



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

TUHÉ MODIFIKÁTORY TŘENÍ PRO KOLEJOVOU DOPRAVU

SOLID STICK FRICTION MODIFIERS FOR RAIL TRANSPORT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Andrej Ondák

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Radovan Galas, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Bc. Andrej Ondák
Studijní program:	Konstrukční inženýrství
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Radovan Galas, 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:

Tuhé modifikátory tření pro kolejovou dopravu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Tuhé modifikátory tření jsou v provozu aplikovány na kola kolejových vozidel za účelem redukce hluku, opotřebení a rizika vykolejení. Při nevhodném složení a nevhodné aplikaci produktů může dojít ke kompletnímu odizolování povrchu kola a kolejnice. Tento nežádoucí stav znemožňuje detekci vozidla na trati, což může vést k vážným dopravním nehodám.

Typ práce: výzkumná

Výstup práce: publikační výsledek (J, D), aplikovaný výsledek (Fužit, Fprum, Gprot, Gfunk, R)

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je objasnění vlivu aplikačních parametrů tuhých modifikátorů tření na jejich třecí výkonnost. Vybrané kompozice budou následně studovány z hlediska spotřeby a měrné konduktivity.

Díličí cíle diplomové práce:

- provést analýzu trhu a rešerši vědeckých publikací,
- navrhnout, sestavit a zprovoznit zařízení pro stanovení spotřeby tuhých modifikátorů tření,
- navrhnout metodologii experimentu pro hodnocení trakce, měrné konduktivity a spotřeby,
- realizace experimentů a analýza výsledků,
- příprava podkladů pro publikaci.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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:

Wheel-rail interface handbook. 1st pub. Editor R. Lewis, U. Olofsson. Cambridge: Woodhead, 2009, xxii, 842 s. Woodhead publishing in mechanical engineering. ISBN 978-1-84569-412-8.

LEWIS, R.; E.A GALLARDO; J. COTTER et al. The effect of friction modifiers on wheel/rail isolation. *Wear*. 2011, 271(1-2), 71-77.

HARMON, M. a R. LEWIS. Review of top of rail friction modifier tribology. *Tribology – Materials, Surfaces and Interfaces*, 2016, 10, 150-162.

STOCK, R., L. STANLAKE, C. HARDWICK et al. Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application. *Wear*, 2016, 366–367, 225-232.

SONG, J.; L. SHI; H.H. DING et al. Effects of solid friction modifier on friction and rolling contact fatigue damage of wheel-rail surfaces. *Friction*. 2022, 10(4), 597-607.

GALAS, R.; S. SKURKA; M. VALENA et al. A benchmarking methodology for top-of-rail products. *Tribology International*. 2023, 189.

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

Predložená práca sa zaoberá tuhými modifikátormi trenia, čo sú látky, ktoré majú za úlohu znižovať trenie kontaktu kolies koľajových vozidiel, čo prináša zníženie opotrebovania a redukciu hluku z kontaktu. Aby efektívnosť systému bola čo najvyššia, spotreba materiálu musí byť minimálna. Pri aplikácii tuhých modifikátorov trenia existuje nebezpečenstvo, že dôjde k izolácii kontaktu, čo je nežiadúci efekt vzhľadom na traťové systémy. Sú známe pozitíva aj negatíva danej technológie, avšak bez hlbšej súvislosti s aplikačnými parametrami. Experimentálna časť práce je preto zameraná na stanovenie vplyvu aplikácie na výkonnosť tuhých modifikátorov trenia. Práca je tiež zameraná na vplyv budiacej frekvencie na impedanciu kontaktu a na spotrebu samotných kompozícií. Výsledok výskumu ukázal, že aplikačné parametre silno ovplyvňujú výkonnosť tuhých kompozícií. Bolo tiež zistené, že modifikátor trenia má tendenciu ulpievať na povrch telesa, na ktoré je aplikovaný, a nedochádza tak k jeho prenosu na druhé teleso. Naopak bolo zistené, že impedancia kontaktu nie je závislá na budiacej frekvencii. Vývojová časť práce je venovaná návrhu aplikátora tuhých kompozícií a zariadeniu na meranie impedancie a spotreby.

KLÍČOVÁ SLOVA

Top-of-rail modifikátor, solid stick, parametre aplikácie, HPF, LCF, impedancia

ABSTRACT

The present work deals with solid friction modifiers, which are substances that have the task of reducing the contact friction of the wheels of railroad vehicles, thus reducing wear and noise emission. In order to maximise the efficiency of the system, material consumption must be kept to a minimum. When solid friction modifiers are applied, there is a danger of isolation of the contact, which is an undesirable effect regarding track systems. At the moment, both the positives and the negatives of the technology are known, but without a deeper connection to application parameters. Therefore, the experimental part of the thesis is focused on determining the influence of application on the performance of rigid friction modifiers. The thesis also focuses on the effect of the working frequency of the track systems on the contact impedance and on the consumption of the compositions themselves. As a result of the research, the application parameters strongly influence the performance of the solid compositions. It was also observed that the friction modifier tends to adhere to the surface of the body, to which it is applied and thus there is no transfer to the other body. On the contrary, it was found that the contact impedance is independent of the working frequency. The development part of the thesis is dedicated to the design of a solid composition applicator and a device for measuring the impedance and consumption.

KEYWORDS

Top-of-rail modifier, solid stick, application parameters, HPF, LCF, impedance

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ONDÁK, Andrej. *Tuhé modifikátory tření pro kolejovou dopravu* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-17]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157849>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Radovan Galas.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto mieste by som rád poďakoval predovšetkým vedúcemu práce Ing. Radovanovi Galasovi Ph.D. za trpezlivý prístup a množstvo odborných rád, bez ktorých by táto práca vznikla len ťažko. Ďalej by som rád poďakoval rodine a známym za podporu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prehlasujem, že diplomovú prácu som vypracoval samostatne, pod odborným vedením Ing. Radovana Galasa Ph.D. Súčasne prehlasujem, že všetky zdroje obrazových a textových informácií, z ktorých som čerpal, sú riadne citované v zozname použitých zdrojov.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Rešeršné metódy	14
2.2	Kritická rešerš	15
2.2.1	Trenie v koľajovej doprave	15
2.2.2	Vplyv na trenie kontaktu	17
2.2.3	Aplikácia	18
2.2.4	Impedancia kontaktu	22
2.2.5	Spotreba modifikátorov	24
2.3	Zhrnutie hlavných zistení	27
2.4	Medzera v poznaní	28
3	CÍLE PRÁCE	29
3.1	Výskumné otázky	29
3.2	Ciele práce	29
3.3	Hypotézy	29
3.4	Vývojová časť práce	31
3.4.1	Aplikátor tuhých kompozícií	31
3.4.2	Zariadenie na meranie spotreby	31
4	MATERIÁL A METODY	32
4.1	Metodika	32
4.2	Experimentálne zariadenie a prístrojové vybavenie	33
4.2.1	MTM2 – Meranie trecej výkonnosti tuhých kompozícií	33
4.2.2	Zariadenie na aplikáciu tuhých kompozícií	33
4.2.3	Hodnotenie spotreby	34
4.2.4	Okrajová prístrojová technika	34
4.3	Materiál a testovacie podmienky	35
4.3.1	MTM2	35
4.3.2	ICta	35
4.4	Metódy	36
4.4.1	Časové testy	36
4.4.2	Trečia výkonnosť	37
4.4.3	Spotreba	40

4.4.4	Impedancia	40
4.5	Testované predikcie	41
4.5.1	Vplyv doby prítlaku a sily na súčiniteľ trenia	41
4.5.2	Impedancia kontaktu v závislosti na frekvencii napájania	41
5	VÝSLEDKY	42
5.1	Zariadenie na aplikáciu tuhých kompozícií	42
5.2	Zariadenie ICta	44
5.2.1	Zostava aplikátora	46
5.2.2	Zostava vretena	47
5.2.3	Čistiaca zostava	48
5.2.4	Prítlačná zostava	49
5.3	Testy parametrov aplikácie	50
5.3.1	Časové testy	50
5.3.2	Testy vrstvy modifikátora	53
5.3.3	Testy trecej výkonnosti	55
5.4	Testy spotreby	57
5.5	Testy impedancie	59
6	DISKUZE	60
6.1	Vývojová časť	60
6.1.1	Aplikátor tuhých kompozícií	60
6.1.2	Zariadenie ICta	61
6.2	Výskumná časť	63
6.2.1	Aplikačné parametre a trečia výkonnosť	63
6.2.2	Impedancia	66
6.2.3	Spotreba	68
7	ZÁVĚR	70
8	VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV	71
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	73
10	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	75
11	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	76
12	SEZNAM TABULEK	79

1 ÚVOD

Jedným z najekologickejších a najekonomickejších spôsobov osobnej či nákladnej dopravy je koľajová doprava. Aj napriek nesporným výhodám, trpí koľajová doprava istými obmedzeniami, ktoré limitujú efektivitu jej využitia. Medzi ne patrí predovšetkým výrazný hlukový prejav, ktorý znižuje komfort cestovania, ale aj života ľudí bývajúcich v blízkosti tratí. Taktiež výrazným negatívom tejto oblasti je značné opotrebovanie či už tratí, alebo samotných vozidiel, čo sa podpisuje na zvýšených výdavkoch na údržbu.

Riešením týchto problémov môže byť technológia friction managementu, pomocou ktorej je možné riadiť trecie podmienky v kontakte. Do tejto oblasti patria tuhé modifikátory trenia, ktoré podľa oblasti použitia znižujú úroveň súčiniteľa trenia pre temeno na úroveň 0,3 – 0,4 a menej ako 0,2 pre okolok koľajnice. Pri aplikácií TOR produktov, medzi ktoré tuhé modifikátory patria, môže dôjsť k premazaniu kontaktu, čo negatívne ovplyvňuje možnosti brzdenia a akcelerácie.

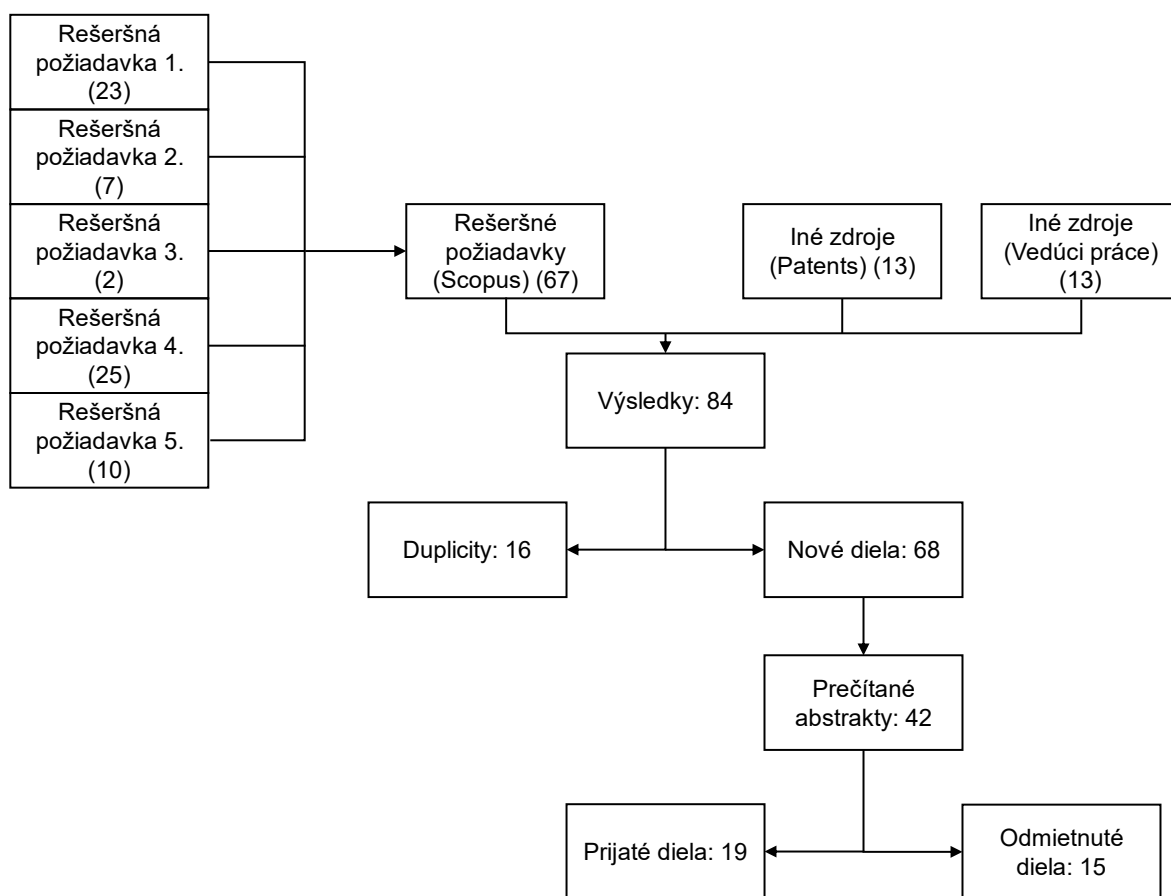
Tuhé modifikátory trenia sú látky zložené z nosnej matrice a maziva. Tieto látky sú pritláčané na koleso za pomoci zásobníkov umiestnených na podvozku koľajového vozidla. Odmazávaním tyčinky tuhého modifikátora dochádza k vytváraniu vrstvy maziva na povrchu kolesa, čo vedie k zníženiu súčiniteľa trenia. Na to môžu mať aplikačné parametre, ako je prítlačná sila a doba aplikácie, nemalý vplyv. Preto cieľom tejto diplomovej práce je stanoviť tento vplyv a študovať treciu výkonnosť za rôznych aplikačných podmienok.

Tým, že zásobníky na tyčinky sú umiestnené na podvozku vozidla, dopĺňanie náplne je komplikované. Preto je potrebné spotrebu tuhých modifikátorov optimalizovať, aby frekvencia dopĺňania bola čo najnižšia. Napriek tomu bola spotreba modifikátorov riešená veľmi málo. Preto je v rámci práce návrh a realizácia zariadenia na meranie spotreby a impedancie tuhých kompozícií na základe patentu US8445416.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Rešeršné metody

Zdroje pre kritickú rešerš boli vyhľadované na portáloch Scopus a Google patents. Časť zo zdrojov bola tiež dodaná vedúcim práce. Pre vyhľadávanie bolo vybraných 5 rešeršných dotazov, pre ktoré bolo celkovo nájdených 68 nových diel. Spomedzi nich bolo nakoniec v plnej dĺžke prečítaných 19 vid' Obr. 1.



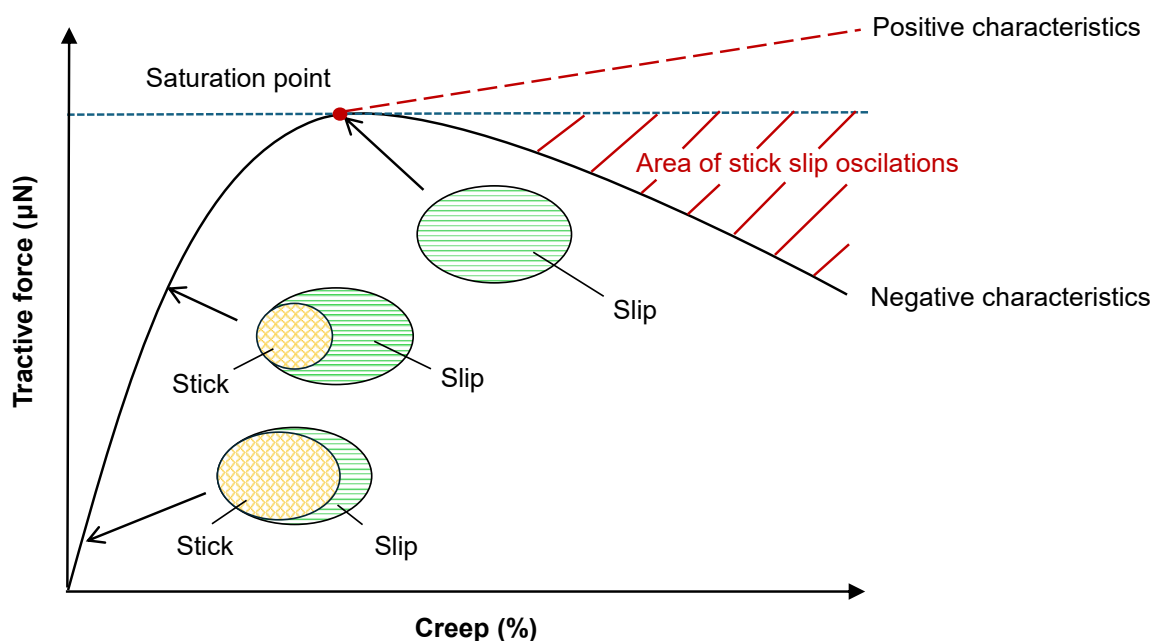
Obr. 1 Prizma diagram diplomovej práce

V samotných výskumných otázkach, ako aj v rešeršných dotazoch, bolo možné odpozorovať jednotlivé konkrétne oblasti, ktoré sú kľúčové pre túto diplomovú prácu. Preto aj samotný súčasný stav bude integrovať literatúru a poznatky zo spomenutých oblastí. Napriek tomu, že existuje pomerne veľa literatúry v oblasti friction managementu, väčšina z nej sa týka tekutých modifikátorov trenia. Iba minimálna časť z nájdených zdrojov bola venovaná tuhým modifikátorom.

2.2 Kritická rešerš

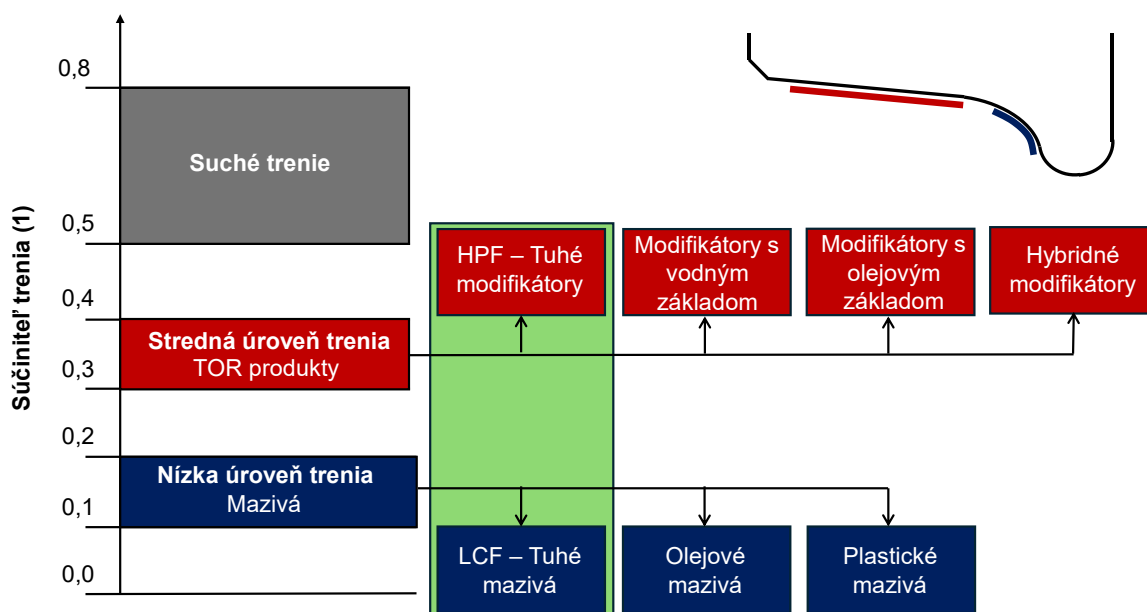
2.2.1 Trenie v koľajovej doprave

Pri odvaľovaní kolesa po koľajnici dochádza k prenosu trakčnej sily, ktorá umožňuje brzdenie a akceleráciu. Mierou prenosu tejto sily je adhézia, ktorá je podielom normálovej a tangenciálnej sily, pričom jej hodnota je závislá na sklze. S rastúcim sklzom rastie adhézia kontaktu, až do bodu saturácie. Tento bod je dosiahnutý, ak je veľkosť adhézie rovná veľkosti súčiniteľa trenia. Samotná kontaktná oblasť je rozdelená na podoblasti, kde dochádza k mikrozvaru a sklzovú podoblasť, kde dochádza k odtrhnutiu povrchov. Pri saturácii kontaktu dôjde k rozšíreniu sklzovej podoblasti na celú kontaktnú oblasť a dochádza k preklzu kolies súpravy. Mechanika kontaktu vie byť silno ovplyvnená vrstvou tretieho materiálu, a to či už prirodzenými kontaminantami, alebo umelými látkami pridávanými za určitým cieľom. Práve mechanizmom úpravy trecích podmienok pomocou rôznych kompozícií, je možné pozitívne zasahovať do prejavov koľajového vozidla [1].



Obr. 2 Trakčná krivka [1]

Celá oblasť zahrňujúca túto technológiu sa volá friction management. Do friction managementu patria látky, ktoré vedia svojou prítomnosťou v kontakte meniť trecie podmienky. Tieto látky delíme na mazivá, TOR produkty a friction enhancers. Z tohto hľadiska sa táto oblasť delí podľa toho, kam sú vyššie spomenuté produkty nanášané. Mazivá sú spravidla nanášané na oblasť okolku, kde je požadovaná čo najnižšia možná úroveň trenia, akú je možné dosiahnuť. Naopak TOR produkty majú za úlohu udržať trenie na približne strednej úrovni, aby trenie nebolo príliš vysoké a zároveň, aby nekleslo príliš nízko. V prípade potenciálnych problémov s nízkou adhéziou sú používané friction enhancers, ako napríklad piesok [2].



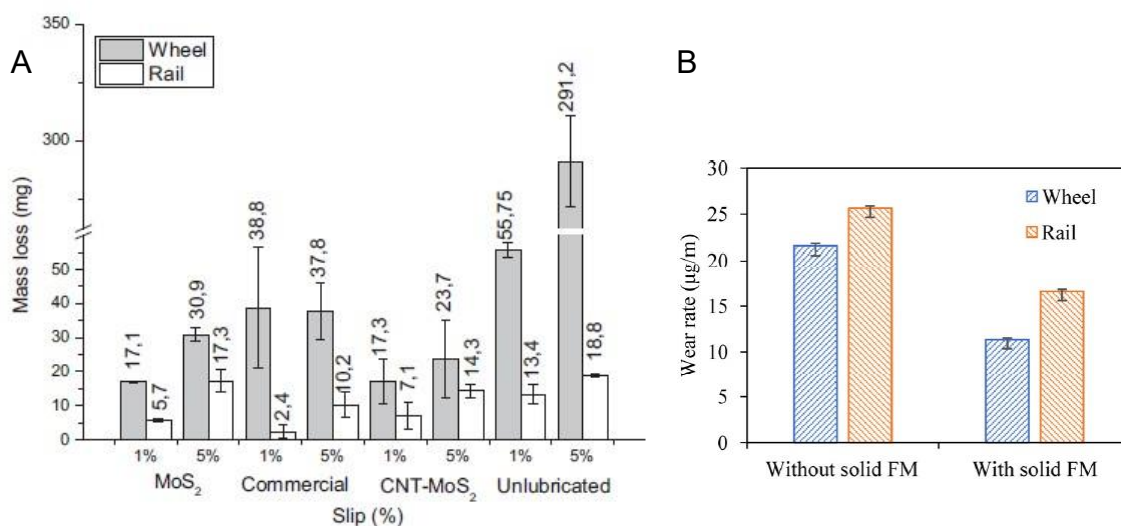
Obr. 3 Rozdelenie oblasti friction managementu [2]

Látky friction managementu môžu byť rôzneho charakteru, a to buď tekuté, alebo tuhé. Tekuté modifikátory podľa zloženia môžu byť na olejovom alebo vodnom základe, prípadne ako hybridné. Olejové modifikátory fungujú na priamom ovplyvnení trenia vytvorením medzného až zmiešaného režimu mazania v kontakte. Naopak modifikátory s vodným základom fungujú na princípe vody ako transmisného média, ktorá sa v kontaktných podmienkach odparí a iba nesie častice modifikátora [2],[3]. Ako alternatíva k tekutým produktom sú tuhé modifikátory trenia. Podľa požadovanej úrovne trenia vieme rozdeliť tuhé modifikátory na skupinu HPF a LCF. Materiály HPF cielia na strednú úroveň trenia, konkrétne súčiniteľ trenia 0,3 až 0,4 a naopak materiály LCF cielia na súčiniteľ trenia menší ako 0,2. Tieto látky sú vo forme tyčínok, ktoré geometricky do seba zapadajú. Toto riešenie umožňuje plné využitie materiálu po tom, ako dôjde k jeho väčšinovému spotrebovaniu. Tieto tyčinky sú primárne zložené z dvoch komponent. Zo základnej matrice, ktorú tvorí spravidla polymér (20-80%), a potom materiál aktívne ovplyvňujúci trenie (5-75%) [4]. Hmotnostné zlomky, ako aj jednotlivé zloženia, sa však môžu meniť v závislosti či už na použitej matrici, alebo na samotnom aktívnom materiáli. V dnešnej dobe je tiež snaha používať ekologické

matrice na prírodnej báze, ktoré sú vo voľnom prostredí jednoduchšie odbúrateľné. Čo možno považovať za potenciálne smerovanie, je využitie CNT-nanotrubic primiešaných do polymérnej matice [5]. Ďalší text bude zameraný primárne práve na tuhé modifikátory trenia.

2.2.2 Vplyv na trenie kontaktu

Ako už bolo naznačené vyššie, tuhé modifikátory trenia majú za úlohu v prvom rade znížiť trenie na požadovanú úroveň vid' Obr. 4. Bolo dokázané, že použitím modifikátorov trenia je možné znížiť opotrebovanie kontaktnej dvojice, a tým zvýšiť jej životnosť [6], [7], [8]. V tomto smere dochádza k pozitívnemu vplyvu na plasticky deformovanú oblasť [6]. Na rozdiel od tekutých modifikátorov nedochádza ku kvapalinovému tlakovaniu trhlín, a tým k rozvoju kontaktnej únavy, čo predstavuje istú výhodu voči ostatným druhom modifikátorov trenia.



Obr. 4 Zníženie opotrebovania kontaktnej dvojice a) [5] b) [6]

Okrem vplyvu na úroveň trenia majú modifikátory trenia za úlohu transformovať trakčnú krivku tak, aby nevykazovala klesajúci charakter, vid' Obr. 2. Trakčná krivka je závislosť súčiniteľa trenia na sklze v kontakte (podielu relatívnej rýchlosti povrchov kontaktných telies). Pri suchom kontakte bez aplikovaného modifikátora môže táto krivka po dosiahnutí bodu saturácie dostať klesajúci charakter. V tomto prípade kontakt môže začať oscilovať medzi dvoma stavmi, pričom tento fenomén označujeme ako stick-slip oscilácie. Tieto oscilácie sú sprevádzané emitovaním hluku postrehnuteľným predovšetkým v miestach trate, kde je vyššia úroveň sklzu (napr. traťové oblúky, točne a pod.) [9]. Výsledkom týchto oscilácií je nepríjemný hluk, ktorý môže byť sprevádzaný aj vlnkovitým poškodením koľajníc. Ako vhodné riešenie sa ukázalo použitie modifikátorov trenia, ktoré transformujú trakčnú krivku na neklesavú, čím zamedzia stick-slip osciláciám a negatívam s nimi spojenými [10].

