlumením. Byly stanoveny optimální podmínky a amplitudy pro nárůst kvílivého hluku a jeho potlačení. Vliv modálních parametrů kolejnice, měnících se v závislosti na úhlu náběhu, na vznik kvílivého hluku byl minimální, pravděpodobně kvůli tomu, že rozsah úhlů náběhu, ve kterém dochází k zesílení kvílivého hluku, je malý. Předpokládá se, že vliv na potlačení kvílivého hluku bude větší, jelikož k němu dochází na větším rozsahu kontaktních úhlů. Nakonec byla stanovena přesnost modelu pro neproporcionální tlumení v rámci méně než 3 dB pro faktory neproporcionálního tlumení -500.

Závěr

Práce poskytuje kompletní analytický model pro predikci vzniku kvílivého hluku a jeho amplitudy. Autor také ukazuje, že mechanismus propojení módů může vedle způsobování kvílivého hluku vést také k jeho snížení a eliminaci. Výsledky však nejsou experimentálně ověřeny.

4 ANALÝZA, INTERPRETACE A ZHODNOCENÍ POZNATKŮ ZÍSKANÝCH NA ZÁKLADĚ REŠERŠE



Obr. 4-1 Citační mapa

4.1 Vliv složení TOR produktu na hluk

Složení TOR produktů se postupně vyvíjelo [12–14]. Obecně se TOR produkty skládají ze základové báze, pojiva, částic pro modifikaci tření a tuhého maziva. Eadie [3, 4] pomocí terénních testů prokázal, že jsou tyto TOR produkty schopny redukovat hluk až o 12 dB. V jeho studiích byl testován TOR produkt na vodní bázi KELTRACK®. Jde tak o hodnocení pouze jednoho produktu. Zároveň v laboratoři probíhaly experimenty, které měly ukázat vliv jednotlivých složek TOR produktů na adhezi a opotřebení. Galas [15] a Fasihi [20] došli k závěru, že množství tuhého maziva obsaženého v produktu hraje

výraznou roli ve snižování hodnoty součinitele adheze. Přílišné množství totiž může vést k dosažení kriticky nízké adheze. V reálném provozu by tak mohlo dojít k nechtěnému ovlivnění brzdné dráhy vozidla, které pozoroval Galas [21]. Výsledky ukazují také rozdíl mezi vlivy filmů před a po odpaření základové báze. Bohužel ani jedna práce nezohledňuje vliv složení TOR produktu na kvílivý hluk. Poznatky z těchto prací lze ale využít při výběru vhodných složení TOR produktů pro další výzkum.

4.2 Vliv provozních parametrů na hluk

Podobná situace panuje v oblasti parametrů, které vznik kvílivého hluku ovlivňují. Liu a Meehan [19] se zabývali simulací vlivu valivé rychlosti a úhlu náběhu kola na kvílivý hluk. Zenzerovic [49] numericky řešil vliv spinu a kontaktního úhlu. Ding [51] se zabýval vlivem dynamiky kolejnic. Co se týká vlivu okolních podmínek, doposud byl zkoumán především vliv na adhezi. Například Baek [56], se zabýval vlivem teploty a vlhkosti vzduchu. Další autoři [18, 57, 58] zkoumali, jaké dopady má přítomnost kontaminantů v kontaktu. Studie, která by se ale zabývala vlivem těchto podmínek v kontaktu na hluk, chybí. Dalšími parametry, které mohou vznik kvílivého hluku ovlivnit, jsou uložení kolejnic, či poloměry oblouků. Eadie [3, 4] a Curley [24] v terénu došli k rozdílným závěrům. Eadie své experimenty prováděl především na lehkých železnicích, jako jsou tramvajové systémy nebo metra. Curley naopak měřil na trati pro osobní a nákladní dopravu. Je tak možné, že rozdíly v uložení kolejnic, poloměr oblouků nebo použité kolejnicové profily mají také vliv na hlukové projevy.

4.3 Mechanismus vzniku kvílivého hluku

Rudd [30] byl první, kdo stanovil základní teoretický přístup pro studium a simulaci třecí nestability mezi kolem a kolejnicí, která je dle mnoha vědců [1, 27–29] příčinou vzniku kvílivého hluku. Většina z nedávných simulačních modelů kvílivého hluku založených na mechanismu klesajícího tření navazuje na Hecklovu práci [35–37]. Ten navrhl matematický model kvílivého hluku v časové oblasti, aby studoval, který z módů kola má sklon ke kvílení. Talotte [29] ve své práci rozšířil několik kategorií simulačních modelů podle simulovaného hluku a složitosti simulačního přístupu. Brunel [38] zjistil, že tlumení kola má v porovnání se sklonem trakční křivky malý vliv na amplitudu kvílivého hluku. De Beer [39] v modelu zahrnul kolejnici a normálový směr dynamiky kontaktu. Prokázal, že kvílivý hluk souvisí s negativním sklonem trakční křivky, který je závislý na pozici kontaktu. Monk-Steel [40] v modelu zahrnul kontakt okolku a kolejnice. Chiello [41] v modelu zahrnul tečný i normálový směr dynamiky kontaktu kola a kolejnice a potvrdil

vztah mezi hladinou akustického tlaku, valivou rychlostí a úhlem náběhu kola. Meehan a Liu [8, 19, 42–44] vyvinuli analytický model pro predikci amplitudy kvílivého hluku. Tento model následně rozšířili o vliv TOR produktů jak na olejové, tak vodní bázi. Model byl ověřován na základě experimentálních dat z terénu i laboratoře. Pro laboratorní testy byla postavena testovací souprava. Model dosahoval dobrých výsledků v oblasti s negativním sklonem křivky. V režimu pozitivního tření byly výsledky smíšené.

Nejednoznačných výsledků při použití TOR produktů v terénu dosáhl i Curley [24]. Z tohoto důvodu byl navržen druhý možný mechanismus vzniku kvílivého hluku – propojení módů. Glocker [45] byl první, kdo navrhl simulační model postavený na tomto mechanismu. Prohlásil, že tento model by neměl být závislý na sklonu trakční křivky. Svůj přístup podložil porovnáním simulace a měření. Pieringer [46] navrhl model, který dokáže simulovat kvílivý hluk v oblasti konstantního tření. Model je implementací Kalkerova modelu CONTACT [31] a pro simulaci využívá předpočítané funkce impulzní odezvy. Model byl však pouze porovnán s předchozím Kalkerovým řešením, chybí zde experimentální ověření modelu. Pieringerův model později ve své práci rozšířil Zenzerovic [49], který do modelu zahrnul vlivu velikosti kontaktního úhlu a spinu kola. Posledním, kdo se mechanismem propojení módů zabýval je Meehan [52]. Ten se místo numerické identifikace a simulace projevů kvílivého hluku zaměřil na vývoj analytického modelu pro predikci vzniku kvílivého hluku a jeho amplitudy. Využitím tohoto modelu následně prokázal, že mechanismus propojení módů může vedle způsobování kvílivého hluku vést také k jeho snížení a eliminaci. Výsledky však nejsou experimentálně ověřeny.

V nedávné době se mechanismem vzniku kvílivého hluku zabýval Ding [50], který ve své práci prokázal, že oba mechanismy mohou existovat vedle sebe. Tuto možnost se mu podařilo prokázat, přičemž prohlásil, že propojení módů ovlivňuje míru tlumení, které je třeba pro překonání efektu negativního tlumení spojeného s mechanismem klesajícího tření. V další práci [51] zahrnul efekt dynamiky kolejnice na vznik kvílivého hluku. Zjistil, že pokud je kolejnice reprezentována pouze jako tlumič, dochází k nestabilitám, které se liší od běžného mechanismu propojení módů. Toto chování kolejnice by mohlo být dalším možným mechanismem vzniku kvílivého hluku.

4.4 Nezmapovaná oblast poznání

Bohužel ani jedna ze studií, které se zabývaly vlivem složení TOR produktu na adhezi, nezohledňovala vliv produktu na hluk. V praxi však nelze adhezi a hluk rozdělit. Ideální TOR produkt by měl efektivně redukovat hladiny akustického tlaku s co nejmenším ovlivněním součinitele adheze v kontaktu. Proto je nutné zkoumat vliv složení TOR produktu na hluk.

Podobně je tomu u parametrů, které ovlivňují vznik kvílivého hluku. Několik autorů se zabývalo například vlivem valivé rychlosti, úhlu náběhu nebo vlivem dynamiky kolejnic. Vliv ostatních parametrů, jako je například teplota, přítomnosti kontaminantů v kontaktu, uložení kolejnic nebo poloměr traťového oblouku však doposud popsán nebyl.

Na základě analýzy článků týkajících se mechanismu vzniku hluku je těžké rozhodnout, který z mechanismů popisuje vznik kvílivého hluku lépe, obzvláště pokud jsou třecí vlastnosti v kontaktu kola a kolejnice modifikovány. Zdá se, že oba mechanismy jsou efektivní pouze v omezeném rozsahu provozních podmínek. Problémy s kvílivým hlukem v kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi pravděpodobně souvisejí s režimy pozitivního a konstantního sklonu trakční křivky. Negativní efekt klesajícího tření je nepochybný. Modelovací přístupy založené na tomto mechanismu jsou schopné přesně predikovat vznik a amplitudy kvílivého hluku. V oblastech bez klesajícího tření jsou však výsledky predikcí nejasné. Naproti tomu simulace založené na mechanismu propojení módů dokážou lépe predikovat vznik a amplitudy kvílivého hluku v oblastech pozitivního a konstantního sklonu trakční křivky. Jejich přesnost pro případy, kdy jsou třecí vlastnosti kontaktu modifikovány, dosud nebyla uspokojivě ověřena.

5 VYMEZENÍ CÍLE DIZERTAČNÍ PRÁCE A NÁVRH ZPŮSOBU JEJÍHO ŘEŠENÍ

Podstatou práce je poskytnout hlubší vysvětlení vzniku a projevů kvílivého hluku v kontaktu kola a kolejnice. Zvláštní pozornost bude věnována kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi, ve kterém v rámci predikce projevů hluku selhává klasický mechanismus klesajícího tření.

