



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

DIAGNOSTIKA ADHEZE ŽELEZNIČNÍHO KOLA S VYUŽITÍM AKUSTICKÉ EMISE

DIAGNOSTICS OF ADHESION OF THE TRAM WHEEL USING ACOUSTIC EMISSION METHOD

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Martin Skoupý

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Martin Skoupý
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Diagnostika adheze železničního kola s využitím akustické emise

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Adheze v kontaktu kola a kolejnice je ovlivněna celou řadou provozních parametrů a je důležitým kvalitativním parametrem jízdy tramvajového vozu. V přechodových stavech ke kterým dochází při nedokonalém odvalování kola po kolejnici má měření adheze konvenčními postupy určité limity. Cílem práce je ověření potenciálu měření adheze v kontaktu s využitím citlivé metody akustické emise pro zvýšení vzhledu do dějů, ke kterým v kontaktu při jízdě dochází.

Typ práce: vývojová

Výstup práce: publikační výsledek (J, D)

Projekt: GAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je experimentálně ověřit schopnost posouzení adheze v kontaktu kola a kolejnice využitím metody akustické emise.

Dílčí cíle diplomové práce:

- navrhnout experiment a stanovit provozní podmínky testu na zařízení "full-scale" twin disk,
- vybrat vhodnou sadu parametrů akustické emise pro posouzení adheze – citlivostní analýza,
- sestavit metodu měření a hodnocení adheze v kontaktu kola a kolejnice s využitím akustické emise.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, digitální data.

Rozsah práce: cca 72 000 znaků (40 – 50 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://www.ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

PRAKASH, Ravi. Non-Destructive Testing Techniques. 1ed. New Academic Science, 2012. ISBN 978-1-5231-1873-1.

LEE, Seung-Seok a , et al. Advanced Nondestructive Evaluation I. 1ed. Trans Tech Publications, 2006. ISBN 978-0-87849-412-5.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Cílem práce je vývoj metody diagnostiky adheze železničního kola pomocí sledování akustické emise vznikající v kontaktu kola a kolejnice. Uplatnění se očekává v laboratorním prostředí na dvoudiskových zařízeních. V práci jsou uvedeny možnosti použití kontaktního i bezkontaktního senzoru, zjišťovány byly odezva na změnu rychlosti a úhlu náběhu a změny adheze po aplikaci vody do kontaktu. Pro vyhodnocení byly použity RMS a uvolněná energie akustické emise, koeficient špičatosti nebo Shannonova entropie.

Bylo zjištěno, že RMS akustické emise od nízkých hodnot úhlu náběhu (10 mrad) prokazatelně stoupá s jeho dalším nárůstem i s rychlostí. Po aplikaci vody byl sledován propad akustické emise korespondující s propadem součinitele adheze. Pozorovány byly i přechodové stavy při zavádění vody a hladovění kontaktu související s nerovnoměrným rozprostřením vody. Ty negativně ovlivňují stabilitu kontaktu a mohou vést ke vzniku nežádoucího kvílivého hluku. Aktivita akustické emise také vzrostla před fází hladovění, což časově koresponduje s v literatuře popsaným uvolněním oxidované vrstvy. Metoda akustické emise proto může sloužit k jeho studiu a potenciálně i predikci hladovění kontaktu.

KLÍČOVÁ SLOVA

akustická emise, kontakt kola a kolejnice, adheze, kvílivý hluk

ABSTRACT

The aim of the thesis is to develop a method of adhesion diagnostics of a tram wheel by monitoring the acoustic emission originating from the wheel-rail contact. Application on a twin-disk test rigs is expected. The possibilities of using both contact and contactless sensors are examined. The thesis is focused on describing the response to varying speeds, angles of attack and the change of adhesion due to the application of water into the contact. RMS and energy of the acoustic emission, kurtosis or Shannon's entropy were evaluated.

It was discovered, that from the low values of the angle of attack (10 mrad) the acoustic emission RMS rises in linear manner with further increase of the angle or speed. After the application of water, the drop of the acoustic emission corresponding to the drop of adhesion coefficient was detected. The transitional states associated with unequal distribution of water were observed following its application and during the contact starvation. This can lead to an undesirable squeal noise. Another transient phenomenon manifested by the increase of acoustic emission activity was observed preceding the contact starvation, its timing corresponds to the removal of oxide layer described in the literature. Acoustic emission therefore proved to be suitable for its study and possibly for the contact starvation prediction.

KEYWORDS

acoustic emission, wheel-rail contact, adhesion, rail squeal

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SKOUPÝ, Martin. *Diagnostika adheze železničního kola s využitím akustické emise*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157669>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Milan Klapka.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval panu doc. Ing. Milanu Klapkovi, Ph.D. za vstřícné vedení práce, pozitivní přístup, díky kterému jsem z konzultací odcházel s úsměvem, a také nemalé množství času a sil, které tomuto věnoval. Dále bych rád poděkoval Ing. Františku Vlašicovi, Ph.D. a Ing. Václavu Navrátilovi, za asistenci při provádění experimentů, přínosné konzultace i rychlé a ochotné reakce na veškeré dotazy.

Chtěl bych velmi poděkovat i svým spolužákům ze studijního programu Konstrukční inženýrství za skvělou atmosféru, která po dobu tvorby této práce panovala a na kterou budu rád vzpomínat. A v neposlední řadě velice děkuji i své rodině za zázemí a podporu, které mi po celou dobu mého studia poskytovala, a díky které jsem tvorbě nejen této práce mohl vyhradit všechny potřebný čas a prostředky.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením doc. Ing. Milana Klapky, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Rešeršní metody	14
2.2	Kritická rešerše	15
2.2.1	Akustická emise	16
2.2.2	Podmínky v kontaktu kola s kolejnicí	17
2.2.3	Využití akustické emise pro sledování kontaktů	20
2.2.4	Bezkontaktní měření akustické emise	24
2.3	Experimentální zařízení	25
2.4	Shrnutí hlavních zjištění	26
2.5	Identifikace novosti a příležitostí	28
3	CÍLE PRÁCE	29
3.1	Vymezení problému	29
3.2	Cíle vývoje	31
4	KONCEPČNÍ NÁVRH	32
4.1	Analýza cílů a specifikace omezení	32
4.2	Technická funkční analýza	32
4.2.1	Senzory	33
4.2.2	Analyzátor	34
4.3	Návrh alternativních řešení	35
4.3.1	Umístění senzorů	35
4.4	Analýza alternativních řešení	37
4.4.1	Umístění kontaktního senzoru	37
4.4.2	Výběr primárního senzoru pro sledování vlivu rychlosti a úhlu náběhu	38
5	PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH	40
5.1	Vyhodnocované veličiny	40
5.1.1	RMS	40
5.1.2	Energie AE na otáčku	40
5.1.3	Koeficient špičatosti	41
5.1.4	Shannonova entropie	41
5.2	Vyhodnocení dat	42

6	DETAILNÍ NÁVRH	44
6.1	Měřicí řetězec akustické emise	44
6.2	Postup ověřovacích experimentů	44
6.3	Testovací podmínky	45
6.3.1	Testy odezvy na rychlost a úhel náběhu	46
6.3.2	Testy odezvy na úbytek vody z kontaktu	46
6.4	Výsledky experimentů	47
6.4.1	Odezva akustické emise na změnu rychlosti	47
6.4.2	Odezva akustické emise na změnu úhlu náběhu	51
6.4.3	Odezva při aplikaci vody do kontaktu	53
6.5	Diskuze a hodnocení klíčových parametrů	57
6.5.1	Odezva na změnu provozních podmínek	58
6.5.2	Odezva při úbytku vody z kontaktu	59
7	ZÁVĚR	64
8	VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV	65
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	66
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	69
10.1	Seznam zkratk	69
10.2	Seznam symbolů a veličin	69
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	70
11.1	Seznam obrázků	70
11.2	Seznam grafů	71
12	SEZNAM TABULEK	73
13	SEZNAM PŘÍLOH	74

1 ÚVOD

Kolejová doprava je jedním ze základních prostředků přepravy osob i materiálu na velké vzdálenosti i napříč městy. Z tohoto důvodu existuje velký zájem o komplexnější porozumění stěžejním oblastem ovlivňujícím provoz vlakových a tramvajových souprav. Velmi důležitým uzlem je kontakt kola s kolejnicí, přes nějž se přenáší mj. trakční a brzdě síly. Kombinace provozních podmínek a vlivů okolního prostředí významně ovlivňuje opotřebení kola i kolejnice, hlučnost, ale i účinnost přenosu působících sil. Některé jejich nevhodné kombinace pak mohou zapříčinit vznik nežádoucích stavů projevujících se například náhlým poklesem adheze, tedy zjednodušeně řečeno přilnavosti mezi kolem a kolejnicí, nebo vznikem kvilivého hluku při průjezdu zatáčkou, který zejména u tramvajového provozu negativně ovlivňuje kvalitu života v okolních obydlích.

Původ těchto jevů je zkoumán v reálných podmínkách i v laboratorním prostředí. Pro simulaci reálných podmínek se u experimentálních zařízení jeví jako vhodné maximální navýšení tuhosti zařízení a zatěžování odpovídající reálnému zatížení kol. Toho může být dosaženo na zařízeních v reálné velikosti, která jsou kvůli úspoře prostoru často realizována ve dvoudiskovém provedení, kde je kolejnice nahrazena menším diskem. Na těchto strojích jsou zpravidla měřeny působící síly a z nich vyvozován součinitel adheze, dále může být měřena hlučnost provozu nebo například vibrace. Všechny tyto veličiny nicméně vznikají až jako důsledek dějů, které mají svůj původ v samotném kontaktu kola a kolejnice, respektive disku, který ji zastupuje. Při provedení v reálné velikosti ovšem není zavedena metoda, která by poskytla přímý náhled do kontaktu, kde se předpokládá existence přechodných dějů, které se přímo nepromítají do zbytku laboratorního zařízení, a tedy ani dnes sledovaných veličin. Jejich působení ale může ve výsledku vést k výše zmíněným nepříznivým stavům, a je proto žádoucí nalézt způsob, kterým by bylo možné kontakt sledovat přímo, a napomoci tak porozumění mechanismům jejich vzniku.

Jednou z perspektivních metod v této oblasti je tzv. metoda akustické emise, která spočívá v detekci stejnojmenného jevu, jenž spočívá v uvolnění vysokofrekvenčního mechanického vlnění v důsledku deformace materiálu. Z tohoto důvodu metoda akustické emise původně vznikla pro účely nedestruktivního testování materiálů a detekci poškození. V poslední době se nicméně prosazuje i do oblasti studia kontaktu, přičemž byla úspěšně aplikována například při pozorování změn režimu mazání kluzných ložisek, kde při dostatečně vysokých otáčkách dochází ke vzniku vrstvy maziva oddělující kontaktní povrchy, což vede k omezení jejich deformací, a tedy i ke změně odezvy na senzoru akustické emise.

Pro účely pozorování kontaktu kola s kolejnicí je nicméně akustická emise využívána spíše až v posledních letech. Zpravidla se jedná o popis odezvy na základní provozní podmínky jako je rychlost a zatížení s využitím zmenšených zařízení. Cílem této diplomové práce je vývoj metody využívající akustickou emisi pro sledování změn adheze i v závislosti na vnějších vlivech s využitím laboratorního dvoudiskového zařízení.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršní metody

Pro rešerši byly stanoveny tři základní otázky:

- 1) Jak se v kolejové dopravě dnes hodnotí vliv **provozních podmínek (zatížení, úhel náběhu, rychlost, kontaktní tlak aj.)** na děje v **kontaktu kola a kolejnice**?

Pro stanovení relevantních cílů a nastavení experimentů je nutné znát reálné podmínky v kontaktu kola a kolejnice a způsob jejich měření.

- 2) Jaké je v současnosti využití **akustické emise** v oblasti **tribologického studia kontaktu železničního kola a kolejnice**?

Metoda akustické emise je již dnes používána v některých oblastech studia tribologie kontaktu dvou těles (viz kluzná ložiska). Poznatky z těchto oblastí pak mohou být do jisté míry přenositelné i na oblast kolejové dopravy.

- 3) Jaká jsou **specifika a omezení měření akustické emise bezkontaktním senzorem**?

Akustická emise je zpravidla měřena senzorem připevněným přímo na zkoumané těleso. Při bezkontaktním měření vhodném pro používané dvoudiskové zařízení lze očekávat jisté negativní vlivy na kvalitu signálu v důsledku jeho přenosu ke snímači vzduchem.

Z těchto otázek byly následně stanoveny finální rešeršní dotazy:

- 1) Podmínky v kontaktu kola s kolejnici

"operating conditions" **AND** ("wheel-rail contact" **OR** "rail-wheel contact")

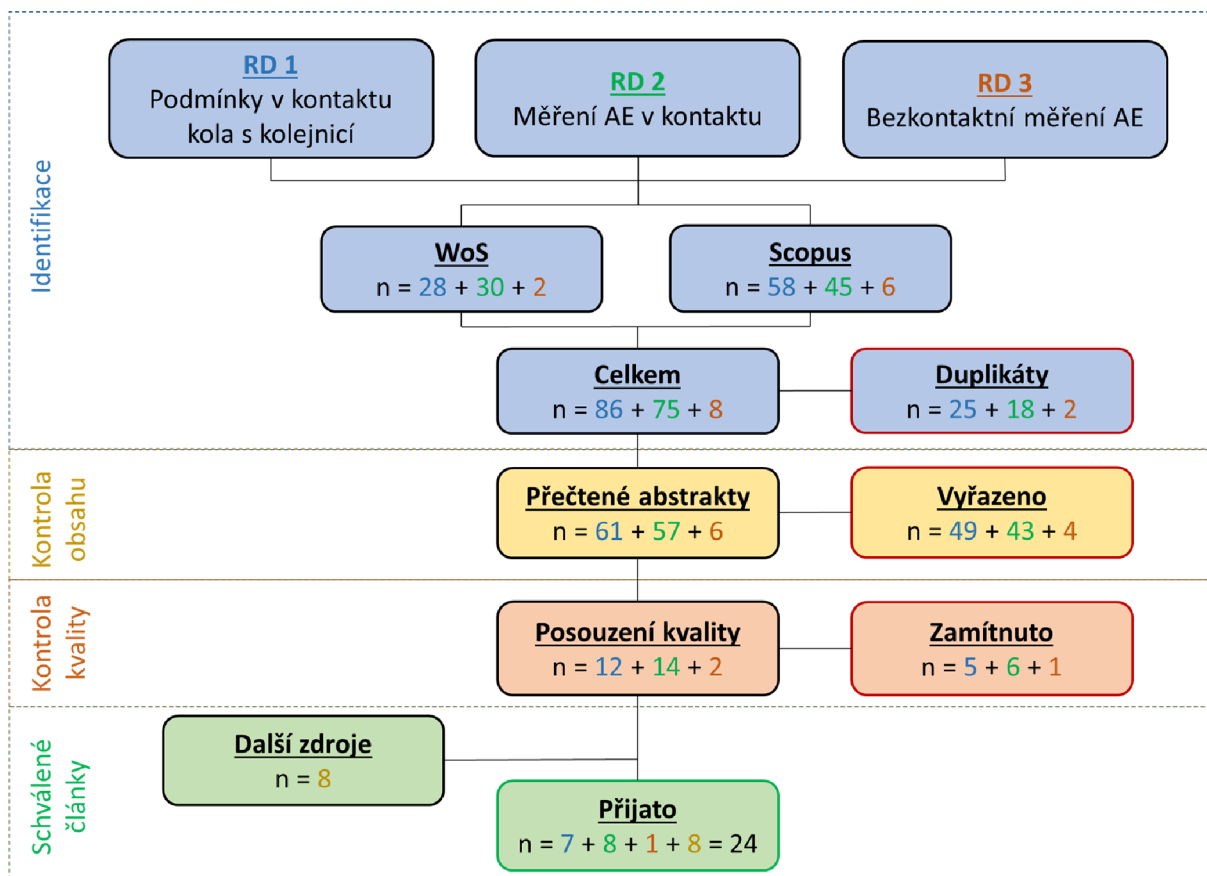
- 2) Měření AE v kontaktu

"acoustic emission" **AND** (tribology **OR** adhesion **OR** friction) **AND** (((contact **OR** touch **OR** "body interaction") **AND** ("rail transport" **OR** train **OR** railway **OR** tram)) **OR** "journal bearing")

- 3) Bezkontaktní měření AE

"acoustic emission" **AND** ("contactless monitor" **OR** "touchless monitor" **OR** "contactless sensor" **OR** "touchless sensor" **OR** "contactless measur*" **OR** "touchless measur*")

Vyhledávání zdrojů probíhalo v databázích Scopus a Web of Science. Zdroje byly filtrovány ve třech fázích. Nejdříve byly odstraněny duplikáty, následně proběhla kontrola relevance v závislosti na abstraktu a na závěr proběhlo vyhodnocení kvality dle Impact Factoru časopisu, přičemž až na výjimky způsobené nedostatkem zdrojů byl hraniční kvartil Q3. V případě většího množství zdrojů zabývajících se podobným tématem bylo přihlíženo i k h-indexu autora a počtu citací. Mezi další zdroje se řadí práce zabývající se konstrukcí experimentálního zařízení i senzorů nebo zdroje části obrázků.



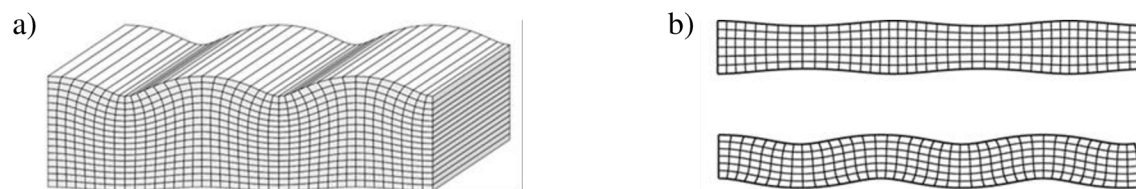
Obr. 2-1 PRISMA diagram vyhledávání a třídění zdrojů

2.2 Kritická rešerše

Rešerše byla rozdělena do čtyř kapitol popisujících princip fungování metody akustické emise (AE), parametry kontaktu kola s kolejnicí a způsob jejich sledování a možnosti uplatnění metody AE pro sledování dějů v kontaktu se zaměřením na dnešní využití v kolejové dopravě i v dalších oblastech. Poslední část identifikuje možnosti uplatnění bezkontaktního senzoru AE pro účely sledování rotujících součástí.

2.2.1 Akustická emise

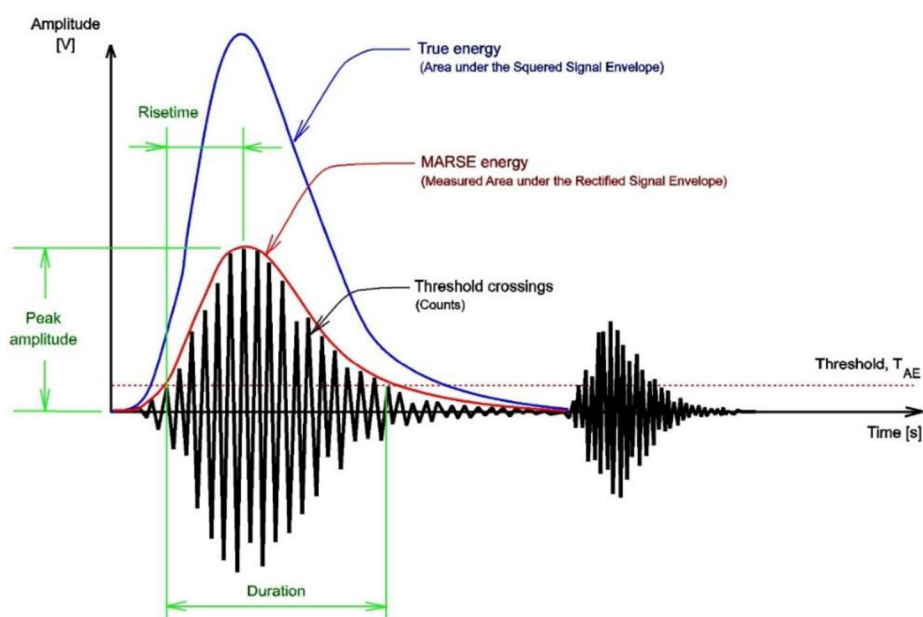
Scruby [1] popisuje akustickou emisi (AE) jako měřicí metodu spočívající v tvorbě a detekci mechanického vlnění v materiálu na ultrazvukových frekvencích. Vlnění vzniká v důsledku rychlé změny napětí nebo deformace v materiálu a je detekováno pomocí piezoelektrického senzoru. Dominantními formami vlnění detekovaného kontaktním senzorem jsou tzv. Rayleighova a Lambého vlny [1], kdy se první jmenované šíří po povrchu materiálu, zatímco druhé se promítají po celém jeho průřezu, a to zejména u tenkých plátů [1], viz Obr. 2-2.



Obr. 2-2 Vlevo Rayleighovo vlnění [2], vpravo Lambého vlnění symetrické (nahore) a asymetrické (dole) [3]

Dle Scrubyho se akustická emise využívala ve třech základních oblastech, a to pro nedestruktivní metodu detekce defektů v materiálu, pozorování dějů v materiálu při obráběcích procesích a také pro testování mechanických vlastností součástí [1]. V poslední době je tato metoda ovšem využívána i pro pozorování procesů odehrávajících se v kontaktu dvou těles. Úspěšně byla nasazena například pro určování režimu mazání kluzných ložisek [4], do jisté míry pak byla využita i pro sledování kontaktu kola s kolejnicí [5].

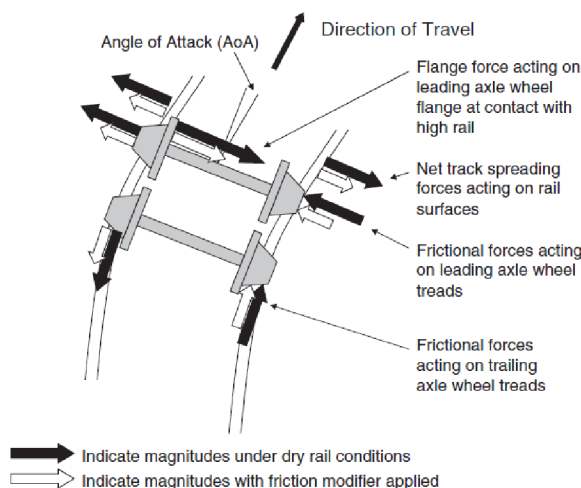
Mezi vyhodnocované parametry se řadí počet a délka překročení stanovené prahové hodnoty, amplitudy přichozího signálu, kvadratický průměr odpovídající efektivní hodnotě signálu (RMS), uvolněná energie získaná její integrací v čase, časová distribuce přichozích signálů, frekvenční spektrum a další [1].



Obr. 2-3 Výběr některých parametrů vyhodnocovaných u akustické emise [1]

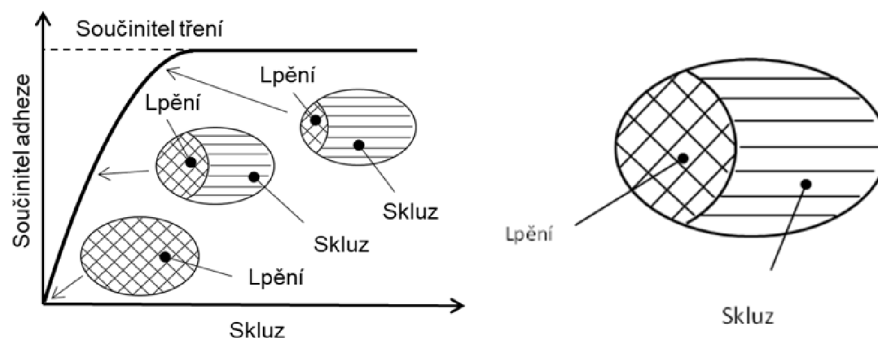
2.2.2 Podmínky v kontaktu kola s kolejnicí

Železniční soupravy jsou poháněny vpřed trakční silou vyvozenou v kontaktu hnaného kola s kolejnicí. Kromě síly zátěžné a trakční vzniká v případě průjezdu zatáčkou v kontaktu síly laterální způsobené bočním skluzem a případně i kontaktem okolku s kolejnicí, kompletní rozklad trakčních a laterálních sil působících na kola i kolejnice znázorňuje Obr. 2-4 [6].



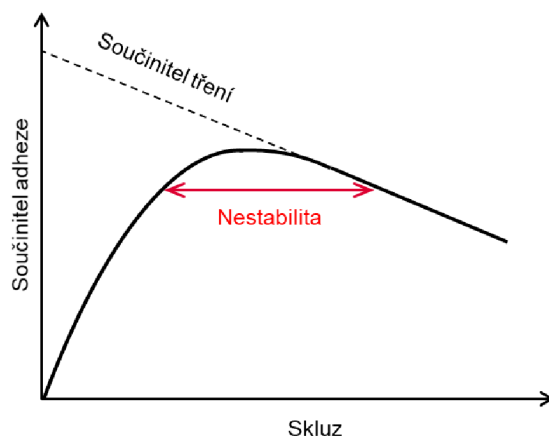
Obr. 2-4 Rozklad sil působících v kontaktu železniční nápravy s kolejnicí při průjezdu zatáčkou [6]

Poměr mezi trakční, případně laterální silou a silou zátěžnou se nazývá *součinitel adheze* (dále používána i zkratka *CoA* z anglického *coefficient of adhesion*) a lze jej přirovnat k míře přilnavosti kola ke kolejnici, respektive obdobě součinitele tření pro valící se tělesa. Nízké hodnoty mohou sloužit k redukci opotřebení mj. při průjezdech zatáčkami, kdy v kontaktu dochází k natočení kola vůči kolejnici (tzv. *úhel náběhu*, dále používána i zkratka *AoA* z anglického *angle of attack*) vedoucímu ke skluzu v laterálním směru. Vysoké hodnoty součinitele adheze jsou naopak žádoucí při rozjíždění a brždění [7]. Při podrobnějším pohledu lze při zrychlování, zpomalování či zatáčení v kontaktu identifikovat oblast lpění, kde dochází k čistému valení a oblast skluzu, jejíž velikost je úměrná relativní rychlosti kola a kolejnice v bodě kontaktu. S rostoucím rozdílem rychlostí stoupá podíl skluzu a zároveň hodnota součinitele adheze. Bod, kde je v kontaktu dosažen plný skluz, se nazývá *bod saturace*, za kterým v ideálním případě nabývá součinitel adheze konstantní hodnoty odpovídající vzhledem k probíhajícímu plnému skluzu součiniteli tření, viz Obr. 2-5 [8].