2.2.3 Aplikácia

Aplikácia v praxi

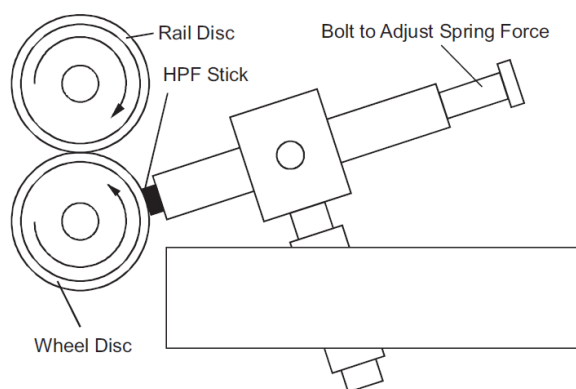
Aby bolo možné dostať modifikátor trenia do kontaktu, je potrebné ho na trecie povrchy aplikovať. Aplikácia tuhých modifikátorov trenia je zásadne odlišná od ostatných TOR produktov. Zatiaľ čo väčšina produktov je tekutých, tuhé modifikátory vyžadujú odlišný prístup. Aplikácia prebieha deponovaním tenkej vrstvy na koleso pomocou prítlačnej sily [2]. Aplikátor tak aj zásobník s náplňou patria do on-board systémov, čo znamená, že sú namontované priamo na koľajové vozidlo. Na koľajovom vozidle sú umiestnené na podvozku tak, aby čo najlepšie umožnili aplikáciu a zároveň aby svojou zástavbou nezaberali príliš mnoho miesta pre iné systémy. Pre obsluhu musia byť zásobníky ľahko dostupné a doplnenie tyčínok rýchle a jednoduché. Najbežnejšou konštrukciou sú lineárne aplikátory, ktoré udržia viacero tyčínok v rade za sebou. Integrálnou časťou celého zásobníka, ktorý je možné si predstaviť ako dutý profil, je prítlačný element. V praxi sa na vyvedenie prítlačnej sily využíva skrutná pružina vid' Obr. 5 - A [12] alebo stlačený vzduch vid' Obr. 5 - B [11]. V oboch variantoch prítlaku je regulácia prítlaku len veľmi obmedzená a výsledná vyvedená sila len približná.



Obr. 5 Spôsoby aplikácie v praxi a) skrutnou pružinou[13] b) stlačeným vzduchom [14]

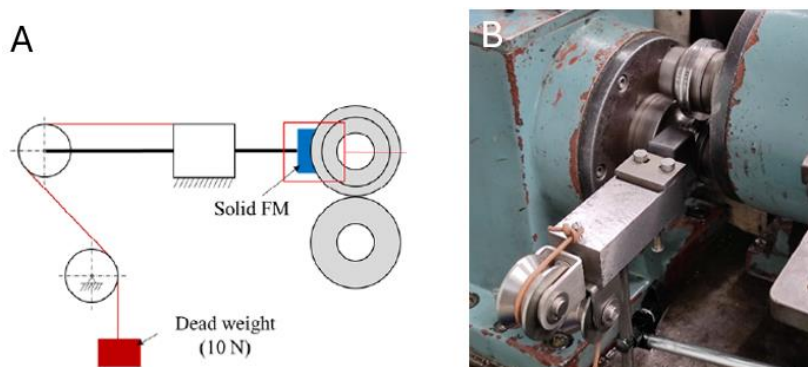
Laboratórny prístup

Naopak pri laboratórnych testoch odpadajú požiadavky na veľkú kapacitu zásobníka a jednoduchú obsluhu. Pri testovaní sa hľadá predovšetkým na presnosť prítlačnej sily a opakovateľnosti merania. Uverejnené boli laboratórne aplikátory iba v 2 typoch konštrukcie. Prvým typom je aplikátor poháňaný vinutou tlačnou pružinou s prítlakom regulovaným pomocou šróbu [15].



Obr. 6 Pružinový aplikátor HPF[15]

Druhým typom konštrukcie je aplikátor s gravitačným zaťažením. V tejto konfigurácii je sila od závažia prenášaná lankom a sústavou kladiek [6]. Výhodou tohto systému je presná sila prítlaku vykúpená väčšou zložitosťou a rizikom vzniku možných oscilácií.



Obr. 7 Gravitačný aplikátor a) Schéma b) V pracovnej polohe [6]

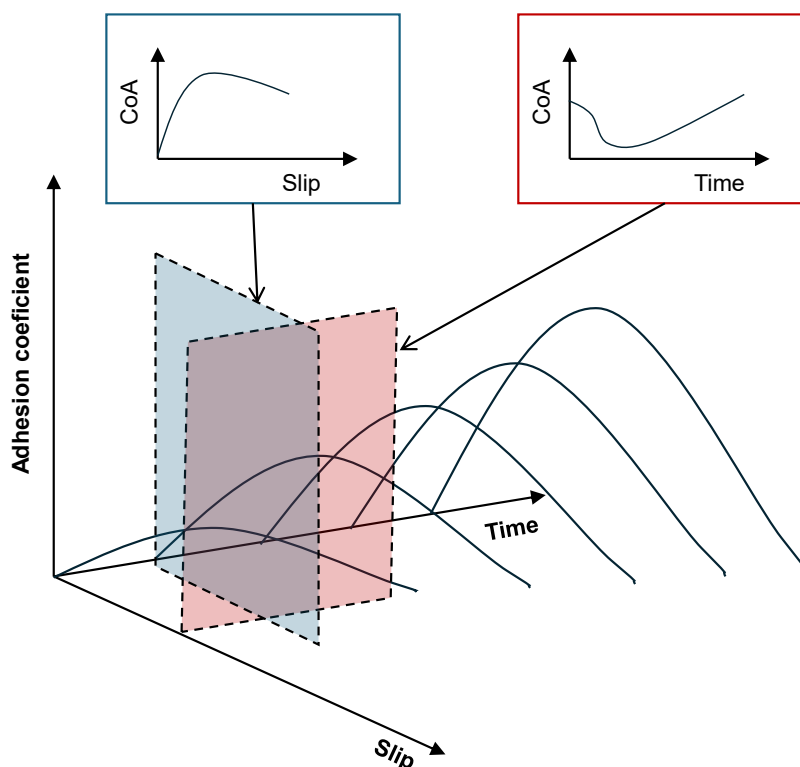
Druhy testov

Kontakt kolesa a koľajnice je zložitý systém, do ktorého vchádza veľa parametrov, a preto na jeho popis sa používajú časové a trakčné testy. Testovanie prebieha v laboratórnych podmienkach na tribometroch v konfigurácii twin – disc a ball – disc .

Trakčné testy dávajú do súvisu súčiniteľ trenia na úrovni sklzu v kontakte (0-20%). Tento druh testu dobre popisuje chovanie modifikátora pri rôznych úrovniach sklzu, pričom toto chovanie odpovedá charakteru kontaktu, napr. pri brzdení či akcelerácii vozidla v skutočnosti. Trakčné testy však nedávajú informáciu o vývoji trenia v čase, a tým poskytujú iba obmedzenú mieru vhl'adu do problematiky.

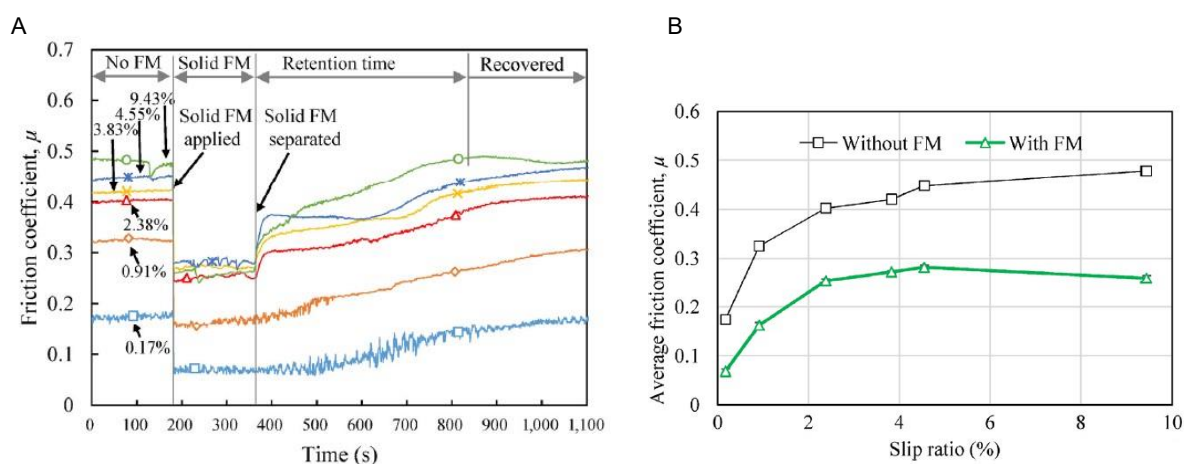
Na druhú stranu, časové testy dávajú do vz'ahu súčiniteľ trenia a čas pri konštantnom sklze. V tomto prípade sú dobre opísateľné jednotlivé udalosti na časovej osi, ako je aplikácia, prepady trenia a podobne. Nevýhodou týchto testov je absencia variovania sklzu, čo pri potrebe komplexného popisu chovania modifikátora trenia vedie nevyhnutne k nárastu počtu

testov pri rôznych úrovniach sklzu vid' Obr. 9. Výsledky časových testov práve z toho dôvodu nemusia vypovedať o skutočnom chovaní kontaktu v reálnych podmienkach [1].



Obr. 8 Spojitosť trakčných a časových kriviek [1]

Alternatívou k popisu chovania modifikátorov trenia môže byť opakovanie trakčných testov. Na tomto základe je postavená metodika OLF, pri ktorej sa opakovane vyhodnocujú trakčné testy, čím dochádza k rýchlejšiemu vyhladovaniu kontaktu. To vedie k lepšiemu popisu systém kontaktu v rovine časovej aj sklzovej [17].

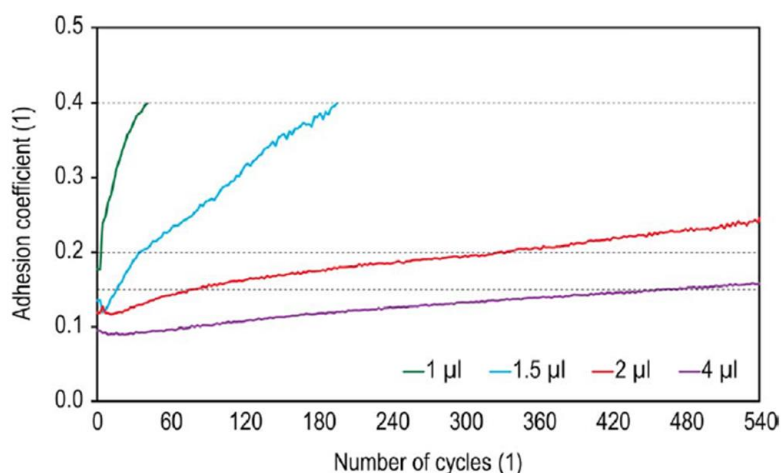


Obr. 9 a) Opakovanie časových testov pri rôznej úrovni sklzu [6] b) Porovnanie trakčný testov suchého kontaktu a kontaktu s tuhým modifikátorom trenia [6]

Na popis a porovnanie chovania kontaktu sú používané veličiny *retentivita* a *carry distance*. Retentivita predstavuje dobu, po ktorú si udržuje kontakt dané vlastnosti. Naopak *carry distance* predstavuje prejdenú vzdialenosť, pri ktorej bol kontakt ovplyvňovaný modifikátorom trenia [16], [17].

Aplikačné parametre

Trecia výkonnosť tekutých modifikátorov trenia je silno závislá na aplikovanom množstve vid' Obr. 10. Pri nízkom množstve v kontakte je efekt zanedbateľný a ovplyvnená dráha príliš krátka [16]. Naopak, aplikáciou príliš vysokého množstva môže dôjsť k premazaniu kontaktu, a tým k ohrozeniu bezpečnosti z dôvodu nedostatku trakcie v prípade nutnosti brzdenia [17].



Obr. 10 Závislosť počtu cyklov do dosiahnutia hraničnej hodnoty od množstva aplikovaného tekutého modifikátoru [17]

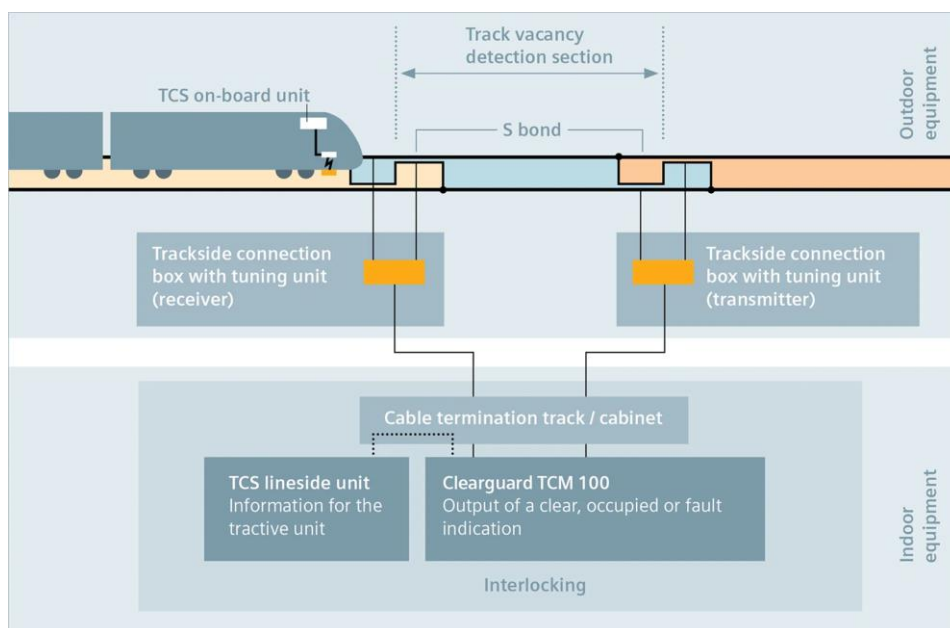
Naopak, aplikačné parametre tuhých modifikátorov neboli komplexnejšie skúmané v žiadnej literatúre. Ako obdobu aplikovaného množstva pri tekutých modifikátoroch je možné brať aplikačné parametre pre tuhé modifikátory. Pod aplikačnými parametrami sa skrýva aplikačná sila, celková doba aplikácie a veľkosť vzorku. Aj napriek tomu, že tejto tematike nebola doteraz venovaná pozornosť. Takmer každá práca, ktorá sa zaoberala tuhými modifikátormi trenia má uvedené aspoň základné okrajové podmienky testov, do ktorých aplikačné parametre patria. Testovanie v plnej veľkosti by bolo príliš nákladné a náročné, a preto boli využité vzorky zmenšené, aby korešpondovali s mierkou daných testov. V nájdených zdrojoch bola aplikačná sila vyvodená v hodnotách nižších desiatok N. Všetky tieto sily boli testované pre rozmery vzorky 10 x10 mm (priemer 10 mm) [4], [6], [7], [15].

Tab. 1 Aplikačné parametre z literatúry [4], [6], [7], [15]

Autor	Sila (N)	Rozmer (mm)	Čas (s)
SONG	10,0	10x10	180
LEWIS	15,0	Φ10	-
YANG	16,5	-	-
COTTER (US8445416)	15,6	-	3600

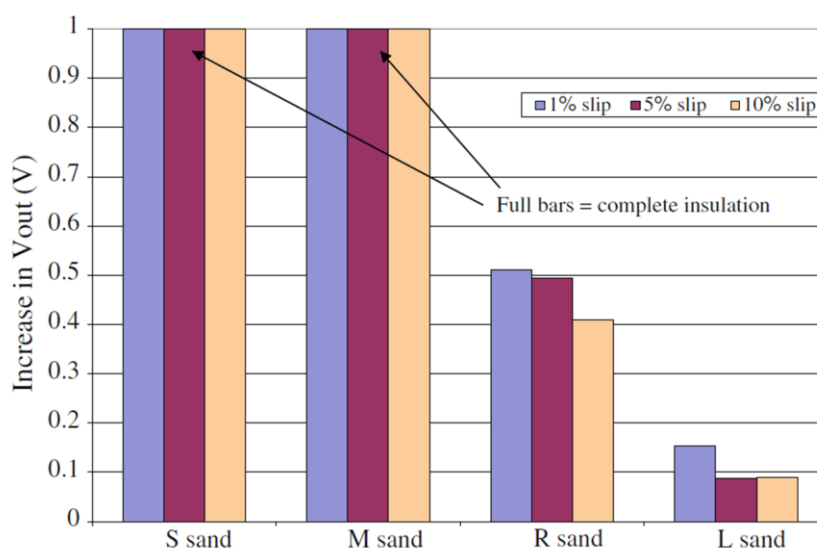
2.2.4 Impedancia kontaktu

O bezpečnosť a plynulosť prevádzky železničných tratí, či už u nás, alebo v Európe sa stará systém monitorovania vlakov ETCS. Súčasťou ETCS je systém detegovania obsadenosti traťových úsekov. Systémy monitorovania obsadenosti traťových úsekov fungujú na princípe zachytenia skratovania koľajníc medzi sebou pri prechode súpravy úsekom (napr. TCM 100). Tento systém je zaradený do skupiny SIL 4 čo znamená, že patrí do najvyššej triedy integrity zabezpečovacích systémov [18]. Preto je nutné, aby aplikácia akejkoľvek kompozície do kontaktu nemala vplyv na funkciu týchto systémov, a aby nedošlo k narušeniu integrity daného systému.



Obr. 11 Systém TCM 100 [18]

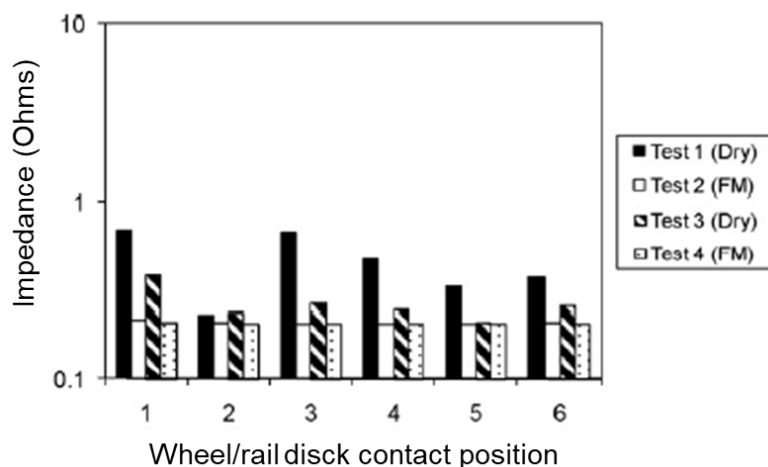
Detekcia je však možná iba v prípade, že dôjde k vodivému spojeniu medzi kolesami súpravy a traťou. Pri aplikácii piesku či modifikátorov trenia dochádza k vnášaniu materiálu medzi kolesá a trať, a preto je nutné z objektívnych dôvodov skúmať ich vplyv na vodivosť kontaktu. Pri experimentálnom testovaní bolo zistené, že piesok, ktorý slúži na zvýšenie adhézie vozidla v nepriaznivých podmienkach, spôsobuje pri vysokých dávkovaniach s jemnou zrnitosťou izoláciu kontaktu [19]. S tým bolo rovnako spojené zistenie, že pri vyšších dávkovaniach piesku jemnej zrnitosti tiež dochádza k prepadu adhézie [19]. V tejto štúdii však nebola riešená samotná frekvencia napájacieho napätia na samotnú impedanciu kontaktu.



Obr. 12 Izolácia kontaktu pri aplikácií piesku [19]

Bolo zistené, že pri testovacej frekvencii 125 Hz a 6 kHz, k prepadu konduktivity pri aplikácii modifikátora nedôjde [15], [20]. Zaujímavým zistením bolo, že pri frekvencií 6 kHz bola pozorovaná vyššia impedancia kontaktu, avšak tento jav nebol hlbšie skúmaný [20]. Bolo tiež zistené, že najvyššia impedancia kontaktu býva dosiahnutá pri nulovom sklze. Toto pozorovanie je vysvetľované absenciou šmykových síl, ktoré zbavujú povrch oxidov a nečistôt, a tým zlepšujú jeho elektrické vlastnosti [20]. Bolo tiež experimentálne overené, že impedancia kontaktu nezávisí na strednej hodnote napájacieho napätia pri konštantnej frekvencii napájacieho napätia 8 kHz [15].

Podsystémy ETCS, ako je napríklad TCM 100, môžu pracovať v celej škále frekvencií od 4,75 kHz až do frekvencie 16,5 kHz [18]. Vplyv samotnej frekvencie na výslednú impedanciu kontaktu nebol dopodrobna skúmaný v žiadnej literatúre.

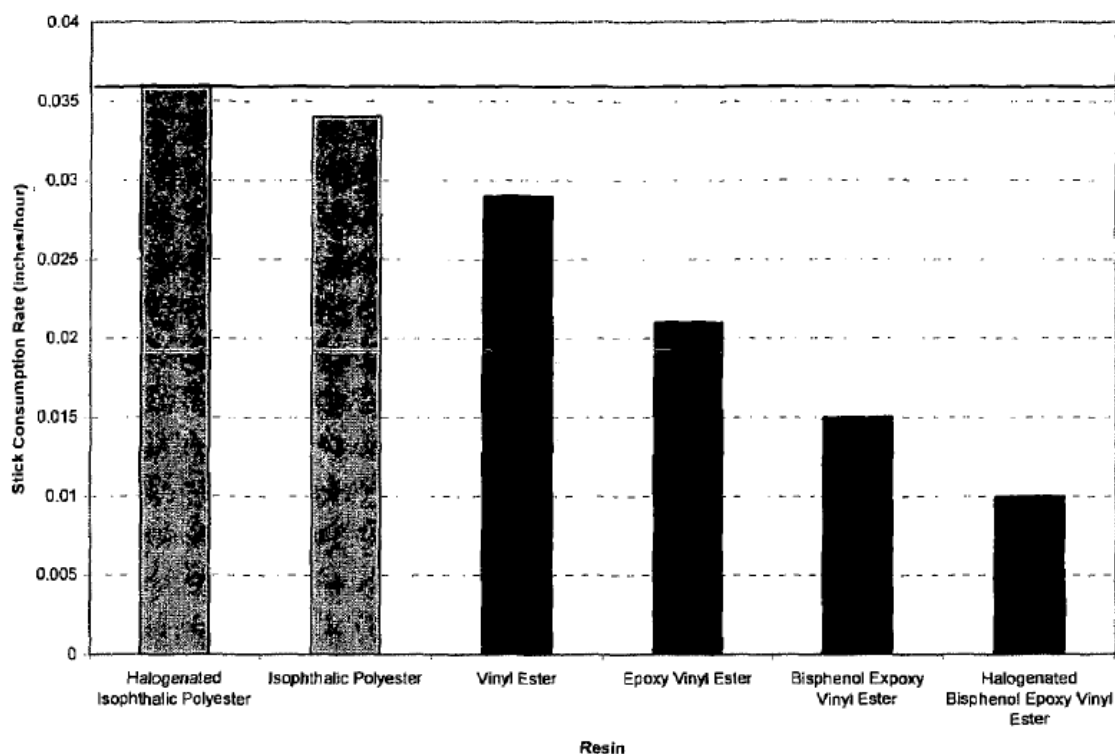


Obr. 13 Rozdiel v impedancii medzi čistým kontaktom a aplikovaným modifikátorom [15]

2.2.5 Spotreba modifikátorov

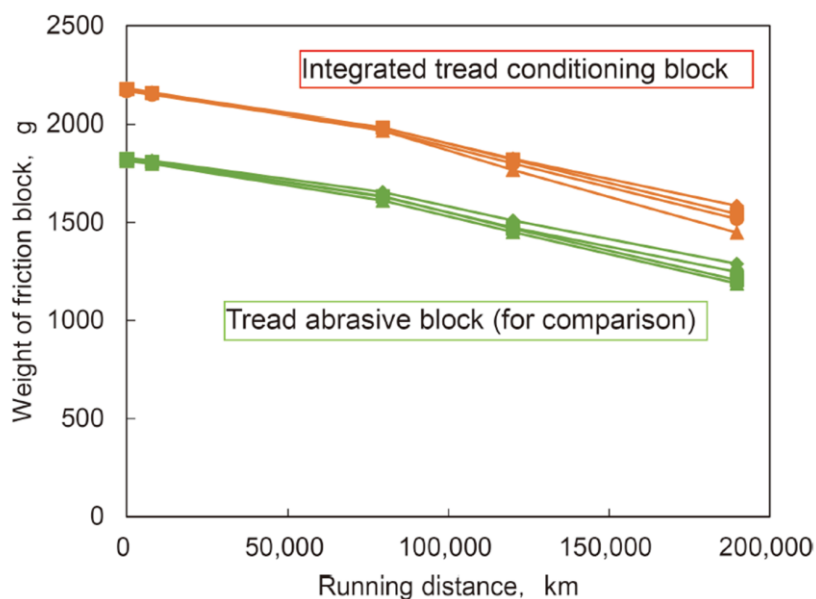
Napriek nesporným výhodám tuhých modifikátorov trenia, limitáciou tejto technológie je spotreba tyčínok. Aby bolo možné udržiavať systém friction managementu v prevádzke, je potrebné pravidelne tento materiál dopĺňať, čo zvyšuje celkovú cenu technológie. To vedie k vývoju kompozícií s čo najnižšou mierou spotreby. Oproti tekutým modifikátorom, ktorých spotrebu je možné účinne kontrolovať vďaka dávkovaniu a senzorom v nádrži, nevieme spotrebu tuhých modifikátorov dobre odhadnúť. V laboratórnom prostredí je možné spotrebu merať hmotnostným úbytkom medzi stavmi pred a po aplikácii. Avšak tento prístup len do obmedzenej miery reprezentuje stav v praxi.

V tomto smere Cotter et al prišiel s metodikou a testovacím zariadením na určenie spotreby tuhých kompozícií. Nepriamym dopočítavaním hmotnostného úbytku jednotlivých kompozícií a pozorovaním spotreby tyčínok v držiakoch koľajových vozidiel v praxi stanovil mernú spotrebu pre vybrané zloženia tuhých modifikátorov trenia vid' Obr. 15 [4], [8]. Takto stanovená spotreba bola však vyhodnotená iba pre konkrétne zloženia kompozícií, pričom tieto zloženia nepostihujú dnešný trend výroby modifikátorov trenia z ekologicky odbúrateľných materiálov.

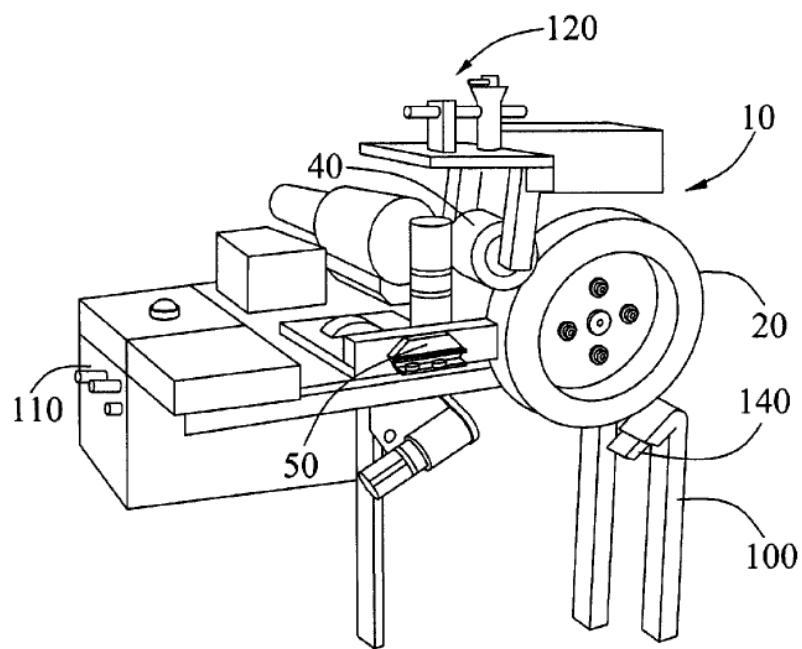


Obr. 15 Merná spotreba základných matric tuhých modifikátorov [4]

Samotné zariadenie STA (stick testing apparatus) vytvorené v rámci patentu funguje na princípe rotujúceho disku, na ktorý je odmazávaná kompozícia (viď Obr. 16) [4]. O čistenie povrchu sa stará prítlačné koleso s behúňom z chlórbutylovej gummy, pričom do kontaktu je prispávaný piesok s priemerom zrn 300 μm o množstve 80 g/h. O prítlak vzorku sa stará pružina silou 15,6 N, pričom odčítanie posunutia je realizované každých 20 minút po dobu jednej hodiny.



