



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# ANALÝZA VLIVU SLOŽENÍ MODIFIKÁTORŮ TŘENÍ NA ADHEZI A HLUK V KOLEJOVÉ DOPRAVĚ

ANALYSIS OF THE EFFECT OF FRICTION MODIFIERS COMPOSITION ON ADHESION AND NOISE IN RAIL  
TRANSPORT

## BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Suchomel

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.

BRNO 2018



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování  
Student: **Ondřej Suchomel**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.**  
Akademický rok: 2017/18

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 bakalářské práce:

## **Analýza vlivu složení modifikátorů tření na adhezi a hluk v kolejové dopravě**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Jedním z nejvýznamnějších negativních vlivů kolejové dopravy na životní prostředí je hluk, který představuje problém především v urbanistických celcích. Jedním z nových přístupů k řešení problému je použití tzv. modifikátorů tření, které se aplikují na hlavu kolejnice za účelem snížení hluku a opotřebení kontaktní dvojice. Tyto modifikátory se liší chemickým složením a je proto třeba analyzovat, jak složení modifikátoru ovlivňuje kvalitu adheze a hladinu hluku v kontaktu kola a kolejnice.

Typ práce: výzkumná

**Cíle bakalářské práce:**

Hlavním cílem práce je objasnit vliv složení vybraných modifikátorů tření na hladinu hluku a míru adheze v kontaktu kola a kolejnice s využitím dvoudiskového testovacího zařízení.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- analyzovat složení vybraných modifikátorů tření,
- vybrat a připravit upravené kompozice,
- stanovit optimální aplikované množství do kontaktu,
- realizovat experimenty a provést analýzu měřených dat,
- srovnat efektivitu testovaných modifikátorů.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2018.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2018.pdf)

**Seznam doporučené literatury:**

KNÁPEK, J. Experimentální studium modifikátorů tření v kolejové dopravě. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radovan Galas.

HARMON, M. a LEWIS, R. Review of top of rail friction modifier tribology. Tribology - Materials, Surfaces. 2016, 10(3), 150-162. DOI: 10.1080/17515831.2016.1216265. ISSN 1751-5831.

STOCK, R., et al. Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application. Wear. 2016, 366-367, 225-232. DOI: 10.1016/j.wear.2016.05.028. ISSN 00431648.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2017/18

V Brně, dne

L. S.

---

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## ABSTRAKT

Cílem této bakalářské práce je experimentální studium vlivu složení modifikátoru tření na vodní bázi na adhezi a hladinu akustického tlaku. Experimenty jsou realizovány na dvoudiskovém zařízení. Nejprve jsou provedeny úvodní experimenty pro stanovení podmínek dalších experimentů. Následují experimenty jednotlivých složek a poté jsou testována různá složení modifikátoru tření. Z výsledků je patrné, že významný vliv na snížení součinitele adheze a hladiny akustického tlaku má tuhé mazivo.

## KLÍČOVÁ SLOVA

součinitel adheze, hladina akustického tlaku, kontakt kola a kolejnice, modifikátor tření

## ABSTRACT

The aim of this bachelor thesis is experimental study of influence of composition of water based friction modifier on adhesion and sound pressure level. Experiments are carried out on twin-disk device. Introductory experiments are conducted to determine the conditions for further experiments. The experiments of the individual components follow, and the various friction modifier compositions are tested. From the results, it is obvious that a significant influence on the reduction of adhesion coefficient and sound pressure level has solid lubricant.

## KEYWORDS

adhesion coefficient, sound pressure level, wheel-rail contact, friction modifier



## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SUCHOMEL, Ondřej. *Analýza vlivu složení modifikátorů tření na adhezi a hluk v kolejové dopravě*. Brno, 2018, 61 s. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Milan Klapka, Ph.D.





## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval svým rodičům a své přítelkyni za podporu během celého studia a také svému vedoucímu práce doc. Ing. Milanu Klapkovi PhD. za pomoc a cenné rady při tvorbě této bakalářské práce.

## PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Podpis autora





# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b>	<b>14</b>
<b>2</b>	<b>PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>15</b>
2.1	Kontakt kola a kolejnice	15
2.1.1	Adheze	16
2.1.2	Skluz	16
2.1.3	Trakční křivka	17
2.2	Modifikátory tření	18
2.2.1	Kategorie modifikátorů tření	19
2.2.2	Složení modifikátorů tření	20
2.2.3	Experimenty s modifikátory tření	22
2.3	Zařízení pro experimentální měření	24
2.3.1	Mini traction machine	25
2.3.2	Dvoudiskové zařízení	25
2.3.3	Zařízení v životní velikosti (full scale)	26
2.4	Zvuk	26
2.4.1	Akustický tlak	27
2.4.2	Hluk	29
2.4.3	Přístroje pro měření hluku	29
2.4.4	Experimenty se snížením hladiny akustického tlaku	30
<b>3</b>	<b>ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE</b>	<b>32</b>
3.1	Shrnutí poznatků plynoucích z rešerše	32
3.2	Cíl práce	33
<b>4</b>	<b>MATERIÁL A METODY</b>	<b>34</b>
4.1	Experimentální zařízení	34
4.1.1	Parametry experimentálního zařízení	35
4.2	Měření hlukové emise	36
4.3	Modifikátory tření	37
4.3.1	Materiály	37
4.3.2	Příprava vzorku	37
4.3.3	Vybrané kompozice	38
4.4	Průběh experimentu	39

4.4.1	Mokrý film	39
4.4.2	Suchý film	39
<b>5</b>	<b>VÝSLEDKY</b>	<b>40</b>
5.1	Trakční křivky	40
5.2	Test množství	41
5.3	Dvousložkové kompozice	42
5.3.1	Součinitel adheze	42
5.3.2	Hladina akustického tlaku	43
5.4	Třísložkové kompozice	44
5.4.1	Součinitel adheze	44
5.4.2	Hladina akustického tlaku	45
5.5	Čtyřsložkové kompozice	46
5.5.1	Součinitel adheze	46
5.5.2	Hodnota akustického tlaku	47
5.6	Korelace součinitele adheze a hladiny akustického tlaku	48
5.7	Opakovatelnost	49
<b>6</b>	<b>DISKUZE</b>	<b>51</b>
6.1	Úvodní experimenty	51
6.2	Experimenty s kompozicemi	51
<b>7</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>54</b>
<b>9</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN</b>	<b>56</b>
9.1	Veličiny	56
9.2	Zkratky	56
<b>10</b>	<b>SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ</b>	<b>58</b>
<b>11</b>	<b>SEZNAM TABULEK</b>	<b>60</b>
<b>12</b>	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>61</b>

# 1 ÚVOD

Kolejová doprava začala vznikat již na začátku 18. století. Zpočátku se využívala pro přepravu nákladů a později i jako prostředek hromadné přepravy osob. Vzhledem k tomu, že se jedná o efektivní způsob přepravy, byly v průběhu času kladeny stále vyšší nároky na její modernizaci a rozvoj. Původní maximální rychlost a nosnost nápravy se několika násobně zvýšily a kolejová doprava si stále drží svou významnou pozici na poli osobní i nákladní dopravy.

Bohužel vše má svá úskalí a jedním z velkých problémů kolejové dopravy je hluková emise, která při provozu vzniká. Největší problém představuje v obydlených oblastech, kde je žádoucí snížit hodnotu hluku na co nejnižší úroveň. V praxi je nejčastějším projevem snahy o snížení hluku v obydlených oblastech tvorba protihlukových stěn. Protihlukové stěny však negativně ovlivňují atraktivitu prostředí a v některých částech se těžko budují. V poslední době je věnována pozornost především kontaktu kola a kolejnice a s ním spojenými modifikátory tření, které získávají stále více pozornosti.

Modifikátory tření jsou vhodnými prostředky pro řízení adheze a tím i regulace hluku. Nejvýznamnějším faktorem ovlivňujícím hladinu zvuku je konkrétní složení modifikátoru tření a je třeba tuto závislost detailně zkoumat, abychom byli schopni bezpečně a efektivně řídit adhezi a hluk a tím zvýšit atraktivitu dopravních prostředků kolejové dopravy.

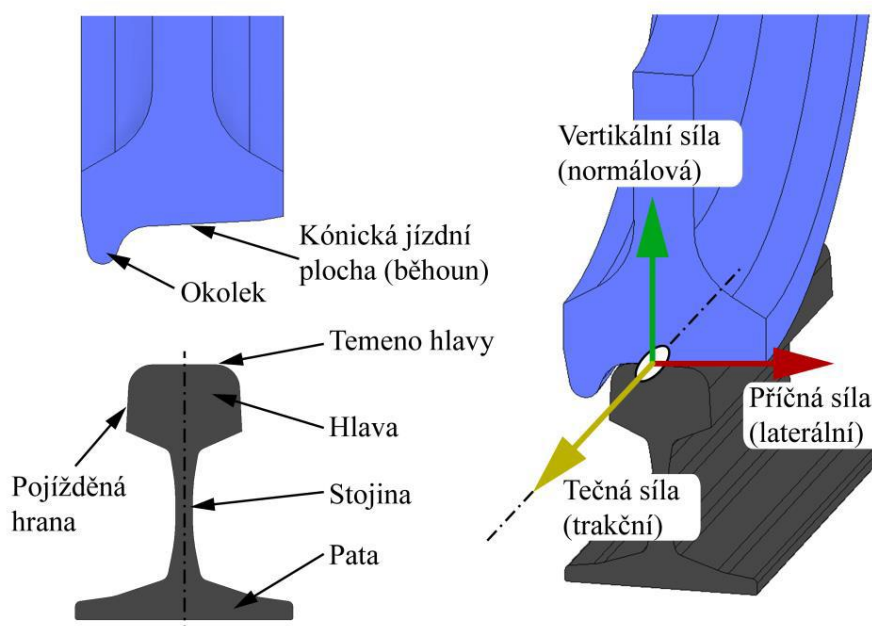
Bakalářská práce se zabývá objasněním závislosti velikosti hluku a adheze na složení modifikátoru tření s pomocí experimentálního zařízení simulujícího kontakt kola a kolejnice.

## 2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 2.1 Kontakt kola a kolejnice

Kontakt kola a kolejnice představuje komplexní případ kontaktu dvou těles, který se liší nejen pro jednotlivá vozidla kolejové dopravy, ale je specifický pro každé kolo zvlášť. Neexistuje mnoho analogií s podobnými součástmi, což zhoršuje využití zkušeností z jiných oblastí. Snad nejbližší jsou valivá kuličková ložiska a ozubená kola, ovšem tyto součásti jsou většinou uzavřené systémy s přesně definovanými a neměnnými podmínkami. [1]

Jako kontaktní plochu uvažujeme pro zjednodušení elipsu. Hlavní poloosu elipsy orientujeme ve směru jízdy. Kontaktní plocha má v průměru velikost  $1 \text{ cm}^2$ , ale vlivem opotřebení se mění. [1] Pro určení její velikosti se většinou používá Hertzova teorie. Kontaktní plocha je tvořena oblastí lpění a oblastí skluzu.



Obr. 2-1 Názvosloví kola (modrá) a kolejnice (šedá) [2]

V místě kontaktu mezi kónickou jízdň plochou kola a temenem hlavy kolejnice, je přenášena síla příčná, tečná a vertikální (obr. 2-1). Kontakt ovlivňují jak okolní vlivy jako vlhkost, kontaminace a teplota okolí, tak i provozní podmínky jako rychlost, skluz, kvalita povrchu těles v místě kontaktu nebo kontaktní tlak. Přenos trakčních sil z kola na kolejnici zajišťuje oblast skluzu, při vzájemném posuvu povrchů. Trakční síla neboli adheze hraje zásadní roli v kontaktu kola a kolejnice. [3]

### 2.1.1 Adheze

Ke vzniku adheze dochází, když je obvodová rychlost kola jiná než rychlost pohybu kola. Rozdíl mezi obvodovou rychlostí a rychlostí pohybu kola je charakteristický pro rozjezd a brzdění. Pro optimální bezpečnost a efektivnost se adheze musí udržovat v ideálním rozmezí.

Míra adheze je vyjádřena pomocí tzv. součinitele adheze. Součinitel adheze je definován jako podíl třecí síly a normálové síly (2-1). Jedná se tedy o analogii Coulombova tření [3].

$$\mu = \sqrt{\mu_x^2 + \mu_y^2} = \sqrt{\left(\frac{F_{tx}}{F_n}\right)^2 + \left(\frac{F_{ty}}{F_n}\right)^2} \quad (2-1)$$

kde:

$\mu_x, \mu_y$	-	- součinitel adheze v ose x resp. v ose y
$F_{tx}, F_{ty}$	N	- třecí síla v ose x, resp. v ose y
$F_n$	N	- normálová síla v kontaktu

### 2.1.2 Skluz

Dalším důležitým parametrem v kolejové dopravě je skluz. Skluz definujeme jako poměr rozdílů rychlostí povrchů a rychlosti kola (2-2). [2]

$$\xi = \frac{\omega \cdot r - v}{\frac{1}{2}(\omega \cdot r + v)} \quad (2-2)$$

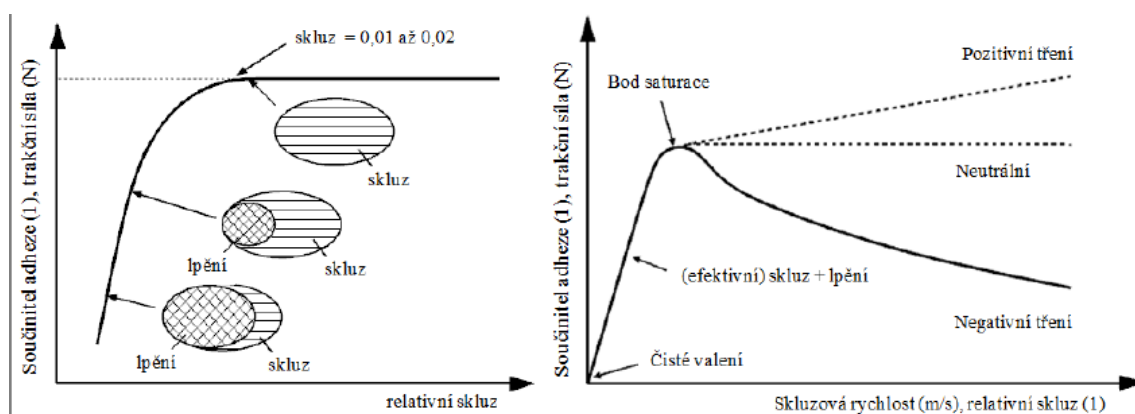
kde:

$\xi$	-	- skluz
$\omega$	$rad \cdot s^{-1}$	- úhlová rychlost
$r$	$m$	- poloměr kola
$v$	$m \cdot s^{-1}$	- rychlost kola



### 2.1.3 Trakční křivka

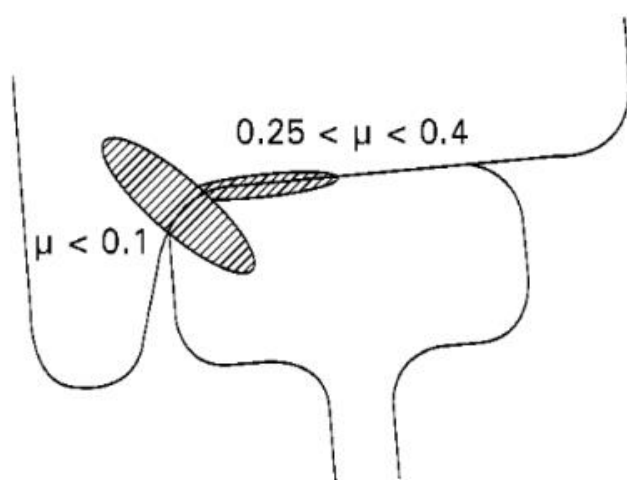
Závislost součinitele adheze na skluzu popisuje trakční křivka. V případě čistého valení nejsou přenášeny tečné síly a kontakt je tvořen pouze oblastí lpění. V další tzv. efektivní části křivky dochází k projevům lpění i skluzu, kde oblast lpění vzniká na náběžné straně a oblast efektivního skluzu vzniká od výstupního okraje. Oblast lpění je tvořena mikrosvary a pomocí oblasti skluzu jsou přenášeny trakční síly. Nejprve je trend lineární a poté přechází do útlumu. Pokud celou kontaktní oblast tvoří pouze skluz dostáváme se k tzv. bodu saturace. Abychom docílili co nejideálnějšího snížení hluku a míry opotřebení kolejí, používáme modifikátory tření, které vykazují pozitivní sklon křivky (pozitivní tření). [2][3]