5.1 Zaměření dizertační práce

Během posledních let se aplikace TOR produktů jeví jako perspektivní technika pro potlačení kvílivého hluku. Stále jsou zde ale otázky ohledně účinnosti těchto produktů. Doposud nebyl uspokojivě vysvětlen vznik kvílivého hluku v kontaktu kola a kolejnice. Hlukové projevy jsou spíše chaotické a pravděpodobnost vzniku hluku závisí na velkém množství parametrů. Diskutuje se o dvou možných mechanismech vzniku hluku, kterými jsou klesající tření a propojení módů. Stále ale chybí dostatek experimentálních dat pro ověření simulačních modelů pracujících s těmito mechanismy.

První část dizertační práce tvoří aplikovaný výzkum (25 %). Jeho předmětem je sledování vlivu složení TOR produktů na hluk a součinitel adheze. Druhou částí dizertační práce (75 %) je pak orientovaný základní výzkum. Cílem této části bude najít odpovědi na to, které parametry ovlivňují vznik kvílivého hluku a jaký mechanismus vzniku hluku v závislosti na nastavení těchto parametrů převládá.

5.2 Cíl dizertační práce

Cílem dizertační práce je objasnit vzniku a výskyt kvílivého hluku v kontaktu kola a kolejnice v případech, kdy selhává predikce tohoto hluku na základě sledování poklesu součinitele tření v kontaktu. Zvláštní pozornost bude zaměřena na kontakt s modifikovanými třecími vlastnostmi. Dílčími cíli práce jsou:

- ověření vztahu mezi adhezí a kvílivým hlukem v kontaktu,
- nalezení složení TOR produktu na vodní bázi vhodného pro další experimenty,
- experimentální výzkum kvílivého hluku v kontaktu bez přítomnosti TOR produktů,
- experimentální výzkum kvílivého hluku v kontaktu v přítomnosti TOR produktů na vodní i olejové bázi,
- validace rozšířených simulačních modelů pro predikci projevů kvílivého hluku, navržených v rámci výzkumné skupiny kolejové dopravy na ÚK,

- experimentální výzkum kvílivého hluku za různých provozních podmínek na reálné trati,
- identifikace parametrů, které ovlivňují vybuzení známých mechanismů vzniku kvílivého hluku,
- identifikace parametrů, které ovlivňují pozitivní vliv modifikace třecích vlastností v kontaktu na vznik kvílivého hluku,
- zobecnění zjištěných výsledků ve vztahu ke známým modelům vzniku kvílivého hluku.

V návaznosti na závěry z kritické rešerše a cíle disertační práce jsou formulovány následující vědecké otázky a pracovní hypotézy:

Vědecká otázka 1

„Jak ovlivňuje složení TOR produktu vyzářený hluk?“

Pracovní hypotéza 1

Aplikací TOR produktu do kontaktu dojde ke snížení adheze a tím pádem i ke zmírnění hluku. Galas [15] a Fasihi [20] se zabývali vlivem složení TOR produktu na vodní bázi na adhezi a prokázali, že je možné změnou množství určité složky dosáhnout jiných třecích vlastností. Není však popsáno, jak změna složení nebo množství jednotlivých komponentů projeví ve schopnosti TOR produktu redukovat hluk.

Vědecká otázka 2

„Jakým nastavením provozních parametrů lze dosáhnout toho, aby převládal jeden z mechanismů vzniku hluku?“

Pracovní hypotéza 2

Ding [50] ve své práci prokázal, že oba mechanismy vzniku hluku mohou existovat vedle sebe. Tuto možnost se mu podařilo prokázat pomocí simulačních modelů pro predikci výskytu hluku. Výsledky ověřil terénním měřením. Jeho práce vede k myšlence, že je určitým nastavením provozních parametrů možné dosáhnout vybuzení hluku vždy jedním mechanismem.

Vědecká otázka 3

„Jaké provozní parametry a podmínky kriticky ovlivňují vznik kvílivého hluku?“

Pracovní hypotéza 3

Vznik kvílivého hluku v kontaktu kola a kolejnice ovlivňuje mnoho parametrů. Od provozních parametrů, jako je například rychlost a zatížení vozidla, přes okolní podmínky, jako přítomnost kontaminantů, vody, nebo okolní teploty, až po uložení kolejnic a poloměru oblouků a traťových smyček. Liu a Meehan [43] se zabývali simulací vlivu valivé rychlosti a úhlu náběhu kola na kvílivý hluk. Zenzerovic [49] numericky řešil vliv

spinu a kontaktního úhlu. Ding [51] se zabýval vlivem dynamiky kolejnic. Doposud však nebyl detailněji popsán a experimentálně ověřen vliv uložení kolejnic, poloměrů oblouků nebo teploty v kontaktu.

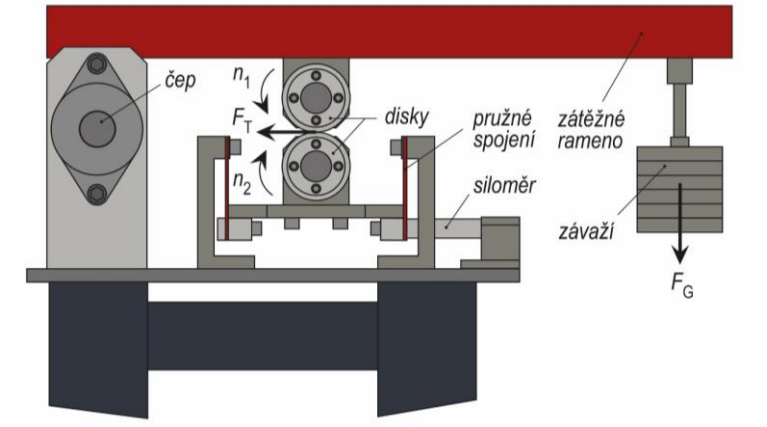
5.3 Způsob řešení a použité vědecké metody zkoumání

V rámci dizertační práce budou probíhat laboratorní experimenty na testovacích soupravách, které jsou na Ústavu konstruování k dispozici. Také proběhnou terénní experimenty ve spolupráci s Dopravním podnikem města Brna. Naměřená data budou sloužit k výzkumu vlivu provozních podmínek a parametrů na kvílivý hluk a také k návrhu vstupních parametrů pro simulační modely, které v současné době v rámci výzkumné skupiny kolejové dopravy vznikají a které budou dále využity pro hlubší výzkum mechanismů vzniku kvílivého hluku v kontaktu kola a kolejnice. V neposlední řadě naměřená data poslouží k validaci těchto simulačních modelů. V rámci dizertační práce se předpokládá spolupráce s institucemi:

- Dopravní podnik města Brna, a.s.
- Tribology Research Institute in State Key Laboratory for Power Traction, Southwest Jiaotong University in P.R. China

5.3.1 Laboratorní experimenty

V laboratoři bude pomocí rozšířené analýzy hluku zkoumán vliv provozních podmínek a parametrů na kvílivý hluk v kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi do větší hloubky. Hlavním parametrem, jehož vliv bude sledován, bude úhel náběhu kola. Během experimentů budou měřeny trakční křivky a skluzové vlastnosti v kontaktu při různých kontaktních a provozních podmínkách.



Obr. 5-1 Testovací souprava se zmenšeným kontaktem

Pro tyto účely budou použity testovací soupravy, které jsou k dispozici v laboratoři kolejové dopravy na Ústavu konstruování. Pro úvodní experimenty bude použita souprava (viz **Obr. 5-1**), která simuluje kontakt kola a kolejnice ve zmenšeném měřítku a umožňuje měření při úhlech náběhu v rozsahu mezi -10° až 10°. Hlavní částí tohoto zařízení je dvojice disků o průměru 80 mm. Horní disk je válcový a reprezentuje kolo, spodní je pak po obvodu zaoblen s rádiusem 50 mm a představuje kolejnici. Oba disky mají svůj vlastní pohon a je možné s nimi dosahovat rychlostí mezi 0-2 m/s, což je běžná rychlost v tramvajových obloucích a točnách. Zatížení je realizováno přes páku, na jejímž konci je zavěšeno závaží. Hlavním výstupem z této měřící soupravy je záznam součinitele adheze v čase. Proto bude souprava využita pro úvodní experimenty, ve kterých bude sledován vztah mezi adhezí a hlukem.

Druhá souprava, viz **Obr. 5-2**, se skládá z reálného železničního kola a menšího disku, který simuluje kolejnici, umožňuje normálové zatížení kontaktu v rozmezí 0,8-1 GPa a je konstruována tak, aby byly zajištěny reálné parametry tuhosti a tlumení systému. Kolo je poháněno elektromotorem, disk se otáčí vlivem trakčních sil v kontaktu a není nijak brzděn. Disk může být vychýlen, takže je možné simulovat velikosti úhlu náběhu v rozmezí -5° až 5°. Příčný skluz způsobený úhlem náběhu je hlavním zdrojem kvílivého hluku. Souprava umožňuje měření součinitele adheze a skluzu v kontaktu, což jsou parametry důležité pro stanovení trakčních křivek. Pro úpravu třecích vlastností kontaktu budou použity TOR produkty na vodní bázi i olejové bázi.

Obr. 5-2 Testovací souprava s reálným železničním kolem

Hladina akustického tlaku na obou zařízeních bude snímána zvukoměrem B&K 2270 od firmy Brüel & Kjær. Pro zjištění frekvenčních pásem bude měřený signál zpracováván pomocí třetinooktávové analýzy. Pro lepší pochopení vyzařovaného hluku budou v případě měření na soupravě s reálným kolem použity pokročilé metody pro lokalizaci zdroje hluku. Pro pokrytí širokého pásma frekvencí, zhruba 200 – 10 000 Hz, bude použita akustická

holografie blízkého pole (SONAH) v kombinaci s metodou beamforming. Tyto metody používají pole mikrofonů, takže umožňují měřit přechodné zvuky jako je kvílivý hluk. Výsledkem budou 2D mapy vyzařovaného zvukového pole, které poskytnou informace o vzniku hluku detailněji než jednoduché měření akustického tlaku. Díky těmto metodám bude možné lokalizovat zdroje hluku a získat představu o prostorovém rozložení hladin kvílivého hluku. Navíc bude z vyzářeného hluku, na základě těchto metod, možné určit vibrační mód kola. Kombinací měření adheze a hladin kvílivého hluku bude možné sledovat korelace mezi hlukovými projevy a provozními parametry. Poznatky z laboratorních měření budou sloužit k verifikaci simulačních modelů vyvíjených v rámci výzkumné skupiny kolejové dopravy.