Obr. 14 Spotreba tyčinky pneumaticky hnaného systému [8]



Obr. 16 Zariadenie STA [4]

2.3 Zhrnutie hlavných zistení

V koľajovej doprave je na vzostupe technológia systémov modifikácie trenia, ktorá pomocou látok na rôznej báze vedie k znižovaniu hluku a opotrebovania [2], [3]. Tieto látky sú delené podľa skupenstva na tuhé a tekuté, pričom pre túto prácu sú kľúčové práve tie tuhé. Tuhé modifikátory sú vo všeobecnosti zmesi polymérnej matrice a tuhého maziva, no táto zmes môže byť modifikovaná rôznymi prísadami zlepšujúcimi vlastnosti výsledného produktu, ako napríklad nanotrúbice [5]. Podľa úrovne trenia, ktorú majú zabezpečiť, sa delia na HPF a LCF kompozície. HPF (high positive friction) sú určené na temeno kolesa a majú udržať súčiniteľ trenia v rozmedzí 0,3 až 0,4. Naopak LCF (low coefficient of friction) sú určené na okolo, kde majú udržať súčiniteľ trenia okolo hodnoty 0,1.

Bolo zistené, že použitím modifikátorov trenia dochádza k zníženiu opotrebovania ako kolies, tak aj koľajníc [6]. Rovnako tuhé modifikátory dokážu účinne ovplyvňovať trenie v kontakte, aby nedošlo k stick slip osciláciám vedúcim k vlnkovitému opotrebovaniu [10]. Pri tekutých modifikátoroch trenia bola zistená závislosť trecej výkonnosti a aplikovaného množstva. Pre tuhé modifikátory nebola žiadna podobná štúdia vykonávaná. V praxi sú tuhé modifikátory bežne aplikované pomocou pružín, prípadne stlačeného vzduchu. V laboratórnych podmienkach dominuje pružinový pohon, avšak nájdu sa aj realizácie s gravitačným zaťažovaním. Pre popis chovania tuhých modifikátorov sa bežne používajú časové testy, ktorých výsledkom je retentivita – čas, ktorý kontakt strávil v danej oblasti. Alternatívne hodnotenie modifikátorov sa realizuje pomocou trakčných testov, pri ktoré vyššími úrovňami sklzu urýchľujú experimenty. V realite však kontakt predstavuje zložitý problém, na ktorého hodnotenie dvojrozmerné testy nestačia. Preto eventuálne riešenie predstavuje OLF metodika, založená na opakovaní trakčných testov [17].

Pomerne široko bola skúmaná oblasť impedancie kontaktu a vplyvu tuhých látok na jej zmenu. Pri použití piesku o jemnej zrnitosti môže dochádzať k úplnej izolácii kontaktu [19]. To môže mať neblahé následky v zmysle znemožnenia funkčnosti zabezpečovacích systémov. Preto boli skúmané tuhé modifikátory trenia, pričom bolo zistené, že nedochádza k zvýšeniu impedancie / izolácii kontaktu po aplikácii [15]. Tieto testy boli vykonávané staticky za konštantnej frekvencie napájania. Avšak zabezpečovacie systémy fungujúce na princípe skratového prúdu pracujú s vysokými frekvenciami až do 17 kHz.

Tuhé modifikátory trenia sú aplikované on-board, teda počas jazdy na vozidle. Zásobníky pre tuhé modifikátory sú umiestnené na podvozku vozidla, čo robí dopĺňanie tyčíniek zložitejším. Preto je potrebné riešiť spotrebu tuhých kompozícií, aby bol tento úkon čo najmenej frekventovaný. Štúdií ktoré by sa touto témou zaoberali je však málo. Laboratórne bola spotreba riešená iba pre základné polymérne matrice [4].

2.4 Medzera v poznaní

V súčasnej dobe sú tekuté produkty friction managementu pomerne dobre popísané z hľadiska chovania, ako aj aplikácie. Naopak tuhé modifikátory trenia vykazujú vysoký potenciál z hľadiska redukcie opotrebovania a hluku, avšak preskúmané sú len veľmi málo. Výkonnosť tekutých modifikátorov je výrazne ovplyvnená aplikačnými parametrami, čo však nie je zatiaľ možné povedať o tuhých modifikátoroch, nakoľko žiaden výskum v tejto oblasti nebol uverejnený.

Riešená bola impedancia kontaktu po aplikácii tuhých kompozícií, pričom bolo zistené, že nedochádza k izolácii kontaktu. Avšak zabezpečovacie systémy pracujú na rôznych frekvenciách, pričom tento vplyv do uverejnených výskumov nebol zahrnutý. Všetky štúdie pracujú s fixnou frekvenciou, ktorá nemusí dostatočne odpovedať elektrickým vlastnostiam kontaktu v celom pracovnom rozsahu. Táto znalosť má širší presah v tom, že ak by kontakt s modifikátorom vykazoval kapacitný charakter, bolo by možné priamym odmeriavaním stanoviť hrúbku nanesej vrstvy.

Okrem spomenutých medzier vo výskume sa naskytá aj oblasť spotreby tuhých kompozícií. Pre spotrebiteľa by spotreba mala byť jedným z najkľúčovejších kritérií výberu vhodnej kompozície, no napriek tomu ju výrobcovia neuvádzajú. Okrem toho neexistuje jednotný spôsob jej hodnotenia okrem zariadenia experimentálneho zariadenia STA [4].

3 CÍLE PRÁCE

3.1 Výskumné otázky

O1: Ako závisí súčiniteľ trenia a hrúbka vrstvy na sile a dobe prítlaku tuhého modifikátora trenia?

O2: Akým spôsobom ovplyvní prítomnosť tuhého modifikátora schopnosť kontaktu vodiť s ohľadom na frekvenciu pracovného napätia zabezpečovacích systémov?

3.2 Ciele práce

Cieľom diplomovej práce je skúmať tuhé modifikátory trenia a vplyv aplikačných parametrov na ich chovanie. Súčasne budú tuhé modifikátory skúmané z hľadiska spotreby a mernej konduktivity kontaktu po aplikácií.

Dielčie ciele práce:

- Vývoj experimentálneho zariadenia na meranie spotreby a impedancie kontaktu ICTa
- Vývoj prípravku na aplikáciu tuhých modifikátorov pre zariadenie MTM2
- Experimentálny výskum tuhých modifikátorov trenia
- Analýza výsledkov
- Vyhodnotenie a príprava publikácie výsledkov

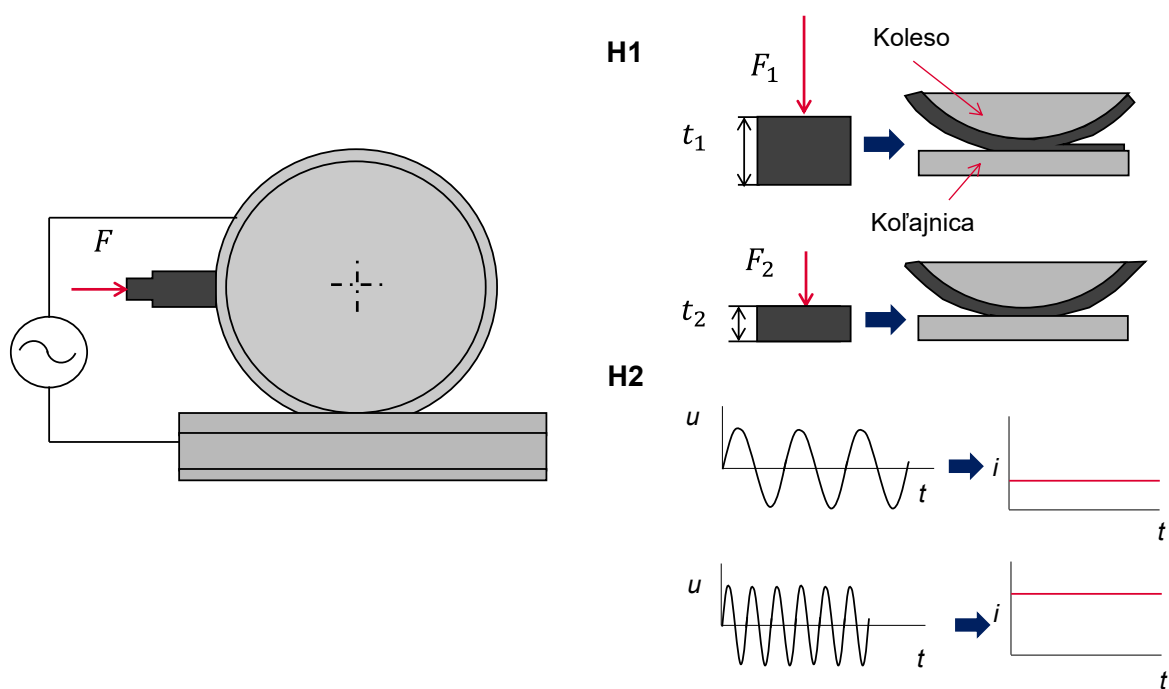
3.3 Hypotézy

H1: Kontinuálna vrstva modifikátora trenia o vyššej nominálnej hrúbke sa vytvorí pri vyšších silách prítlaku a dobe aplikácie. Pri vyššej sile prítlaku a dobe aplikácie bude stúpať retentivita. Po vytvorení vrstvy modifikátora dôjde k zníženiu trenia, pričom časť z nej sa bude prenášať na druhé kontaktné teleso, až kým nedôjde k jej úplnému odstráneniu z kontaktu vid' Obr. 17 - H1.

V literatúre boli hodnoty prítlaku uvedené 10 N s dobou prítlaku 3 minúty pri obvodových rýchlostiach do 0,41 m/s [6]. Avšak v žiadnej nájdennej literatúre nebol variovaný prítlak a doba aplikácie. Mechanizmus prenosu materiálu bol opísaný iba pre jeden konkrétny materiál s pridanými nanotrubicami. Pri aplikácii sa tuhý modifikátor abrazívne opotrebováva a tieto častice sú vnášané do kontaktu, kde pod tlakom vytvárajú vrstvu s nízkou šmykovou tuhosťou, čím znižujú trenie [5].

H2: Pre kontakt s aplikovaným tuhým modifikátorom existuje kritická frekvencia napájacieho napätia, kedy je impedancia najvyššia vid' Obr. 17 - H2.

V doterajších prácach bola impedancia kontaktu s modifikátorom trenia riešená iba pre jednu fixnú frekvenciu 2 kHz a 8 kHz, prípadne pre jednosmerný prúd [15]. Bolo zistené, že na impedanciu nemá vplyv napájacie napätie, naopak sklz v kontakte výrazne prispieva k zníženiu impedancie [15]. Avšak samotný vplyv frekvencie na impedanciu nebol zisťovaný. Pri sledovaní obsadenosti traťových úsekov však systémy TCM pracujú pri frekvenciách až 16,5 kHz [18]. V prípade, že kontakt s tuhým modifikátorom trenia vykazuje kapacitný charakter, môže dôjsť pri konkrétnej frekvencii k zvýšeniu impedancie natoľko, že obsadený traťový úsek bude vyhodnotený ako neobsadený.



Obr. 17 Znáozornenie hypotéz

3.4 Vývojová časť práce

V rámci diplomovej práce bolo potrebné vyvinúť experimentálny aparát, ktorý by umožnil kvalitne zhodnotiť vlastnosti tuhých modifikátorov trenia.

3.4.1 Aplikátor tuhých kompozícií

Pre tribometer MTM2 bolo nutné vyvinúť aplikátor, ktorý umožňuje opakovateľnú aplikáciu v rozmedzí síl 1 až 25 N. Taktiež je potrebné, aby bolo možné presne polohovať vzorku voči disku tribometra.

3.4.2 Zariadenie na meranie spotreby

Na stanovenie spotreby kompozícií a jej porovnanie voči už nameraným výsledkom bolo potrebné navrhnuť zariadenie vychádzajúce z patentu US8445416. Pre toto zariadenie vystali požiadavky presnosti a opakovateľnosti upnutia vzorku. Ďalej nastavenie obvodovej rýchlosti na 32 km/h a prítlaku vzorku do 50 N. Okrem aplikácie bolo potrebné zaistiť aj kontinuálne čistenie disku.

4 MATERIÁL A METODY

4.1 Metodika

Diplomová práca je rozdelená do dvoch častí, a to priemyselný výskum (modrou) a experimentálny vývoj (červenou). Priemyselný výskum je zameraný predovšetkým na stanovenie parametrov aplikácie a rozčlenenie tuhých modifikátorov do výkonnostných skupín podľa metodiky OLF (časť I). Ďalej je skúmaná spotreba jednotlivých kompozícií a impedancia kontaktu. V časti experimentálneho vývoja bol vyvinutý aplikátor tuhých modifikátorov trenia pre zariadenie MTM2. Následne bolo vyvinuté samotné zariadenie ICta dedikované na meranie spotreby a impedancie kontaktu.

PRIEMYSELNÝ VÝSKUM

I. Parametre aplikácie

O1: $F, t \rightarrow \mu, OLF$

MTM2



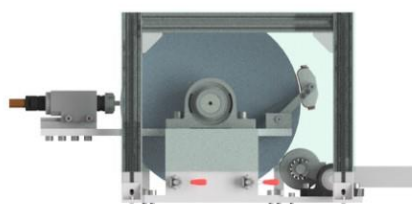
Aplikátor na MTM2



II. Spotreba a impedancia

O3: $F, f \rightarrow \sigma (\Delta m)$

ICta



I. Aplikátor tuhých modifikátorov trenia

II. Zariadenie na spotrebu a imped.

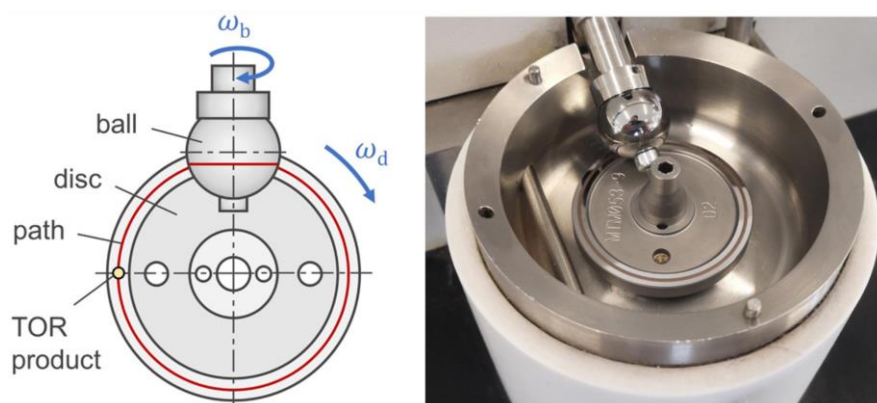
EXPERIMENÁLNY VÝVOJ

Obr. 18 Metodika postupu diplomovej práce

4.2 Experimentálne zariadenie a prístrojové vybavenie

4.2.1 MTM2 – Meranie trecej výkonnosti tuhých kompozícií

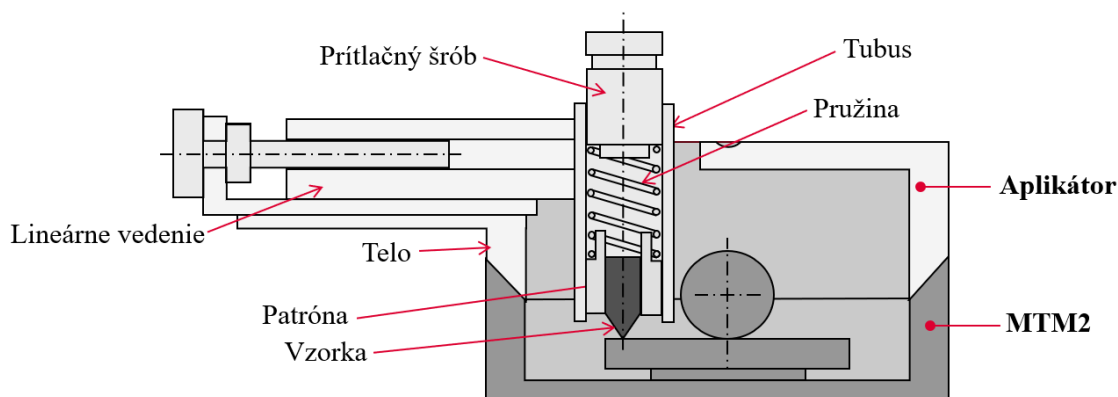
Pre vyhodnocovanie adhézných testov bol použitý tribometer MTM2. Tribometer bol vybraný na základe jednoduchosti testov a malého vplyvu vonkajších podmienok na výsledky. Toto zariadenie pracovalo v konfigurácii ball on disc. Tribometer MTM2 pracoval s guľičkou a diskom z ložiskovej ocele (AISI 52100) o priemere 19,05 mm a 46 mm. Guľičku a disk poháňali dva nezávislé pohony, čo umožňovalo meniť sklz v kontakte. Na guľičku bola počas testu vyvíjaná sila 18 N, čo vyvolávalo kontaktný tlak 800 MPa.



Obr. 19 Zariadenie MTM2

4.2.2 Zariadenie na aplikáciu tuhých kompozícií

Aby bolo možné aplikovať tuhé modifikátory trenia na kontaktné teleso, bolo skonštruované zariadenie na aplikáciu. To pozostávalo z vonkajšieho tela zapadajúceho na kužel a pripojovacie kolíky pôvodného zariadenia MTM2 vid' Obr. 20. Na tomto tele bolo primontované lineárne vedenie, ktoré zabezpečovalo možnosť polohovať aplikátor radiálne voči osi otáčania disku. Samotný aplikátor pozostával z tubusu, v ktorom bola umiestnená patróna so vzorkom. Aplikácia bola vyvolávaná pružinou s tuhosťou 1,49 N/mm ktorá bola regulovaná pomocou šróbu v rozsahu 1 až 25 N. Výsledná prítlačná sila bola pred aplikáciou kalibrovaná pomocou tlakového senzoru SEN0047, ktorý bol v sériovom zapojení s rezistorom s výstupom z operačného zosilovača LM358.



Obr. 20 Schéma zariadenia na aplikáciu tuhých kompozícií

4.2.3 Hodnotenie spotreby

Pre testovanie spotreby tuhých kompozícií bolo vyvinuté testovacie zariadenie na základe patentu US8445416. Požiadavky na zariadenie vychádzali z predmetného patentu, ale aj od vedúceho práce tak, aby bolo možné merať spotrebu a zároveň, aby bolo možné určiť impedanciu kontaktu kolesa a koľajnice ovplyvneného tuhým modifikátorom trenia. Jedná sa o poháňaný disk o priemere 350 mm. Na tento disk bola pritláčaná vzorka modifikátora trenia pomocou pružiny. Pri otere kompozície dochádzalo k úbytku materiálu z čela vzorky a tento posuv bol odmeriavaný pomocou indukčného senzoru. Z tejto hodnoty bol následne dopočítavaný celkový úbytok materiálu. O čistenie disku sa starala čistiaca doska s brúsnym rúnom, ktoré bolo po každom teste menené za nové. Táto doska bola k hlavnému kolesu pritláčaná pomocou pružinového mechanizmu, ktorý dovoľoval odstavenie čistiacej zostavy počas merania. Z dôvodu zachovania čistoty laboratória bolo potrebné doplniť aj krytovanie zariadenia, aby nedošlo k nechcenému znečisteniu okolia. Aby bolo možné merať impedanciu kontaktu, k hlavnému disku bolo zahrnuté aj sekundárne koleso galvanicky oddelené od rámu zariadenia. Medzi hlavným a sekundárnym diskom mohol byť pomocou závaží vytvorený kontaktný tlak až 1,3 GPa.

4.2.4 Okrajová prístrojová technika

Okrem spomenutých zariadení boli využité tiež zariadenia na okrajové testy a vyhodnocovanie. Jednalo sa o optický profilometer BRUKER Contour GT-X, na ktorom boli merané a vyhodnocované priemery zbrúsených špičiek vzorkov. Taktiež mikroskop NIKON SMZ800 s fotoaparátom na vyhodnocovanie nanesej vrstvy modifikátora. Rovnako váha RADWAG IMMU-53 na zistenie relatívnej hustoty použitých kompozícií. Na meranie teploty bol použitý pyrometer MESTEK IR02B

4.3 Materiál a testovacie podmienky

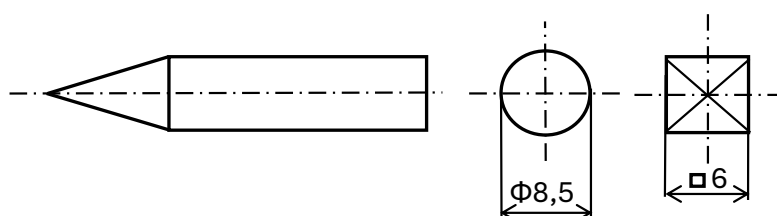
Vychádzajúc z rešerše materiálov na trhu boli stanovené vzorky materiálov, ktoré boli podrobené testovaniu vid' Tab. 2. Tieto materiály boli podľa svojho určenia rozdelené medzi HPF a LCF produkty.

Tab. 2 Zoznam použitých materiálov

HPF produkty	LCF Produkty
HPF – N	LCF – N
HPF – U	LCF – C

4.3.1 MTM2

Pre testovacie zariadenie MTM2 a zariadenie na aplikáciu tuhých modifikátorov boli vytvorené z polotovarov a pôvodných solid stickov vzorky o priemere 8,5 mm, resp. hranoly o strane 6 mm vid' Obr. 21. Tieto vzorky boli zakončené kuželom, aby vznikla špička ktorou bolo možné zasiahnuť kontaktnú oblasť na disku. Prítlak vzorky bol variovaný v rozpätí 1 až 25 N.

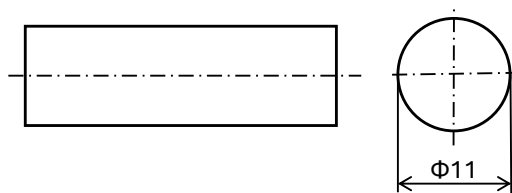


Obr. 21 Tvar a rozmery vzoriek pre zariadenie MTM2

4.3.2 ICta

Pre testovacie zariadenie na meranie spotreby a impedancie boli vytvorené vzorky valcového tvaru s priemerom 11 mm vid' Obr. 22. Testovacie podmienky zodpovedali bežným laboratórnym podmienkam, a to teplote 21 °C. Hlavný aj sekundárny disk bol vyrobený z uhlíkovej ocele 12050 (C45). Prítlak vzorky bol v rozpätí od 0 až do 50 N. Pre meranie impedancie bolo do kontaktu privádzané striedavé napätie o frekvencii od 5 kHz do 20 kHz vytvárané pomocou generátora sínusového signálu XR2206. Na čistenie povrchu

hlavného disku bolo použité brúsne rúno o zrnitosti 400 s tým, že pri každom teste došlo k jeho výmene za nové.



Obr. 22 Tvar a rozmery vzorky pre zariadenie ICta

4.4 Metódy

4.4.1 Časové testy

Pre stanovenie prítlaku a doby aplikácie bolo využité zariadenie MTM2 s pripojeným aplikátorom. Na základe časových testov boli stanovené najvhodnejšie aplikačné parametre. Pre časové testy platí, že boli vykonávané pri konštantnej rýchlosti 1 m/s a sklze 2 %. Kontaktný tlak medzi telesami bol vyvedený na hodnotu 800 MPa.

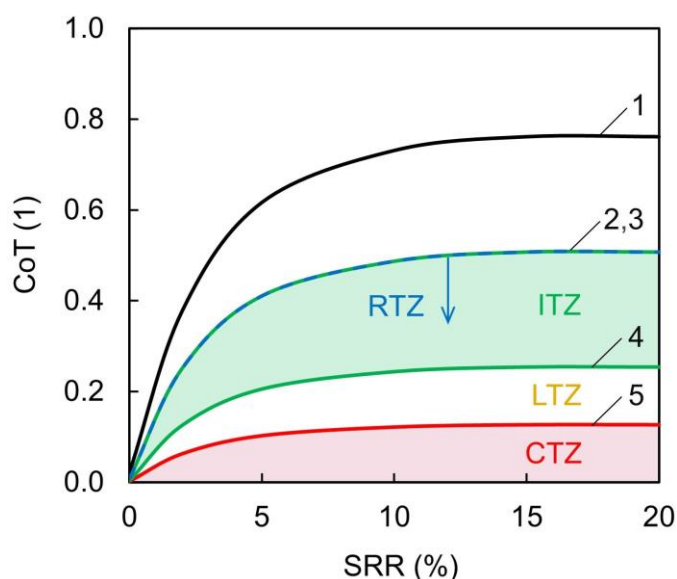
Pri osadení nového kontaktného páru bol pred testom zaradený *wear in*. Tento proces pozostával zo zabehnutia suchého kontaktného páru po dobu jednej hodiny. Kontaktný pár si takto vytvoril stykové plochy a súčiniteľ trenia bol stabilizovaný na úrovni 0,4. Pri použití zabehnutého kontaktného páru bol zaradený *run in*. Tento proces slúžil na vytvorenie základných podmienok medzi jednotlivými testami pričom trval 30 minút.

Samotný test začínal aplikáciou, ktorá spočívala v osadení aplikátora a rozbehnutí kontaktného páru počas vopred stanovenej doby. Po dobehnutí aplikácie bol aplikátor demontovaný a namazaný kontakt sa nechal bežať až do dosiahnutia hodnoty *threshold*. *Threshold* je hodnota súčiniteľa trenia stanovená ako 66 % suchého súčiniteľa trenia po zábehu. Pri dosiahnutí tejto hodnoty už kontakt nie je v dostatočnej miere mazaný a test je ukončený. Po skončení testu bol kontaktný pár demontovaný a vyčistený v acetóne v ultrasonickéj čističke. Rovnako vnútorná komora zariadenia MTM2 bola dôkladne vyčistená od usadených častíc maziva.

Výsledkom týchto testov boli časové krivky a celková doba a vzdialenosť, ktorú kontakt prekonal do dosiahnutia *thresholdu*. Samotné vyhodnotenie bolo vytvorené porovnaním jednotlivých časov testov jednotlivých aplikačných parametrov.

4.4.2 Trecia výkonnosť

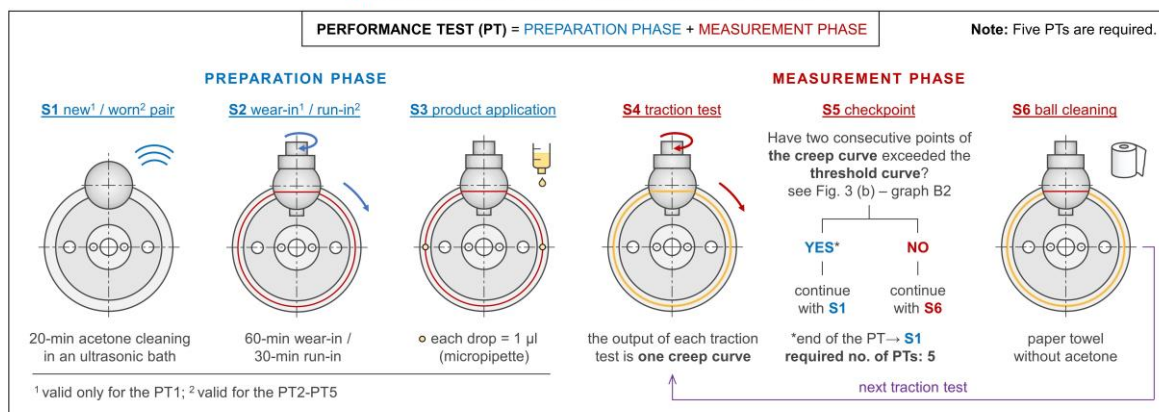
Testy trecej výkonnosti boli vykonávané na zariadení MTM2, pričom sa riadili metodikou OLF [17]. Podstatou tejto metodiky bolo určiť výkonnosť modifikátora trenia z trakčných testov pre hodnoty sklzu od 0 do 20%. V tomto rozsahu boli určené trakčné zóny, ktoré zodpovedali podielu súčiniteľa trenia suchého kontaktu. Išlo o zóny CTZ (critical traction zone) - zóna kriticky nízkeho trenia, LTZ (low traction zone) - zóna nízkeho trenia a ITZ (intermediate traction zone) – zóna strednej úrovne trenia. Na vyhodnotenie výkonnosti modifikátora trenia preto boli vytvorené parametre, ktoré odpovedajú kumulatívnej vzdialenosti, ktorú kontakt prekonal v danej trakčnej zóne v jednom teste, a to c , i a r .