Obr. 2-2 Trakční křivka [3]

## 2.2 Modifikátory tření

Řízení tření obsahuje různé přístupy k modifikaci tření mezi kolem a kolejnicí. Tyto přístupy jsou široce používány po celém světě ve snaze dosáhnout lepší efektivity transportu, bezpečnosti, redukci hluku a udržení přijatelných nákladů. Modifikátory tření jsou uměle vytvořené směsi, které se aplikují na temeno hlavy kolejnice nebo přímo do kontaktu. Z toho vyplývá i umístění aplikační jednotky na koleji nebo přímo na nápravě kolejového vozidla. Existují dvě důležité kontaktní oblasti mezi kolem a kolejnicí, na která je třeba se zaměřit v případě řízení tření pomocí modifikátoru tření (obr. 2-3). První oblast je mezi okolkem a pojížděnou hranou kolejnice, zde se snažíme o dosažení velmi nízkého koeficientu tření až



Obr. 2-3 Kontaktní plochy vhodné pro nanášení modifikátoru tření [1]

pod hodnotu menší než 0,1. Druhá oblast se nachází mezi kónickou jízdnicí plochou kola a temenem hlavy kolejnice. V tomto místě se přenáší trakční síly a je vhodné udržovat součinitel adheze optimálně v rozmezí 0,2-0,4, aby došlo ke snížení opotřebení a hluku a zároveň nedošlo ke ztrátě přenosu trakčních sil. V případě kontaminace kontaktu například listím, které vytváří mezivrstvu a snižuje koeficient adheze pod spodní hranici 0,2, je třeba okamžité obnovení koeficientu adheze a přenosu trakčních sil. Obnovení vlastností dosahujeme nejčastěji částicemi písku, které mají dobrý vliv na nárůst koeficientu adheze. [2,4]

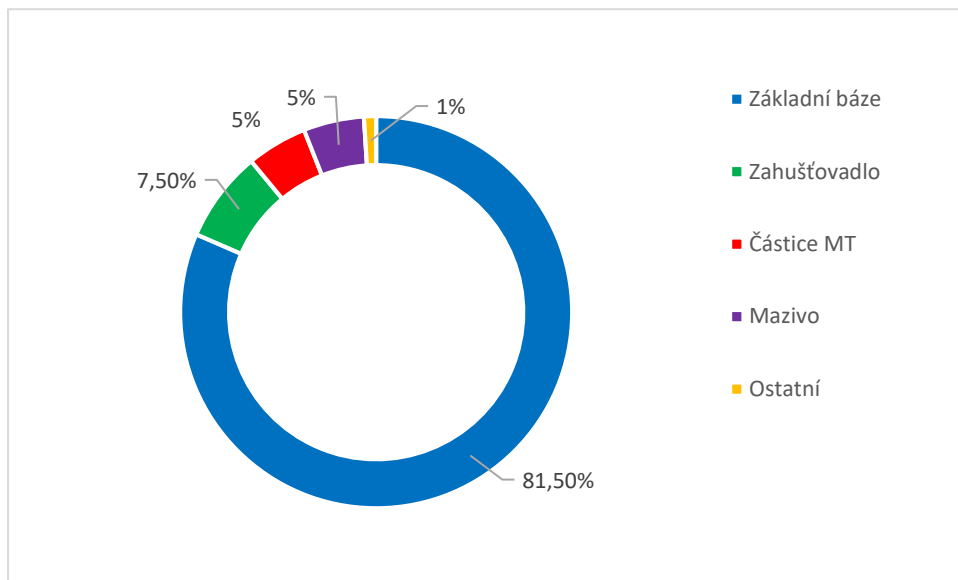
## 2.2.1 Kategorie modifikátorů tření

Vzhledem k velikosti koeficientu tření/adheze rozlišujeme tři kategorie modifikátorů tření [4].

- a) **Modifikátory tření pro nízký koeficient tření** – typickými reprezentanty jsou tuky a olejová maziva, které se používají pro mazání okolku. Tyto směsi vytváří koeficient adheze nižší než 0,1. Tím se sníží opotřebení a hluk. Aplikace je realizována systémy umístěnými na kolejovém vozidle a olejové mazivo nebo tuk se nanáší do kontaktu okolku s pojížděnou hranou kolejniče. V angličtině těmto modifikátorům říkáme Low coefficient friction modifiers (LCF).
- b) **Modifikátory tření s vysoce pozitivní třecí charakteristikou** – tyto TOR produkty (top-of-rail) udržují koeficient adheze na průměrné úrovni, která je obvykle v rozmezí 0,15 až 0,4. Modifikátory tření se spodní hranicí koeficientu adheze 0,15-0,25 se používají v urbanistických oblastech, jelikož dokáží dobře redukovat hluk. Horní hranice 0,25-0,4 se využívá v přepravě těžkých nákladů. [2] Tyto modifikátory tření dokáží udržet pozitivní trend trakční křivky. Z tohoto důvodu je směs většinou používána do kontaktu běhounu kola a temena hlavy kolejniče. Z anglického High positive friction modifiers (HPF).
- c) **Zesilovače tření** – též Very high positive friction modifiers (VHPF). Typickým reprezentantem této skupiny jsou částice písku, které zvyšují adhezi. Speciálně se používají během rozjezdu a brzdění v nepříznivých podmínkách (při kontaminaci kontaktu cizími třecími vrstvami). Aplikací písku můžeme dosáhnout hodnot koeficientu tření vyšších jak 0,4. Částice písku mohou být aplikovány na rovných i zakřivených úsecích trati.

## 2.2.2 Složení modifikátorů tření

Modifikátory tření se mohou skládat z mnoha složek, ale za nejdůležitější považujeme základní bázi, zahušťovadlo, částice modifikátoru tření a mazivo. Vlastnosti modifikátorů tření jsou závislé hlavně na hmotnostním zastoupení a typu jednotlivých složek. Tyto složky jsou popsány dále.



Obr. 2-4 Příklad složení modifikátoru tření v hm%

### **Základní báze**

Základní bázi vytváří voda, olej nebo jejich kombinace. Modifikátorům, jejichž základní bázi tvoří voda i olej, říkáme hybridní. Základní báze udržuje všechny složky pohromadě a usnadňuje aplikaci. U modifikátorů na vodní bázi se základní báze po aplikaci, v čase odpovídajícím aplikovanému množství, odpaří. Po odpaření vody se již modifikátor dále neroznáší, což omezuje jeho dosah. Naopak olejové modifikátory se roznáší na velkou vzdálenost. Základní báze tvoří většinou 40 až 95 hm. %.

### **Zahušťovadlo**

Zahušťovadlo zamezuje sedimentaci a vytváří homogenní rozložení látek ve směsi. Díky němu modifikátor lépe přilne ke kolejnici nebo kolu. Je to hydrofilní přísada, která díky absorpci vody způsobí nabobtnání kompozice a řídí její viskozitu. Nejčastěji tvoří 1 až 10 hm. %. Nejběžnějšími zahušťovadly jsou bentonit, kasein nebo například škroby.

## **Částice modifikátoru tření**

Nejdůležitější vlastností částic modifikátoru tření je jejich schopnost dosažení pozitivní třecí charakteristiky. Zajišťují také přenos trakčních sil. Částice modifikátoru tření mají práškovou formu. Jejich ideální velikost pro HPF modifikátory se pohybuje v rozmezí 1 až 2  $\mu\text{m}$ . U VHPF modifikátorů můžeme zaznamenat velikost až 10  $\mu\text{m}$ . Mezi typické zástupce patří například oxid hlinitý, mastek nebo oxid zinečnatý.

## **Mazivo**

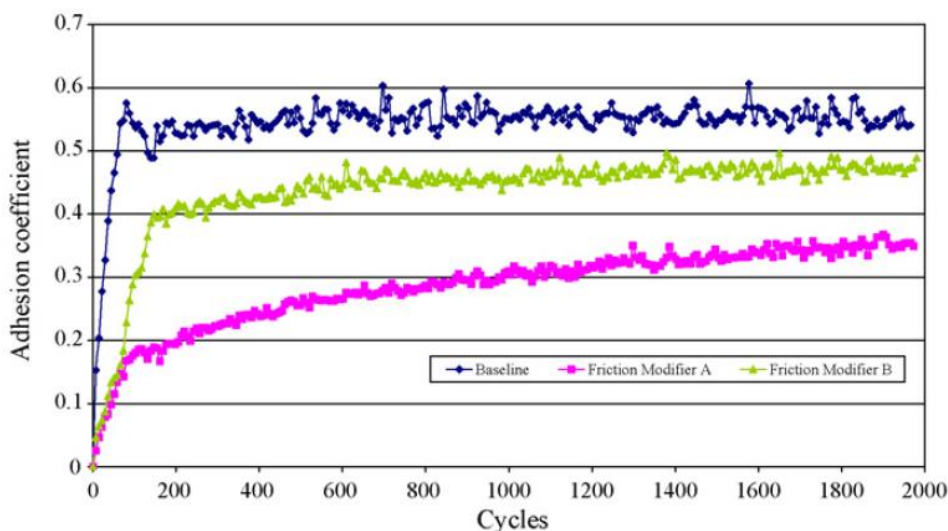
Mazivo způsobuje výrazný pokles součinitele tření, snižuje opotřebení kontaktních ploch a vytváří na povrchu tenký film. Nejčastějšími pevnými práškovými mazivy jsou disulfid molybdenu a grafit.

## **Ostatní**

Další přísady obsažené v modifikátorech tření jsou již spojeny s určitými konkrétními požadavky, které vytváří například okolní prostředí místa kontaktu. Například přípravky pro snížení teploty tuhnutí, antioxidanty, antibakteriální činidla, činidla snižující povrchové napětí, přísady pro zlepšení reologických vlastností nebo zvýšení životnosti a zabránění stárnutí modifikátoru.

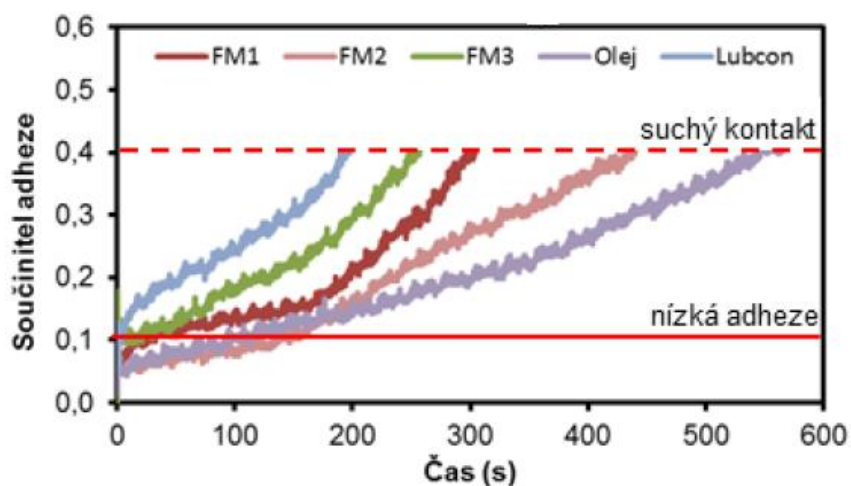
### 2.2.3 Experimenty s modifikátory tření

Arias-Cuevas a kol. [5] prováděli testy na dvoudiskovém zařízení. Používali dva modifikátory tření FMA a FMB. FMA obsahoval několik typů pevných komponent, které měli různé fyzikální a tribologické vlastnosti, díky tomu finální produkt vykazoval různou funkčnost jako zlepšení tření a dobrý přenos filmu mezi kolem a kolejnicí. Dvě skupiny velikostí částic byly dominantní, konkrétně malé částice o velikosti okolo 10  $\mu\text{m}$  obklopené většími 100  $\mu\text{m}$  částicemi vytvářejícími podporu. FMB je směs složená z anorganického zahušťovadla, stabilizátoru, vody, pískových zrn a částic nerezové oceli. Testy probíhaly za sucha a při přidání vody. Dokud nebyly aplikovány modifikátory tření byla adheze nejvyšší (0,30–0,60). FMA vykazoval větší pokles adheze, v průběhu experimentů za sucha 0,15–0,35. Po aplikaci vody do kontaktu došlo k poklesu adheze na 30-60 % původní hodnoty. Nejmenší naměřená hodnota adheze pro FMA byla 0,07. Tato hodnota je již příliš nízká a vzniká riziko ztráty trakčních sil. Testy ukazují, že na velikost adheze má velký vliv složení modifikátoru tření.



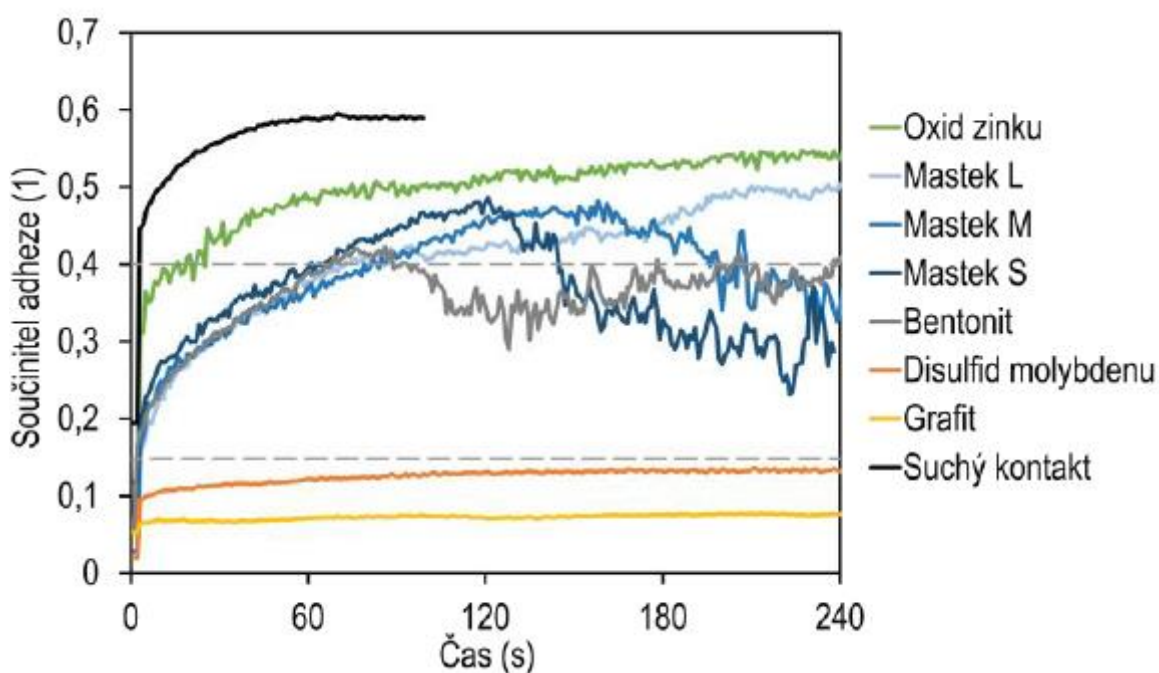
Obr. 2-5 Hodnoty koeficientu adheze za suchých podmínek při 1% skluzu [5]

Na jiném dvoudiskovém zařízení prováděl experimenty Knápek [13]. Ve svých experimentech používal výhradně komerční modifikátory. Zejména Sintono Terra HLK od společnosti Lubcon, který je tvořen olejovou bází, a pro porovnání dále dva další olejové modifikátory pod označením FM1, FM2 a jeden vodní FM3. Provedl experimenty pro srovnání vlivu jednotlivých modifikátorů na součinitel adheze (Obr. 2-6), za kontaktního tlaku 0,8 GPa, 8 % skluzu, rychlosti 1  $\text{ms}^{-1}$ , úhlu náběhu  $0^\circ$  a aplikované množství modifikátoru bylo 2  $\mu\text{l}$ .