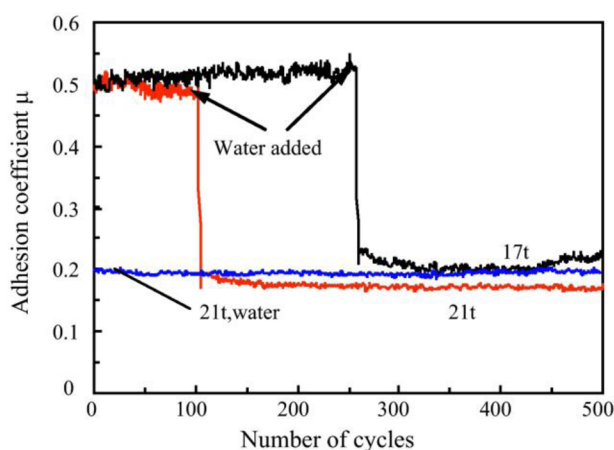
Obr. 2-5 Trakční křivka [8]

Součinitel tření má nicméně s rostoucí relativní rychlostí na neošetřeném povrchu tendenci klesat, což v kombinaci s omezeným tlumením železničního soukolí vede při relativních rychlostech v blízkosti bodu saturace k destabilizaci systému a překmitávání mezi dvěma stavy znázorněnými na Obr. 2-6. Je předpokládáno, že právě kvůli vzniklé nestabilitě poté vzniká silný a zejména v městském prostředí nežádoucí kvílivý hluk [7].



Obr. 2-6 Mechanismus vzniku kvílivého hluku v důsledku nestability součinitele adheze – upraveno [7]

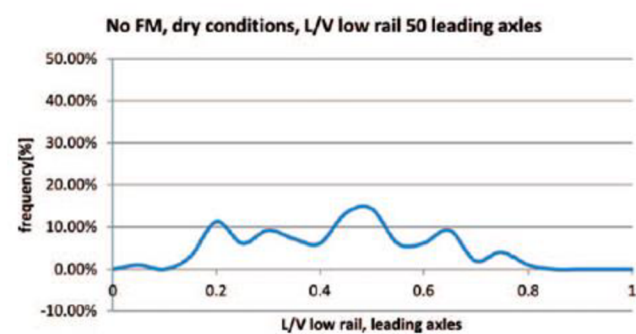
Adheze v kontaktu kola s kolejnicí je závislá na provozních podmínkách, v přírodě běžně mj. na přítomnosti vody na železniční trati. Vliv vody v kontaktu kola a kolejnice popsali na zmenšeném experimentálním zařízení mj. Wang a kol. [9], kteří srovnávali hodnotu součinitele adheze za různých podmínek. V suchých podmínkách byl při zatížení 21 tun, což by při uvažování velikosti kontaktní oblasti $1,5 \text{ cm}^2$ odpovídalo kontaktnímu tlaku asi 1,4 GPa, nulovém úhlu náběhu a rychlosti 60 km/h pozorován součinitel adheze po saturaci přibližně o hodnotě 0,5 [9]. Po aplikaci vody docházelo v důsledku vzniku vodního filmu k výraznému poklesu adheze, který činil přibližně 60 %, součinitel adheze se tedy poté pohyboval v okolí hodnoty 0,2. Studie také naznačuje možný vliv dalších částic přítomných v kontaktu, kdy se adhezivní součinitel mírně lišil při aplikaci vody před začátkem testů a během testů (Obr. 2-7), přičemž ve druhém případě se v kontaktu nacházely částice vzniklé z dřívějšího opotřebení kontaktních těles [9].



Obr. 2-7 Součinitel adheze při aplikaci vody předem a během testů [9]

Kromě popisovaného poklesu adheze při aplikaci většího množství vody může ovšem docházet i k řádově většímu propadu, který nastává ve specifických podmínkách, kdy je v kontaktu přítomna vhodná kombinace menšího množství vody a právě dalších částic vzniklých z opotřebení kontaktních těles. Tento propad dokáže snížit adhezní součinitel i výrazně pod hodnotu 0,05 [10]. V anglickém prostředí se zmíněný jev označuje jako *wet-rail* fenomén a popis určení jeho příčin je v posledních letech předmětem většího množství studií [10], [11], [12], [13]. Za propadem adheze stojí film tvořený zejména oxidem železitým (Fe_3O_2) [11] a vodou, přičemž množství vody se musí pohybovat v úzkém rozmezí, kdy je dostatečné pro vznik viskózní vrstvy a oddělení kontaktních povrchů, ale zároveň není postačující k úplnému smytí oxidované vrstvy mimo kontakt kola a kolejnice. Tyto podmínky nastávají při přítomnosti rosy, lehkém dešti nebo při pomalém vysychání kolejnice [12]. Kromě zmíněného filmu pak velikost propadu adheze roste i s klesající drsností povrchu, přičemž ta se může v průběhu provozu v důsledku opotřebení postupně zvyšovat [13]. Podmínky pro vznik *wet-rail* fenoménu jsou proto poměrně náročně replikovatelné v laboratorním prostředí. Jejich simulaci na dvoudiskovém zařízení provedli Buckley-Johnstone a kol. [10], kteří v pravidelných intervalech aplikovali do kontaktu velmi nízká množství vody (25 $\mu\text{l/s}$), čímž dosáhli udržení nízkých hodnot adheze v delším časovém intervalu. V dalších experimentech pak pozorovali úbytek vody z kontaktu kola s kolejnicí v čase, což odpovídá podmínkám vysychání povrchu kolejnic po dešti. V tomto případě bylo těsně (řádově jednotky až desítky cyklů) před úplným vyschnutím kontaktu pozorováno uvolnění oxidované vrstvy z povrchů kontaktních těles. Tento okamžik byl ve studii považován za nejvhodnější pro vznik vodního filmu s obsahem Fe_3O_2 vedoucího k velmi nízké adhezi, nicméně v důsledku jeho krátkého trvání nebyl významnější propad adheze zaznamenán.

Důsledky dějů v kontaktu mezi kolem a kolejnicí jsou běžně pozorovány pomocí analýz hluku nebo pomocí snímání působících sil. Oldknow a kol. [6] sledovali vliv přítomnosti vody a modifikátorů tření na poměr laterální a zátěžné síly, tedy součinitel adheze v laterálním směru, při průjezdu zatáčkou. Zjištěn byl poměrně široký interval pozorovaných CoA v případě suchého (mezného) stavu, z čehož lze předpokládat poměrně vysokou nestabilitu kontaktu potenciálně vedoucí ke vzniku kvilivého hluku. Medián hodnot lze v tomto stavu pozorovat v rozmezí CoA 0,4 až 0,5.



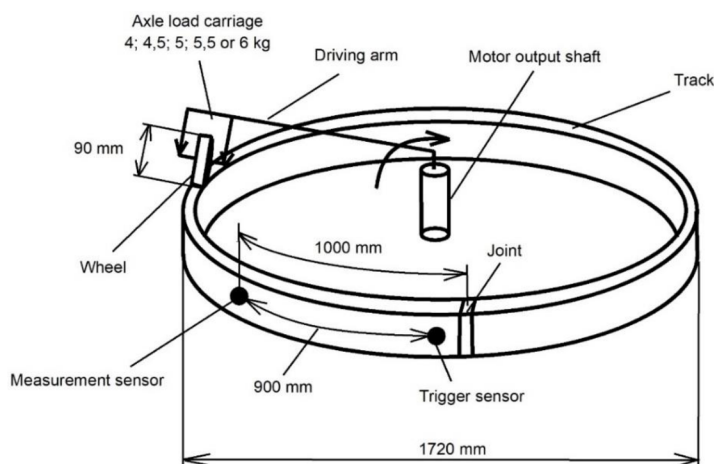
Obr. 2-8 Zastoupení hodnot součinitele adheze při padesáti cyklech v suchých podmínkách [6]

Hlukovou analýzu za účelem zjištění součinitele adheze při různých podmínkách (změna rychlosti, přítomnost vody) provedli na dvoudiskovém testovacím zařízení Spiriyagin a kol. [14]. Na zjištěných hodnotách *SPL (Sound Pressure Level)* se v uváděném rozsahu frekvencí (cca do 5 kHz) přímo neprojevovala trakční křivka, nicméně jisté změny, které ovšem nebyly ve studii podrobněji zdůvodněny, byly pozorovatelné na tvaru frekvenčního spektra, kdy ve všech experimentech byly pozorovány dva stejné rozsahy frekvencí, přičemž při vyšších rychlostech a mokré trati převládala vyšší frekvence přibližně o hodnotě 2700 Hz, zatímco v opačném případě byly dominantní signály na nižší frekvenci cca 350 Hz. Studie dále uvádí možný teoretický přístup ke zjištění adhezního součinitele v závislosti na hustotě materiálu, rychlosti nebo silovém a tepelném zatížení [14].

2.2.3 Využití akustické emise pro sledování kontaktů

Změna provozních podmínek, jako je rychlost nebo zatížení, ale také působení přírodních vlivů, například deště, tedy způsobuje změnu adheze, přičemž její hodnota ovlivňuje míru opotřebení kola i kolejnice. Mechanické vlnění vznikající při deformacích kontaktních povrchů lze detekovat pomocí metody akustické emise.

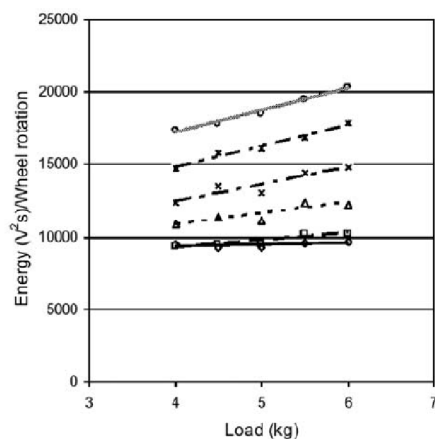
Na zmenšeném kruhovém modelu testovací trati tohoto faktu využívala například studie Thakkara a kol. [5]. Senzor akustické emise byl umístěn přímo na koleji, viz Obr. 2-9. Vyhodnocována přitom byla závislost na rychlosti, zatížení nebo bočním pohybu kola.



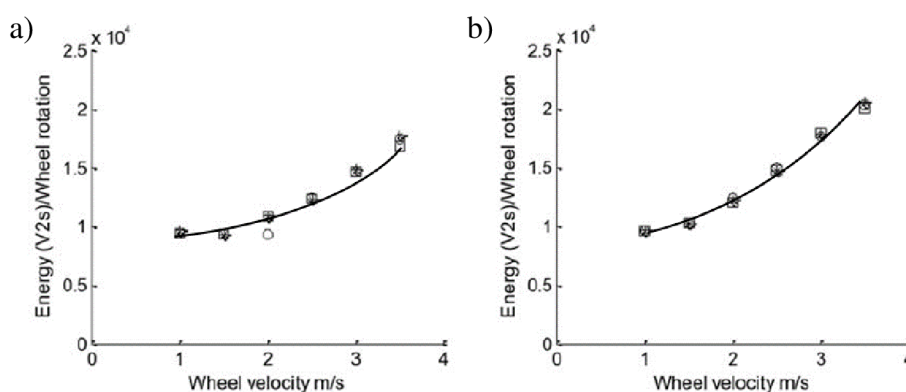
Obr. 2-9 Experimentální zařízení využitě Thakkarem a kol. [5]

Studie se zaměřovala na efektivní hodnotu signálu spočtenou jako jeho kvadratický průměr (RMS) a z ní odvozenou energii signálu. Kromě poklesu se vzdáleností byly tyto hodnoty silně ovlivněny rychlostí, se kterou energie signálu stoupala přibližně kvadraticky, a v menší míře i aplikovaným zatížením, kde byla závislost lineární.

Hodnoty závislosti na zatížení zobrazuje Obr. 2-10 a závislost na rychlosti je vynesena na Obr. 2-11. Ve studii byl dále pozorován i vliv bočního pohybu kola, kde se oproti případu bez bočního vřle na signálu projevovovala nestabilita spojená s tímto pohybem [5].



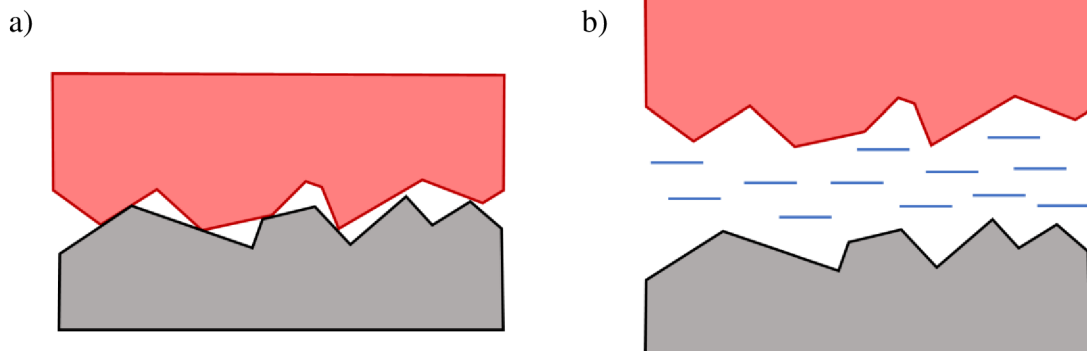
Obr. 2-10 Závislost uvolněné energie (RMS) na zatížení pro různé rychlosti [5]



Obr. 2-11 Závislost uvolněné energie (RMS) na rychlosti pro zatížení: a) 4 kg; b) 6 kg [5]

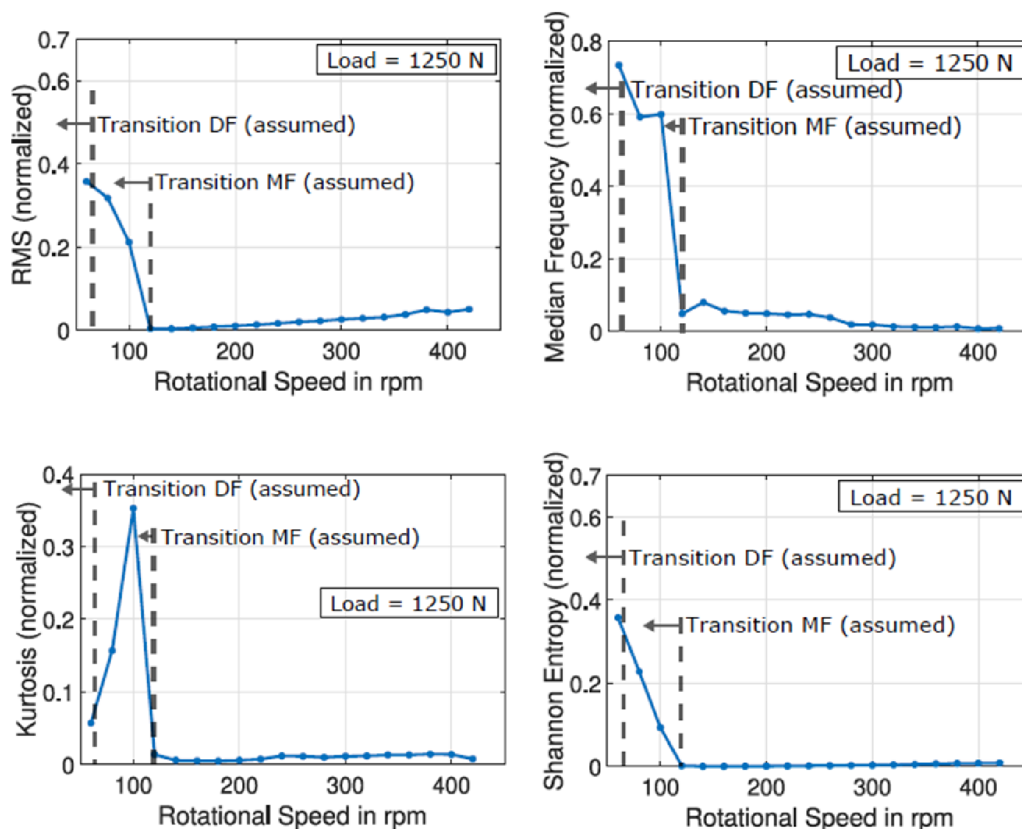
Akustická emise se pro pozorování dějů v kontaktu v posledních letech poměrně úspěšně prosazuje v oblasti studia kluzných ložisek. Hase a kol. [15] například využili akustickou emisi k detekci opotřebení. Průměrná hodnota frekvence akustické emise u nových ložisek činila asi 0,5 MHz. Přibližně v 70 % životnosti součásti před zadřením se začaly významně projevat frekvence pod 0,3 MHz spojované s tvorbou a kolizemi částic v kontaktu. První změny v signálu AE související s adhezivním opotřebením ovšem byly detekovány již při dosažení asi 10 % životnosti na frekvencích nad 1 MHz.

Závislostí akustické emise na zatížení a rychlosti se v oblasti kluzných ložisek zabývali Mohktari a kol. [4]. Při vzrůstající rychlosti přitom dokázali pomocí RMS i mediánu frekvencí signálu pozorovat změny režimů mazání, tedy přechod mezi mezným, smíšeným a kapalinovým režimem. V mezném režimu jsou obě části ložiska v přímém kontaktu, přes který jsou přenášeny veškeré síly a dochází tedy k větším deformacím a zvýšení aktivity AE, při zvyšující se obvodové rychlosti hřídele ovšem v kontaktu vzniká mazací film oddělující kontaktní povrchy a nastává přechod do smíšeného a následně kapalinového (elastohydrodynamického – EHD a hydrodynamického) režimu, přičemž zde je již veškeré zatížení rozprostřeno skrze vzniklý film, a dochází tedy k podstatně nižšímu opotřebením povrchů a poklesu aktivity akustické emise.



Obr. 2-12 a) Mezný režim; b) Kapalinový režim

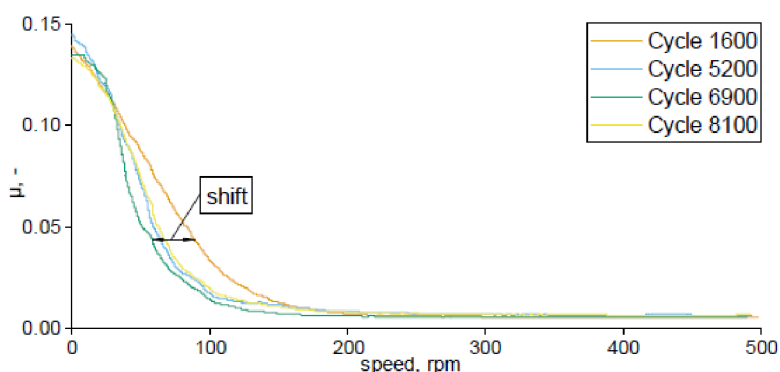
Přechod mezi jednotlivými režimy pak byl lépe lokalizován pomocí průběžného vyhodnocování koeficientu špičatosti RMS akustické emise. Rozlišení mezi smíšeným a kapalinovým mazáním se také projevovalo na tzv. Shannonově entropii, která v případě elasto-hydrodynamického a hydrodynamického mazání klesala vzhledem k absenci zdánlivě nahodilých kontaktů mezi vrcholky drsnostního profilu téměř k nule. Všechny uvedené přístupy jsou uvedeny na Obr. 2-13. Po integraci RMS v čase bylo také možné určit objem opotřebení odpovídající celkové uvolněné energii za daný čas [4].



Obr. 2-13 Možnosti využití různých parametrů signálu pro určení režimu mazání [4]

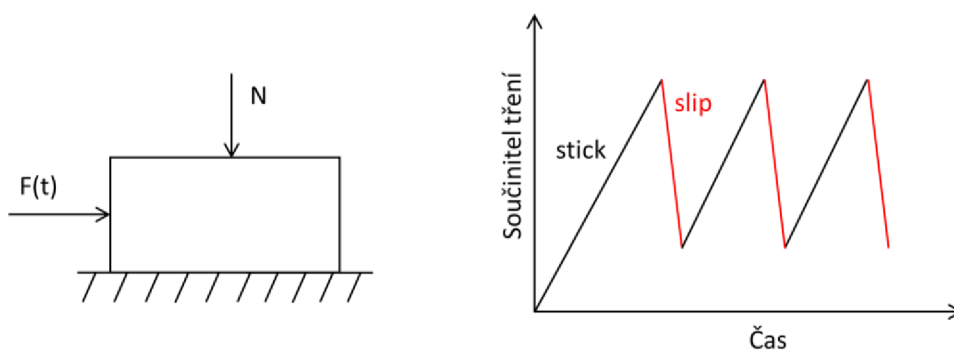
Možnosti použití součinitele špičatosti jako podkladu pro víceúčelový trigger při pozorování dějů v kontaktu díky jeho zřetelným a rychlým reakcím na místní změny uvádí studie

Renharta a kol. [16]. V této studii byla v několika tisících start-stop cyklech opět ověřena i uplatnitelnost AE pro pozorování opotřebení a také přechodů mezi mazacími režimy (Obr. 2-14). Vliv těchto veličin na signál získaný metodou akustické emise potvrzuje i studie Königa a kol. [17].



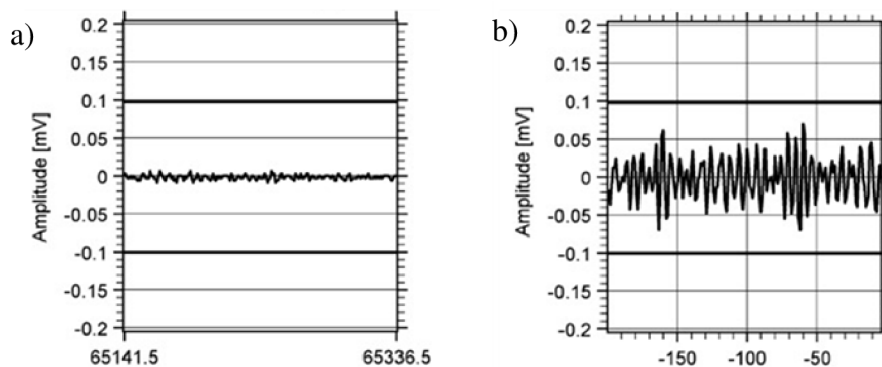
Obr. 2-14 Součinitel adheze odvozený ze signálu akustické emise [16]

Akustická emise byla využita také pro studii tzv. stick-slip fenoménu, tedy situace, při které dochází ke střídání statického stavu a dynamického pohybu tělesa po podložce. Za příčinu stick-slip efektu je považována nižší hodnota součinitele dynamického tření oproti statickému v kombinaci s kolísáním tečné síly zejména v situaci, kdy součinitel tření klesá s relativní rychlostí [18], což je zároveň jeden ze základních předpokladů pro vznik oscilací popsanych v kapitole 2.2.2. Situace je zjednodušeně zobrazena na Obr. 2-15.

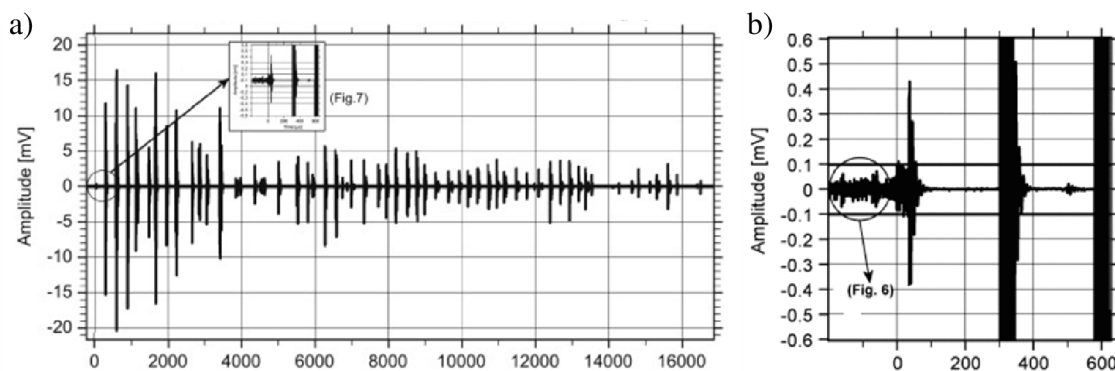


Obr. 2-15 Stick-slip efekt [18] – upraveno

Metoda akustické emise byla pro účely pozorování stick-slip efektu aplikována na speciálním testovacím zařízení [19], kde byly kromě významného nárůstu amplitud signálu po uvedení do pohybu detekovány i změny bezprostředně předcházející přechodu mezi statickým a dynamickým stavem. Po počátečním nárůstu v aktivitě signálu AE spojovaným s počínajícími deformacemi v kontaktu, následovala asi 100 ms před samotným pohybem první menší vlna vysvětlovaná lokálními prokluzy v nejvíce namáhaných místech. Díky tomu byla ověřena možnost uplatnění AE pro krátkodobou predikci tohoto jevu, ale i potvrzena přítomnost dějů, konkrétně lokálních deformací v kontaktu, předcházejících makroskopické změně chování tělesa a dostatečně výrazných pro zaznamenání metodou akustické emise.



