



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

VÝVOJ TRIBOMETRU PRO MĚŘENÍ ADHEZE NA REÁLNÉ KOLEJNICI

DEVELOPMENT OF A TRIBOMETER FOR THE ADHESION MEASUREMENT ON A REAL RAIL

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michal Vodehnal

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Milan Omasta, Ph.D.

BRNO 2019

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Bc. Michal Vodehnal**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Konstrukční inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. Milan Omasta, Ph.D.**
Akademický rok: 2018/19

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:

Vývoj tribometru pro měření adheze na reálné kolejnici

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Adheze v kontaktu kola a kolejnice vyjadřuje schopnost přenosu tečných sil bez vzniku prokluzu. Tuto schopnost značně ovlivňují zejména provozní a klimatické podmínky. Pro posouzení těchto vlivů je důležité měření adheze na reálné trati, k němuž lze využít několik metod s různou mírou modelového zkreslení. Nejjednodušším způsobem je použití přenosného tribometru.

Typ práce: vývojová – konstrukční

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

Projekt: TAČR

Cíle diplomové práce:

Hlavním cílem je vyvinout přenosný traťový tribometr pro stanovení adheze na reálné kolejnici. Tribometr bude umožňovat změnu brzdného momentu a je určen pro použití na širokopatní i žlábkové kolejnici.

Dílčí cíle diplomové práce:

- provést a vyhodnotit rešerši dostupných zařízení,
- definovat požadavky na zařízení vzhledem k uvažovanému použití,
- navrhnout a analyzovat konstrukční řešení,
- realizovat zařízení a ověřit jeho funkčnost.

Požadované výstupy: průvodní zpráva.

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

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2019.pdf

Seznam doporučené literatury:

STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. Engineering tribology. 3rd ed. Boston: Elsevier Butterworth-Heinemann, 2005. ISBN 07-506-7836-4.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2018/19

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Předložená diplomová práce se zabývá vývojem tribometru pro měření adheze na reálné kolejnici. Práce obsahuje přehled základních pojmů týkajících se kontaktu kola a kolejnice. Následuje přehled zařízení, která jsou schopna měřit adhezi na reálné trati. Vlastní řešení autora obsahuje konstrukční návrh tribometru, navrženou metodiku měření a také popis jednotlivých součástí. Výstupem práce je funkční vzorek, který je ověřen v laboratorních podmínkách a na reálné trati.

KLÍČOVÁ SLOVA

přenosný tribometr, měření adheze, součinitel adheze, kontakt kola a kolejnice

ABSTRACT

The submitted master's thesis describes the development of a tribometer used to measure the adhesion of a real rail. The thesis contains an overview of the basic terms concerning wheel and rail contact. Following that, there is an overview of devices that are able to measure the adhesion on a real track. The author's solution includes a design of the tribometer, the proposed measurement methodology and also a description of the individual components. The result of this thesis is a functional device, verified in laboratory conditions and on a real track.

KEYWORDS

portable tribometer, adhesion measurement, coefficient of adhesion, wheel-rail contact

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VODEHNAL, Michal. *Vývoj tribometru pro měření adheze na reálné kolejnici*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/113216>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce Ing. Milan Omasta, Ph.D.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu Ing. Milanu Omastovi, Ph.D. za veškeré cenné rady, vstřícný přístup a čas, který se mnou strávil při konzultacích. Také bych rád poděkoval Ing. Vojtěchu Polnickému za pomoc s elektronikou a programováním.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

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

.....

Michal
Vodehnal

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1	Kontakt kola a kolejnice	16
2.1.1	Adheze	16
2.1.2	Faktory ovlivňující adhezi	19
2.2	Měření adheze na reálné trati	20
2.2.1	Přídavná zařízení na měření adheze	20
2.2.2	Měřicí podvozek	21
2.2.3	Měřicí vozidlo	22
2.2.4	Strojově tlačené tribometry	23
2.2.5	Ruční tribometry	24
2.3	Konstrukce ručního tribometru	24
2.3.1	Hlavní části	24
2.3.2	Princip měření	25
2.3.3	Verze ručního tribometru	26
2.4	Výsledky měření s ručním tribometrem	27
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	29
3.1	Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše	30
3.2	Analýza problému	31
3.3	Podstata a cíle diplomové práce	32
4	KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	33
4.1	Volba koncepční varianty	33
4.2	Volba způsobu vyhodnocení součinitele adheze	35
4.3	Volba parametrů měřicího kola	36
4.4	Vyvození normálové síly	37
4.5	Průběh měření	37
4.6	Zhodnocení koncepčního řešení	38
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	40
5.1	Požadavky na zařízení	40
5.2	Princip měření	40

5.3	Konstrukce tribometru	42
5.3.1	Měřicí modul	42
5.3.2	Normálové zatížení	46
5.3.3	Lineární vedení	48
5.3.4	Tělo tribometru	52
5.4	Ovládání a elektronika	54
5.4.1	Měřicí řetězec	54
5.4.2	Metodika měření	54
5.4.3	Ovládání v programu Labview	55
5.5	Realizace	56
5.5.1	Kalibrace snímače momentu	56
5.5.2	Elektromagneticky ovládaná brzda	57
5.5.3	Elektronika	62
5.6	Experimentální ověření v laboratoři	63
5.6.1	Postup sestavení adhezní křivky	63
5.6.2	Vliv opakovaných průjezdů	64
5.6.3	Vliv rychlosti	65
5.6.4	Vliv normálové síly	65
5.6.5	Opakovatelnost měření	66
5.7	Experimentální ověření na reálné trati	67
5.7.1	Měření na širokopatní kolejnici	67
5.7.2	Měření na žlábkové kolejnici	68
6	DISKUZE	69
6.1	Zhodnocení navrženého řešení	69
6.2	Analýza přesnosti měření	70
6.3	Parametry vyvinutého zařízení	72
7	ZÁVĚR	73
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	74
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	76
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	78
11	SEZNAM TABULEK	81
12	SEZNAM PŘÍLOH	82
13	PŘÍLOHY	83

1 ÚVOD

Jedním z klíčových předpokladů efektivního řízení hnacího ústrojí kolejových vozidel je pochopení dějů, které nastávají v kontaktu mezi kolem a kolejnicí. Mezi hlavní procesy významně ovlivňující styk těchto dvou elementů patří adheze, kterou lze definovat jako schopnost přenosu tečných sil bez vzniku prokluzu [1]. Díky vhodnému rozložení výkonu na hnací kola lze dosáhnout efektivního rozjezdu kolejových vozidel a jejich bezpečnému brzdění. Během jízdy se výkon aplikuje tak, aby se ve styku přenášela co největší síla a zároveň aby nedošlo k prokluzu kol.

Odhadnout součinitel adheze lze pomocí empirických vzorců (Kother, Curtius-Kniffler), které se v praxi stále často používají. Avšak jejich výsledky se v dnešní době nedají považovat za příliš odpovídající, jelikož tyto vzorce byly odvozeny v 50. letech minulého století a od té doby se vozidla změnila (např. ve stavbě pojezdů, využitím nových pohonů atd.) [2].

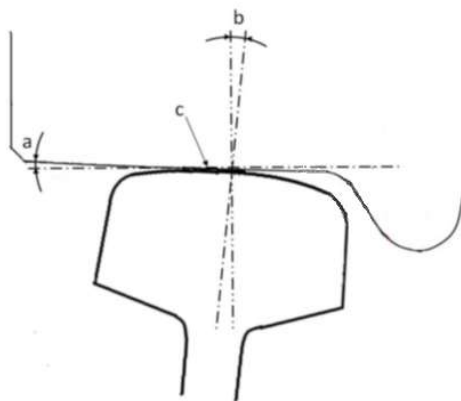
V dnešní době jsou kolejová vozidla schopná stanovit skluz a adhezi během jízdy. Děje se tak díky měření aplikovaného výkonu a otáček jednotlivých náprav. Většina zkoumaných problémů zabývajících se kontaktem kola a kolejnice je však studováno na laboratorních zařízeních, která simulují reálný kontakt. Při těchto testech lze nastavit různé velikosti zatížení, či aplikovat modifikátory tření, a simulovat tak různé podmínky v kontaktu. Patří sem zařízení Ball-on-Disk, které používá kuličku, jež se odvaluje po otáčejícím se disku. Další druh tribometrů, nejčastěji používaných v laboratoři, je tribometr Twin-Disk, jenž se sestavuje ze dvou kol, které spolu tvoří simulovaný kontakt kola a kolejnice. Rychlost otáčení kol je různá, takže je vyvolán řízený skluz. Existují konfigurace s koly, která jsou menší než reálná kola u vozidla – tzn., že to jsou tribometry se zmenšeným měřítkem. U nich se objevuje modelové zkreslení výsledků, jelikož je zde jiná velikost kontaktní oblasti než ve skutečném kontaktu mezi kolem a kolejnicí. Ale existují také takové, které obsahují reálné kolo od vozidla a druhé kolo je vyrobeno přímo z materiálu kolejnice, součásti jsou tedy v reálném měřítku [3].

Laboratorní podmínky neumožňují dokonalé simulování klimatických podmínek. Pro studium adheze je vhodnější měřit na reálné trati s reálnými třecími vrstvami. Pro tyto účely jsou využívána zařízení, která jsou schopna měřit na reálných kolejnicích a zkoumat tak kontakt v podmínkách co nejbližších skutečnosti. Jedním takovým zařízením je i přenosný tribometr, jehož vývojem se diplomová práce zabývá.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Kontakt kola a kolejnice

Kola i kolejnice v kolejové dopravě jsou uzpůsobeny tak, aby při kontaktu těchto dvou elementů docházelo k co nejmenší energetické náročnosti pro pohyb. Díky vysokému modulu pružnosti oceli je deformace v kontaktu malá i při vysokém zatížení. Důsledkem toho je i malá styková plocha (1,5–2,5 cm²), která je podle Hertzovy teorie v ideálním případě eliptická. Valivý odpor je potom malý, a tudíž je doprava tohoto druhu energeticky výhodná [6]. Na obr. 2-1 lze vidět schematicky znázorněný kontakt kola a kolejnice. Kontakt na rovných úsecích tratě probíhá teoreticky v jednom bodě (ve skutečnosti se jedná o elipsu). V místě **c** se stýká temeno kolejnice s běhounem kola. Zde je přenášeno veškeré vertikální zatížení a jsou přenášeny i tečné síly umožňující pohyb vozidla. Kolej je uložena se sklonem dovnitř (viz. Obr. 2-1, úhel **b**) tak, aby se zatížení lépe přenášelo do pražců.



obr. 2-1 Schéma styku kola a kolejnice [7]

2.1.1 Adheze

V místě kontaktu kola a kolejnice probíhá děj zvaný **adheze**. Tu lze definovat jako schopnost přenášet tečné síly mezi kolem a jízdni dráhou bez vzniku prokluzu. Tato definice platí jak pro kolejovou dopravu, tak i dopravu silniční. Z fyzikálního hlediska se adheze skládá ze tří jevů, které jsou vzájemně provázané a nemohou prakticky existovat odděleně. Těmi jevy jsou: smykové tření, valení a spin. Poslední zmíněný spin se také nazývá vrtné tření a vzniká ve styčné ploše mezi kolem a kolejnicí při natáčení kola kolem své svislé osy. Tím se vyvolávají přídatné skluzové rychlosti, ale většinou nejsou nikterak velké, proto se spin často zanedbává.

Adheze je vyjadřována součinitelem adheze, což je podíl trakční (tečné) síly ku síle normálové (viz rovnice (1)). Rozdíl mezi součinitelem adheze a tření je v tom, že v tření vystupuje třecí síla, která vzniká při čistém skluzu, kdež to u adheze dochází ještě k odvalování, takže je přítomna síla tečná.

$$\mu = \frac{F_T}{F_N} \quad (1)$$

kde:

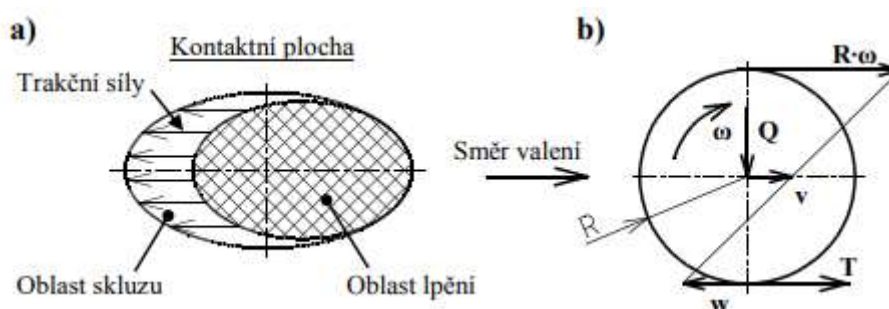
μ [1] součinitel adheze

F_T [N] tečná síla

F_N [N] normálová síla

Styková plocha

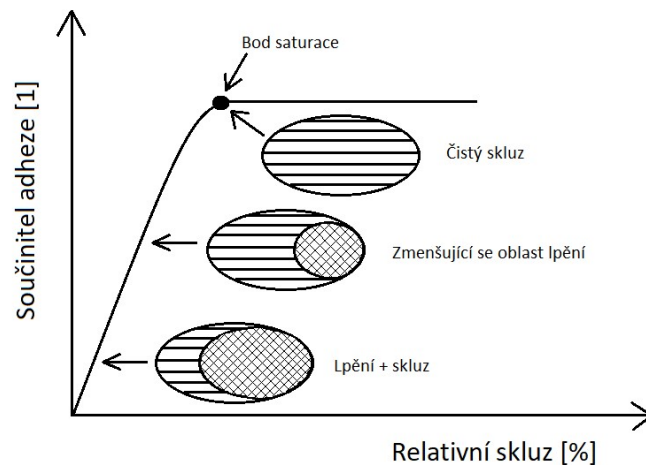
Stykovou plochu lze rozdělit na dvě oblasti. První je oblast lpění (stick), kde dochází k odvalování bez prokluzu, a druhou je oblast přenášející tečné (trakční) síly tzv. oblast skluzu (slip), která se vytváří díky elastické deformaci těles v kontaktu. V závislosti na skluzové rychlosti (skluzu) se mění i vzájemný poměr velikosti těchto dvou oblastí. Když je skluz nulový, tak celá kontaktní plocha je v režimu lpění a žádné tečné síly nejsou přenášeny. Tento stav se označuje jako valení. Pokud dojde ke změně obvodových rychlostí kola (tzn. buď brzdění nebo akcelerace), začne se oblast lpění zmenšovat a narůstá skluz. Hranice mezi skluzem a lpěním se postupně posunuje směrem ke vstupu kontaktu, takže oblast skluzu se nachází u výstupu kontaktu [7–9].



obr. 2-2 a) Kontaktní plocha, b) Odvalování kola [9]

Trakční křivka

Pohyb těles je tedy kombinace odvalování a skluzu. Jak roste skluz, lineárně s ním rostou i tečné síly. Adheze v kontaktu je popisována tzv. adhezní charakteristikou (trakční křivkou), což je závislost součinitele adheze (popř. tečných sil) na skluzové rychlosti či relativním skluzu (obr. 2-3). Když oblast lpění zcela vymizí (bod saturace), nastane čistý skluz a teoreticky zůstane třecí síla konstantní. Ve skutečnosti však při skluzu tření konstantní není a v momentě, kdy se kontakt dostane do bodu saturace, mohou nastat tři možnosti. Kontakt přejde do režimu pozitivního, neutrálního či negativního tření [10].



obr. 2-3 Trakční křivka s kontaktní oblastí

Po dosažení bodu saturace dochází většinou k poklesu adheze. Tento režim se nazývá negativní tření a dochází často k nadměrnému opotřebením kol a zvýšenému hluku. Při provozu je tedy snaha pohybovat se těsně pod bodem saturace, kdy je adheze dostatečně velká, aby se přenášel co největší výkon, ale skluz není tak velký, aby byl překročen bod saturace. K vyvození pozitivního tření se používají tzv. modifikátory tření, které upravují podmínky v kontaktu [11].

Skluzová rychlost

Výskyt oblastí skluzu a lpění v místě kontaktu v praxi znamená, že se kolo otáčí vždy jinou rychlostí, než která by odpovídala ujeté vzdálenosti. Existuje tedy určitý rozdíl obvodové rychlosti kola a skutečné dopředné rychlosti, kterou se kolo pohybuje vpřed. Tento rozdíl se nazývá **skluzovou rychlostí** w . Tato hodnota se pohybuje okolo 3 % dopředné rychlosti [1].

$$w = R \cdot \omega - v \quad [m \cdot s^{-1}] \quad (2)$$

kde:

- R [m] poloměr kola
- ω [s^{-1}] úhlová rychlost kola
- v [$m \cdot s^{-1}$] dopředná rychlost kola po kolejnici

Relativní skluz

Relativní skluz s je vyjádřen poměrem skluzové rychlosti a rychlosti dopředné. Většinou je udáván v procentech [9].

$$s = \frac{w}{v} = \frac{R \cdot \omega - v}{v} \quad (3)$$

2.1.2 Faktory ovlivňující adhezi

Třecí vrstva

Velký vliv na součinitel adheze mají především kontaminanty v kontaktu kola a kolejnice, tzv. třecí vrstva (third-body layer). Existují přírodní kontaminanty, jako je voda, listy a oxidy železa, které jsou nežádoucí, a jejich výskyt je důsledkem působení okolního prostředí a otevřenosti systému kolo-kolejnice. Na druhé straně jsou umělé kontaminanty, kterými se rozumí lubrikanty a modifikátory, jež jsou přidávány do kontaktu účelně [7]. Přítomnost vody či oleje v kontaktu snižuje součinitel adheze. Nejmenší hodnoty však vykazuje, pokud je trať kontaminována spadajícími listy. Součinitel tření je v tom momentě pod hodnotou 0,1 a s ním klesá i součinitel adheze. Naopak pro zvýšení adheze a tření je do kontaktu aplikován písek, který pomáhá především při rozjezdech a brzdění vozidel. Avšak díky tvrdým částicím dochází k opotřebování kol i kolejnic [9].

Rychlost

Pro odhad součinitele adheze mezi kolem a kolejnicí lze využít vzorce, které byly odvozeny z experimentů. Většinou se stále používají v praxi, jelikož k nim není potřeba žádné vybavení pro měření, takže je to nejjednodušší, nejlevnější, avšak rozhodně nenejpřesnější metoda pro určení součinitele adheze. Jediná veličina, která v nich vystupuje, je rychlost vozidla V vyjádřená v $\text{km}\cdot\text{h}^{-1}$.