Obr. 2-6 Vliv modifikátorů tření na součinitel adheze [13]

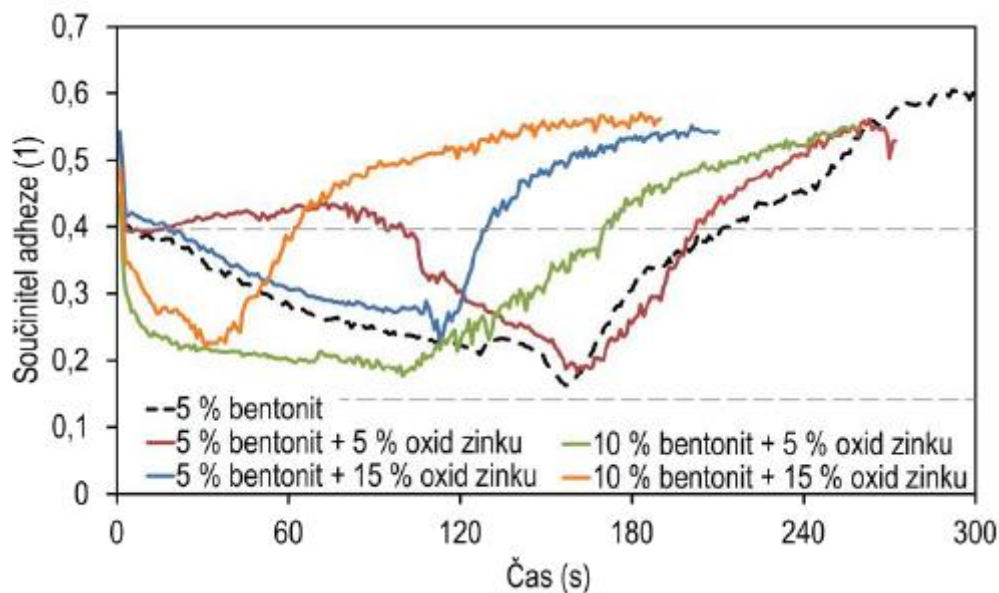
Můžeme pozorovat, že každý modifikátor má jinou schopnost mazání, přičemž nejdéle je kontakt ovlivněn samotným olejem, který byl v experimentu také použit, ale díky poklesu počáteční hodnoty adheze až pod hodnotu nízké adheze není vhodný pro řízení adheze. Vliv složení modifikátorů tření na adhezi a opotřebení kontaktu dvou těles studoval také Kvarda [2]. Experimenty prováděl na zařízení Mini traction machine v konfiguraci



Obr. 2-7 Adhezí křivky samostatných komponent [2]

ball-on-disk, která vytváří bodový kontakt. Ve svých experimentech používal modifikátory tření, které si sám připravoval. Kompozice se skládaly ze samostatných komponent a jejich kombinací v různých hmotnostních poměrech. Jako základní báze byla vždy použita voda a

jako zahušťovadlo bentonit. Částice pro modifikaci tření byly mastek (velikost částic S, M a L) a oxid zinku a byla použita pevná maziva Ekolube Molyka RF (difulsid molybdenu) a vločkový grafit. Pro podmínky experimentu byl vymezen kontaktní tlak 750 MPa, rychlost  $0,3 \text{ ms}^{-1}$  a skluz 5 %. V experimentech se samostatnými komponentami (obr. 2-7) lze pozorovat, že nejnižšího součinitele adheze bylo dosaženo pro pevná maziva (grafit), zatímco nejméně adhezi ovlivnili částice oxidu zinku. Na testech s různým množstvím bentonitu a oxidu zinku (Obr. 2-8), kdy bylo aplikováno 50  $\mu\text{l}$  kompozice jako mokrý film, můžeme vidět, že nejstabilnější průběh má kompozice 10 % bentonit + 5 % oxid zinku.



Obr. 2-8 Závislost součinitele adheze na čase pro kompozici voda, bentonit a oxid zinku [2]

## 2.3 Zařízení pro experimentální měření

Experimentální měření může probíhat buď přímo v terénu na trati, kde jsou získávána reálná data nebo v laboratorních podmínkách. Pro experimentální měření v laboratorních podmínkách využíváme několik typů zařízení. První skupina jsou zařízení pro obecné studium kontaktu, patří sem např. mini traction machine. Do druhé skupiny řadíme zařízení přímo určená pro zkoumání kontaktu kola a kolejnice, jsou to dvoudisková zařízení tzv. twin disk, která pracují ve zmenšeném měřítku a zařízení v reálné velikosti tzv. full scale.



### 2.3.1 Mini traction machine

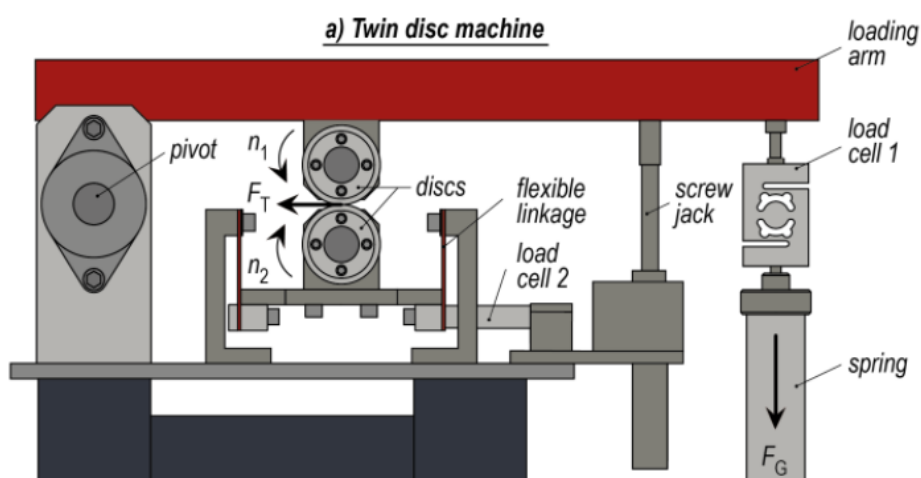
Zařízení se používá ke studiu valivě-skluzového kontaktu dvou těles. Velice dobře u něj lze kontrolovat podmínky experimentu jako skluzová rychlost, relativní skluz a zatížení. Aparatura vytváří bodový kontakt a můžeme studovat třecí vrstvu a vliv kontaminantů a modifikátorů tření na adhezi.



Obr. 2-9 Mini traction machine [12]

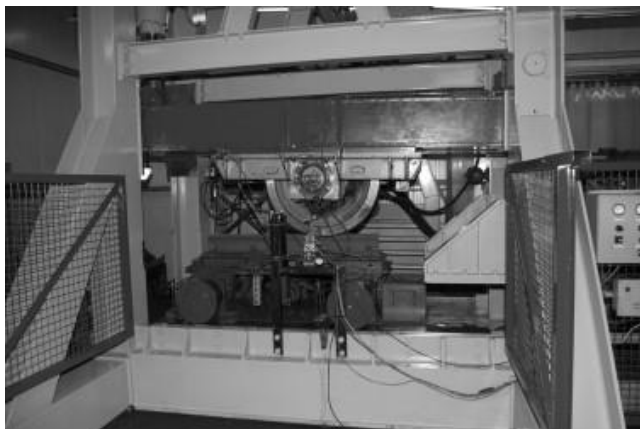
### 2.3.2 Dvoudiskové zařízení

Základní částí dvoudiskového zařízení jsou dva disky, jejichž geometrie je navržena tak, aby co nejlépe simulovala skutečný kontakt kola a kolejnice. Každý disk má vlastní pohon, čímž můžeme simulovat libovolný skluz. Nedílnou součástí dvoudiskového zařízení je zátěžný člen, který v kontaktní oblasti vytváří stejnou hodnotu tlaku jako v reálné situaci. Celé zařízení funguje ve zmenšeném měřítku, což umožňuje použití menší zátěžné síly, ale zhoršuje možnost přesné interpretace výsledků do praxe. V případě, že lze jeden z disků natáčet, je možné simulovat průjezd traťovým obloukem.



Obr. 2-10 Schéma dvoudiskového zařízení [13]

### 2.3.3 Zařízení v životní velikosti (full scale)



Obr. 2-11 Zařízení životní velikosti [14]

Zařízení obsahuje buď reálné železniční kolo nebo disk reálné velikosti. Největší výhodou je reálný kontakt těles a reálná kontaktní oblast a z toho plynoucí jednoduší přenesení dat do praxe. Naopak nevýhodami jsou vyšší pořizovací náklady a nutnost konstrukce dorazů a mechanismu zpětného pohybu kola. Možnost nastavení úhlu náběhu je minimální nebo zcela chybí. Díky reálné velikosti kola je možné přímo testovat i aplikační jednotky maziva, modifikátorů tření apod.

## 2.4 Zvuk

Zvuk je projevem mechanického kmitání v pružném prostředí. Dělí se dle frekvenčního rozsahu na tři pásma infrazvuk, slyšitelné pásmo a ultrazvuk. V oblasti zkoumání hluku je důležité především pásmo slyšitelného zvuku, které se pohybuje ve frekvenčním rozsahu 20 až 20 000 Hz. [6]

Akustické veličiny mají veliký rozsah hodnot. Můžou dosahovat hodnot například od  $10^{-9}$  W až po  $10^6$  W pro akustický výkon. Proto pro lepší názornost byly zavedeny tzv. hladiny sledované akustické veličiny, jejichž základní jednotkou je decibel [dB]. S decibelovými stupnicemi se můžeme setkat i v jiných oborech nejen v akustice. [11]

## 2.4.1 Akustický tlak

Při kmitání částic v prostředí dochází k výchylkám z jejich rovnovážné polohy. Díky působení vzájemných sil mezi částicemi, tak dochází ke vzniku míst s vyšší koncentrací částic (přetlak) a naopak s nižší koncentrací částic (podtlak). Celkový statický tlak je pak určen součtem středního barometrického tlaku a tlaku akustického. Akustický tlak je o mnoho řádů nižší než barometrický a lidské ucho ho vnímá již od hodnot  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. Pro harmonický signál má rovnice akustického tlaku tvar [6]:

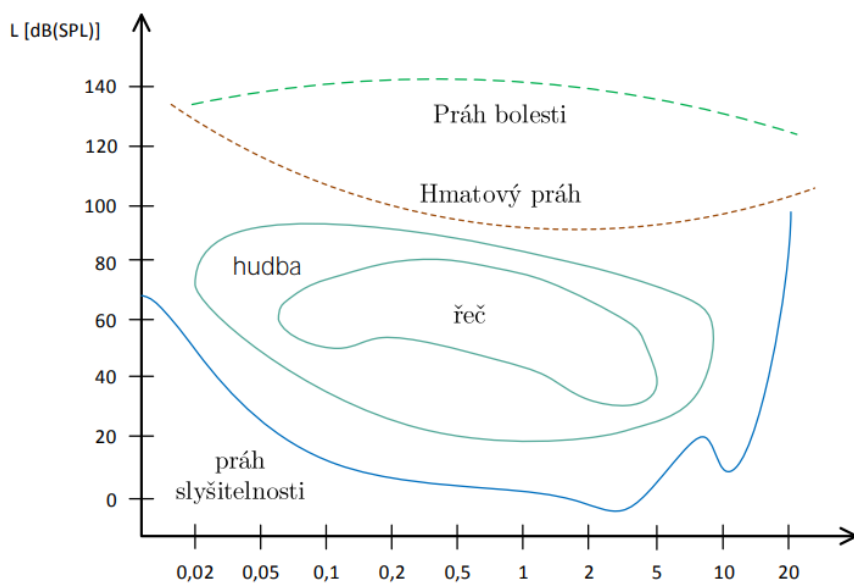
$$p = p_0 \cos \left[ \omega \left( \tau \mp \frac{x}{c} \right) \right],$$

kde  $p_0$  je amplituda akustického tlaku.

Vyjadřování akustického tlaku v [Pa] je nepřehledné a využívá se proto hladin vztažených k určitému kmitočtu. Hladinu akustického tlaku  $L$  (Sound Pressure Level – SPL) definujeme jako:

$$L_p = 10 \log \frac{p^2}{p_0^2} = 20 \log \frac{p}{p_0} [\text{dB}_{\text{SPL}}],$$

kde vztažnou hodnotou je  $p_0$ , která odpovídá prahu slyšitelnosti při kmitočtu 1 kHz a je rovna  $2 \cdot 10^{-5}$  Pa. [7]



Obr. 2-12 Slyšitelné pásmo zvuku [7]

Nejmenší změnu akustického tlaku jakou je lidské ucho schopno zaznamenat je 1dB. Problémy začínají vznikat při dlouhodobějším pobytu v prostředí, kde hladina akustického tlaku A přesahuje 85 dB, zde již vznikají trvalé poruchy sluchu. Při 130 dB se již účinky hluku mění na bolesti ve sluchovém orgánu. Pro lidské ucho již nepříjemnou hodnotou intenzity hluku je 160 dB, kdy dochází k protržení ušního bubínku. Zvuky se stejnou intenzitou můžeme však vnímat jinak a to vlivem rozdílného kmitočtu, ucho je nejcitlivější na oblast 2 až 3 kHz. [6][7]

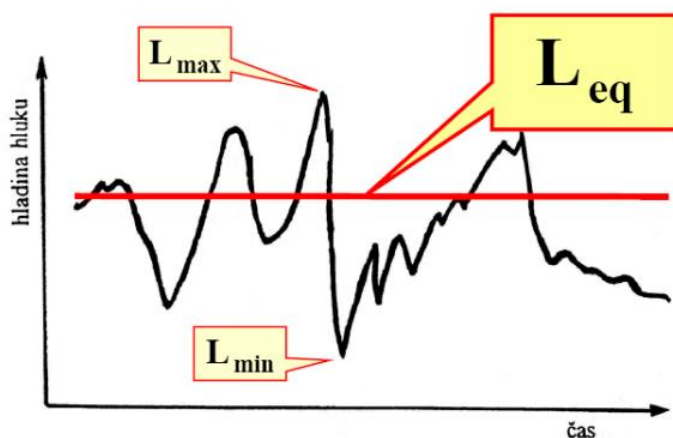
Při experimentálních měřeních se využívá tzv. váhových filtrů, které korigují naměřené hodnoty akustického tlaku, dle vnímání hlasitosti zvuku při různých kmitočtech. Nejčastěji používaným je filtr A, který koriguje naměřené hodnoty akustického tlaku podle charakteristiky lidského ucha.

V případech, kdy hluk výrazně kolísá v čase, se užívá ekvivalentní hladina akustického tlaku A  $L_{Aeq,T}$  [dB]. Ve sledovaném časovém úseku T má tato fiktivní ustálená hodnota stejný účinek na člověka jako skutečná akustická hladina tlaku A. Pro výpočet se užívá zjednodušený vzorec, vycházející z časového rozložení hladin akustického tlaku  $L_{pA}$  [6]:

$$L_{Aeq,T} = 10 \log \sum_{i=1}^n 10^{0,1L_{pAi}} \eta_i,$$

kde je  $\eta_i$  [-] relativní četnost výskytu hladiny akustického tlaku A,

$L_{pAi}$  [dB] střední hladina akustického tlaku A v i-tém intervalu.



Obr. 2-13 Ekvivalentní hladina akustického tlaku [8]

## 2.4.2 Hluk

Hluk je nedílnou součástí lidského života. Nemá přesnou fyzikální definici, ale jako hluk označujeme každý rušivý a nežádoucí prvek zvuku. Hluk je negativní faktor, který ohrožuje naše životní prostředí a jeho intenzita v posledních letech stále narůstá. Při jeho akumulaci například v místech dopravních uzlů, může negativně ovlivňovat zdraví člověka. [6]

## 2.4.3 Přístroje pro měření hluku

Pro měření hluku využíváme mikrofony. Mikrofon snímá akustický tlak a převádí ho na napětí. Dělíme je na analogové a digitální.