5.3.2 Terénní měření

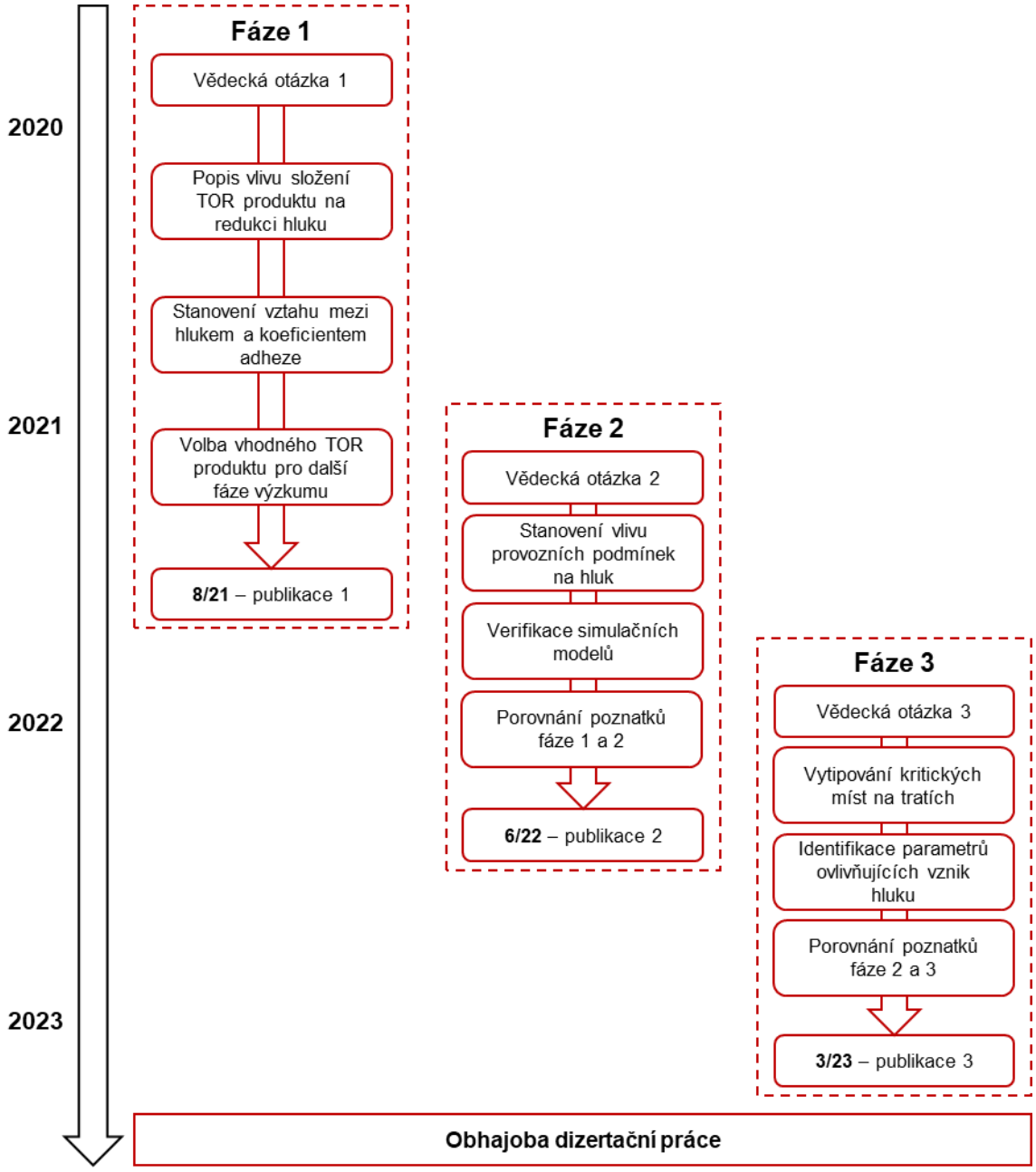
Během terénních měření bude sledován vliv vnějších podmínek a provozních parametrů na hladinu kvílivého hluku. Tato měření budou probíhat ve spolupráci s Dopravním podnikem města Brna. Důležitá bude přípravná fáze měření, kdy bude nutné vytipovat kritická místa na brněnských tramvajových tratích, kde dochází ke vzniku kvílivého hluku. Následně budou sledovány způsoby uložení kolejí, poloměry oblouků na dané trati a rychlosti, kterými tramvaje danými místy projíždějí. Tímto způsobem bude hledán parametr, který bude pro všechna místa společná a který by měl hrát zásadní roli při vzniku hluku na reálné trati.

Klíčové bude také porovnání hlukových projevů v kontaktu bez přítomnosti TOR produktů s projevy v kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi. Pro tato měření budou použity standardní TOR produkty na olejové bázi, které se běžně na brněnských tratích používají. Mimo tyto produkty budou použity také TOR produkty na vodní bázi, které budou vytipovány na základě předchozích laboratorních měření. Toto porovnání osvětlí vliv TOR produktů na vyzařované hladiny kvílivého hluku a umožní také definovat parametry pro návrh simulačních modelů.

Hladiny akustického tlaku bude snímána, stejně jako v případě laboratorních měření, zvukoměrem B&K 2270 od firmy Brüel & Kjær. Zvukoměr bude dle norem umístěn ve vzdálenosti 7,5 m od okraje oblouku a 1,2 m nad zemí. Měřený signál bude dále zpracováván pomocí třetinooktávové analýzy, která odhalí frekvenční pásma, ve kterých se kvílivý hluk projevuje.

Pro hlubší vhled do problematiky bude sledována celistvost roznesení mazací vrstvy na kolejnici. Sledování proběhne vizuálně pomocí fotografií a traťového tribometru, poté také chemicky, kdy budou provedeny stěry z jednotlivých částí točny. Údaje z těchto měření poskytnou přehled o parametrech, které ovlivňují vznik hluku v reálném kontaktu a poskytnou důležitá data pro vývoj simulačních modelů.

5.3.3 Plán publikací



Obr. 5-3 Časový plán řešení dizertační práce

Publikace budou rozděleny do tří na sebe navazujících fází. První fáze proběhne v laboratoři na zmenšeném dvoudiskovém zařízení a její výsledky ozřejmí vztah mezi adhezí a hlukem. Také bude tato fáze sloužit k vytipování TOR produktů vhodných pro další testování. To proběhne ve druhé fázi na soupravě s reálným tramvajovým kolem. V této fázi bude zkoumán vliv úhlu náběhu na vznik kvílivého hluku, budou do měření zapojeny pokročilé akustické metody a bude se sledovat efektivita TOR produktů na snižování hluku. Třetí fáze proběhne v terénu, kde budou vyžity poznatky z laboratorních měření. Tato měření odhalí kritické parametry, které vznik hluku ovlivňují.

Publikace 1

Cílem první studie bude sledovat vliv složení TOR produktu na vodní bázi na redukci hluku a adheze. Sledována bude schopnost různých substancí efektivně redukovat hluk a zároveň co nejméně ovlivňovat adhezi v kontaktu. Zároveň bude studován vztah mezi adhezí a vyzářeným hlukem. Pro tento účel bude využito dvoudiskové zařízení se zmenšeným kontaktem. V rámci této studie proběhnou čtyři sady experimentů, viz **Tabulka 5-1**. Tyto experimenty poslouží k výběru TOR produktů na vodní bázi, které budou použity pro další testování. Všechny experimenty budou probíhat při kontaktním tlaku p_k = 0,8 GPa, rychlosti u_m = 1 m/s, skluzu SRR = 0,05 a úhlu náběhu AoA = 4 °. Hodnoty těchto parametrů odpovídají běžným hodnotám dosahovaných při průjezdu vozidla traťovým obloukem. Publikace bude směřována do časopisu Tribology Letters (IF = 2.566) a její odeslání je plánováno na třetí čtvrtletí roku 2021.

Tabulka 5-1 Návrh experimentů pro první publikaci

Sada	Aplikovaná látka	Typ testu	Sledované veličiny
1	Žádná	Referenční test se suchým kontaktem	Hluk Adheze
2	Voda	Referenční test s kontaktem zaplaveným vodou	
3	9 kompozic (kombinace vody, bentonitu, mastku nebo oxidu zinečnatého a disulfid molybdenu)	Testy „mokrých“ filmů	
4	9 kompozic (kombinace vody, bentonitu, mastku nebo oxidu zinečnatého a disulfid molybdenu)	Testy filmů po odpaření základové báze	

Publikace 2

Cílem publikace bude ověření poznatků získaných v první fázi na zařízení s reálným tramvajovým kolem a verifikaci vyvinutých simulačních modelů. Pro studii bude použit vytipovaný TOR produkt z první studie a běžně používaný TOR produkt na olejové bázi. Práce bude rozšířena o použití pokročilých akustických metod. Jmenovitě bude použita akustická holografie blízkého pole (SONAH) v kombinaci s metodou beamforming. Pro účely práce bude využito ruční pole mikrofonů, které má k dispozici akustická sekce Odboru diagnostiky na Ústavu konstruování. Použitím těchto metod bude možné určit vibrační mód kola. Experimenty budou probíhat při více provozních podmínkách. Kontaktní tlak se bude pohybovat v rozmezí p_k = 0,8-1 GPa, rychlosti u_m = 1-4 m/s a úhel náběhu AoA = 0-5 °. Pro každé nastavení proběhne pět sad experimentů, viz **Tabulka 5-2**. Publikace bude směřována do časopisu Journal of Sound and Vibration (IF = 3.429) a její odeslání je plánováno na druhé čtvrtletí roku 2022.