- Curtius a Kniffler

- Za sucha

$$\mu = \frac{7,5}{V+44} + 0,161 \quad (4)$$

- Za mokra

$$\mu = \frac{7,5}{V+44} + 0,13 \quad (5)$$

- Kother

$$\mu = \frac{9}{V+42} + 0,116 \quad (6)$$

- Ohyama

- Za sucha

$$\mu = 0,265 \cdot \frac{1+1,451\cdot V}{1+1,879\cdot V} \quad (7)$$

- Za mokra

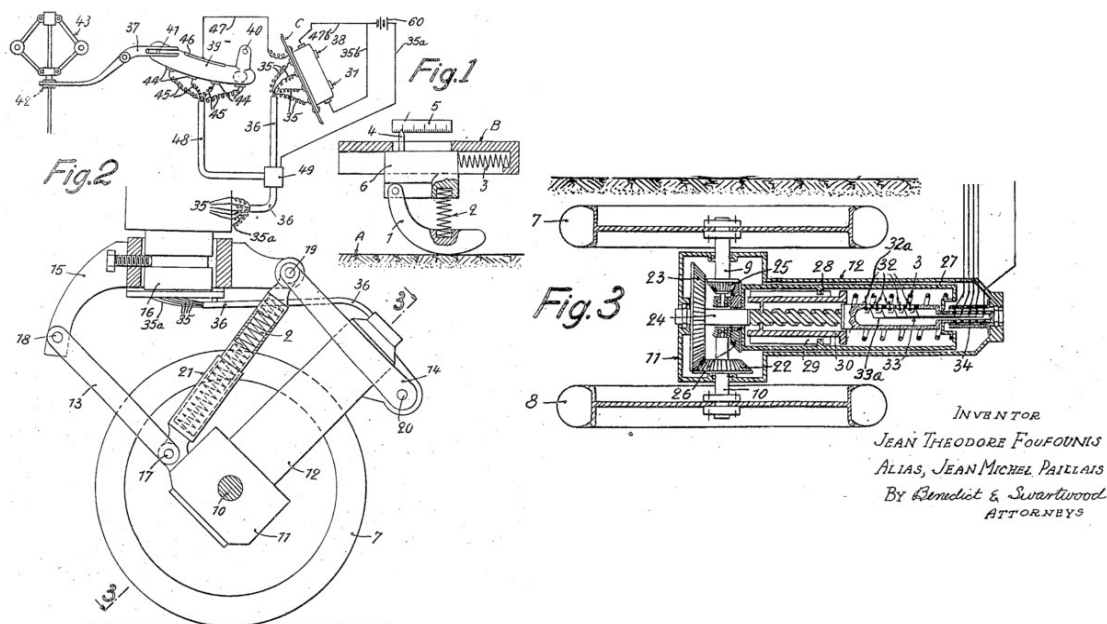
$$\mu = \frac{3,78}{22,6\cdot V} \quad (8)$$

2.2 Měření adheze na reálné trati

Pro měření adhezní charakteristiky mezi kolem a kolejnicí přímo na trati se využívají speciální zařízení. Jedná se např. o celé měřicí vozy nebo části vozů, kterými lze měřit adhezi přímo za provozu. Další možností jsou traťové tribometry, jež mohou být tlačeny po kolejích buď strojově nebo ručně. Traťové tribometry se mohou objevit v provedení se zmenšeným měřicím kolem, takže při měření dochází k modelovému zkreslení. V případě měřicích vozidel nebo měřicích částí vozů existují provedení s reálnou velikostí kola, takže nedochází ke zkreslení.

2.2.1 Přídavná zařízení na měření adheze

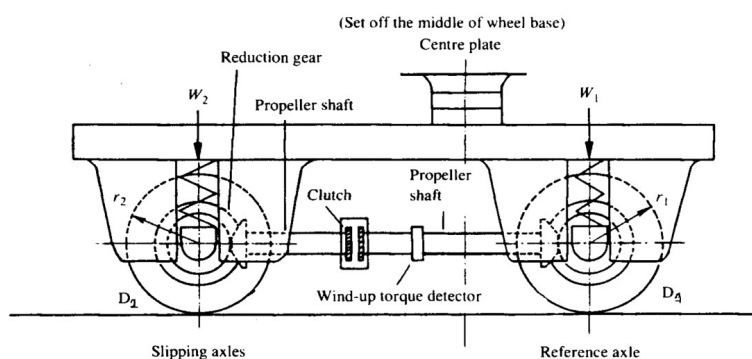
Foufounis přišel již v roce 1950 s patentem [12] na zařízení, které bylo přidělováno k vozidlu a bylo schopno měřit součinitel adheze za provozu. Jeho návrh obsahuje kluzák (obr. 2-4, Fig. 1), který je pružinou přitlačován k povrchu a vyhodnocuje tření, a dynamometrické zařízení (obr. 2-4, Fig. 2), které měří součinitel adheze. Dynamometrické zařízení se skládá ze dvou sousedních měřicích kol, která jsou spojena ozubenými koly (viz obr. 2-4, Fig. 3) s rozdílnými poloměry, takže dochází ke skluzu. Účelem tohoto zařízení bylo informovat řidiče vozidla, pokud je trať moc kluzká. To se dělo pomocí světla na přístrojové desce, které se v okamžiku nebezpečného stavu rozsvítilo [12]. Podobné přídavné zařízení navrhl a sestrojil Popovici [3], avšak sloužilo pro měření součinitele tření, proto zde nebude nadále rozebíráno.



obr. 2-4 Schéma patentu od Foufounise [12]

2.2.2 Měřicí podvozek

Při použití speciálně upravených podvozků, které mohou být aplikovány u běžných vagonů, je docíleno měření za reálných podmínek, a to včetně rychlostí v daných úsecích tratě, třecí vrstvy v kontaktu nebo zatížení. Nagase zveřejnil v roce 1986 [13] a 1989 [14] články, ve kterých jako první popisuje podvozek (viz obr. 2-5), který je schopen měřit adhezi na kolejnici. Skládá se ze dvou náprav spojených převodovkou. Kola referenční nápravy jsou větší (910 mm) než kola skluzové nápravy (860 mm), čímž se vytváří brzdňý moment (autor uvádí „konfliktní moment“) a vzniká skluz. Aby se zabránilo tomu, že by skluz nastával v obou nápravách, je potřeba dát větší normálové zatížení na referenční nápravu. To je vyřešeno posunutím místa napojení podvozku s vagonem blíže k této nápravě.



obr. 2-5 Měřicí podvozek od Nagaseho [13]

Pro výpočet součinitele adheze uvádí autor tyto rovnice:

$$T_1 = F_1 \cdot r_1 \quad (9)$$

$$T_2 = W_2 \cdot r_2 \cdot \mu \quad (10)$$

$$\mu = \frac{r_1 \cdot F_1}{W_2 \cdot r_2} \quad (11)$$

kde:

T_1	[N·m]	moment referenční nápravy
T_2	[N·m]	moment skluzové nápravy
F_1	[N]	tečná síla na referenční nápravě
W_2	[N]	normálová síla na skluzové nápravě
r_1	[m]	poloměr kola referenční nápravy
r_2	[m]	poloměr kola skluzové nápravy
μ	[-]	součinitel adheze

Modernější podvozek IWT4 (Instrumented Wheelset Technology, generation 4) vyvinula společnost SNC Lavalin (viz obr. 2-6). Po připevnění na vagony může měřit nejen normálové a boční síly, ale i síly podélné. Dále měří polohu kontaktu na kolejnici a také rychlost otáčení kol. Pro měření používá tenzometry. Díky vysoké vzorkovací frekvenci až 2 kHz je schopno rozlišit zvlnění koleje. Pro přenos informací slouží bezdrátové spojení, takže není potřeba zařízení spojovat kabely [15].



obr. 2-6 Podvozek IWT4 [15]

2.2.3 Měřicí vozidlo

Kromě speciálních měřicích podvozků byla vytvořena i speciální měřicí vozidla, která mají velikost i podobu opravdových kolejových vagonů, takže nedochází k modelovému zkreslení. Podmínky v kontaktu jsou tedy simulovány naprosto přesně. Nevýhodami mohou být vysoká cena, nutnost použít lokomotivu pro transport či měření a v neposlední řadě je složité takové vozidlo převézt z místa na místo jinak než po kolejích. Britské dráhy vyvinuly v roce 1975 právě takové měřicí vozidlo (viz obr. 2-7). Na jedné nápravě vagonu byla umístěna brzda pracující zvlášť od ostatních brzd, která měla za úkol kola této nápravy přibrzďovat a vyvozovat tak brzdný moment, čímž docházelo k zvyšování skluzu. Nevýhodou bylo, že zařízení neměřilo kontinuálně, ale zapisovalo pouze hodnoty, když nastal skluz kola [15].



obr. 2-7 Měřicí vozidlo Britských drah [15]

2.2.4 Strojově tlačené tribometry

Jelikož měřicí podvozky a vozidla jsou velká zařízení, nevhodná pro přepravu a mají další nevýhody spojené se svojí velikostí a hmotností, byla navržena zařízení, která jsou jednodušší na převoz a nemusí být připojena k lokomotivě. Např. společnost Salient Systems uvedla TriboRailer, což je tribometr, jenž se dá připevnit např. před auto, které je uzpůsobeno jízdě po kolejích. Zařízení jezdí po čtyřech kolech a jedním měřicím kolem na každé straně měří. Celé se dá ovládat z doprovodného vozidla. Trakční křivku získává vyvoláním bočního skluzu (maximálně 2,5 %) natočením měřicích koleček okolo volné osy otáčení. Automaticky shromažďuje data, ukládá GPS polohu a je schopno měřit za rychlosti až $45 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ [3, 8].



obr. 2-8 TriboRailer [3]

Dalším takovým zařízením je Surveyor od firmy Portec Rail Inc., což je komerční název pro patentovaný tribometr z roku 2001 (viz [16]). Celé zařízení je tlačeno doprovodným vozidlem po trati. Zařízení je schopno měřit jak temeno, tak i bok kolejnice zároveň, jelikož pro každou plochu má zvlášť měřicí kolo. Obě kola jsou brzděna servomotory tak, aby docházelo k řízenému skluzu. Umožňuje i vyhodnocovat okolní podmínky (teplota, vlhkost atd.) a zaznamenávat polohu (GPS). Nevýhodami tohoto zařízení mohou být jeho velikost, cena a nutnost mít doprovodné vozidlo, aby mohlo provádět měření [3, 15].



obr. 2-9 Surveyor [3]

2.2.5 Ruční tribometry

Společnost International Engineering na svých stránkách [17] představuje **automatický přenosný tribometr**. Jedná se však pouze o koncept a bohužel k němu nejsou dostupné bližší informace. Na krátkém videu na zmíněných stránkách je možné vidět, že tribometr se uchycuje napevno na kolejnici a měření provádí kolo připevněné na lineární vedení. Pravděpodobně je zde skluz vyvozen pomocí natočení kola kolem svislé osy.

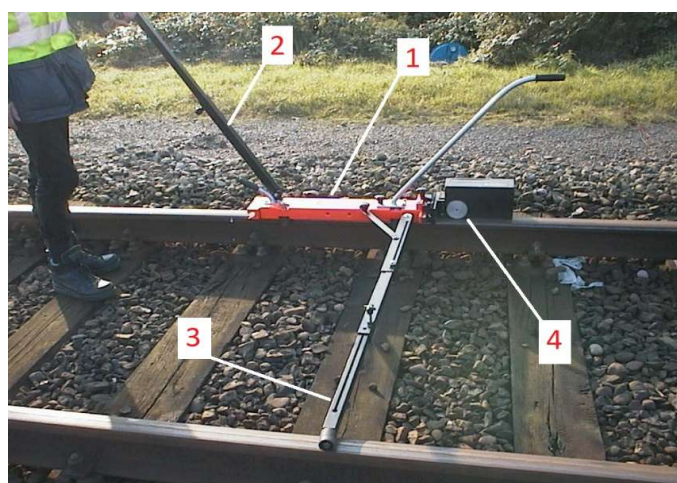


obr. 2-10 Automatický přenosný tribometr [17]

Nejjednodušším zařízením na měření součinitele adheze na kolejích je **ručně tlačný tribometr**. Jak název napovídá, není potřeba žádné mechanizace k jeho provozu. Je také velmi snadný na ovládání a manipulaci. Jelikož zařízení využívá malé měřicí kolo, je kontaktní plocha menší než ve skutečnosti a dochází tak k modelovému zkreslení. Také není dosaženo odpovídající rychlosti, jelikož ta je omezena pouze na rychlost chůze. Z podobného důvodu není zařízení vhodné pro měření dlouhých tratí, ale pouze pro zkoumání lokální části tratě [15, 18]. Zařízení je detailně popsáno v kapitole 2.3.

2.3 Konstrukce ručního tribometru

2.3.1 Hlavní části



obr. 2-11 Součásti ručního tribometru [15]

Ruční tribometr obsahuje několik hlavních částí (viz obr. 2-11). Tělo tribometru (1) se pohybuje po kolejnici díky pojezdovým kolům. Celý tribometr je tlačěn obsluhou pomocí páky s madlem (2). Aby bylo zařízení stabilní, disponuje výklopnou konstrukcí s pomocným kolem (3), které má za funkci pouze oporu na druhé koleji. V přední části se nachází modul s měřicími prvky a měřicím kolem (4).

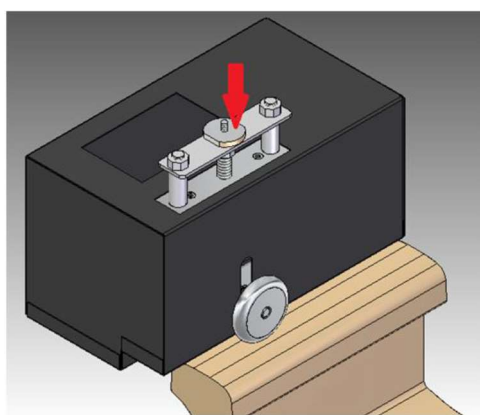
2.3.2 Princip měření

Vyvození skluzu

Podobně jako u ostatních druhů tribometrů měřících adhezi je potřeba měnit rychlost měřicího kola, aby docházelo v kontaktu kola a kolejnice ke skluzu. Změnou rychlosti se ve všech uvedených zařízeních rozumí přibrzdování (zrychlování je složité na řízení). Tomuto účelu slouží elektromagnetická spojka nebo brzda, která aplikuje na kolo brzdný moment. Manuálně nastavitelným proměnným odporem lze měnit skluz spojky, čímž se řídí skluz v kontaktu mezi kolem a kolejnicí. S rostoucím odporem brzdy se zvyšují i tečné síly, a to až do okamžiku, kdy dojde k prokluzu kola [4, 19–21].

Vyvození normálové síly

Normálová síla je důležitá pro zajištění odpovídajícího kontaktního tlaku (1–1,2 GPa) v kontaktu měřicího kola a kolejnice. V praxi jsou používány dva přístupy. Prvním je využití závaží na páce, kde je možno posouváním závaží docílit různé velikosti normálové síly. Tento způsob je však použitelný pouze pro měření temena kolejnice, jelikož se využívá gravitační síly. Druhou možností je použití šroubové pružiny. Dotahováním šroubu lze pružinu stlačovat a je možno tak docílit různé normálové síly. V tomto provedení je umožněno měření součinitele adheze i na boku kolejnice, jelikož pružina již není závislá na gravitační síle [4, 8, 19, 22].



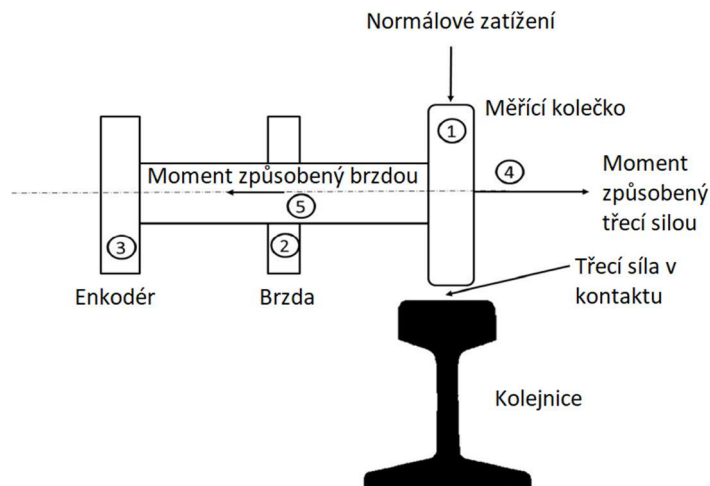
obr. 2-12 Šroubová pružina [22]

Průběh měření

Všechny komponenty pro měření jsou umístěny ve měřicím modulu. Měřicí řetězec se skládá z enkodéru, měřiče momentu, popřípadě silových snímačů a také již zmíněné elektromagnetické spojky či brzdy. Rychlost otáčení měřicího kola je měřena pomocí enkodéru připevněného na hřídeli. V momentě dosažení nastavené rychlosti začne tribometr měřit v nastavených časových sekvencích. Na konci každé sekvence vyhodnotí součinitel tření a výsledek vypíše na digitální displej. Procesorem ovládaná elektromagnetická brzda vyvíjí brzdnu sílu, která má v čase zvyšující se průběh. Brzdny moment je postupně zvyšován až do okamžiku, kdy nastane prokluz mezi kolem a kolejnicí. Poté procesor spustí cyklus od začátku. Součinitel tření je v tomto případě vypočítán z maximálního točivého momentu. Popřípadě lze měřit tečné i normálové síly pomocí silových snímačů a z jejich poměru vypočítávat přímo součinitel adheze. Data jsou nahrávána na paměťovou kartu, po ukončení testu jsou zpracována a pro každou hodnotu skluzu je přiřazen součinitel trakce, čímž je stanovena trakční křivka [4, 19–21].

2.3.3 Verze ručního tribometru

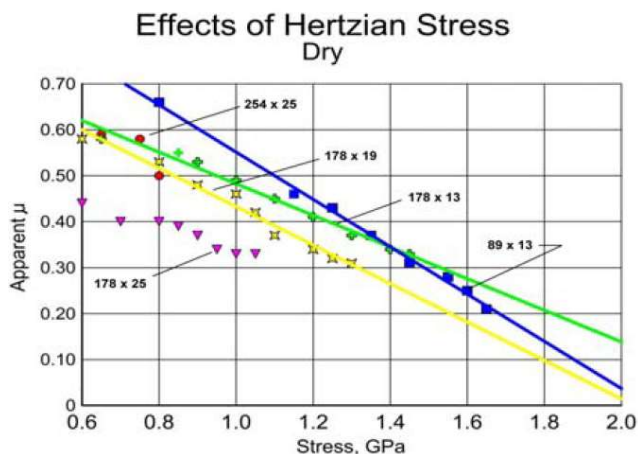
TriboMetro FR 101 je nekomerční ruční tribometr, který využívala Areiza ([4][19]) na stanovení trakční křivky. Tento druh tribometru využívá k vyvození normálové síly šroubovou pružinu a měřicí prvky lze vidět na obr. 2-13 [19]. Další typ ručního měřicího zařízení je **BR tribometr** vyvinutý Britskými dráhami (British Rail – BR) pro společnost AAR (Association of American Railroads). Zařízení má stejnou stavbu jako TriboMetro. Normálová síla je zde vyvozena pomocí závaží, které působí přes rameno páky [8]. Jelikož BR tribometr neumožňuje provádět měření na boku kolejnice, přistoupila společnost AAR na vývoj vlastního prototypu **AAR tribometru**. Rozdíl oproti předchozí verzi spočívá v odlišném původu normálové síly. Kvůli závaží na rameni (využití gravitace) nemohl BR tribometr přenášet sílu na bok kolejnice. Z toho důvodu byla použita pružina, která působí na měřicí kolečko jedoucí po boku kolejnice [8]. Tribometr vyvinutý AAR byl pouze prototyp, proto tento koncept převzala společnost **Salient Systems** (resp. **LB Foster**) a převedla do podoby komerčně prodávaného zařízení [5]. Princip měření je stejný jako v předchozích verzích. Magnetická brzda brzdila měřicí kolečko a normálová síla je opět vyvozena pomocí pružiny. Tribometr přímo měří jak normálovou, tak i třecí sílu, pomocí silových snímačů. Z uvedených zdrojů lze vyčíst, že průměr měřicího kola je 89,0 mm (+/- 0,1 mm) a šířka 9,2 mm (+/- 0,1 mm). Poloměr kontaktní plochy běhounu je 29 mm (+/- 1 mm) [8, 21].



obr. 2-13 Měřící komponenty Tribometro FR 101 [4]

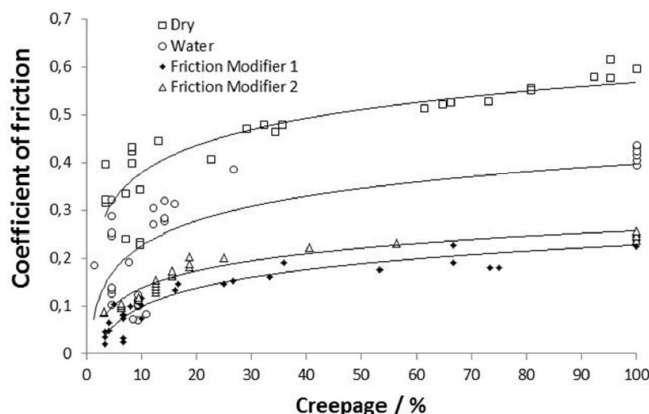
2.4 Výsledky měření s ručním tribometrem

Ruční tribometr je univerzální, lehce přenosné zařízení, které lze použít na měření trakčních vlastností kolejnice. Bylo využito několika autory především na zkoumání vlivu modifikátorů tření a kontaminantů v kontaktu mezi kolem a kolejnicí nebo na měření součinitele tření na kratších úsecích trati. **Harrison** [8] porovnával výsledky měření ručním tribometrem a zařízením TriboRailer. Zjistil, že za sucha ruční tribometr udává součinitel tření větší (0,7) než TriboRailer (0,5). Autor uvádí jako možnou příčinu nižší kontaktní tlak. Poté publikoval další článek [20], ve kterém stávající tribometr upravil tak, aby byl schopen aplikovat větší kontaktní tlak a tím ověřil, že při zvětšení kontaktního tlaku součinitel tření poklesne (viz obr. 2-14).