Obr. 2-16 a) Klidový stav; b) Počáteční nárůst aktivity akustické emise před uvedením do pohybu [19]



Obr. 2-17 a) Signál akustické emise po uvedení do pohybu; b) vlna o menší amplitudě předcházející tomuto stavu [19]

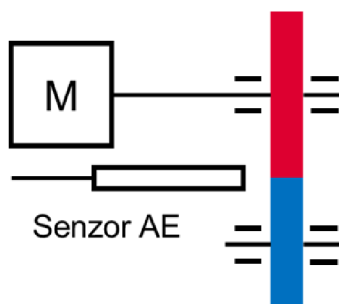
Další studie [20] se zabývaly například detekcí dotyku statoru a rotoru parních turbín, přičemž byla opět zmíněna i možnost pozorování kontaktu v kluzných ložiscích. Zároveň byl porovnán vliv polohy senzoru, kde nejmenší úroveň šumu a nejvyšší citlivost vykazovaly snímače umístěné přímo na ložiscích turbíny jako nejbližších nerotujících částech.

Bergmann a kol. [21] zkoumali vliv opotřebení na akustickou emisi u ring-on-disk testovacího zařízení a také u kluzných ložisek. Jako perspektivní opět uvedli sledování RMS a množství uvolněné energie akustické emise nebo sledování amplitud získaného signálu.

2.2.4 Bezkontaktní měření akustické emise

Pro měření akustické emise se v téměř všech případech využívá kontaktní senzor usazený na sledované součásti. Při pozorování rotačních dílů ovšem není možné umístit snímač přímo na pozorovaný díl, ale až na první nerotující součást, což může potenciálně vést ke ztrátě nebo zkreslení informace o studovaném kontaktu. Alternativa v podobě senzoru bezkontaktního není dnes široce využívána, nicméně malé množství prací s tímto způsobem měření publikováno bylo. Jako příklad lze uvést článek Uluse a Erkayi [22] zabývající se detekcí defektů čelního ozubeného soukolí za různých provozních podmínek z hlediska zatížení a rychlosti. Vyhodnocována byla hodnota RMS AE, na které se prokazatelně

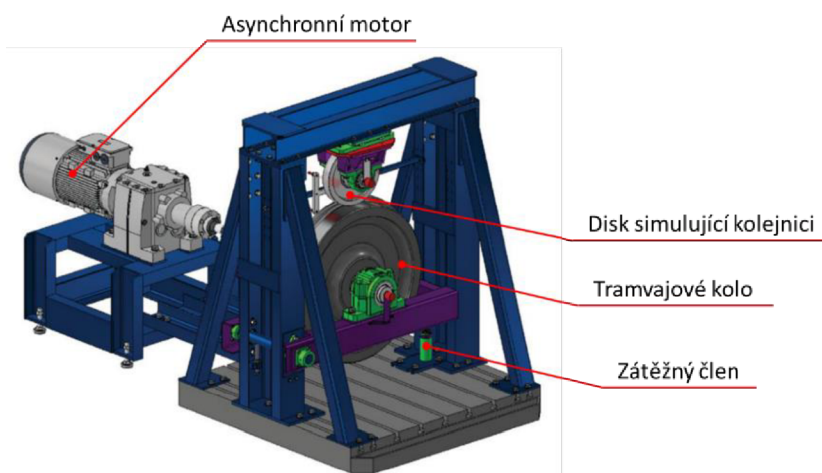
projevoval vliv provozních podmínek, a poměr amplitudy a efektivní hodnoty. Ten se prokázal jako vhodný prostředek pro určení závažnosti defektu [22]. Senzor akustické emise byl umístěn ve vzdálenosti 150 mm od kontaktu, přičemž byl orientován ve směru os ozubených kol [22], viz schéma na Obr. 2-18.



Obr. 2-18 Uspořádání při experimentech s bezkontaktním senzorem dle Uluse a Erkayi [22]

2.3 Experimentální zařízení

Na Ústavu konstruování Fakulty strojního inženýrství VUT v Brně je k dispozici dvoudiskové laboratorní zařízení (tzv. twin-disk, viz Obr. 2-19), které simuluje kontakt kola s kolejnicí pomocí vzájemného odvalování reálného tramvajového kola a disku zastupujícího kolejnici. Výhodou tohoto uspořádání oproti zařízením s reálným modelem kolejnice je možnost provádění experimentů ve skutečném měřítku v laboratorních podmínkách, přičemž zařízení je navrženo tak, aby tuhost jeho konstrukce v radiálním směru kontaktu i zatížení kola odpovídaly v maximální míře realitě [23].



Obr. 2-19 Použité dvoudiskové laboratorní zařízení [23]

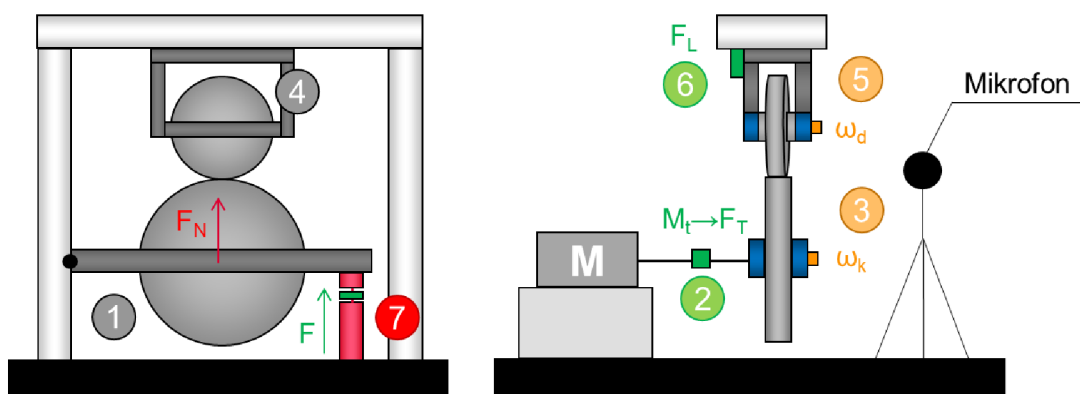
Současný měřicí řetězec je zobrazen na Obr. 2-20. Kolo (1) o průměru 800 mm je poháněno 11kW asynchronním motorem, uložení kola je realizováno pomocí dvou dvouřadých soudečkových ložisek. Maximální obvodová rychlost kola je 4 m/s. Mezi kolem a motorem

se nachází snímač momentu (2) sloužící k výpočtu tangenciální složky třecí síly. Rychlost kola je snímána pomocí rotačního enkodéru (3).

Disk (4) s průměrem 320 mm se nachází v horní části zařízení a je uložen pomocí dvou radiálních kuličkových ložisek. Rychlost disku je snímána separátním enkodérem (5), díky čemuž lze vyhodnotit skluz v kontaktu. Za diskem se nachází brzda a senzor síly (6) umístěný v osové směru sloužící pro vyhodnocení laterální složky třecí síly.

Zatížení je realizováno pomocí hydraulického válce (7) umístěného pod rámem kola. Maximální uvažovaná síla působící na kontakt činí 3,5 kN, což odpovídá maximálnímu tlaku v kontaktu 900 MPa [23]. Úroveň hluku je snímána mikrofonom Svantek Mk 255 umístěného ve vzdálenosti 1 m od kontaktu.

Fotografie zařízení se všemi instalovanými senzory jsou obsahem Přílohy B.



Obr. 2-20 Stávající měřicí řetězec

2.4 Shrnutí hlavních zjištění

Kontakt kola s kolejnicí je významně ovlivňován provozními podmínkami (rychlost, úhel náběhu) i vnějšími faktory, které mají značný vliv na adhezi mezi oběma tělesy. Její náhlé změny mohou vést například ke vzniku kvilivého hluku nebo zvýšení opotřebení [7]. Z přírodních vlivů je jedním z nejčastějších a nejzásadnějších přítomnost vody v kontaktu, která vede k významnému poklesu adheze i za standardních podmínek [9], zejména ale v situacích, kdy je v kontaktu přítomno pouze malé množství vody tvořící viskózní film s obsahem zoxidovaných částic pocházejících z povrchu železnice, který může vést k poklesu součinitele adheze na hodnoty blízké nule [12]. Vznik filmu způsobuje částečné nebo plné oddělení kontaktních těles, což vede k omezení míry deformací na jejich površích [4]. Nízké množství vody také může způsobovat její nerovnoměrnou distribuci, a tedy opět nestabilní průběh adheze.

Tyto procesy pak teoreticky lze sledovat tzv. metodou akustické emise spočívající v detekci ultrazvukového vlnění vznikajícího v materiálu právě v důsledku deformací. V současné

době je metoda akustické emise využívána v širokém spektru oblastí jako je nedestruktivní testování vzorků, online monitoring vzniku vnitřních defektů, studium mechanických vlastností materiálů aj. [1].

Mnoha studii je nicméně vnímána jako perspektivní metoda i pro sledování kontaktu dvou těles, a to z hlediska její reakce na rychlost nebo zatížení i z pohledu pozorování změny režimu mazání, který je v případě kontaktu kola a kolejnice významně závislý na přítomnosti dalších látek, jako např. srážkové vody. Široce jsou zkoumány možnosti použití akustické emise pro pozorování kluzných ložisek, kde např. Mokhtari a kol. [4] nebo Renhart a kol. [16] pomocí ní sledovali změnu mazacího režimu v závislosti na rychlosti (otáčkách). Při přechodu mezi mezním a elastohydrodynamickým režimem byl v těchto studiích popsán propad aktivity AE způsobený zmíněným poklesem intenzity deformací v kontaktu. Mokhtari také uvádí množství metod statistického zpracování, které dále umožňují přesnou identifikaci časových okamžiků, kdy k těmto změnám dochází.

V oblasti železniční dopravy byla akustická emise kromě studií sledujících tvorbu defektů na kolejnici uplatněna při výzkumu vlivu zatížení a rychlosti [5], který byl proveden pomocí kontaktního senzoru na zmenšeném modelu, kde se disk o průměru 10 mm (měřítko tedy přibližně 1:8) odvaloval po kruhové dráze představující kolejnici, na kterou byl senzor umístěn. Ve studii byla sledována energie akustické emise vztažená na jednu otáčku kola, přičemž byl pozorován přibližně kvadratický nárůst v závislosti na rychlosti a lineární nárůst při rostoucím zatížení.

Ve většině prací byla pozornost věnována zejména efektivní hodnotě akustické emise (RMS) a z ní odvozeným veličinám (např. uvolněné energii), podrobnější analýza frekvenčního spektra byla častější zejména ve studiích zabývajících se rozlišením mechanického poškození. Efektivní hodnota signálu akustické emise představuje kvadratický průměr, který je ve studiích vyhodnocován průběžně (klouzavý průměr), tato veličina tedy představuje intenzitu signálu v daném časovém úseku s menším rozptylem hodnot, než je tomu u samotného nezpracovaného signálu. Uvolněnou energii, jak ji určovali Thakkar a kol. [5] lze stanovit pomocí časové integrace RMS signálu. Energie akustické emise je díky nastavení délky vyhodnocovaného časového úseku lépe přiřaditelná k jedné otáčce kola.

Naprostá většina studií zabývajících se měřením akustické emise využívá kontaktní senzory méně vhodné pro pozorování rotujících součástí. Bezkontaktní senzor byl použit například pro pozorování kontaktu ozubeného soukolí ve studii Uluse a Erkayi [22], kde byla potvrzena možnost použití tohoto způsobu měření pro popis vlivu zatížení a rychlosti na vznik defektů.

2.5 Identifikace novosti a příležitostí

Ačkoliv již byla akustická emise použita na zmenšených modelech kontaktu železničního kola a kolejnice, nebyly nalezeny žádné studie zabývající se měřením na modelu ve skutečné velikosti, který má simulovat tuhost reálné železniční nápravy. Studie na zmenšených modelech navíc zkoumaly pouze vliv zatížení a rychlosti na uvolněnou energii nebo RMS bez asociace k adhezním dějům v kontaktu. V této oblasti nebyl ani zkoumán vliv aplikace dalších látek běžně se vyskytujících v kontaktu kola s kolejnicí, jako je například voda.

Změna signálu akustické emise v závislosti na oddělení kontaktů v důsledku vzniku mezivrstvy byla sice popsána u valivých a zejména kluzných ložisek, které ale pracují v diametrálně odlišných podmínkách a nejsou zpravidla srovnatelné ani z hlediska kvality povrchů nebo velikosti a s ní související délkou přenosové cesty.

Ve většině prací zabývajících se sledováním akustické emise byl použit kontaktní senzor a chybí tedy i zhodnocení citlivosti senzoru bezkontaktního, jehož použití bylo nalezeno pouze v jediné relevantní studii a týkalo se sledování poškození ozubeného soukolí.

Z druhé strany, v případě výzkumů týkajících se změn adheze v kontaktu železničního kola s kolejnicí, je zpravidla měřen součinitel adheze v závislosti na působících silách, nebyla ale nalezena zavedená metoda, která by byla na dvoudiskovém zařízení v reálné velikosti schopna sledovat v reálném čase lokální změny přímo v kontaktu, jež mohou vést ke změnám adheze například při vzniku nebo zániku mezivrstvy. Zejména v případě postupného úbytku vody z kontaktu nejsou podrobněji popsány děje bezprostředně předcházející jeho následnému hladovění, tedy přechodu zpět do mezního režimu, které by mohly umožnit tento jev z časového hlediska lépe předvídat.

3 CÍLE PRÁCE

3.1 Vymezení problému

Běžně používané laboratorní metody pozorování kontaktu kola s kolejnicí se zaměřují na studium adheze pomocí měření působících sil, případně na měření vibrací nebo hlukovou analýzu. Na experimentálních zařízeních jako je např. ball-on-disk nebo pin-on-disk lze kontakt pozorovat i přímo, např. pomocí interferometrie, využívající optické sledování. Takový přístup ovšem není vhodný u dvoudiskových zařízení, kde by pro přímé optické sledování bylo nutné kontakt pozorovat skrze velké množství průhledného a opticky čistého materiálu, tedy např. skrze celý průměr kola či disku. Tento problém by byl navíc znásoben při testování na zařízeních simulujících reálnou velikost a zatížení železničního kola. Děje odehrávající se v kontaktu přitom ale mohou významně ovlivnit mj. adhezní součinitel, od kterého se v konečném důsledku odvíjí ekonomičnost a bezpečnost provozu na železnici. Jedním z uvažovaných přístupů v této problematice je aplikace tzv. metody akustické emise, která již byla úspěšně využita pro diagnostiku kontaktů v jiných oblastech. Chybí ovšem podrobnější studie popisující možnosti jejího využití při studiu adheze v kontaktu kola s kolejnicí a metodika měření na dvoudiskovém zařízení v reálné velikosti. Oproti zmenšeným modelům s rovinnou, respektive kruhovou kolejnicí musí v případě dvoudiskového zařízení dojít k umístění kontaktního senzoru akustické emise na nerotující část zařízení, tedy dále od kontaktu. Z tohoto důvodu připadá v úvahu i bezkontaktní snímání akustické emise, jehož možnosti ovšem nejsou v literatuře široce popsány. K těmto účelům byl využit senzor vyvinutý na ÚK FSI VUT v Brně, který byl původně určen pro detekci úniků pneumatického potrubí.

Produkt

V práci je vyvíjena metodika sledování kontaktu železničního kola s kolejnicí na dvoudiskovém laboratorním zařízení využívající akustickou emisi. Vyvinutá metodika má sloužit k účelům přímého pozorování kontaktních dějů a umožnit tak bližší náhled a predikci změn adheze v tomto kontaktu.

Zákazník

Metodika je vyvíjena pro další použití v kolejové laboratoři Odboru diagnostiky Ústavu konstruování na Fakultě strojního inženýrství Vysokého učení technického v Brně i v dalších institucích.

Spotřebitel

Spotřebitelem je vědecko-výzkumný pracovník.

Vymezení problému

Metodika má umožnit diagnostiku adheze železničního kola na dvoudiskovém laboratorním zařízení, při změně rychlosti, úhlu náběhu nebo při aplikaci a následném úbytku vody. Podrobný strom cílů je obsahem Tab. 3-1.

Tab. 3-1 Atributy, cíle (C), funkce (F), omezení (O) a prostředky (P) vyvíjené metodiky

Atribut	C	F	O	P
Metodika měření adheze železničního kola pomocí AE	x			
Využití kontaktního i bezkontaktního senzoru	x	x		
Odezva na změnu provozních podmínek	x	x		
Detekce změn adheze v závislosti na okolním prostředí	x	x		
Možnost pozorování přechodových jevů v kontaktu	x	x		
Aplikace na dvoudiskovém zařízení		x		
Laboratorní prostředí			x	
Maximální testovaná rychlost 4 m/s			x	
Maximální testovaný úhel náběhu 25 mrad			x	
Postup zpracování dat	x			x
Program pro pokročilé zpracování signálu				x

3.2 Cíle vývoje

Cílem práce je vývoj metodiky pozorování kontaktu železničního kola s kolejnicí pomocí metody akustické emise na laboratorním dvoudiskovém zařízení a zhodnocení možností jejího využití v této oblasti. V rámci vývoje bude navrženo umístění senzorů na dvoudiskovém zařízení a vhodná sada parametrů akustické emise pro vyhodnocení vlivu změn provozních podmínek a s tím souvisejících změn adheze v kontaktu.

Dílčí cíle:

- Návrh umístění kontaktního a bezkontaktního senzoru
- Výběr vhodné sady parametrů AE pro sledování vlivu provozních podmínek (rychlost, úhel náběhu)
- Analýza výstupů z hlediska citlivosti na změny rychlosti a úhlu náběhu za sucha a při aplikaci vody
- Popis vlivu změny adheze v kontaktu v důsledku aplikace vody a jejího následného úbytku v čase na parametry akustické emise
- Vypracování odborného článku

4 KONCEPČNÍ NÁVRH

4.1 Analýza cílů a specifikace omezení

Primární cíl v podobě vývoje metodiky měření adheze železničního kola metodou akustické emise lze rozčlenit do několika dílčích částí uvedených v kapitole 3.1. Pro upřesnění dalšího postupu práce byly vybrány cíle a omezení dále rozvedeny.

Volba vhodného senzoru akustické emise

Metodika je vyvíjena a primárně určena pro laboratorní dvoudisková zařízení, na kterých nelze klasický senzor AE umístit do blízkosti kontaktu. Proto se jako vhodné řešení nabízí využití senzoru bezkontaktního, jehož možnosti ale nejsou dalšími studii široce popsány. U kontaktního senzoru je navíc nutné identifikovat ideální umístění.

Odezva na změnu provozních podmínek

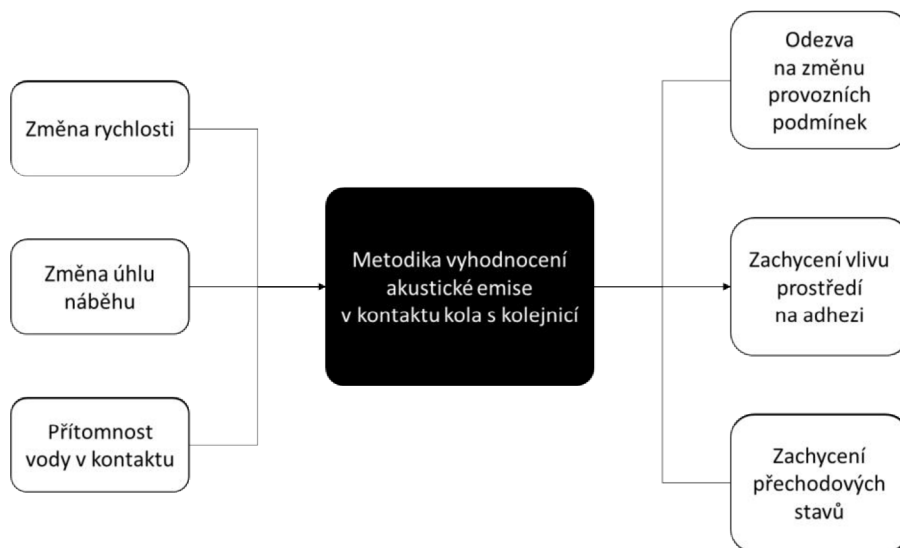
Základním předpokladem pro úspěšné uplatnění metody je možnost pozorování stabilní odezvy na provozní podmínky železniční soupravy. Zařízení umožňuje regulaci rychlosti, úhlu náběhu a zatížení. Pro účely snížení opotřebení byl při vývoji sledován pouze vliv rychlosti, a to v plném rozsahu možností zařízení, a vliv úhlu náběhu, přičemž maximální úhel byl kvůli opotřebení volen na hodnotě 25 mrad.

Popis změn v závislosti na okolním prostředí a detekce přechodových jevů

Po určení odezvy na provozní podmínky bylo přistoupeno k analýze změn signálu AE v závislosti na okolním prostředí, která byla v této práci zaměřena na vliv přítomnosti vody, jakožto jednoho z nejčastějších kontaminantů kontaktu kola s kolejnicí. V souvislosti s aplikací a úbytkem vody z kontaktu lze očekávat přítomnost přechodových stavů mezi suchým a zavodněným režimem, které by pomocí metody akustické emise mělo být možné pozorovat. K tomuto účelu lze použít i pokročilé metody zpracování signálu, pro něž byl vytvořen počítačový skript.

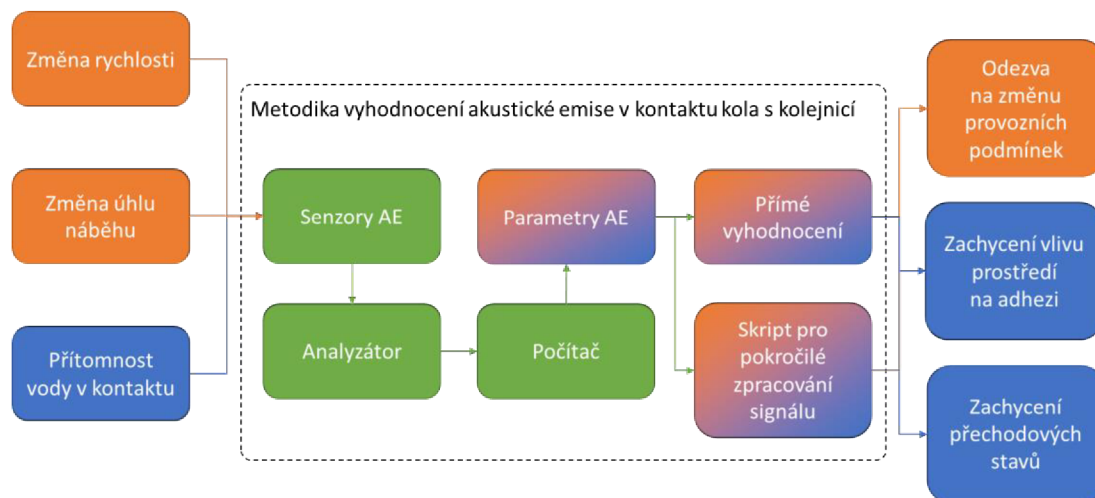
4.2 Technická funkční analýza

Z cílů práce vyplývají požadavky na vyvíjenou metodiku, přičemž vstupy jsou provozní podmínky v podobě rychlosti a úhlu náběhu, z vlivů okolního prostředí byla v této práci analyzována přítomnost vody v kontaktu. Výstupem je popis odezvy akustické emise na provozní podmínky, metodika by dále měla umožnit zachycení vlivu přítomnosti vody na adhezi, stejně jako identifikaci a bližší zkoumání přechodových stavů nastávajících v kontaktu, viz Obr. 4-1.



Obr. 4-1 Schéma vstupů a výstupů – black box

Podrobné znázornění řešených uzlů je zobrazeno na Obr. 4-2. Pozornost byla věnována konkrétně volbě senzorů akustické emise a jejich umístění a dále výběru vhodných parametrů AE pro pozorování zvolených vstupů. Tyto parametry byly jednak vyhodnocovány přímo a jednak zpracovány pomocí skriptu vytvořeného v programu Matlab.



Obr. 4-2 Základní schéma metodiky – glass box

4.2.1 Senzory

Pro měření byly využity dva senzory akustické emise, souběžně ovšem probíhala i měření hluku a sil používaných pro výpočet součinitele adheze (CoA), který byl vyhodnocován v laterálním směru, tedy jako poměr laterální (F_L) a zátěžné (F_N) síly. Oba senzory akustické emise dosahují maximální citlivosti při frekvencích signálu přibližně do 500 kHz.

Bezkontaktní senzor AE

Použitý bezkontaktní senzor byl původně vyvinut na Ústavu konstruování FSI pro účely detekce úniků pneumatického potrubí, principálně se ovšem neliší od běžných senzorů akustické emise. Příchozí ultrazvukové vlnění je pomocí piezoelektrického krystalu transformováno na elektrický signál při frekvenci 2 MHz. Signál je před dalším zpracováním v analyzátoru zesílen pomocí 34dB předzesilovače. Příjem signálu je optimalizován díky kónickému nástavci na přední straně tělesa senzoru, který pomáhá stínit signály mimo osu citlivosti snímače a zlepšuje tak jeho směrovou charakteristiku. Senzor s nástavcem při testech vykazoval v závislosti na intenzitě sledovaného signálu, v tomto případě úniku pneumatického potrubí, vysokou citlivost do vzdálenosti 30 až 60 cm [24].