Tabulka 5-2 Návrh experimentů pro druhou publikaci

Sada	Aplikovaná látka	Typ testu	Sledované veličiny
1	Žádná	Referenční test se suchým kontaktem	Hluk Adheze
2	Voda	Test s kontaktem zaplaveným vodou	
3	Složení na základě Publikace 1	Testy „mokrých“ filmů	
4	Složení na základě Publikace 1	Testy filmů po odpaření základové báze	
5	Komerční TOR produkt na olejové bázi	Testy „mokrých“ filmů	

Publikace 3

Cílem třetí publikace bude odhalení kritických parametrů, které ovlivňují vznik kvílivého hluku na reálné trati. Pro tuto studii bude nutné ve spolupráci s Dopravním podnikem vytipovat kritická místa na brněnských tratích, kde dochází k silným hlukovým projevům. Důležité také bude popsat společné rysy jednotlivých míst. Sledován bude hlavně poloměr oblouků, způsob uložení kolejí a rychlosti, kterými danými místy tramvaje běžně jezdí. Na každém místě pak proběhnou tři sady měření, viz **Tabulka 5-3**. Znovu budou použity stejné TOR produkty jako ve druhé studii, čímž bude umožněno porovnání výsledků terénních a laboratorních měření. Během testů bude také sledováno roznesení TOR produktu, a to vizuálně a pomocí traťového tribometru. Publikace bude směřována do časopisu Journal of Sound and Vibration (IF = 3.429) a její odeslání je plánováno na první čtvrtletí roku 2023.

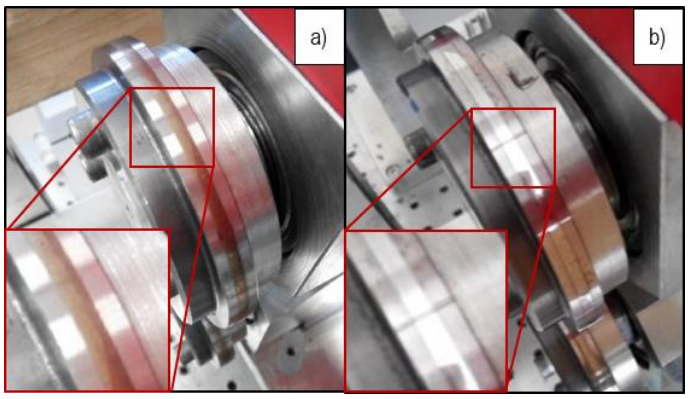
Tabulka 5-3 Návrh experimentů pro třetí publikaci

Sada	Aplikovaná látka	Typ testu	Sledované veličiny
1	Žádná	Porovnávací testy	Hluk Roznesení mazací vrstvy
2	Složení na základě Publikace 1		
3	Komerční TOR produkt na olejové bázi		

6 SOUČASNÝ STAV ŘEŠENÍ DIZERTAČNÍ PRÁCE

Dizertační práce je nyní ve stavu dokončování první fáze řešení a na začátku fáze druhé. V rámci první fáze řešení bylo cílem zodpovědět první položenou vědeckou otázku. Proto byla pozornost soustředěna na zkoumání vztahu mezi adhezí a hlukem a nalezení vhodného složení TOR produktu na vodní bázi, který by byl schopen redukovat kvílivý hluk s co nejmenším ovlivněním adheze v kontaktu. Základem pro tuto fázi byla předchozí Galasova [15] studie, který zkoumal vliv jednotlivých komponentů TOR produktu na vodní bázi na třecí vlastnosti a opotřebení.

Pro experimenty bylo použito dvoudiskové zařízení se zmenšeným kontaktem, které bylo popsáno v předchozích kapitolách. Použité disky musely být před každým testem vyčištěny. Jelikož nestačilo pouhé vyčištění acetonem, byl stanoven dvoufázový postup, který spočíval ve vyčištění disku acetonem a následně zaplavením kontaktu vodou, čímž došlo k dostatečnému vyčištění, viz **Obr. 6-1**.

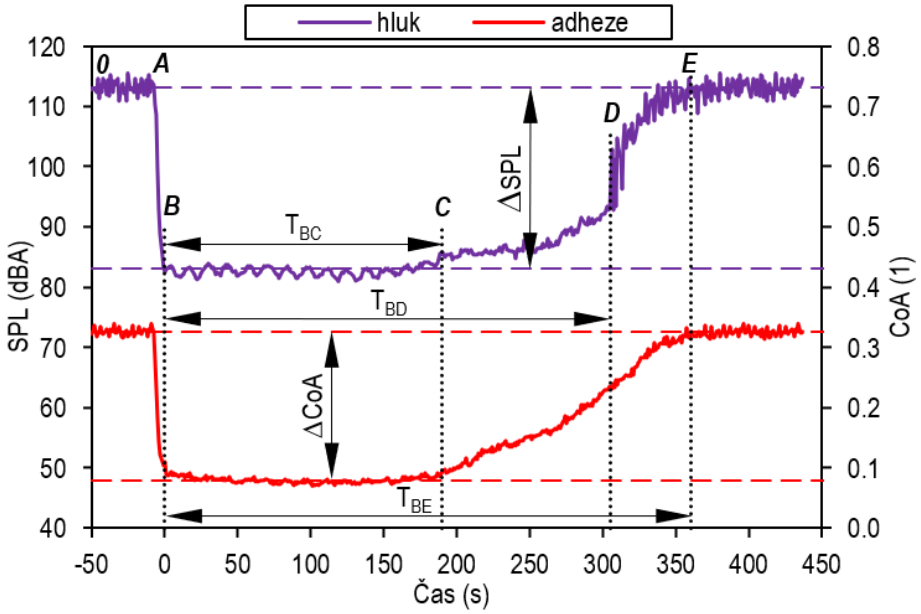


Obr. 6-1 (a) disk vyčištěný acetonem; (b) dvoufázově vyčištěný disk

Všechny testy proběhly za následujících podmínek: kontaktní tlak p_k = 0,8 GPa, rychlost u_m = 1 m/s, skluz SRR = 0,05 a úhel náběhu AoA = 4 °. Měřící mikrofon byl umístěn 1 m nad zemí a 50 cm od kontaktu v horizontálním směru a byl orientován přímo do kontaktu. Během experimentů byly sledovány dva parametry: vyzářené hladiny akustického tlaku (dále „SPL“ – z angl. Sound Pressure Level) a součinitel adheze (dále „CoA“ – z angl. Coefficient of Adhesion).

Podle plánu uvedeného v předchozí kapitole proběhly čtyři sady experimentů. Účelem prvních dvou sad experimentů bylo získat referenční hodnoty pro suchý kontakt a kontakt zaplavený vodou. Třetí sada experimentů probíhala s „mokrými“ filmy. Během těchto testů jsou CoA a SPL ovlivňovány přítomností základové báze. Tato situace se typicky objevuje po aplikaci TOR produktu na kolejnici. Poslední sada experimentů probíhala se „suchými“ filmy. V tomto případě byl experiment započat až po odpaření základové báze. Tento typ filmu je tak tvořen pouze pevnými částicemi a běžně se vyskytuje na reálné trati po roznesení produktu prvním vozidlem. Schéma průběhu experimentu

je uvedeno na **Obr. 6-2**. Testy s mokrými filmy začaly ihned po záběhové fázi (0-A). Okamžik aplikace testované kompozice je označena písmenem A. Rozdíl v případě testů se suchými filmy spočíval v zastavení zařízení v bodě B (přibližně 5 s po aplikaci) po dobu 10 min, během které došlo k odpaření základové báze. Zaznamenávání dat bylo spuštěno v bodě B po opětovném startu zařízení.



Obr. 6-2 Průběh experimentu a vyhodnocované parametry

Pro vyhodnocení experimentů byly pro každou testovanou kompozici stanoveny tři časové intervaly T_{BC}, T_{BD}, a T_{BE}, viz **Obr. 6-2**. První interval T_{BC} vyjadřuje schopnost kompozice udržovat hluk a adhezi na konstantních redukovaných hladinách. Druhý interval T_{BD} vyjadřuje periodu, po kterou je kompozice schopna efektivně redukovat hluk a adhezi a poslední interval T_{BE} vyjadřuje dobu, po které dojde k dosažení referenčních hodnot, nazývanou též „retence“. Mimo tyto tři časové parametry byly stanoveny ještě dva parametry ΔSPL a ΔCoA. Tyto parametry ukazují rozdíl mezi hlukem, respektive adhezí v ustáleném stavu na konci experimentu (po překročení bodu E) a konstantní hladinou hluku, respektive hodnotou adheze v intervalu BC.

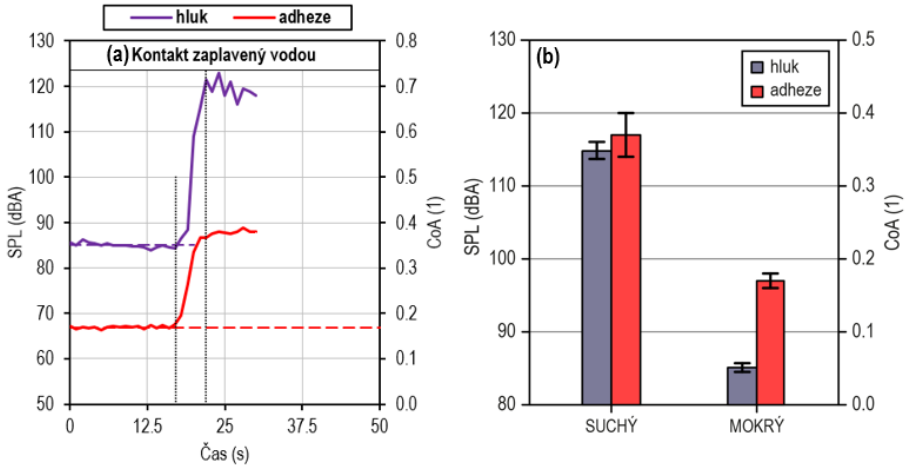
Testované kompozice byly vybrány na základě Galasovy [] studie. Celkem bylo testováno 9 různých složení od jednodušších dvousložkových (C1-3), přes třísložkové (C4-5) až po čtyřsložkové (C6-9) kompozice. Složení kompozic je uvedeno v **Tabulka 6-1**. Všechny kompozice byly na vodní bázi. Množství bentonitu 7,5 hm. % bylo stanoveno v předchozí studii. U menšího množství 5 hm. % se ukázalo, že by mohlo vést na kriticky nízké hodnoty adheze. Na druhou stranu množství 10 hm. % bentonitu už způsobovalo problémy s aplikací kompozice. Proto se množství 7,5 hm. % bentonitu zdálo jako optimální. MoS_2 byl testován ve dvou množstvích 2 hm. % a 5 hm. %, protože byl na základě předchozích zkušeností očekáván výrazný vliv na redukci adheze. Porovnání těchto dvou množství mělo tento výrazný vliv ukázat.