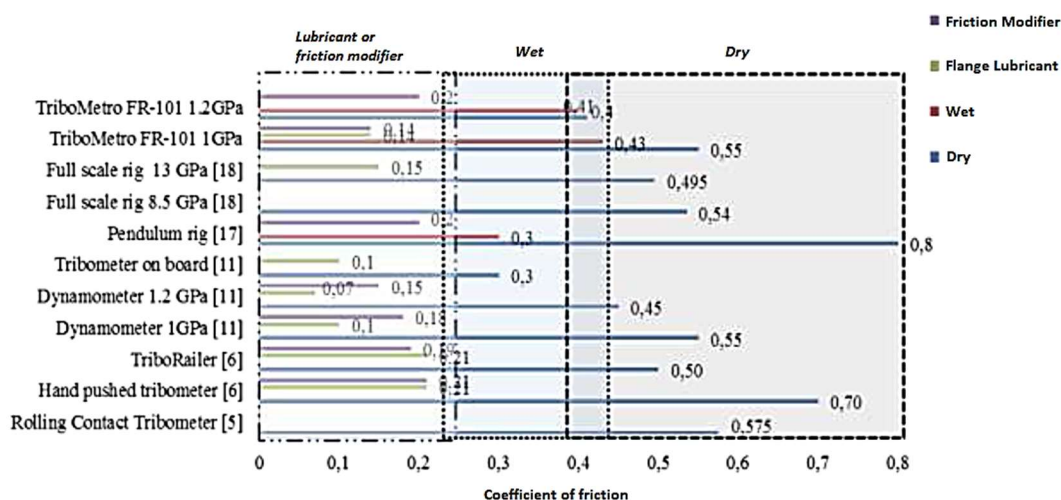
obr. 2-14 Vliv kontaktního tlaku na součinitel tření [20]

Areiza v roce 2013 [4] měřila součinitel tření na kolejnici ve stavech, kdy je kolej suchá, kontaminovaná vodou nebo dvěma různými modifikátory (viz obr. 2-15). O rok později publikovala práci [19], která popisuje měření součinitele trakce pomocí TriboMetro FR 101. Opět do kontaktu aplikovala modifikátory, pro které následně sestavila trakční křivky. Autorka uvádí, že průměrná skluzová rychlost při měření zařízením TriboMetro FR 101 byla 0,5 m/s a kontaktní tlak se pohyboval mezi 1 GPa až 1,2 GPa. Proběhlo 20 měření, z nichž byl stanoven průměrný součinitel trakce a trakční křivka. Před každým testem bylo měřicí kolečko očištěno methanolem a acetonem pro odstranění veškerých kontaminantů [19].



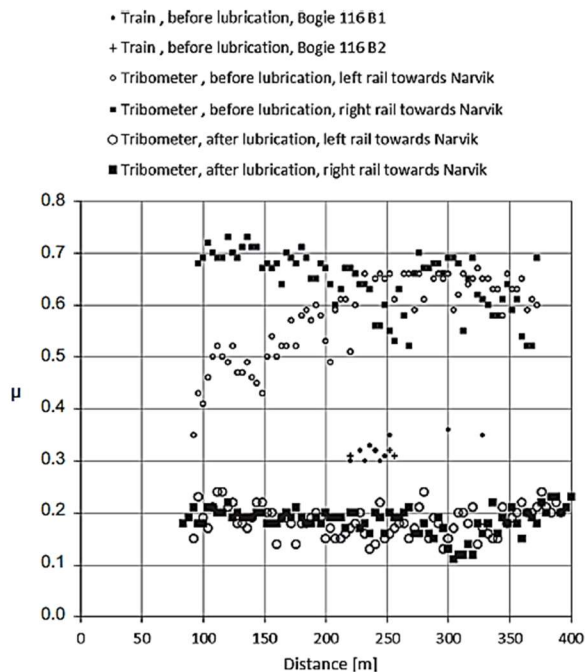
obr. 2-15 Měření součinitele adheze pomocí ručního tribometru s kontaktním tlakem 1 GPa [4]

Také **Van Steenis** [18] používal ruční tribometr k měření adheze na kolejnici a porovnával hodnoty s měřicím vlakem VIRM. Došel k závěru, že ruční tribometr umožňuje získat pouze hrubou představu o skutečné adhezi. Naproti tomu **Olofsson** a **Telliskivi** srovnávali měření součinitele tření na reálné trati ručním tribometrem a laboratorní měření na pin-on-disk přístroji. Obě zařízení vykazovala srovnatelné výsledky [9]. Na obrázku 2-16 lze vidět **porovnání výsledků měření pro jednotlivá měřicí zařízení** s různou mírou kontaminace kontaktu. Rozdíly součinitelů jsou způsobeny odlišnými metodami měření, podmínkami v kontaktu či dosažených rychlostí.



obr. 2-16 Porovnání výsledků součinitele tření pro různá měřicí zařízení [18]

Dalším publikujícím autorem je **Lundberg**, který ve své práci [21] používá ruční tribometr k měření součinitele tření a porovnává ho s vestavěným měřicím systémem v lokomotivě IORE, která táhla 68 plně naložených vagonů uhlí. Chtěl tak zjistit, zda tak zjednodušený systém jako je ruční tribometr, je schopen věrohodně simulovat podmínky v kontaktu. Hodnoty součinitele tření za sucha byly opět vyšší než hodnoty obdržené z lokomotivy (viz obr. 2-17). Při měření s aplikováním modifikátorů tření na kolejnice tomu bylo naopak.



obr. 2-17 Porovnání součinitele tření naměřené ručním tribometrem a podvozkem [21]

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza, interpretace a zhodnocení poznatků z rešerše

V rešeršní části byla popisována zařízení vyhodnocující součinitel adheze. Nejdůležitější je kapitola zabývající se ručním tribometrem, jelikož cílem práce je podobné zařízení navrhnout. V rešerši bylo zjištěno, že pro vyvození skluzu je měněna rychlost kola tak, aby obvodová rychlost byla o určité procento odlišná od dopředné rychlosti vozíku. Z dostupných zdrojů lze vyčíst, že měřicí kola jsou brzděna. Pro tyto účely jsou využívány elektromagnetické spojky či brzdy. Existence skluzu mezi měřicím kolem a kolejnicí je nutná podmínka pro vyvození tečných sil v kontaktu. Rychlosti otáčení jsou měřeny enkodérem [19] [21]. Z rešerše také vyplývá, že ruční tribometry vyvozují kontaktní tlak o velikosti 1–1,2 GPa [19]. Normálová síla potřebná k vyvození takového tlaku může být vyvolána pomocí pružiny, kterou lze regulovat díky dotahování šroubu. Další možností je použít závaží na páce. V obou případech je normálová síla po celou dobu testu konstantní [8]. Tečné síly v kontaktu lze podle rešerše měřit dvěma způsoby. První možností je využití senzorů síly, které dokáží sice měřit přímo sílu, avšak ne v jejím působišti, takže technické řešení je obtížnější. Druhou variantou je dopočítávání sil z krouticího momentu díky znalosti poloměru měřicího kola [8, 21].

V uvedených zdrojích se uvádí, že ruční tribometr měří v nastavených časových sekvencích. Elektromagnetická spojka či brzda aplikuje na měřicí kolo zvyšující se brzdny moment. Software na konci každé sekvence, tj. když dojde k prokluzu měřicího kola, vyhodnotí součinitel tření a výsledek vypíše na digitální displej. Součinitel tření je dopočítáván z maximálního krouticího momentu [4, 19, 21]. Z článků lze také vyčíst, že průměr měřicího kola je v případě tribometru od společnosti Salient Systems 89,0 mm (+/- 0,1 mm) a šířka 9,2 mm (+/- 0,1 mm). Poloměr kontaktní plochy běhounu je 29 mm (+/- 1 mm) [21].

Z rešerše vyplývá, že ruční tribometr neposkytuje zcela věrohodné výsledky a že slouží spíše pro odhad součinitele adheze. Například Harrison došel k závěru, že ruční tribometr nadhodnocuje výsledky součinitele tření (0,7 oproti 0,5 při použití zařízení TriboRailer). Jako možná příčina zde byl uváděn nižší kontaktní tlak. Při aplikaci vyššího kontaktního tlaku dojde ke snížení součinitele tření [20]. Lundberg při porovnání ručního tribometru s hodnotami z měřicího vlaku došel také k závěru, že ruční tribometr nadhodnocuje výsledky. Nejlépe je porovnání vidět na obr. 2-16, kde je porovnání více zařízení pro měření součinitele tření.

3.2 Analýza problému

Práce se zabývá návrhem přenosného tribometru pro stanovení adheze na kolejnici. Z rešerše vyplynulo několik poznatků, které se týkají ručně tlačeného tribometru, jehož princip měření je použitelný pro tuto diplomovou práci. Tyto tribometry mají oproti reálným kolům kolejových vozidel menší měřicí kolo (respektive kontaktní plochu) a především menší kontaktní tlak. Výsledky jsou tedy ovlivněny modelovým zkreslením, kterému se nelze vyhnout. S volbou většího rozměru měřicího kola roste i požadavek na větší normálovou sílu, aby byl zachován požadovaný kontaktní tlak. Zařízení se tedy stává mohutnějším a roste i jeho hmotnost. Na druhou stranu při použití malé normálové síly a malého měřicího disku budou výsledky více podléhat modelovému zkreslení. Je tedy potřeba najít kompromis mezi vhodnou geometrií měřicího kola a normálovou silou, aby zařízení bylo stále lehké a přenosné, a přitom stále dávalo odpovídající výsledky.

Pro vyhodnocení součinitele adheze jsou možné dva přístupy. Prvním je **řízení skluzu a měření tečných sil**, což v praxi znamená, že je měřicí kolo ovládáno tak, aby jeho obvodová rychlost byla vždy o určité procento (skluz) jiná než jeho dopředná rychlost. Adhezní (tečné) síly v kontaktu jsou měřeny a součinitel adheze může být vypočítán. Tato varianta je však velice náročná na řízení, jelikož software musí vyhodnocovat dopřednou rychlost vozíku a okamžitě měnit otáčky tak, aby docházelo k požadovanému skluzu. Druhým možným přístupem je **řídít tečné síly a následně měřit skluz**, čehož využívá ručně tlačený tribometr probíraný v rešerši. Tato varianta je jednodušší na řízení, kdy kolo je přibrzdováno elektromagneticky ovládanou třecí brzdou, na níž lze nastavit konstantní brzdňý moment, a skluz je vyhodnocován pomocí enkodérů. Jelikož je v zadání požadavek na řízení brzdňého momentu, je v této práci použit druhý přístup pro využití adheze a první je zde zmíněn pouze pro osvětlení problematiky.

Elektromagnetická brzda, která zajišťuje změnu brzdňého momentu, se v praxi používá v odlišné aplikaci. Většinou se jedná o navíjecí stroje, kdy je potřeba řídit navíjecí rychlost tak, aby byl navíjený materiál (látka, nitě, papír) stále napnutý, ale zároveň se nepřetrhl. Brzda je proto řízena zpětnovazebně pomocí vlastního ovládacího modulu, který nabízí široké spektrum možností, jak lze brzdu ovládat. V této diplomové práci však nejsou žádné další možnosti kromě konstantního brzdňého momentu potřebné, proto je brzda ovládána bez použití tohoto modulu. Je však zapotřebí prozkoumat vlastnosti brzdy a možnosti jejího ovládání. To znamená stanovit charakteristiku brzdňého momentu v závislosti na ovládacím napětí.

Tribometr musí být použitelný pro žlábkovou i širokopatní kolejnici. Je tedy důležité zajistit vhodné uložení na obou typech kolejnic. Ručně tlačенý tribometr musí být vhodně uložen tak, aby při pohybu po kolejnici z vymezené dráhy nesjížděl. V případě nepohyblivé varianty zařízení, která se na koleje položí a měření bude provádět automaticky, nesmí dojít k samovolnému pohybu po kolejnici, takže musí být navržen vhodný systém upnutí. Kolejnice také často podléhají opotřebení, takže se v některých částech tratě mění jejich tvar i rozchod. Uložení tedy musí být značně variabilní. Při návrhu zařízení je také třeba zohlednit fakt, že žlábková kolejnice je často zapuštěna přímo do vozovky, takže žádná část tribometru by neměla zasahovat pod úroveň temena hlavy kolejnice.

Jak bylo zmíněno v rešerši, v současné době přenosné tribometry již existují. Jeden z nich je však pouze koncept, o kterém nejsou žádné bližší informace. Druhý tribometr, který nabízí pouze jedna firma, je v praxi sice ověřený, avšak jeho použitelnost je omezená pouze na širokopatní kolejnice. Je proto potřeba navrhnout tribometr, který bude umožňovat měření adheze v reálných podmínkách a zároveň bude použitelný jak pro širokopatní, tak žlábkovou kolejnici.

3.3 Podstata a cíle diplomové práce

Hlavním cílem diplomové práce je vyvinout přenosný traťový tribometr pro stanovení adheze na reálné kolejnici. Tribometr bude umožňovat změnu brzdného momentu a je určen pro použití na širokopatní i žlábkové kolejnici. Pro dosažení tohoto cíle je nutné splnit následující dílčí cíle:

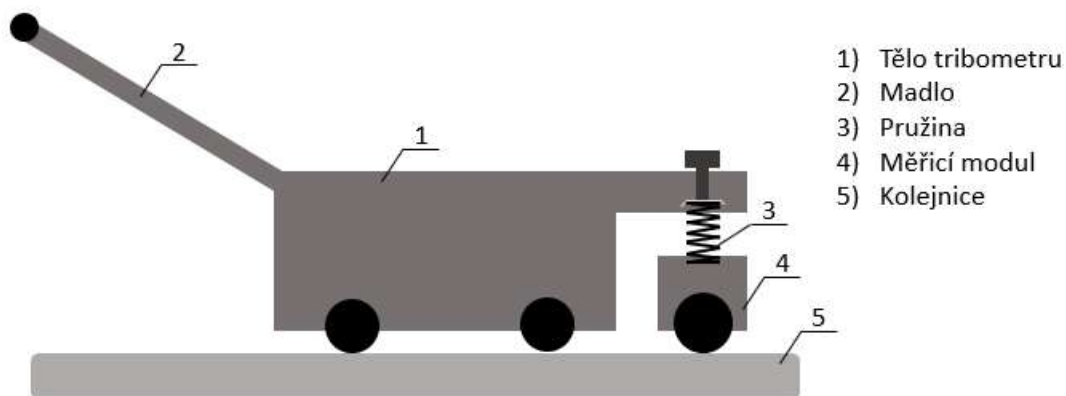
- provést prvotní návrhové výpočty,
- vytvořit koncepční varianty,
- definovat požadavky na zařízení vzhledem k uvažovanému použití,
- stanovit geometrii měřicího kola,
- navrhnout konstrukční řešení,
- navrhnout měřicí schéma,
- zajistit realizaci zařízení,
- navrhnout metodiku měření,
- ověřit funkci zařízení na reálné trati.

Požadovaným výstupem je **průvodní zpráva a funkční vzorek**.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

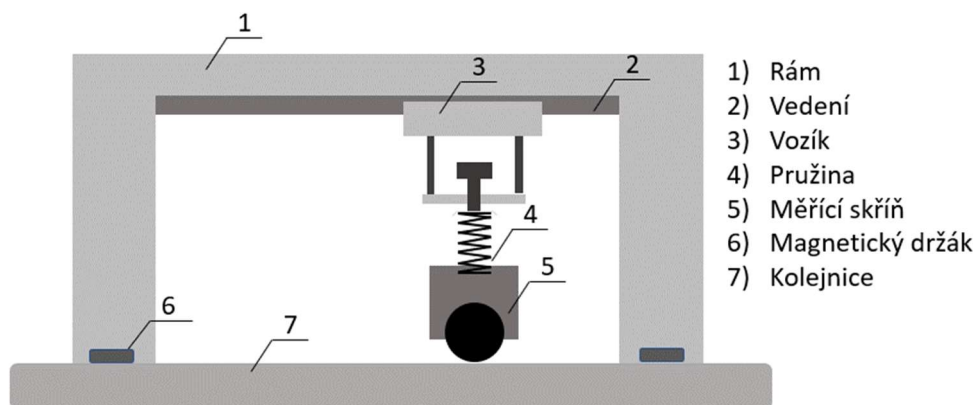
4.1 Volba koncepční varianty

První možností je inspirovat se dostupnými zařízeními a vytvořit ručně tlačný tribometr popisovaný v kapitole 2.3. Zařízení by tedy bylo možné tlačit po kolejích a měřit tak součinitel adheze na dlouhém úseku tratě. Skládalo by se z hlavního těla (obr. 4-1, 1) s pojezdovými koly a tyčí s madlem (2), pomocí které by operátor tribometru ovládal. Dále by byla součástí i výklopná konstrukce s opěrným kolem, díky níž by mělo zařízení stabilitu a bylo by zajištěno vedení po kolejnicích. A samozřejmě by zde byl přítomný měřicí modul (4) obsahující veškeré měřicí prvky. Musí zde být aplikována normálová síla, aby se v kontaktu kola a kolejnice vytvořil dostatečný kontaktní tlak. Normálová síla by mohla být vyvozena buď tlačnou či listovou pružinou (3), nebo pomocí závaží. Výhodou tohoto konceptu je především jednoduchá konstrukce a obsluha. Celé zařízení je také malé a lehce složitelné. Avšak zařízení nemůže být na kolejích žádným způsobem zapřeno proti pohybu vzhůru (u širokopatní kolejnice by to možné bylo, u žlábkové však ne). Síla pružiny může tedy při nedostatku hmotnosti celý tribometr nadzdvihnout. Další nevýhodou by mohla být rychlost pojezdu, jelikož ta by byla závislá na rychlosti chůze operátora, která nikdy nebude konstantní. Do měření by se tak mohli vnášet nepřesnosti vlivem nerovnoměrné rychlosti. Problematické je také vedení tribometru na kolejnicích, jelikož koleje jsou často různě opotřebované, a navíc je nutné umožnit měření na žlábkové i širokopatní kolejnici, které mají odlišný tvar.



obr. 4-1 Ručně tlačená varianta

Druhým řešením je vytvořit tribometr s automatickým pojezdem, který by bylo možné umístit na koleje, provést měření v určitém místě tratě a následně ho posunout a měření opakovat. Zařízení by se skládalo z rámu (obr. 4-2, 1), který by se pomocí magnetických držáků (6) uchytil pevně na kolejnici (7). Normálová síla by byla opět vyvolána buď pružinou (4) nebo závažím. Měřicí modul (5) by byl připevněn na vozík (3) lineárního vedení (2), které by zajišťovalo jeho správnou polohu a pohyb. Bylo by možné použít pasivní lineární vedení, kdy by pohyb měřicího modulu zajišťoval například operátor tribometru nebo by byla použita tlačná pružina uložena horizontálně, kterou by bylo možné stlačit a vystřelit, což by udávalo měřicímu modulu zrychlení. Další možností je využít lineární osy s pohonem, takže by celý proces byl automatický. Nevýhodou tohoto řešení je však větší energetická náročnost celého měření, a tudíž nutnost použít větší baterie, které přidají celému zařízení na hmotnosti. Zařízení však bude schopno provádět jednotlivá měření se stále stejnými podmínkami, tudíž nenastanou chyby způsobené chybou nerovnoměrné rychlosti a všechny výsledky tak budou lépe porovnatelné. Tento tribometr také nemusí, oproti ručně tlačnému, překonat svou vahou sílu pružiny, jelikož bude přichycen pomocí držáků, a tudíž se nenadzdvihne.