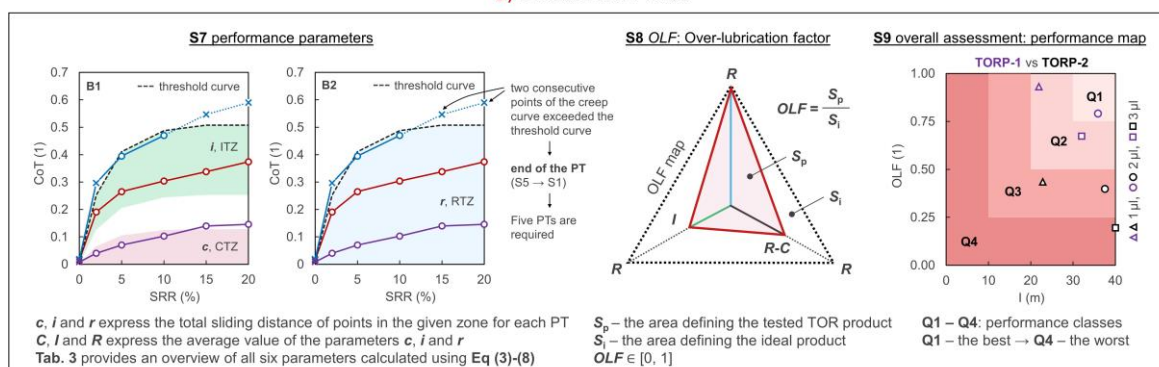
Obr. 23 Oblasti trakčných zón [17]

Pre dosiahnutie robustnosti metodiky bolo zaradené opakovanie testov, a to do momentu, kedy dve po sebe idúce hodnoty súčiniteľa trenia vyskočia nad úroveň zóny ITZ. V tomto momente sme mohli považovať vplyv modifikátora trenia na kontakt za nepodstatný. Medzi každým opakovaním testu bola guľička očistená suchou papierovou utierkou. Jedno takéto opakovanie testov sa v danej metodike nazývalo PT (performance test). Pre jeden modifikátor trenia bolo zopakovaných 5 PT (viď Obr. 24).

A) EXPERIMENTAL PHASE = 5x PERFORMANCE TEST (PT)



B) EVALUATION PHASE



Obr. 24 Postup merania podľa metodiky OLF [17]

Pre vyhodnotenie výkonnosti modifikátora boli použité parametre *c*, *i* a *r* pre ktoré platí:

$$c_k = \sum_{j=1}^5 t \cdot v \cdot SRR_j \cdot N_{c,j} \quad (1)$$

$$i_k = \sum_{j=1}^5 t \cdot v \cdot SRR_j \cdot N_{i,j} \quad (2)$$

$$r_k = \sum_{j=1}^5 t \cdot v \cdot SRR_j \cdot N_{r,j} \quad (3)$$

Kde *t* označuje čas zotrvania kontaktu v jednom pásme sklzu a dosahuje konštantnej hodnoty 30 s. Ďalej *v* značí rýchlosť, ktorá je rovná 1 m/s. Pre *SRR* platí, že ide o veľkosť sklzu v kontakte, čo znamená rozdiel obvodových rýchlostí kontaktných telies. Premenná *N* značí počet bodov merania, ktoré sa nachádzajú v danej trakčnej zóne. Pre všetkých 5 performance testov vychádza potom priemerná hodnota *C*, *I* a *R*:

$$C = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 c_k \quad (4)$$

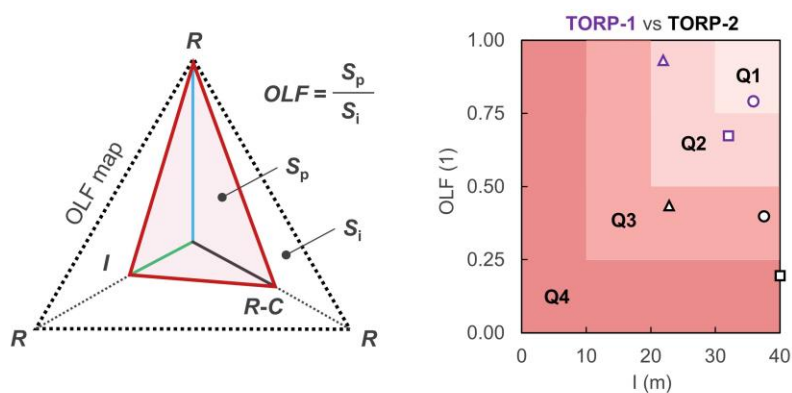
$$I = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 i_k \quad (5)$$

$$R = \frac{1}{5} \sum_{k=1}^5 r_k \quad (6)$$

Aby bolo možné definovať výkonnosť modifikátorov trenia jediným parametrom, bol zavedený parameter OLF (Over-Lubrication factor). Pričom jeho geometrickou interpretáciou je podiel obsahov trojuholníkov skonštruovaných z hodnôt C , I a R . Pre jeho výpočet platí:

$$OLF = \frac{S_p}{S_i} = \frac{R \cdot I + R \cdot (R - C) + I \cdot (R - C)}{3 \cdot R^2} \quad (7)$$

Všeobecne platí, že hodnoty OLF sú v rozmedzí 0 a 1, pričom čím vyššia hodnota OLF tým lepšie sú vlastnosti modifikátora trenia. V rámci OLF metodiky je možné zdeliť TOR produkty do štyroch výkonnostných skupín v závislosti od OLF faktoru a sklzovej vzdialenosti.



Obr. 25 Hodnotenie výkonnosti podľa metodiky OLF [17]

4.4.3 Spotreba

Testovanie spotreby prebiehalo na zariadení ICTa, ktoré vzniklo v rámci tejto diplomovej práce. Podstatou merania bolo zistiť úbytok materiálu zo vzorky známeho prierezu a meraného skrátene. Toto skrátene sa prejavilo ako celkové posunutie celej podzostavy, ktorú tvoril klieštinový upínač, klieština, vzorka a klieštinová matica. Pri prvotnom upnutí vzorky do klieštiny bol celý držiak vzorky na rybinovom vedení posunutý tak, aby došlo k dotyku vzorky s kolesom. Ďalej bola dotiahnutá prítlačná matica na vyvodenie požadovanej prítlačnej sily. Nakoniec došlo k montáži indukčného senzoru nadoraz snímaného meracieho rozsahu tj. 0,7 mm od čela klieštinového upínača. Následne bol inicializovaný pohon hlavného kolesa a započala prvotná 10 minútová zábehová fáza. Táto fáza bola zaradená z dôvodu vytvorenia rádiusu na konci vzorky.

Samotné meranie spočívalo v 60 minútovom teste, počas ktorého bola odčítaná hodnota posunutia čela klieštinového upínača so vzorkovaním po 1 sekunde, ako dochádzalo k odmazávaniu vzorky na hlavné koleso zariadenia. Test prebiehal za konštantnej obvodovej rýchlosti hlavného kolesa, pričom táto hodnota činila 32 km/h. Výstupom testov bolo posunutie v čase d , z ktorého sa dá dopočítať výsledná spotreba:

$$w = \frac{\pi \cdot D \cdot t \cdot n}{\rho \cdot S \cdot d} \quad (8)$$

Pričom v tomto vzťahu D je priemer hlavného kolesa, t je doba testu a n otáčky hlavného kolesa. Pre celý čitateľ platí, že ide o ekvivalent prejdenej dráhy kolesa o priemere D o otáčkach n za čas t . Pre menovateľ platí, že ide o ekvivalent hmotnostného úbytku o hustote ρ , ploche S a posunutí d . Po každom teste spotreby bolo zaradené čistenie hlavného disku pomocou čistiaceho rúna o trvaní 10 minút.

4.4.4 Impedancia

Pre testy impedancie kontaktu bolo použité zariadenie z kapitoly 5.2. Pri tomto teste došlo k zaradeniu sekundárneho kolesa na ramene so závažím o hmotnosti 10 kg. Na zostavu ramena so sekundárnym kolesom bol privedený striedavý prúd o frekvencii v rozsahu 5 až 20 kHz, pričom zbytok zariadenia ostal ukostrený. Budiaca frekvencia bola verifikovaná pomocou digitálneho osciloskopu. Následne bola zaradená aplikácia modifikátora o dopredu stanovenej prítlačnej sile. Nakoniec došlo k inicializácii pohonu. Po ustálení zariadenia na pracovných otáčkach 112 1/min došlo k odčítaniu hodnoty pretekajúceho prúdu kontaktom. Takto získaná hodnota prúdu bola vyhodnotená pre celý pracovný rozsah frekvencií, pričom krok predstavoval 5 kHz.

4.5 Testované predikcie

4.5.1 Vplyv doby prítlaču a sily na súčiniteľ trenia

S rastúcou dobou a prítlakom bude rásť aj OLF faktor. Rovnako bude rásť aj retentivita jednotlivých kompozícií. Nezávislou premennou je čas a doba prítlaču, závislou premennou je OLF faktor a retentivita.

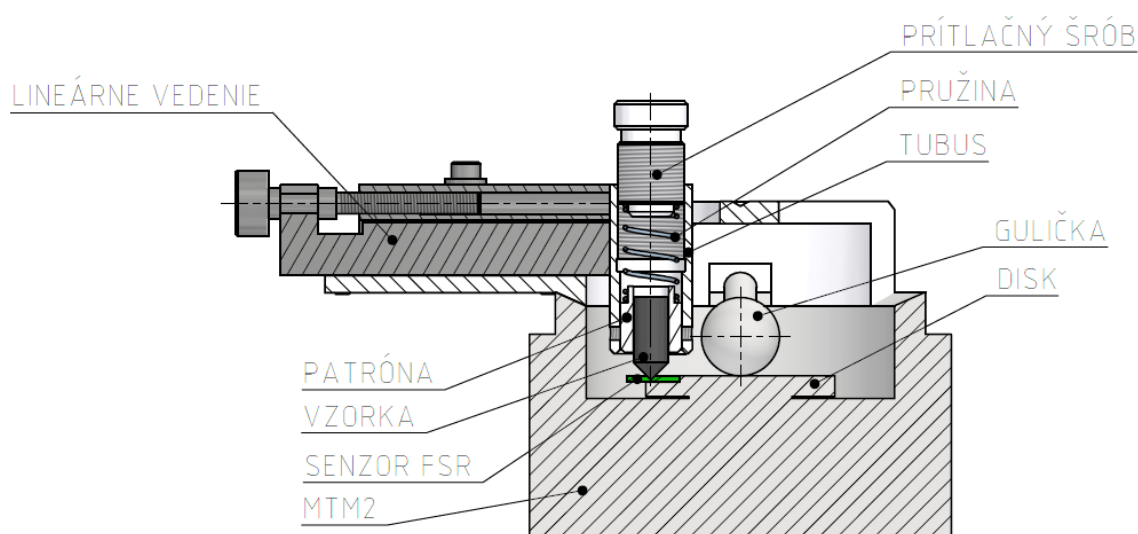
4.5.2 Impedancia kontaktu v závislosti na frekvencii napájania

Pri nízkych frekvenciách z daného spektra bude impedancia vyššia ako v prípade vysokých frekvencií. Nezávislou premennou testu je frekvencia napájacieho napätia a závislou premennou stredná hodnota napätia na kontakte.

5 VÝSLEDKY

5.1 Zariadenie na aplikáciu tuhých kompozícií

Zariadenie na aplikáciu tuhých modifikátorov vychádzalo z potreby testovania na zariadení MTM2. Pre toto zariadenie doteraz nebola implementovaná technológia aplikácie tuhých modifikátorov, ktorá by zaručila opakovateľnosť aplikácie a konzistentnosť parametrov ovplyvňujúcich meranie. Ako už bolo spomenuté zariadenie MTM2 pracuje v konfigurácii *ball on disc*. Drážka na disku po zabehnutí kontaktného páru má šírku okolo 0,6 mm. Do tohto priestoru je nutné naniesť modifikátor trenia o konštantnej sile v rozmedzí 1 - 25 N. Preto vzorky boli vytvorené s kužeľovým zakončením, čo dovoľuje presnejšie ustavenie a aplikáciu. O čo najpresnejšiu aplikáciu tuhého modifikátora sa stará lineárne vedenie nesúce tubus, pomocou ktorého môže obsluha regulovať radiálny posuv vzorky voči drážke. Spojenie zariadenia s MTM2 zaručuje dosadacia kužeľová plocha spolu s dvoma kolíkmi. Z vrchu sa potom zariadenie zaisťuje pomocou páky koncového spínača krytu MTM2. Aby bolo možné overovať prítlačnú silu aplikovanú na vzorku, je k zariadeniu pridaný FSR (force sensitive resistor) s operačným zosilovačom. Tento prístup dovoľuje presné určenie prítlačnej sily vzorky.



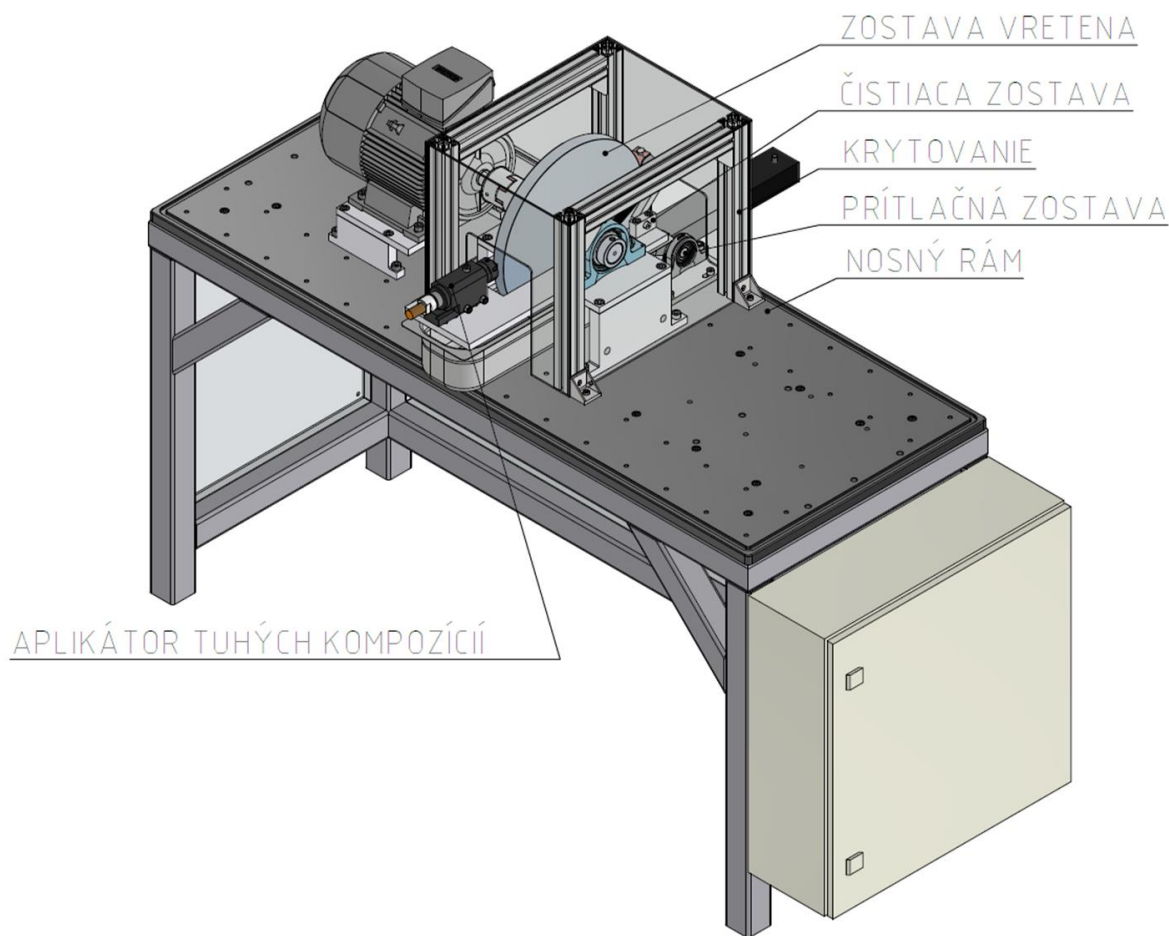
Obr. 26 Schéma aplikátora tuhých kompozícií



Obr. 27 Hotové zariadenie na aplikáciu tuhých modifikátorov trenia

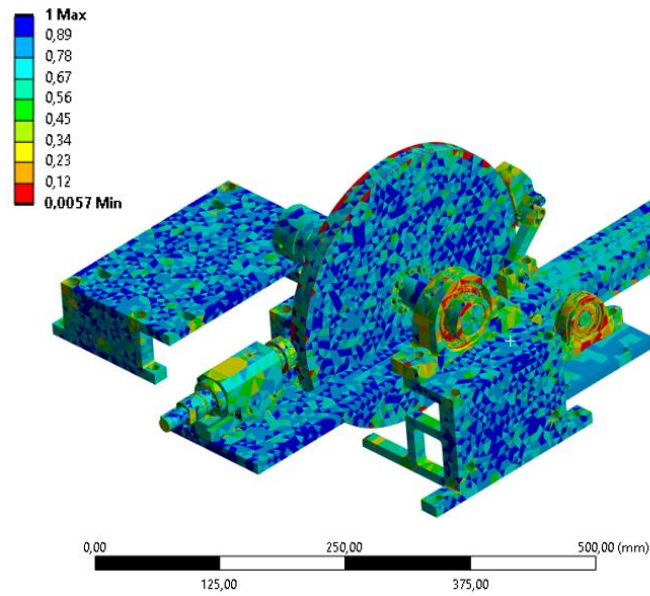
5.2 Zariadenie ICta

Pre potreby diplomovej práce a projektu, v rámci ktorého bola riešená, bolo potrebné vyvinúť zariadenie na meranie spotreby a impedancie. Toto zariadenie bolo v krátkosti opísané v kapitole 4.2.3. Jeho hlavnými konštrukčnými uzlami bola predovšetkým zostava aplikátora, vretena, prítlaku a čistenia. Podobné alternatívne zariadenie od konkurencie neexistuje, a preto bolo možné porovnať výsledok iba voči pôvodnému patentu. Preto aj návrhový proces nebol úplne štandardný, pričom konštrukčné uzly boli pevne dané a iteračný proces bol aplikovaný v rámci nich vid' Obr. 28.



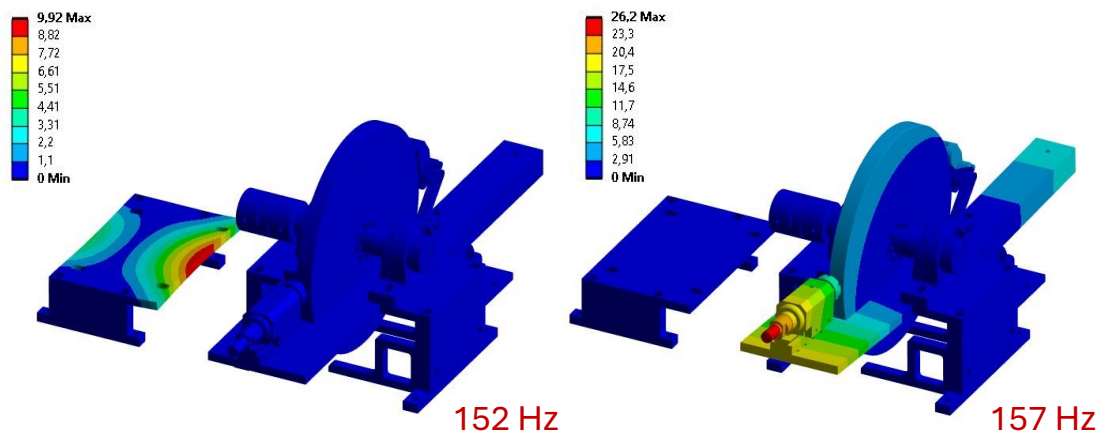
Obr. 28 Hlavné konštrukčné uzly ICta

Zariadenie pracuje s rotujúcimi súčast'ami, preto je na mieste predpokladať možnosť budenia vibrácií práve týmto pohybom. Kvôli tomu bola celá zostava odizolovaná od podlahy a rámu pomocou silenblokov. Okrem toho bolo celé zariadenie podrobené modálnej analýze. Vstupom do modálnej analýzy bola zjednodušená geometria zariadenia bez stola, nosnej dosky a motora. Geometrii boli priradené materiály odpovedajúce realite z knižnice Ansys. Náhradou za model motora bol geometrii priradený hmotný bod reprezentujúci motor. Nakoniec bola nastavená diskretizácia, kontakty a okrajové podmienky vid' Obr. 29.



Obr. 29 Kvalita diskretizácie modelu

Výsledkom modálnej analýzy sú módy deformácií pri vlastných frekvenciách zariadenia. Kľúčové je, aby pracovná frekvencia zariadenia, v našom prípade 8,33 Hz, bola dostatočne vzdialená od vlastnej frekvencie zariadenia. Z tabuľky je evidentné, že najnižšia vlastná frekvencia predstavuje takmer 20 násobok pracovnej, a preto môžeme prehlásiť, že zariadenie sa nerozkmitá vďaka rezonancii od pohonu.



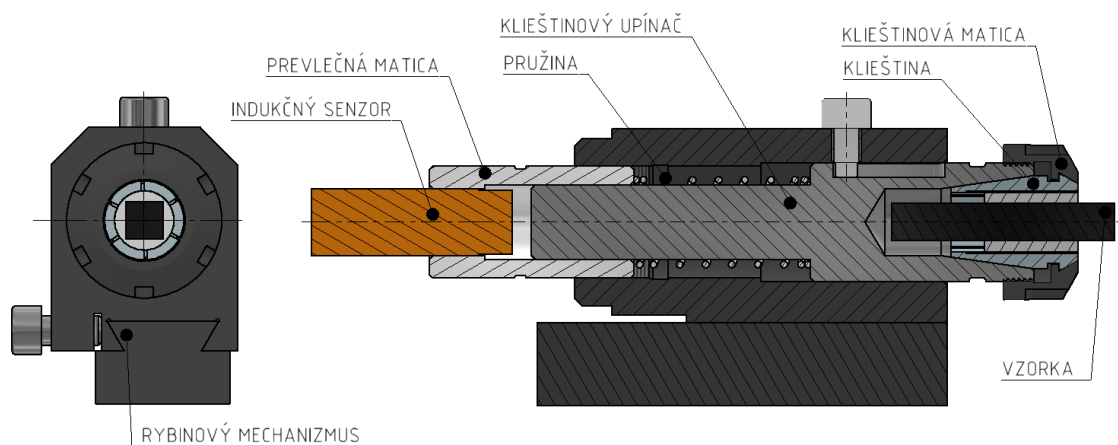
Obr. 30 Hlavné tvary a frekvencie vlastných frekvencií ICTa

Tab. 3 Frekvencie vlastných módov zariadenia

Módy deformácie	Frekvencia
Mód 1	125 Hz
Mód 2	157 Hz
Mód 3	191 Hz
Mód 4	216 Hz

5.2.1 Zostava aplikátora

Zostava aplikátora tuhých kompozícií bola kľúčovou komponentou zariadenia, pretože okrem samotného uloženia vzorky poskytuje prítlak vzorky o koleso, ako aj odčítanie hodnoty posuvu vzorky. Prvotný návrh počítal s uložením vzorky pomocou stavacích šróbov, ale po prehodnotení sa prešlo na upínanie pomocou klieštin. Toto riešenie tak moc neobmedzuje tvar alebo veľkosť vzorky a poskytuje dostatočný úchop bez poškodenia povrchu vzorky.

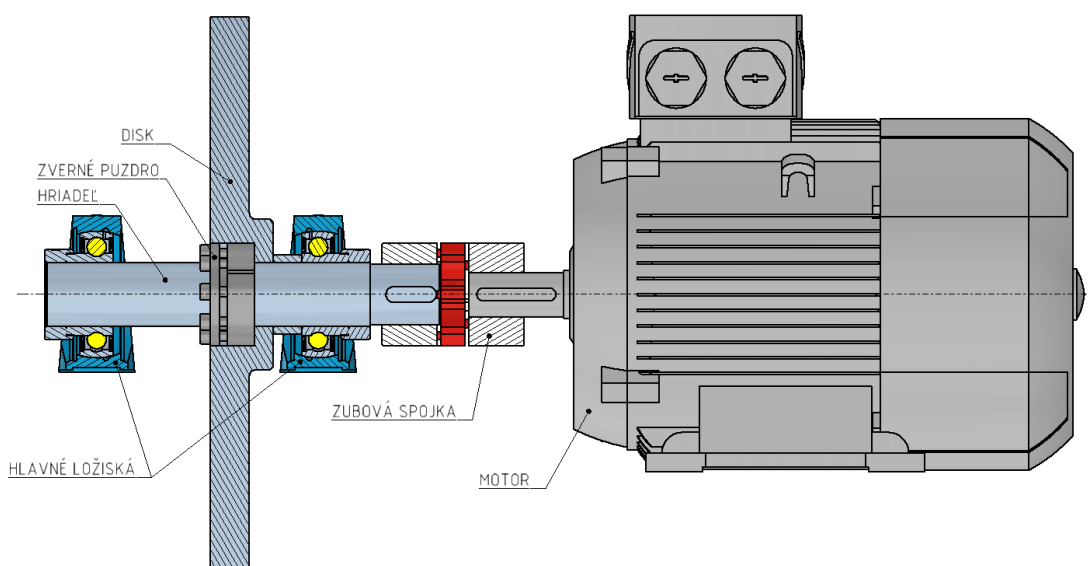


Obr. 31 Aplikátor tuhých kompozícií

Na prítlak a jeho reguláciu bola použitá vinutá tlačná pružina s tuhosťou 2,68 N/mm s prevlečnou maticou. Prevlečná matica bola opatrená závitom so stúpaním 1 mm, čo zjednodušovalo nastavenie prítlačnej sily. Okrem toho do tejto matice bol vkladajú indukčný senzor, ktorý zo vzdialenosti čela klieštinového upínača snímajú zmenu vzdialenosti, a tým úbytok materiálu vzorku. Celý aplikátor bol umiestnený na rybinovom vedení, ktoré dovoľovalo pohyb zostavy v radiálnom smere k osi kola. Koncept tohto vedenia bol prevzatý z vyvrtávacích hláv pre konvenčné frézky, kde sa osvedčil. Vedenie je z jednej strany prítlačané pomocou 2 šróbov M10, pričom elastickou deformáciou v koreni rybiny dochádza k jeho uzamknutiu.

5.2.2 Zostava vretena

Vreteno ako nosný prvok zariadenia je kľúčovým konštrukčným uzlom, ktorý zabezpečuje prenos síl a momentov z a na hlavné koleso zariadenia. Samotné koleso a jeho geometria vychádzala z patentu, pričom zvyšok uzla sa tomu musel prispôbiť. Z pevnostnej analýzy vyplývalo, že priemer 28 mm hriadele vretena z ocele C45 je dostatočný, avšak voči priemeru a hrúbke hlavného disku disproporčný. Aby bola zachovaná proporcionalita, bol navrhnutý hriadeľ s priemerom 40 mm. Ten bol uložený na ložiskách SKF_SF 40 a zaistený excentrami. Samotné koleso bolo upevnené pomocou rozperného puzdra. Na začiatku návrhu bolo uvažované o letnom uložení v ložiskovom domci s kuželíkovými ložiskami. S týmto návrhom bolo spojené upevnenie disku pomocou technológie CAM-LOCK. Od tohto bolo však upustené, a to preto, že panovala zhoda na tom, že hlavné koleso nebude demontované príliš často. V tom prípade cena výroby prevyšovala nad benefitom tuhosti a jednoduchosti demontáže. Spojenie s pohonnou jednotkou zabezpečuje zubová spojka GESF_28/38 s pružným členom.