Obr. 4-3 Bezkontaktní senzor akustické emise s nástavcem

Kontaktní senzor AE

Pro kontaktní měření byl použit senzor MDK13 od firmy ZD Rpety – Dakel s magnetickou fixací. Princip funkce je obdobný jako u senzoru bezkontaktního, kdy je 2MHz signál přijímán pomocí piezoelektrického krystalu a zesílen pomocí integrovaného 34dB předzesilovače.



Obr. 4-4 Kontaktní senzor akustické emise MDK13

4.2.2 Analyzátor

Další zpracování signálu je realizováno pomocí analyzátoru DAKEL-ZEDO-MINIBOX-22 se dvěma kanály pro akustickou emisi, kmitočtovým rozsahem 24 kHz až 2700 kHz a maximální vzorkovací frekvencí 10 MHz. Schéma zapojení do kompletního měřicího řetězce je obsahem kapitoly 6.1.

4.3 Návrh alternativních řešení

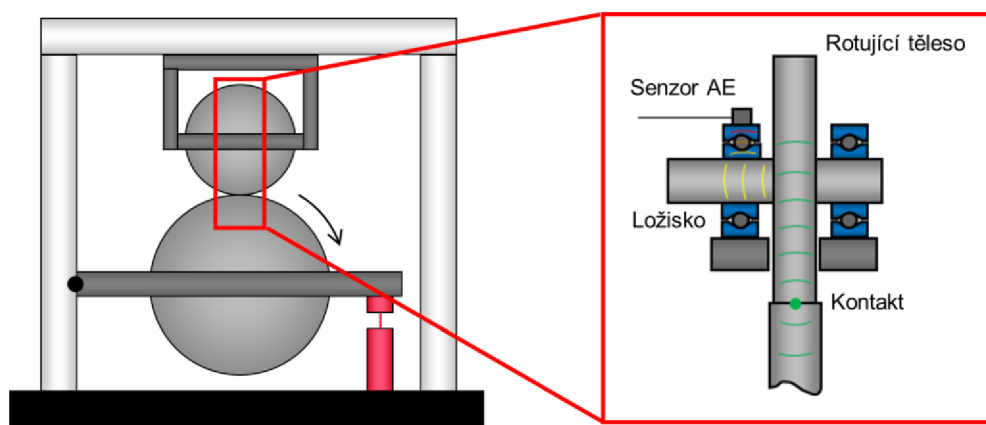
V práci jsou posuzovány dva základní přístupy k měření akustické emise, a to měření pomocí kontaktního senzoru a bezkontaktního senzoru. Data z obou senzorů jsou poté zpracována pomocí sady parametrů, jejichž odezva na změny podmínek je vyhodnocována z hlediska citlivosti.

4.3.1 Umístění senzorů

Měření kontaktním senzorem

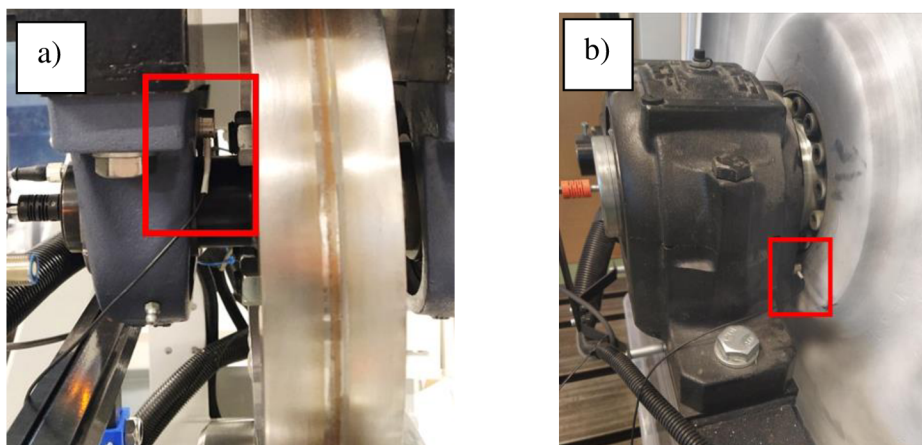
Kontaktní piezoelektrické senzory jsou standardním nástrojem měření akustické emise používaným ve valné většině publikovaných prací. Ve standardních aplikacích jsou instalovány přímo na zkoumanou součást a detekují tedy původní mechanické vlnění vznikající v této součásti v důsledku jejich deformací.

Při pozorování dějů na dvoudiskovém zařízení ovšem není z hlediska zajištění přenosu dat možné senzor umístit přímo na rotující železniční kolo nebo na disk zastupující kolejnicí a je tak nutné jej upevnit až na statickou součást nacházející se dále od kontaktu. Nejbližšími takovými součástmi jsou ložiskové domky kola a disku. Potenciální nevýhodou tohoto uspořádání je více než samotná fyzická vzdálenost komplikovanost přenosové cesty, kdy na místo originálního vlnění vznikajícího v kontaktu je sledována spíše odezva vyvolaná v ložisku, na něž je senzor umístěn. Přenos skrze jednotlivé komponenty ložiska může potenciálně vést ke zkreslení nebo ztrátě informace o sledovaném kontaktu.



Obr. 4-5 Přenos signálu při měření kontaktním senzorem

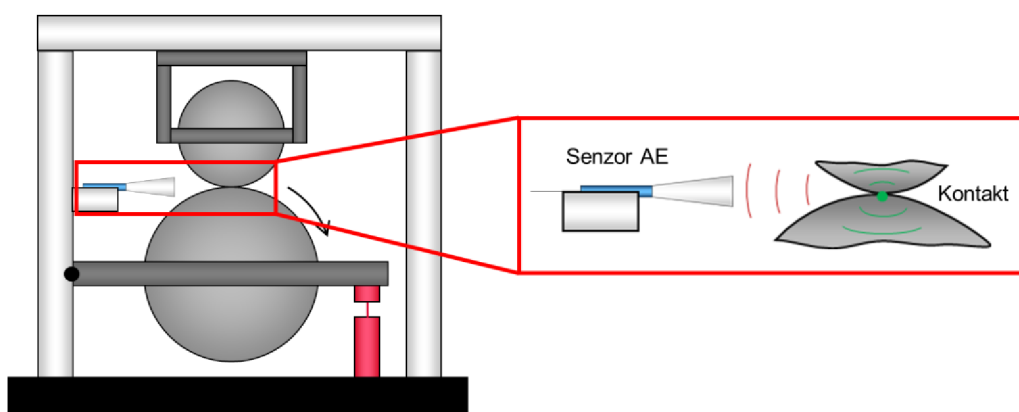
Přes výše zmíněné nevýhody je umístění na ložiscích možné a lze očekávat, že kontaktní děje se na takto získaném signálu v omezené míře promítnou [20]. Zvažovaná umístění senzoru na ložiskových domcích kola a disku simulujícího kolejnicí znázorňuje Obr. 4-4.



Obr. 4-6 Zvažovaná místa kontaktního senzoru: a) ložisko disku; b) ložisko kola

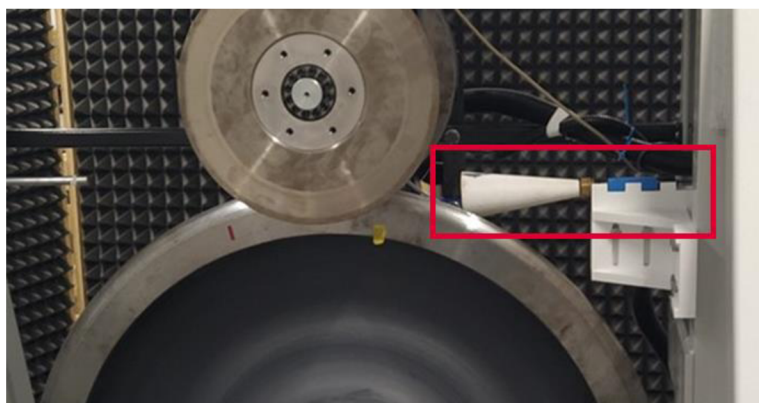
Měření bezkontaktním senzorem

Bezkontaktní senzor akustické emise je možné umístit podstatně blíže kontaktu, přičemž na rozdíl od senzoru kontaktního zaznamenává vlnění šířící se přímo z místa kontaktu vzduchem. Signál tedy překonává méně rozhraní a není zatížen například ději odehrávajícími se v ložiscích. Přenos vzduchem ale může vést k větší náchylnosti senzoru na okolní vlivy jako je například hluk nebo vysokofrekvenční elektronické rušení. Tento způsob měření ovšem v současné době není široce otestovaný a potenciální degradace signálu v důsledku jiné přenosové cesty proto není dostatečně popsána. Bezkontaktní senzory akustické emise tedy nejsou běžně komerčně dostupné a k měření byl využit prototyp dříve vyvinutý na ÚK FSI.



Obr. 4-7 Přenos signálu při měření bezkontaktním senzorem

Senzor byl umístěn v úrovni kontaktu v rovině kola a disku ve vzdálenosti 25 cm od kontaktu dle Obr. 4-8. Umístění bylo voleno proti směru otáčení kola z důvodu ochrany senzoru při aplikaci vody. Pro tyto účely byl vyroben nastavitelný nástavec, který byl ale po prvním měření fixován ve stálé pozici pro zajištění replikovatelnosti měření.

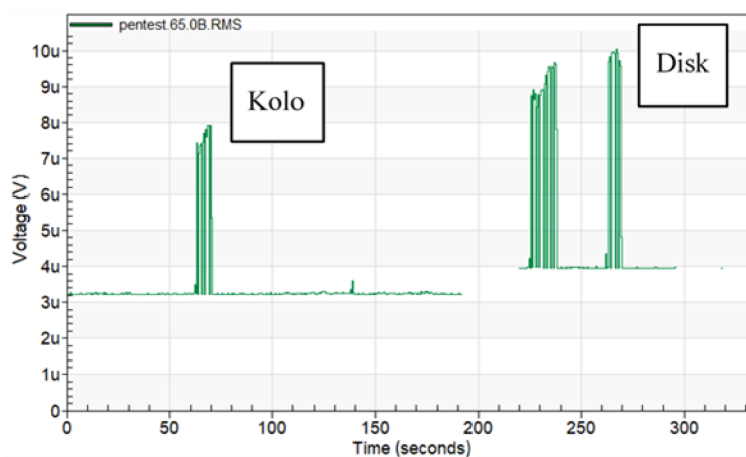


Obr. 4-8 Umístění bezkontaktního senzoru

4.4 Analýza alternativních řešení

4.4.1 Umístění kontaktního senzoru

Výběr pozice kontaktního senzoru byl realizován na základě výsledků testů provedených pomocí elektronického kalibrátoru snímačů AE (ZD Rpety – DAKEL). Pomocí něj byl do zatíženého kontaktu aplikován obdélníkový zátěžný pulz o frekvenci 1 Hz (Graf 4-1). Vyhodnocován byl poměr amplitudy získaného signálu vůči šumu a dále samotná amplituda.

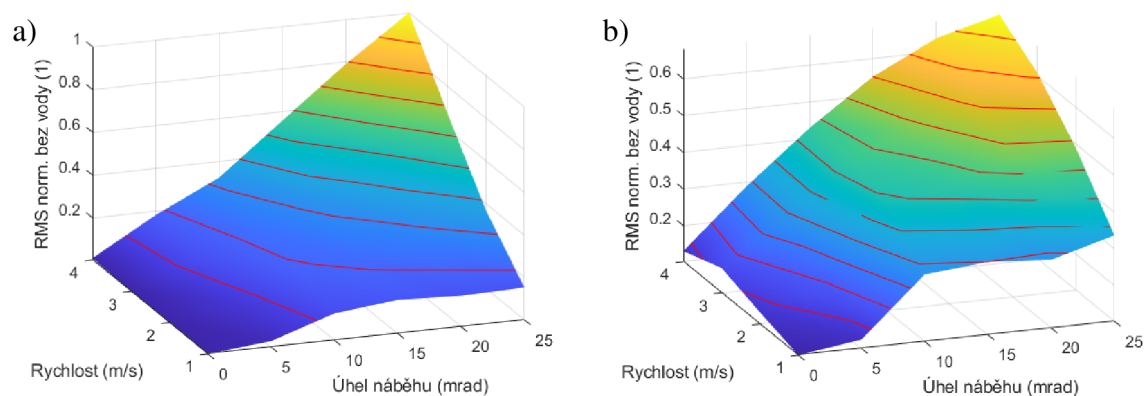


Graf 4-1 Odezva na kalibrační pulz

Poměr maxima signálu vůči šumu byl v obou případech podobný a činil přibližně 2,55, absolutní maximum signálu bylo ovšem detekováno u testů na ložisku disku, které se nachází blíže sledovanému kontaktu. Na základě těchto zjištění bylo zvoleno umístění na ložisku disku.

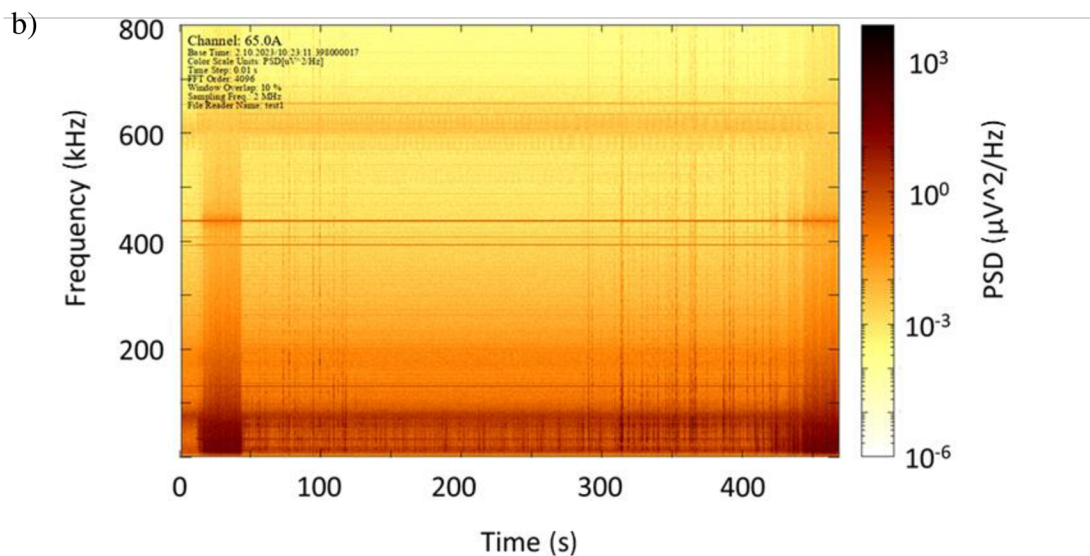
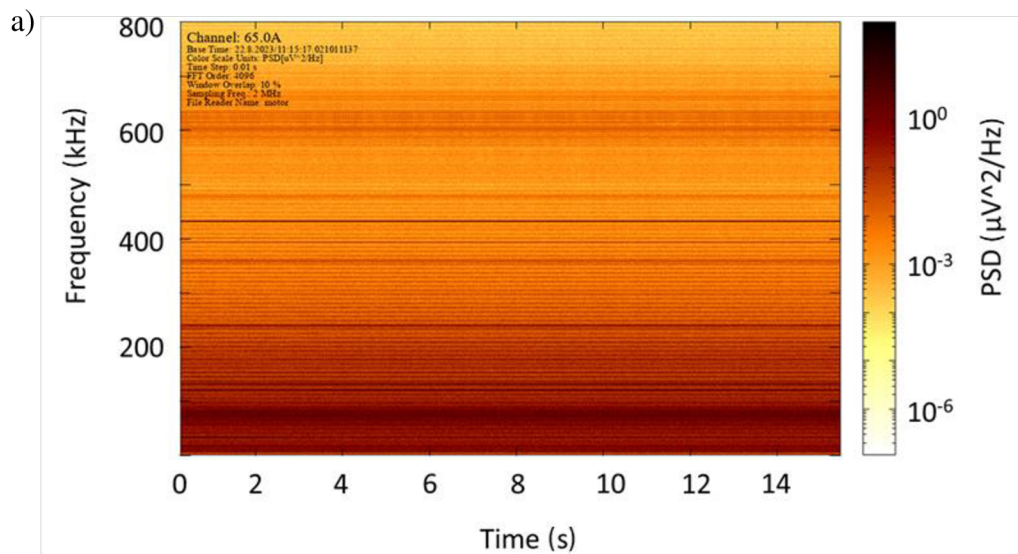
4.4.2 Výběr primárního senzoru pro sledování vlivu rychlosti a úhlu náběhu

Na Graf 4-2 jsou uvedeny odezvy z kontaktního a bezkontaktního senzoru akustické emise v podobě RMS v plném rozmezí měřených rychlostí a úhlů náběhu.



Graf 4-2 a) Odezva kontaktního senzoru; b) Odezva bezkontaktního senzoru

Odezva kontaktního senzoru vykazovala v porovnání se senzorem bezkontaktním stabilnější hodnoty napříč měřeními. Na bezkontaktním senzoru se navíc po sepnutí chodu motoru v odlehčeném stavu projevovalo pravidelné rušení po 8 kHz, které bylo pravděpodobně způsobeno vlivem provozu elektrických zařízení nebo vibracemi, toto rušení je sice intenzitou nižší než signál získaný při zatížení kola (viz Graf 4-3), přesto ale může v omezené míře ovlivňovat získaná data a zároveň je jen obtížně filtrovatelné bez ztráty relevantních údajů. U vysokých rychlostí a úhlů náběhu také docházelo ke snížení citlivosti na další změny. Vzhledem k tomu, že u bezkontaktního senzoru nebyla v tomto typu testů ve srovnání s kontaktním senzorem identifikována žádná přidaná informace, byl jako primární senzor pro sledování vlivu rychlosti a úhlu náběhu zvolen senzor kontaktní.



Graf 4-3 Spektrogram signálu AE: a) Nezatížený stav se spuštěným motorem; b) Test úbytku vody z kontaktu

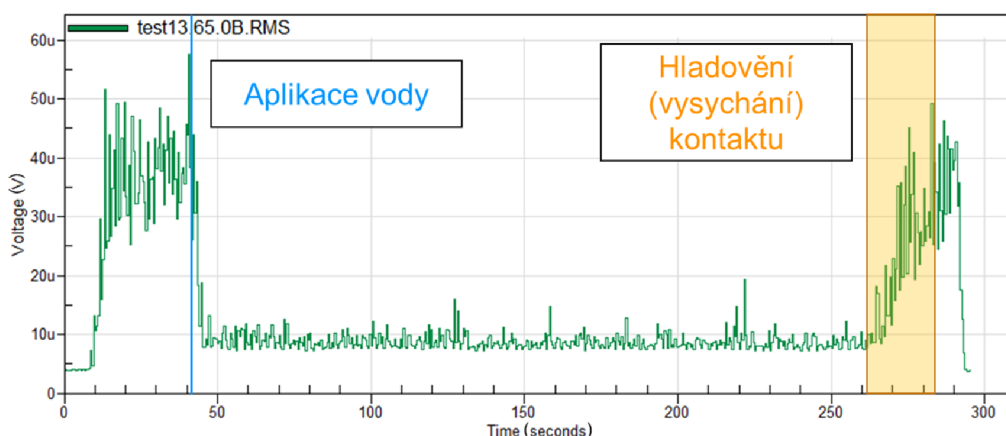
5 PŘEDBĚŽNÝ NÁVRH

5.1 Vyhodnocované veličiny

Kromě efektivní hodnoty signálu akustické emise byly na základě literatury v jednotlivých případech vyhodnocovány i uvolněná energie přepočtená na jednu otáčku železničního kola, koeficient špičatosti a Shannonova entropie.

5.1.1 RMS

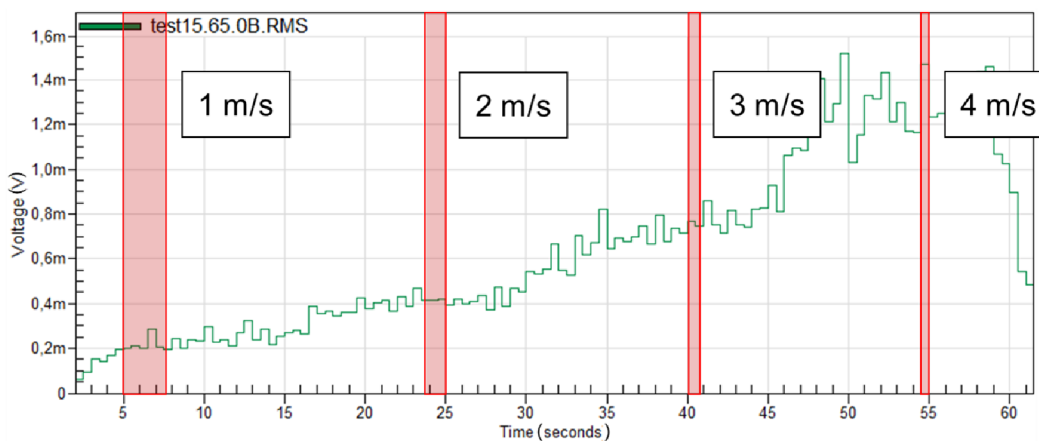
Efektivní hodnota signálu může sloužit k základnímu posouzení vývoje kontaktu, který je ovlivněn změnami rychlosti nebo úhlu náběhu, ale také potenciální mezivrstvou, jež v kontaktu vzniká v důsledku aplikace dalších látek, v testovaném případě vody. Jedná se o jednu z výchozích veličin, které lze při pozorování akustické emise sledovat a v oblasti pozorování kluzných ložisek je standardně používána při určování režimu mazání.



Obr. 5-1 RMS signálu AE v programu ZDaemon (test s aplikací vody)

5.1.2 Energie AE na otáčku

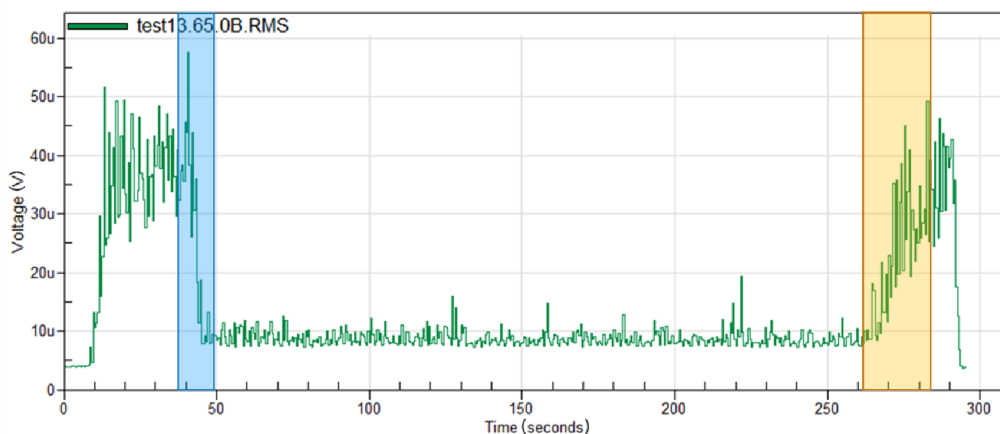
Energie akustické emise odpovídá energii uvolněné v kontaktu při deformacích. Pokud je vztažena na jednu otáčku kola, může potenciálně udávat přesnější informaci o vlivu změny rychlosti a úhlu náběhu na deformace v kontaktu, které jsou spojeny mj. s trakční silou, a tedy i adhezí. Energie vztažená na otáčku kola byla také sledována ve studiích na zmenšených rovinných modelech kontaktu kola s kolejnicí a při porovnání tedy může sloužit i pro ověření aplikovatelnosti metody na dvoudiskovém zařízení.



Obr. 5-2 Trvání jedné otáčky kola při různých rychlostech

5.1.3 Koeficient špičatosti

Koeficient špičatosti, který je průběžně vyhodnocován v pravidelných intervalech, v literatuře zabývající se studiem kluzných ložisek vykazoval výrazný nárůst v oblasti přechodu mezi mezním a smíšeným, případně až elastohydrodynamickým režimem mazání. Díky tomu může být potenciálně uplatněn pro zvýšení přesnosti a dosažení vyšší průkaznosti při přechodu mezi těmito režimy v situaci, kdy bude do kontaktu aplikována voda.

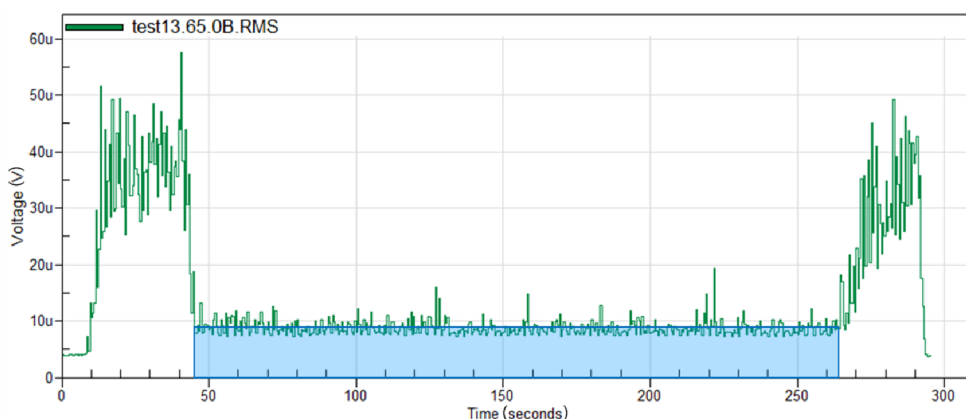


Obr. 5-3 Oblast zvýšeného koeficientu špičatosti (krátce po aplikaci vody a při hladovění kontaktu)

5.1.4 Shannonova entropie

Shannonova entropie je statistickou veličinou udávající míru nahodilosti signálu. Pokud je vyhodnocována průběžně, může sloužit k jasnějšímu rozlišení mezi jednotlivými režimy mazání, kdy u kapalinového (např. elastohydrodynamického) režimu lze díky oddělení kontaktních povrchů pozorovat výrazně hladší průběh signálu než u dalších režimů a hodnota Shannonovy entropie je tedy blízká nule. Pro tyto vlastnosti je podobně jako

u koeficientu špičatosti využívána v oblasti studia kluzných ložisek. Při sledování kontaktu kola s kolejnicí může její sledování zvýraznit rozdíly mezi suchým a zavodněným stavem.