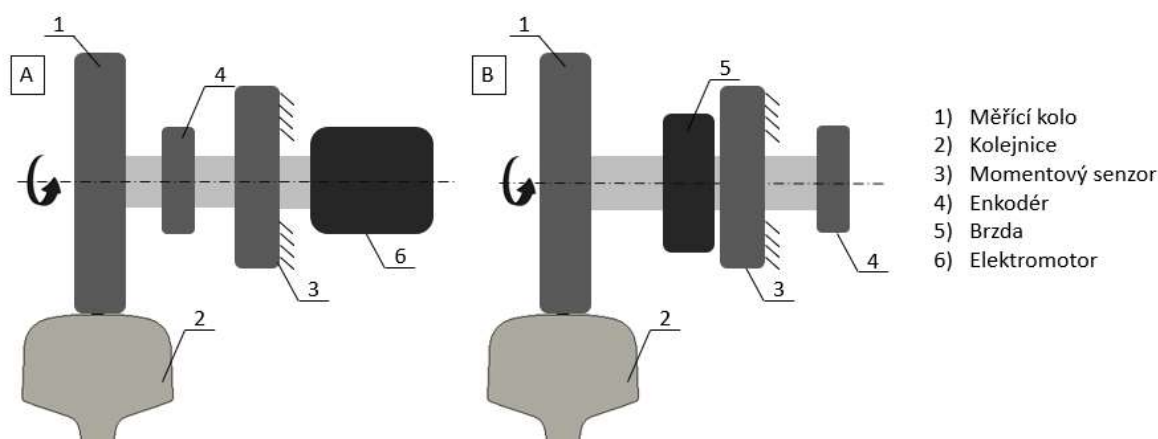


obr. 4-2 Varianta s automatickým pojezdem

4.2 Volba způsobu vyhodnocení součinitele adheze

Způsob měření a vyhodnocení adheze je nezávislý na vybrané koncepční variantě, jelikož měřicí modul i s komponenty lze použít jak v ručně tlačeném tribometru, tak i ve variantě s automatickým pojezdem. Součástí měřicího modulu je měřicí kolo (disk), které simuluje kontakt mezi kolem reálného vozidla a kolejnicí a to tak, že je v kontaktu vyvolán skluz a tečné (adhezní) síly. Ze zadání vyplývá požadavek změny brzdného momentu, což znamená, že na kolo bude aplikován brzdný moment, díky němuž vzrostou tečné síly. Ze známé velikosti momentu, který bude měřen momentovým senzorem, a poloměru měřicího kola lze dopočítat hodnotu tečné síly a následně součinitel tření. Enkodérem je měřena rychlost otáčení měřicího kola, takže je možné vypočítat skluz. Následně může být sestavena adhezní charakteristika, což je závislost součinitele tření na relativním skluzu.

Změnu brzdného momentu je možné provést dvěma způsoby. V **prvním možné variantě** (obr. 4-3 A) by byl využit elektromotor, který by fungoval jako brzda. Aplikoval by brzdný moment na měřicí kolo. Bylo by však zapotřebí složitější zpětnovazební řízení, jelikož by bylo obtížné udržet požadovaný brzdný moment. **Ve druhé variantě** (obr. 4-3 B) by byla rychlost otáčení měřicího kola, které by se odvalovalo po koleji, redukována elektromagneticky ovládanou brzdou, která by udávala kolu brzdný moment, díky čemuž by se v kontaktu zvyšovaly tečné síly. Brzda může být buď třecí nebo prášková. Oběma lze zajistit konstantní brzdný moment, který je nezávislý na rychlosti. Omezení těchto brzd spočívá v malé rychlosti otáčení (pod 15 min^{-1}), kdy může dojít k tzv. stick-slip efektu. Rozhodujícím parametrem pro výběr je velikost brzdy a brzdného momentu, což se odvíjí především od rozměru měřicího kola.



obr. 4-3 Měřicí řetězec s A) - brzdou, B) - elektromotorem

V obou způsobech vyhodnocení součinitele adheze by byl skluz vypočítáván podle rovnice (3), tudíž by bylo nutné měřit rychlost otáčení měřicího kola i dopřednou rychlost, čehož lze docílit pomocí enkodérů. Měření tečné síly by bylo možné zajistit například použitím senzoru síly, který by vyhodnocoval sílu působící v kontaktu. Problémem tohoto senzoru by bylo jeho umístění, jelikož ho nelze vložit přímo do kontaktu, tudíž by vznikl moment, z něhož by musela být tečná síla dopočítána. Další možností by bylo použít momentový senzor, díky kterému by byla známa přesná hodnota brzdného momentu působícího na kolo. Z ní pak lze vypočítat, díky známému průměru měřicího kola, tečnou sílu působící v kontaktu. Při volbě všech měřicích součástí je třeba dbát na kompaktnost a hmotnost celého zařízení. Rozměry těchto dílů nesmí přesahovat rozměr měřicího kola, jelikož by pak docházelo při měření na zapuštěné žlábkové kolejnici ke kontaktu tribometru s vozovkou.

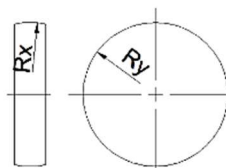
4.3 Volba parametrů měřicího kola

Pro dokonalou simulaci reálného kontaktu by bylo ideální zvolit měřítko 1:1, což by znamenalo, že velikost měřicího kola bude shodná s velikostí reálného kola. Koncept přenosného tribometru tuto variantu však neumožňuje. Je tedy nutné vybrat vhodnou velikost měřicího disku. Při velkém průměru kola musí být pro zachování dostatečného kontaktního tlaku zvýšena i normálová síla. S touto samozřejmě roste hmotnost celého zařízení, ať už pro variantu tlačného tribometru, nebo variantu s automatickým pojezdem, kdy celé zařízení včetně vedení pak musí být tužší. S malým průměrem kola se však kontakt vzdaluje od reality, jelikož kontaktní plocha se stává menší než ve skutečnosti.

V tabulce 4-1 lze vidět varianty velikosti kol, které byly spočítány pomocí Hertzovy teorie pro eliptický kontakt. Z určeného kontaktního tlaku 1 GPa (tato hodnota byla převzata z rešerše) je stanovena potřebná normálová síla. Za předpokladu součinitele tření 0,5 byla vypočítána i tečná síla působící v kontaktu a následně maximální krouticí moment, který nastane při smýkání plně zabrzděného kola. Maximální krouticí moment je důležitý pro výběr konkrétních měřicích prvků jako je elektromagnetická brzda a senzor momentu, aby nedošlo k jejich poškození. Do srovnání byla přidána i varianta kola, kterou používá tribometr TriboMetro a také reálné kolo od vagonu pro porovnání velikosti kontaktní plochy.

tab. 4-1 Parametry měřicího kola

Parametry		TriboMetro	ø60	ø80	ø100	ø120	Reálné kolo
Rozměry kola	R_x (mm)	29	5	15	10	20	0
	R_y (mm)	44,5	30	40	50	60	475
Kontaktní oblast	a (mm)	0,39	0,08	0,22	0,16	0,29	3,99
	b (mm)	0,54	0,26	0,43	0,46	0,63	5,38
Max. kontaktní tlak	p_{max} (GPa)	1	1	1	1	1	1
Normálová síla	F_N (N)	440	44	200	150	385	45052
Třecí síla	F_t (N)	220	22	100	75	193	22526
Krouticí moment	M_{max} (Nm)	9,79	0,65	4,00	3,75	11,55	10699,85



4.4 Vyvození normálové síly

Normálová síla působící na měřicí disk je potřebná k vyvození odpovídajícího kontaktního tlaku 1–1,2 GPa. Jelikož je zařízení koncipováno jako přenosné, odpadají možnosti použít hydraulické nebo pneumatické válce. Nabízejí se tedy možnosti využít závaží, pružinu nebo elektrický aktuátor. Aplikace závaží na měřicí modul by byla nejjednodušším řešením. Skrývala by však několik nedostatků. Především by se jednalo o variabilitu normálové síly. Ta by se měnila buď odebráním či přidáváním závaží, popřípadě by bylo možné využít závaží na rameni pro lepší nastavení. Další možností by bylo využití tlačné šroubové pružiny. Tato varianta by nabízela jednoduchou změnu normálové síly pouhým dotahováním šroubu, kdy by se měnilo stlačení pružiny. Poslední možností by bylo použít elektrický aktuátor, který by tlačil měřicí kolo proti kolejnici. Avšak nerovnosti na povrchu by mohly způsobovat problémy s normálovou silou, jelikož při najetí na výstupek by se normálová síla zvětšila. Bylo by tedy stejně nutné tuto variantu odpružit. S aktuátorem také roste celková energetická náročnost zařízení a požadavky na řízení.

4.5 Průběh měření

Součástí tribometru je i software, který se stará o ovládání samotného zařízení a průběh měření. V případě ručně tlačného tribometru by byl měřicí cyklus naprogramován tak, že by byl postupně zvyšován brzdný moment, až do okamžiku zastavení měřicího kola. V tu chvíli by byly zapsány hodnoty maximálního momentu a vypočítán součinitel tření. Cyklus by se takto opakoval po celou dobu jízdy, dokud by operátor tribometr tlačil. V případě tribometru s automatickým pojezdem lze naprogramovat cykly více způsoby. Opět by zde byl zvyšován brzdý moment až do okamžiku zastavení kola, avšak pravděpodobně k tomu nedojde za dobu jediného průjezdu. Proto je zde možnost pohybu vozíku z jedné maximální polohy do druhé až do okamžiku zastavení kola, kdy by se brzdý moment s každým průjezdem zvětšoval. Tím by byla vytvořena celá adhezní charakteristika tohoto úseku tratě. Avšak nevýhodou je několikanásobný průjezd zkoumané plochy, což může ovlivnit výsledky. Také je možné před začátkem měření odhadnout přibližný součinitel tření a nastavit takový brzdý moment, který již bude blízko maximálnímu brzdnému momentu, takže se celý proces měření urychlí a dojde k menšímu počtu opakovaných průjezdů.

Volba konkrétního řídicího softwaru a hardwaru nabízí několik možností. Použití univerzálního systému Arduino by bylo velice levnou a relativně dobře proveditelnou variantou. Avšak výkonové možnosti této platformy jsou značně omezené a při měření a ovládání veškerých prvků by mohl být nedostatek výpočetní paměti. Další nevýhodou je to, že programovatelná deska Arduino neobsahuje přímo moduly pro čtení měřených hodnot, takže by se veškeré postupy zpracování dat musely naprogramovat. Velkou výhodou by ale

byla možnost nahrávat data na paměťovou kartu, takže by nebylo nutné k měření používat externí notebook. Další možností je využít systém Labview, který umožňuje jak ovládání řídicích karet, tak je uzpůsobený přímo pro zpracování naměřených dat. Avšak bylo by již potřeba využít pro měření notebook. Poslední variantou je také kombinace těchto dvou přístupů, tzn. ovládání pohybu a otáček motoru pomocí programovatelné desky Arduino (s možností nastavení parametrů měření přes displej s tlačítky) a zpracování dat z měřicích komponent pomocí Labview. Tato varianta však není vhodná, jelikož komunikace mezi více platformami by byla složitá na řízení.

4.6 Zhodnocení koncepčního řešení

Ručně tlačený tribometr sice nabízí jednodušší řešení než varianta s automatickým pojezdem (především je zde méně elektroniky a automatického řízení), avšak je zde riziko chyby způsobené nestabilní rychlostí chůze operátora. Nejvýraznějším problémem ručně tlačené varianty je vedení po kolejnicích, jelikož se může měnit rozteč, výška ale i opotřebení kolejnic, což by mohlo během měření přinášet komplikace. Varianta tribometru s automatickým pojezdem má díky magnetickým držákům variabilní uchycení, takže je vhodná pro širokopatní i žlábkovou kolejnici. Jelikož měření probíhá automaticky, je zaručena opakovatelnost a výsledky jsou lépe porovnatelné. Po dohodě s vedoucím práce bylo tedy rozhodnuto, že zařízení bude **tribometr s automatickým pojezdem**.

Jako vhodný způsob vyhodnocení adheze byla zvolena druhá popsaná varianta – tedy pro změnu brzdného momentu využít **elektromagneticky ovládanou brzdu**. Toto řešení je jednodušší na řízení. Na elektromagneticky ovládané brzdě lze lehce nastavit konstantní brzdný moment, který je navíc nezávislý na rychlosti otáčení. Konstrukce brzdy navíc umožňuje její jednodušší implementaci do zařízení a připojení ke hřídeli než motor.

Velikost kola je důležitá pro výběr konkrétních prvků měřicí soustavy. Souvisí s ní především velikost normálové síly, velikost brzdného momentu a rozměry dalších komponent. Při použití malého kola (průměr 60 mm) jsou sice normálové síly i brzdné momenty menší, což vede k sestrojení lehčí varianty tribometru, avšak kontaktní plocha je relativně malá, a proto narůstá modelové zkreslení. Také by byl složitý výběr dalších komponent, protože většina z nich tak malých rozměrů nedosahuje. Kolo velkého průměru (průměr 120 mm) naopak zlepšuje simulaci reálného kontaktu, avšak normálové síly nutné pro vytvoření dostatečného tlaku jsou relativně velké (440 N), díky čemuž by se celé zařízení stalo mohutnějším a těžším. Vhodnou velikostí se jeví **průměr 100 mm**. Normálová síla 150 N umožňuje použít lehčí varianty lineárního vedení a dostatečný průměr měřicího kola nabízí širší nabídku ostatních měřicích komponent.

Pro vyvození normálové síly je vhodnější šroubová pružina. Velikost síly lze přesně regulovat pouhou změnou stlačení pružiny, což je oproti sundávání a přidávání závaží jednodušší variantou. Pro tuto první generaci tribometru však byla zvolena **varianta se závažím**, která je dostačující pro prvotní testování. Tribometr bude však přizpůsoben i pro použití pružiny, aby ji případná další generace zařízení mohla využít.

Co se týče volby hardwaru a softwaru pro měření, tak nejvýhodnější variantou se jeví použití **Labview**. Ovládání pomocí desky Arduino je levné a relativně jednoduché řešení, avšak po konzultaci se zkušenějšími programátory byla tato varianta zamítnuta. Vyšlo najevo, že samotná platforma Arduino pravděpodobně nezvládne proces ovládání všech prvků a zpracování naměřených dat. Při kombinaci obou variant by bylo náročné sloučit cyklus ovládání s měřením pomocí Labview. Využití jedné platformy na celý proces ovládání i měření je jednodušší způsob.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

5.1 Požadavky na zařízení

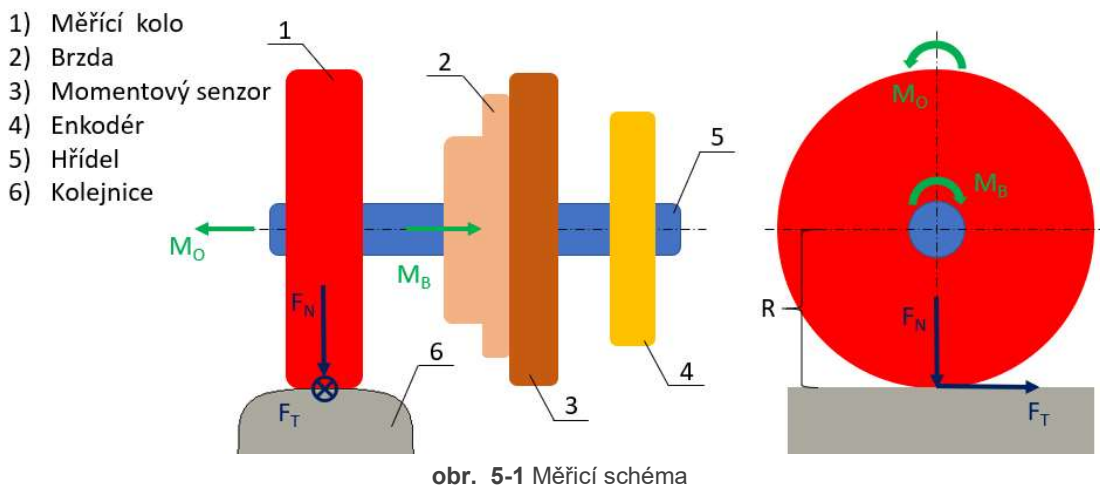
Na začátek je důležité vymežit požadavky na zařízení. V kapitole 4 byly popsány koncepční varianty, možnosti vyhodnocení součinitele adheze a způsob vyvození normálové síly. Z těchto úvah a prvotních výpočtů vzešly požadavky, které musí zařízení splňovat. Další parametry byly stanoveny na základě rešerše a zadání.

- 1) Tribometr je použitelný pro širokopatní i žlábkovou kolejnici
- 2) Je umožněna změna brzdného momentu
- 3) Tribometr je možno pevně přichytit na kolejnice
- 4) Délka měřicí dráhy je 1000 mm
- 5) Maximální dopředná rychlost vozíku je $0,4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$
- 6) Poloha měřicího kola je nastavitelná

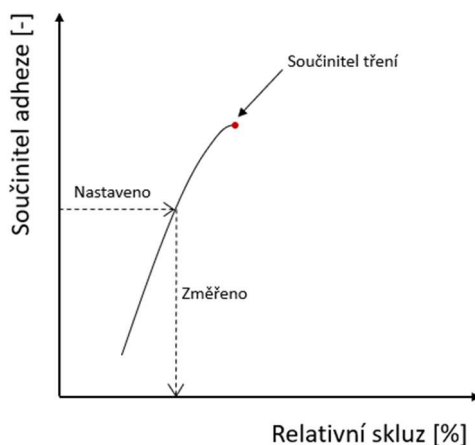
Body 1 a 2 pochází ze zadání diplomové práce. Jedním z důvodů, proč je délka měřicí dráhy omezena na 1000 mm, je hmotnost tribometru. Samozřejmě čím delší vedení, tím hmotnost roste. Dalším důvodem je kompaktnost celého zařízení. K délce měřicí dráhy je potřeba přičíst krajní kostky lineárního vedení, kde se nachází řemenice, a také magnetické základny. Rozměry tribometru by měly umožňovat jeho snadný transport v kufru osobního automobilu. Bod 5 vyšel ze základních výpočtů lineárního vedení a pohonu. Byl brán ohled na potřebný výkon motoru pro rozjezd na maximální rychlost a také na setrvačné síly, které působí na lineární vedení. Nastavením polohy měřicího kola se rozumí laterální pohyb po temeni hlavy kolejnice. Díky tomu je možné provádět měření na celé ploše temene hlavy.

5.2 Princip měření

Tribometr slouží ke stanovení adheze na kolejnici, respektive k sestavení adhezní křivky, což je závislost součinitele adheze (tření) na relativním skluzu. Měřicí kolo (obr. 5-1, 1) se odvaluje po kolejnici (6) ve směru M_O a brzda (2) působí brzdným momentem (M_B), čímž v kontaktu rostou tečné síly (F_T), respektive adheze. Momentovým senzorem (3) je měřen brzdný moment a díky známému poloměru měřicího disku (R) mohou být dopočítány tečné síly. Součinitel tření je potom podíl tečné a normálové síly (F_N). Zároveň jsou enkodérem (4) měřeny otáčky hřídele (resp. měřicího kola), ze kterých lze dopočítat obvodovou rychlost kola.