Tabulka 6-1 Přehled testovaných kompozic

Kompozice	Základová báze	Pojivo	Částice pro modifikaci tření	Tuhé mazivo
C1	92.5 hm. % voda	7.5 hm. % bentonit	/	/
C2	92.5 hm. % voda	/	7.5 hm. % mastek	/
C3	92.5 hm. % voda	/	7.5 hm. % oxid zinečnatý	/
C4	85 hm. % voda	7.5 hm. % bentonit	7.5 hm. % mastek	/
C5	85 hm. % voda	7.5 hm. % bentonit	7.5 hm. % oxid zinečnatý	/
C6	85 hm. % voda	7.5 hm. % bentonit	7.5 hm. % mastek	2 hm. % MoS_2
C7	85 hm. % voda	7.5 hm. % bentonit	7.5 hm. % mastek	5 hm. % MoS_2
C8	85 hm. % voda	7.5 hm. % bentonit	7.5 hm. % oxid zinečnatý	2 hm. % MoS_2
C9	85 hm. % voda	7.5 hm. % bentonit	7.5 hm. % oxid zinečnatý	5 hm. % MoS_2

Získané výsledky

Jako první byly provedeny referenční testy pro suchý kontakt a pro kontakt zaplavený čistou vodou. Účelem těchto testů bylo získat referenční hodnoty pro následné sledování vlivu kompozic na redukci hluku a adheze. Voda byla do kontaktu přiváděna kontinuálně po dobu 15 s. Pro suchý kontakt byly stanoveny referenční hodnoty 114.8 ± 1.1 dB a 0.37 ± 0.03, pro kontakt zaplavený vodou 85 ± 0.6 dB a 0.17 ± 0.01, viz **Obr. 6-3**.



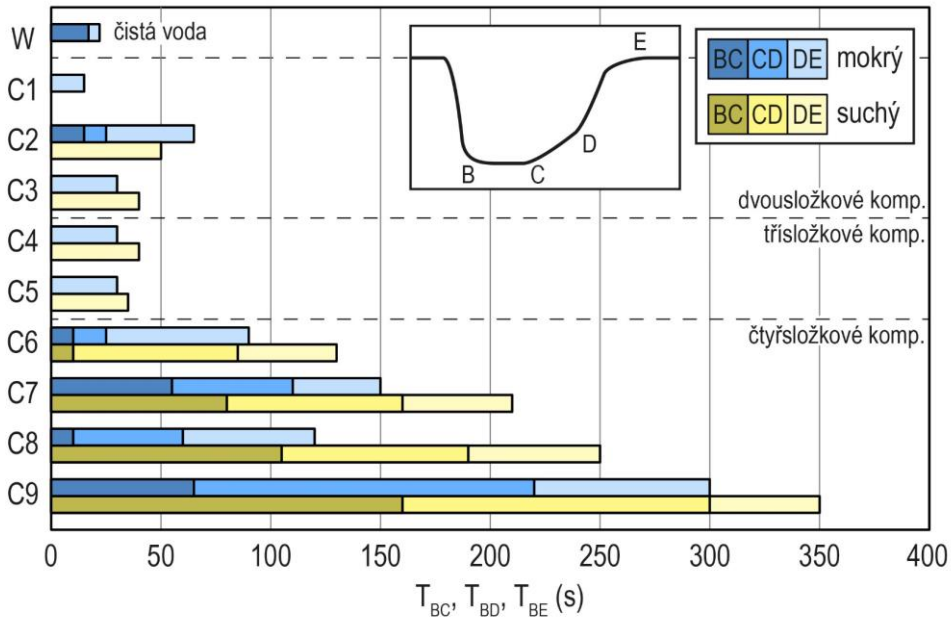
Obr. 6-3 (a) Průběh experimentu pro vodou zaplavený kontakt; (b) referenční hodnoty

Po referenčních testech následovaly experimenty s mokrými filmy. Výsledky těchto testů jsou uvedeny v první polovině **Tabulka 6-2**. Z dvousložkových kompozic dosáhla konstantní redukce SPL a CoA pouze kompozice C2, a to po dobu 15 s. Retence této kompozice byla 65 s. Mokré filmy třísložkových kompozic neměly na redukci hluku výrazný vliv. Jejich efekt byl pozorovatelný po dobu 30 s, ale konstantních hodnot redukce nedosáhla žádná z kompozic. Zajímavějších výsledků ale dosáhly čtyřsložkové kompozice. Všechny kompozice dosáhly konstantních hodnot redukce hluku a adheze. Nejdelších retencí dosahovaly kompozice s obsahem 5 hm. % MoS_2 (kompozice C7 a C9). Tyto kompozice také dosahovaly mírně větších redukcí hluku a adheze.

Tabulka 6-2 Výsledky experimentů s mokrými a suchými filmy

MOKRÝ FILM									
Kompozice	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
T_{BC} (s)	/	15	/	/	/	10	55	10	65
σ (s)	/	5	/	/	/	2	5	2	5
T_{BD} (s)	/	25	/	/	/	25	110	60	220
σ (s)	/	5	/	/	/	2	5	7	10
T_{BE} (s)	15	65	30	30	30	90	150	120	300
σ (s)	2	5	5	5	5	5	5	5	25
ΔSPL (dB)	/	/	/	/	/	25.6	31.1	28.7	33.0
σ (dB)	/	/	/	/	/	0.4	1.5	0.3	0.9
ΔCoA (1)	/	/	/	/	/	0.19	0.28	0.26	0.31
σ (1)	/	/	/	/	/	0.02	0.01	0.05	0.02
SPL_D (dB)	/	/	/	/	/	93.1	93.2	94.8	94.3
σ (dB)	/	/	/	/	/	0.8	1.2	1.2	1.1
CoA_D (1)	/	/	/	/	/	0.30	0.26	0.28	0.27
σ (1)	/	/	/	/	/	0.01	0.04	0.01	0.02
SUCHÝ FILM									
Kompozice	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9
T_{BC} (s)	/	/	/	/	/	10	80	105	160
σ (s)	/	/	/	/	/	3	5	10	15
T_{BD} (s)	/	/	/	/	/	85	140	190	300
σ (s)	/	/	/	/	/	5	20	2	10
T_{BE} (s)	/	50	40	40	35	130	190	270	370
σ (s)	/	5	5	5	3	25	20	20	20
ΔSPL (dB)	/	/	/	/	/	29.6	31.5	33.1	32.7
σ (dB)	/	/	/	/	/	1.7	1.2	0.7	0.5
ΔCoA (1)	/	/	/	/	/	0.25	0.26	0.30	0.31
σ (1)	/	/	/	/	/	0.01	0.01	0.01	0.02
SPL_D (dB)	/	/	/	/	/	96.5	93.1	93.9	93.9
σ (dB)	/	/	/	/	/	0.7	2.6	0.1	1.3
CoA_D (1)	/	/	/	/	/	0.34	0.27	0.26	0.25
σ (1)	/	/	/	/	/	0.02	0.07	0.03	0.02

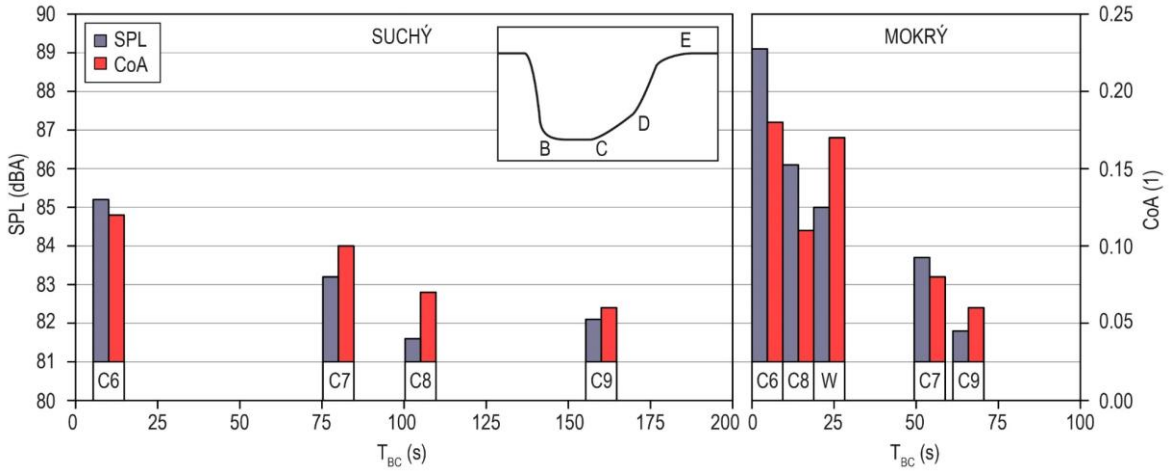
Druhá polovina **Tabulka 6-2** ukazuje výsledky experimentů se suchými filmy. Výsledky dvousložkových a třísložkových kompozic dopadly podobně. Ani jedna z kompozic C1-5 nebyly schopny dosáhnout konstantní fáze redukce hluku a adheze a jejich retence se pohybovala v rozmezí 35-50 s. V případě čtyřsložkových kompozic byl znovu pozorován vliv množství MoS_2. Efekt většího množství opět spočíval v prodloužení všech sledovaných časových parametrů. Kromě vlivu množství MoS_2 byl tentokrát ale pozorován i rozdíl mezi kompozicemi obsahujícími částice mastku a oxidu zinečnatého. V případě kompozic s oxidem zinečnatým bylo dosahováno delších konstantních fází redukce hluku a adheze a také retence těchto kompozic byla výrazně delší. Vysvětlení tohoto rozdílu leží v rozdílné Mohsově tvrdosti částic. Vyšší tvrdost částic oxidu zinečnatého zvyšuje odolnost třecího filmu proti smykovému napětí, které v kontaktu vzniká.