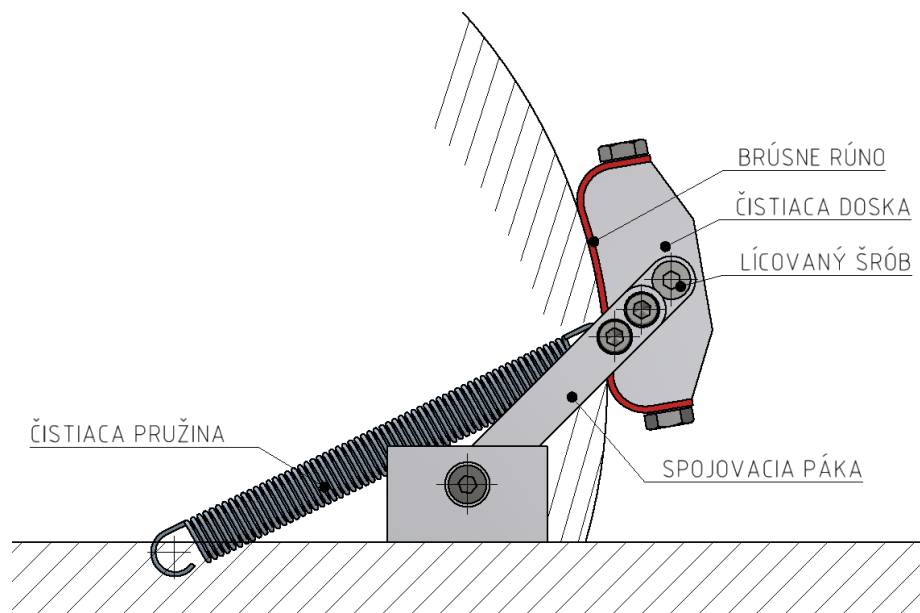


Obr. 32 Zostava vretena s pohonom

Pre výber a návrh pohonu bolo vychádzané z požiadaviek, aby motor dosahoval dostatočný výkon bez nutnosti spätnej väzby otáčok. Pohonnou jednotkou bol implicitne vybraný asynchrónny motor s frekvenčným meničom. Z výpočtu vyšlo, že pohon s výkonom 1,5 kW spoľahlivo dostičuje. V rámci demontovaných testovacích zariadení na fakulte bol dodaný motor KASTE 4kW aj s frekvenčným meničom, čo nahradilo pôvodne vybraný pohon.

5.2.3 Čistiaca zostava

Pre čistenie vrstvy modifikátora trenia z povrchu hlavného disku boli testované viaceré varianty. V pôvodnom patente bolo čistenie vyriešené sypaním piesku do kontaktu hlavného kolesa a kolesa z chlórbutylovej gumy. Tento spôsob je síce účinný, ale náročný na zásobu abraziva a celkové znečistenie okolia zariadenia. Rovnako v realite nedochádza primárne k odstraňovaniu vrstvy modifikátora pomocou pieskovania, ale sklzom medzi kolesom koľajového vozidla a koľajnice. Bolo testované odstraňovanie vrstvy pomocou britu z nástrojovej ocele, brúsnym papierom a nakoniec brúsnym rúnom. Brit z nástrojovej ocele síce dokázal odstrániť vrstvu modifikátora, ale popri tom ovplyvňoval povrch kontaktného telesa a emitoval hluk. Brúsny papier taktiež odstraňoval modifikátor trenia z kontaktu pomerne dobre, ale z dlhodobého hľadiska by jeho výdrž nebola optimálna. Nakoniec brúsne rúno nevykazovalo ani jeden z vyššie uvedených nevýhod, a preto bolo vybrané ako konečné riešenie čistiaceho média pre zariadenie ICta.

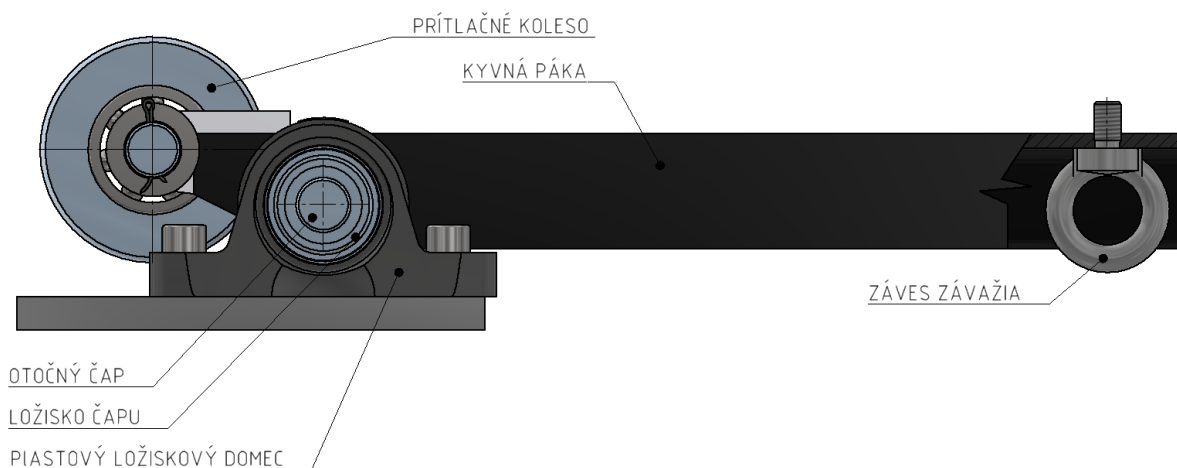


Obr. 33 Čistiaca zostava

Aplikácia čistiaceho rúna bola sprostredkovaná pomocou dosky, na ktorú bolo natiahnuté a dvoma šróbmi utiahnuté. Pre túto dosku bol vytvorený jednoduchý pružinový bistabilný mechanizmus. To znamená, že čistenie je možné kedykoľvek prerušiť presunutím páky do stabilnej vypnutej polohy. Naopak pri inicializácii čistenia stačí prekonať odpor pružiny a prisunúť páku s doskou do stabilnej pracovnej polohy.

5.2.4 Prítlačná zostava

Pre potreby merania impedancie vrstvy modifikátora trenia bola vytvorená prítlačná zostava. Tá pozostáva z prítlačného kolesa uloženého na kyvnej páke zaťažovanej pomocou závažia. Prítlačné koleso bolo vyrobené z uhlíkovej ocele C45. Vhodnou geometriou a maximálnym zaťažením sme schopní dosiahnuť v kontakte kontaktné tlaky až 1,3 GPa. Jednoduchá výmena kontaktných telies je umožnená pomocou čapu s poistnou závlačkou.

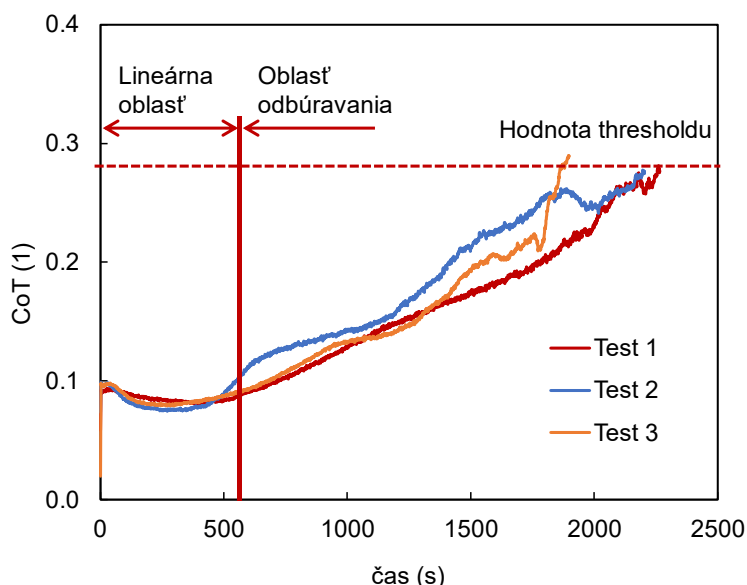


Obr. 35 Prítlačná zostava

5.3 Testy parametrov aplikácie

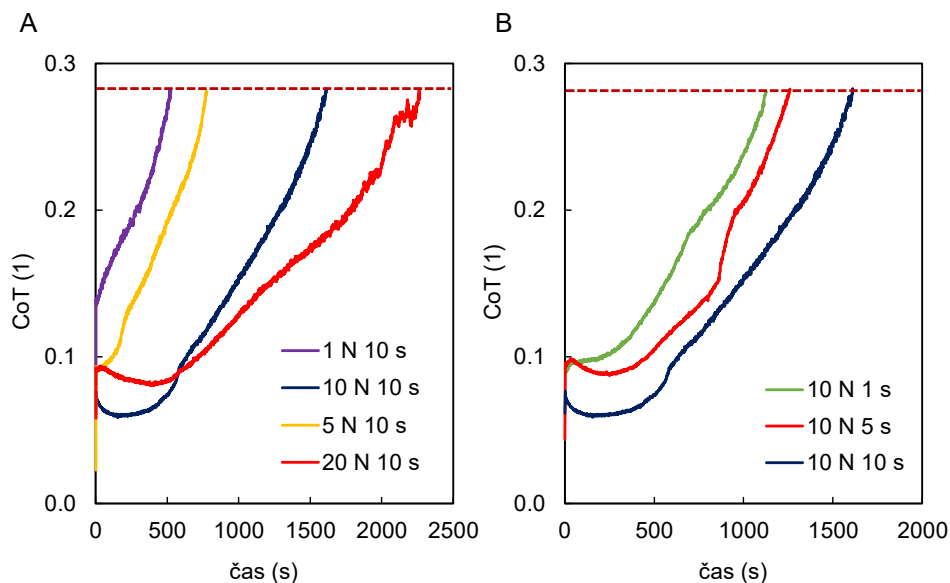
5.3.1 Časové testy

Počiatkové výsledky výskumu aplikačných parametrov boli stanovené z časových testov. Testovanou kompozíciou bola látka HPF – N. Boli testované 4 úrovne prítlaku (1, 5, 10 a 20 N) v časovom úseku 1, 5 a 10 sekúnd v štyroch opakovaníach. Tribometer MTM2 musí však pred každým testom zaradiť 6 sekundovú sekvenciu roztočenia disku čo znamená, že každá aplikácia bola zaťažaná navyše o túto dobu. Priebehy jednotlivých časových testov mali podobný charakter a líšili sa iba v celkovom čase, ktorý strávil kontakt v strednej úrovni trenia, tj. súčiniteľ trenia sa nedostal nad hodnotu *thresholdu*. Zo začiatku namazaný kontakt vykazoval približne konštantné hodnoty súčiniteľa trenia, avšak po istej dobe sa začal modifikátor trenia z kontaktu odbúravať. Preto začalo dochádzať k postupnému nárastu hodnoty súčiniteľa trenia až do momentu dosiahnutia *thresholdu* (viď Obr. 36).



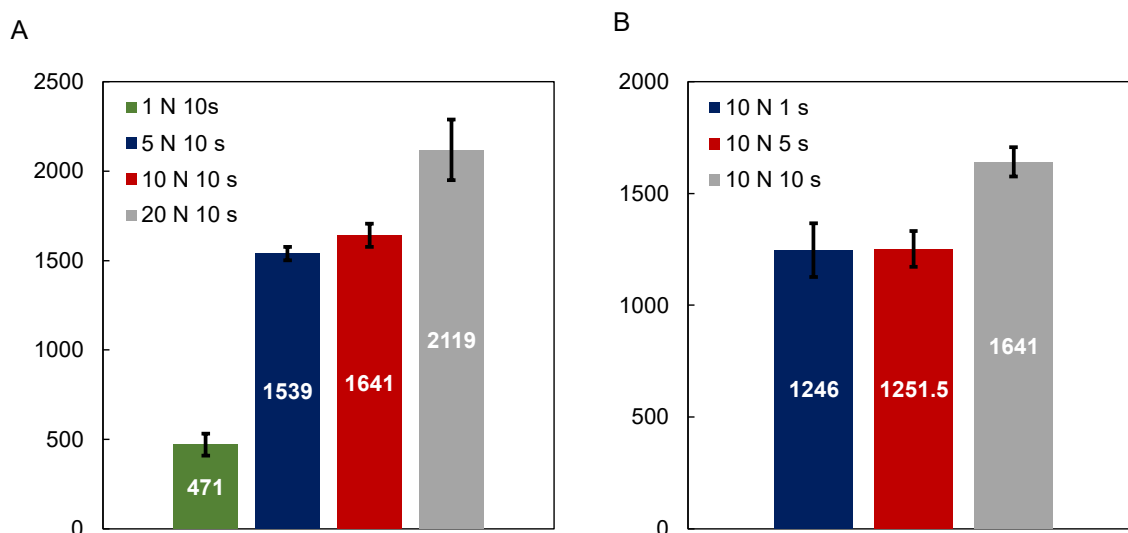
Obr. 36 Štandardný priebeh časových testov

Pri porovnaní priemerných hodnôt súčiniteľa trenia po aplikácii pri jednotlivých aplikačných parametroch je zrejmé, že existuje závislosť medzi celkovou dĺžkou času do dosiahnutia *thresholdu* a aplikačnou silou. Tiež je zrejmé, že pri materiáli HPF – N bude potrebné brať do úvahy dobu aplikácie, pretože môže mať značný podiel na výslednom správaní sa kontaktu viď Obr. 37.



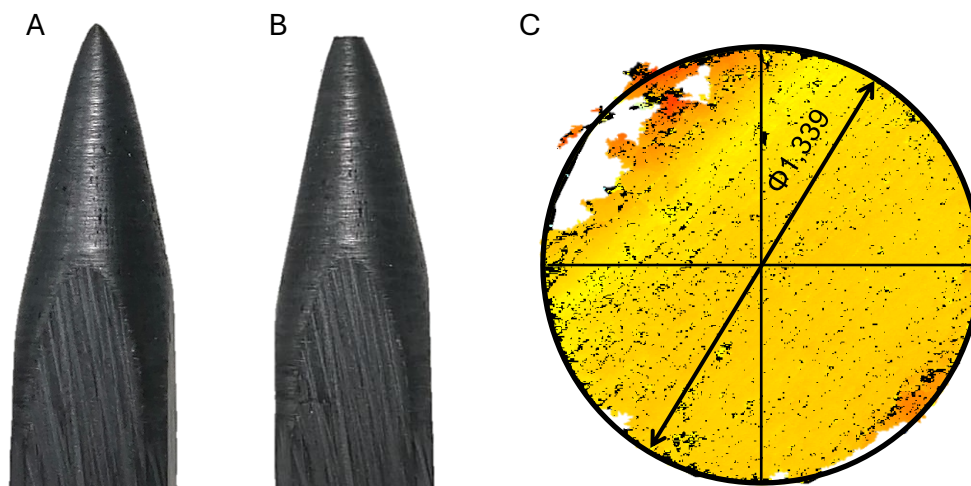
Obr. 37 a) Výsledky časových testov pri premennom prítlačku b) Výsledky časových testov pri premennom čase aplikácie (zobrazené iba reprezentatívne krivky zo súboru meraní)

Hlavným výsledkom merania je celková doba, ktorú kontakt strávil v strednej oblasti trenia pri jednotlivých aplikačných parametroch. Z grafu (viď Obr. 37) je evidentné, že rovnako prítlačná sila i doba aplikácie má značný podiel na výsledku. Zaujímavé je potom porovnať priemernú hodnotu aplikovaného množstva (hmotnostného úbytku vzorku viď Tab. 4) s výslednou retentivitou. Výsledok je v zhode s realitou, pretože aj pri empirickom pozorovaní počas meraní bolo vidieť množstvo deponovaného materiálu mimo kontaktu, pričom toto množstvo sa zvyšovalo so zvyšujúcou sa prítlačnou silou a dobou aplikácie.



Obr. 38 a) Graf celkovej retentivity pri premennej prítlačnej sile b) Graf celkovej retentivity pri premennom čase

Pri časových testoch neboli nakoniec vyhodnocované iba krivky retentivity, ale aj hmotnostný úbytok na vzorke a tiež tvar trecej plochy vzorky po teste. Tvar trecej plochy vzorky bol vyhodnocovaný pomocou profilometra. Následne bol tvar tejto plochy aproximovaný kružnicou, ktorej priemer bol vyhodnocovaný vid' Obr. 39 - C.



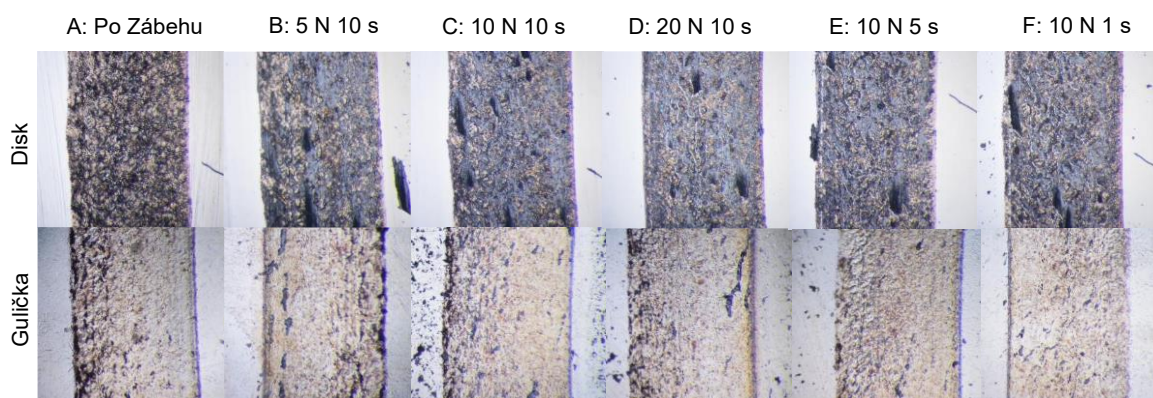
Obr. 39 a) Vzorka pred testom b) Vzorka po teste c) Vyhodnotenie

Tab. 4 Výsledky hmotnostného úbytku a priemeru trecej plochy

Sila (N)	1	5	10	20	Čas (s)	1	5	10
Δm (mg)	0,25	0,47	0,8	1,65		0,45	0,6	0,8
Φd (mm)	0,68	0,89	1,07	1,32		0,94	1,01	1,07

5.3.2 Testy vrstvy modifikátora

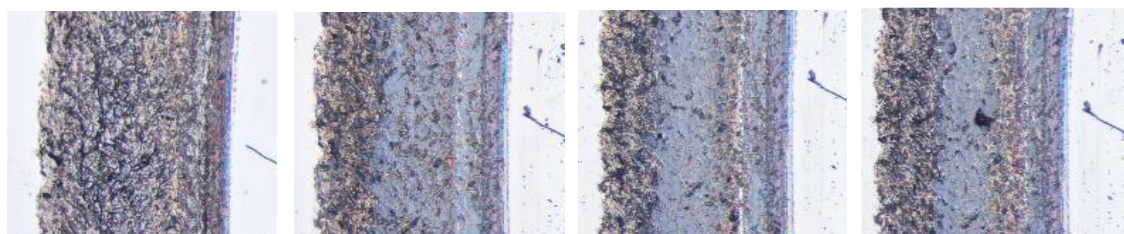
Na pozorovanie vytvorenej vrstvy a vyhodnocovanie jej hrúbky bolo testovaných niekoľko prístupov, a to predovšetkým skenovaním na profilometri a snímaním na mikroskope. Z výsledkov profilometrického merania nebolo možné pozorovať dostatočne kvalitne vytvorenú vrstvu kompozície na povrchu kontaktných telies. Naopak na snímkach z mikroskopu je evidentná vytvorená vrstva, ktorej hrúbku nie je možné týmto spôsobom vyhodnocovať. Preto kompromisným riešením bolo snímať povrch kontaktných telies iba na mikroskope, pričom snímky boli strojovo spracované, aby bolo možné určiť aspoň percentuálny podiel povrchu, ktorý pokrýval tuhý modifikátor trenia a čistého kontaktného telesa. Tento postup bol zopakovaný pre všetky konfigurácie skúmaných aplikačných parametrov pre primárne skúmaný materiál HPF – N. Výsledkom je, že približne 20 % povrchu disku a 0 % povrchu guličky bolo pokrytý vrstvou tuhého modifikátora trenia. Tento záver platil pre všetky skúmané kombinácie aplikačných parametrov vid' Obr. 40. Šírka pokrytej oblasti bola v rámci kombinácií parametrov takmer rovnaká, ale retentivita bola rozdielna. To nepriamo značí, že aj napriek tomu, že pokrytá oblasť je rovnaká pre všetky kombinácie parametrov, pri silnejšom a dlhšom prítlaku, tuhého modifikátora musí byť v kontakte viac, a preto aj samotná hrúbka vrstvy musí byť väčšia.



Obr. 40 Snímky z mikroskopu pre jednotlivé aplikačné parametre A - F

V rámci pozorovania vrstvy a jej utvárania bol zaradený časový test, kedy bol kontaktný pár po úrovniach 0,05 súčiniteľa adhézie zastavovaný a vrstva modifikátora bola nasnímaná. Tento experiment bol realizovaný na materiáli HPF – N za podmienok 10 N 10 s a vypovedá o tom, ako dochádza k vytváraniu trecích podmienok v kontakte a k odbúraniu vrstvy modifikátora vid' Obr. 41. Zobrazené snímky odzrkadľujú stav disku v danom momente. Naopak snímky guličky boli schválne vynechané, pretože na nich nebola zaznamenaná žiadna zmena počas celého testu.

Aplikáciou došlo k vytvoreniu stabilnej vrstvy modifikátora v kontakte, ktorá bola následne rozvalcovaná opakovanými prechodmi kontaktom. Po určitom čase začalo dochádzať k odhaľovaniu najväčších výstupkov a nerovností z vrstvy modifikátora, ktorá začala pomaly ubúdať, čo ústilo v postupnom zvyšovaní súčiniteľa adhézie. Nakoniec posledné zbytky modifikátora trenia boli zaznamenané v najväčších priehlbínach povrchu disku, pričom po ich eliminácii sa kontakt vrátil na hodnoty suchého trenia.

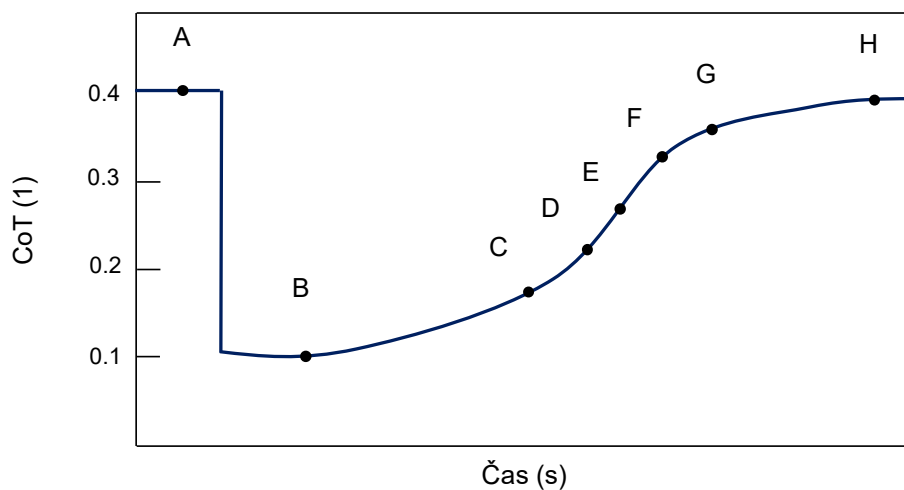


A: Po zábehu

B: CoT 0.1

C: CoT 0.15

D: CoT 0.2

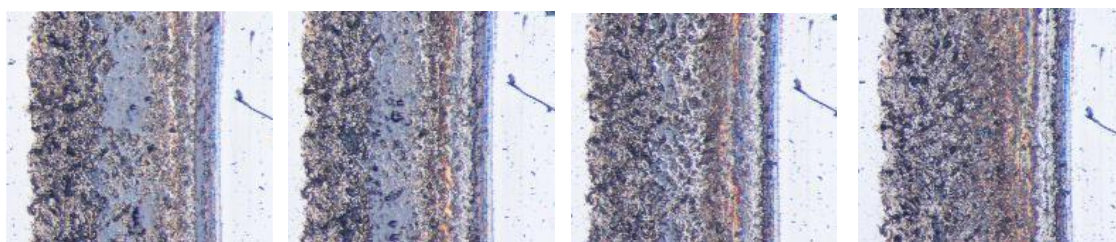


E: CoT 0.25

F: CoT 0.3

G: CoT 0.35

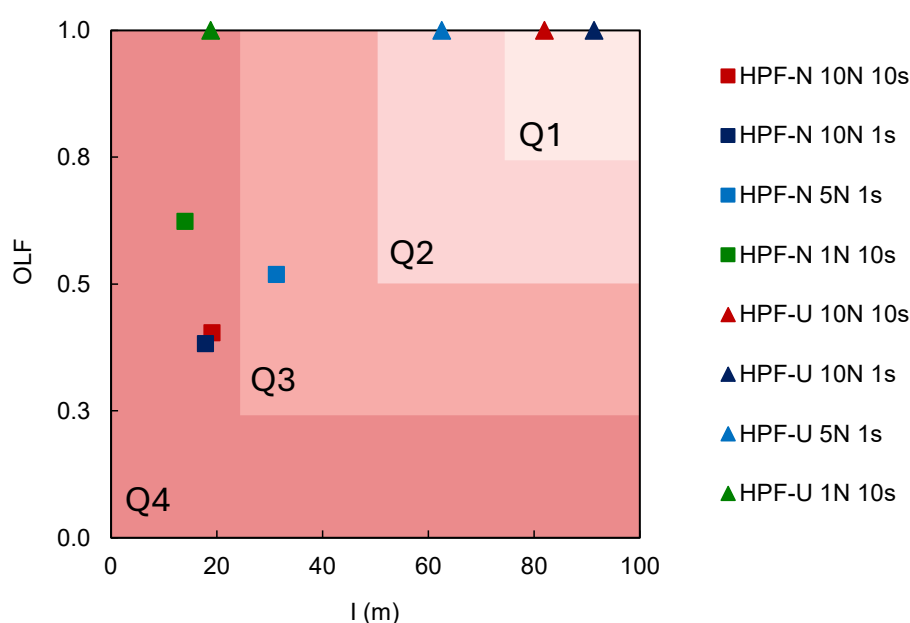
H: CoT 0.4



Obr. 41 Priebeh odbúravanja tuhého modifikátora z kontaktu

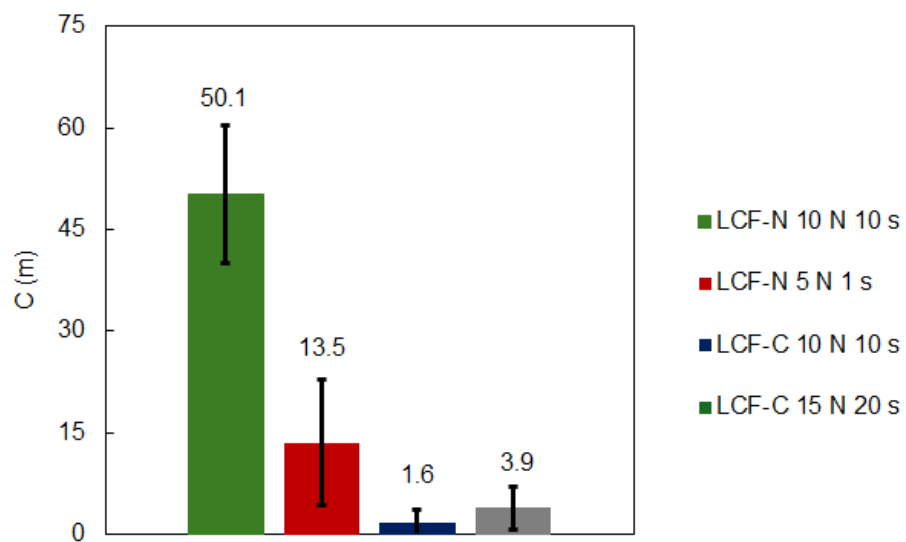
5.3.3 Testy trecej výkonnosti

Po časových testoch boli zaradené testy trecej výkonnosti podľa metodiky OLF. Skúmané boli materiály typu HPF pre rôzne prítlaky a doby prítlaku. Boli variované sily prítlaku 1, 5 a 10 N a doba aplikácie 1 a 10 s. Výsledkom bola mapa OLF faktoru v závislosti na sklzovej vzdialenosti v zóne strednej úrovne trenia vid' Obr. 42. Z výsledkov merania je materiál HPF – N radený do kategórie Q4 až Q3. Pri nízkych silách prítlaku dosahovala táto kompozícia paradoxne lepšie výsledky ako pri vyšších prítlakoch. Naopak materiál HPF – U je radený do kategórie Q2 až Q1, čo predstavuje najlepšie možné hodnotenie. OLF faktor dosiahol pri všetkých konfiguráciách parametrov aplikácie hodnotu jedna, čo znamená, že nedošlo k premazaniu kontaktu a kontakt sa nedostal do oblasti kriticky nízkeho trenia.