Obr. 5-4 Oblast velmi nízké Shannonovy entropie

5.2 Vyhodnocení dat

První vyhodnocení všech testů bylo provedeno v programu ZDaemon, který umožňuje základní zpracování signálu jako je výpočet efektivní hodnoty (kvadratický průměr – RMS) nebo frekvenčního spektra pomocí FFT. Samotný signál i zpracované veličiny je možno v rámci programu graficky porovnat. Dále lze exportovat data pro tvorbu spektrogramů pomocí programu Gnuplot.

Přesné porovnání uvedených veličin a základní statistické zpracování (průměr, směrodatná odchylka) bylo provedeno v programu Excel. energii elektrického signálu lze obecně spočítat dle vzorce (1). Thakkar [5] ve své práci používá výpočet energie AE na otáčku kola pomocí efektivní hodnoty signálu, viz rovnice (2).

$$E_{AE} = \int_{-\infty}^{\infty} x(t)^2 dt \quad (1)$$

$$E_{AE} = \sum_{i=1}^N RMS_{AEi}^2 \cdot \Delta t \quad (2)$$

Kde

- E_{AE} energie akustické emise
- $x(t)$ hodnota signálu akustické emise
- RMS_{AE} efektivní hodnota signálu AE
vyhodnocovaná v časovém intervalu Δt
- $N=\Delta t/T$ počet intervalů Δt za jednu otáčku kola o době trvání T (zaokrouhлено)

Vzhledem k zaměření práce na průběhy sledovaných veličin spíše než jejich absolutní hodnoty a také vysoké citlivosti senzorů akustické emise na okolní podmínky byla v případech před statistickým zpracováním napříč měřeními data normalizována vzhledem k maximální a minimální hodnotě v rámci dané sady dle vzorců (3) a (4). Toto zpracování umožňuje sledování trendů signálu bez ovlivnění možnými posuny v absolutní intenzitě, data při měření s vodou jsou přitom normalizována vůči maximální hodnotě bez vody, díky čemuž je zajištěna možnost srovnání mezi těmito dvěma stavy. Dané případy jsou označeny v textu nebo v grafech zkratkou *norm.*

$$x_{norm,i} = \frac{x_i - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (3)$$

$$x_{norm,vi} = \frac{x_{vi} - x_{min}}{x_{max} - x_{min}} \quad (4)$$

Kde

- x vstupní veličina (např. RMS)
- x_{norm}normalizovaná veličina (např. RMS norm.)
- x_vvstupní veličina při aplikaci vody
- $x_{norm,v}$ normalizovaná veličina při aplikaci vody
- x_{max} maximální hodnota vstupní veličiny v rámci dané sady a provozních podmínek bez aplikace vody

Pro podrobnější statistické zpracování kompletního signálu (koeficient špičatosti (5), Shannonova entropie (6)) byl využit program Matlab. Veličiny byly vyhodnocovány průběžně ve 2s intervalu. Program pro jejich výpočet je obsahem Přílohy C.

$$\gamma_2 = \frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^4}{(N-1) \cdot \sigma^4} \quad (5)$$

$$H = - \sum_{i=1}^N x_i^2 \cdot \ln(x_i^2) \quad (6)$$

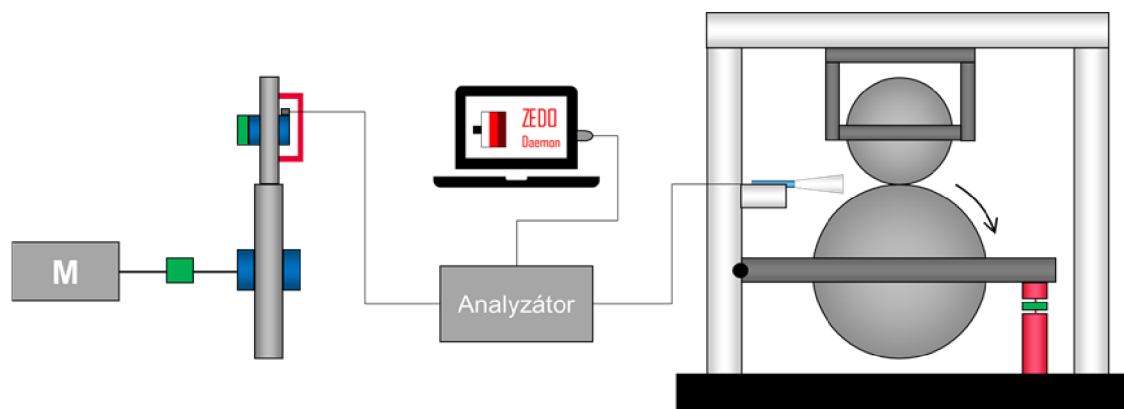
Kde

- γ_2 koeficient špičatosti
- x_i hodnoty signálu
- σ směrodatná odchylka signálu
- H Shannonova entropie

6 DETAILNÍ NÁVRH

6.1 Měřicí řetězec akustické emise

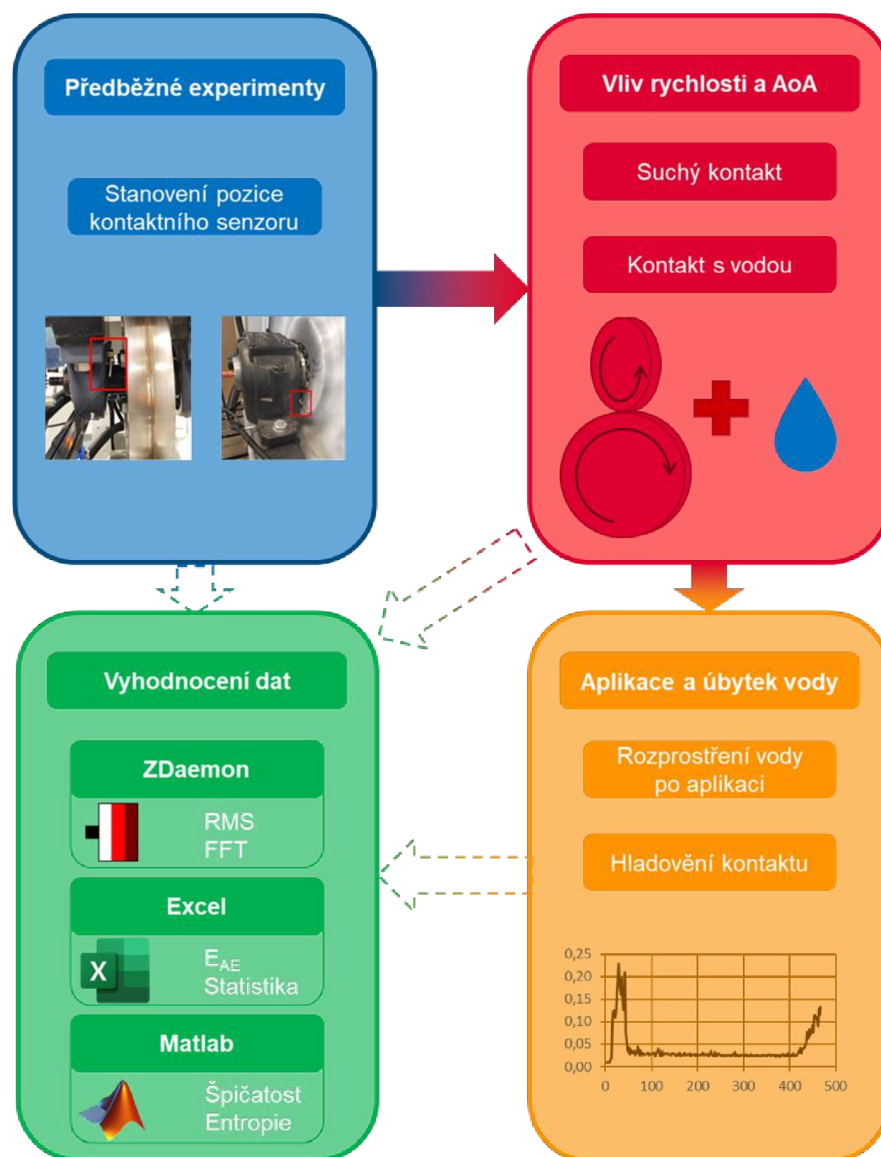
Na základě výsledků uvedených v kapitole 4.4 byl měřicí řetězec na laboratorním dvoudiskovém zařízení rozšířen o senzory akustické emise dle schématu na Obr. 6-1. Kompletní schéma vyvinuté metodiky je obsahem Přílohy A.



Obr. 6-1 Měřicí řetězec akustické emise (pohled z boku a zepředu)

6.2 Postup ověřovacích experimentů

Po fázi předběžných testů, ze kterých vyplynulo umístění kontaktního senzoru, následovaly vlastní experimenty, které byly v souladu s cíli zaměřeny na sledování odezvy akustické emise na provozní podmínky a vlivy okolního prostředí. V první fázi byla na testovacím zařízení ověřována přítomnost a charakter odezvy zvolených parametrů akustické emise na změnu rychlosti a úhlu náběhu, a to v suchém a poté i zavodněném stavu. Následně bylo přistoupeno k testům sledujícím vliv aplikace a časového úbytku vody z kontaktu, přičemž byla ověřována možnost využití metody akustické emise pro účely sledování vzniku a zániku vodní mezivrstvy mezi kolem a diskem simulujícím kolejnici, která zapříčiňuje změnu režimu mazání. Ze sledovaných parametrů byla RMS vyhodnocována přímo v programu ZDaemon, přepočítání na energii na otáčku a statistické zpracování v programu Excel a pokročilejší techniky zpracování signálu (koeficient špičatosti, Shannonova entropie) v programu Matlab. Postup experimentů shrnuje Obr. 6-2.



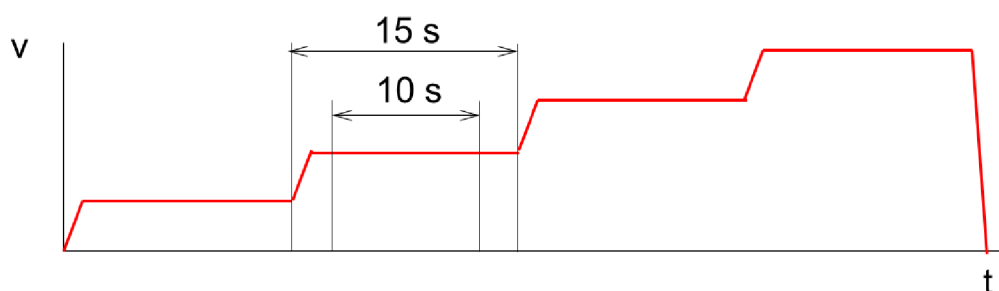
Obr. 6-2 Schéma postupu ověřovacích experimentů

6.3 Testovací podmínky

Po předběžných testech, které probíhaly zejména při zatíženích 600 a 700 MPa, nebyl v daném rozsahu shledán významný rozdíl mezi jednotlivými nastaveními, vyšší zatížení pak vedla k nadměrnému poškození kola. Z těchto důvodů byla při experimentech ověřujících odezvu AE na provozní parametry věnována pozornost změnám rychlosti a úhlu náběhu. Veškeré testy proto z důvodu minimalizace opotřebení testovacího zařízení probíhaly při zatížení 600 MPa.

6.3.1 Testy odezvy na rychlost a úhel náběhu

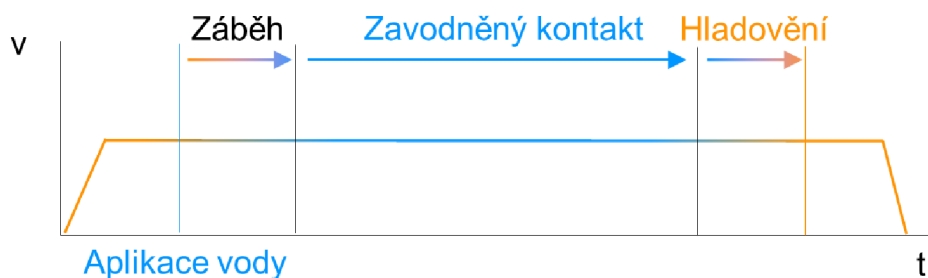
Vliv rychlosti a úhlu náběhu byl měřen formou schodovitého nárůstu rychlosti s intervalem 15 s při kroku 1 m/s do rychlosti 4 m/s. Vyhodnocován byl vždy 10s úsek, aby se předešlo zkreslení dat v důsledku zahrnutí časového úseku, ve kterém dochází k nárůstu rychlosti (viz Obr. 6-3). Rozsah úhlů náběhu byl 0 mrad až 25 mrad (přibližně $1,43^\circ$). Testy probíhaly za sucha nebo s předem aplikovanou vodou v množství 2 ml. Vyhodnocována byla RMS AE a energie uvolněná za jednu otáčku kola, obdobně jako u experimentů na zmenšených modelech popsanych v kapitole 2.2.3. Pro účely statistického zpracování byly provedeny tři sady měření.



Obr. 6-3 Průběh experimentů při testech odezvy na rychlost a úhel náběhu

6.3.2 Testy odezvy na úbytek vody z kontaktu

Při testech s aplikací a následným časovým úbytkem vody byly hodnoceny možnosti sledování změn adheze v důsledku vzniku a zániku vodní mezivrstvy v kontaktu kola s kolejnicí. Testy probíhaly primárně při úhlu náběhu 15 mrad, doměřena pak byla i data pro 5 a 25 mrad. Obvodová rychlost kola byla při všech měřeních 2 m/s a množství vody 2 ml. Kolo bylo nejdříve rozběhnuto na stálou rychlost, a poté byla aplikována voda, přičemž měření probíhalo až do vyhladovění kontaktu (viz Obr. 6-4) charakterizovaného návratem úrovně signálu na původní hodnoty. Vyhodnocovány byly RMS, koeficient špičatosti a Shannonova entropie, obdobně jako u studií sledujících mazání kluzných ložisek (viz kapitola 2.2.3).



Obr. 6-4 Průběh experimentů při testech odezvy na úbytek vody z kontaktu

Podmínky všech prováděných experimentů shrnuje Tab. 6-1.

Tab. 6-1 Plán experimentů

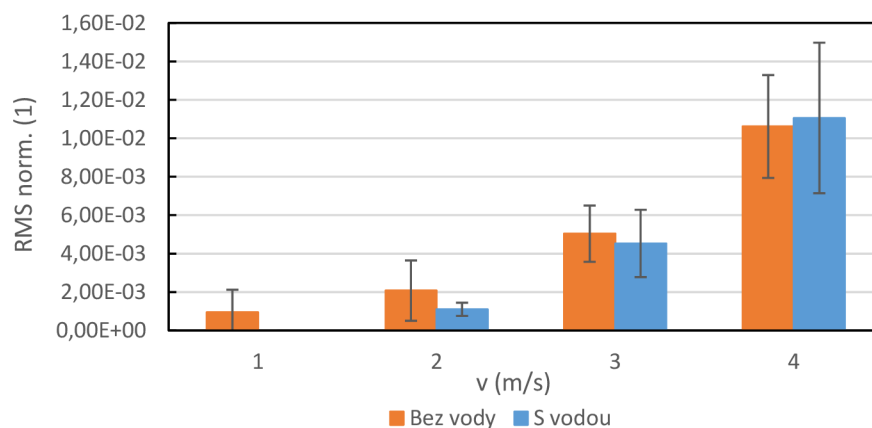
Testovaná veličina	Rychlost (m/s)	Krok (m/s)	AoA (mrad)	Krok (mrad)	Zatížení (MPa)	Voda
Rychlost, AoA	1 až 4	1	0 až 25	5	600	Ne
Rychlost, AoA + voda	1 až 4	1	0 až 25	5	600	Ano
Úbytek vody z kontaktu	2	-	15 (+ 5; 25)	-	600	Ano

6.4 Výsledky experimentů

6.4.1 Odezva akustické emise na změnu rychlosti

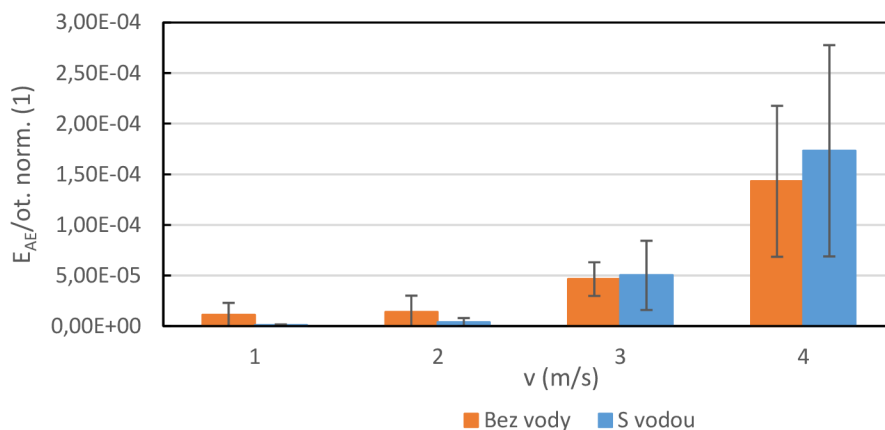
Odezva při nulovém úhlu náběhu

Při nulovém úhlu náběhu lze na RMS akustické emise pozorovat stoupající trend, přičemž mezi hodnotami pro rychlost 1 m/s a 4 m/s došlo přibližně k desetinásobnému nárůstu intenzity signálu, viz Graf 6-1. Rozptyl mezi jednotlivými měřeními je poměrně vysoký, což lze přisoudit relativně nízkým jmenovitým hodnotám signálu, kdy oproti měřením s maximálním úhlem náběhu (25 mrad) je síla signálu asi 100x nižší. Výsledky měření s vodou se při nulovém úhlu náběhu téměř shodují s výsledky bez aplikace vody, přičemž rozdíl se napříč třemi provedenými sadami měření pohybují v rozmezí statistické chyby.



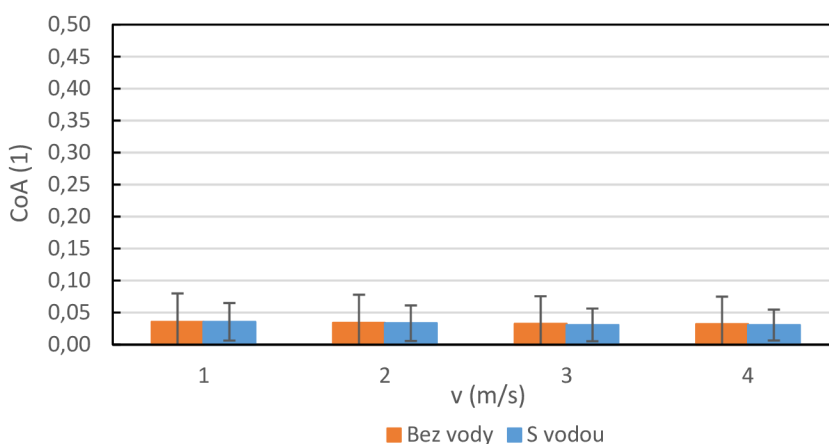
Graf 6-1 Závislost RMS AE na rychlosti při nulovém úhlu náběhu

Stoupající trend signálu byl zachován i při převodu dat na závislost energie AE uvolněné za jednu otáčku kola, tedy při zohlednění ujeté vzdálenosti (Graf 6-2). V tomto případě byl ovšem nárůst jednoznačně pozorován až od rychlosti 2 m/s výše. Napříč provedenými měřeními byly zjištěny poměrně velké rozdíly v hodnotách energie, které se projeví vysokou směrodatnou odchylkou. To lze opět přisoudit velmi nízkým jmenovitým hodnotám signálu pro úhly náběhu blízké nule, kdy v důsledku umocnění RMS signálu v rámci výpočtu jeho energie došlo ke snížení maximálních hodnot na asi jednu desetitisícinu hodnot při $A\theta A$ 25 mrad. Průběhy signálu při aplikaci vody se od signálu při testech za sucha liší opět pouze v rámci statistické chyby.



Graf 6-2 Závislost uvolněné energie AE za jednu otáčku na rychlosti při nulovém úhlu náběhu

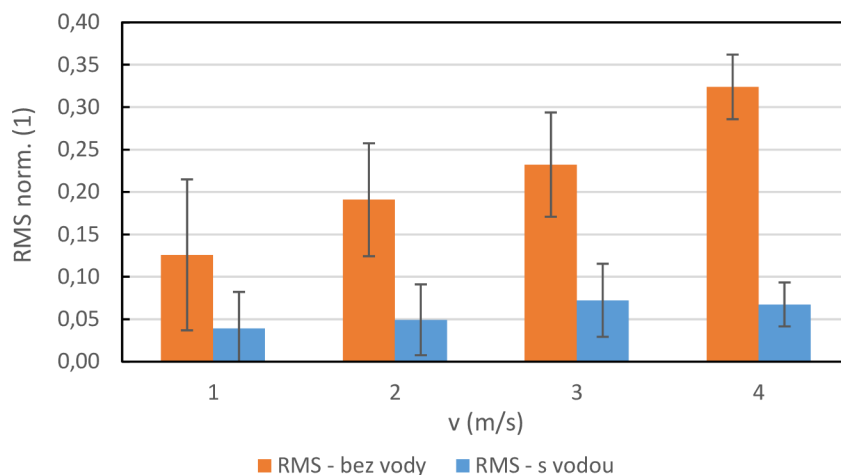
Vzhledem k metodě měření adheze založené na výpočtu poměru laterální a zátěžné síly byl součinitel adheze při nulovém úhlu náběhu také téměř nulový, viz Graf 6-3. Fluktuace lze přisoudit nepřesnostem při nastavení úhlu náběhu a malým výchyilkám axiální síly v důsledku kontaktu nerovností.



Graf 6-3 Závislost součinitele adheze na rychlosti při nulovém úhlu náběhu

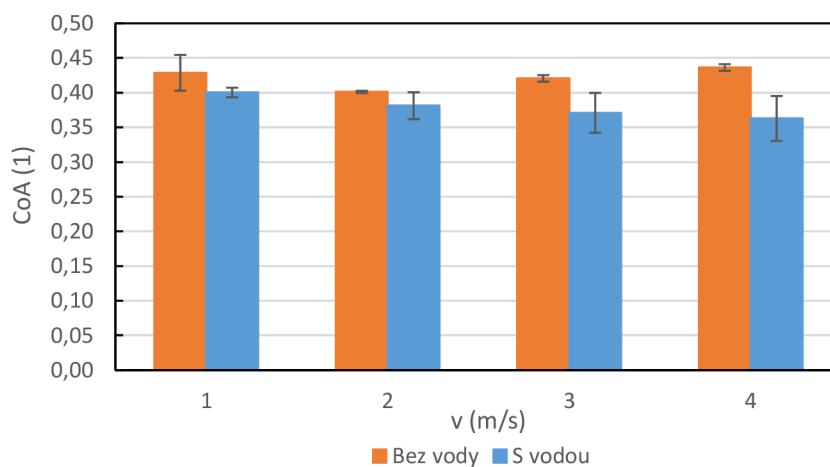
Odezva při středních úhlech náběhu (5 a 10 mrad)

Při středních úhlech náběhu (5 a 10 mrad) a stavu bez vody byly pozorovány proměnlivé průběhy akustické emise, které se značně lišily napříč jednotlivými měřeními. Opakovatelnost měření proto zůstávala zejména v nízkých rychlostech poměrně nízká, přičemž během testů při těchto úhlech náběhu byla právě při nižších rychlostech pozorována slyšitelná změna v charakteru kontaktu, který v důsledku velmi nízkých AoA přecházel od čistého valení do stavu se střídavým prokluzem a zpět. Tento přechodový jev byl pozorován v rozmezí rychlostí 1 m/s a 2 m/s. Při aplikaci vody byla zaznamenána pouze relativně slabá odezva, ve které nebyl zaznamenán žádný pozorovatelný trend (viz Graf 6-4).



Graf 6-4 Závislost RMS AE za jednu otáčku na rychlosti při úhlu náběhu 10 mrad

Větší hodnota směrodatné odchylky při rychlosti 1 m/s je viditelná i na součiniteli adheze (Graf 6-5), kde je při AoA 10 mrad od vyšších rychlostí při suchém stavu viditelný pozvolný nárůst jeho hodnoty. Při aplikaci vody byl pozorován postupný pokles v závislosti na rychlosti.