Obr. 6-4 Porovnání časových parametrů kompozic

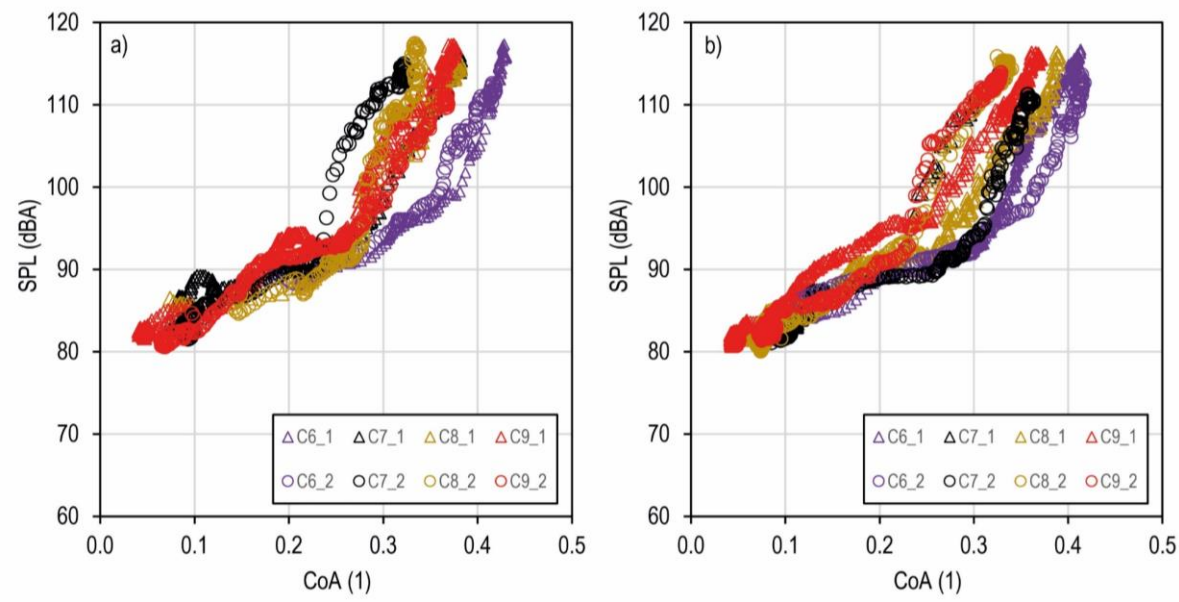
Data ze všech experimentů jsou porovnána na **Obr. 6-4**. Prvních zajímavých výsledků dosáhla samotná voda v kontaktu, která dokázala efektivně redukovat kvílivý hluk, a navíc zaplavení kontaktu vodou nevedlo ke kriticky nízké adhezi, která se může v závislosti na ostatních podmínkách (aplikované množství, přítomnost kontaminantů atd.) objevit při použití TOR produktů na vodní i olejové bázi [21, 44, 59–61]. Na druhou stranu efekt vody na redukci hluku odezněl v porovnání s kompozicemi C6-9 velmi rychle. Z tohoto hlediska se přímá aplikace vody z projíždějícího vozidla na kolo zdá jako slibná možnost, jak předcházet hlukovým projevům. V praxi je zde několik problémů, jako například koroze způsobená vodou nebo zamrzání vody v zimních měsících, které by bylo nutné řešit, ale samotná voda může představovat jednoduchý a levný způsob redukce hluku, který je šetrný k přírodě. Proto by voda neměla být opomenuta v dalším výzkumu.

Kromě čisté vody byla pozornost zaměřena také na vodu s bentonitem (kompozice C1). Předchozí studie [15] totiž odhalila, že kompozice složená z vody a bentonitu dosahuje středních hladin součinitele adheze bez risku dosažení kriticky nízké adheze, ale vliv na hluk doposud studován nebyl. Výsledky testů na dvoudiskovém zařízení ale ukazují, že tato kompozice není schopna dosahovat konstantních hodnot redukce hluku a její retence je dokonce kratší než v případě čisté vody. V případě suchého filmu byl efekt kompozice v podstatě nulový. Proto nemá použití této kompozice pro další výzkum smysl. Jediné složení z dvousložkových a třísložkových kompozic, které zasluhuje pozornost, je kompozice C2, která v případě mokrých filmů dosáhla konstantní fáze redukce hluku a adheze. Retence této kompozice je ale v porovnání se čtyřsložkovými kompozicemi omezená.



Obr. 6-5 Porovnání výsledků mokrých a suchých filmů čtyřsložkových kompozic

Porovnání čtyřsložkových kompozic, viz **Obr. 6-4** a **Obr. 6-5**, ukazuje, že ačkoliv kompozice obsahující 5 hm. % MoS_2 dosahují stabilní a dlouhé fáze konstantní redukce hluku, součinitel adheze se v této fázi pohybuje na velmi nízkých hodnotách. Fulford [53] ve své práci uvádí hodnotu součinitele adheze pro bezpečné brždění vozidla 0.09. Vzhledem k této hodnotě se jako nejvhodnější pro další výzkum zdá kompozice C6. Tato kompozice dokáže dostatečně snižovat SPL a zároveň CoA byl dostatečný pro brždění vozidla při obou typech testů. Tato kompozice obsahuje 2 hm. % tuhého maziva a 7,5 hm. % bentonitu a mastku. Na základě těchto zjištění lze navrhnout, že pro další výzkum by měly být použity kompozice s nižším obsahem tuhého maziva. Další výhodou těchto kompozic by mělo být menší poškození povrchů kontaktních těles, protože všechny částice obsažené v kompozici C6 mají nízkou Mohsovu tvrdost (mezi 1-1.5).



Obr. 6-6 Závislost SPL na CoA pro (a) mokrý; (b) suchý film

Obr. 6-6 ukazuje závislost SPL na CoA během experimentů se čtyřsložkovými kompozicemi. Během vyhodnocení byla pozorována silná korelace mezi SPL a CoA. Zhruba po hodnoty kolem CoA 0.24 postupně SPL roste s pozvolnou směrnicí. Po dosažení těchto hodnot se ale směrnice prudce změní a nárůst SPL je strmější. Závislost mezi SPL a CoA tak lze označit za bilineární. Hodnoty SPL, na kterých k tomuto zlomu dochází, odpovídají hodnotám v bodě D. Toto chování je pravděpodobně způsobeno tím, že na uvedených hodnotách CoA je již vliv filmu TOR produktu minoritní a podmínky v kontaktu jsou dané třením mezi suchými povrchy kontaktních těles. Toto zjištění by mohlo být užitečné v návrhu systémů pro mazání kolejnic. Spouštění mazání by mohlo být řízeno v závislosti na sledované hladině akustického tlaku, čímž by se dalo předejít nechtěnému kvílivému hluku. V současné době jsou totiž většinou mazníky řízeny intervalově, sledování hluku by tak mohlo proces mazání zefektivnit.

Ze získaných výsledků a jejich porovnání vyplývají následující závěry:

- Přímá aplikace vody z jedoucího vozidla může být jednou z metod, jak dosáhnout efektivního snížení hluku bez rizika dosažení kriticky nízké adheze.
- Aby bylo možné dosáhnout dlouhé retence TOR produktu na vodní bázi, je nutná přítomnost tuhého maziva v produktu. Větší množství tuhého maziva ale může vést k problému s nízkou adhezí. V této studii se jako optimální jevilo množství 2 hm. % tuhého maziva.
- Nejhodnějších výsledků z hlediska redukce hluku a hladin součinitele adheze dosahovala kompozice obsahující bentonit, mastek a disulfid molybdenu.
- Byla pozorována silná korelace mezi součinitelem adheze a vyzářenou hladinou akustického tlaku. Závislost mezi těmito veličinami je bilineární. Poznatky z toho zjištění by mohly být využity při vývoji řízení systémů pro mazání kolejnice a celý proces mazání by tak mohl být zefektivněn.

7 ZÁVĚR

Pojednání ke státní doktorské zkoušce detailně rozebírá nejvýznamnější experimentální a teoretické práce související s oblastí vzniku kvílivého hluku v kontaktu kola a kolejnice. Na základě analýzy poznatků z rešeršní části byly formulovány hlavní a dílčí cíle práce a odpovídající vědecké otázky a hypotézy. Dále byly navrženy metody, kterými budou vytyčené cíle dosaženy, a byl představen plán publikací pro nadcházející období. V poslední části práce byl shrnut současný stav dizertační práce. Byly uvedeny výsledky a závěry experimentálního výzkumu v rámci první fáze řešení. V rámci této fáze již byly splněny první dílčí cíle práce, které povedou k úspěšnému splnění hlavního cíle.

BIBLIOGRAFIE

[1] THOMPSON, D. Curve Squeal Noise. In: *Railway Noise and Vibration*. B.m.: Elsevier, 2009, s. 315–342. ISBN 9780080451473. Dostupné z: doi:10.1016/B978-0-08-045147-3.00009-8

[2] MÜLLER, B. a J. OERTLI. Combating Curve Squeal: Monitoring existing applications. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, roč. 293, č. 3–5, s. 728–734. ISSN 10958568.

[3] EADIE, D. T., M. SANTORO aj. KALOUSEK. Railway noise and the effect of top of rail liquid friction modifiers: Changes in sound and vibration spectral distributions in curves. *Wear*. 2005, roč. 258, č. 7–8, s. 1148–1155. ISSN 00431648.