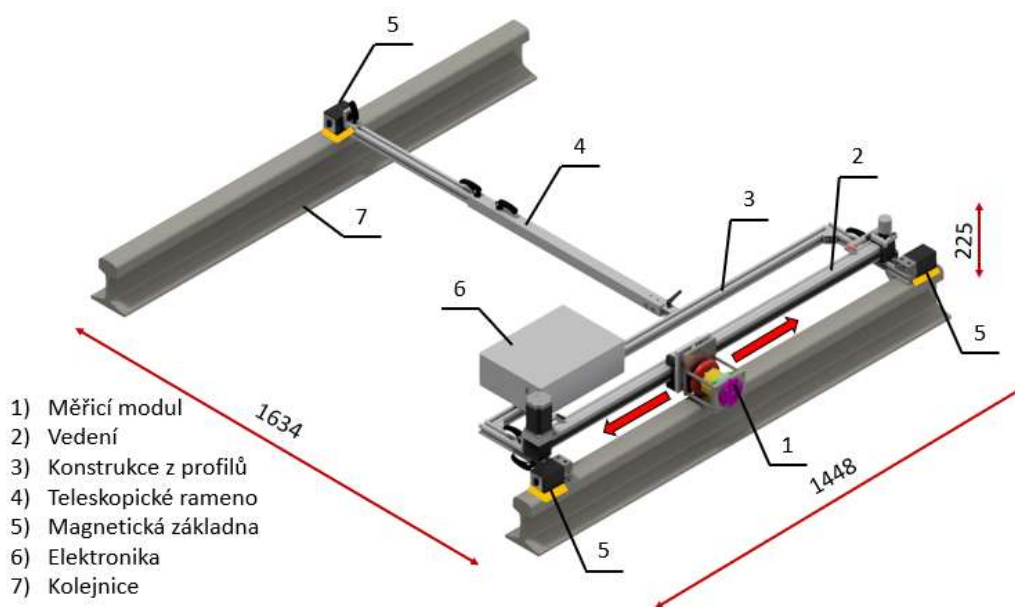


Díky známé dopředné rychlosti vozíku (měřena pomocí druhého enkodéru na řemenici vedení) pak lze vypočítat relativní skluz. Pro každý další průjezd je navýšena hodnota brzdného momentu, čímž vzniknou další body, které se vynášejí do grafu a vytvoří se adhezní charakteristika. Měření končí v okamžiku, kdy se měřící kolo již neotáčí (je plně zabrzděno), ale smýká se po kolejnici. Tento stav značí, že v kontaktu je 100% skluz a čisté tření, takže je měřen součinitel tření.



obr. 5-2 Princip stanovení adhezní charakteristiky

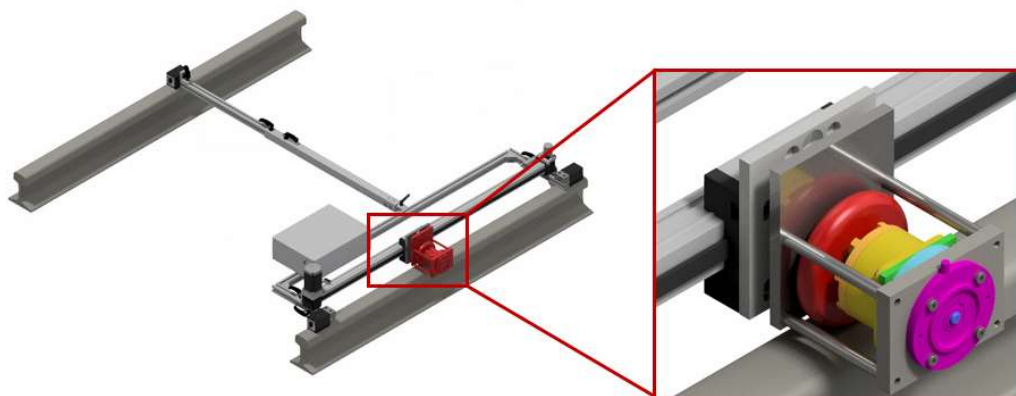
5.3 Konstrukce tribometru



obr. 5-3 Konstruktivní řešení s maximálními rozměry (mm)

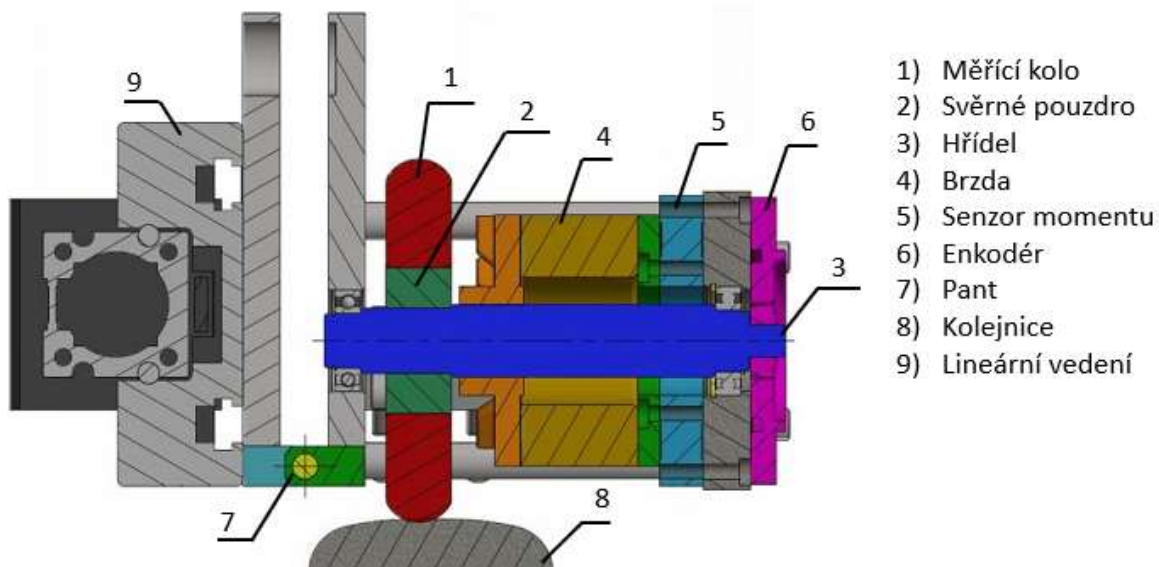
Konstruktivní řešení lze vidět na obrázku 5.3. Tribometr je položen na kolejnici (7) a přichycen k ní pomocí magnetických základen (5). Vznikne tak uchycení ve třech místech, které je variabilní, a přitom stabilní. Tělo tribometru (3) je složeno z modifikovatelných konstrukčních profilů z extrudovaného hliníku, na které je připevněna skříň s elektronikou (6). Součástí je i vyklápěcí teleskopické rameno (4), které přispívá ke kompaktnosti zařízení a k variabilitě uchycení. K tělu tribometru je umístěno lineární vedení (2) s řemenovým pohonem, které je poháněno krokovým motorem. K vozíku vedení je připevněn měřicí modul (1) obsahující měřicí komponenty, který je unášen motorem lineárního vedení ve směru červených šipek. V dalších kapitolách jsou jednotlivé části tribometru popsány detailněji.

5.3.1 Měřicí modul



obr. 5-4 Měřicí modul

Měřicí modul je hlavní měřicí částí celého tribometru. Modul je tvořen dvěma přírubami, které jsou spojeny pomocí tyčí se závity. Na hřídeli uložené v ložiscích je připevněno měřicí kolo, enkodér a rotační část elektromagnetické brzdy. Připevnění modulu k vedení je provedeno prostřednictvím otočného pantu spojujícího přírubu modulu s deskou na vozíku vedení. V řezu na obr. 5-5 jsou vidět veškeré komponenty modulu.



obr. 5-5 Řez měřicím modulem

Měřicí kolo

Rozměry měřicího kola byly stanoveny na základě Hertzovy teorie pro eliptický kontakt – průměr kola 100 mm, šířka 18 mm a poloměr běhounu je 10 mm. V porovnání s kolem reálného kolejového vozidla se jedná o měřítko přibližně 1:10. Pro zajištění kola na hřídeli je použito samostředící svěrné pouzdro Sit-Lock 12 od firmy Mateza. Vnější průměr má rozměr 40 mm, vnitřní 18 mm a šířka pouzdra je 18 mm. Měřicí kolo je prvkem s největším průměrem, aby při měření zapuštěných žlábkových kolejnic nedocházelo ke kontaktu ostatních částí modulu s okolním terénem.

Třecí elektromagneticky ovládaná brzda

Jak již bylo psáno v principu měření, brzda slouží k přibrzdování kola během měření. Musí být tedy dimenzována na největší krouticí moment, který může působit na kolo. Ve zmíněné tabulce 4-1 je pro kolo o průměru 100 mm vypočítaný maximální krouticí moment 3,75 Nm. Je to stav, kdy je kolo již plně zabrzděno a smýká se po koleji. Pro správně měření je důležité, aby brzda tento moment dokázala udržet a nepovolila.

Zvolena byla třecí brzda s označením TB 260 od společnosti Warner Electric disponující brzdovým momentem až 4 Nm. Jedná se o třecí brzdou, která se skládá ze dvou částí. První část je rotační. Jedná se o ocelový disk, který je pomocí ozubeného kola spojen s hřídelí, tzn. že se otáčí stejnou rychlostí jako hřídel, ale je umožněn pohyb disku v axiálním směru. Druhou částí je elektromagnet, který je statický a je připevněn k momentovému senzoru. V okamžiku, kdy do elektromagnetu začne téci proud, dojde k vytvoření magnetického pole, které přitahuje rotační část brzdy. Třením mezi povrchy se energie rotace přetváří v teplo a na hřídel tak působí brzdový moment. Se zvyšujícím napětím rostou přitažlivé síly, což má za důsledek větší brzdový moment, který lze měnit postupně bez skokových změn a který je konstantní a nezávislý na rychlosti otáčení. Krouticí moment mezi brzdou a hřídelí je přenášen pomocí aretačních šroubů dotažených k hřídeli.

Omezení těchto brzd spočívá v malé rychlosti otáčení (pod 15 min^{-1}), kdy může dojít k tzv. stick-slip efektu. Na začátku otáčení k sobě disk a elektromagnet přilnou a je potřeba větší síly pro jejich rozpohybování. To je nežádoucí pro měření. Modul tedy musí být poháněn minimální dopřednou rychlostí $0,08 \text{ m/s}$, aby se měřicí kolo otáčelo rychlostí alespoň 15 min^{-1} .

Momentový senzor

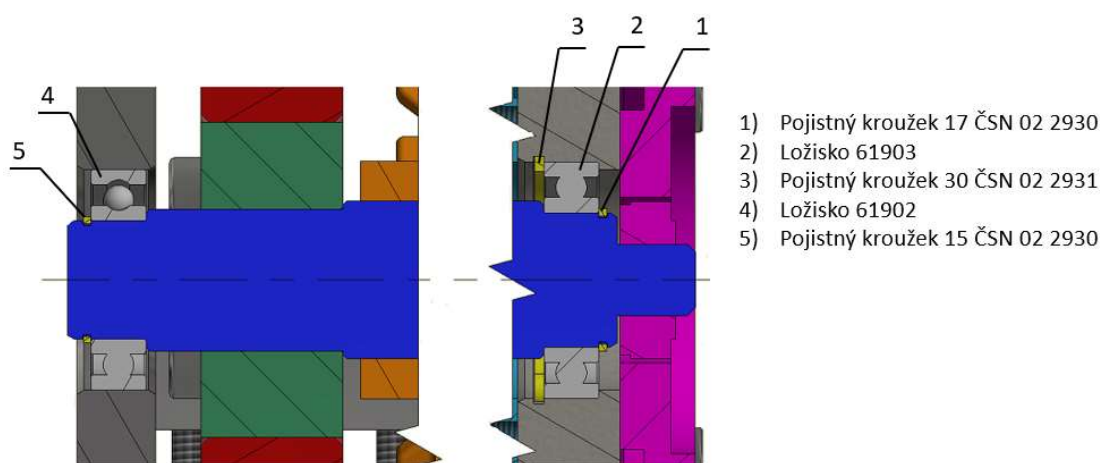
Jako senzor momentu byl vybrán reakční momentový senzor s označením FTHB-5 od firmy Forsentek s maximálním měřicím momentem 5 Nm. Výhodou tohoto senzoru je velmi malá šířka, která činí pouhých 12 mm, což umožňuje vytvořit měřicí modul o kompaktních rozměrech. Další výhodou je průchozí otvor uprostřed senzoru, jenž umožňuje prostrčit skrz hřídel, která může být uložena do ložisek až za senzorem. Elektromagneticky ovládaná brzda je statickou částí přichycena k senzoru momentu. Jelikož přípojovací rozměry brzdy a senzoru neodpovídají, je pro jejich spojení použit vyrobený spojovací člen, což je v podstatě hliníkový kvádr o tloušťce 8 mm, ve kterém jsou otvory pro šrouby, jimiž lze tyto součásti připojit. Z druhé strany je momentový senzor připevněn k malé přírubě pomocí šroubů tak, aby se neprotáčel a mohl tak měřit reakční moment. Toto uspořádání tedy umožňuje měřit reakční moment, který udává elektromagnetická brzda, respektive moment, který působí i na měřicí kolo. Díky znalosti tohoto momentu a poloměru kola lze vypočítat tečné síly vyskytující se v kontaktu kola a kolejniče.

Enkodér

Enkodér umístěný na vnější straně malé příruby slouží k měření otáček kola. Znalost otáček umožňuje vypočítání skluzu podle rovnice 3. Je zde použit enkodér MIG NOVA+, který vyniká svou malou šířkou pouhých 7 mm. Jedná se o bezkontaktní enkodér, který pro měření využívá magnetický kroužek o průměru 20 mm nasazený na konci hřídele.

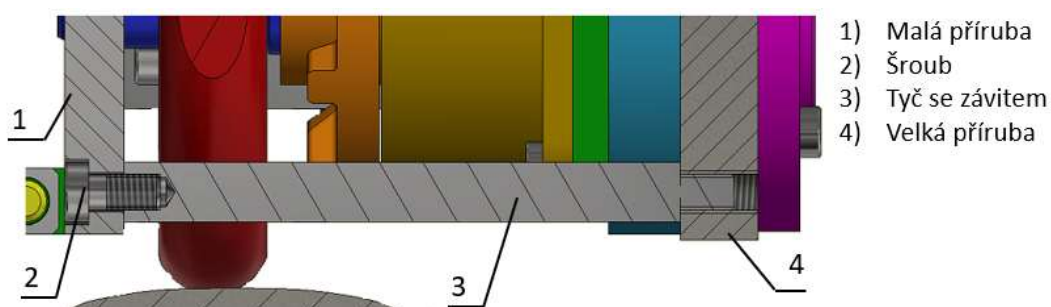
Hřídel

Hřídel je součást, která přenáší moment mezi kolem a elektromagnetickou brzdou. Je však potřeba hřídel vhodně uložit, aby nedošlo k přetížení senzoru momentu, který má velmi malou radiální únosnost. Uložení hřídele je provedeno pomocí dvojice ložisek nacházejících se v přírubách. Jak lze vidět na obr 5-6, je jedno ložisko (2) uloženo pevně jak na hřídeli, tak v díře, kdež to druhé ložisko (4) je pevně uloženo pouze na hřídeli a v díře je umožněn posuv, aby bylo možné kompenzovat tepelné roztažnosti. Zajištění ložisek je zprostředkováno pomocí pojistných kroužků (1,2,5) nebo opřením o osazení. Na jedné straně je ložisko 61903 o vnějším průměru 30 mm a tloušťce 7 mm. a na druhé straně je ložisko 61902 o vnějším průměru 28 mm a tloušťce 7 mm.



obr. 5-6 Uložení hřídele

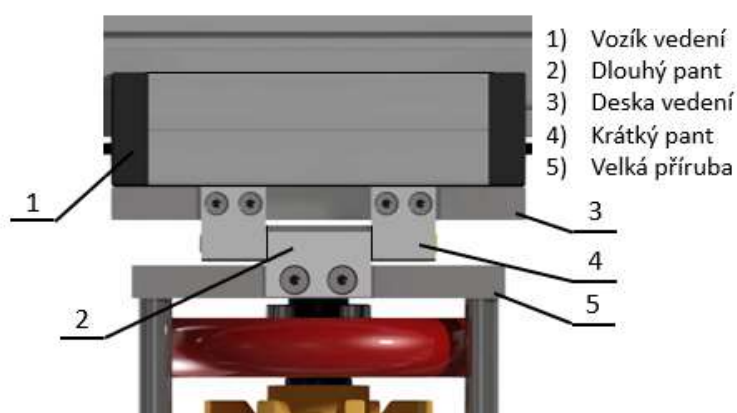
Pro správné zajištění polohy hřídele a ostatních prvků jsou mezi přírubami umístěny tyče se závity (na jedné straně vnější a na druhé vnitřní závit). Obrázek 5-7 znázorňuje uložení těchto tyčí, kdy na jedné straně je tyč (3) namontována pomocí vnějšího závitu přímo do malé příruby (1), kdež to na druhé straně je tyč přitažena k velké přírubě (4) pomocí šroubu (2). Takovéto upevnění umožňuje snadné rozebrání modulu, kdy se pouze odmontují šrouby z tyčí a hřídel se všemi měřicími prvky může být z velké příruby vytáhnut.



obr. 5-7 Spojovací tyč se závity

Panty

Měřicí modul je na vedení uložen pomocí trojice pantů (viz obr. 5-8). Na měřicí modul jsou namontovány dva krátké panty (4), ve kterých jsou nalisována plastová kluzná ložiska Iglidur® G od výrobce Igus, aby byl redukován koeficient tření mezi čepem a pantem. Mezi těmito panty se nachází dlouhý pant (2) připevněný k desce vedení. Spojení je zprostředkováno pomocí čepu z kalené oceli o průměru 7 mm, který lze v během demontáže modulu vyndat a sundat tak celý modul z vozíku (1). Panty jsou připojeny k deskám (3,5) šrouby, k nimž se lze dostat ze spodu tribometru. Pro správnou funkci pantu je důležitá souosost všech třech děr, kterými prochází čep. Jelikož nebyla umožněna přesná výroba dílů, byly panty navrženy tak, aby se jejich poloha dala podle potřeby nastavit. Jejich uložení v deskách i díry pro šrouby jsou s vůlí. Při montáži modulu je tak zajištěna variabilita upevnění pantu.

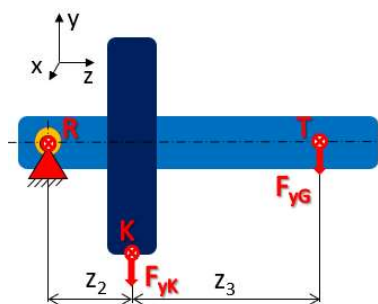


obr. 5-8 Uložení modulu přes panty (pohled zespodu)

5.3.2 Normálové zatížení

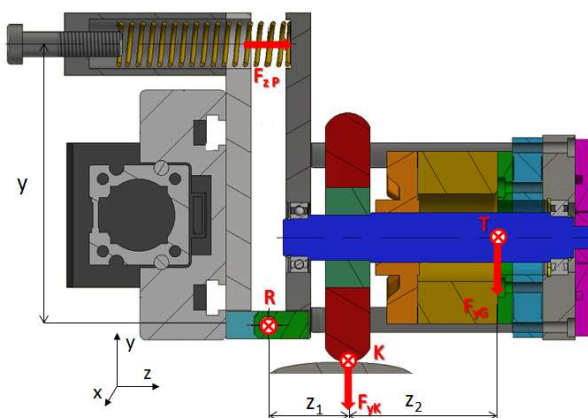
Z výpočtů v kapitole 4 vyplynulo, že pro dosažení požadovaného kontaktního tlaku 1 GPa je zapotřebí vyvinout normálovou sílu působící v kontaktu měřicího kola a kolejnice o velikosti 150 N. Jak již bylo zmíněno v koncepčním řešení, existují dva způsoby vyvození normálové síly – závaží nebo pružina. V konečném řešení jsou umožněny oba způsoby aplikace, proto jsou v této kapitole výpočty pro pružinu i závaží. Ponechání obou variant slouží především pro další iterace při vývoji tohoto zařízení, kdy není potřeba vyrábět nové díly, ale stačí přimontovat nebo oddělat pružinu. Měření v této práci však probíhala se závažím.