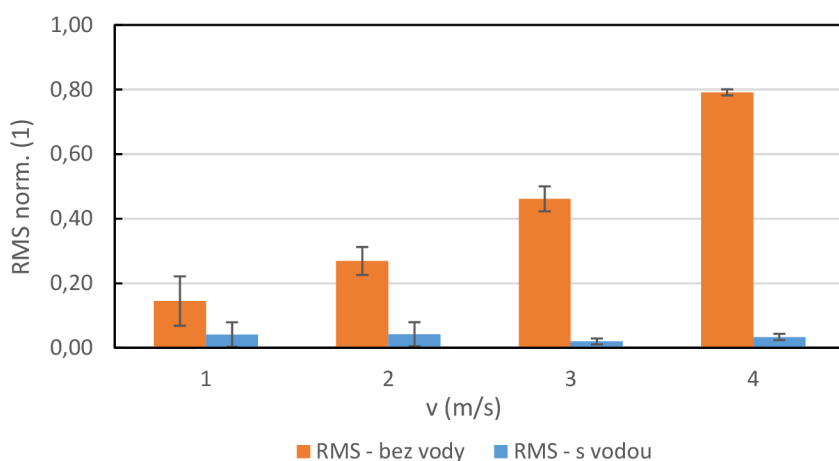


Graf 6-5 Závislost součinitele adheze na rychlosti při úhlu náběhu 10 mrad

Odezva při vysokých úhlech náběhu (15 až 25 mrad)

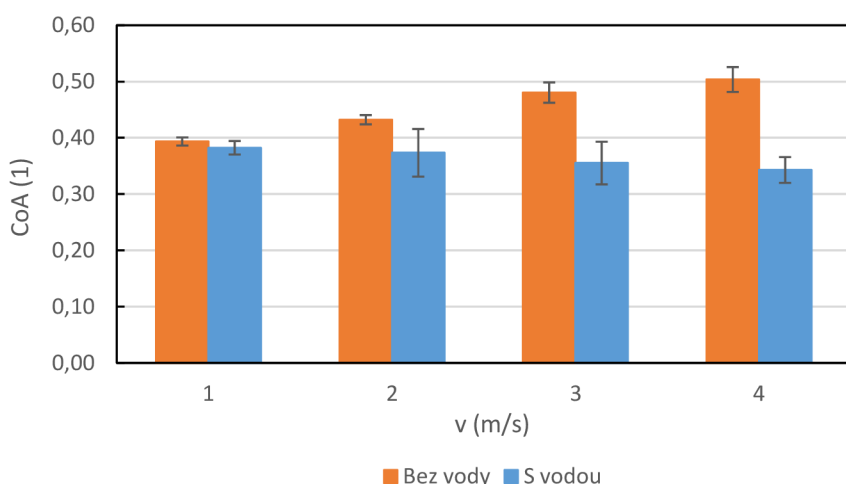
Při vysokých úhlech náběhu (AoA 15 až 25 mrad) byla konzistence výsledků při testech bez vody napříč měřeními znatelně vyšší. Nárůst je patrný již od minimální testované rychlosti 1 m/s. Odchylna naměřených dat napříč měřeními se zpravidla snižuje s rostoucí rychlostí.

Při aplikaci vody na rozdíl od testů za sucha docházelo k mírnému poklesu RMS akustické emise, přičemž ale její hodnoty byly oproti testům bez vody téměř zanedbatelné, a to zejména při vysokých rychlostech, viz Graf 6-6.



Graf 6-6 Závislost RMS AE na rychlosti při úhlu náběhu 20 mrad

Obdobně jako energie akustické emise při vyšších úhlech náběhu vykazuje i součinitel adheze (Graf 6-7) stoupající tendenci v případě bez aplikace vody, zatímco s vodou je trend opačný. Toto chování tak v obou případech (měření AE a CoA) vede k postupnému navyšování rozdílů mezi suchým a zavodněným stavem.



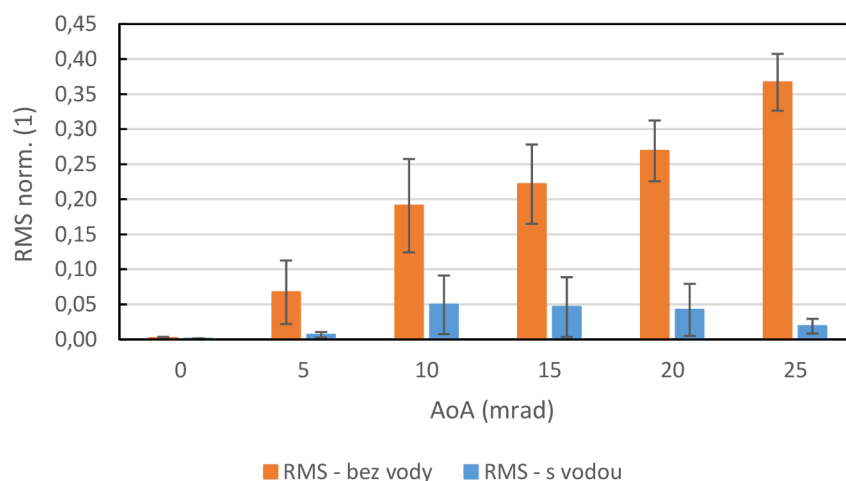
Graf 6-7 Závislost součinitele adheze na rychlosti při úhlu náběhu 20 mrad

6.4.2 Odezva akustické emise na změnu úhlu náběhu

Akustická emise vykazovala při navýšení úhlu náběhu rostoucí trend, který zejména u vyšších rychlostí nabýval přibližně lineárního charakteru. U nízkých rychlostí (v měřeném rozsahu při rychlosti 1 m/s a v menší míře i 2 m/s) byla měření charakterizována značnými směrodatnými odchylkami. Při těchto rychlostech byl zvláště u nižších úhlů náběhu pozorován výše zmíněný proměnlivý stav, při kterém docházelo ke střídání valení a prokluzu v laterálním směru.

Odezva při nižších rychlostech (1 a 2 m/s)

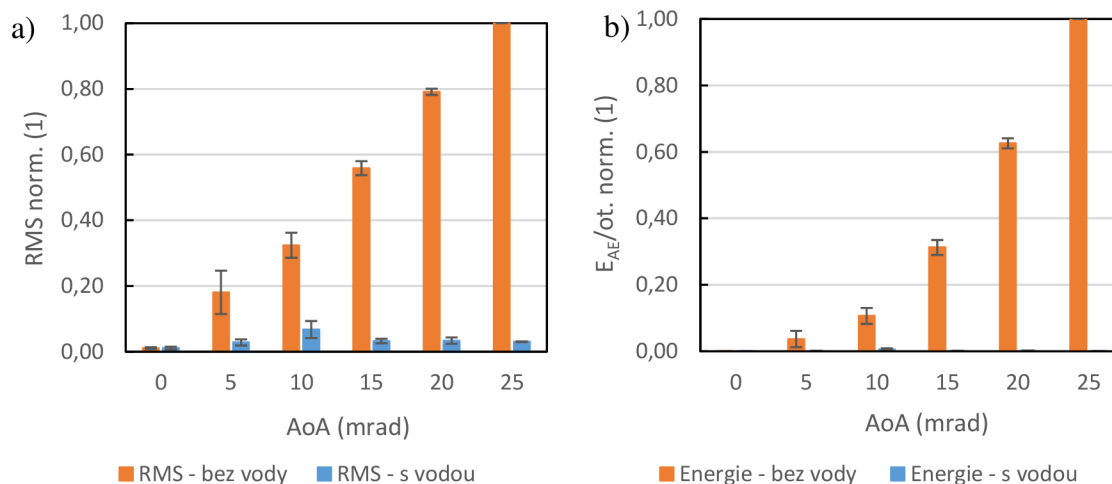
Nestabilita běhu kola byla obzvláště při rychlosti 1 m/s napříč provedenými sadami měření poměrně vysoká a výsledky z tohoto důvodu nelze považovat za průkazné. Při rychlosti 2 m/s (Graf 6-8) lze pozorovat postupný pokles relativní velikosti směrodatných odchylek vůči absolutní hodnotě signálu, a to asi od AoA 15 mrad. Mezi úhly 10 a 15 mrad je také při stavu bez vody pozorovatelné snížení rychlosti růstu RMS akustické emise. Hodnoty signálu po aplikaci vody jsou opět prakticky zanedbatelné a liší se v řádu statistické chyby.



Graf 6-8 Závislost RMS AE na rychlosti při rychlosti 2 m/s

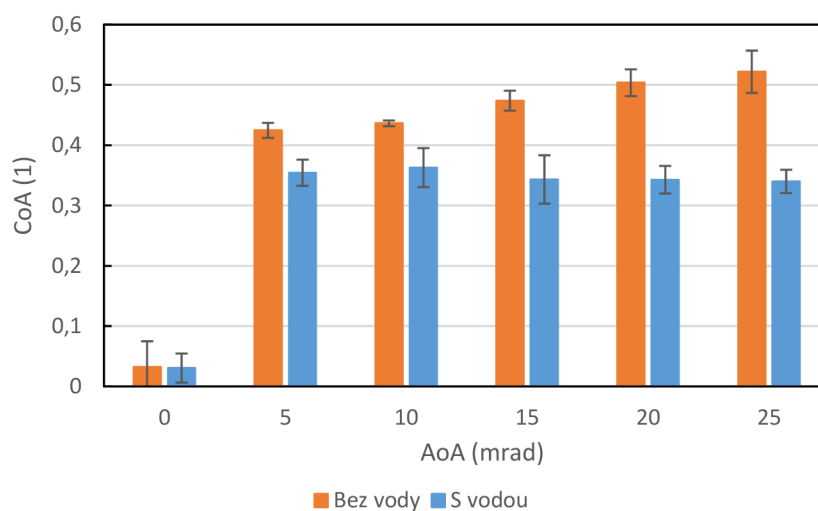
Odezva při vyšších rychlostech (3 a 4 m/s)

Při vyšších rychlostech byla sledována přibližně lineární odezva RMS akustické emise na změnu úhlu náběhu, z čehož plyne v základu kvadratický trend nárůstu uvolněné energie AE. Zároveň byla zaznamenána vysoká opakovatelnost výsledků. Odezva po aplikaci vody byla stále téměř zanedbatelná, přičemž maximum nastalo při AoA 10 mrad. Neprojevuje se ovšem žádný dominantní trend. Výsledky znázorňuje Graf 6-9.



Graf 6-9 Odezva AE při rychlosti 4 m/s: a) RMS; b) Energie uvolněná za jednu otáčku kola

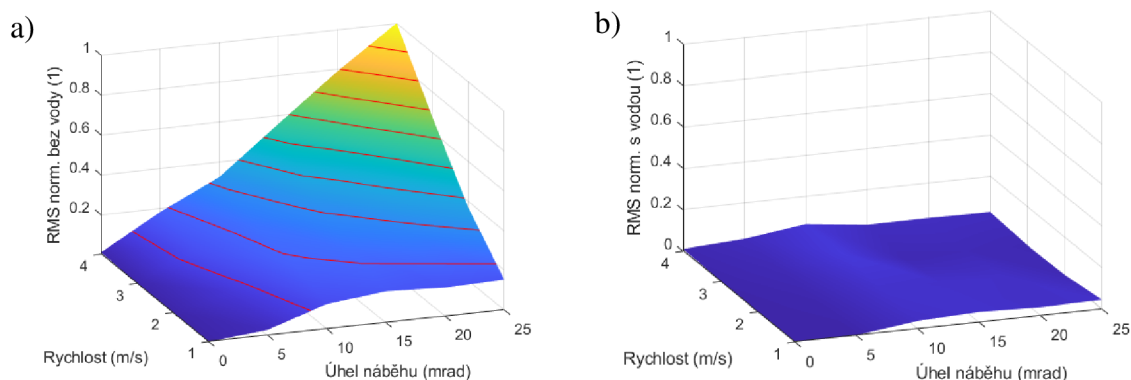
Na průběhu součinitele adheze byl pozorován stoupající trend, přičemž vzhledem k metodice jeho měření lze za relevantní považovat údaje od AoA 5 až 10 mrad, kdy začíná docházet ke stabilnímu skluzu v příčném směru, a tedy i generování laterální síly využívané při výpočtu součinitele adheze. Se stoupajícím úhlem náběhu lze při suchém stavu pozorovat nárůst CoA v důsledku stoupající laterální síly. Po aplikaci vody nastalo stejně jako u RMS na kontaktním senzoru akustické emise maximum při úhlu náběhu 10 mrad, výsledky se ovšem liší v rámci statistické chyby a celkový trend lze považovat za přibližně konstantní, viz Graf 6-10.



Graf 6-10 Závislost součinitele adheze na úhlu náběhu při rychlosti 4 m/s

6.4.3 Odezva při aplikaci vody do kontaktu

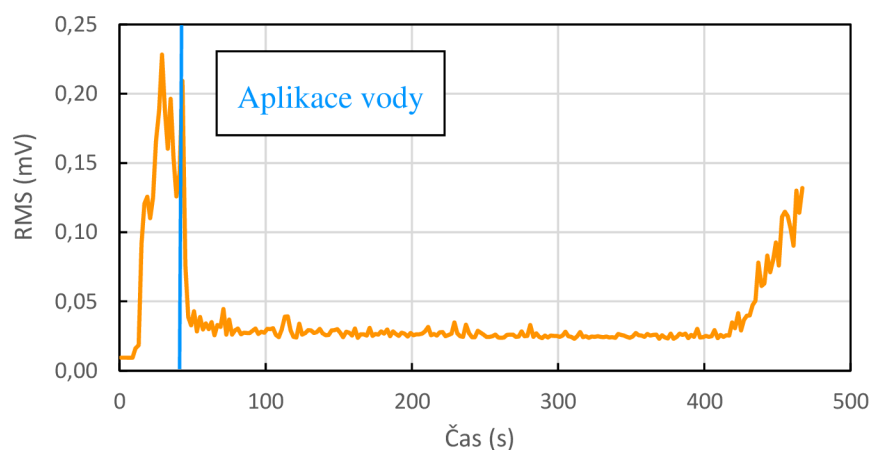
Po aplikaci vody byla dle očekávání pozorována pouze velmi omezená odezva AE (viz Graf 6-11) související s oddělením kontaktních povrchů. Tento poznatek byl dále aplikován při sledování změn v režimu kontaktu právě po aplikaci vody a následně během hladovění kontaktu a přechodu zpět do suchého stavu.



Graf 6-11 Odezva akustické emise před a po aplikaci vody (kontaktní senzor)

Měření úbytku vody v čase byla provedena při úhlech 5, 15 a 25 mrad, průběh se ovšem výrazným způsobem lišil pouze intenzitou signálu v suchém (mezném) stavu. Dále jsou prezentovány výsledky při AoA 15 mrad, výsledky pro další úhly náběhu jsou obsahem Přílohy D.

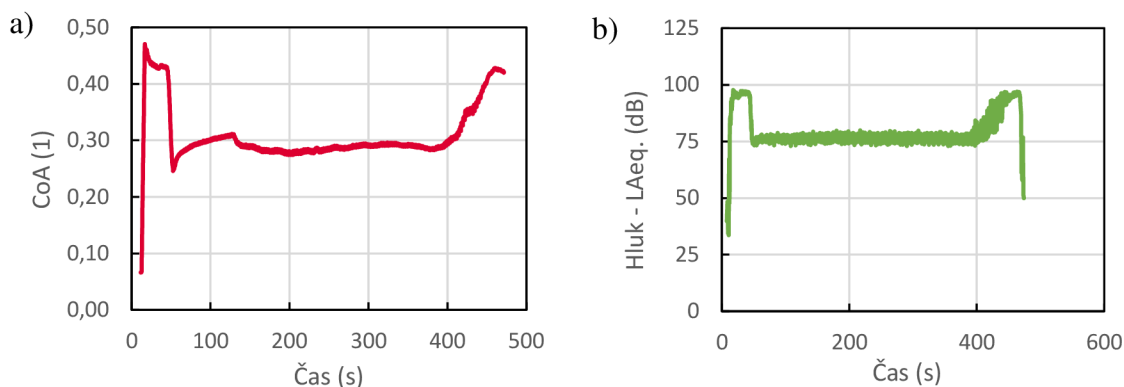
RMS signálu (Graf 6-12) z kontaktního senzoru se po aplikaci vody ustálila asi na 20 % intenzity v suchém stavu, přičemž byl pozorován stabilní průběh až do počátku hladovění, které při aplikaci 2 ml vody nastávalo v rozmezí 2 až 5 minut po zavodnění kontaktu.



Graf 6-12 Průběh RMS na kontaktním senzoru AE při aplikaci vody pro $AoA = 15$ mrad

Podobný průběh lze pak pozorovat i na průběhu adheze (Graf 6-13a), kde při úhlu náběhu 15 mrad v důsledku snížení součinitele tření kvůli vodě přítomné v kontaktu, nastal pokles z hodnot v okolí 0,45 na hodnoty v blízkosti 0,3, došlo tedy ke snížení asi o 35 %.

Po zavodnění kontaktu došlo také k poklesu hluku (Graf 6-13b), který se při daném úhlu náběhu, snížil z téměř 100 dB na přibližně 75 dB.

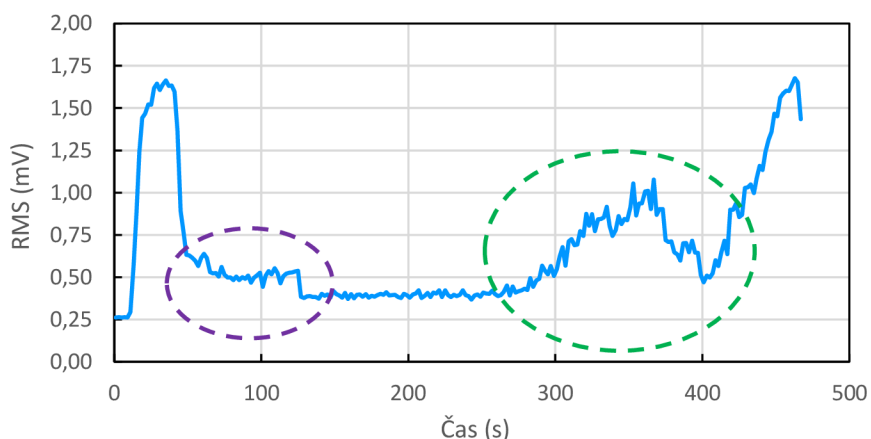


Graf 6-13 a) Průběh adheze; b) Průběh hluku v decibelech pro $AoA = 15$ mrad

Rozdílné výsledky byly ovšem pozorovány na bezkontaktním senzoru akustické emise (Graf 6-14). V tomto případě byl opět pozorován pokles RMS v souvislosti s aplikací vody a následný nárůst aktivity při hladovění. Hodnota při zavodněném kontaktu se pohybovala v intervalu 0,4 až 0,5. Amplituda v suchém stavu opět závisela na úhlu náběhu, přičemž při 15 mrad činila asi 1,7 mV. Došlo tedy k poklesu RMS asi o 75 %.

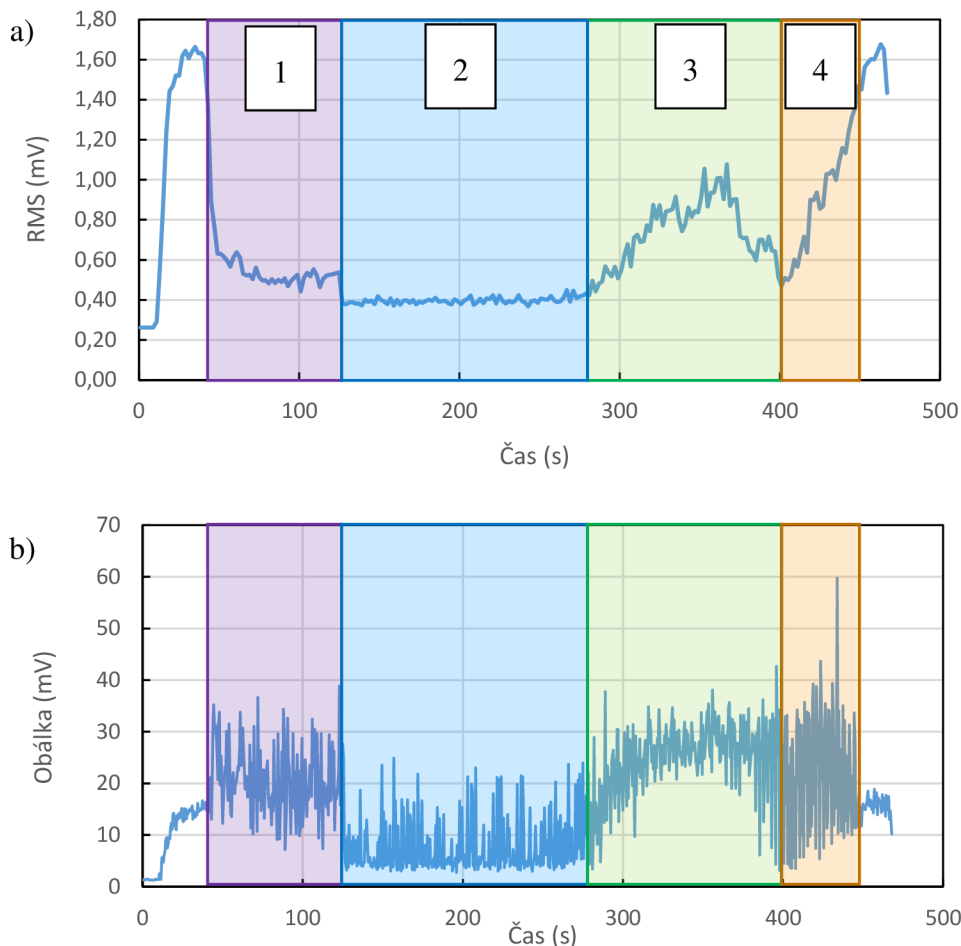
Oproti dalším metodám měření byl ovšem navíc zaznamenán přechodný nárůst aktivity v oblasti bezprostředně předcházející fázi hladovění kontaktu. Tento nárůst měl při všech měřeních nezávisle na úhlu náběhu amplitudu v rozmezí 0,85 až 1,1 mV (na Graf 6-14 mezi 280. a 400. sekundou, označeno zelenou barvou).

Zejména na bezkontaktním senzoru AE lze navíc v některých měřeních sledovat lehce zvýšenou aktivitu RMS ve fázi následující krátce po aplikaci vody. V případě měření na Graf 6-14 ji lze sledovat cca mezi 50. a 120. sekundou (označeno fialovou barvou). Tato aktivita byla zároveň zaznamenána i na průběhu adheze (viz Graf 6-13 výše).



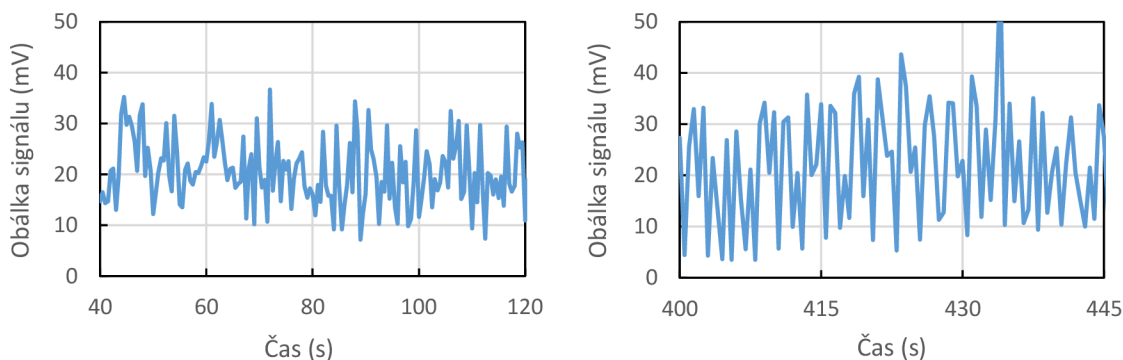
Graf 6-14 Průběh RMS na bezkontaktním senzoru AE při aplikaci vody pro $AoA = 15$ mrad

V obou těchto oblastech je na samotném signálu patrný velký nárůst amplitud, jak lze ve zjednodušené podobě pozorovat na obálce signálu AE, viz Graf 6-15, ze kterého je zároveň patrné, že ačkoliv RMS, tedy kvadratický průměr, po aplikaci vody významně klesá, amplitudy signálu na bezkontaktním senzoru dosahují dokonce vyšších hodnot než v suchém stavu, přičemž jsou až 70x vyšší než průměr.



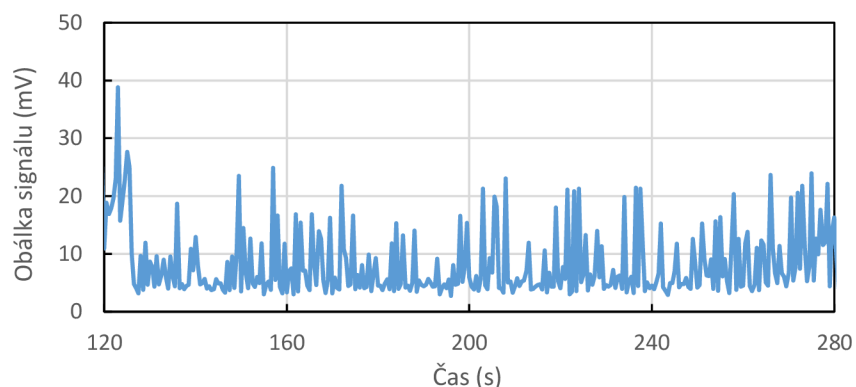
Graf 6-15 a) RMS AE; b) Obálka signálu AE

V oblasti následující těsně po aplikaci vody (1) lze pozorovat poměrně velké výkyvy v získaném signálu v rozmezí přibližně 25 mV, obdobný průběh je patrný i při hladovění (4) s většinou obálky signálu pohybující se v 35mV rozmezí mezi 5 a 40 mV, viz i Graf 6-16.