### **Analogové mikrofony**

Analogové mikrofony se dále dělí, dle způsobu převodu akustického tlaku na napětí na elektrodynamické a elektrostatické.

Elektrostatické mikrofony obsahují vnitřní deskový kondenzátor nabitý konstantním nábojem. Jedna elektroda kondenzátoru je pohyblivá a vlivem akustického tlaku dochází k jejímu vychýlení. Změnou vzdálenosti mezi elektrodami dojde ke změně kapacity kondenzátoru, což zapříčiní změnu výstupního napětí.

U elektrodynamických mikrofonů dochází ke změně výstupního napětí vlivem indukce elektrického napětí, jehož velikost se odvíjí od rychlosti pohybu cívky v magnetickém poli. Kde prvotní vychýlení cívky je zapříčiněno změnou akustického tlaku. [9]

### **Digitální mikrofony**

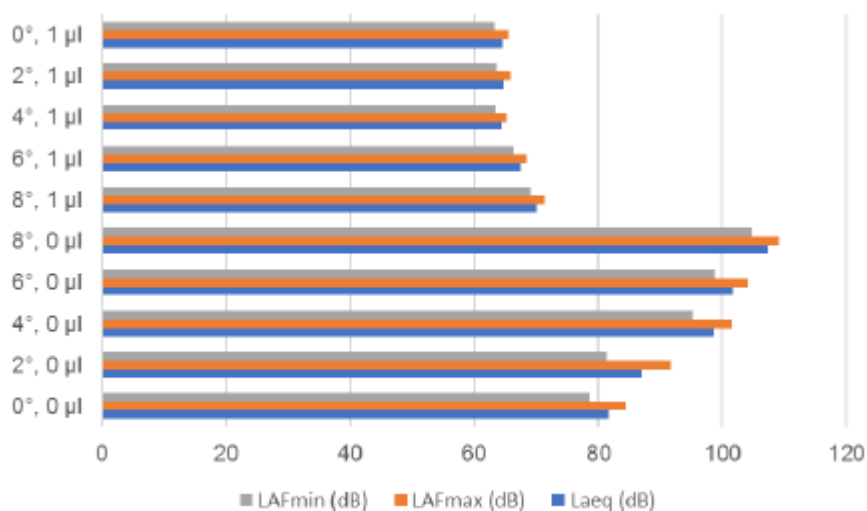
Digitální mikrofony se skládají z několika částí. První z nich je senzor akustického tlaku. Senzor akustického tlaku funguje podobně jako elektrostatický mikrofon. Pomocí silikonového kapacitátoru s jednou pohyblivou elektrodou snímá akustický tlak a převádí ho na napětí. Poté se signál zesílí pomocí zesilovače. V další fázi je analogový signál převáděn na digitální tzv. vzorkování a dále zpracováván analyzátozem jako je například PC. [10]

### **Zvukoměr**

Narozdíl od mikrofonů nefunguje zvukoměr jen jako snímač akustického tlaku, ale obsahuje v sobě také zesilovač a analyzátor naměřených dat. Je tedy schopný data zpracovat a rovnou zobrazit na displeji, kterým je vybaven.

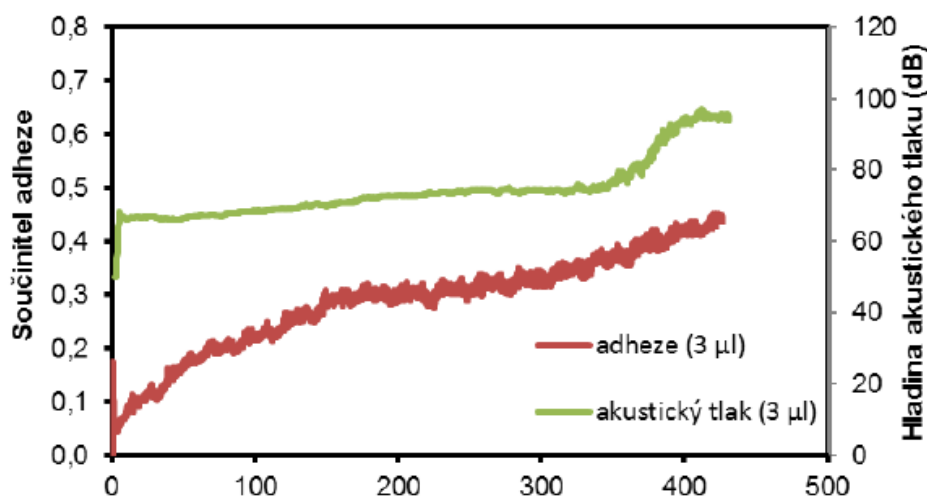
## 2.4.4 Experimenty se snížením hladiny akustického tlaku

Knápek [13] se v experimentech na zařízení twin-disk zabýval také měřením hlukové emise. Studoval změnu akustického tlaku při změně úhlu náběhu (obr. 2-14) a při aplikaci modifikátoru na olejové bázi. Lze pozorovat, že se vzrůstající hodnotou úhlu náběhu vzrůstá



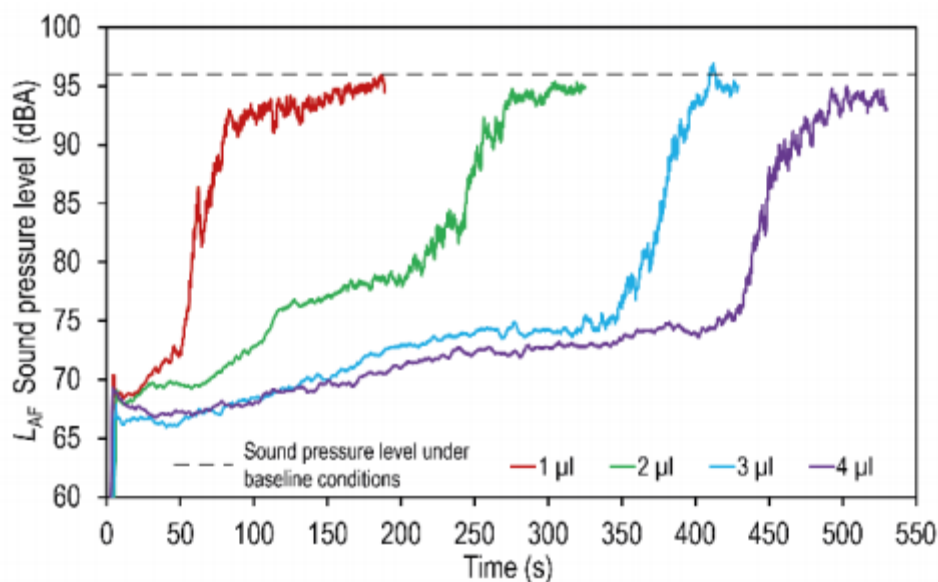
Obr. 2-14 Vliv úhlu náběhu a modifikátoru tření na hladinu akustického tlaku [13]

také hladina akustického tlaku a to až na maximální průměrnou hodnotu 107 dB. Po aplikaci modifikátoru dochází ke zjevnému poklesu hladiny akustického tlaku a to až o více než 30 dB a s postupným růstem součinitele adheze hladina akustického tlaku vzrůstá (obr. 2-15). K většímu skoku dochází v místě, kdy se adheze blíží hodnotě suchého kontaktu. Vliv různého množství modifikátoru tření na olejové bázi (1-4 μl) na hladinu akustického



Obr. 2-15 Velikost součinitele adheze a akustického tlaku při aplikaci 3 μl modifikátoru [13]

tlaku (obr. 2-16), kterým se zabýval Galas a kol. [15] ukazuje, že po aplikaci všech množství dojde ke snížení akustického tlaku na hodnoty 64-68 dBA. Můžeme vidět, že aplikované množství má značný vliv hlavně na délku úseku, kdy dochází k efektivnímu snížení akustického tlaku od 50 s (1  $\mu$ l) až po 440 s (4  $\mu$ l).



Obr. 2-16 Efekt množství modifikátoru tření na hladinu akustického tlaku [15]

## 3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 3.1 Shrnutí poznatků plynoucích z rešerše

Jak můžeme vidět z rešerše, nejdůležitější roli v kontaktu kola a kolejnice hraje adheze. Míru adheze vyjadřujeme pomocí součinitele tření, který získáme podílem třecí síly a normálové síly v kontaktu. Velikost adheze je ovlivněna jednak okolními vlivy prostředí jako je například teplota, vlhkost a kontaminanty (např. listí), tak provozními podmínkami, mezi jejichž reprezentanty patří například kvalita povrchu těles, rychlost, skluz, kontaktní tlak nebo úhel náběhu kola.

Dále lze kontakt velmi dobře ovlivnit aplikací modifikátorů tření, díky kterým jsme schopni součinitel adheze udržovat v ideálním rozpětí vzhledem k efektivnosti přenosu sil, bezpečnosti provozu kolejových vozidel a redukci hluku. Vzhledem ke zvolené situaci a požadovanému efektu používáme tři skupiny modifikátorů tření. Jako nejvýhodnější se z hlediska redukce hluku a zachování ideálních trakčních vlastností jeví tzv. HPF modifikátory, tedy modifikátory tření s vysoce pozitivní třecí charakteristikou, jejichž aplikací jsme schopni docílit součinitele adheze v rozmezí 0,15-0,4. Modifikátory tření aplikujeme do dvou nejdůležitějších oblastí a to oblast mezi okolkem a pojížděnou hranou kolejnice a oblast mezi kónickou jízdni plochou kola a temenem hlavy kolejnice. Jednotlivá konkrétní složení komerčních modifikátorů tření nejsou lehce dohledatelná, ale za základní složky považujeme základní bázi, zahušťovadlo, částice modifikátoru tření a mazivo. Jako základní báze je nejčastěji používána voda nebo olej, zahušťovadla reprezentuje bentonit, jako částice modifikátoru tření využíváme mastek a oxid zinečnatý a nejefektivnějšími mazivy jsou disulfid molybdenu a grafit. Nejvýznamnější vliv na vývoj součinitele adheze má hmotnostní zastoupení jednotlivých složek, které se mimo základní bázi pohybuje v rozmezí 1-10 hm. %. Z dosavadních poznatků plyne, že je třeba dbát také na aplikované množství modifikátoru do kontaktu a velikost a tvrdost částic.

Při měření zvuku je třeba dodržovat přesně definovanou polohu měřícího zařízení, vzhledem k charakteru šíření zvuku. Jako výhodné se jeví využití váhového filtru typu A, který koriguje naměřené hodnoty akustického tlaku podle charakteristiky lidského ucha. Hladina akustického tlaku by během cílené modifikace tření měla odpovídat poklesu součinitele adheze a mít podobně vzestupný trend.



## 3.2 Cíl práce

Hlavním cílem práce je objasnit vliv složení vybraných modifikátorů tření na hladinu hluku a míru adheze v kontaktu kola a kolejnice s využitím dvoudiskového testovacího zařízení. Požadovanými výstupy jsou průvodní zpráva, laboratorní protokol a digitální data.

Dílčí cíle:

- analyzovat složení vybraných modifikátorů tření,
- vybrat a připravit upravené kompozice,
- stanovit optimální aplikované množství do kontaktu,
- realizovat experimenty a provést analýzu měřených dat,
- srovnat efektivitu testovaných modifikátorů.

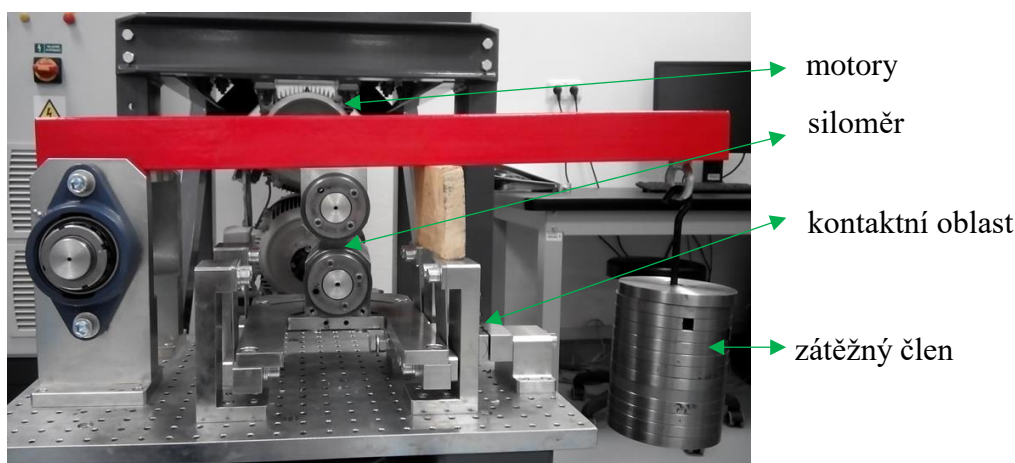
Vzhledem k poznatkům, získaným z rešerše a experimentům provedeným na zařízení twin-disk s modifikátory tření na olejové bázi, je žádoucí doplnit tyto experimenty o modifikátory tření na vodní bázi a více prozkoumat vliv složení modifikátorů na hladinu vyzařovaného hluku.

## 4 MATERIÁL A METODY

V následující kapitole bude popsáno experimentální zařízení, na němž bylo provedeno měření, použité materiály a postup praktikovaný při jednotlivých měřeních.

### 4.1 Experimentální zařízení a měření adheze

Měření probíhalo na dvoudiskovém zařízení, které se skládá ze dvou po sobě se odvalujících disků, kyvného rámu, na jehož konci je zátěžný člen, siloměru a dvou elektromotorů s měniči frekvence. Celá konstrukce byla umístěna ve dvou pevných nosných rámech. Disky byly vyrobeny z ložiskové oceli 100CrMn6, s počáteční drsností povrchu  $R_a = 0,2$  a tvrdostí 60 HRC. Oba disky byly vyrobeny o průměru 80 mm a šířce 8 mm, přičemž horní disk měl rádius o velikosti 50 mm, díky kterému bylo dosaženo eliptické kontaktní oblasti. Kyvný rám, který byl pevně spojen s horním diskem a fungoval jako páka, umožňoval okamžité oddělení obou disků a bylo možné oba disky s mechanismu vyjmout, případně nastavit úhel náběhu na dolním disku. Na volném konci kyvného rámu bylo umístěno oko, na nějž bylo pomocí háku připevňováno závaží, které vytvářelo potřebný kontaktní tlak. Dolní disk byl umístěn na rámu, který byl zavěšen na pásovině, díky čemuž lze snímat třecí sílu v kontaktu. Oba motory s frekvenčními měniči byly ovládány z řídicího PC nezávisle na sobě a bylo tedy možné nastavit různou hodnotu skluzu. Řídicí PC byl také propojen s tenzometrickým snímačem, který snímal hodnotu třecí síly v kontaktu. Údaje z tenzometrického snímače byly následně zpracovány na řídicím PC pomocí softwaru Dewesoft a pomocí hodnoty zátěžné síly byla vyhodnocena velikost součinitele adheze v kontaktu. Data byla dále ze softwaru DeweSoft exportována s vzorkovací frekvencí 1 Hz a zpracovávána pomocí programu Excel.



Obr. 4-1 Experimentální zařízení

#### 4.1.1 Parametry experimentálního zařízení

Dvoudiskové experimentální zařízení je vybaveno možností nastavení několika důležitých parametrů. Hlavní předností je možnost nastavení úhlu náběhu, dále rychlosti, skluzu a v neposlední řadě zatížení v místě kontaktu (Tab. 1).