Na obrázku 5-9 lze vidět zjednodušené silové schéma, které slouží pro základní výpočty normálové síly. Na nákresu je znázorněno kolo s kontaktem v bodě K, čep v bodě R a těžiště modulu v bodě T. K vyvození normálové síly v kontaktu napomáhá tíhová síla působící na měřicí modul, jejíž hmotnost je 4,6 kg, takže síla F_{yG} má velikost 45,1 N. Jelikož je modul uložen přes pant a jeho těžiště je dál od středu otáčení než bod kontaktu, vytváří tíhová síla díky páce sílu v kontaktu o velikosti 93,2 N. Do požadovaných 150 N zbývá síla 56,8 N.



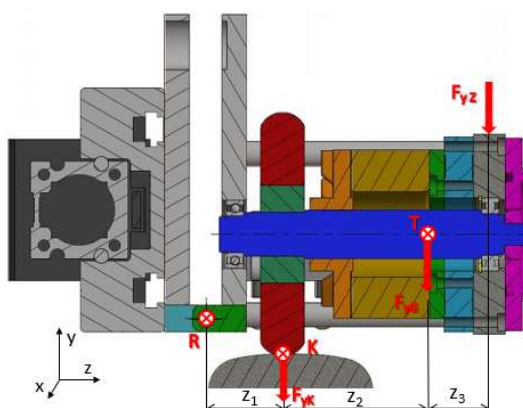
obr. 5-9 Zjednodušený silový rozbor

První možností, jak doplnit potřebnou sílu v kontaktu, je **šroubová pružina**, která je uložena horizontálně, což sníží zástavbové prostory celého modulu (viz obr. 5-10). Pružina je uložena v neprůchozím otvoru kostky, která je připevněna k desce vedení. Ve velké přírubě je zahloubení, kde se pružina opírá a přenáší tak potřebnou sílu pomocí páky na měřicí kolo. Síla pružiny je regulována pomocí šroubu, který mění její stlačení. Z rovnosti momentů byla dopočítána potřebná síla pružiny F_{zP} , která činí 15,7 N.



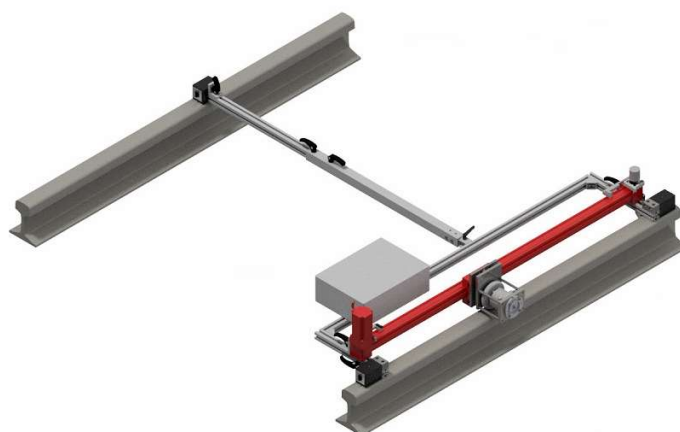
obr. 5-10 Silový rozbor s pružinou

Druhou možností je použít **závaží** (obr. 5-11), které sice nemá tak snadno nastavitelnou sílu jako pružina, ale jelikož je po celou dobu měření normálová síla konstantní, tak to není zásadní problém. Závaží je umístěno na malé přírubě, aby vzdálenost od bodu otáčení byla co největší. Pro doplnění síly v kontaktu o 56,8 N musí mít závaží hmotnost 1,5 kg.



obr. 5-11 Silový rozbor se závažím

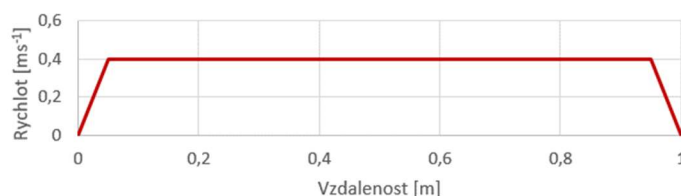
5.3.3 Lineární vedení



obr. 5-12 Lineární vedení

Lineární vedení s krokovým motorem slouží k uvedení měřicího modulu do pohybu. Rozhodující parametry pro výběr lineárního vedení jsou zátěžné síly a momenty, které působí na vozík. Každé vedení má tyto maximální hodnoty předepsané a pro správný chod nesmějí být překročeny. Požadavky na zařízení udávají délku měření, respektive délku zdvihu, 1000 mm a maximální rychlost vozíku $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Z tohoto hlediska se aplikace nepotýká s potížemi, jelikož tyto hodnoty jsou relativně nízké. Jelikož je zařízení koncipováno jako přenosné, je důležitým faktorem hmotnost vedení a zástavbové prostory.

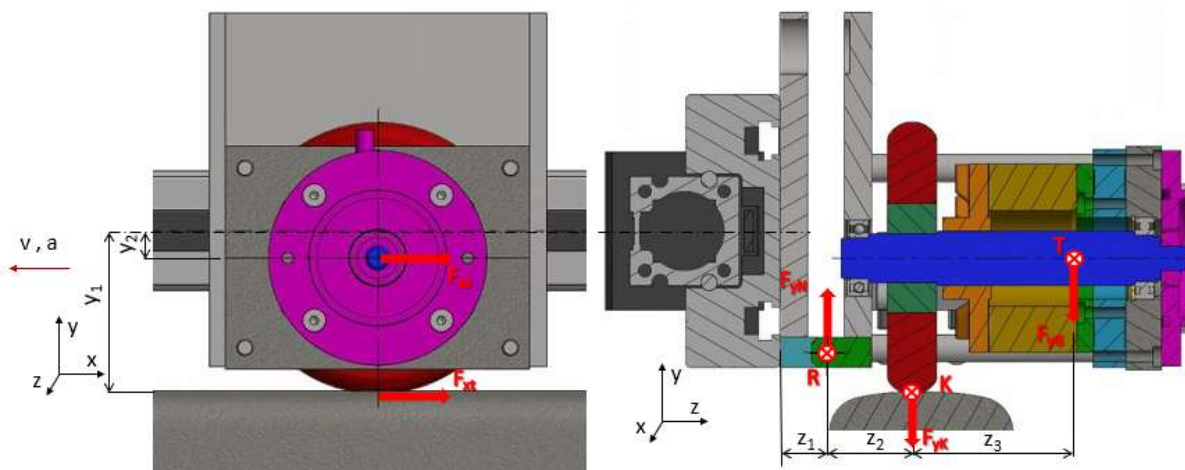
Před výběrem konkrétního typu vedení bylo nutné provést následující výpočty. Zvolená dráha pro rozjezd je stanovena na 50 mm. Poté vozík ujede dráhu o délce 900 mm a začne následně opět na 50 mm zpomalovat na nulovou rychlost. Rychlostní profil lze vidět na obrázku 5-13.



obr. 5-13 Profil jízdy

Nejdříve bylo vypočítáno maximální zrychlení, které je třeba vyvinout při rozpohybování vozíku z nulové rychlosti na maximální rychlost $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Za předpokladu, že akcelerace a decelerace probíhají stejně, vyšlo maximální zrychlení na $3,2 \text{ m}\cdot\text{s}^{-2}$. Dále byly spočítány pro každou osu maximální síly a momenty, které působí na vozík vedení (viz obr. 5-14). Jak bylo zmíněno výše, požadovaná síla v kontaktu kola a kolejnice je 150 N. Za předpokladu, že součinitel tření v kontaktu je 0,5, je třecí síla v kontaktu F_{xt} rovna 75 N. Měřicí modul se závažím (tzn. vše, s čím musí vedení pohnout) váží přibližně 6 kg. Tato skutečnost byla zanesena do výpočtu setrvačné síly, kterou je nutno vyvinout, aby se vozík dal do pohybu.

Po vynásobení hmotnosti a zrychlení vyšla setrvačná síla F_{xs} o velikosti 24 N. Součet všech sil v ose X dává hodnotu 99 N. Tíhová síla měřicího modulu se závažím je vztažená do těžiště a působí proti směru osy Y. Jelikož se kolo opírá v bodě K o kolejnici, vzniká páka, která zvedá vozík vedení ve směru osy Y silou F_{yN} , jež má velikost 77,3 N. V ose Z nepůsobí na vozík vedení žádná síla. Následně byly z vypočítaných sil a známých délek ramen vypočítány momenty kolem jednotlivých os. Moment kolem osy X je roven 1,3 Nm, kolem osy Y je 5,5 Nm a kolem osy Z 4,7 Nm.



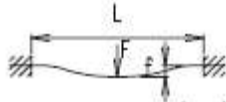
obr. 5-14 Silové schéma pro výpočet vedení

Jako vhodné vedení bylo vybráno lineární vedení ELZ 40 od firmy Bahr Modultechnik. Jedná se o vedení s řemenem, které bylo zvoleno především kvůli nižší hmotnosti. Oproti srovnatelnému vedení s kuličkovým šroubem, které by vážilo 6,1 kg, je varianta s řemenem lehčí o 2,3 kg. Další výhodou řemenu je snadnější údržba (méně součástí na namazání). V tabulce 5-2 je vidět porovnání vypočítaných a maximálních dovolených sil a momentu působících na vozík.

tab. 5-1 Porovnání výpočtu a parametrů vedení

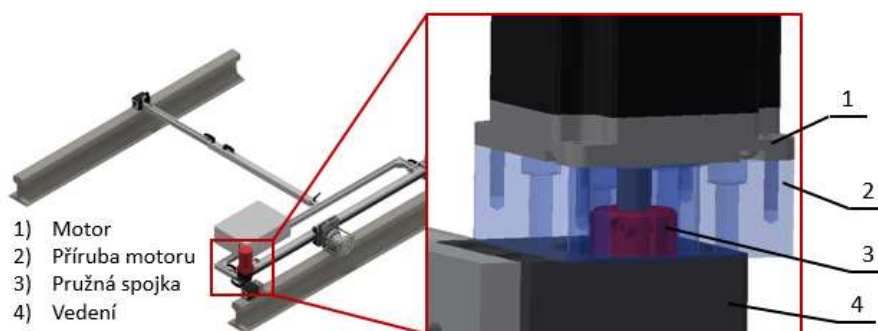
	Výpočet	Vedení ELZ 40
F_x [N]	99	350
F_y [N]	77,3	700
F_z [N]	0	650
M_x [Nm]	1,3	20
M_y [Nm]	5,5	18
M_z [Nm]	4,7	25

Podle vzorce v katalogu výrobce (obr. 5-15) byl vypočítán i maximální průhyb vedení při maximálním zatížení. Výsledná hodnota je rovna 0,1 mm, takže vliv prohnutí vedení je zanedbatelný. Výrobce udává i výpočet potřebného krouticího momentu a výkonu, kterým musí disponovat pohon vedení. Krouticí moment vyšel na 2,66 Nm a výkon na 40 W.

<p>Driving torque:</p> $M_a = \frac{F \cdot P \cdot S_i}{2000 \cdot \pi} + M_n$ $P_a = \frac{M_a \cdot n}{9550}$	<p>F = force (N) P = pulley action perimeter (mm) S_i = safety factor 1,2 ... 2 M_n = no-load torque (Nm) n = rpm pulley (min⁻¹) M_a = driving torque (Nm) P_a = motor power (KW)</p>	<p>Deflection:</p> $f = \frac{F \cdot L^3}{E \cdot I \cdot 192}$ <p>f = deflection (mm) F = load (N) L = free length (mm) E = elastic modulus 70000 (N/mm²) I = second moment of area (mm⁴)</p> 
--	--	---

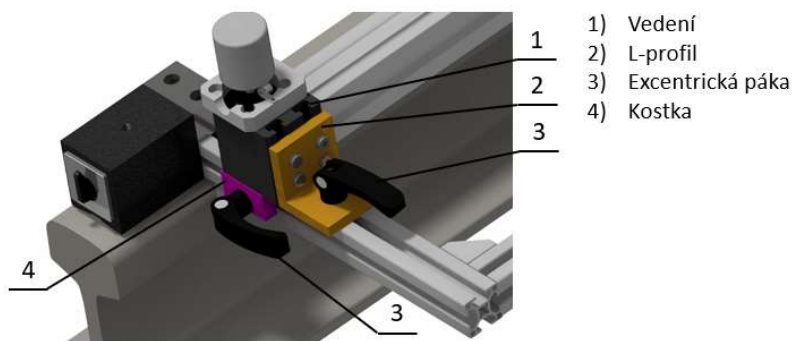
obr. 5-15 Výpočet z katalogu vedení

Je však třeba upozornit, že hodnota bezpečnostního faktoru byla stanovena na 1,5, takže výpočet je proveden s menším předdimenzováním, protože rozjezdy často vyžadují větší krouticí moment. I přesto vybraný krokový motor SX24-2341 od firmy Pacific Scientific disponuje maximálním krouticím momentem 4,1 Nm. Krokové motory vykazují při vzrůstajících otáčkách pokles krouticího momentu. V tomto případě se otáčky budou pohybovat maximálně do hodnoty 240 min⁻¹ (0,25 s⁻¹), což je v momentové charakteristice stále v oblasti maximálního krouticího momentu. Napojení motoru k vedení je provedeno pružnou spojkou, kterou výrobce dodává přímo s vedením. Byla vybrána plastová spojka, která má měkký plastový mezikus (80 shore) a nepřenáší tak vibrace na vedení. Samotný motor je přes přírubu připevněn k vedení (viz obr. 5-16). Mezi motorem a přírubou se nachází gumová podložka, která má za úkol tlumit vibrace.



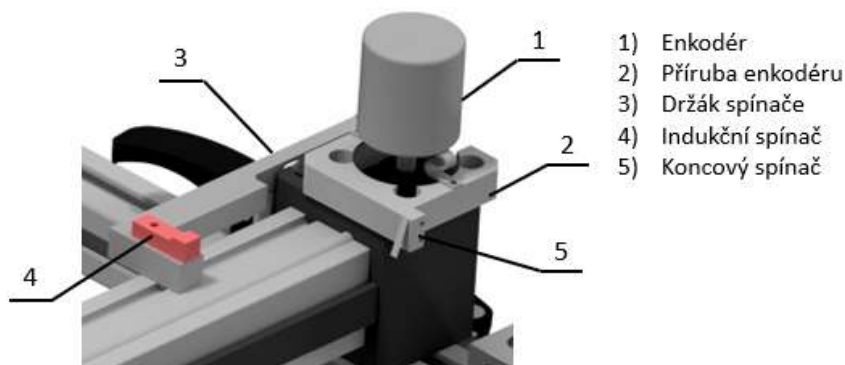
obr. 5-16 Napojení motoru

Uložení lineárního vedení (obr. 5-17) je koncipováno tak, že je možné s celým vedením, a tím pádem s měřicím modulem, posunovat v laterálním směru po kolejnici. Při měření je tedy možné zkoumat více než jednu část kontaktní plochy. Vedení neobsahuje mnoho montážních děr, takže uložení je složitější. K vedení (1) jsou připevněny L-profilů (2), které jsou excentrickou pákou (3), dotaženy ke konstrukčním profilům tvořícím nosnou konstrukci tribometru. Ukázalo se však, že uložení pomocí L-profilů je nedostatečné, a proto byly přidány kostky (4), které se pomocí utahovací páčky uchycují z boku konstrukčního profilu.



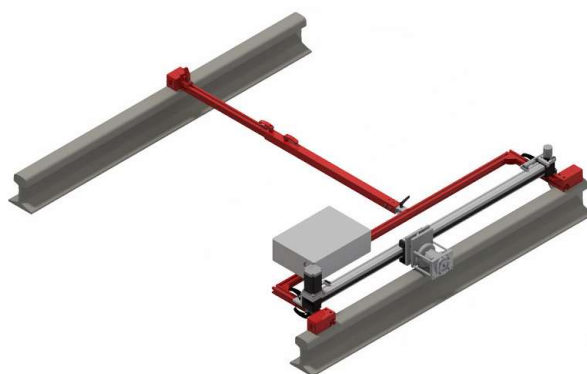
obr. 5-17 Uložení vedení

Na řemenici lineárního vedení se nachází enkodér (viz obr. 5-18, 1), který měří dopřednou rychlost vozíku. Jedná se o enkodér od firmy Sick s označením DBS36. S řemenicí je spojen pomocí pružné spojky a hřídele o průměru 8 mm. Na 3D tiskárně byla vyrobena speciální příruba (2) pro tento enkodér. Na krajích lineárního vedení jsou umístěny indukční spínače polohy (4), které slouží k určení polohy měřicího modulu během automatického měření. Jejich poloha je díky posuvným držákům (3) nastavitelná. Byly vybrány indukční spínače GL-8H, které jsou bezkontaktní a reagují na průjezd kovového vozíku vedení. Dále se na kraji nachází koncové mikrospínače (5), které slouží jako pojistka při nárazu vozíku do kraje vedení, kdy dojde k přerušení proudu do motoru.



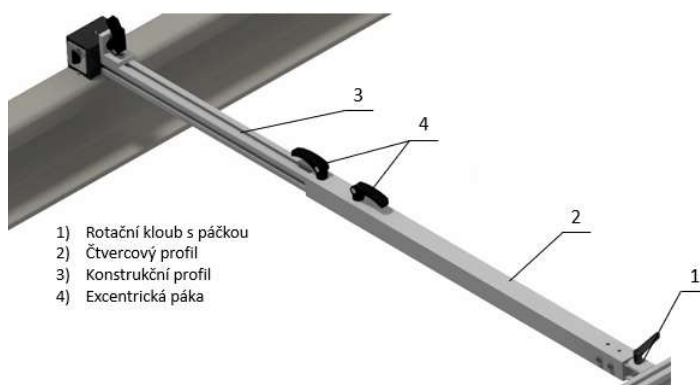
obr. 5-18 Enkodér a spínače na vedení

5.3.4 Tělo tribometru



obr. 5-19 Rám tribometru

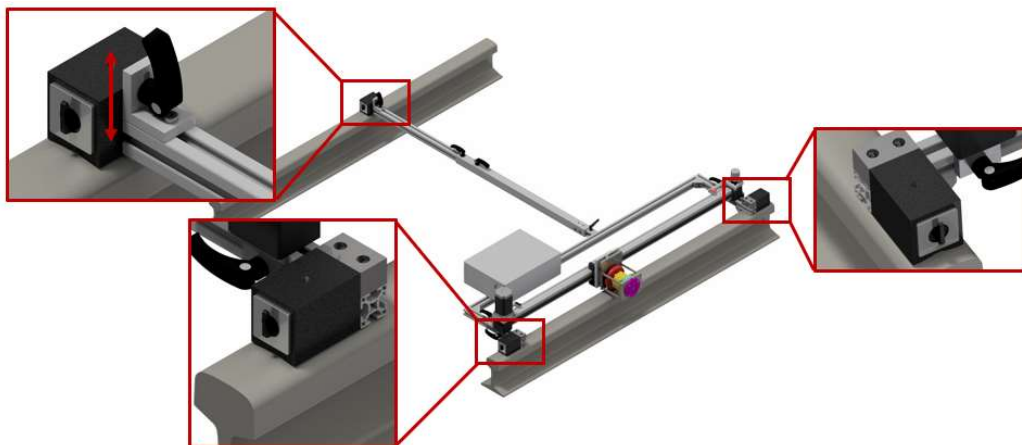
Jak bylo zmíněno v minulé kapitole, vedení je připevněno na hliníkové konstrukční profily, které jsou výhodné především kvůli své univerzálnosti, ceně a nízké hmotnosti. V případě potřeby je také snadné celou konstrukci modifikovat dokoupením stejných typů profilů. Konkrétně se jedná o profily o velikosti 30 x 30 mm. Součástí této konstrukce je teleskopické rameno (viz obr. 5-20), které je tvořeno jedním konstrukčním profilem (3) zastrčeným do hliníkového čtvercového profilu 35 x 35 x 2 (2). Tyto dva profily jsou spojeny dvěma excentrickými páčkami (4), které umožňují rychlou změnu polohy a zároveň pevně drží. Toto celé teleskopické rameno je spojeno s rámem pomocí otočného pantu (1) určeného přímo pro tyto profily. Fixace ramene je zprostředkována pomocí utahovací páky, která nahrazuje šroub v pantu. Díky tomuto sklopnému systému lze tribometr složit do menších rozměru vhodných pro transport a zároveň je zařízení na kolejnici podepřeno.



obr. 5-20 Teleskopické rameno

Upevnění tribometru na kolejnicích je provedeno třibodově. Na měřené koleji se nachází dvě magnetické základny, které drží tribometr při provádění měření. Magnetická základna na druhé kolejnici slouží především k zajištění stability tribometru. Díky přichycení této základny ke konstrukčnímu profilu pomocí upraveného L-profilu je možné nastavit výšku uchycení základny (viz obr. 5-21). Případné nerovnosti, zvlnění nebo opotřebení kolejnic poté nebrání uchycení tribometru.