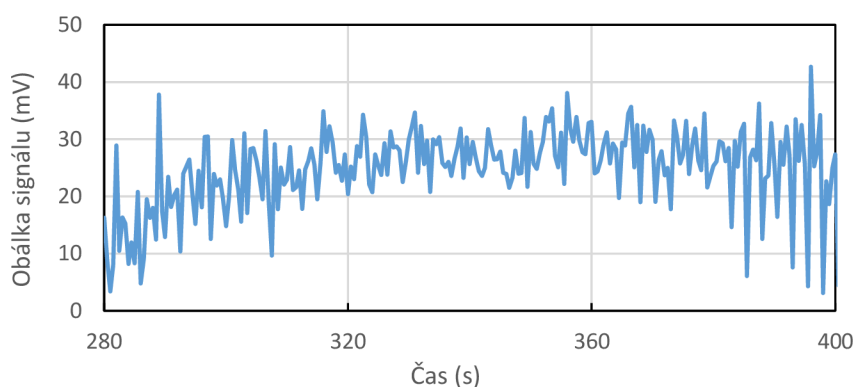
Graf 6-16 Detail obálky signálu AE: a) Oblast po aplikaci vody (1); b) Oblast hladovění (3)

V ustáleném zavodněném stavu (2) jsou na signálu opět pozorovatelné občasné výkyvy v rozmezí 15 až 20 mV, absolutní hodnoty amplitud jsou nicméně výrazně nižší a nepřesahují 25 mV, viz Graf 6-17.



Graf 6-17 Detail obálky signálu v zavodněném stavu po ustálení

Oblast přechodného nárůstu akustické emise (3) vykazuje z hlediska obálky signálu stabilnější průběh spojený se zvýšením průměrné hodnoty vyjádřené v RMS signálu. Zejména ve středové fázi se rozsah amplitud signálu AE promítnutých v jeho obálce pohyboval v rozmezí cca 15 mV, jak lze pozorovat i na Graf 6-18 mezi 310. a 380. sekundou. V koncové fázi je již pozorovatelný vyšší rozptyl spojený s překryvem se začátkem hladovění kontaktu.

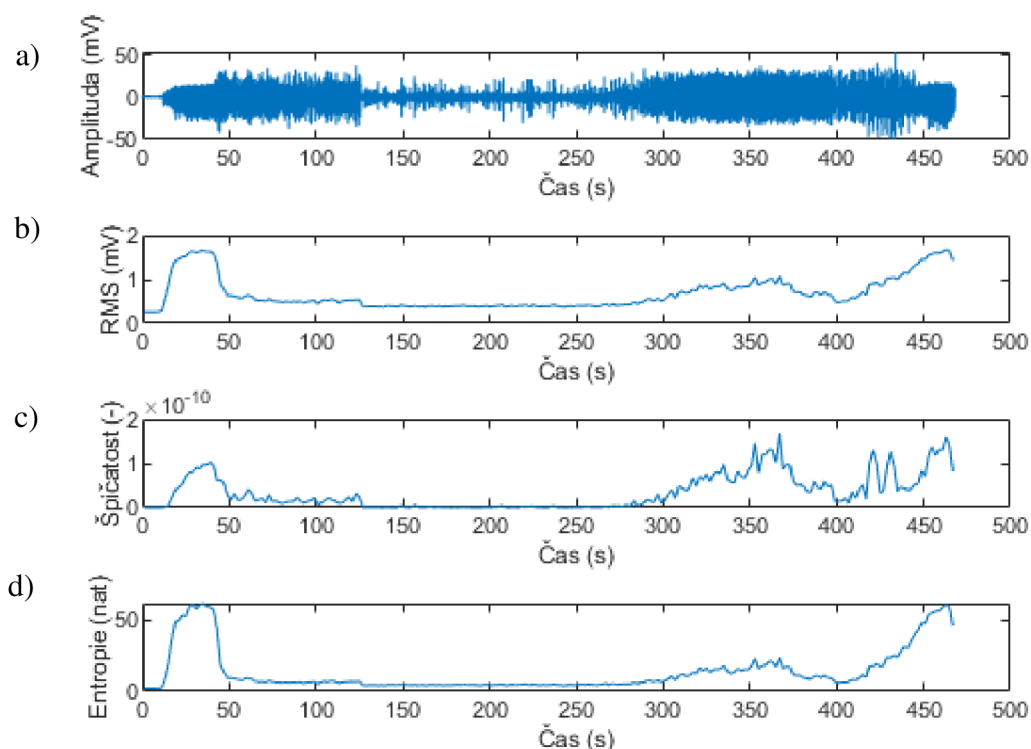


Graf 6-18 Detail obálky signálu AE během přechodného jevu nastávajícího před hladovění kontaktu

Signál AE byl dále statisticky zpracován dle postupů používaných pro rozlišení mazacích režimů kluzných ložisek, konkrétně byly po 2s úsecích průběžně vyhodnocovány koeficient špičatosti a Shannonova entropie. Jako příklad je dále popsáno měření bezkontaktním senzorem, opět při 15 mrad (Graf 6-19).

Na koeficientu špičatosti (Graf 6-19c) byla pozorována zvýšená aktivita v oblasti suchého kontaktu a během aplikace vody a také ve fázi hladovění. Při menších úhlech náběhu se ovšem nejvyšší hodnoty vyskytují v oblasti přechodného nárůstu RMS. Kontrast je dále zvýrazněn díky téměř nulové hodnotě koeficientu špičatosti během běhu v ustáleném zavodněném stavu.

Shannonova entropie (Graf 6-19d) signálu vykazovala obdobný průběh jako RMS, nicméně došlo ke zvýraznění rozdílu mezi suchým a zavodněným stavem, které bylo způsobeno redukcí šumu pozorovatelného na RMS po aplikaci vody. Pokles Shannonovy entropie po zavodnění kontaktu činil v uvedeném případě přibližně 94 %.



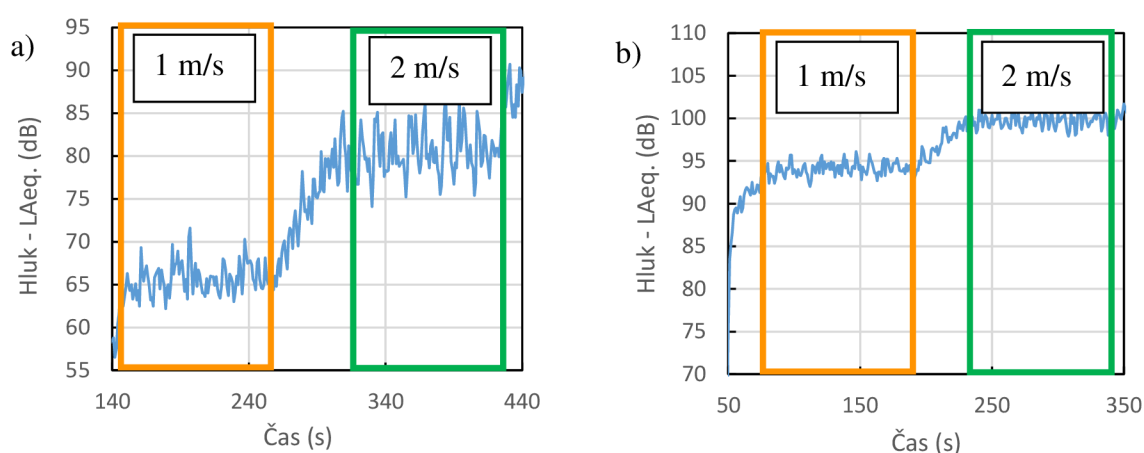
Graf 6-19 Statistické zpracování signálu z bezkontaktního senzoru pro úhel náběhu 15 mrad: a) nezpracovaný signál AE; b) RMS AE; c) Koefficient špičatosti; d) Shannonova entropie

6.5 Diskuze a hodnocení klíčových parametrů

Hlavní výsledky lze rozdělit do dvou kapitol, a to odezvy na provozní podmínky (rychlost a úhel náběhu) a změny v signálu v důsledku aplikace vody. Odezva akustické emise na změnu provozních podmínek byla vyhodnocována zejména jako základ pro další zmíněné části a zjištění omezení z hlediska měřicího rozsahu, druhá kapitola pak navíc představuje i možnosti uplatnění akustické emise v praxi studia adheze v kontaktu železničního kola a kolejnice, a to zejména v laboratorních, ale v jistých případech potenciálně i reálných podmínkách.

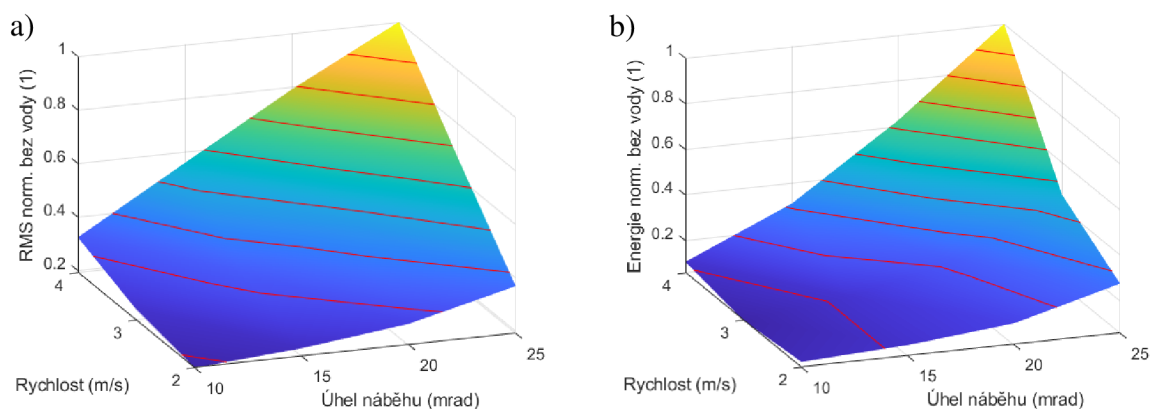
6.5.1 Odezva na změnu provozních podmínek

Vyšší opakovatelnost měření na kontaktním senzoru pravděpodobně souvisí se způsobem přenosu signálu, kde přenos materiálem v podstatně menší míře ovlivňují vnější vlivy, mezi které se v případě vysokofrekvenčního měření nepočítá pouze slyšitelný hluk, ale také vysokofrekvenční zdroje, jako jsou elektronická zařízení nebo vibrace, což bylo potvrzeno i na zpracovaných spektrogramech. Signál promítající se na ložisku disku reagoval na změny provozních podmínek s poměrně vysokou mírou opakovatelnosti s výjimkou kombinace nízkých úhlů náběhu (0, 5 a 10 mrad) a nízkých rychlostí (1 m/s). Při těchto hodnotách docházelo i dle vysoké nestability hlukových projevů (Graf 6-20) k náhodným změnám mezi zdánlivě čistým valením a prokluzem v laterálním směru, které mohly být způsobeny i nedostatečnou tuhostí zařízení v dané ose.



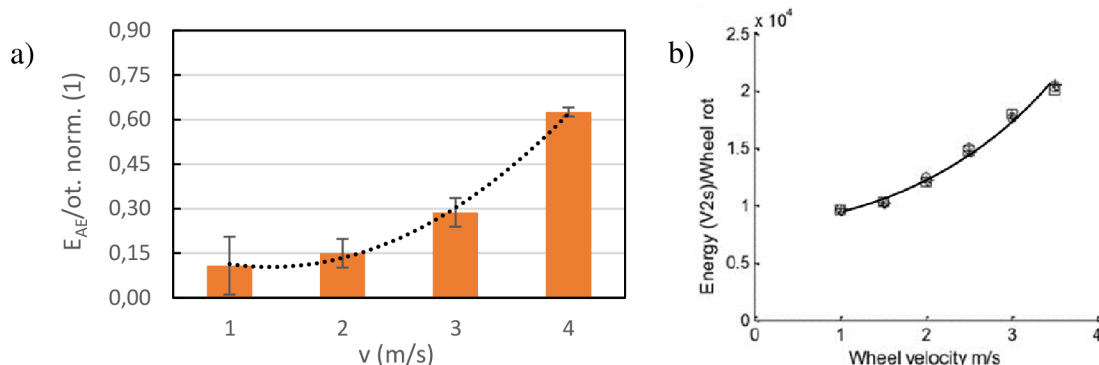
Graf 6-20 Nestabilita hlukových projevů: a) $AoA = 5$ mrad; b) $AoA = 20$ mrad

Na vyšších hodnotách rychlosti i AoA se průběhy odezvy napříč měření ustálily, přičemž byla pozorována přibližně lineární závislost RMS na rychlosti i úhlu náběhu (Graf 6-21a), lze proto předpokládat, že míra deformací promítající se v RMS akustické emise je úměrná vznikající laterální síle.



Graf 6-21 a) RMS AE (kontaktní senzor); b) Energie AE na otáčku (kontaktní senzor)

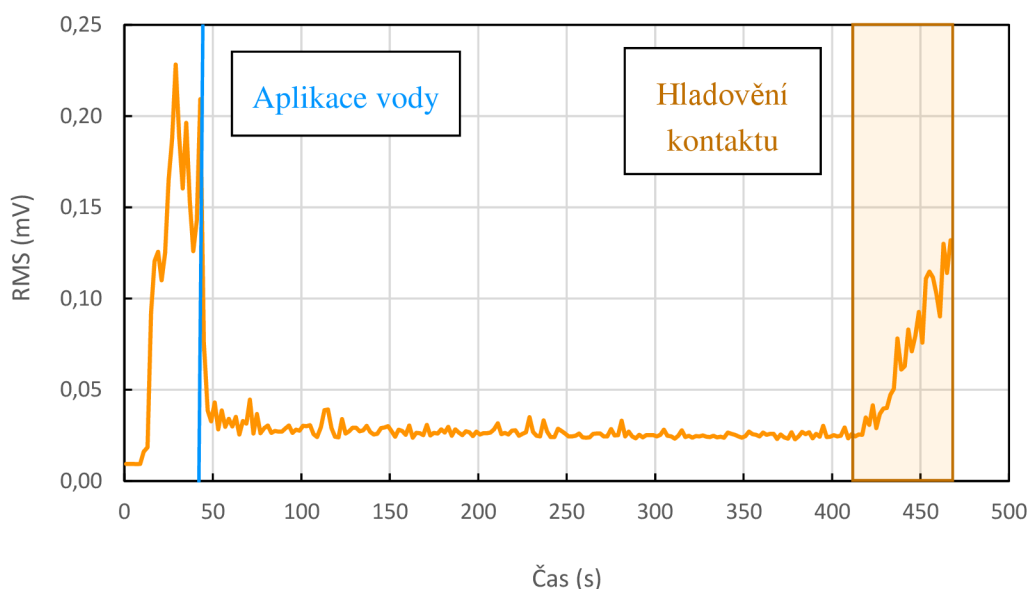
Po vypočtení odpovídající energie byl tedy potvrzen přibližně kvadratický trend (Graf 6-22b) pozorovaný na zmenšených zařízeních [5], viz kapitola 2.2.3, dále ovlivněný přepočtem na jednu otáčku kola.



Graf 6-22 Energie AE na otáčku: a) Sledovaný twin-disk (20 mrad); b) zmenšené zařízení (Thakkar, 2013) [5]

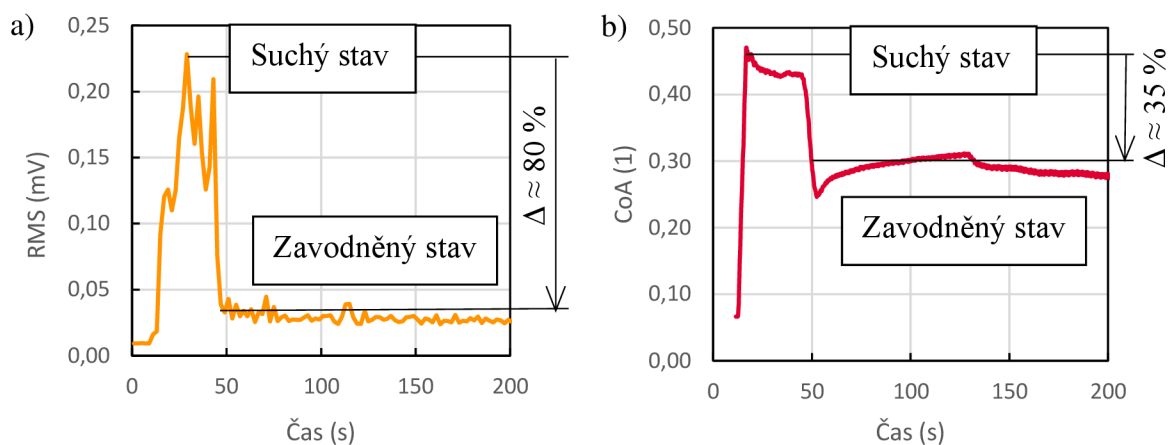
6.5.2 Odezva při úbytku vody z kontaktu

Při experimentálním ověření reakce RMS akustické emise na změnu režimu kontaktu v čase byl po aplikaci vody pozorován významný pokles aktivity akustické emise. Tento pokles odpovídá studiím provedeným na kluzných ložiscích a lze jej asociovat s omezením intenzity deformací na kontaktních površích. To naznačuje, že aplikované množství vody bylo dostatečné pro vytvoření mezivrstvy nacházející se mezi kontaktními povrchy. Aby došlo k takto vysokému poklesu musí tato mezivrstva disponovat dostatečnou tloušťkou pro alespoň částečné oddělení kontaktních povrchů. Po tomto poklesu následuje na kontaktním senzoru relativně stabilní průběh AE v délce několika minut, během kterých dochází vzhledem k otevřenému charakteru kontaktu k postupnému úbytku vody do okolí. Doba trvání tohoto stavu není stálá, nicméně při vyšších úhlech náběhu dochází spíše k jejímu zkracování, což pravděpodobně souvisí s dodatečným silovým působením na vodní mezivrstvu v laterálním směru, tedy ven z kontaktu a zároveň pryč od kontaktních těles. Opětovný nárůst hodnoty RMS akustické emise byl znovu pozorován mj. i na průběhu CoA a lze jej proto asociovat s hladověním kontaktu. V tomto stavu již tloušťka vodní vrstvy poklesne natolik, že není dostatečná pro oddělení kontaktních povrchů a opět tak dochází k intenzivnější tvorbě deformací, což se promítá na signálu akustické emise. Na kontaktním senzoru AE i běžně měřených veličinách (CoA , hluk) nastává tento proces poměrně náhle a délka jeho trvání se pohybuje v řádech nižších desítek sekund, jak je patrné i z Graf 6-23.



Graf 6-23 Průběh RMS na kontaktním senzoru AE při aplikaci vody pro $AoA = 15$ mrad

Jak bylo zmíněno, všechny výše popsané jevy jsou pozorovatelné i pomocí dnes používaných metod. Bylo prokázáno, že v daném rozsahu měření RMS akustické emise reaguje na aplikaci vody stejným způsobem jako součinitel adheze, přičemž jevy vedoucí k deformacím kontaktních povrchů se v důsledku promítají i na míře hluku. Právě díky tomuto poznatku ovšem zejména kontaktní měření metodou akustické emise představuje potenciálně jednodušší variantu sledování stavu kontaktu v reálném čase z hlediska přítomnosti kontaminantů. Na rozdíl od měření CoA totiž není pro vyhodnocení AE nutná sada siloměrů, případně momentových snímačů, jejichž data se musí pro výpočet adheze následně kombinovat, ale postačuje jeden senzor. Tento senzor lze navíc umístit na stávající konstrukci bez nutnosti jejího přizpůsobení. Díky tomu je metodu akustické emise potenciálně možné použít i na reálných železničních nápravách, které pro toto pozorování nebyly předem nijak upraveny. Vnější vlivy, jako je poškození kolejnice, změna rychlosti nebo průjezdy zatáčkami sice pravděpodobně neumožní přepočítání RMS AE na součinitel adheze v absolutních hodnotách, nicméně detekovaný pokles při aplikaci vody a potenciálně dalších kontaminantů je natolik výrazný, že zejména na rovných úsecích lze předpokládat spolehlivé pozorování snížení adheze teoreticky i od změny v řádu vyšších jednotek procent. Jako příklad lze uvést vzorový experiment (viz kapitola 6.4.3), kde se 35% pokles CoA promítnul v 80% pokles RMS AE (viz Graf 6-24), což by při uvažování lineární závislosti mohlo být jinak způsobeno pouze 80% snížením rychlosti, případně AoA .



Graf 6-24 a) Pokles RMS AE po aplikaci vody; b) Pokles CoA po aplikaci vody

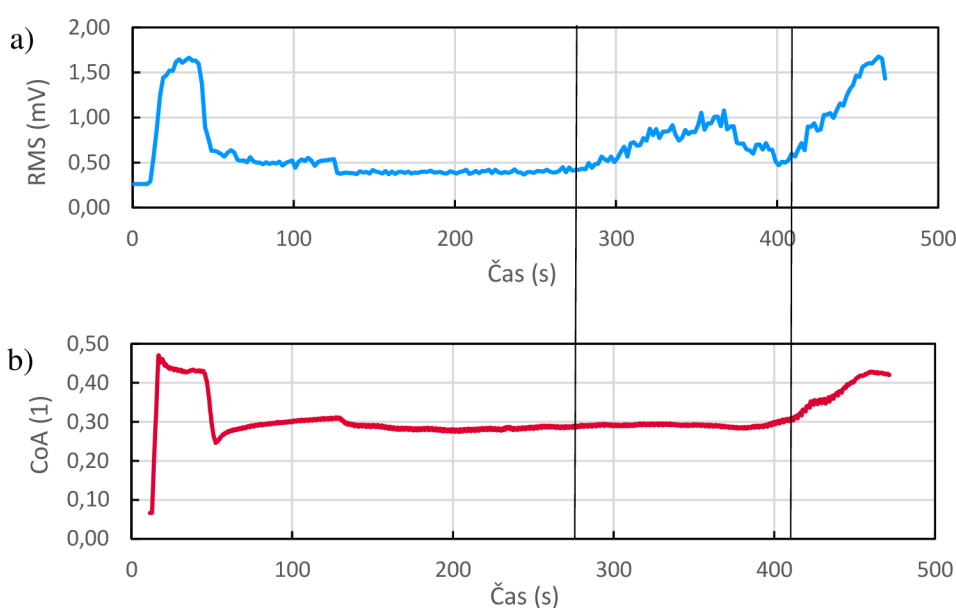
Bezkontaktní senzor AE kromě popsaných průběhů zaznamenal navíc dva přechodové stavy, kde první nastával bezprostředně po aplikaci vody a druhý předcházel fázi hladovění kontaktu a následného přechodu do mezního režimu.

Stav nastávající bezprostředně po aplikaci vody se projevuje mírně zvýšenou hodnotou RMS AE a lze jej sledovat i na CoA . Při experimentech je voda aplikována do kontaktu v poměrně krátkém časovém úseku a není tedy zpočátku v kontaktu rozprostřena rovnoměrně. Tato zvýšená hodnota signálu akustické emise i součinitele adheze proto velmi pravděpodobně souvisí s postupným rozprostíráním vody v kontaktu, přičemž má různý charakter napříč jednotlivými testovacími měřeními a v některých případech i absentuje. To je pravděpodobně způsobeno ručním způsobem aplikace vody, kdy v závislosti na její délce a přesném umístění aplikované dávky, může čas potřebný k rovnoměrnému rozprostření vody variovat.

Obdobný průběh lze na obálce signálu pozorovat i v případě hladovění kontaktu. Lze tedy předpokládat, že v obou těchto fázích v důsledku nedostatku vody v některých náhodně rozmístěných částech obvodu kola dochází k lokálním přechodům do mezního režimu mazání, které jsou ovšem stále poměrně nahodilé a málo četné a nepromítají se proto ve významnější míře do součinitele adheze ani hodnoty pozorovaného hluku.

Druhý stav, předcházející fázi hladovění, byl detekován při všech měřeních v relativně stálé podobě. Délka jeho trvání se vždy pohybovala v rozmezí jedné až dvou minut, přičemž dosahoval relativně stálé amplitudy ve výši asi 200 % hodnoty v ustáleném zavodněném stavu, viz Graf 6-25. V důsledku toho byla amplituda pozorovaného jevu při AoA 5 mrad dokonce vyšší než při suchém kontaktu. Po odeznění jevu se RMS krátce navrátila na hodnotu v zavodněném stavu, nicméně po několika jednotkách až nižších desítkách sekund došlo k počátku hladovění kontaktu, a tedy nárůstu RMS zpět na hodnoty odpovídající suchému režimu. Vzhledem ke stálému načasování tohoto přechodného jevu lze předpokládat, že přímo souvisí s klesajícím množstvím vody v kontaktu a zároveň může mít teoreticky podíl i na jeho relativně náhlém a rychlém vyhladovění, které téměř

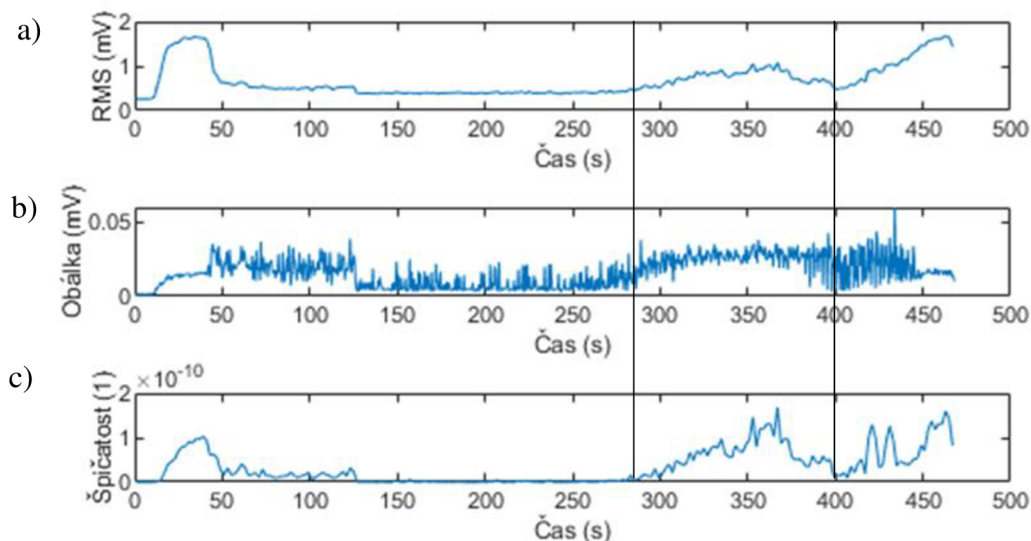
bezprostředně následuje. Protože tento jev není pozorovatelný na kontaktním senzoru AE umístěném mimo oblast kontaktu na ložisku a na součiniteli adheze se promítá pouze velmi omezeně nebo vůbec, lze vyvozovat, že se jedná o lokální děj, jenž se nepromítá do celé sestavy testovacího zařízení, v reálném případě tedy do zbytku nápravy. Z literatury [10], [12] plyne předpoklad, že v daném časovém úseku může docházet k náhlému uvolnění zoxidované povrchové vrstvy z kontaktu. Tyto oxidy zde mohly vznikat po aplikaci vody a zpočátku být chráněné právě vodní vrstvou. Po redukci této vrstvy pod kritickou mez pak může následovat jejich náhlé setření druhým kontaktním povrchem, přičemž v důsledku nízké přilnavosti k základnímu materiálu kola, respektive disku se tyto jevy nepromítají do celkového zaznamenávaného silového působení ani do úrovně hluku.