Rychlost	0,5-2,5 ms <sup>-1</sup>
Skluz	0-10 %
Úhel náběhu	0-10°
Kontaktní tlak	0,6-1 GPa

Tab. 1 Parametry experimentálního zařízení

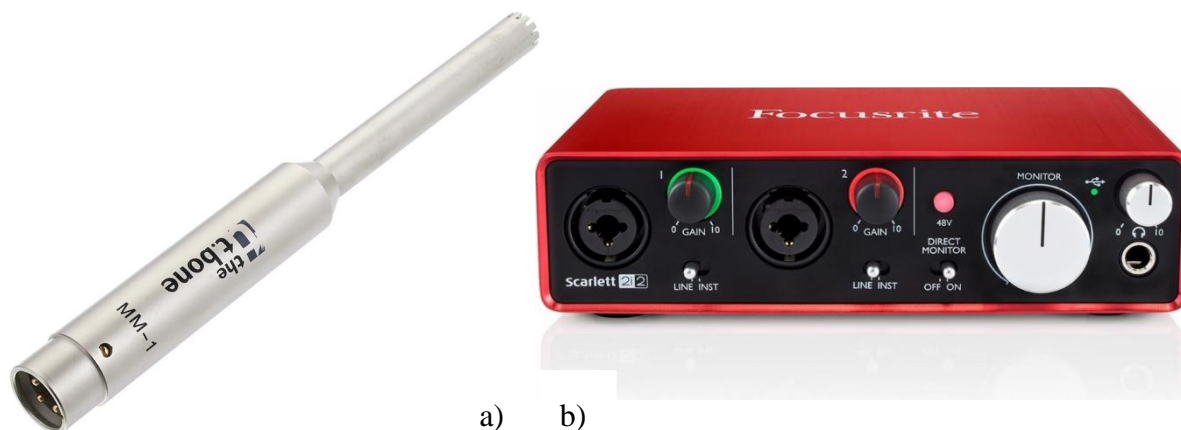
Pro účely experimentu byly zvoleny parametry získané z rešeršní části práce a úvodního experimentu. V místě kontaktu je udržován kontaktní tlak 800 GPa, který je shodný s reálným tlakem v místě kontaktu u kolejových vozidel používaných pro hromadnou přepravu osob ve městech. Úhel náběhu 4° nejlépe simuluje průjezd obloukem na reálné trati, kdy vzniká nárůst hlukové emise například v místech tramvajových točen. Zařízení bohužel nedokáže simulovat skutečnou rychlost, která je vyšší, byla tedy zvolena vyhovující rychlost experimentu 1 ms<sup>-1</sup>. Po úvodním experimentu byl zvolen skluz 5 %, který reprezentuje chování za bodem saturace.

Rychlost	1 ms <sup>-1</sup>
Skluz	5 %
Úhel náběhu	4°
Kontaktní tlak	800 Gpa

Tab. 2 Zvolené parametry experimentu

## 4.2 Měření hlukové emise

Hodnota akustického tlaku byla snímána na druhém měřícím okruhu, jehož součástí byl všesměrový měřící mikrofon s frekvenčním rozsahem 20 Hz až 18 kHz (obr. 4-2). Mikrofon byl vždy umístěn v předem definované pozici (1000 mm kolmo nad zemí a 500 mm od místa



Obr. 4-2 a) Mikrofon the t.bone MM-1 b) zvuková karta Focusrite Scarlett 2i2 [16][17]

kontaktní), aby byla zaručena opakovatelnost experimentu (obr. 4-3). Signál z mikrofonu šel dále na zvukovou kartu Focusrite Scarlett 2i2 a pomocí fyziologického váhové filtru A a softwaru DeweSoft byla na druhém PC zjištěna hodnota akustického tlaku LAFp [dB], naměřená data byla ze softwaru DeweSoft exportována s vzorkovací frekvencí 1 Hz a dále zpracovávána pomocí programu Excel. Měření třecí síly i měření hlukové emise bylo spouštěno manuálně a drobný časový posun byl následně zohledňován při zpracovávání dat.



Obr. 4-3 Pozice mikrofonu

## 4.3 Modifikátory tření

### 4.3.1 Materiály

Materiály pro modifikátory tření byly vybrány na základně poznatků získaných Kvardou [2], který jejich vlastnosti testoval na zařízení mini traction machine. Vybrané kompozice se skládají z následujících složek:

- základní báze – voda
- zahušťovadlo – bentonit
- částice pro modifikaci tření – mastek, oxid zinečnatý
- pevné mazivo – Ekolube Molyka RF (disulfid molybdenu)

Důležitým rozdílem mezi částicemi modifikátoru tření je jejich Mohsova tvrdost, kde mastek má velikost částic 4,7  $\mu\text{m}$  a tvrdost 1 a oxid zinečnatý se pohybuje pod hranicí velikosti částic 5  $\mu\text{m}$  a dosahuje tvrdosti 4-5.

### 4.3.2 Příprava vzorku

Nejdříve bylo nutné navážit přesné množství jednotlivých složek, k tomuto účelu byla použita analytická laboratorní váha KERN ABJ 320-4NM, která dosahuje přesnosti 1 mg, což bylo pro účely našeho experimentu dostačující. Každý vzorek byl připravován v celkovém množství všech kompozic 20 g. Do určené nádoby byly jednotlivé složky přidány v následujícím pořadí:

- základní medium
- zahušťovadlo
- částice pro modifikaci tření
- pevné mazivo

U kompozic obsahujících pevné mazivo byly ostatní složky nejprve smíchány samostatně a až poté bylo přimícháno pevné mazivo. Pro rovnoměrné smíšení všech složek byl použit šlehač mléka od společnosti IKEA. Každá kompozice byla připravována bezprostředně před samotným experimentem, jelikož po několika hodinách dochází k sedimentaci (v některých případech i během několika sekund) a vlivem netěsnosti nádoby také k vypařování základního média.

### 4.3.3 Vybrané kompozice

V následující tabulce jsou zahrnuta složení vybraných kompozic pro experimentální měření v hmotnostních procentech.

číslo kompozice	voda	bentonit	mastek	oxid zinečnatý	disulfid molybdenu
	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %	hm. %
1	92,5	7,5	-	-	-
2	92,5	-	7,5	-	-
3	92,5	-	-	7,5	-
4	85	7,5	7,5	-	-
5	85	7,5	-	7,5	-
6	83	7,5	7,5	-	2
7	80	7,5	7,5	-	5
8	83	7,5	-	7,5	2
9	80	7,5	-	7,5	5

Tab. 3 Složení vybraných kompozic

## 4.4 Průběh experimentu

### 4.4.1 Mokrý film

Před každým experimentem byl nejdříve umístěn mikrofon do správné pozice poté byla připojena zvuková karta a celý okruh připojen do PC. Dále byly uvedeny do provozu motory naprázdno a spuštěna zkouška mikrofonu, při které proběhla kontrola jeho správného



Obr. 4-4 Ukázka aplikace modifikátoru tření

nastavení. Disky byly vždy očištěny a odmaštěny pomocí acetonu a proveden jejich záběh za podmínek: 0,8 GPa,  $1 \text{ ms}^{-1}$ , 5 % skluz a úhel náběhu  $4^\circ$ . Během záběhu byla do kontaktu kontinuálně přiváděna voda v množství  $60 \mu\text{l}/1 \text{ s}$ , záběh byl ukončen po 10 sekundách. Poté byly disky znovu otřeny a byl nanesen modifikátor tření. Aplikace modifikátoru tření probíhala pomocí mikropipety a celkové množství bylo rozděleno na 4 stejné dávky, které byly nanесeny po obvodu disku ve vzdálenosti  $90^\circ$ . Následně bylo spuštěno ukládání dat na obou PC a zapnuty motory. Experimenty byly ukončeny po návratu a ustálení součinitele adheze na původní hodnoty.

### 4.4.2 Suchý film

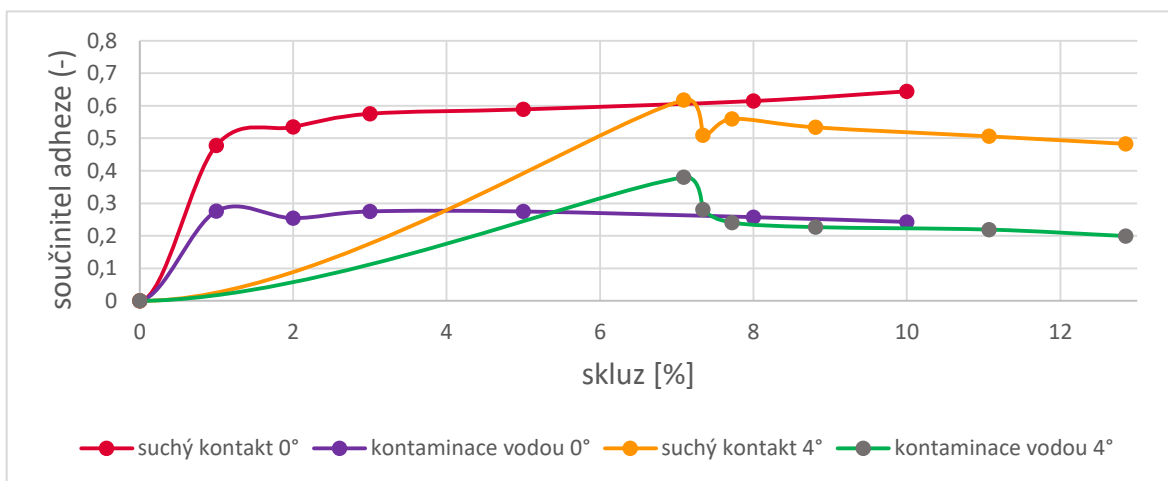
U suchého filmu probíhali experimenty stejně jako v případě mokrého filmu. Jediný rozdíl byl, že po aplikaci modifikátoru tření byly spuštěny motory pouze na dobu 2 s, kdy došlo k roznesení kompozice po obvodu disků. Po 10-15 minutách došlo k odpaření základní báze a experiment mohl být spuštěn.

## 5 VÝSLEDKY

V další části práce nebude v popisu testovaných kompozic zmiňována základní báze (voda), která je obsažena ve všech kompozicích. Při popisu grafů je použito zkratk pro bentonit (B), mastek (T), oxid zinečnatý (Z) a disulfid molybdenu (M).

### 5.1 Trakční křivky

První experimentálním měření vedlo k získání trakčních křivek pro suchý a vodou kontaminovaný kontakt. Byl zkoumán úhel náběhu  $0^\circ$  a  $4^\circ$  pro skluz na motorech v rozsahu 0 až 10 %. Je nutné si uvědomit, že při úhlu náběhu vzniká i vedlejší (příčný) skluz, který je nutno při vyhodnocování zohlednit. Z trakčních křivek (obr. 5-1) je patrné, že bod saturace



Obr. 5-1 Trakční křivky pro úhel náběhu  $0^\circ$  a  $4^\circ$

pro úhel náběhu  $0^\circ$  nastal okolo oblasti 2 % celkového skluzu a pro úhel náběhu  $4^\circ$  byla hodnota celkového skluzu 7,3-7,7 %. Tyto hodnoty celkového skluzu odpovídají relativnímu skluzu na motorech 2-3%. Pro další experimenty byl tedy skluz na motorech zvolen 5 %,

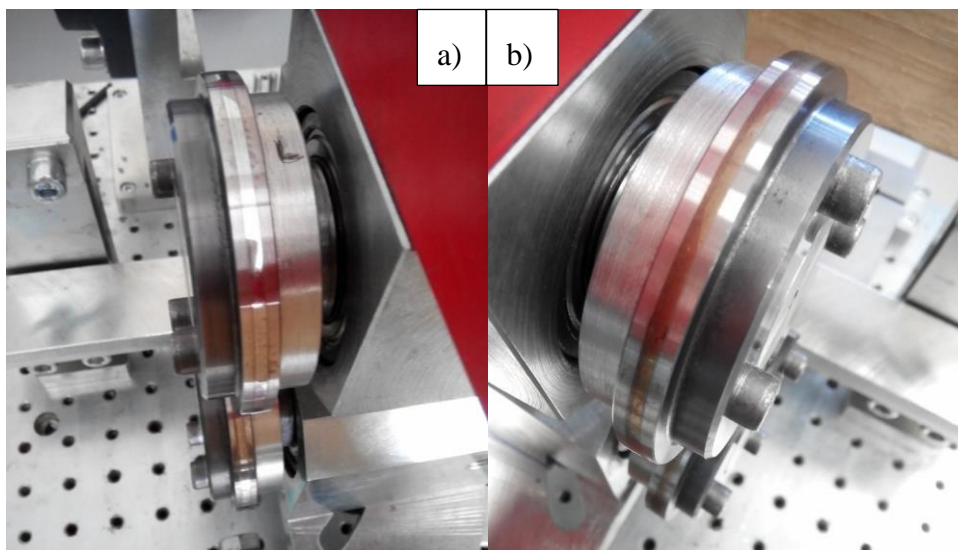
Skluz na motorech (%)	1	2	3	5	8	10
Celkový skluz (%)	7,09	7,34	7,72	8,81	11,07	12,85

Tab. 4 Odpovídající hodnoty celkového skluzu pro pevně daný skluz na motorech při úhlu náběhu  $4^\circ$

kde se již s jistotou pohybujeme za bodem saturace. Při jednorázové aplikaci vody před experimentem docházelo k vysychání kontaktu, proto byl zvolen kontinuální přívod vody, kdy pomocí nástavce mikropipety byla voda dávkována do kontaktu v množství 10  $\mu\text{l}/1$  s.



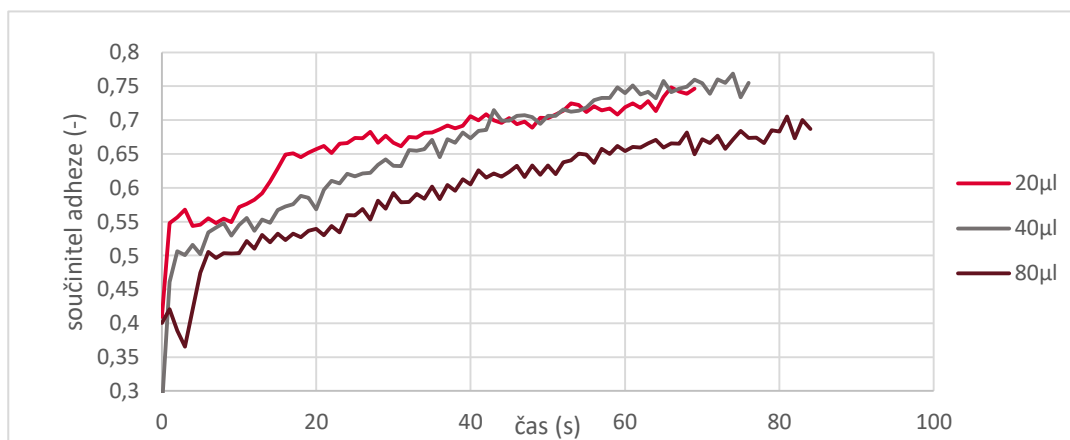
Následně po prvním experimentu s vodou došlo k významnému ovlivnění místa kontaktu, kdy byly odplaveny veškeré nečistoty z drážky, což doposud, kdy byly disky čišťeny pomocí ultrazvukové čističky a papírové utěrky s acetonem, nebylo pozorováno. Vizuální rozdíl je zachycen na obr. 5-2. Proto byla tato nová metoda čištění disků zavedena před každým experimentem za účelem lepší opakovatelnosti experimentů.