[4] EADIE, D. T. a M. SANTORO. Top-of-rail friction control for curve noise mitigation and corrugation rate reduction. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, roč. 293, č. 3–5, s. 747–757. ISSN 10958568.

[5] HAN, J., Z. WEN, R. WANG, D. WANG, X. XIAO, Guotang ZHAO a Xuesong JIN. Experimental study on vibration and sound radiation reduction of the web-mounted noise shielding and vibration damping wheel. *Noise Control Engineering Journal*. 2014, roč. 62, č. 3, s. 110–122. ISSN 07362501.

[6] BRUNEL, J. F., P. DUFRÉNOY a F. DEMILLY. Modelling of squeal noise attenuation of ring damped wheels. *Applied Acoustics*. 2004, roč. 65, č. 5, s. 457–471. ISSN 0003682X.

[7] STOCK, R., L. STANLAKE, C. HARDWICK, M. YU, D. EADIE a R. LEWIS. Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application. *Wear*. 2016, roč. 366–367, s. 225–232. ISSN 00431648.

[8] MEEHAN, P. A. a X. LIU. Modelling and mitigation of wheel squeal noise under friction modifiers. *Journal of Sound and Vibration*. 2019, roč. 440, s. 147–160. ISSN 10958568.

[9] NELSON, J.T. *Wheel/Rail Noise Control Manual*. 1997. ISBN 0309060605.

[10] EADIE, D. T., J. KALOUSEK a K. C. CHIDDICK. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena. *Wear*. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 185–192. ISSN 00431648.

[11] EADIE, D. T., M. SANTORO a W. POWELL. Local control of noise and vibration with KELTRACK™ friction modifier and Protector® trackside application: An integrated solution. *Journal of Sound and Vibration*. 2003, roč. 267, č. 3, s. 761–772. ISSN 0022460X.

[12] CHIDDICK, K.. Solid lubricants and friction modifiers for heavy loads and rail application. U.S. Patent 6 136 757, 2000.

[13] EADIE, D.T., X. LU a J.COTTER. Modified friciton control compositions. U.S. Patent 7 939 476 B2, 2011.

[14] CHIDDICK, K., A. MEDRANO, R. KRINKER, K. WILSON a D. BIRDWELL. Positive friction control composition for railways. U.S. Patent 9 617 498 B2, 2017.

[15] GALAS, R., D. KVARDA, M. OMASTA, I. KRUPKA a M. HARTL. *The role of constituents contained in water–based friction modifiers for top–of–rail application*. 2018. ISSN 0301679X.

[16] MATSUMOTO, A., Y. SATO, H. ONO, Y. WANG, M. YAMAMOTO, M. TANIMOTO a Y. OKA. Creep force characteristics between rail and wheel on scaled model. *Wear*. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 199–203. ISSN 00431648.

[17] LI, Z., O. ARIAS-CUEVAS, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in leaf contaminated wheel-rail contacts. *Tribology Letters*. 2009, roč. 33, č. 2, s. 97–109. ISSN 10238883.

[18] ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS a E. A. GALLARDO-HERNÁNDEZ. Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts. *Wear*. 2010, roč. 268, č. 3–4, s. 543–551. ISSN 00431648.

[19] MEEHAN, P. A. a X. LIU. Wheel squeal noise control under water-based friction modifiers based on instantaneous rolling contact mechanics. *Wear*. 2019, roč. 440–441, č. January, s. 203052. ISSN 00431648.

[20] FASIHI, P., O. KENDALL, R. ABRAHAMS, P. MUTTON, Q. LAI, C. QIU a W. YAN. Effect of graphite and MoS2 based solid lubricants for application at wheel-rail interface on the wear mechanism and surface morphology of hypereutectoid rails. *Tribology International*. 2021, roč. 157, č. January, s. 106886. ISSN 0301679X.

[21] GALAS, R., M. OMASTA, M. KLAPKA, S. KAEWUNRUEN, I. KRUPKA a M. HARTL. Case study: The influence of oil-based friction modifier quantity on tram braking distance and noise. *Tribology in Industry*. 2017, roč. 39, č. 2, s. 198–206. ISSN 03548996.

[22] EGANA, J. I., J. VINOLAS a N. GIL-NEGRETE. Effect of liquid high positive friction (HPF) modifier on wheel-rail contact and rail corrugation. *Tribology International*. 2005, roč. 38, č. 8, s. 769–774. ISSN 0301679X.

[23] EADIE, D. T., M. SANTORO, K. OLDKNOW a Y. OKA. Field studies of the effect of friction modifiers on short pitch corrugation generation in curves. *Wear*. 2008, roč. 265, č. 9–10, s. 1212–1221. ISSN 00431648.

[24] CURLEY, D., D. C. ANDERSON, J. JIANG a D. HANSON. Field Trials of Gauge Face Lubrication and Top-of-Rail Friction Modification for Curve Noise Mitigation. In: . 2015, s. 449–456.

[25] JIANG, J., R. DWIGHT a D. ANDERSON. Field Verification of Curving Noise Mechanisms. In: . 2012, s. 349–356.

[26] ANDERSON, D. a N. WHEATLEY. Mitigation of Wheel Squeal and Flanging Noise on the Australian Rail Network. In: *Noise and Vibration Mitigation for Rail Transportation Systems*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, nedatováno, s. 399–405. ISBN 978-3-540-74893-9.

[27] REMINGTON, P.J. Wheel/rail squeal and impact noise: What do we know? What don't we know? Where do we go from here? *Journal of Sound and Vibration*. 1987, roč. 116, č. 2, s. 339–353. ISSN 0022460X.

[28] DIXON, N. R. a P. J. REMINGTON. Mechanisms for the generation of railroad wheel squeal. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 1983, roč. 74, č. S1, s. S106–S106. ISSN 0001-4966.

[29] TALOTTE, C., P. E. GAUTIER, D. J. THOMPSON a C. HANSON. Identification, modelling and reduction potential of railway noise sources: A critical survey. *Journal of Sound and Vibration*. 2003, roč. 267, č. 3, s. 447–468. ISSN 0022460X.

[30] RUDD, M. J. Wheel/rail noise—Part II: Wheel squeal. *Journal of Sound and Vibration*. 1976, roč. 46, č. 3, s. 381–394. ISSN 0022460X.

[31] KALKER, J. J. *Three-Dimensional Elastic Bodies in Rolling Contact*. Dordrecht: Springer Netherlands, 1990. Solid Mechanics and Its Applications. ISBN 978-90-481-4066-4.

[32] VON STAPPENBECK, H. Das Kurvengeräusch der Straßenbahn. Möglichkeiten zu seiner Unterdrückung. *VDI Zeitschrift*. 1954, roč. 96, č. 6, s. 171–175.

[33] VERMEULEN, P. J. a K. L. JOHNSON. Contact of Nonspherical Elastic Bodies Transmitting Tangential Forces. *Journal of Applied Mechanics*. 1964, roč. 31, č. 2, s. 338–340. ISSN 0021-8936.

[34] AKAY, A. Acoustics of friction. *The Journal of the Acoustical Society of America*. 2002, roč. 111, č. 4, s. 1525–1548. ISSN 0001-4966.

[35] HECKL, M. A. a I. D. ABRAHAMS. Curve squeal of train wheels, Part 1: mathematical model for its generation. *Journal of Sound and Vibration*. 2000, roč. 229, č. 3, s. 669–693. ISSN 0022460X.

[36] HECKL, M. A. Curve squeal of train wheels, Part 2: which wheel modes are prone to squeal? *Journal of Sound and Vibration*. 2000, roč. 229, č. 3, s. 695–707. ISSN 0022460X.

[37] HECKL, M. A. a X. Y. HUANG. Curve squeal of train wheels, Part 3: active control. *Journal of Sound and Vibration*. 2000, roč. 229, č. 3, s. 709–735. ISSN 0022460X.

[38] BRUNEL, J. F., P. DUFRÉNOY, M. NAÏT, J. L. MUÑOZ a F. DEMILLY. Transient models for curve squeal noise. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, roč. 293, č. 3–5, s. 758–765. ISSN 10958568.

[39] DE BEER, F. G., M. H.A. JANSSENS a P. P. KOOIJMAN. Squeal noise of rail-bound vehicles influenced by lateral contact position. *Journal of Sound and Vibration*. 2003, roč. 267, č. 3, s. 497–507. ISSN 0022460X.

[40] MONK-STEEL, A. D., D. J. THOMPSON, F. G. DE BEER a M. H.A. JANSSENS. An investigation into the influence of longitudinal creepage on railway squeal noise due to lateral creepage. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, roč. 293, č. 3–5, s. 766–776. ISSN 10958568.

[41] CHIELLO, O., J. B. AYASSE, N. VINCENT a J. R. KOCH. Curve squeal of urban rolling stock-Part 3: Theoretical model. *Journal of Sound and Vibration*. 2006, roč. 293, č. 3–5, s. 710–727. ISSN 10958568.

[42] MEEHAN, P. A. a X. LIU. Modelling and mitigation of wheel squeal noise amplitude. *Journal of Sound and Vibration*. 2018, roč. 413, s. 144–158. ISSN 10958568.

[43] LIU, X. a P. A. MEEHAN. Wheel squeal noise: A simplified model to simulate the effect of rolling speed and angle of attack. *Journal of Sound and Vibration*. 2015, roč. 338, s. 184–198. ISSN 10958568.

[44] LIU, X. a P. A. MEEHAN. Investigation of squeal noise under positive friction characteristics condition provided by friction modifiers. *Journal of Sound and Vibration*. 2016, roč. 371, s. 393–405. ISSN 10958568.

[45] GLOCKER, Ch, E. CATALDI-SPINOLA a R. I. LEINE. Curve squealing of trains: Measurement, modelling and simulation. *Journal of Sound and Vibration*. 2009, roč. 324, č. 1–2, s. 365–386. ISSN 0022460X.

[46] PIERINGER, A. A numerical investigation of curve squeal in the case of constant wheel/rail friction. *Journal of Sound and Vibration*. 2014, roč. 333, č. 18, s. 4295–4313. ISSN 10958568.