Výhodou magnetických základen je snadné přepínání mezi pozicemi „zapnuto“ a „vypnuto“, kdy se pouze otáčí spínacím kolečkem. Vybraná základna MSB-100 od výrobce Selos disponuje upínací silou 100 kg. Maximální přitažlivá síla působí v případě, že základna dosedá rovnou podložku. V případě dosednutí na kolejnici tomu tak sice nebude, jelikož kolejnice má styčnou plochu o poloměru 300 mm, ale testy prokázaly, že přitažlivá síla je dost velká a tribometr se na kolejnici nehýbe.

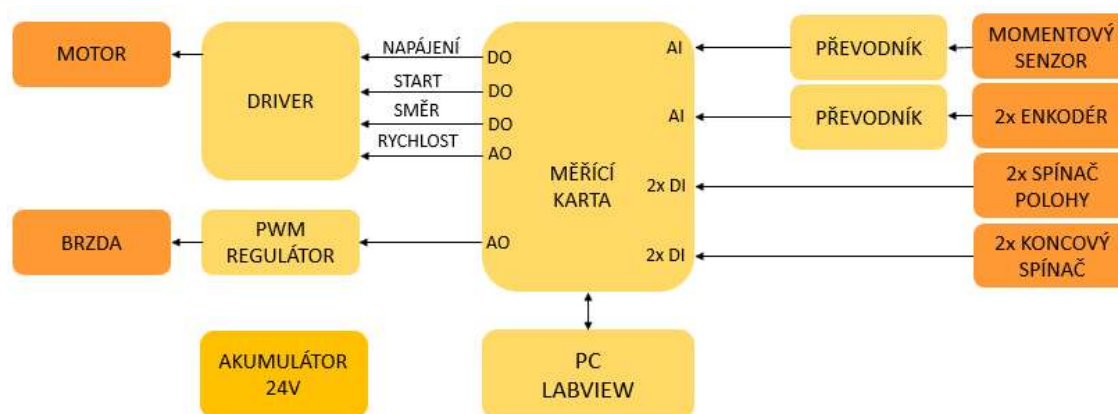


obr. 5-21 Uchycení magnetické základny

5.4 Ovládání a elektronika

5.4.1 Měřicí řetězec

Na obrázku 5-22 se nachází schéma měřicího řetězce. Celé zařízení je ovládáno pomocí programu Labview na externím počítači, který komunikuje s měřicí kartou od firmy National Instruments. Digitálními výstupy (DO) lze ovládat driver motoru. Lze jimi nastavit, zda je motor napájen, směr otáčení a start/stop. Analogový výstup (AO) karty mění velikost přiváděného proudu do motoru, respektive rychlost otáčení. Další analogový výstup ovládá PWM regulátor, který ovládá napětí na elektromagnetické brzdě, přičemž platí, že čím větší napětí, tím je brzdný moment větší. Analogovým vstupem (AI) přichází hodnoty ze senzoru momentu, jenž využívá jako mezistupeň převodník. Stejně tak data z enkodérů jsou zpracována pomocí převodníku a následně posílána do měřicí karty ve formě analogového vstupu. Na digitální vstupy (DI) jsou připojeny indukční spínače polohy, které slouží k automatickému ovládání pohybu měřicího modulu. Další digitální vstupy slouží pro koncové spínače, které v případě nárazu měřicího modulu na konec vedení odpojí motor od proudu, aby nedošlo k poškození tribometru. Celé zařízení je napájeno pomocí akumulátoru s napětím 24 V.



obr. 5-22 Schéma měřicího řetězce

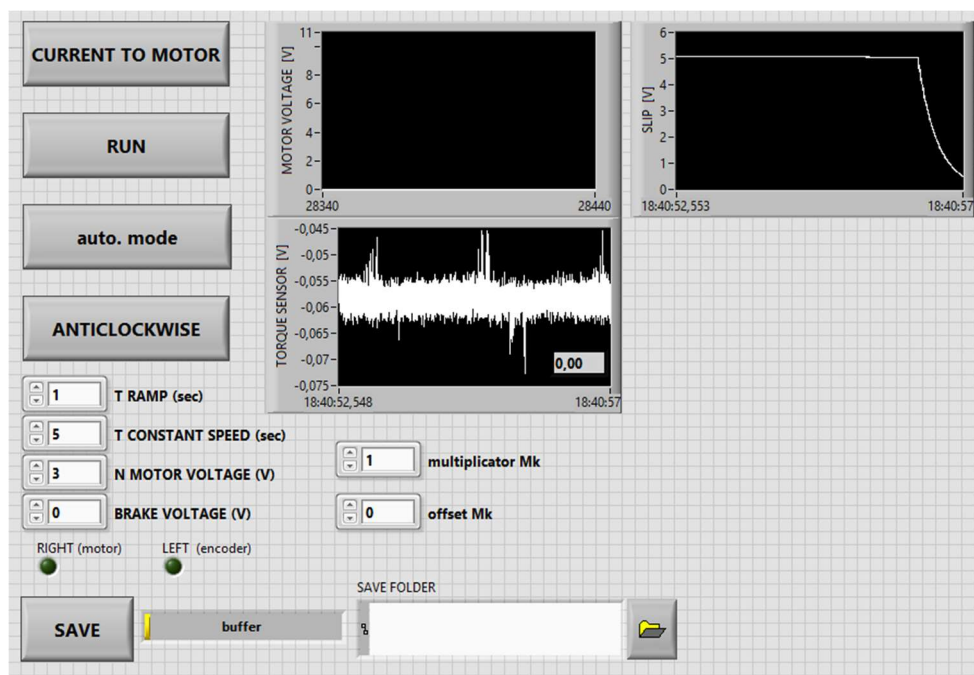
5.4.2 Metodika měření

Na začátku měření se modul nachází na kraji lineárního vedení u prvního spínače polohy, ke kterému se lze dostat pomocí manuálního režimu. Následuje volba maximální rychlosti pohybu, rampy a velikosti brzdného momentu. Po spuštění motoru provede měřicí modul průjezd k druhému spínači polohy a zase zpět. Pohyb je automaticky ovládán pomocí signálů ze spínačů polohy a každý rozjezd a zastavení měřicího modulu je provedeno dle nastavené rampy. Po celou dobu testu je měřena rychlost otáčení obou enkodérů a momentovým senzorem je měřen moment působící na kolo. Po celou dobu průjezdu je nastavený brzdný

moment konstantní. Po skončení průjezdu je manuálně nastavena vyšší hodnota brzdného momentu a tento postup se opakuje. Měření končí v okamžiku, kdy je v kontaktu 100% skluz. Následuje vyhodnocení dat a sestavení adhezní křivky.

5.4.3 Ovládání v programu Labview

K ovládání tribometru bylo v rámci širšího řešitelského týmu vytvořeno ovládací rozhraní v programu Labview, jehož tvorba nebyla náplní práce diplomanta. Ovládací panel (viz obr. 5-23) obsahuje tlačítka pro ovládání motoru. Po zapnutí tlačítka „Current to motor“ je do motoru puštěn proud. Pro manuální ovládání motoru (respektive vozíku vedení) je třeba zvolit časovou rampu (políčko „ramp“), se kterou dojde po spuštění tlačítka „run“ k rozjezdu na maximální nastavenou rychlost v políčku „motor voltage“ (1 V odpovídá rychlosti $0,5 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Vozík setrvá na maximální rychlosti po dobu nastavenou v políčku „constant speed“. Pro automatický režim, který provede průjezd tam a zpátky, je třeba pustit do motoru proud a zvolit tlačítko „auto mod“ a „run“. Pohyb vozíku je poté ovládán spínači polohy, které jsou umístěny na vedení. V políčku „brake voltage“ lze nastavit ovládací napětí brzdy, čímž se nastaví brzdný moment. Grafy v ovládacím rozhraní znázorňují průběh napětí motoru, napětí momentového senzoru a hodnotu skluzu v závislosti na čase. Pro vykreslení průběhu momentu na čase, je třeba nastavit pomocí políček „multiplier“ a „offset“ hodnoty získané z kalibrace senzoru momentu. Do zvolené složky v políčku „save folder“ jsou ukládány hodnoty napětí na motoru, napětí momentového senzoru a skluzu ve formě textového dokumentu (.txt). Indikátory „right“ a „left“ jsou spjaty s indukčními senzory polohy, takže se rozsvítí, pokud senzor detekuje vozík vedení.



obr. 5-23 Ovládací rozhraní v programu Labview

5.5 Realizace

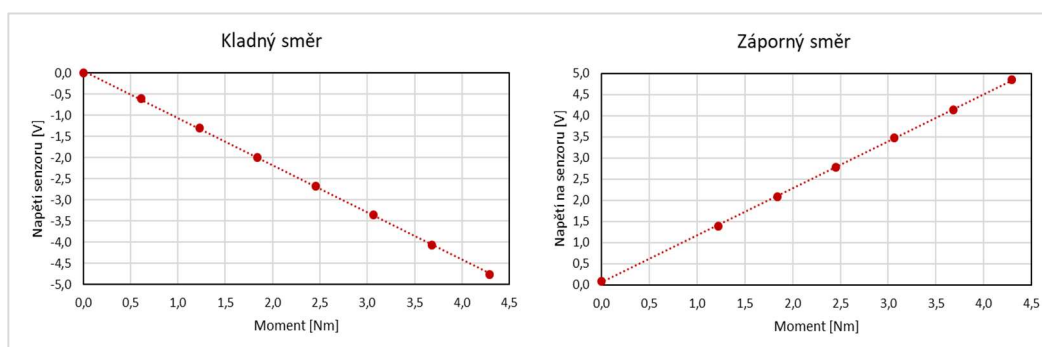
Po vyrobení veškerých potřebných dílů byl tribometr sestaven. Fotografie celého zařízení jsou k nahlédnutí v příloze 1. Následovalo zapojení elektroniky a testování jednotlivých komponent a částí tribometru.

5.5.1 Kalibrace snímače momentu



obr. 5-24 Kalibrace momentového senzoru

Snímač momentu bylo potřeba v první řadě zkalibrovat. Jedná se o reakční momentový senzor s průchozím otvorem. Pro kalibraci byla zvolena metoda páky se známou délkou a závaží se známou hmotností. Není vhodné umístit páku přímo na senzor, jelikož tyto senzory mají nízkou radiální únosnost (výrobce nebyl schopen tuto hodnotu sdělit) a mohl by se tak poškodit. Kalibrace tedy probíhala s celým složeným měřicím modulem (viz obr. 5-24), aby se radiální síly zachytily v ložiskách. Páka byla umístěna na měřicí kolo pomocí dvou šroubů. Brzda byla zabrzděna na maximální možnou hodnotu, takže se kolo neprotáčelo a závaží pověšené na páce vytvářelo moment známý moment. Ze senzoru byly odečítány odpovídající hodnoty napětí a vytvořena jejich závislost na brzděném momentu. Bylo proměřeno více hodnot, a to jak ve směru kladného otáčení, tak ve směru opačném. Jak lze vidět na obrázku 5-25, závislost je lineární.



obr. 5-25 Charakteristika momentového senzoru

5.5.2 Elektromagneticky ovládaná brzda

Elektromagnetická třecí brzda se tradičně používá v aplikacích, kde dochází k navíjení různých materiálů na cívky a bubny. Využívá se zpětnovazebního řízení, aby nedošlo k přetržení nebo prověšení navíjeného materiálu. Pro řízení brzdy je využíván speciální regulátor napětí. Pro účely diplomové práce byly zkoumány možnosti ovládání brzdy standartně dostupnými regulátory napětí. Bylo tedy nutné provést testy pro zjištění vlastností brzdy a prozkoumat možnosti regulace napětí pro její ovládání.



obr. 5-26 Elektromagnetická brzda uložená v měřicím modulu

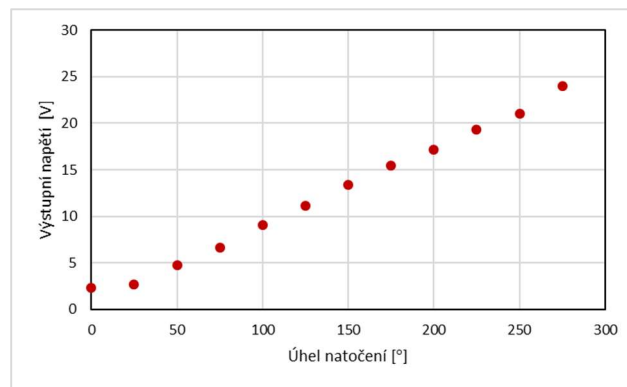
Ovládání brzdy

První možností regulace napětí je **PWM regulátor**, který se používá pro řízení otáček krokových motorů. Velikost výstupního napětí závisí na střídě, která je na něm nastavena. Při tomto experimentu byl PWM regulátor s potenciometrem napájen laboratorním zdrojem konstantním napětím 24 V (viz obr. 5-27). Pomocí multimetru byla zjišťována charakteristika PWM regulátoru, tedy závislost výstupního napětí na otočení potenciometru.



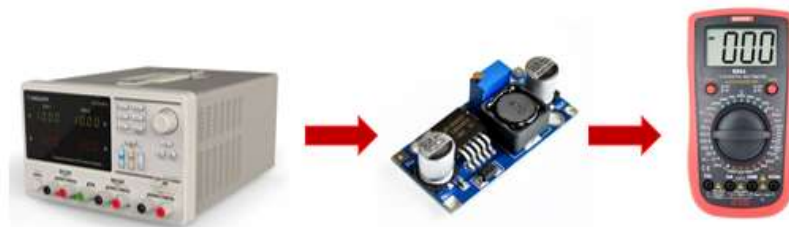
obr. 5-27 Experiment s PWM regulátorem [23–25]

Charakteristika PWM regulátoru (viz obr. 5-28) je lineární, avšak problémem je, že nejde nastavit nižší hodnota výstupního napětí než 2,2 V. Toto řešení je tedy nevyhovující, protože se tím sníží celkový rozsah ovládání brzdy o necelých 10 % a mohl by nastat problém při měření oblastí s nízkou adhezí.



obr. 5-28 Charakteristika PWM regulátoru

Druhou možností regulace napětí je nastavitelný **step-down modul**. Během tohoto experimentu (obr. 5-29) bylo na modul přiváděno konstantní napětí 24 V z laboratorního zdroje a opět bylo měřeno výstupní napětí multimetrem. Ovládání modulu probíhá pomocí nastavitelného rezistoru, který změnou odporu snižuje vstupní napětí (24 V) na požadovanou hodnotu výstupního napětí.



obr. 5-29 Experiment se step-down modulem [23, 25, 26]

Měření probíhalo vždy po jedné otáčce trimru o 360 °. Jak lze vidět na obr. 5-30, charakteristika je opět lineární, avšak minimální výstupní napětí je zde 1,3 V. To v kombinaci s tím, že trimrem se točí pomocí šroubováku, což je pro automatické měření nevhodné, značí, že tato varianta je pro ovládání brzdy nevhodná.



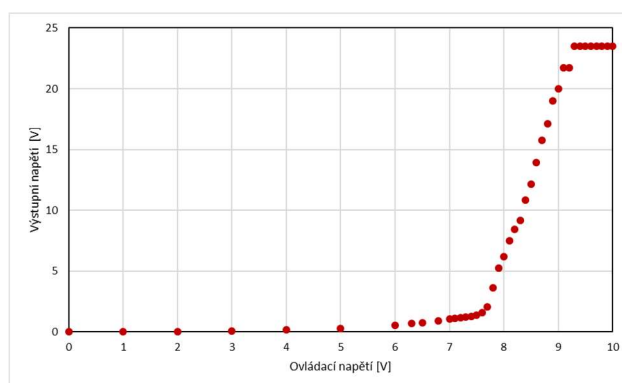
obr. 5-30 Charakteristika step-down modulu

Třetí možností, jak ovládat napětí na brzdě, je **stmívač pro LED osvětlení**. Ten obsahuje, kromě vstupních a výstupních svorek napětí, také vstup pro analogový signál. Ovládacím napětím 0 až 10 V lze nastavit výstupní napětí. V tomto experimentu (obr. 5-31) bylo do stmívače přiváděno napětí 24 V z laboratorního zdroje, v programu Labview bylo analogovým signálem nastaveno ovládací napětí a multimetrem měřeno výstupní napětí.



obr. 5-31 Experiment se stmívačem LED [23, 25, 27]

Experiment ukázal, že charakteristika (viz obr. 5-32) stmívače je značně nelineární. Výstupní napětí ze začátku roste velmi pomalu a od 7 V ovládacího napětí následuje prudký nárůst. Výhodou však je, že lze nastavovat výstupní napětí od nuly, takže je možné měření nízkých součinitelů adheze. Další výhodou je také analogový vstup, který je vhodný pro ovládání pomocí měřicí karty a programu Labview. Pro ovládání brzdy tato charakteristika není sice ideální, ale nijak nebrání v použití stmívače jako regulátoru napětí. Výhody převyšují nad nevýhodami a tato varianta se jeví jako nejlepší.