Obr. 5-2 a) Po vyčištění vodou při záběhu b) Po vyčištění papírovou utěrkou a acetonem

## 5.2 Test množství

Pro testy množství aplikovaného do kontaktu byla vybrána kompozice složená ze 7,5 hm. % bentonitu a 7,5 hm. % mastku. Kompozice vykazovala relativně malou citlivost na aplikované množství, ale při použití dávky 20  $\mu\text{l}$  docházelo k horšímu roznesení



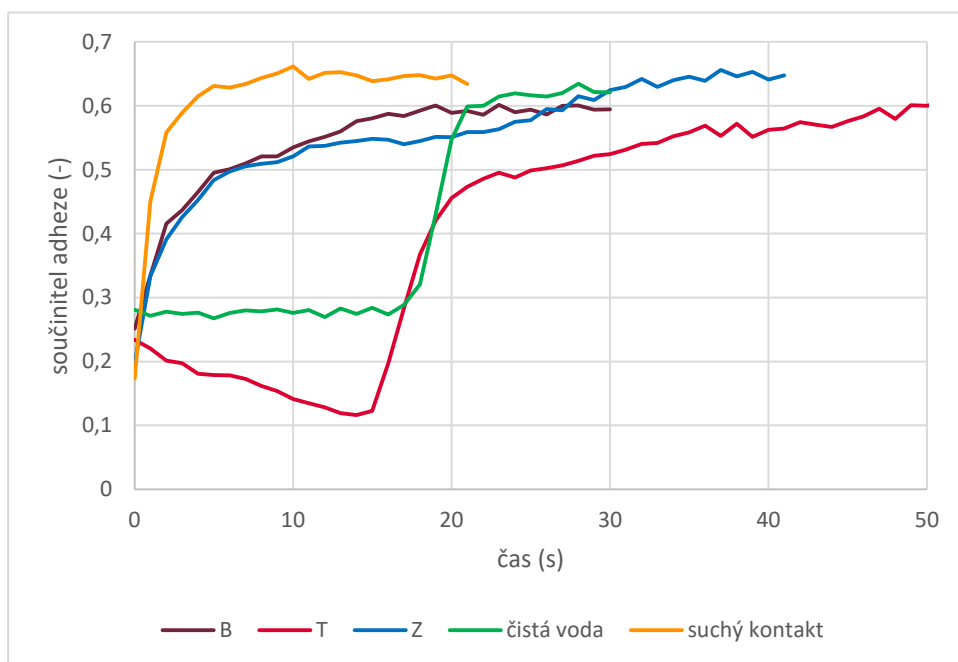
Obr. 5-3 Vliv použitého množství kompozice B (7,5 %) + T (7,5 %) na součinitel adheze

kompozice po obvodu disku. Naopak při testech s 80  $\mu\text{l}$  bylo značné množství kompozice vytlačeno z kontaktu. I vzhledem k další fázi experimentů, kdy byly použity kompozice obsahující pevné mazivo, a při vyšším množství kompozice by mohlo dojít k přemazání kontaktu, byla pro všechny následující experimenty zvolena dávka 40  $\mu\text{l}$ .

## 5.3 Dvousložkové kompozice

### 5.3.1 Součinitel adheze

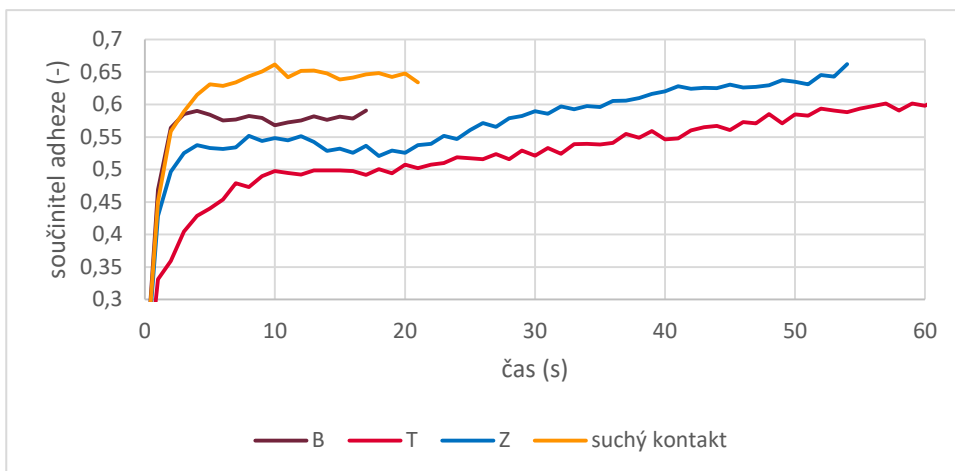
Z experimentů dvousložkových kompozic za podmínek mokrého filmu můžeme vidět, že významnou roli hraje základní báze, tedy voda. Při experimentu se samotnou vodou nabyl součinitel adheze zpočátku konstantní hodnoty 0,27 a po uplynutí 18 s došlo k vysušení a prudkému nárůstu součinitele adheze na hodnotu blízkou suchému kontaktu. Přidáním



Obr. 5-4 Součinitele adheze dvousložkových kompozic (mokrý film)

částic mastku došlo k počátečnímu poklesu součinitele adheze až na hodnotu 0,11 a po 15 s nastal prudký nárůst stejně jako u vody, přičemž se nárůst zastavil na hodnotě 0,5 a součinitel adheze již rostl pozvolněji. Bentonit a oxid zinečnatý vykazují společný trend prudšího nárůstu součinitele adheze a hodnotě suchého kontaktu se přiblíží takřka ve stejném čase jako voda. V případě suchého filmu docházelo k prudkému nárůstu součinitele adheze,

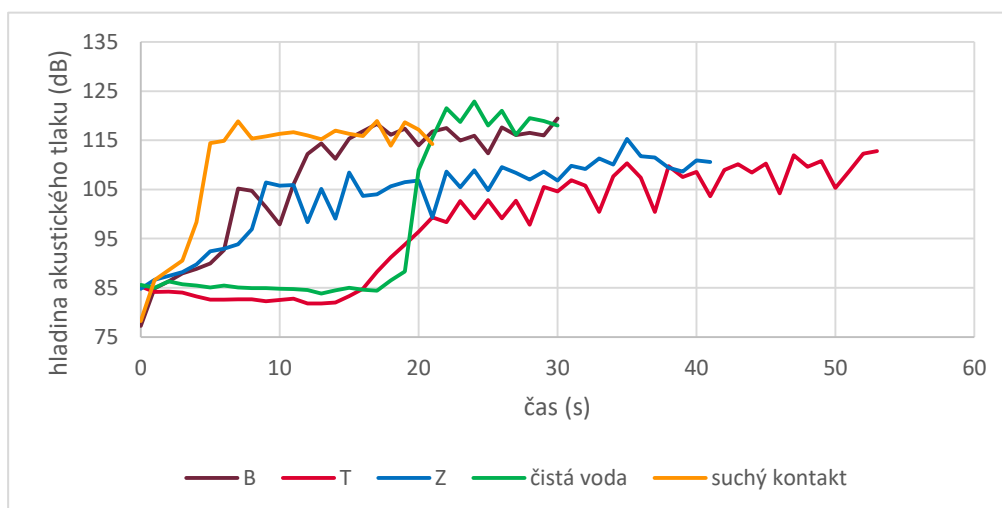
který se zastavil až na hranici 0,5 součinitele adheze. Nedošlo tedy k efektivnímu snížení součinitele adheze pod hranici 0,4.



Obr. 5-5 Součinitel adheze dvousložkových kompozic (suchý film)

### 5.3.2 Hladina akustického tlaku

Hladina akustického tlaku u dvousložkových kompozic pro mokrý film i suchý film velice rychle vzrostla nad 100 dB, výjimku tvoří částice mastku u mokrého filmu a čistá voda, které vykazovaly po dobu 16 s hodnoty akustického tlaku pod 85 dB. Pro jednotlivé kompozice byla vyčíslena minimální a maximální hodnota akustického tlaku a také medián. Pro suchý film nebylo dosaženo výraznějšího snížení hladiny akustického tlaku. Nižší hodnoty mediánu dosáhla voda (85,6 dB) a mastek (96,5 dB).



Obr. 5-6 Hladina akustického tlaku pro dvousložkové kompozice (mokrý film)

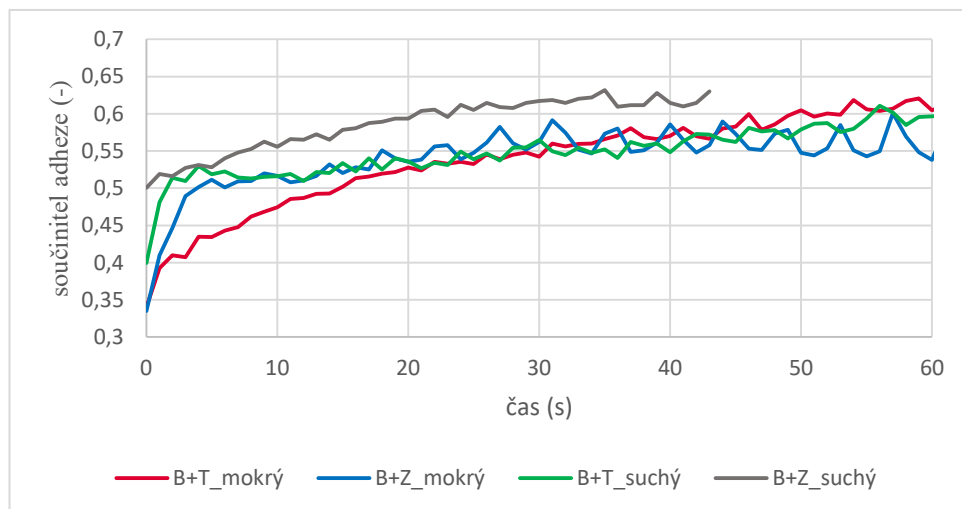
	Bentonit		Mastek		Oxid zinečnatý		Čistá voda	Suchý kontakt
typ filmu	mokrý	suchý	mokrý	suchý	mokrý	suchý	mokrý	suchý
max. LAFp (dB)	119,5	117,1	119,8	120,1	115,3	114,3	122,9	119,0
min. LAFp (dB)	84,9	105,6	80,7	85,9	86,6	88,8	83,8	113,9
medián (dB)	104,9	113,7	96,5	106,5	107,5	107,5	85,6	115,6

Tab. 5 Medián, minimální a maximální hodnota akustického tlaku pro dvousložkové kompozice

## 5.4 Tříšložkové kompozice

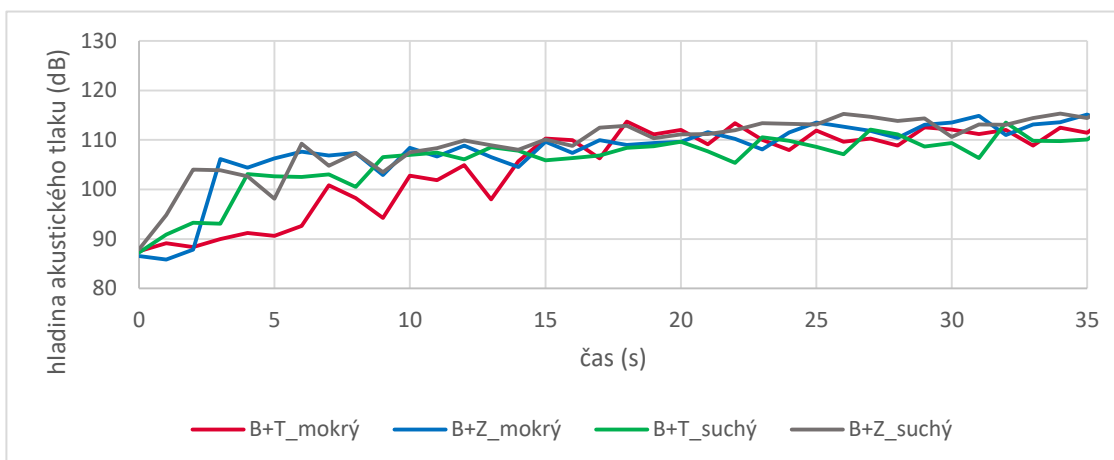
### 5.4.1 Součinitel adheze

Tříšložkové kompozice obsahující bentonit v kombinaci s mastkem nebo oxidem zinečnatým nevykazovaly větší vliv na součinitel adheze. U kompozice bentonitu a mastku při aplikaci mokrého filmu došlo ke krátkodobému snížení součinitele adheze pod hodnotu 0,5.



Obr. 5-7 Součinitele adheze pro tříšložkové kompozice

## 5.4.2 Hladina akustického tlaku



Obr. 5-8 Hladiny akustického tlaku pro tříslužkové kompozice

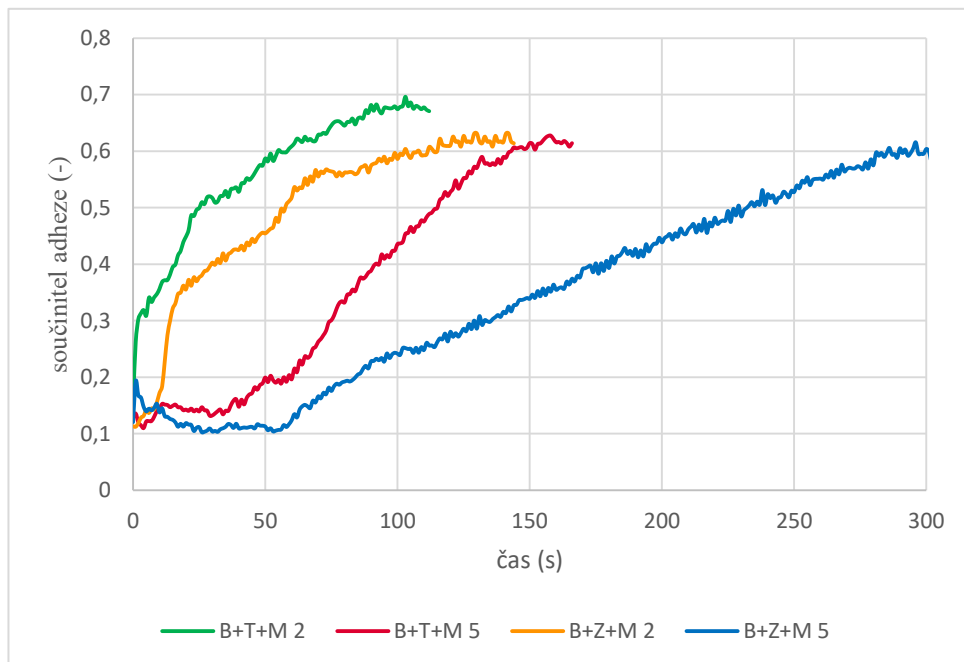
Hladina akustického tlaku pro kompozici bentonit + oxid zinečnatý ihned po začátku experimentu přesáhla hodnotu 100 dB. Kompozice bentonit + mastek (mokrý film) vykazovala výdrž 10 s mezi hodnotami akustického tlaku 90-100 dB.

typ filmu	B+T		B+Z	
	mokrý	suchý	mokrý	suchý
max. LAFp (dB)	120,0	119,2	116,3	119,7
min. LAFp (dB)	85,4	93,1	83,8	93,0
medián (dB)	106,3	111,9	109,4	110,1

Tab. 6 Medián, minimální a maximální hodnota akustického tlaku pro tříslužkové kompozice

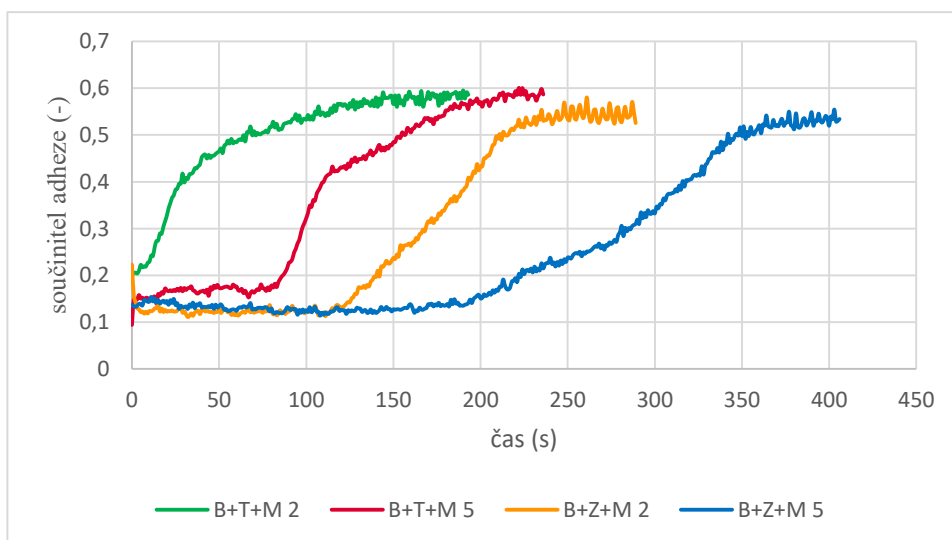
## 5.5 Čtyřsložkové kompozice

### 5.5.1 Součinitel adheze



Obr. 5-9 Velikost součinitele adheze pro čtyřsložkové kompozice (mokrý film)