Obr. 42 OLF mapa HPF materiálov

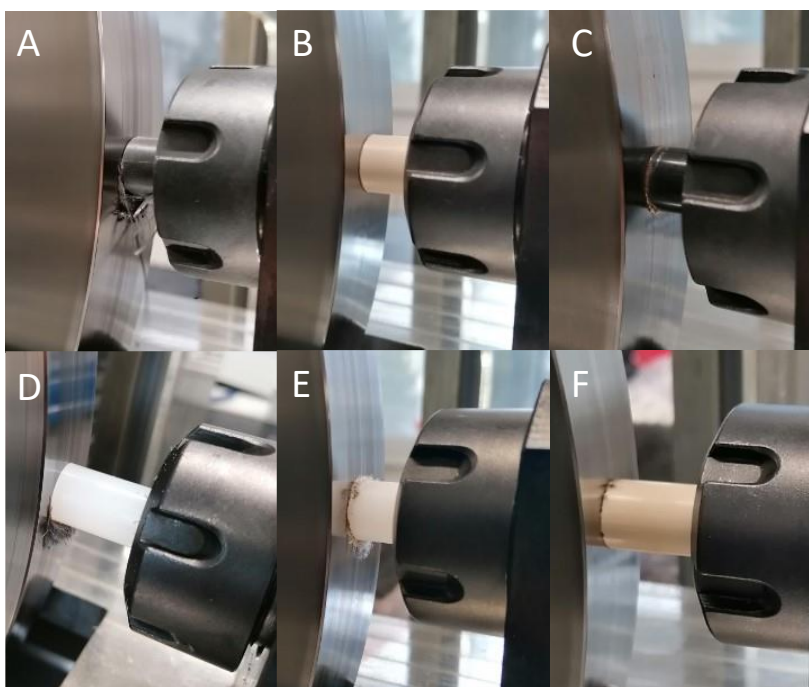
Ďalej boli skúmané materiály LCF metodikou OLF, ale s tým rozdielom, že nebol stanovovaný OLF faktor, ale hlavnou skúmanou veličinou bola sklzová vzdialenosť v pásme nízkej hodnoty trenia. Tento spôsob testovania vyplýva zo samotnej funkcie LCF materiálov, ako mazív pre okolky koľajových vozidiel. Preto výsledným grafom je závislosť sklzovej vzdialenosti v nízkej oblasti trenia C. Pri týchto testoch podstatne lepšie výsledky dosiahla kompozícia LCF – N, zatiaľ čo kompozícia LCF – C poskytovala žiadané trecie podmienky len veľmi krátko.



Obr. 43 Sklzová vzdialenosť LCF materiálov

5.4 Testy spotreby

Testovanie spotreby bolo rozdelené do dvoch častí, a to na testovanie základných plastov a na testy spotreby komerčných produktov friction managementu. Základné plasty boli testované, aby bolo stanovené ich správanie a spotreba pri odmazávaní, aby následne mohli byť uvažované ako základná matrica pre budúce kompozície. Kontrolovaný bol nielen hmotnostný úbytok, ale aj teplota disku, vzorky, častice opotrebovania a v neposlednom rade emitovanie hluku z kontaktu.

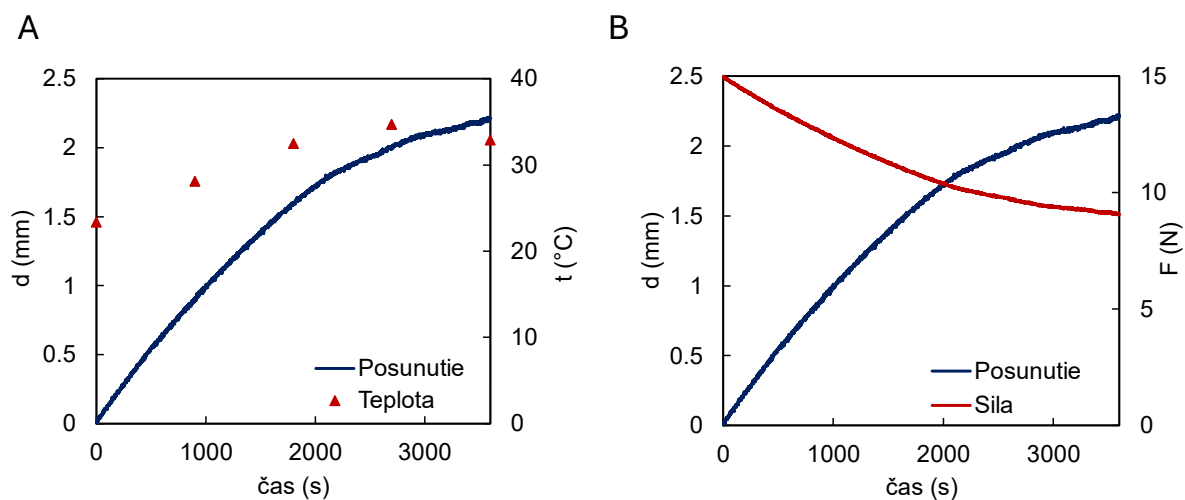


Obr. 44 Opatrebovanie vzorky a) NYLON b) PEEK c) POM d) PAGXTN e) POM – N f) PEEK – N

Aby bolo možné z objemovej spotreby stanoviť hmotnostnú spotrebu, bolo nutné zistiť hustoty jednotlivých komerčných kompozícií. Tieto hodnoty nie sú bežne dostupné a ani samotný výrobca ich neuvádza. Preto bola využitá Archimedova metóda na ich stanovenie. Výsledok tohto merania vid' Príloha 2.

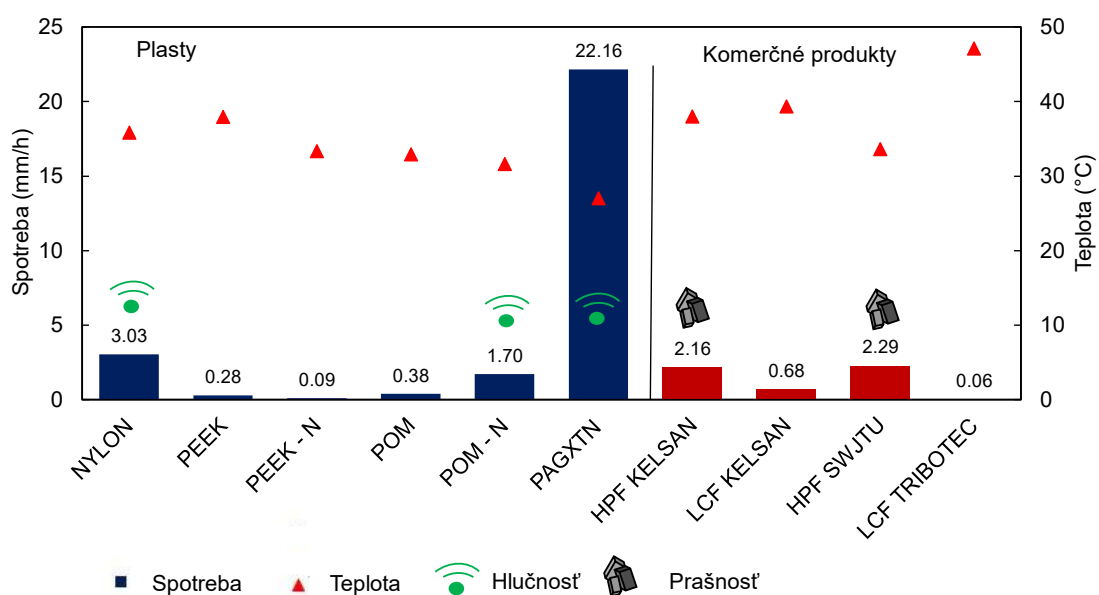
Typickým výstupom z merania spotreby kompozície tuhého modifikátora bolo posunutie vzorku v čase. Na grafe vid' Obr. 46 - a je vidieť postupný nárast vzdialenosti a teploty disku počas merania.

Počas merania sa menila vzdialenosť celej zostavy klieštinového upínača, čo malo za následok zmenu sily pôsobiacej na vzorku. Výslednú silu je možné vidieť na grafe vid' Obr. 46 - b.



Obr. 46 Graf úbytku kompozície HPF - U a) a teploty disku v čase b) a zmeny prítláčnej sily

Hlavným výsledkom merania na zariadení ICTa je zhodnotenie hodinovej spotreby jednotlivých plastov a komerčných kompozícií pri počiatocnom zaťažení 15 N vid' Obr. 45. Modrou označené základné plasty môžeme rozdeliť do dvoch skupín, a to s nízkou spotrebou do hodnoty 0,5 mm/h (PEEK, PEEK – N, POM) a skupinu s vyššou spotrebou nad 0,5 mm/h (NYLON, POM – N, PAGXTN).

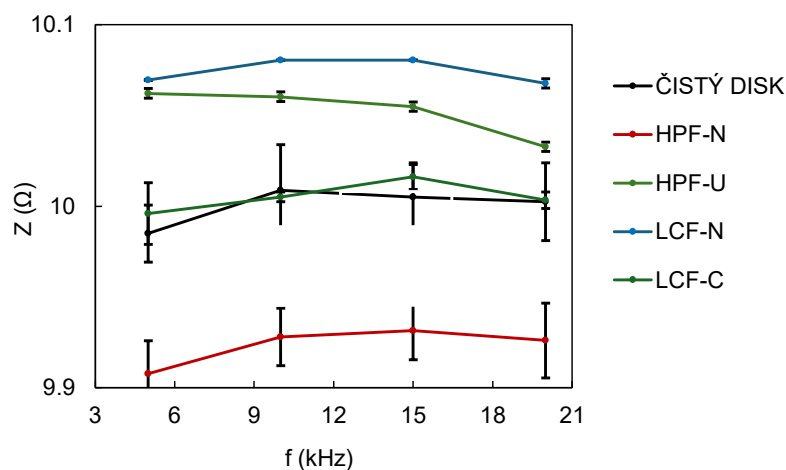


Obr. 45 Porovnanie hodinovej spotreby plastov a komerčných kompozícií

V prípade komerčných produktov je evidentný rozdiel medzi materiálmi skupiny HPF a LCF. Materiály HPF dosahovali podstatne vyššiu spotrebu, pričom bola subjektívne pozorovaná aj zvýšená prašnosť emitovaná z kontaktu. Teplota disku pozorovaná pri všetkých testovaných vzorkách sa pohybovala v intervale od 27 °C do 48 °C.

5.5 Testy impedancie

Testy impedancie boli uskutočnené na zariadení ICta za použitia všetkých vzoriek komerčných produktov. Variovaná bola frekvencia napájania, pričom jej hodnota bola nastavovaná v rozsahu od 5 do 20 kHz. Výstupné napätie bolo snímané s frekvenciou 50 kHz, aby bola splnená Nyquist - Shannonova podmienka a bolo zabránené aliasingu. Snímané napätie bolo prepočítané na výslednú impedanciu kontaktu, ktorá bola vykreslená vid' Obr. 47.



Obr. 47 Závislosť impedancie na frekvencii

Je evidentné, že trend impedancie so stúpajúcou frekvenciou neexistuje. Rozdiely v impedancii pri jednotlivých úrovniach pracovnej frekvencie sú marginálne v rozpätí 0,2 ohmu. Je možné si všimnúť, že nie všetky materiály nutne zvyšovali impedanciu. Kompozícia HPF – N impedanciu mierne znížila. Naopak ostatné komerčné materiály zvýšili impedanciu kontaktu voči čistému disku.

6 DISKUZE

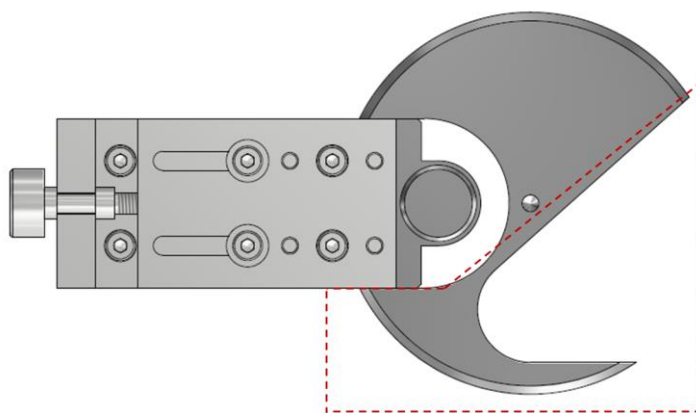
6.1 Vývojová časť

6.1.1 Aplikátor tuhých kompozícií

Zariadenie na aplikáciu tuhých kompozícií pre tribometer MTM2 vyvinuté v rámci tejto diplomovej práce z pohľadu funkčnosti úspešne splnilo svoju úlohu. Pomocou neho bola nameraná značná časť výsledkov výskumnej časti. Vďaka nemu bolo možné v rozsahu 0 – 25 N zabezpečiť prítlak vzorky. Silový senzor (Force sensitive resistor) umožnil overiť nastavenie prítlačnej sily s presnosťou 0,5 N. Vymeniteľná patróna dovoľovala použiť v závislosti na polotovare vzorky štvorcového alebo kruhového prierezu.

Napriek tomu všetkému dosahuje tento prípravok isté obmedzenia v podobe periférneho odmeriavania sily pri použití pružinového prítlaku. Okrem toho, pri nízkych prítlačných silách vykazuje nestabilitu zapríčinenú vôľou v závitoch prítlačného šróbu. Ako alternatívne riešenie bolo pružinové napínanie pri nízkych silách zamenené za gravitačné, čo do istej miery vyriešilo tento problém a umožnilo merať s nízkymi silami okolo 1 N.

V prípade ďalšieho vývoja by bolo dobré zapracovať na tom, aby mohol byť prípravok fixne umiestnený na tribometer bez nutnosti jeho demontáže medzi meraniami. To by sa dalo zabezpečiť pomocou výklopnej zostavy tubusu a vedenia. Ďalším zlepšením by bolo integrované odmeriavanie prítlačnej sily v rámci tubusu, kde by sa nastavovanie sily a jej spätná kontrola podstatne zjednodušila. Z merania bolo vyzozorované, že kľúčovým bolo správne nastavenie polohy vzorky. Toto nastavenie bolo kontrolované pomocou zubného zrkadla, čo podmieňuje dobrý prístup do meracej komory zariadenia. Pri ďalšom prípadnom vývoji by bolo dobré ešte viac otvoriť otvor na túto kontrolu, aby sa zlepšil prístup a zvýšila sa viditeľnosť špičky vzorky pri teste vid' Obr. 48.



Obr. 48 Oblasť aplikátoru vhodná na odstránenie pre zlepšenie viditeľnosti vzorku

6.1.2 Zariadenie ICta

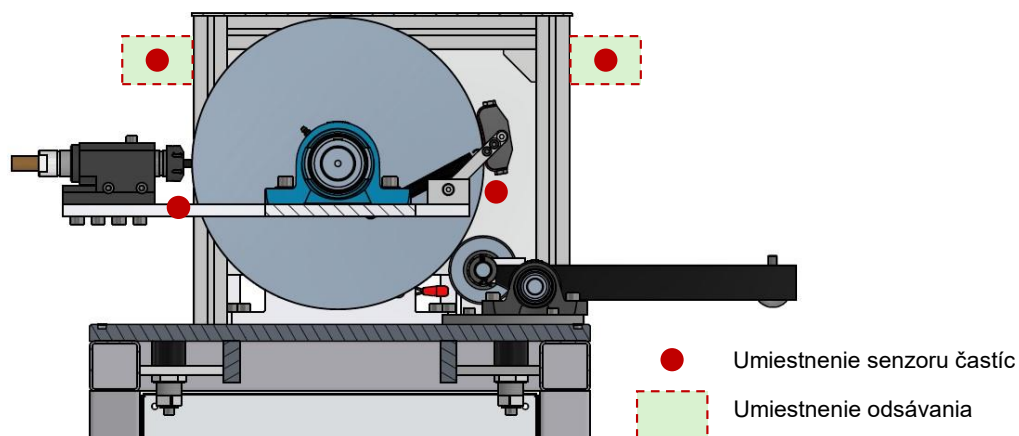
Zariadenie ICta splnilo svoj účel v rámci tejto diplomovej práce. Vďaka nemu bola spoľahlivo stanovená spotreba, ako základných plastov, tak aj komerčných kompozícií. Rovnako s jeho pomocou bola testovaná impedancia kontaktu po aplikovaní tuhých kompozícií. Zariadenie dosahovalo v maxime kontaktný tlak až 1,3 GPa, pričom obvodová rýchlosť hlavného disku mohla dosahovať až 60 km/h. Vymeniteľnosť pružín v aplikátore potom dovoľovala dosahovať prítlak až 50 N. Použitie indukčného senzoru dovoľovalo meranie posunutia vzorky s presnosťou až 0,02 mm.

Zariadenie ICta má aj isté limitácie, ako napríklad pomerne nízku tuhosť hlavného disku. Ten má hrúbku iba 25 mm, pričom pri kontakte so sekundárnym kolesom potom vybudzuje vysokofrekvenčný hluk emitovaný v kontakte. Pri kontrole voči vlastným frekvenciám boli porovnávané frekvencie vlastných kmitov voči otáčkovým frekvenciám hlavného a prítlačného disku. Do úvahy však neboli brané frekvencie kmitov vznikajúcich práve mechanickou interakciou v kontakte, čo zapríčinilo, že pri zostavení zariadenia bol pozorovaný vysokofrekvenčný hluk šíriaci sa z hlavného disku, ktorý však neovplyvňoval výslednú funkciu zariadenia.

Aplikátor tuhých kompozícií v spojení s rybinovým vedením splnil očakávania v tuhosti upnutia a ovládania pozície vzorky. Naopak stanovovanie sily a periférne odmeriavanie stlačenia pružiny nebolo príliš praktické. Podstatným nedostatkom aplikátora bola premenná sila prítlaku v závislosti na odbrúsení vzorky. Momentálna sila prítlaku sa dá jednoducho dopočítať, a preto môžeme prítlak považovať za kvázi statický. Tomuto fenoménu napovedajú aj výsledné krivky posunutia na čase vid' Obr. 46. Použitie gravitačného zaťaženia miesto pružinového bolo z počiatku brané do úvahy, následne bolo zavrnuté z dôvodu prílišnej zložitosti celého mechanizmu a pre obavy z kmitania záťaže. Možným riešením by mohlo byť použitie skrutných pružín (s konštantnou silou). Takéto skrutné pružiny by museli byť menené v závislosti na meranej úrovni prítlaku, avšak poskytovali by konštantný prítlak nezávislý na posunutí vzorky.

Pri odstraňovaní vrstvy modifikátora trenia bola z počiatku testovaná celá paleta opatrení, medzi ktoré patrilo použitie brúsneho papiera, britu z rýchloreznej ocele či ocelevej kefy. Ako víťazné opatrenie sa javilo použitie brúsneho rúna, ktoré ani po dlhšej dobe nestrácalo v značnej miere brúsnu štruktúru a nedochádzalo k jeho prílišnému zanášaniam. Tento prístup mal nevýhodu v tom, že pri dlhodobom testovaní dochádzalo k ohrievaniu disku. V patentne, z ktorého zariadenie vychádza, tento problém nebol riešený, nakoľko tam bolo použité čistenie pomocou prúdu piesku, ktoré bolo z navrhovanej koncepcie zavrhnuté. Ohriatie disku môže ovplyvniť výsledky testov spotreby či impedancie vid' Obr. 46. Pri testovaní neboli prekročené hranice toho, s čím by sa tuhé modifikátory trenia mohli dostať do styku v praxi, čo môže dodávať ďalší rozmer výsledkom. Zaujímavým výsledkom preto môže byť práve rozdielnosť správania sa tuhých modifikátorov pri rôznych vonkajších vplyvoch, ako je napríklad zvýšená teplota kontaktných telies.

Jedným z neočakávaných vedľajších efektov pri zariadení ICTa bola značná prašnosť uvoľnená pri niektorých kompozíciách. S istým znečistením sa v návrhu počítalo, ale nie s takou úrovňou, aká bola pozorovaná počas meraní. Vhodným opatrením by bolo úplné uzavretie komory s diskom, doplnené o odsávanie. Rovnako zaujímavým výsledkom by bolo kvantifikovanie množstva uvoľnených častíc. Preto by bolo dobré do odsávacieho potrubia a na miesta, kde sa tvorí najväčšia koncentrácia častíc, umiestniť senzory vid' Obr. 49.



Obr. 49 Umiestnenie odsávania a senzorov častíc

6.2 Výskumná časť

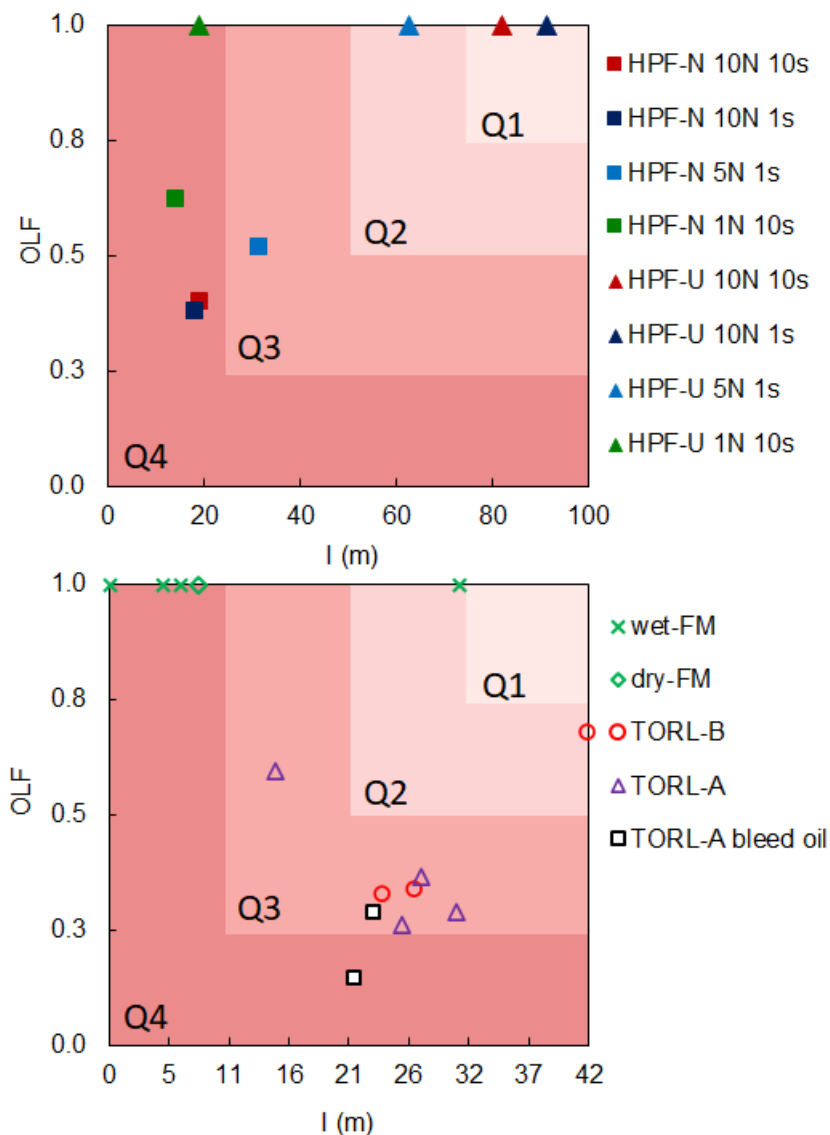
6.2.1 Aplikačné parametre a tretia výkonnosť

Hypotéza H1, vyslovená pre aplikačné parametre a ich vplyv na retentivitu môže byť prehlásená za čiastočne verifikovanú s ohľadom na výsledky, ako časových testov tak testov trecej výkonnosti vid' 5.3.1 a 5.3.3. Čím vyššou silou, a čím dlhšie je modifikátor trenia aplikovaný, tým väčšiu retentivitu poskytuje kontakt. Toto tvrdenie nie je možné zovšeobecniť pre testy trecej výkonnosti. Testované látky vykazovali dvojaký charakter. Látka HPF – N mala tendenciu pri vyšších parametroch aplikácie premazávať kontakt, čím klesal OLF faktor. Na druhú stranu, materiál HPF – U bol odolný voči premazaniu kontaktu a poskytoval konštantne vysokú výkonnosť celým spektrom testovaných parametrov. Sklzová vzdialenosť v oblasti stredného trenia hovorí o závislosti na parametroch aplikácie. Naopak bolo preukázané, že aplikačné parametre nemajú vplyv na prerozdelenie vrstvy modifikátora medzi kontaktnými telesami. Bolo nepriamo dokázané, že aplikačné parametre ovplyvňujú hrúbku vrstvy, ktorá však ostáva celá na disku a nedochádza k presunu materiálu na guľičku vid' 5.3.2.

Výkonnosť jednotlivých tuhých modifikátorov v porovnaní s tekutými produktami nie je možné jednoducho zovšeobecniť vid' Obr. 50. Pre látku HPF – U odpovedá wet – FM a dry – FM, pričom toto chovanie je charakteristické vysokým OLF faktorom. Znamená to, že tieto látky spoľahlivo poskytujú súčiniteľ trenia na strednej úrovni, pričom na aplikovanom množstve závisí iba sklzová vzdialenosť. Za zmienku stojí rozdielna mierka osi sklzovej vzdialenosti. Pre tuhú kompozíciu HPF – U platí, že poskytuje dobré trecie vlastnosti po takmer dvojnásobnú sklzovú vzdialenosť oproti tekutým modifikátorom a oproti druhej testovanej tuhej HPF kompozícii.

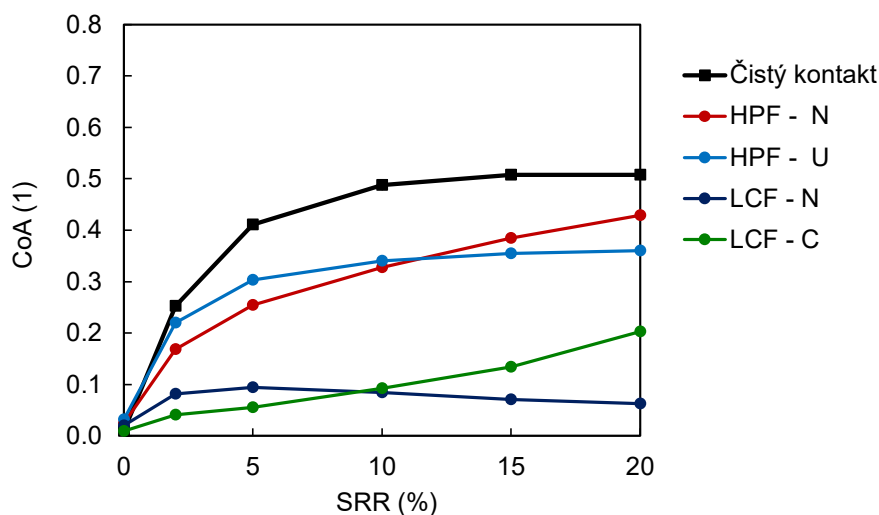
Naopak látke HPF – N odpovedá chovanie TORL – A a TORL – B. Pri tekutých látkach platí, že so stúpajúcim aplikovaným množstvom klesá OLF faktor [17]. Obdobný fenomén bol pozorovaný pri tuhých kompozíciách, kde s vyšším prítlakom klesal OLF faktor. Pre sklzovú vzdialenosť platí, že je približne podobná pri oboch skupinách látok. Je teda možné hovoriť, že výkonnosť vyššie spomenutých kompozícií je závislá na aplikačných parametroch a s ich zvyšujúcim sa aplikovaným množstvom sa zvyšuje riziko premazania kontaktu.