[47] HOFFMANN, N., M. FISCHER, R. ALLGAIER a L. GAUL. A minimal model for studying properties of the mode-coupling type instability in friction induced oscillations. *Mechanics Research Communications*. 2002, roč. 29, č. 4, s. 197–205. ISSN 00936413.

[48] HOFFMANN, N. a L. GAUL. Effects of damping on mode-coupling instability in friction induced oscillations. *ZAMM Zeitschrift fur Angewandte Mathematik und Mechanik*. 2003, roč. 83, č. 8, s. 524–534. ISSN 00442267.

[49] ZENZEROVIC, I., W. KROPP a A. PIERINGER. Influence of spin creepage and contact angle on curve squeal: A numerical approach. *Journal of Sound and Vibration*. 2018, roč. 419, s. 268–280. ISSN 10958568.

[50] DING, B., G. SQUICCIARINI, D. THOMPSON a R. CORRADI. An assessment of mode-coupling and falling-friction mechanisms in railway curve squeal through a simplified approach. *Journal of Sound and Vibration*. 2018, roč. 423, s. 126–140. ISSN 10958568.

[51] DING, B., G. SQUICCIARINI a D. THOMPSON. Effect of rail dynamics on curve squeal under constant friction conditions. *Journal of Sound and Vibration*. 2019, roč. 442, s. 183–199. ISSN 10958568.

[52] MEEHAN, P. A. Prediction of wheel squeal noise under mode coupling. *Journal of Sound and Vibration*. 2020, roč. 465, s. 115025. ISSN 10958568.

[53] FULFORD, C.R. *Engineering Review of Low Adhesion Research.* Report published by Rail Safety and Standards Board, UK (2004)

[54] KALKER, J. J. A Fast Algorithm for the Simplified Theory of Rolling Contact. *Vehicle System Dynamics*. 1982, roč. 11, č. 1, s. 1–13. ISSN 0042-3114.

[55] HUANG, Z. *Theoretical Modelling of Railway Curve Squeal*. B.m., 2007. University of Southampton.

[56] BAEK, K. S., K. KYOGOKU a T. NAKAHARA. An experimental investigation of transient traction characteristics in rolling-sliding wheel/rail contacts under dry-wet conditions. *Wear*. 2007, roč. 263, č. 1-6 SPEC. ISS., s. 169–179. ISSN 00431648.

[57] WANG, W.J., J. GUO, H.Y. WANG, Q.Y. LIU, M.H. ZHU a X.S. JIN. Experimental investigation of adhesion coefficient of wheel/rail under the track ramp conditions. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2014, roč. 228, č. 7, s. 808–815. ISSN 1350-6501.

[58] WANG, W.J., H.F. ZHANG, Q.Y. LIU, M.H. ZHU a X.S. JIN. Investigation on adhesion characteristic of wheel/rail under the magnetic field condition. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2016, roč. 230, č. 5, s. 611–617. ISSN 1350-6501.

[59] CHEN, H., S. FUKAGAI, Y. SONE, T. BAN a A. NAMURA. Assessment of lubricant applied to wheel/rail interface in curves. *Wear*. 2014, roč. 314, č. 1–2, s. 228–235. ISSN 00431648.

[60] GALAS, R., M. OMASTA, I. KRUPKA a M. HARTL. Laboratory investigation of ability of oil-based friction modifiers to control adhesion at wheel-rail interface. *Wear*. 2016, roč. 368–369, s. 230–238. ISSN 00431648.

[61] BUCKLEY-JOHNSTONE, L., M. HARMON, R. LEWIS, C. HARDWICK a R. STOCK. A comparison of friction modifier performance using two laboratory test scales. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2019, roč. 233, č. 2, s. 201–210. ISSN 0954-4097.

SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Seznam obrázků

Obr. 2-1 (a) Průjezd vozidla traťovým obloukem; (b) vznik příčného skluzu; (c) trakční křivka [1, 8] 8

Obr. 3-2 Frekvenční pásma kvílivého hluku (a) Tramvaj 1A, (b) Tramvaj 1B; (c) Tramvaj 2; (d) Porovnání hladin akustického tlaku před a po aplikaci TOR produktu [3] 10

Obr. 3-3 Časový záznam hladin akustického tlaku pro průjezd nákladního vlaku. [24] ... 11

Obr. 3-4 (a) Efekt množství TOR produktu na hluk; (b) Porovnání měření adheze a hluku [21] 12

Obr. 3-5 Měření hladin ak. tlaku pro modifikovaný kontakt a za suchých podmínek [21] 13

Obr. 3-1 (a) Trakční křivky testovaných kompozic [20], (b) Třecí křivky jednotlivých komponentů [15] 14

Obr. 3-6 (a) Časový průběh laterální síly v kontaktu; (b) Odpovídající frekvenční spektrum laterální síly [46] 16

Obr. 3-7 (a) Schéma vývoje modelu kvílivého hluku; (b) s. s. v bodě kontaktu (123) a s. s. kola a kolejnice [49] 17

Obr. 3-8 (a) Testovací souprava; (b) MKP model testovací soupravy [43] 18

Obr. 3-9 (a) Simulované amplitudy rychlosti vibrací a měřené hladiny akustického tlaku pro úhel náběhu 24 mrad při různých valivých rychlostech; (b) Simulované amplitudy rychlosti vibrací a měřené hladiny akustického tlaku při valivé rychlosti 800 ot-1 pro různé úhly náběhu [43] 19

Obr. 3-10 (a) Simulovaná trakční křivka v kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi; (b) proces stanovení experimentální trakční křivky z průměrných součinitelů adheze při 800 ot^{-1} [44] 20

Obr. 3-11 Blokový diagram analytického modelu [42] 21

Obr. 3-12 (a) závislost hladiny ak. tlaku na crabbing velocity; měření v terénu (body), predikce (čáry); (b) frekvenční spektra hluku; terění měření (červená), predikce (modrá) [42] 22

Obr. 3-13 (a) Simulované trakční křivky pro suchý (–) a modifikovaný (–) kontakt a experimentální data pro suchý (□) a modifikovaný (○) kontakt při valivé rychlosti 17,8 m/s; (b) simulované okamžité trakční křivky modifikovaného kontaktu pro úhly náběhu 8, 16 a 24 mrad [8] 23

Obr. 3-14 Optimální trakční křivka modifikovaného kontaktu (– –) a optimalizovaná oblast pro eliminaci kvílivého hluku (šedě) pro valivou rychlost 17,8 m/s [8] 23

Obr. 3-15 (a) Mapa stability pro vnitřní kolo, efekt laterálního ofsetu pozice kontaktního bodu a součinitele adheze; (b) mapa stability pro vnější kolo, efekt kontaktního úhlu a součinitele adheze [50] 24

Obr. 3-16 Vibrace kola při kvílivém hluku na frekvenci 1515 Hz, (a) časová data, (b) frekvenční spektrum [50] 25

Obr. 3-17 (a) MKP mesh kolejnice a jejího uložení; (b) schéma modelu kontaktu kola a kolejnice [51] 26

Obr. 3-18 Analytická predikce a numerická verifikace vibrací kvílivého hluku za suchých a modifikovaných podmínek [19] 27

Obr. 3-19 Predikce hladin kvílivého hluku pro různé rychlosti a úhly náběhů (a) v suchém kontaktu; (b) v kontaktu s modifikovanými třecími vlastnostmi [19] 28

Obr. 3-20 Vliv TOR produktů na vodní bázi na snížení kvílivého hluku [19] 28

Obr. 3-21 (a) Simulovaný časový průběh nárůstu kvílivého hluku bez propojení módů (černá) a s maximálním viskózním propojením módů (červená) a jim odpovídající analytické predikce; (b) závislost hladiny ak. tlaku na příčném skluzu, srovnání analytických (čára) a numerických (body) výsledků [52] 29

Obr. 3-22 (a) Simulovaný časový průběh nárůstu kvílivého hluku bez propojení módů (černá) a s maximálním tuhostním propojením módů (červená) a jim odpovídající analytické predikce; (b) závislost hladiny ak. tlaku na příčném skluzu, srovnání analytických (čára) a numerických (body) výsledků [52] 30

Obr. 4-1 Citační mapa 31

Obr. 5-1 Testovací souprava se zmenšeným kontaktem 37

Obr. 5-2 Testovací souprava s reálným železničním kolem 38

Obr. 6-1 (a) disk vyčištěný acetonem; (b) dvoufázově vyčištěný disk 43

Obr. 6-2 Průběh experimentu a vyhodnocované parametry 44

Obr. 6-3 (a) Průběh experimentu pro vodou zaplavený kontakt; (b) referenční hodnoty . 45

Obr. 6-4 Porovnání časových parametrů kompozic 47

Obr. 6-5 Porovnání výsledků mokrých a suchých filmů čtyřsložkových kompozic 48

Obr. 6-6 Závislost SPL na CoA pro (a) mokrý; (b) suchý film 48

SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1 Hlavní frekvenční složky simulací [46] 16

Tabulka 3-2 Nestabilní frekvence a jim odpovídající rezonanční módy kola [51] 26

Tabulka 5-1 Návrh experimentů pro první publikaci 41

Tabulka 5-2 Návrh experimentů pro druhou publikaci 42

Tabulka 5-3 Návrh experimentů pro třetí publikaci 42

Tabulka 6-1 Přehled testovaných kompozic 45

Tabulka 6-2 Výsledky experimentů s mokrými a suchými filmy 46

SEZNAM PUBLIKACÍ

NAVRÁTIL, V., GALAS, R., KLAPKA, M., KVARDA, D., OMASTA, M., SHI, L., DING, H., WANG, W., KŘUPKA, I. a M. HARTL. Wheel squeal noise in rail transport: the effect of friction modifier composition. 2021 (v revizi)

OMASTA, M., NAVRÁTIL, V., GABRIEL, T., GALAS, R., KLAPKA, M. Design of the twin-disc test rog for te study of wheel squeal noise. 2021 (v revizi)