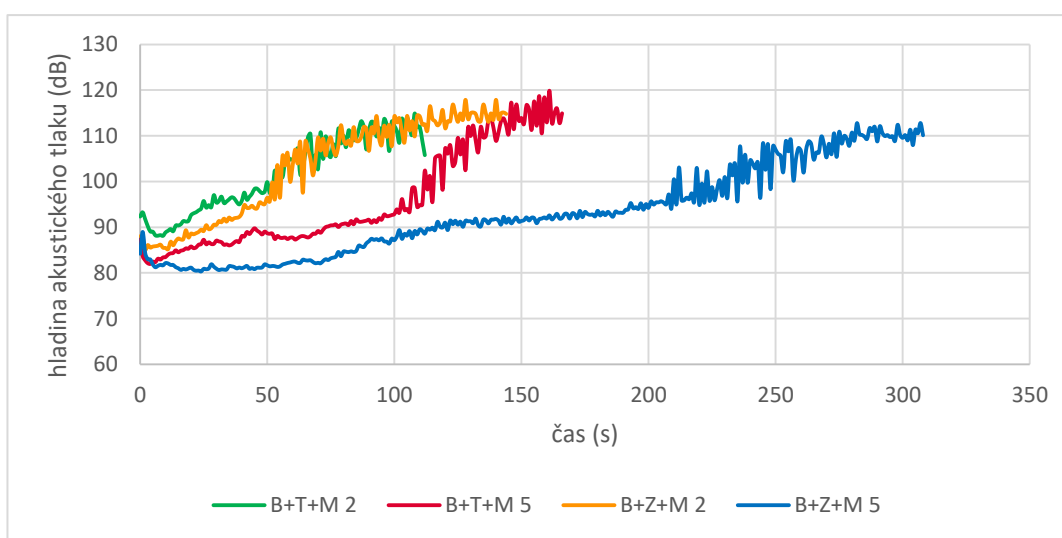
Kompozice obsahující disulfid molybdenu přinášejí snížení hodnoty součinitele adheze. Při použití 7,5 % bentonitu, 7,5 % oxidu zinečnatého a 5 % disulfid molybdenu se hodnoty součinitele adheze při mokrém filmu pohybovaly pod hodnotou 0,15 v úseku delším jak 50 s,



Obr. 5-10 Velikost součinitele adheze pro čtyřsložkové kompozice (suchý film)

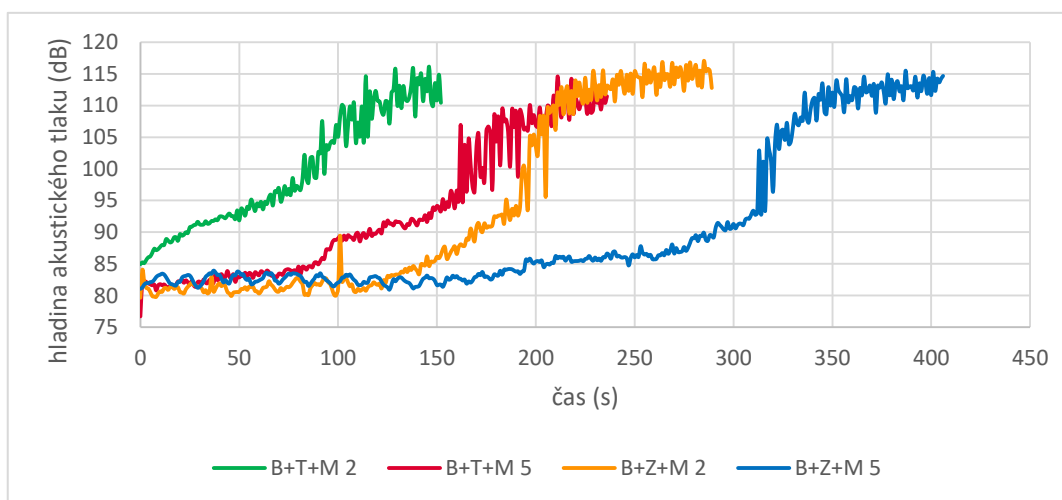
v případě suchého filmu až 170 s, což už byla velmi nízká adheze. Celková délka efektivního snížení adheze pod hodnotu 0,4 byla až 320 s. Zároveň byl růst adheze ustálenější a nedocházelo k prudkým změnám. Tvrdší částice oxidu zinečnatého dosahovaly nižší hodnot součinitele adheze nežli měkčí částice mastku pro mokrý i suchý film. Čtyřsložkové kompozice obsahující disulfid molybdenu dosahují nižších hodnot součinitele adheze při suchém filmu než při mokrém.

## 5.5.2 Hodnota akustického tlaku



Obr. 5-11 Hladina akustického tlaku pro čtyřsložkové kompozice (mokrý film)

U experimentů mokrého filmu projevovala kompozice obsahující 2 % disulfid molybdenu snížení hladiny akustického tlaku pod 100 dB na dobu 50 s. Pro kompozici B+Z+M 5 byla



Obr. 5-12 Hladina akustického tlaku pro čtyřsložkové kompozice (suchý film)

hladina akustického tlaku snížena více než 200 s, medián byl 90,8 dB, pro suchý film dosáhla tato kompozice snížení akustického tlaku po dobu 320 s a medián byl 83,8 dB. Minimální hodnoty všech kompozic při suchém filmu se pohybují mezi 80-85 dB. Větší množství disulfid molybdenu způsobuje delší výdrž kompozice na minimálních hodnotách.

	B+T+M 2		B+T+M 5		B+Z+M 2		B+Z+M 5	
typ filmu	mokrý	suchý	mokrý	suchý	mokrý	suchý	mokrý	suchý
max. LAFp (dB)	118,6	118,5	119,9	115,6	118,7	118,2	119,3	118,2
min. LAFp (dB)	88,1	83,9	81,4	78,4	85,1	79,6	80,3	80,5
medián (dB)	95,6	93,4	90,0	88,0	94,8	85,7	90,8	83,8

Tab. 7 Medián, maximální a minimální hodnota akustického tlaku pro čtyřšložkové modifikátory

## 5.6 Korelace součinitele adheze a hladiny akustického tlaku

Z naměřených dat bylo patrné, že součinitel adheze a vyzařovaná hladina akustického tlaku vykazují podobný trend křivek. Teoretický předpoklad byl takový, že by závislost mohla být lineární. Byly vypočteny Pearsonovi korelační koeficienty pro jednotlivé kompozice. Pro všechna data získaná při měření mokrého filmu byl korelační koeficient vyšší než 0,85. U suchého filmu byl korelační koeficient pod hranicí 0,85 ve třech případech.

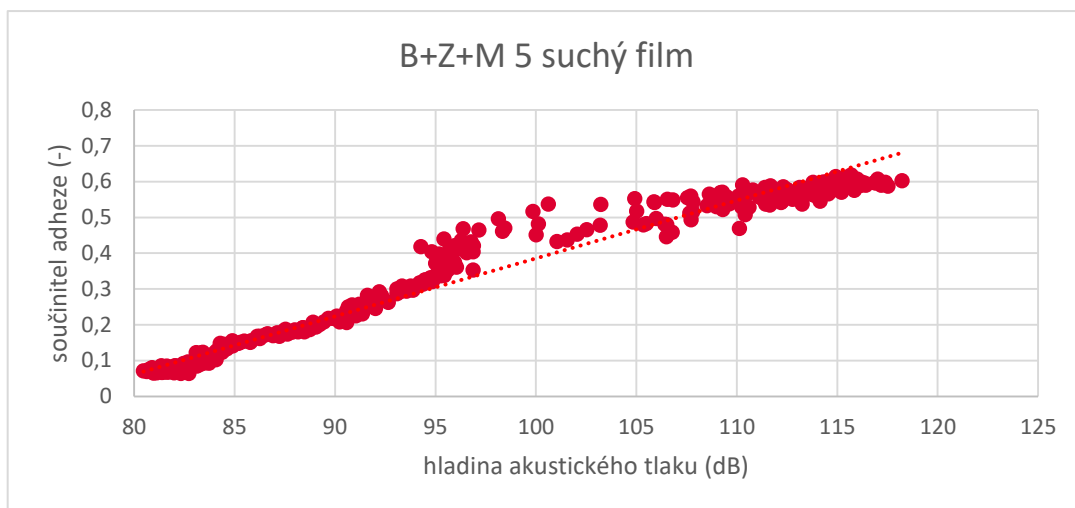
	B	T	Z	B+T	B+Z	B+T+M (2)	B+T+M (5)	B+T+Z (2)	B+Z+M (5)
P. k. k.	0,93	0,96	0,89	0,92	0,85	0,90	0,95	0,93	0,95

Tab. 8 Pearsonův korelační koeficient pro mokré film

	B	T	Z	B+T	B+Z	B+T+M (2)	B+T+M (5)	B+T+Z (2)	B+Z+M (5)
P. k. k.	0,79	0,87	0,76	0,80	0,89	0,91	0,94	0,96	0,98

Tab. 9 Pearsonův korelační koeficient pro suchý film

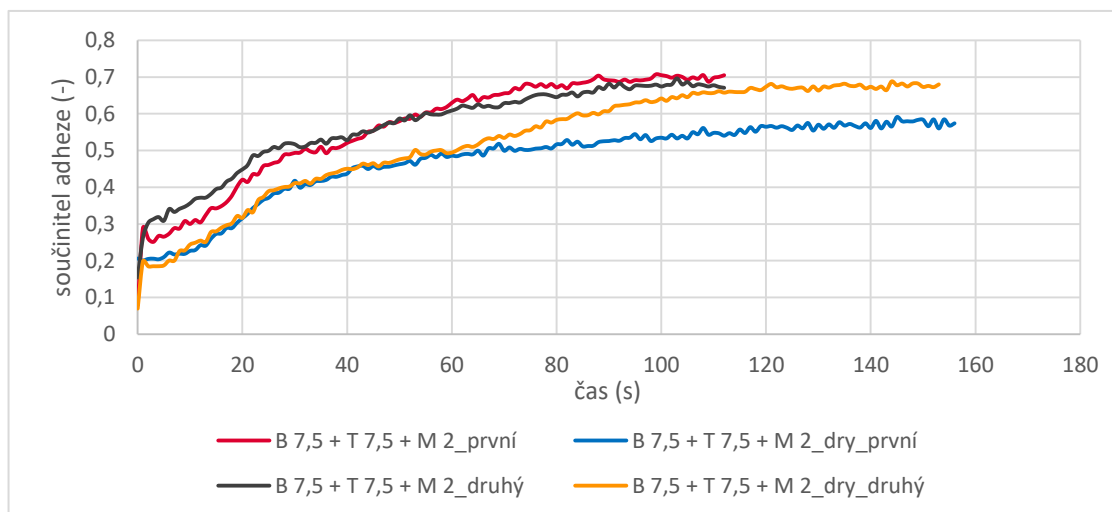




Obr. 5-13 Korelační diagram pro suchý film B+Z+M 5

## 5.7 Opakovatelnost

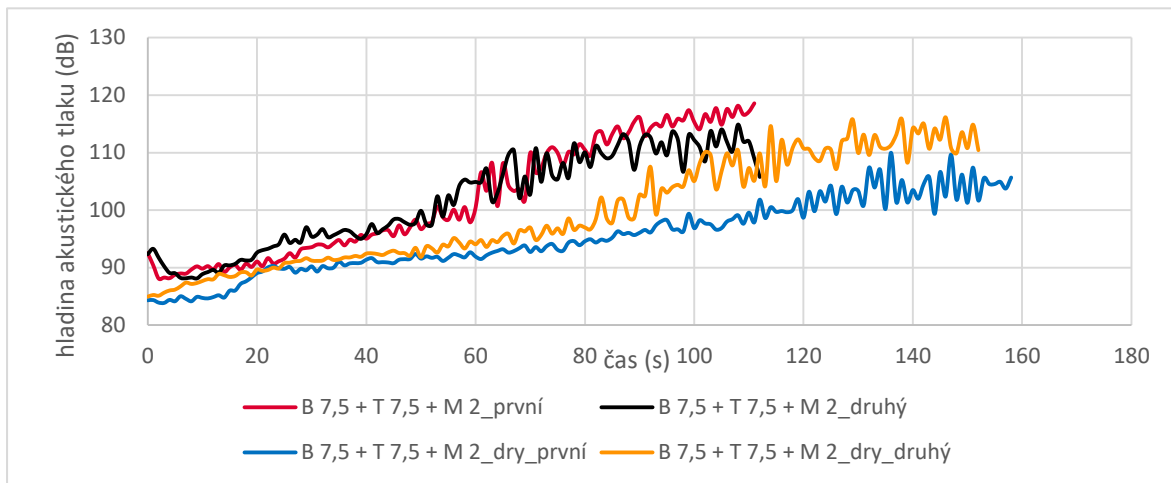
Důležitým parametrem všech experimentů je jejich opakovatelnost, proto byly všechny experimenty opakovány dvakrát. Po provedení prvního experimentu byl vždy měřící řetězec



Obr. 5-14 Opakovatelnost součinitele adheze při použití kompozice B+T+M (2 %)

vypnut, případně rozpojen, a opakování experimentu probíhalo až po opětovném sestavení. Většina experimentů vykazovala dobrou opakovatelnost, jak vzhledem k součiniteli adheze, tak hladině akustického tlaku. Rychlejší nárůst hodnot při opakování experimentu se suchým kontaktem (obr. 5-14), který vzniká při hodnotě součinitele adheze 0,5 je pravděpodobně

způsoben větším výtlakem kompozice a tím pádem menším efektivním množstvím v místě kontaktu. Můžeme pozorovat, že rychlejší nárůst součinitele adheze je spojen s větším množstvím vyzářené hladiny akustického tlaku.



Obr. 5-15 Opakovatelnost hladiny akustického tlaku při použití kompozice B+T+M (2 %)

## 6 DISKUZE

### 6.1 Úvodní experimenty

V úvodních experimentech byly získány trakční křivky a určeno množství kompozice, které bude aplikováno do kontaktu. Trakční křivky byly měřeny za podmínek kontaktního tlaku 800 GPa, rychlosti  $1 \text{ ms}^{-1}$  a úhlu náběhu  $0^\circ$  a  $4^\circ$ . Pro úhel náběhu  $0^\circ$  byl bod saturace pozorován při celkovém skluzu okolo 2 % a při úhlu náběhu  $4^\circ$  nastal při celkovém skluzu 7,3-7,7 %. Tyto hodnoty odpovídají relativnímu skluzu na motorech 2-3%, pro další experimenty byl tedy zvolen relativní skluz na motorech 5%, kde se již s jistotou pohybujeme za bodem saturace, tím byly stanoveny podmínky nastavení experimentálního zařízení pro všechny následující experimenty. Při druhém úvodním experimentu bylo testováno množství kompozice aplikované do kontaktu. Byla vybrána testovací kompozice složená ze 7,5 hm. % bentonitu a 7,5 hm. % mastku. V experimentech Knápka [13] a Galase [15] na dvoudiskovém zařízení bylo v případech olejových modifikátorů používáno pouze malé množství kompozic 1-4  $\mu\text{l}$ , naopak Kvarda [2] používal na zařízení mini traction machine při využití kompozic na vodní bázi množství 10  $\mu\text{l}$  až 1 ml. Byly provedeny experimenty s 20,40 a 80  $\mu\text{l}$ . S ohledem na relativní necitlivost kompozice na aplikované množství a možnost přemazání kontaktu vlivem tuhých maziv v jiných kompozicích bylo vyloučeno aplikované množství 80  $\mu\text{l}$ . Naopak dávka 20  $\mu\text{l}$  nedosahovala ideálního pokrytí obvodu disku. 40  $\mu\text{l}$  bylo zvoleno jako ideální aplikovaná dávka.