Pri látkach LCF bolo zistené, že ich schopnosť znížiť trenie na nízku úroveň je silno závislá na aplikačných parametroch vid' Obr. 43. Materiál LCF – N poskytuje vyššiu sklzovú vzdialenosť v oblasti nízkeho trenia, pričom táto vzdialenosť sa predlžuje s vyššou prítláčnou silou a dobou aplikácie. Podobný záver platí pre kompozíciu LCF – C, avšak hodnoty sklzovej vzdialenosti v tomto prípade sa pohybujú v jednotkách metrov. Optimum aplikačných parametrov pre túto látku na dosiahnutie porovnateľných výsledkov je posunuté do vyšších prítláčnych síl a dlhšej doby aplikácie.



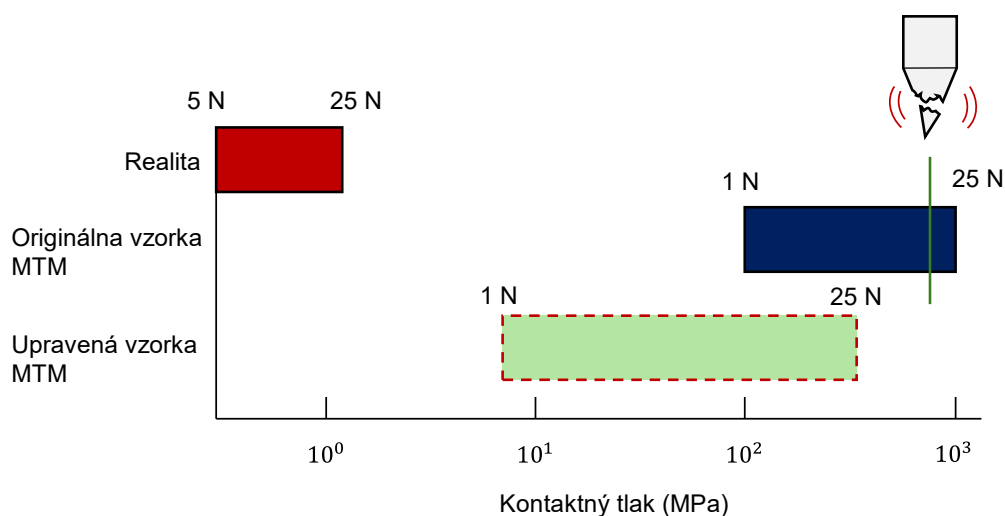
Obr. 50 Porovnanie výkonnosti tuhých a tekutých modifikátorov [17]

Zaujímavým výsledkom je porovnanie trakčných kriviek jednotlivých látok vid' Obr. 52. Ako sa dalo predpokladať, HPF produkty poskytovali trenie v strednej oblasti a zároveň nedosahovali negatívny sklon. Naopak pri LCF produktoch mohol byť pozorovaný klesajúci trend krivky. Toto správanie bolo spozorované predovšetkým u materiálu LCF – N, kde pri každom počiatčnom meraní OLF faktoru bol tento prejav zaznamenaný. Tento materiál, aj napriek dobrým mazacím vlastnostiam oproti LCF – C, nesie so sebou riziko možného vzniku stick slip oscilácií v mieste aplikácie – na okolku.



Obr. 52 Porovnanie trakčných kriviek pri aplikácii rôznych materiálov

Aby bolo možné preniesť závery z laboratórneho prostredia do praxe, je potrebné ozrejmiť zjednodušenia a limitáciu tohto prístupu. Jednou z nevýhod použitia tribometra MTM je zložitá opakovateľnosť upnutia vzoriek kontaktných telies. Pri prvotných experimentoch bolo odpozorované, že pri niekoľkonásobnom použití disku došlo k relatívnemu posunutiu osi drážky na disku voči osi otáčania náboja. Týmto spôsobom môže pri neadbalej obsluhu dochádzať k skresľovaniu výsledkov. Pri zmene relatívnej polohy osi drážky disku voči osi náboja, sa rozširuje drážka na disku, a tým sa mení aj kontaktný tlak, čo môže mať negatívny vplyv na výsledky. Ďalšou nevýhodou je nutnosť prvotného roztočenia disku zariadenia pred testom z pravidla v dĺžke 6 sekúnd. Počas tejto doby dochádza k aplikácii modifikátora, avšak nedochádza k zbieraniu dát. Táto podmienka obmedzuje možnosti doby aplikácie na zariadení MTM2 do 7 sekúnd. Vo všetkých grafoch bol tento čas vynechaný, pretože sa jedná o systematický vplyv, a teda nemá dopad na trend výsledkov.



Obr. 51 Grafické znázornenie kontaktného tlaku vzorky tuhého modifikátora v realite a v zariadení MTM

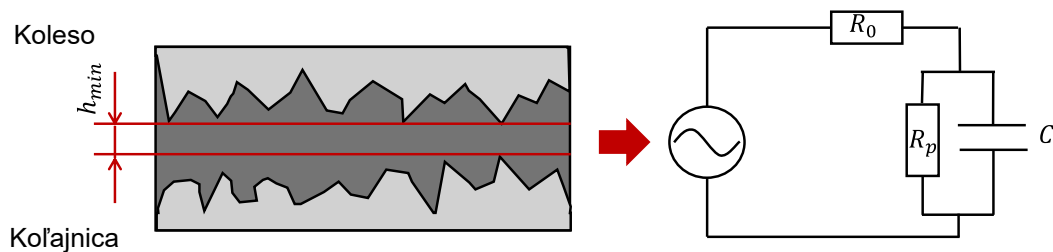
Hlavným parametrom, ktorým sa testy na MTM a reálnou situáciou odlišujú, je vyššie spomínaný kontaktný tlak vid' Obr. 51. Nejedná sa však o kontaktný tlak medzi kontaktnými telesami, ale medzi vzorkou modifikátora trenia a kontaktným telesom. Pri použitých silách počas testov dosahoval kontaktný tlak na ostrej špičke vzorky (modrou) vyššie stovky MPa. Tvar ostrých vzoriek sa pri testoch osvedčil pomerne dobrou opakovateľnosťou vid' Obr. 36. Naopak, na reálnom podvozku medzi tyčinkou modifikátora trenia a kolesom koľajového vozidla (červenou) sa tento tlak pohybuje na úrovni do 1 MPa. Tento nepomer bol spôsobený tvarom vzorky, ktorá bola schválne tvarovaná do špičky. Ak by sme chceli priblížiť testovacie podmienky bližšie k realite, musel by byť tvar vzorky pozmenený (zelenou), čo by však úplne znemožnilo presnú aplikáciu do kontaktu. Úprava tvaru vzorky by spočívala vo vytvorení plochy o približnom rozmere valivej stopy na špičke vzorky. Pri testoch sa tiež ukázalo, že pri silách vyšších ako 20 N sa ostrá špička vzorky láme a dochádza k jej znehodnocovaniu. Pre výsledky bližšie sa realite by bolo ideálne urobiť testovanie priamo na koľajovom vozidle alebo na podobnom simulátore, ktorý by zabezpečil podobné kontaktné tlaky medzi realitou a experimentom. Prípadné priblíženie sa realite by bolo možné použitím upraveného tvaru vzorky, kde však treba klásť vyšší dôraz na presnosť aplikácie.

6.2.2 Impedancia

Hypotéza H2, že existuje kritická frekvencia napájacieho napätia, kedy je impedancia kontaktu najvyššia bola zamietnutá. Pri meraní bolo potvrdené, že neexistuje vzťah medzi impedanciou a frekvenciou pri aplikovanom modifikátore trenia vid' 5.5. Pri tvorení hypotézy bolo vychádzané z predpokladu, že aplikáciou materiálu s dielektrickými vlastnosťami do kontaktu dostane kontakt kapacitný charakter [21]. Impedancia takéhoto kontaktu by sa riadila rovnicou:

$$Z = \sqrt{R^2 + \left(\frac{1}{2\pi fC}\right)^2} \quad (9)$$

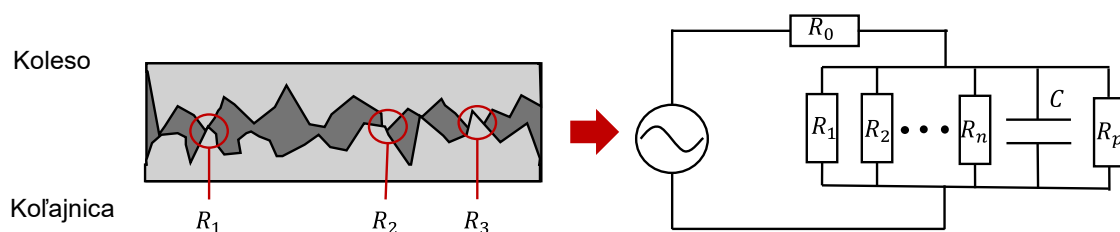
Ak by vrstva modifikátora bola koherentná, tak by vykazovala kapacitný charakter. Takýto stav je možné si predstaviť ako doskový kondenzátor s kapacitou C so stratovým odporom dielektrika R_p . V takomto obvode s nízkou kapacitou kondenzátora by výsledná impedancia závisela na frekvencií napájacieho napätia, pričom by dosahovala pomerne vysoké hodnoty impedancie. Takto postavený elektrický obvod by sa riadil podľa rovnice 9.



Obr. 53 Grafické znázornenie obvodu s kapacitným charakterom

Z merania bolo zistené, že celková impedancia Z obvodu nezávisí na napájacej frekvencii, čo môže znamenať, že nedošlo k vytvoreniu koherentnej vrstvy. Ak vrstva modifikátora trenia nebola kontinuálna, tak dochádzalo k styku kontaktných telies na výstupkoch povrchu. Styk týchto výbežkov mal výrazne nižší odpor R_1 až R_n , ako miesta s dostatočnou hrúbkou vrstvy tuhého modifikátora s kapacitou C a stratovým odporom dielektrika R_p , a preto sa prejavoval iba čisto odporový charakter kontaktu. Takýto obvod by sa riadil rovnicou 10:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{4\pi^2 f^2 C^2 + \frac{1}{R^2}}} \quad (10)$$



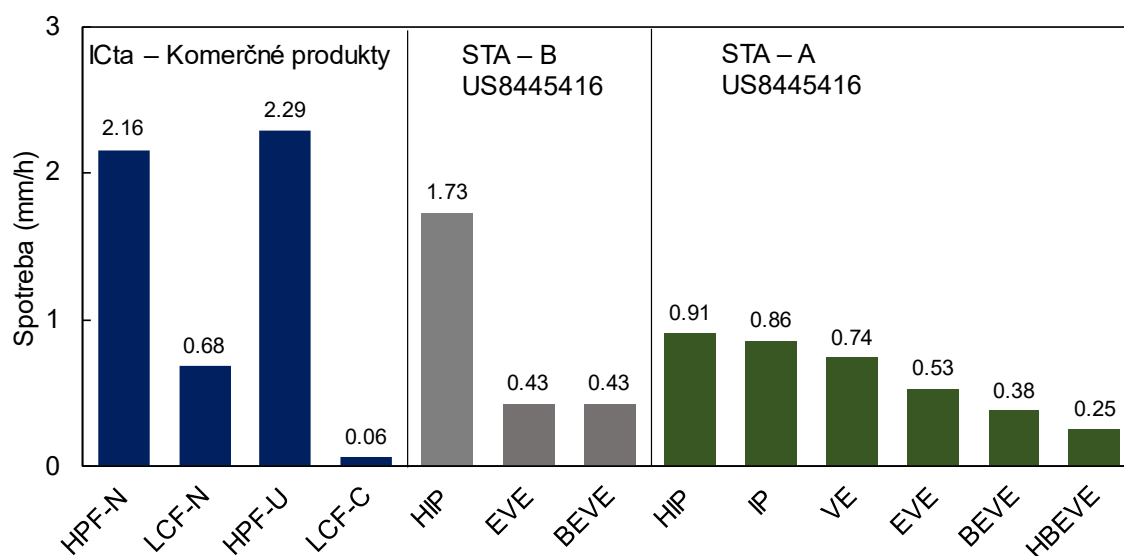
Obr. 54 Grafické znázornenie obvodu s odporovým charakterom

Z merania tiež vyplýva, že existuje marginálny rozdiel v impedancii kontaktu pri aplikácií rôznych zložení tuhých modifikátorov. Ako však pri pozorovaní snímok z mikroskopu bolo zrejme, pri akejkoľvek konfigurácii aplikačných parametrov dochádzalo k vytvoreniu vrstvy, ktorá nepokrývala 100% kontaktnej oblasti. To nepriamo dokazuje aj nameraná impedancia, ktorá nezávisela na frekvencii napájania. K vytvoreniu vrstvy s čisto kapacitným charakterom môže dôjsť iba vo veľmi obmedzenej miere, ak by bol kontakt zahľtený modifikátorom trenia. V laboratórnych podmienkach je vznik takýchto podmienok teoreticky možný, avšak v realite je dosiahnutie za bežnej prevádzky nemožné.

Pre bezpečnosť koľajovej dopravy a jej zabezpečenia vyššie opísaný mechanizmus nepredstavuje hrozbu. Laboratórne podmienky predstavujú najhorší možný scenár, ktorý sa môže vyskytnúť v realite. Výsledky naznačujú, že aj v prípade toho najhoršieho stavu nedôjde k izolácii kontaktu a k potenciálne nebezpečnej situácii.

6.2.3 Spotreba

Meranie spotreby za pomoci zariadenia ICta odhalilo, že materiály LCF majú podstatne nižšiu hodinovú spotrebu ako materiály HPF. Okrem toho boli testované spotreby základných plastov, z ktorých vyplynulo, že materiály ako NYLON, POM-N a PAGXTN nie sú vhodné na ďalšie použitie ako tuhé modifikátory trenia. Naopak, materiály PEEK a POM vykazujú dobré vlastnosti, či už z pohľadu spotreby, alebo emitovania hluku. Dá sa preto o nich uvažovať ako o vhodných adeptoch na ďalšie testovanie trecích vlastností, či ako základnej matrice pre budúce tuhé modifikátory trenia. Hodnoty dosiahnuté pomocou zariadenia je možné porovnať voči hodnotám posunutia vzoriek na pôvodnom zariadení STA vyvinutého v rámci patentu [4].



Obr. 55 Porovnanie výsledkov ICta a STA

Ako je možné vidieť z grafu vid' Obr. 55, výsledky zo zariadenia STA približne odpovedajú výsledkom zo zariadenia ICta. Podrobné porovnanie spotrieb jednotlivých materiálov je nemožné, pretože konkrétne zloženie skúmaných kompozícií je uvedené iba v rámci rozsahu hmotnostných zlomkov. Preto je možné maximálne konštatovať, že nadobudnuté hodnoty hodinovej spotreby sú podobné predovšetkým medzi materiálmi LCF. Naopak hodnoty spotreby materiálov HPF prevyšujú spotrebu testovaných materiálov na zariadení STA. Odlíšnosť medzi nameranými hodnotami môže súvisieť samozrejme so zložením testovaných materiálov, ale aj v spôsobe testovania. Zariadenie ICta používa ako hnací element vinutú tlačnú pružinu na rozdiel od STA, ktoré používalo skrutnú pružinu s konštantným priebehom tlačnej sily. Rozdiel mohol byť v tvare vzorky, pričom v patente nebola vzorka podrobnejšie popísaná, čo mohlo vyústiť v rozdielnom kontakte tlaku vzoriek medzi zariadeniami. Ďalším rozdielom bolo použitie brúsneho rúna ako systému na odstraňovanie vrstvy modifikátora trenia z povrchu kolesa. V pôvodnom patente bol použitý piesok sypaný do kontaktu medzi gumové koleso a hlavné koleso.

Všetky tieto rozdiely v konštrukcii môžu mať dopad na výsledky z oboch zariadení. Bez testu jedného konkrétneho materiálu pri rovnakých podmienkach na oboch zariadeniach nie je možné určiť úroveň skreslenia výsledkov metodikou a laboratórnym zariadením.

Jedným z viditeľných obmedzení zariadenia ICta je použitie práve vinutej tlačnej pružiny. Ako dochádza k deponovaniu vrstvy modifikátora, tak dochádza k posunu vzorky, a teda aj zmenšovania sily prítlaku. Tento fenomén je evidentný vid' Obr. 46. Z testu je však pomerne jednoduché dopočítať prítlačnú silu v každom momente. Z výsledných kriviek spotreby je tak možné deriváciou určiť okamžitú spotrebu tuhého modifikátora v závislosti na aktuálnej prítlačnej sile. Test potom dáva informáciu nielen o hodinovej spotrebe pri jednej konkrétnej sile prítlaku, ale aj informácie o okamžitej spotrebe v celom rozsahu dosiahnutých prítlačných síl.

Pri prvotných meraniach bolo pozorované zahrievanie hlavného disku. Preto padlo rozhodnutie snímať teplotu disku počas meraní pyrometrom. Teplota disku stúpala z väčšej časti kvôli treniu vznikajúcemu medzi brúsnym rúnom a diskom. Z menšej časti potom teplota stúpala kvôli treniu vznikajúcemu v kontakte vzorky a disku, a to predovšetkým pri testovaní základných plastov. Tento vplyv na spotrebu nie je možné v úplnej miere zanedbať. Skrátením testov, či dodaním odvetrania komory vieme zredukovať teplotu disku. Napriek tomu nie je možné sa úplne zbaviť spomínaného vplyvu. Ako výsledky jednotlivých testov naznačujú, s rôznou teplotou disku sa líši aj spotreba jednotlivých materiálov. Preto by bolo vhodné rozobrať túto tematiku v ďalšom výskume.

Pri meraní spotreby komerčných tuhých kompozícií bola subjektívne pozorovaná emisia tuhých častíc. Tento fenomén nebol nijako kvantifikovaný, pričom jediným ukazovateľom bola úroveň znečistenia, či už samotnej testovacej komory, alebo okolia zariadenia. Testy spotreby trvali jednu hodinu, pričom za tento čas došlo k takému znečisteniu, tak že priehľadnosť testovacej komory klesla približne na polovicu. V ďalšom výskume by bolo potrebné sa tomuto problému venovať a smerovať vývoj tuhých modifikátorov ku kompozíciám, ktoré vytvárajú čo najmenšie množstvo uvoľnených častíc.

7 ZÁVĚR

Hlavným zameraním diplomovej práce boli tuhé modifikátory trenia a ich spotreba a výkonnosť vzhľadom na parametre aplikácie, ako dĺžka a sila prítlaku. Okrem toho bol skúmaný vplyv frekvencie na impedanciu kontaktu s aplikovanou tuhou kompozíciou. V rámci experimentálneho vývoja bolo navrhnuté, skompletizované a otestované zariadenie na stanovenie spotreby a impedancie tuhých modifikátorov. V tejto práci bol navrhnutý a použitý aplikátor tuhých kompozícií pre tribometer MTM2. V rámci rešerše bolo analyzované doterajšie poznanie v oblasti tuhých modifikátorov trenia a na tomto základe boli stanovené dve konkrétne oblasti, v ktorých bol potenciál ďalšieho výskumu. Okrem toho boli hodnotené doterajšie prístupy k aplikovaniu tuhých modifikátorov a ich hodnoteniu.

Prvou funkčnou vzorkou bol už spomenutý aplikátor pre tribometer MTM2. Vďaka nemu bolo možné jednoducho a účinne aplikovať kompozície na kontaktné telesá v rámci testovania. Spolu s tým vznikla požiadavka na zariadenie na meranie spotreby a impedancie kontaktu. Druhé zariadenie v rámci tejto práce umožnilo hodnotiť spotrebu nielen komerčných kompozícií, ale aj základných plastov. Toto zariadenie je okrem toho navrhnuté na meranie impedancie kontaktu, do ktorého bol aplikovaný tuhý modifikátor trenia.

Empirickým pozorovaním experimentov bola čiastočne potvrdená závislosť výkonnosti tuhých kompozícií na parametroch aplikácie. Bolo zhodnotené, že nedochádza k prenosu materiálu z jedného kontaktného telesa na druhé. Do budúcnosti by bolo vhodné dané experimenty zopakovať na väčšom testovacom zariadení alebo priamo na reálnych kontaktných telesách. Bolo dokázané, že impedancia kontaktu nezávisí na frekvencii napájacieho napätia a preto funkcia zabezpečovacích systémov nie je nijako ohrozená používaním tuhých modifikátorov trenia. Vyšlo najavo, že HPF materiály majú relatívne vyššiu spotrebu ako LCF materiály. Spolu s tým bol pozorovaný nárast emisie tuhých častíc. V nadväznosti na najnovšiu normu Euro 7, ktorá sprísňuje limity na emisie uvoľnených častíc brzdových obložení, bude potrebné sa do budúcnosti venovať zníženiu vytvárania týchto častíc.

8 VÝSLEDEK VÝZKUMU PODLE RIV

Funkčná vzorka „G“:

ONDÁK, A.; GALAS, R.; OMASTA, M.; ROSENDORF, P.; VAŠÍČEK, M.: *Aplikátor tuhých modifikátorov trenia pre MTM2*. Laboratoř tribologie A3/614, Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

URL: <https://intranet.ustavkonstruovani.cz/file-download/get-project-pdf/474>

Jedná sa o aplikátor tuhých modifikátorov trenia na povrch disku univerzálneho tribometra MTM2. Aplikátor je pripojený k tribometru MTM2 pomocou dvoch strediacich kolíkov, ktoré sú súčasťou vane tribometra. Toto spojenie umožňuje presné uloženie aplikátoru a potrebná stabilita uloženia je zaistená pomocou aretačnej páky, ktorá je súčasťou tribometra MTM2. Najdôležitejšou časťou aplikátora je tubus, ktorý obsahuje šrób s jemným závitom, tlačnú pružinu, patronu a samotnú vzorku tuhého modifikátora trenia. Toto konštrukčné usporiadanie umožňuje presné nastavenie prítlačnej sily, ktorá je vyvedená predopnutím tlačnej pružiny pomocou šróbu. Na zaistenie presnej pozície tuhého modifikátora trenia voči kontaktnej stopke je tubus pripevnený k lineárnemu vedeniu, ktoré umožňuje pohyb tubusu v horizontálnom smere. Súčasťou aplikátoru je tiež LED pásik pre osvetlenie vnútorného priestoru vane tribometra.

Funkčná vzorka „G“:

ONDÁK, A.; GALAS, R.; OMASTA, M.; ROSENDORF, P.; VAŠÍČEK, M.: *ICta; Zariadenie na testovanie konzumpcie tuhých modifikátorov trenia*. Laboratoř kolejové dopravy B2/307, Ústav konstruování, Fakulta strojního inženýrství, Vysoké učení technické v Brně, Technická 2896/2, 616 69 Brno.

URL: <https://intranet.ustavkonstruovani.cz/file-download/get-project-pdf/475>

Hlavnou časťou zariadenia je disk uložený na hriadeli, ktorá je cez zubovú spojku spojená s elektromotorom. Na obvod rotujúceho disku je pomocou aplikátora tuhých mazív pritlačovaná vzorka tuhého modifikátora trenia. Sila prítlaku je nastavená pomocou tlačnej pružiny a prevlečnej matice. Súčasťou aplikátoru je tiež indukčný senzor, ktorý umožňuje stanoviť spotrebu (konzumpciu) testovaného vzorku. Pre priebežné odstraňovanie vytvorenej trecej vrstvy z obvodu rotujúceho disku je zariadenie vybavené čistiacou sústavou. Ďalšou súčasťou zariadenia je prítlačná sústava, ktorá obsahuje menšie koleso, ktoré je pritlačované na obvod hlavného disku, a to za účelom merania impedancie medzi rotujúcim diskom, trecou vrstvou a malým kolesom prítlačnej sústavy.

Článok „JIMP“:

Názov: Influence of application parameters on performance of solid stick friction modifiers

Autor: Ondák A., Galas R.

Abstrakt:

Solid friction modifiers are used as an effective way to address excessive wear and simultaneously as a method of noise mitigation generated from the wheel rail contact. Presented paper tries to assess solid stick friction modifiers performance according to application parameters. Objective of the study is also obtaining the knowledge about the impact of change in frequency of track monitoring system on impedance of contact with layer of solid friction modifier. To reduce the maintenance frequency, the solid sticks must hold out as long as possible, in other words the consumption of FMs must be reasonably low. To archive this, testing apparatus and methodology is presented and consumption of four commercial products is determined.

Stav: Finalizované

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. LEWIS, R a OLOFSSON, U. Wheel-Rail Interface Handbook. 1. San Diego: Woodhead Publishing, 2009. ISBN 9781845694128.
2. STOCK, Richard; STANLAKE, Louisa; HARDWICK, Chris; YU, Marcia; EADIE, Donald et al. Material concepts for top of rail friction management – Classification, characterisation and application. Online. Wear. 2016, roč. 366-367, s. 225-232. ISSN 00431648.
3. HARMON, M. a LEWIS, R. Review of top of rail friction modifier tribology. Online. Tribology (Leeds). 2016, roč. 10, č. 3, s. 150-162. ISSN 1751-5831.
4. Solid stick compositions comprising vinyl ester (US). Příhl.: 26.1.2007. Uděl.: 21.5.2013. US 8.445,416 B2.
5. VÉLEZ, Juan Camilo; CORNELIO, Jesús Antonio Carlos; SIERRA, Robinson Buitrago; SANTA, Juan Felipe; HOYOS-PALACIO, Lina Marcela et al. Development of a composite friction modifier with carbon nanotubes for applications at the wheel–rail interface. Online. Advanced Composites Letters. 2020, roč. 29. ISSN 2633-366X.
6. SONG, Jingdong; SHI, Lubing; DING, Haohao; GALAS, Radovan; OMASTA, Milan et al. Effects of solid friction modifier on friction and rolling contact fatigue damage of wheel-rail surfaces. Online. Friction. 2022, roč. 10, č. 4, s. 597-607. ISSN 2223-7690.
7. SUN, Peiwen; YANG, Jianwei; ZHU, AiHua; HU, Zhongshuo; WANG, Jinhai et al. Experimental study on the effect of solid lubricants on wheel rail contact wear and surface hardness evolution. Online. Industrial Lubrication and Tribology. 2023, roč. 75, č. 8, s. 904-910. ISSN 0036-8792.
8. HANDA, Kazuyuki; IKEUCHI, Katsuyoshi a SAGA, Shinichi. BDevelopment of Improved Wheel Friction Block with Integrated Flange Lubrication and Tread Adhesion Functions/b. Online. Quarterly Report of RTRI. 2021, roč. 62, č. 3, s. 197-200. ISSN 0033-9008.
9. EADIE, Donald T.; KALOUSEK, Joe a CHIDDICK, Kelvin C. The role of high positive friction (HPF) modifier in the control of short pitch corrugations and related phenomena. Online. Wear. 2002, roč. 253, č. 1, s. 185-192. ISSN 0043-1648.
10. KALOUSEK, J a JOHNSON, K L. An Investigation of Short Pitch Wheel and Rail Corrugations on the Vancouver Mass Transit System. Online. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 1992, roč. 206, č. 2, s. 127-135. ISSN 0954-4097.

11. Intelligent pneumatic power solid flange lubrication system and lubricating method (Čína). China Academy of Railway Sciences. Přihl.: 25.11.2016. Uděl.: 13.8.2019. CN106379372B.
12. Aplicator for a solid stick composition. L.B Foster rail technologies. 2021. Přihl.: 21.10.2020. Uděl.: 29.4.2021. WO2021077217A1.
13. L.B. FOSTER. Wheel Tread Friction Management. Online. Dostupné z: <https://lbfoster.com/rail/friction-management/friction-management-products/top-of-rail-and-wheel-tread-friction-management/wheel-tread-friction-management>. [cit. 2024-04-11].
14. TRADEPRESS MEDIA GROUP. Rail lubricants and friction modifiers 2021. Online. Dostupné z: <https://www.progressiverailroading.com/mow/news/Product-update-Rail-lubricants-and-friction-modifiers-2021--64514>. [cit. 2024-04-11].
15. LEWIS, R.; GALLARDO, E.A.; COTTER, J. a EADIE, D.T. The effect of friction modifiers on wheel/rail isolation. Online. Wear. 2011, roč. 271, č. 1-2, s. 71-77. ISSN 00431648.
16. KHAN, Saad Ahmed; LUNDBERG, Jan a STENSTRÖM, Christer. Carry distance of top-of-rail friction modifiers. Online. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2018, roč. 232, č. 10, s. 2418-2430. ISSN 0954-4097.
17. GALAS, Radovan; SKURKA, Simon; VALENA, Martin; KVARDA, Daniel; OMASTA, Milan et al. A benchmarking methodology for top-of-rail products. Online. Tribology international. 2023, roč. 189, s. 108910. ISSN 0301-679X.
18. SIEMENS MOBILITY. Clearguard TCM 100 Track Vacancy Detection System. Online. 2016. Dostupné z: https://assets.new.siemens.com/siemens/assets/api/uuid:c0a13519-6066-4d88-a066-87787158720b/momm-b10150-00_clearguardtcm100d72dpi.pdf. [cit. 2024-04-11].
19. ARIAS-CUEVAS, O.; LI, Z. a LEWIS, R. Investigating the Lubricity and Electrical Insulation Caused by Sanding in Dry Wheel–Rail Contacts. Online. Tribology Letters. 2010, roč. 37, č. 3, s. 623-635. ISSN 1023-8883.
20. HARDWICK, Christopher; LEWIS, Stephen a LEWIS, Roger. The effect of friction modifiers on wheel/rail isolation at low axle loads. Online. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2014, roč. 228, č. 7, s. 768-783. ISSN 0954-4097.
21. BOWEN, Patrick. Basic Theory of Contact Resistance. Online. 2020. Dostupné z: <https://deringerney.com/basic-theory-of-contact-resistance/>. [cit. 2024-04-15].