Graf 6-25 Přechodový jev před vyhladověním kontaktu: a) RMS AE; b) CoA

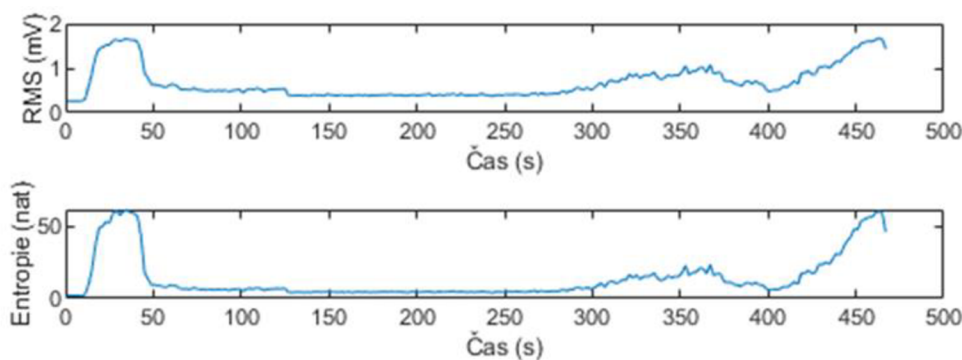
V zavodněném stavu po rozprostření vodní vrstvy je průběh RMS stabilní (Graf 6-26a), nicméně na obálce signálu (Graf 6-26b) lze pozorovat nahodilé výkyvy o nižší frekvenci, které vzhledem k jejich nízké amplitudě lze přisoudit šumu, vznikajícímu při provozu kola, ve vzduchu jako přenosovém médiu.

Při dalším zpracování získaných dat byly zejména u nízkých úhlů náběhu (5 mrad, 15 mrad) pozorovány vysoké hodnoty koeficientu špičatosti během přechodového děje předcházejícího fázi hladovění kontaktu, viz Graf 6-26c. Vysoká míra odezvy této statistické veličiny je z definice způsobena klesajícím rozptylem hodnot signálu, jak lze pozorovat i na jeho obálce. Přes pozorovaný postupný nárůst a opětovný pokles aktivity RMS AE je tedy tento děj poměrně stálý z hlediska lokálních výkyvů, což by v případě potvrzení hypotézy o uvolnění oxidační vrstvy mohlo s přihlédnutím k době trvání otáčky kola naznačovat její poměrně rovnoměrné rozložení po obvodu, stejně jako v této fázi stále ještě rovnoměrné rozložení ubývající vrstvy vody.



Graf 6-26 Přechodový jev před vyhladověním kontaktu: a) RMS AE; b) Koeficient špičatosti; c) Obálka signálu

Shannonova entropie dle očekávání zvýraznila rozdíly mezi suchým (mezným) a zavodněným stavem, při kterém nedochází nebo je významně redukován kontakt náhodně rozmístěných vrcholků drsnostního profilu povrchů součástí a kontakt je tedy podstatně stabilnější (méně stochastický), což vede právě k poklesu entropie, viz Graf 6-27. Kromě této redukce šumu v zavodněném stavu lze při srovnání s RMS pozorovat velmi podobný průběh se všemi výše popsány jevy, což vytváří potenciál pro využití tohoto druhu statistického signálu právě k účelům filtrace šumu a dalšího zvýraznění přechodu mezi suchým stavem a stavem s vodou a potenciálně i dalšími kontaminanty.



Graf 6-27 Redukce šumu: a) RMS AE; b) Shannonova entropie

Bezkontaktní měření AE vzhledem ke své vysoké citlivosti na okolní vlivy a specifickému umístění senzoru v blízkosti kontaktu pravděpodobně není perspektivní z hlediska online monitoringu reálného kontaktu, nicméně se jeví jako vhodné pro další laboratorní studie zabývající se přechodovými stavy, které se v něm odehrávají, přičemž některé z nich nejsou jinými metodami pozorovatelné.

7 ZÁVĚR

V práci byla vyvinuta metodika sledování kontaktu kola s kolejnici pomocí metody akustické emise na laboratorním dvoudiskovém zařízení s kolem v reálné velikosti a diskem simulujícím kolejnici. Zvolený přístup kombinuje výhody bezkontaktního senzoru, který není pro měření akustické emise běžně využíván a senzoru kontaktního, u něžž bylo navrženo optimální umístění pro sledování odezvy akustické emise na změnu provozních podmínek, a to na ložiskovém domku disku simulujícího kolejnici. Funkčnost vytvořeného přístupu byla experimentálně ověřena obsáhlou sadou experimentů zaměřujících se na odezvu na změnu rychlosti a úhlu náběhu kola vůči kolejnici a dále na možnosti sledování procesů odehrávajících se při vzniku a zániku vodní vrstvy ve sledovaném kontaktu.

Pro sledování základní odezvy na sledování rychlosti a úhlu náběhu se dle výsledků experimentů jeví jako vhodnější využití kontaktního senzoru, který byl méně ovlivněn okolními vlivy v podobě vysokofrekvenčního rušení, jež bylo detekováno zejména po spuštění elektromotoru. Zároveň bylo ověřeno, že tento senzor vykazuje i přes větší vzdálenost od kontaktu dostatečnou citlivost na změnu rychlosti a natočení disku vůči kolu, a to zejména při vyšších rychlostech a úhlech náběhu, kdy výsledky nebyly ovlivněny omezením experimentálního zařízení ani velmi nízkými hodnotami získaného signálu. Pozorované jevy byly nicméně v omezené kvalitě sledovány i na senzoru bezkontaktním.

V další fázi byla ověřena citlivost akustické emise na změnu režimu kontaktu po aplikaci vody. Na obou senzorech byl zaznamenán významný propad v důsledku omezení deformací po vzniku vodní vrstvy v kontaktu, detekováno bylo i následné hladovění a návrat do mezního režimu. Rozdíl v intenzitě signálu akustické emise byl mezi suchým a zavodněným stavem výrazně vyšší než u dalších sledovaných veličin, jako je laterální síla sloužící k výpočtu součinitele adheze. Díky tomu představuje metoda akustické emise perspektivní alternativu ke sledování změn adheze způsobených přítomností kontaminantů. Tomu napomáhá i fakt, že měření akustické emise kontaktním senzorem je konstrukčně výrazně jednodušší než měření působících sil pro výpočet součinitele adheze.

Na bezkontaktním senzoru byl navíc identifikován přechodový jev bezprostředně předcházející hladovění, který se nepromítá do zbytku testovacího zařízení. Je očekáváno, že tento stav může být způsoben uvolněním oxidační vrstvy, která v kontaktu vzniká. Tento jev je předmětem zájmu současného výzkumu, protože v určitých podmínkách může vést i k prudkému propadu adheze, a tedy potenciálně nebezpečným situacím, přičemž se předpokládá, že předchází právě fázi hladovění kontaktu. Možnosti jeho pozorování běžně používanými metodami jsou nicméně omezené. Z tohoto důvodu existuje vysoký potenciál měření akustické emise pomocí bezkontaktního senzoru pro účely dalšího sledování zmíněného jevu v laboratorních podmínkách. Tento přístup by pak mohl napomoci nejen jeho lepšímu porozumění, ale také otevřít možnosti k prediktivní aplikaci modifikátorů tření do kontaktu, a tedy ke zvýšení ekonomičnosti provozu.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Na základě práce vznikl odborný článek zabývající se možnostmi měření akustické emise na dvoudiskových zařízeních.

Název článku

Diagnostics of adhesion of the tram wheel using Acoustic emission method

Autoři

Martin Skoupý, Václav Navrátil, František Vlašic, Milan Klapka

Abstrakt

This study aims on the verification of the possibility of using the acoustic emission measurement for wheel-rail contact observation on a full-scale twin-disk test rig. The object of this work was to describe the response of acoustic emission signal on the operational parameters of the wheel, namely the circumferential velocity and angle of attack. After this, the experiments with the application of water were underwent. Acoustic emission proved to be suitable for observing the mechanism of water layer generation between the contact bodies and also for detecting the contact starvation. During these intervals, the ideal conditions for the generation of the squeal noise are expected. Using the contactless acoustic emission sensor, another transient event was observed directly preceding the contact starvation phase, which by its timing correlates with the expected oxide layer removal from the contact surfaces and subsequent generation of a viscous layer in the contact. Acoustic emission can therefore be suitable for further research of this phenomenon in laboratory conditions and possibly also for the early prediction of the contact starvation.

Klíčová slova

wheel-rail contact, acoustic emission, twin-disk, rail squeal, adhesion

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] SCRUBY, C. B. An introduction to acoustic emission. *Journal of Physics E: Scientific Instruments*. 1987, roč. 20, č. 8, s. 946–953 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 00223735.
- [2] BURTIN, Arnaud, Niels HOVIUS a Jens M. TUROWSKI. Seismic monitoring of torrential and fluvial processes. *Earth Surface Dynamics*. 2016, roč. 4, č. 2, s. 285–307 [vid. 1. květen 2023]. ISSN 2196632X.
- [3] MARKS, Ryan, Alastair CLARKE, Carol FEATHERSTON, Christophe PAGET a Rhys PULLIN. Lamb Wave Interaction with Adhesively Bonded Stiffeners and Disbonds Using 3D Vibrometry. *Applied Sciences 2016, Vol. 6, Page 12*. 2016, roč. 6, č. 1, s. 12 [vid. 1. květen 2023]. ISSN 2076-3417.
- [4] MOKHTARI, Noushin, Jonathan Gerald PELHAM, Sebastian NOWOISKY, José Luis BOTE-GARCIA a Clemens GÜHMANN. Friction and wear monitoring methods for journal bearings of geared turbofans based on acoustic emission signals and machine learning. *Lubricants*. 2020, roč. 8, č. 3 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 20754442.
- [5] THAKKAR, Nirav A, John A STEEL a Robert L REUBEN. A laboratory study of rail–wheel interaction monitoring using acoustic emission: Effect of rolling conditions with and without lateral rattling. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013, roč. 227, č. 2, s. 161–175 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 0954-4097.
- [6] OLDKNOW, Kevin, Donald T. EADIE a Richard STOCK. The influence of precipitation and friction control agents on forces at the wheel/rail interface in heavy haul railways. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2013, roč. 227, č. 1, s. 86–93 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 20413017.
- [7] LEWIS, R. a U. OLOFSSON. Wheel-Rail Interface Handbook. *Wheel-Rail Interface Handbook*. 2009, s. 1–842 [vid. 4. květen 2024].
- [8] KVARDA, Daniel. *Vliv složení modifikátorů tření na trakci v kontaktu kola a kolejnice*. Brno, 2017 [vid. 16. květen 2024]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/100717>
- [9] WANG, W. J., P. SHEN, J. H. SONG, J. GUO, Q. Y. LIU a X. S. JIN. Experimental study on adhesion behavior of wheel/rail under dry and water conditions. *Wear*. 2011, roč. 271, č. 9–10, s. 2699–2705 [vid. 12. březen 2024]. ISSN 0043-1648.

- [10] BUCKLEY-JOHNSTONE, L. E., G. TRUMMER, P. VOLTR, K. SIX a R. LEWIS. Full-scale testing of low adhesion effects with small amounts of water in the wheel/rail interface. *Tribology International*. 2020, roč. 141, s. 105907 [vid. 7. březen 2024]. ISSN 0301-679X.
- [11] WHITE, Ben, Reuben KEMPKA, Peter LAITY, Chris HOLLAND, Klaus SIX, Gerald TRUMMER, Luke BUCKLEY-JOHNSTONE a Roger LEWIS. Iron Oxide and Water Paste Rheology and Its Effect on Low Adhesion in the Wheel/Rail Interface. *Tribology Letters*. 2022, roč. 70, č. 1, s. 1–14 [vid. 7. březen 2024]. ISSN 15732711.
- [12] WHITE, Ben a Roger LEWIS. Simulation and understanding the wet-rail phenomenon using twin disc testing. *Tribology International*. 2019, roč. 136, s. 475–486 [vid. 7. březen 2024]. ISSN 0301-679X.
- [13] BUCKLEY-JOHNSTONE, L. E., G. TRUMMER, P. VOLTR, A. MEIERHOFER, K. SIX, D. I. FLETCHER a R. LEWIS. Assessing the impact of small amounts of water and iron oxides on adhesion in the wheel/rail interface using High Pressure Torsion testing. *Tribology International*. 2019, roč. 135, s. 55–64 [vid. 7. březen 2024]. ISSN 0301-679X.
- [14] SPIRYAGIN, Maksym, Kwan Soo LEE, Hong Hee YOO, Valentyn SPIRYAGIN a Yuriy VIVDENKO. Experimental and theoretical investigation of adhesion based on analysis of wheel-rail noise. *15th International Congress on Sound and Vibration 2008, ICSV 2008*. 2008, roč. 2, s. 942–949.
- [15] HASE, Alan, Hiroshi MISHINA a Masaki WADA. Fundamental study on early detection of seizure in journal bearing by using acoustic emission technique. *Wear*. 2016, roč. 346–347, s. 132–139 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 00431648.
- [16] RENHART, Philipp, Michael MAIER, Christopher STRABLEGG, Florian SUMMER, Florian GRÜN a Andreas EDER. Monitoring tribological events by acoustic emission measurements for bearing contacts. *Lubricants*. 2021, roč. 9, č. 11 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 20754442.
- [17] KÖNIG, F., J. MARHEINEKE, G. JACOBS, C. SOUS, Ming J. ZUO a Zhigang TIAN. Data-driven wear monitoring for sliding bearings using acoustic emission signals and long short-term memory neural networks. *Wear*. 2021, roč. 476 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 00431648.
- [18] MARTINS, J. A.C., J. T. ODEN a F. M.F. SIMOES. A study of static and kinetic friction. *International Journal of Engineering Science*. 1990, roč. 28, č. 1, s. 29–92 [vid. 13. květen 2024]. ISSN 0020-7225.

- [19] FERRER, C., F. SALAS, M. PASCUAL a J. OROZCO. Discrete acoustic emission waves during stick-slip friction between steel samples. *Tribology International*. 2010, roč. 43, č. 1–2, s. 1–6 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 0301679X.
- [20] LEAHY, M, D MBA, P COOPER, A MONTGOMERY a D OWEN. Experimental investigation into the capabilities of acoustic emission for the detection of shaft-to-seal rubbing in large power generation turbines: A case study. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part J: Journal of Engineering Tribology*. 2006, roč. 220, č. 7, s. 607–615 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 1350-6501.
- [21] BERGMANN, Philipp, Florian GRÜN, Florian SUMMER, István GÓDOR a Gabriel STADLER. Expansion of the metrological visualization capability by the implementation of acoustic emission analysis. *Advances in Tribology*. 2017, roč. 2017 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 16875923.
- [22] ULUS, Şaban a Selçuk ERKAYA. An experimental study on gear diagnosis by using acoustic emission technique. *International Journal of Acoustics and Vibrations*. 2016, roč. 21, č. 1, s. 103–111 [vid. 17. březen 2023]. ISSN 10275851.
- [23] GABRIEL, Tomáš. *Konstrukce zkušebního zařízení pro testování adheze a hluku v kontaktu kola a kolejnice*. Brno, 2020 [vid. 20. květen 2024]. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/124740>
- [24] MACKŮ, Ondřej. *Optimalizace ultrazvukového detektoru úniků pneumatického systému*. Brno, 2020 [vid. 2. květen 2024]. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124863>

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

10.1 Seznam zkratek

AE	akustická emise
EHD	elastohydrodynamický
FSI	Fakulta strojního inženýrství
norm.	normalizovaná veličina
RIV	rejstřík informací o výsledcích
RMS	kvadratický průměr (root mean square)
VUT	Vysoké učení technické v Brně

10.2 Seznam symbolů a veličin

γ_2	koeficient špičatosti
$A_{\theta A}$	úhel náběhu (angle of attack)
CoA	součinitel adheze (coefficient of adhesion)
E_{AE}	energie uvolněné akustické emise
F_L	laterální síla
F_N	zátěžná síla
H	Shannonova entropie
LA_{eq}	ekvivalentní hladina akustického tlaku
SPL	úroveň akustického tlaku (sound pressure level)
t	čas
v	rychlost
x	vstupní veličina pro normalizaci (RMS , E_{AE}) při běhu za sucha
x_{norm}	normalizované veličina
x_v	vstupní veličina pro normalizaci (RMS , E_{AE}) při aplikaci vody

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

11.1 Seznam obrázků

Obr. 2-1 PRISMA diagram vyhledávání a třídění zdrojů	15
Obr. 2-2 Vlevo Rayleigho vlnění [2], vpravo Lambeho vlnění symetrické (nahore) a asymetrické (dole) [3].....	16
Obr. 2-3 Výběr některých parametrů vyhodnocovaných u akustické emise [1].....	16
Obr. 2-4 Rozklad sil působících v kontaktu železniční nápravy s kolejnicí při průjezdu zatáčkou [6].....	17
Obr. 2-5 Trakční křivka [8]	17
Obr. 2-6 Mechanismus vzniku kvílivého hluku v důsledku nestability součinitele adheze – upraveno [7]	18
Obr. 2-7 Součinitel adheze při aplikaci vody předem a během testů [9]	18
Obr. 2-8 Zastoupení hodnot součinitele adheze při padesáti cyklech v suchých podmínkách [6]	19
Obr. 2-9 Experimentální zařízení využitě Thakkarem a kol. [5].....	20
Obr. 2-10 Závislost uvolněné energie (RMS) na zatížení pro různé rychlosti [5]	21
Obr. 2-11 Závislost uvolněné energie (RMS) na rychlosti pro zatížení: a) 4 kg; b) 6 kg [5]	21
Obr. 2-12 a) Mezný režim; b) Kapalinový režim.....	22
Obr. 2-13 Možnosti využití různých parametrů signálu pro určení režimu mazání [4].....	22
Obr. 2-14 Součinitel adheze odvozený ze signálu akustické emise [16].....	23
Obr. 2-15 Stick-slip efekt [18] – upraveno	23
Obr. 2-16 a) Klidový stav; b) Počáteční nárůst aktivity akustické emise před uvedením do pohybu [19].....	24
Obr. 2-17 a) Signál akustické emise po uvedení do pohybu; b) vlna o menší amplitudě předcházející tomuto stavu [19]	24
Obr. 2-18 Uspořádání při experimentech s bezkontaktním senzorem dle Uluse a Erkayi [22]	25
Obr. 2-19 Použité dvoudiskové laboratorní zařízení [23]	25
Obr. 2-20 Stávající měřicí řetězec	26

Obr. 4-1 Schéma vstupů a výstupů – black box	33
Obr. 4-2 Základní schéma metodiky – glass box.....	33
Obr. 4-3 Bezkontaktní senzor akustické emise s nástavcem	34
Obr. 4-4 Kontaktní senzor akustické emise MDK13	34
Obr. 4-3 Přenos signálu při měření kontaktním senzorem.....	35
Obr. 4-4 Zvažovaná umístění kontaktního senzoru: a) ložisko disku; b) ložisko kola.....	36
Obr. 4-5 Přenos signálu při měření bezkontaktním senzorem	36
Obr. 4-6 Umístění bezkontaktního senzoru	37
Obr. 5-1 RMS signálu AE v programu ZDaemon (test s aplikací vody)	40
Obr. 5-2 Trvání jedné otáčky kola při různých rychlostech	41
Obr. 5-3 Oblast zvýšeného koeficientu špičatosti (krátce po aplikaci vody a při hladovění kontaktu).....	41
Obr. 5-4 Oblast velmi nízké Shannonovy entropie	42
Obr. 6-1 Měřicí řetězec akustické emise (pohled z boku a zepředu).....	44
Obr. 6-2 Schéma postupu ověřovacích experimentů.....	45
Obr. 6-3 Průběh experimentů při testech odezvy na rychlost a úhel náběhu	46
Obr. 6-4 Průběh experimentů při testech odezvy na úbytek vody z kontaktu.....	46

11.2 Seznam grafů

Graf 4-1 Odezva na kalibrační pulz.....	37
Graf 4-2 a) Odezva kontaktního senzoru; b) Odezva bezkontaktního senzoru	38
Graf 4-3 Spektrogram signálu AE: a) Nezatížený stav se spuštěným motorem; b) Test úbytku vody z kontaktu	39
Graf 6-1 Závislost RMS AE na rychlosti při nulovém úhlu náběhu.....	47
Graf 6-2 Závislost uvolněné energie AE za jednu otáčku na rychlosti při nulovém úhlu náběhu	48
Graf 6-3 Závislost součinitel adheze na rychlosti při nulovém úhlu náběhu	48
Graf 6-4 Závislost RMS AE za jednu otáčku na rychlosti při úhlu náběhu 10 mrad	49
Graf 6-5 Závislost součinitele adheze na rychlosti při úhlu náběhu 10 mrad	49
Graf 6-6 Závislost RMS AE na rychlosti při úhlu náběhu 20 mrad	50

Graf 6-7 Závislost součinitele adheze na rychlosti při úhlu náběhu 20 mrad	50
Graf 6-8 Závislost RMS AE na rychlosti při rychlosti 2 m/s.....	51
Graf 6-9 Odezva AE při rychlosti 4 m/s: a) RMS; b) Energie uvolněná za jednu otáčku kola	52
Graf 6-10 Závislost součinitele adheze na úhlu náběhu při rychlosti 4 m/s.....	52
Graf 6-11 Odezva akustické emise před a po aplikaci vody (kontaktní senzor).....	53
Graf 6-12 Průběh RMS na kontaktním senzoru AE při aplikaci vody pro $AoA = 15$ mrad	53
Graf 6-13 a) Průběh adheze; b) Průběh hluku v decibelech pro $AoA = 15$ mrad	54
Graf 6-14 Průběh RMS na bezkontaktním senzoru AE při aplikaci vody pro $AoA = 15$ mrad	54
Graf 6-15 a) RMS AE; b) Obálka signálu AE.....	55
Graf 6-16 Detail obálky signálu AE: a) Oblast po aplikaci vody (1); b) Oblast hladovění (3)	55
Graf 6-17 Detail obálky signálu v zavodněném stavu po ustálení	56
Graf 6-18 Detail obálky signálu AE během přechodného jevu nastávajícího před hladovění kontaktu	56
Graf 6-19 Statistické zpracování signálu z bezkontaktního senzoru pro úhel náběhu 15 mrad: a) nezpracovaný signál AE; b) RMS AE; c) Koeficient špičatosti; d) Shannonova entropie	57
Graf 6-20 Nestabilita hlukových projevů: a) $AoA = 5$ mrad; b) $AoA = 20$ mrad	58
Graf 6-21 a) RMS AE (kontaktní senzor); b) Energie AE na otáčku (kontaktní senzor)...	58
Graf 6-22 Energie AE na otáčku: a) Sledovaný twin-disk (20 mrad); b) zmenšené zařízení (Thakkar, 2013) [5]	59
Graf 6-23 Průběh RMS na kontaktním senzoru AE při aplikaci vody pro $AoA = 15$ mrad	60
Graf 6-24 a) Pokles RMS AE po aplikaci vody; b) Pokles CoA po aplikaci vody	61
Graf 6-25 Přechodový jev před vyhladověním kontaktu: a) RMS AE; b) CoA	62
Graf 6-26 Přechodový jev před vyhladověním kontaktu: a) RMS AE; b) Koeficient špičatosti; c) Obálka signálu.....	63
Graf 6-27 Redukce šumu: a) RMS AE; b) Shannonova entropie.....	63

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 3-1 Atributy, cíle (C), funkce (F), omezení (O) a prostředky (P) vyvíjené metodiky	30
Tab. 6-1 Plán experimentů	47

13 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha A	Blokové schéma metodiky
Příloha B	Experimentální zařízení a senzory – fotografie
Příloha C	Skript pro vyhodnocení signálu
Příloha D	Testy s aplikací vody

PŘÍLOHA A – BLOKOVÉ SCHÉMA METODIKY