### 6.2 Experimenty s kompozicemi

Experimenty dvousložkových kompozic ukázaly, že při testech suchého filmu dochází jen k minimálnímu snížení součinitele adheze a hladiny akustického tlaku. Všechny testované kompozice vykazovali prudký nárůst adheze ihned po startu experimentu až na hodnoty 0,5 a stejně tak i rychlý nárůst hladiny akustického tlaku nad 100 dB. V případě mokrého filmu dosáhl nejnižších hodnot součinitele adheze a akustického tlaku mastek, jehož hodnota součinitele adheze z počáteční hodnoty 0,23 klesala po dobu 15 s až na hodnotu 0,11, poté došlo k prudkému nárůstu až k hodnotě 0,5. Nejnižší dosažená hodnota akustického tlaku byla 80,7 dB. Třísložkové kompozice nedosahovaly vyšší efektivity při snížení součinitele adheze ani akustického tlaku, jak bylo teoreticky předpokládáno. Pouze kompozice složená ze 7,5 hm. % bentonitu a 7,5 hm. % mastku snížila součinitel adheze na dobu 12 s pod hodnotu 0,5 a po stejnou dobu došlo také ke snížení hladiny akustického tlaku pod hranici 100 dB. Zajímavějších výsledků bylo dosaženo se čtyřsložkovými kompozicemi, kde se podařilo snížit hodnotu vyzařovaného akustického tlaku na 80-90 dB po dobu 300 s pro

kompozici 7,5 hm. % bentonit, 7,5 hm. % oxid zinečnatý a 5 hm. % disulfid molybdenu. Obsah disulfid molybdenu ve čtyřsložkových kompozicích způsobuje jejich vyšší efektivitu při aplikaci suchého filmu u dvousložkových a třísložkových kompozic tomu bylo právě naopak, což potvrzuje poznatky získané Kvardou [2]. Také kompozice obsahující oxid zinečnatý ve čtyřsložkových kompozicích vykazují lepší schopnost snížení hodnoty součinitele adheze a akustického tlaku než kompozice s mastkem, který měl při experimentech dvousložkových kompozic díky své nižší tvrdosti lepší efekt při snížení adheze. Vyšší množství disulfid molybdenu nezpůsobovalo další větší propad součinitele adheze nebo akustického tlaku, ale zaručovalo delší výdrž na nízkých hodnotách. Nejefektivnějších hodnot bylo dosaženo pro kompozici 7,5 hm. % bentonit, 7,5 hm. % mastek a 5 hm. % disulfid molybdenu, kdy se hodnota součinitele adheze pohybovala v rozmezí 0,15-0,25, nedochází tedy ke ztrátě trakčních sil, a hladina akustického tlaku v rozsahu 82-87 dB po dobu 90 s.

Při hodnocení vzájemné závislosti mezi součinitelem adheze a vyzařovanou hladinou akustického tlaku bylo teoreticky předpokládáno, že by závislost mohla mít lineární charakter. Pro posouzení závislosti byla vybrána korelační analýza. Byly vypočteny Pearsonovi korelační koeficienty, které vyjadřují míru korelace (vzájemné závislosti), pokud by byla jeho hodnota rovna 1, jednalo by se o zcela lineární závislost. Pro většinu kompozic byla hodnota Pearsonova korelačního koeficientu větší než 0,85, což vyjadřuje silnou závislost mezi součinitelem adheze a vyzařovanou hladinou akustického tlaku. Nejvyšší hodnoty 0,98, tedy téměř linearity, dosáhla kompozice 7,5 hm. % bentonit, 7,5 hm. % oxid zinečnatý a 5 hm. % disulfid molybdenu.

Pro všechny experimenty s kompozicemi byly sestrojeny grafy opakovatelnosti. Při pohledu na tyto grafy bylo možné říct, že jednotlivé kompozice vykazují relativně dobrou opakovatelnost a při opakování experimentu je zachycen stejný trend křivek. Případné posuny hodnot byly připisovány nehomogenitě kompozic, která vznikala rychlou sedimentací částic nebo naopak vyšší viskozitou, která znemožňovala dokonalé promíslení všech složek, dále mohlo docházet k nedokonalému nanesení kompozice přesně na střed povrchu disku a tím k rozdílnému výtlaku kompozice z místa kontaktu. Experimenty mohly být také ovlivněny zbytky nečistot a částic otěru v místě drážky a rostoucí teplotou samotných disků v průběhu experimentu.

## 7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývá vlivem složek modifikátoru tření na vodní bázi na vývoj adheze a s ním spojenou vyzařovanou hladinu akustického tlaku v kontaktu kola a kolejnice. Kolejová vozidla jsou nedílnou součástí hromadné dopravy v urbanistických oblastech a jedním z jejich největších negativních dopadů je hluková emise. V poslední době je kladem důraz na využití modifikátorů tření, které jsou efektivním nástrojem nejen v oblasti řízení adheze a redukce hluku, ale také např. při snížení opotřebení.

V rešeršní části práce jsou shrnuty základní poznatky z oblasti styku kola a kolejnice a měření hladiny akustického tlaku. Dále jsou na základě rešeršní části stanoveny podmínky experimentu. Jako experimentální zařízení bylo vybráno dvoudiskové zařízení.

Z výsledků práce je patrné, že největší vliv na redukci hladiny akustického tlaku mají kompozice obsahující disulfid molybdenu. Experimenty kompozic bez tuhého maziva nevykazovali při aplikaci suchého filmu větší vliv na redukci součinitele adheze a hladiny akustického tlaku. V případě testů samotných částic a částic a zahušťovadla dosahovaly nižších hodnot součinitele adheze kompozice obsahující mastek, naopak při testech s tuhým mazivem bylo dosaženo nižších hodnot pro oxid zinečnatý. Byla potvrzena existence závislosti mezi součinitelem adheze a hladinou akustického tlaku.

Byly splněny cíle práce. Výsledky práce a získaná data je možné využít k dalšímu zkoumání vzájemného vztahu mezi adhezí a vyzařovanou hladinou akustického tlaku. Redukce vyzařované hladiny akustického tlaku by měla být dozajista předmětem dalšího komplexnějšího výzkumu.

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. OLOFSSON, U. a R. LEWIS. *Wheel-rail interface handbook*. Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 2009. ISBN 978-1-84569-412-8.
2. KVARDA, D. *Vliv složení modifikátorů tření na trakci v kontaktu kola a kolejnice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 83 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radovan Galas.
3. GALAS, R. *Konstrukce experimentálního zařízení pro studium pískování kolejových vozidel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013. 102 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Petr Šperka, Ph.D..
4. GALAS, R. *Friction Modification within Wheel-Rail Contact*. Brno, 2017, 110 p. PhD thesis. Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, Institute of Machine and Industrial Design. Supervisor: prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
5. ARIAS-CUEVAS, O., Z. LI, R. LEWIS a E. A. GALLARDOHERNANDEZ. *Rolling-sliding laboratory tests of friction modifiers in dry and wet wheel-rail contacts*. *Wear* [online]. 2010, roč. 268, č. 2–3, s. 543–551. ISSN 00431648. Dostupné z: doi:10.1016/j.wear.2009.09.01
6. NOVÝ, R. *Hluk a chvění*. Vyd. 3. V Praze: České vysoké učení technické, 2009, 400 s. ISBN 978-80-01-04347-9
7. STEJSKAL, Tomáš *Hlukoměr pro embedded systémy*: diplomová práce. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav telekomunikací, 2015. 73 s. Vedoucí práce byl Ing. Miroslav Botta
8. Bc. Adam Černocho, *Vyhodnocování dopravního hluku a jeho modelování*. Brno, 2014. 102 s. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta stavební, Ústav pozemních komunikací. Vedoucí práce prof. Ing. Jan Kudrna, CSc..
9. JEDLIČKA, P. *Hlukoměr a detektor zvuků*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav radioelektroniky, 2017. 55 s., 3 s. příloh. Bakalářská práce. Vedoucí práce: Ing. Aleš Povalač, Ph.D..
10. ST MICROELECTRONICS. MP45DT02-M [pdf]. 2016 [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: <http://www.st.com/content/ccc/resource/technical/document/datasheet/group3/27/62/48/98/44/54/4d/36/DM00303211/files/DM00303211.pdf/jcr:content/translations/en.DM00303211.pdf>.
11. Decibelové veličiny v akustice, kmitočtová pásma. Ufmi.ft.utb.cz [online]. [cit. 2018-04-09]. Dostupné z: [http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env\\_fyzika/EF\\_03.pdf](http://ufmi.ft.utb.cz/texty/env_fyzika/EF_03.pdf)
12. PCS-INSTRUMENTS [online]. [cit. 2018-04-22]. URL<<http://pcs-instruments.com/wp-content/uploads/2014/03/MTM-Std-test-set-up.jpg>>

13. KNÁPEK, J. *Experimentální studium modifikátorů tření v kolejové dopravě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 86 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Radovan Galas.
14. STOCK, R., D. T. EADIE, D. ELVIDGE, K. OLDKNOW. *Influencing rolling contact fatigue through top of rail friction modifier application - A full scale wheel-rail test rig study*. *Wear*. [online]. 2011, roč. 271, s. 134-142. [cit. 2018-04-22]. URL<<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810003406>>. ISSN 0043-1648
15. GALAS, R., M. OMASTA, M. KLAPKA, I. KŘUPKA a M. HARTL. *Case study: the influence of oil-based friction modifier quantity on tram braking distance and noise*. *Tribology in Industry* [online]. Serbian Tribology Society, 2017, **39**(2), 198-206 [cit. 2018-05-04]. DOI: 10.24874/ti.2017.39.02.06. ISSN 0354-8996. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/69341>
16. THOMANN [online]. [cit. 2018-05-03] Dostupné z: <[https://www.thomann.de/pics/bdb/190404/10445900\\_800.jpg](https://www.thomann.de/pics/bdb/190404/10445900_800.jpg)>
17. SWEETWATER [online]. [cit. 2018-05-03] Dostupné z: <[https://media.sweetwater.com/api/i/f-webp\\_\\_q-82\\_\\_ha-061355632ef226e6\\_\\_hmac-a62be5fe1809cba87394a011724b4b913b02af84/images/items/750/Scarlet2i2G2-large.jpg.auto.webp](https://media.sweetwater.com/api/i/f-webp__q-82__ha-061355632ef226e6__hmac-a62be5fe1809cba87394a011724b4b913b02af84/images/items/750/Scarlet2i2G2-large.jpg.auto.webp)>

## 9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

### 9.1 Veličiny

$\mu$	(-)	- součinitel adheze
$\mu_x, \mu_y$	(-)	- součinitel adheze v ose x resp. v ose y
$F_{tx}, F_{ty}$	(N)	- třecí síla v ose x, resp. v ose y
$F_n$	(N)	- normálová síla
$\xi$	(-)	- skluz
$\omega$	( $rad \cdot s^{-1}$ )	- úhlová rychlost
$r$	(m)	- poloměr kola
$v$	( $m \cdot s^{-1}$ )	- rychlost kola
$p$	(Pa)	- akustický tlak
$p_0$	(Pa)	- amplituda akustického tlaku
$x$	(m)	- vzdálenost
$\tau$	(s)	- čas
$c$	( $m \cdot s^{-1}$ )	- rychlost zvuku
$L_p$	(dB <sub>SPL</sub> )	- hladina akustického tlaku L
$L_{Aeq,T}$	(dB)	- ekvivalentní hladina akustického tlaku A
$\eta_i$	(-)	- relativní četnost výskytu hladiny akustického tlaku A
$L_{pAi}$	(dB)	- střední hladina akustického tlaku A v i-tém intervalu
$R_a$	(-)	- drsnost povrchu
$LAFp$	(dB)	- hladina akustického tlaku pro váhový filtr A

### 9.2 Zkratky

LCF	- low coefficient friction
TOR	- top-of-rail
HPF	- high positive friction
VHPF	- very high positive friction
FMA	- friction modifier A



FMB	- friction modifier B
SPL	- sound pressure level
PC	- personal computer
HRC	- zkouška tvrdosti podle Rockwella
B	- bentonit
T	- mastek
Z	- oxid zinečnatý
M	- disulfid molybdenu
max.	- maximální hodnota
min.	- minimální hodnota

## 10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Názvosloví kola (modrá) a kolejnice (šedá) [2].....	15
Obr. 2-2 Trakční křivka [3] .....	17
Obr. 2-3 Kontaktní plochy vhodné pro nanášení modifikátoru tření [1] .....	18
Obr. 2-4 Příklad složení modifikátoru tření v hm% .....	20
Obr. 2-5 Hodnoty koeficientu adheze za suchých podmínek při 1% skluzu [5].....	22
Obr. 2-6 Vliv modifikátorů tření na součinitel adheze [13] .....	23
Obr. 2-7 Adhezivní křivky samostatných komponent [2].....	23
Obr. 2-8 Závislost součinitele adheze na čase pro kompozici voda, bentonit a oxid zinku [2] .....	24
Obr. 2-9 Mini traction machine [12].....	25
Obr. 2-10 Schéma dvoudiskového zařízení [13].....	25
Obr. 2-11 Zařízení životní velikosti [14].....	26
Obr. 2-12 Slyšitelné pásmo zvuku [7].....	27
Obr. 2-13 Ekvivalentní hladina akustického tlaku [8] .....	28
Obr. 2-14 Vliv úhlu náběhu a modifikátoru tření na hladinu akustického tlaku [13].....	30
Obr. 2-15 Velikost součinitele adheze a akustického tlaku při aplikaci 3 $\mu$ l modifikátoru [13] .....	30
Obr. 2-16 Efekt množství modifikátoru tření na hladinu akustického tlaku [15] .....	31
Obr. 4-1 Experimentální zařízení .....	34
Obr. 4-2 a) Mikrofon the t.bone MM-1 b) zvuková karta Focusrite Scarlett 2i2 [16][17].	36
Obr. 4-3 Pozice mikrofону .....	36
Obr. 4-4 Ukázka aplikace modifikátoru tření.....	39
Obr. 5-1 Trakční křivky pro úhel náběhu 0° a 4° .....	40
Obr. 5-2 a) Po vyčištění vodou při záběhu b) Po vyčištění papírovou utěrkou a acetonem	41
Obr. 5-3 Vliv použitého množství kompozice B (7,5 %) + T (7,5 %) na součinitel adheze .....	41
Obr. 5-4 Součinitele adheze dvousložkových kompozic (mokrý film).....	42
Obr. 5-5 Součinitel adheze dvousložkových kompozic (suchý film) .....	43
Obr. 5-6 Hladina akustického tlaku pro dvousložkové kompozice (mokrý film).....	43

Obr. 5-7 Součinitele adheze pro tříšložkové kompozice .....	44
Obr. 5-8 Hladiny akustického tlaku pro tříšložkové kompozice.....	45
Obr. 5-9 Velikost součinitele adheze pro čtyřšložkové kompozice (mokrý film) .....	46
Obr. 5-10 Velikost součinitele adheze pro čtyřšložkové kompozice (suchý film) .....	46
Obr. 5-11 Hladina akustického tlaku pro čtyřšložkové kompozice (mokrý film) .....	47
Obr. 5-12 Hladina akustického tlaku pro čtyřšložkové kompozice (suchý film) .....	47
Obr. 5-13 Korelační diagram pro suchý film B+Z+M 5.....	49
Obr. 5-14 Opakovatelnost součinitele adheze při použití kompozice B+T+M (2 %) .....	49
Obr. 5-15 Opakovatelnost hladiny akustického tlaku při použití kompozice B+T+M (2 %) .....	50

## 11 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Parametry experimentálního zařízení.....	35
Tab. 2 Zvolené parametry experimentu.....	35
Tab. 3 Složení vybraných kompozic.....	38
Tab. 4 Odpovídající hodnoty celkového skluzu pro pevně daný skluz na motorech při úhlu náběhu $4^\circ$ .....	40
Tab. 5 Medián, minimální a maximální hodnota akustického tlaku pro dvousložkové kompozice.....	44
Tab. 6 Medián, minimální a maximální hodnota akustického tlaku pro tříložkové kompozice.....	45
Tab. 7 Medián, maximální a minimální hodnota akustického tlaku pro čtyřložkové modifikátory.....	48
Tab. 8 Pearsonův korelační koeficient pro moký film .....	48
Tab. 9 Pearsonův korelační koeficient pro suchý film .....	48

## 12 SEZNAM PŘÍLOH

<b>Příloha 1</b>	Laboratorní protokol
<b>Příloha 2</b>	Digitální data