10 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

CoA	Coefficient of adhesion
CoT	Coefficient of traction
MTM	Mini traction machine
OLF	Over lubrication factor
I	Skľzová vzdialenosť v strednej oblasti trenia
Z	Impedancia
C	Kapacita
R	Odpor
HPF	High positive friction
LCF	Low coeficient of friciton
TCM	Track circuit monitoring
SIL	Safety integrity level
ICta	Impedance consumption testing aparatus
STA	Stick testing aparatus
HIP	Halogenated Isophthalic Polyester
EVE	Epoxy Vinyl Ester
BEVE	Bisphenol Epoxy Vinyl Ester
IP	Isophthalic Polyester
VE	Vinyl Ester
HBEVE	Halogenated Bisphenol Epoxy Vinyl Ester

11 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 1 Prizma diagram diplomovej práce	14
Obr. 2 Trakčná krivka	15
Obr. 3 Rozdelenie oblasti friciton managmentu	16
Obr. 4 Zníženie opotrebovania kontaktnej dvojice A) B)	17
Obr. 5 Spôsoby aplikácie v praxi a) skrutnou pružinou b) stlačeným vzduchom.....	18
Obr. 6 Pružinový aplikátor HPF.....	19
Obr. 7 Gravitačný aplikátor (A Schéma (B V pracovnej polohe.....	19
Obr. 8 Spojitosť trakčných a časových kriviek.....	20
Obr. 9 a) Opakovanie časových testov pri rôznej úrovni sklzu b) Porovnanie trakčný testov suchého kontaktu a kontaktu s tuhým modifikátorom trenia	20
Obr. 10 Závislosť počtu cyklov do dosiahnutia hraničnej hodnoty od množstva aplikovaného tekutého modifikátoru	21
Obr. 11 Systém TCM 100	22
Obr. 12 Izolácia kontaktu pri aplikácií piesku	23
Obr. 13 Rozdiel v impedancii medzi čistým kontaktom a aplikovaným modifikátorom ..	24
Obr. 14 Spotreba tyčinky pneumaticky hnaného systému	25
Obr. 15 Merná spotreba základných matric tuhých modifikátorov	25
Obr. 16 Zariadenie STA	26
Obr. 17 Znázornenie hypotéz.....	30
Obr. 18 Metodika postupu diplomovej práce	32
Obr. 19 Zariadenie MTM2	33
Obr. 20 Schéma zariadenia na aplikáciu tuhých kompozícií	34
Obr. 21 Tvar a rozmery vzoriek pre zariadenie MTM2.....	35
Obr. 22 Tvar a rozmery vzorky pre zariadenie ICta.....	36
Obr. 23 Oblasti trakčných zón	37
Obr. 24 Postup merania podľa metodiky OLF	38
Obr. 25 Hodnotenie výkonnosti podľa metodiky OLF	39
Obr. 26 Schéma aplikátora tuhých kompozícií.....	42
Obr. 27 Hotové zariadenie na aplikáciu tuhých modifikátorov trenia	43

Obr. 28 Hlavné konštrukčné uzly ICta.....	44
Obr. 29 Kvalita diskretizácie modelu	45
Obr. 30 Hlavné tvary a frekvencie vlastných frekvencií ICta	45
Obr. 31 Aplikátor tuhých kompozícií	46
Obr. 32 Zostava vretena s pohonom	47
Obr. 33 Čistiaca zostava	48
Obr. 34 Zostava čistiaceho mechanizmu.....	49
Obr. 35 Prítlačná zostava	49
Obr. 36 Štandardný priebeh časových testov	50
Obr. 37 A) Výsledky časových testov pri premennom prítlačku B) Výsledky časových testov pri premennom čase aplikácie (zobrazené iba reprezentatívne krivky zo súboru meraní). 51	
Obr. 38 A) Graf celkovej retentivity pri premennej prítlačnej sile B) Graf celkovej retentivity pri premennom čase.....	51
Obr. 39 A) Vzorka pred testom B) Vzorka po teste C) Vyhodnotenie	52
Obr. 40 Snímky z mikroskopu pre jednotlivé aplikačné parametre A - F	53
Obr. 41 Priebeh odbúravania tuhého modifikátora z kontaktu	54
Obr. 42 OLF mapa HPF materiálov	55
Obr. 43 Sklzová vzdialenosť LCF materiálov.....	56
Obr. 44 Opotrebovanie vzorky a) NYLON b) PEEK c) POM d) PAGXTN e) POM-N f) PEEK-N	57
Obr. 45 Porovnanie hodinovej spotreby plastov a komerčných kompozícií.....	58
Obr. 46 Graf úbytku kompozície HPF - U a) a teploty disku v čase b) a zmeny prítlačnej sily	58
Obr. 47 Závislosť impedancie na frekvencií.....	59
Obr. 48 Oblasť aplikátoru vhodná na odstránenie pre zlepšenie viditeľnosti vzorku	60
Obr. 49 Umiestenie odsávania a senzorov častíc.....	62
Obr. 50 Porovnanie výkonnosti tuhých a tekutých modifikátorov	64
Obr. 51 Grafické znázornenie kontaktného tlaku vzorky tuhého modifikátora v realite a v zariadení MTM.....	65
Obr. 52 Porovnanie trakčných kriviek pri aplikácií rôznych materiálov.....	65
Obr. 53 Grafické znázornenie obvodu s kapacitným charakterom.....	67

Obr. 54 Grafické znázornenie obvodu s odporovým charakterom	67
Obr. 55 Porovnanie výsledkov ICta a STA.....	68

12 SEZNAM TABULEK

Tab. 1 Aplikačné parametre z literatúry	22
Tab. 2 Zoznam použitých materiálov	35
Tab. 3 Frekvencie vlastných módov zariadenia	46
Tab. 4 Výsledky hmotnostného úbytku a priemeru trecej plochy	52

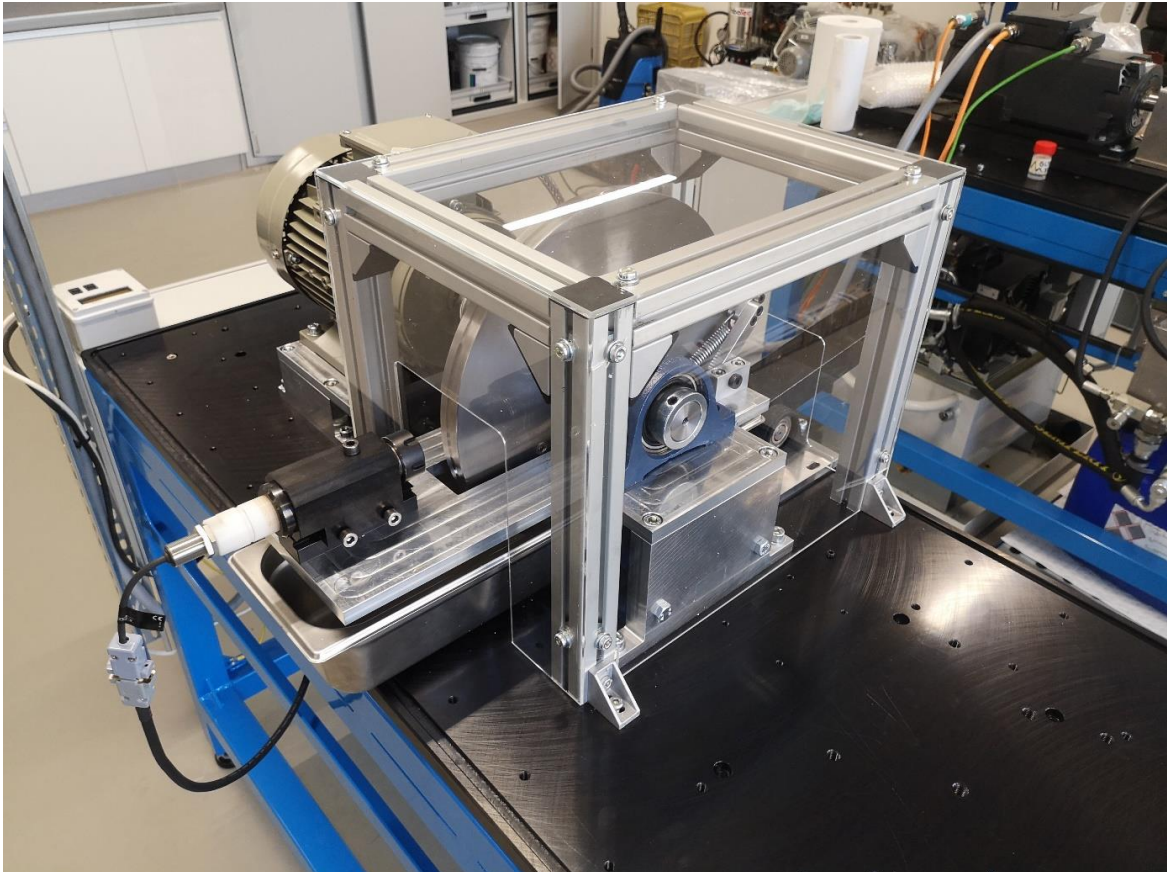
13 SEZNAM PŘÍLOH

- Príloha 1** Návod na obsluhu zariadenia ICta
- Príloha 2** Tabuľka hustoty tuhých modifikátorov
- Príloha 3** Výkresová dokumentácia: ICta
- Príloha 4** Výkresová dokumentácia: Aplikátor tuhých modifikátorov trenia pre MTM2

PRÍLOHA 1

Manuál na obsluhu ICTA

Zariadenie ICTa je určené na meranie spotreby a impedancie tuhých kompozícií. Pred začiatkom práce sa odporúča prejsť si manuál a oboznámiť sa s jeho základnými funkcionalitami. Jedná sa o elektrické zariadenie pracujúce s napätím 380V, preto je nutná náležitá opatrnosť. Obsluha by mala nosiť vo vlastnom záujme osobné ochranné pomôcky, ako sú rukavice a dýchaciu masku.



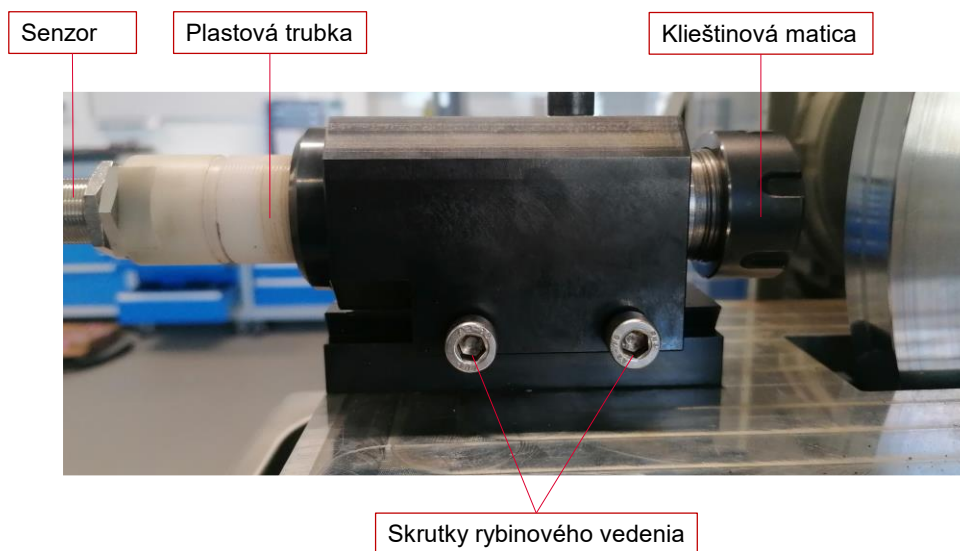
Zapnutie stroja

Na ľavej strane rozvádzača sa nachádza hlavný vypínač. Jeho rýchlym otočením z polohy 0 do polohy I privedieme napätie na všetky elektrické spotrebiče. V prípade práce na stroji je nutné tento vypínač vypnúť. Pri pomalom otáčaní vypínača môže dôjsť k vybaveniu prúdovej ochrany v hlavnom rozvádzači laboratória. Pre opätovné nahodenie slúži prúdový chránič pod číslom 18.



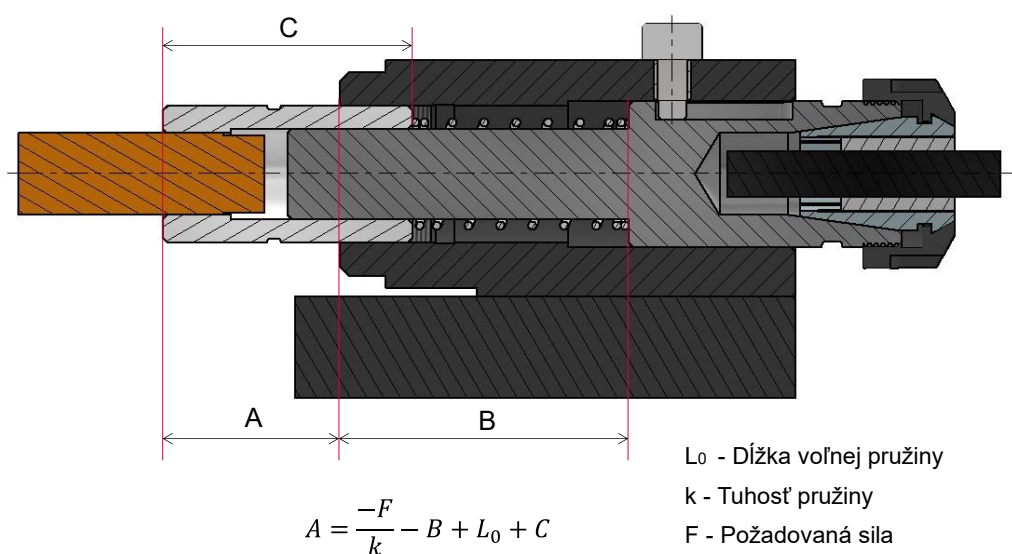
Upnutie vzorku

Na upínanie vzorku slúži klieštinový upínač so sadou klieštin ER 25, ktoré sú k dispozícii k zariadeniu. Pre upnutie stačí vložiť vzorku do klieštiny a dotiahnuť klieštinovú maticu. Celý držiak vzorku je po upnutí prisunutý na rybinovom vedení do kontaktu s diskom. Rybinové vedenie je pomocou dvoch skrutiek M10 patrične ustavené.



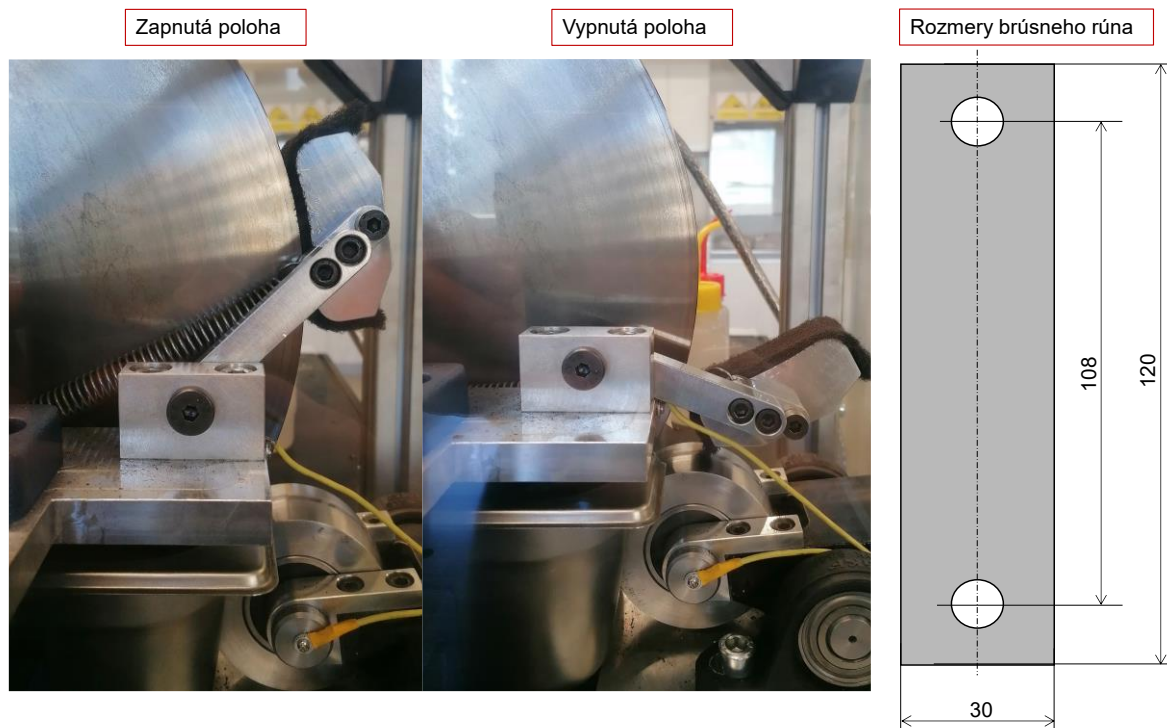
Nastavenie prítlačnej sily

Na vyvedenie prítlačnej sily slúži vinutá tlačná pružina o priemere 1,8 mm tuhosti 2,68 N/mm. K dispozícii sú alternatívne pružiny o priemere 2,5 mm a tuhosti 7,29 N/mm a o priemere 2 mm a tuhosti 2,98 N/mm. Regulovanie prítlačnej sily je riešené plastovou trúbkou, ktorej doťahovaním sa pružina stlačuje a tak je vyvodzovaná prítlačná sila. Po nastavení prítlačnej sily je možné namontovať senzor priblíženia do plastovej trúbky. Senzor má snímací rozsah 0,5 až 7 mm, a preto je nutné ho inštalovať čo najbližšie k čelu upínača. Snímanie senzoru indikuje LED dióda, pričom ak bliká, snímaný predmet je mimo rozsahu. Ak dióda svieti, tak je predmet v snímacom rozsahu.



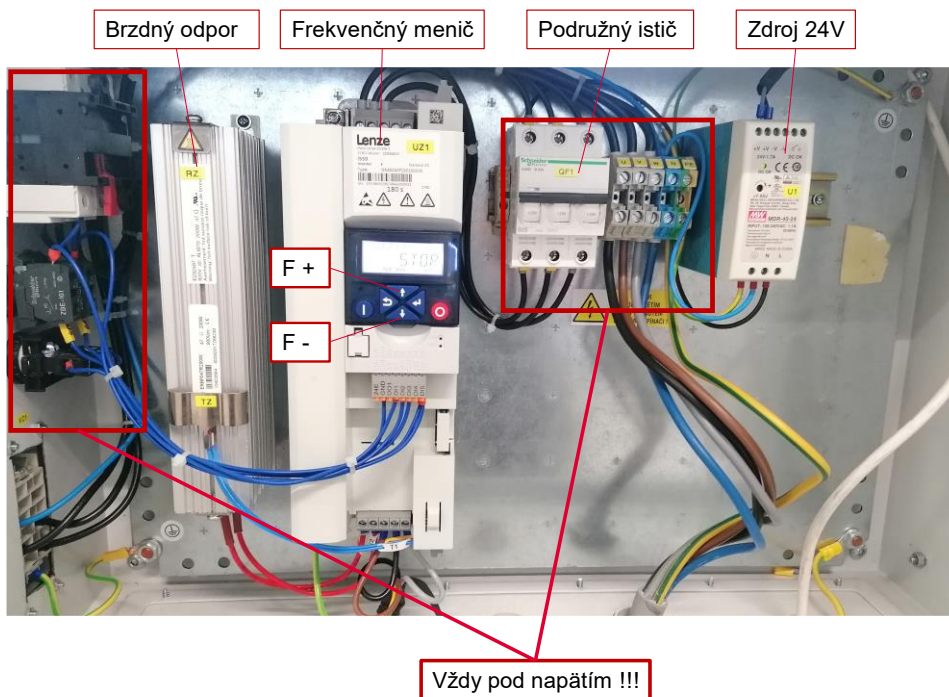
Čistenie disku

O čistenie disku sa stará bistabilný mechanizmus, na ktorom je dvoma šróbmi uchytené brúsne rúno. Pred spustením je mechanizmus uvedený do vypnutej polohy a šróby sú demontované spolu s použitým rúnom. Nové rúno je následne pomocou šróbov uchytené a celý mechanizmus je uvedený do zapnutej polohy. Brúsne rúno je chystané predom v prúžkoch o rozmeroch 120 x 30 mm s dierami o priemere 9 mm s roztečou 108 mm. Na vyhotovenie dier je používaný razník, ktorý je súčasťou príslušenstva.



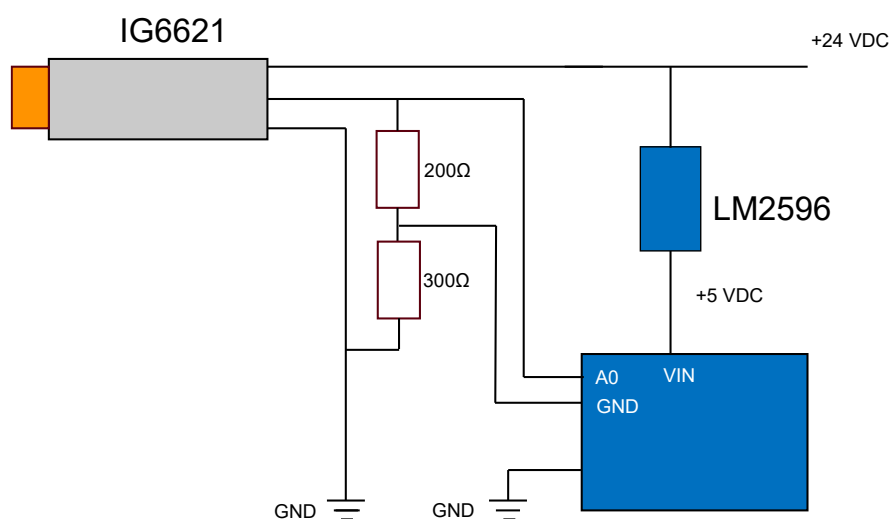
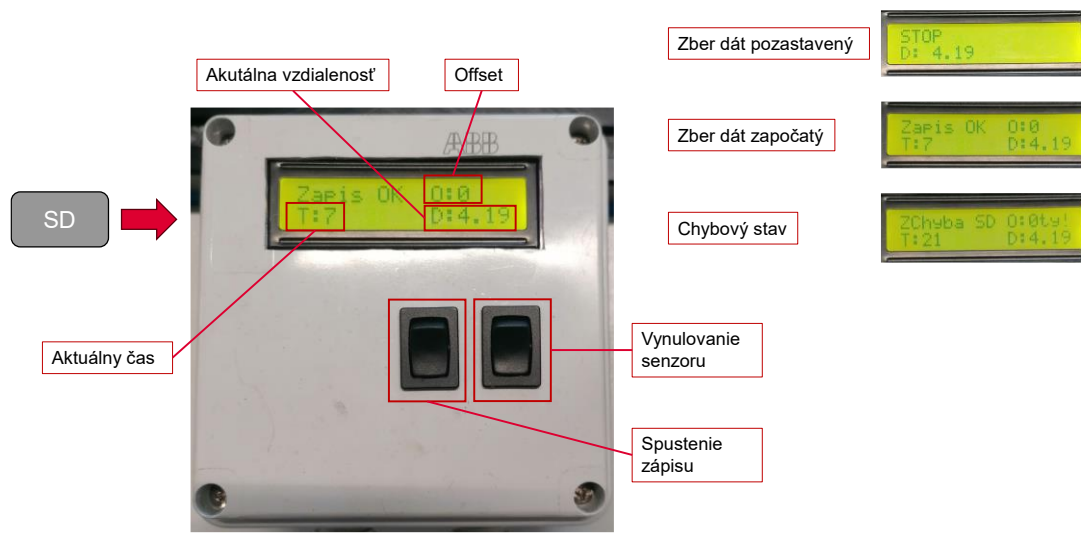
Spustenie pohonu

Na spustenie pohonu a na určenie smeru otáčania slúži vypínač na ľavej strane rozvádzača. Okrem smeru otáčania je možné riadiť rýchlosť rotácie disku pomocou frekvenčného meniča. Predvolená frekvencia napájania je 7 Hz, pričom jej zmena je možná pomocou tlačidiel pod displejom frekvenčného meniča.



Zber dát

Na zber dát slúži arduino uno s modulom na ukladanie na SD kartu. SD karta je vkladaná do slotu na ľavom boku krabice. Pri zapnutí hlavného vypínača zariadenia je na mikrokontrolér privedené napätie a posunutie vzorky je snímané iba informačne pre obsluhu. Na vynulovanie snímanej hodnoty a kalibráciu snímača slúži pravé tlačidlo na krabici. Po jeho stlačení sa aktuálna hodnota posunutia zapíše ako offset a všetky hodnoty budú o tento offset upravené. Na zapnutie zápisu dát slúži ľavé tlačidlo na krabici. Po jeho stlačení dôjde k zápisu na SD kartu v intervale 1 s, pričom časovač je nastavený na 3600 s. Hodnota časovača je v ľavom dolnom rohu. Po uplynutí tejto doby je zápis ukončený. V prípade poruchy SD karty je na displej vypísaný poruchový stav. Na manuálne ukončenie merania stačí opäť stlačiť ľavé tlačidlo. Po ukončení merania by mala byť SD karta zo zariadenia vyňatá, údaje presunuté z textového súboru MERANIE a textový súbor premazaný a uložený.



Poznámky:

- Súbor MERANIE nesmie byť vymazaný, mažu sa iba údaje v ňom.
- Občas sa stane že prvá hodnota v súbore je úplne skreslená. V tomto prípade stačí hodnotu vymazať.
- Ak na displeji pri zapnutí zápisu nevykazuje údaje, stačí zariadenie vypnúť a zapnúť chyba by sa mala opraviť. Ak vykazuje: „Zápis OK“ tak údaje sú zapisované na kartu v poriadku, len nie sú vypisované na displej.

Meranie impedancie

Na meranie impedancie je dedikovaná zostava prítlačného kolesa, ktorá je galvanicky oddelená od zbytku zariadenia. Meranie impedancie kontaktu je umožnené vďaka dvom žltým vodičom, ktoré sú pripojené k zariadeniu. Meranie impedancie nie je riešené v rámci meracieho reťazca opísaného vyššie a je potrebné zostaviť periférny merací reťazec. Tuhosť zariadenia pri vysokých zaťaženiach použitých na meranie impedancie nie je optimálna, a preto sa neodporúča prekračovať obvodové rýchlosti cez 2 m/s z dôvodu zvýšenej hlučnosti.

Čistenie a údržba

Na čistenie kontaktných telies a všetkých kovových povrchov je odporučený izopropyl alkohol. Na čistenie plastového krytovania sa používa čistá voda. Pri znečistení prachovými časticami je vhodné použiť vysávač.

PRÍLOHA 2

Hustota komerčných tuhých modifikátorov

	HPF - N	HPF - U	LCF - C	LCF - N
Hustota ($\frac{g}{cm^3}$)	2,06	1,54	1,82	2,16