obr. 5-32 Charakteristika stmívače LED

Charakteristika brzdy

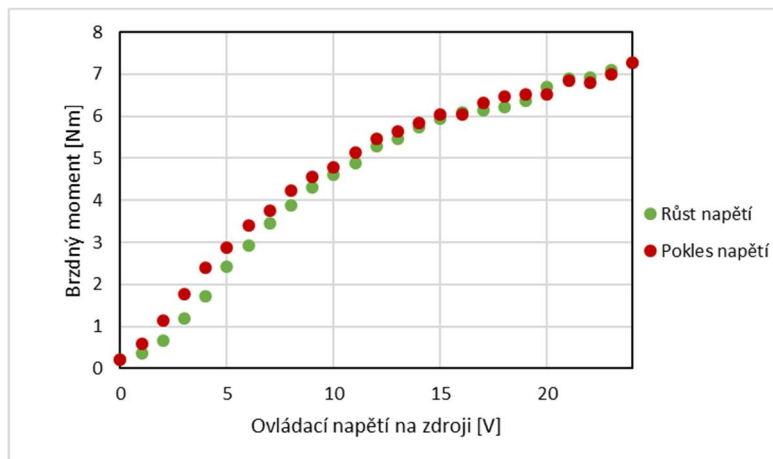
Aby bylo možné brzdou správně ovládat, bylo potřeba stanovit závislost ovládacího napětí na brzděném momentu. Správnou funkci brzdy při experimentu zajistilo uložení ocelového disku na hřídel a druhá část brzdy byla pevně upevněna tak, aby byly tyto dvě části souosé. Statická část brzdy byla upevněna k senzoru momentu, aby bylo možné stanovit brzděný moment, kterým brzda působí. Byla využita páka připevněná k měřicímu kolu, která se používala ke kalibraci snímače momentu. Protože se brzda se při měření otáčí, byl zkoumán brzděný moment za stálého prokluzu brzdy. S kolem bylo při pokusu otáčeno a byly tak simulovány podmínky při reálném měření. Statický brzděný moment by byl větší díky statickému tření. Brzda byla napájena laboratorním zdrojem, kterým se nastavovalo ovládací napětí (0–24 V). V prvním měření se ovládací napětí zvyšovalo a ve druhém se po stejných hodnotách snižovalo. Zkoumala se tak hystereze brzdy.



obr. 5-33 Měření brzděného momentu

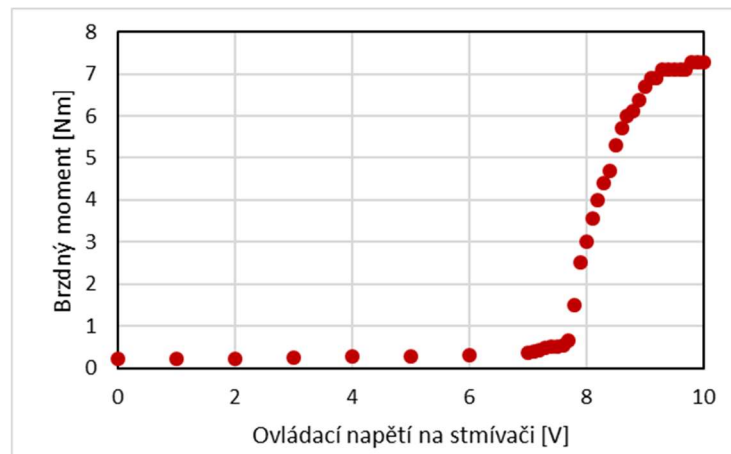
Hodnoty napětí a brzděného momentu byly vyneseny do grafu (obr. 5-34). Brzda úměrně reaguje na zvyšující se ovládací napětí. Bylo však zjištěno, že brzda dokáže aplikovat i větší brzděný moment (7,3 Nm), než který deklaruje výrobce (4 Nm). Jedním z důvodů může být samotný princip třecí brzdy, jelikož třecí povrchy mohou být ovlivněny klimatickými podmínkami. Samozřejmě hraje roli i uložení brzdy při pokusu, které je vertikální, takže tíhová síla disku přispívá se přičítá k přitažlivé síle magnetu. Při uložení horizontálně dosahuje maximální brzděný moment hodnoty 4,6 Nm.

Jak je vidět na grafu, brzda vykazuje jistou hysterezi. Děje se tak především, při poklesu ovládacího napětí. Brzda je ovlivněna zbytkovým magnetismem, takže při nastavení libovolného brzděného momentu není vždy zaručena opakovatelnost. Jedinou možností, jak docílit opakovatelnosti, je nejdříve nastavit na brzdě maximální napětí 24 V a poté klesnout na 0 V. Následně musí ovládací napětí stoupat, aby brzděný moment odpovídal červené charakteristice na obr. 5-34. Pokud je potřeba ponížít brzděný moment, je potřeba nejdříve nastavit napětí na brzdě 0 V a poté teprve požadovanou hodnotu. Tento problém by byl vyřešen použitím originálního regulátoru napětí pro ovládání brzdy.



obr. 5-34 Charakteristika brzdy s laboratorním zdrojem

Stejná charakteristika byla vytvořena pro stmívač LED tentokrát ale připojený k brzdě. Lze jej lze ovládat pomocí vstupního napětí 0-10 V. Jak je vidět na obr. 5-35, charakteristika je velmi ovlivněna chováním stmívače. Při přeměření nízkých adhezí, kdy se brzdny moment pohybuje pod 1 Nm, je však tato charakteristika relativně lineární, tudíž pro měření vhodná.



obr. 5-35 Charakteristika brzdy se stmívačem LED

Enkodéry

Enkodéry jsou určeny k výpočtu skluzu. K tomu je potřeba znát aktuální rychlost otáčení měřicího kola a dopřednou rychlost měřicího modulu. Signál z enkodérů je zpracováván v programovací platformě Arduino Nano. V programu jsou počítány jednotlivé kroky enkodérů. Enkodér lineárního vedení má 500 pulzů na otáčku a enkodér na hřídeli má 1024 pulzů na otáčku. Ze znalosti obvodu měřicího disku a řemenice lze dopočítat ujeté dráhy. Dráhy ujeté za dobu 0,1 s jsou pomocí numerické derivace přepočítány na dopřednou rychlost vozíku a obvodovou rychlost měřicího disku. Se stejnou frekvencí probíhá i výpočet relativního skluzu. Analogovým výstupem z programovací desky Arduino je hodnota relativního skluzu posílána přímo do měřicí karty NI.

5.5.3 Elektronika

Elektrická skříň

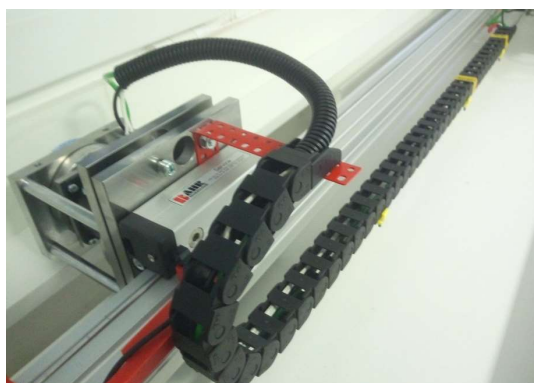
Pro testování byly nejdříve elektronické komponenty propojeny pomocí nepájivého pole. Po ověření funkčnosti celého systému byla spájena deska plošných spojů, která byla vložena spolu s ostatními elektronickými prvky do skříně (schéma zapojení viz příloha 2). Jako výstupy a vstupy skříně slouží konektory CAN9, které propojují měřicí a ovládací komponenty s elektronikou uvnitř skříně. Dalšími výstupy skříně jsou dva USB porty, které slouží ke komunikaci měřicí karty NI s PC a k napájení programovací desky Arduino.

Uvnitř elektrické skříně se nachází měřicí karta National Instruments s firemním označením USB-6002, která komunikuje s PC a svými vstupy a výstupy ovládá ostatní elektronické komponenty (brzda, snímače, atd.). Pro zpracování signálu ze senzoru momentu slouží tenzometrický převodník TZA11400. Ovládání motoru je zprostředkováno driverem s označením RTA Pavia ADW 06V. Pro regulaci napětí brzdy je použit stmívač dimLED 065503. Výpočet skluzu provádí programovací deska Arduino Nano.



obr. 5-36 Komponenty elektrické skříně

Kabely, které vedou od enkodéru na vedení, indukčního a koncového snímače, jsou vloženy do drážek v konstrukčních profilech. Kabely vedoucí z pohybujícího se měřicího modulu by mohly kolidovat s ostatními částmi tribometru a způsobit jeho poškození. Jsou proto vloženy do energetického řetězu umístěného ze zadní strany lineárního vedení, který zajišťuje jejich bezpečný pohyb při měření.



obr. 5-37 Energetický řetěz

Zdroj elektrické energie

Pro napájení celého zařízení slouží akumulátor s napětím 24 V. Při testech bylo zjištěno, že maximální odběr při nejvyšší rychlosti a brzdném momentu je 1 A. Naměření jedné adhezní charakteristiky zabere přibližně 15 minut. Lze předpokládat, že měření na reálné trati nebude trvat déle než 6 hodin. Jednoduchým výpočtem lze odhadnout potřebnou kapacitu akumulátoru, která by neměla být nižší než 6 Ah. Byl vybrán lithiový akumulátor o kapacitě 20 Ah, jehož výhodou je především nízká hmotnost, která činí pouhých 3,6 kg. Avšak pro základní otestování tribometru byla k dispozici dvojice 12V akumulátorů, které při zapojení do série dokážou zařízení napájet napětím 24 V.

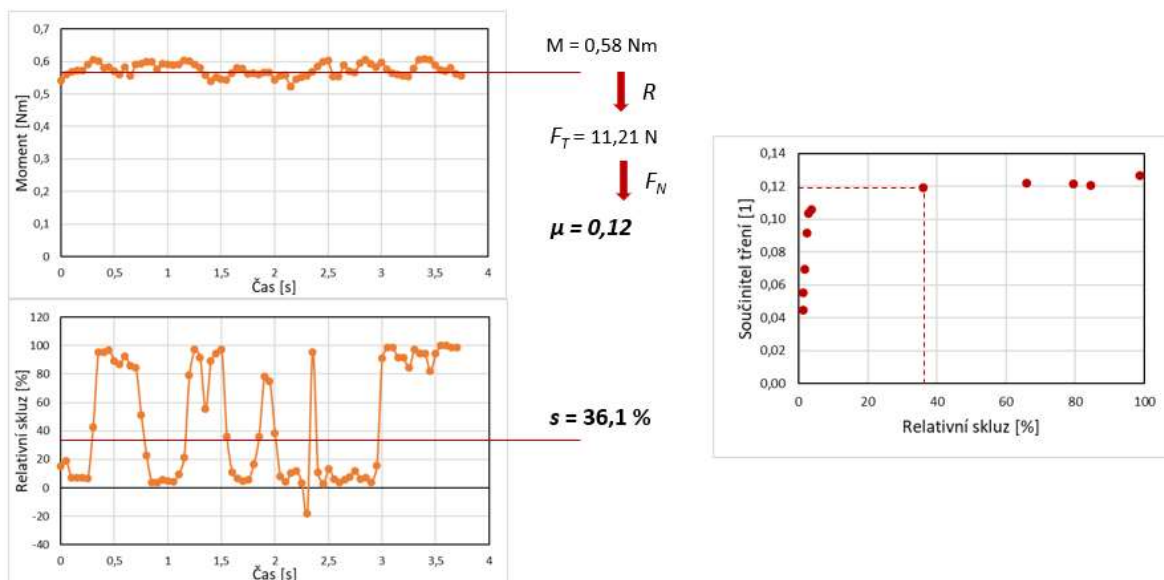
5.6 Experimentální ověření v laboratoři

Tribometr byl po sestavení podroben několika testům, které měly ověřit jeho funkčnost v laboratorních podmínkách a prozkoumat možnosti a limity celého zařízení. Testy probíhaly v laboratoři na kovové upínací desce. Při každém testu proběhla série měření, která se skládala z několika průjezdů (jedním průjezdem je myšlen pohyb tam a zpět). Z jednoho průjezdu lze stanovit jeden bod adhezní charakteristiky.

5.6.1 Postup sestavení adhezní křivky

Do zvolené složky v PC jsou ukládána data do textového souboru, který obsahuje hodnoty napětí motoru, kroutícího momentu a skluzu. Následuje manuální vyhodnocení v programu Excel, kde jsou data dále zpracována. Hodnoty během rampového rozběhu a doběhu (lze rozpoznat z napětí motoru) nejsou do vyhodnocení zahrnuta. Z jednoho průjezdu je vytvořen jeden bod adhezní charakteristiky, který se skládá ze součinitele adheze a relativního skluzu.

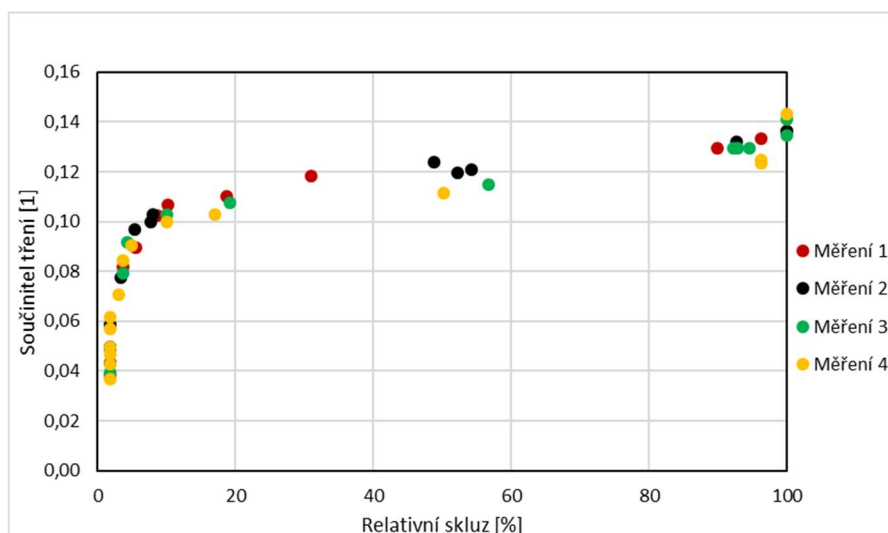
Z každého průjezdu je z hodnot momentu a skluzu stanoven medián (příklad na obr. 5-38, červená příčka), který nejlépe reprezentuje soubor dat. Díky známému poloměru měřicího kola lze dopočítat hodnotu tečné (adhezní) síly. Po dělení se silou normálovou je vypočítán součinitel tření a spolu s relativním skluzem vytvoří jeden bod adhezní křivky. Stejným způsobem jsou zpracovány všechny průjezdy, čímž vznikne celá adhezní charakteristika v rozmezí relativního skluzu od 0 do 100 %. Další průběhy momentu a skluzu v čase lze vidět v příloze 3.



obr. 5-38 Příklad sestavení adhezni charakteristiky

5.6.2 Vliv opakovaných průjezdů

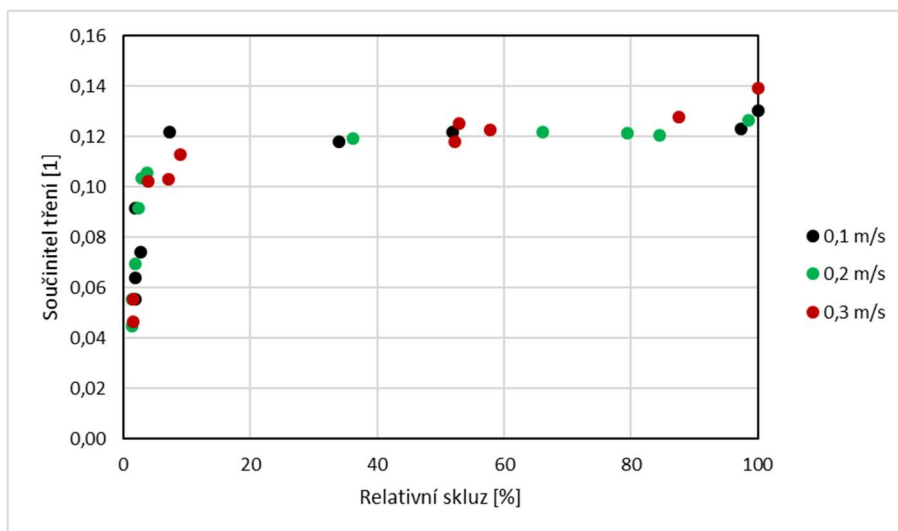
Při tomto testu proběhla čtyři měření adhezni charakteristiky. Všechna probíhala v jedné stopě a při stejných podmínkách a parametrech pohybu. Při každém průjezdu se zvyšoval brzdny moment až do okamžiku plného prokluzu měřicího disku. Cílem bylo zjistit vliv opakovaného projíždění jedné stopy na adhezni charakteristiku. Celkově byla stopa projeta stokrát. Jak lze vidět na obr. 5-39, opakované projíždění jedné stopy nemá vliv na adhezni charakteristiku, jelikož při všech čtyřech měřeních se charakteristika neměnila.



obr. 5-39 Adhezni charakteristika – vliv opakovaného průjezdu

5.6.3 Vliv rychlosti

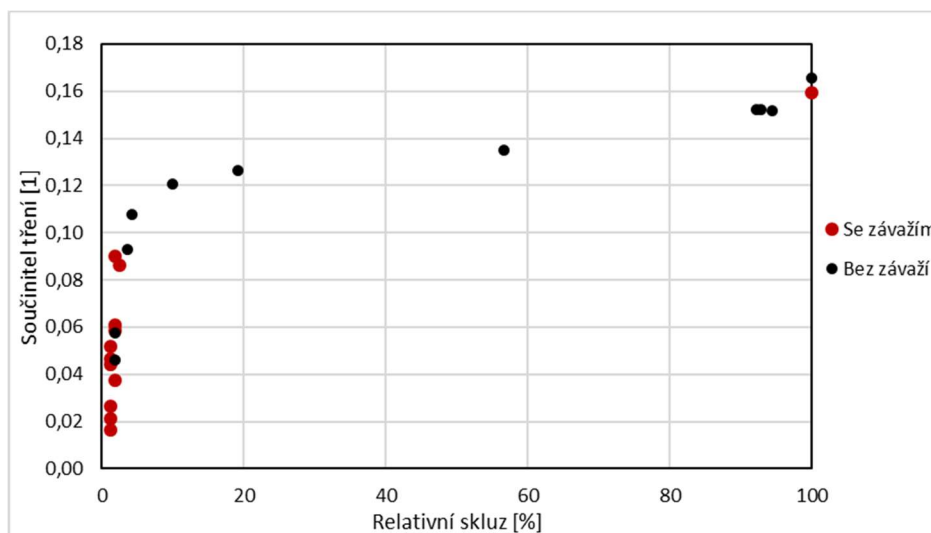
Test se sestával ze tří měření, která se lišila dopřednou rychlostí vozíku, respektive měřicího modulu. Při každém průjezdu se zvyšoval brzdný moment až do okamžiku zastavení kola. Cílem testu bylo stanovit vliv rychlosti pojezdu na adhezní charakteristiku. Výsledný graf (obr. 5-40) ukazuje tři naměřené charakteristiky. Z nich lze usoudit, že rychlost nemá na měření výrazný vliv.



obr. 5-40 Adhezní charakteristika – vliv rychlosti

5.6.4 Vliv normálové síly

Pro stanovení vlivu normálové síly, byl provedeny dvě měření. Parametry testů byly stejné, lišily se pouze normálovou silou. V prvním případě probíhalo měření bez závaží, takže v normálová síla v kontaktu (měřena senzorem síly) byla 80 N. V druhém měření bylo na měřicí modul připevněno závaží o váze 2,2 kg, které zvýšilo normálovou sílu na 160 N. Výsledek testu (obr. 5-41) ukazuje, že normálová síla nemá na adhezní charakteristiku vliv.



obr. 5-41 Adhezní charakteristika – vliv normálové síly

5.6.5 Opakovatelnost měření

Byly provedeny testy, které měly za úkol ukázat, jak je měření s tímto tribometrem opakovatelné. V prvním testu bylo měřicí kolo přibrzdováno konstantním brzdícím momentem 0,4 Nm a ve druhém bylo kolo zabrzděno úplně, takže v kontaktu byl čistý skluz. V obou případech měřicí modul měřil ve stejné stopě a bylo provedeno osm průjezdů se stejnou rychlostí 0,3 m·s⁻¹. Výsledky v tabulce 5-2 ukazují, že zařízení má dobrou opakovatelnost.

tab. 5-2 Opakovatelnost měření

Průjezd	Test 1		Test 2	
	Součinitel adheze [1]	Relativní skluz [%]	Součinitel adheze [1]	Relativní skluz [%]
1	0,080	2,51	0,149	100
2	0,083	2,46	0,155	100
3	0,081	2,45	0,156	100
4	0,081	2,45	0,159	100
5	0,080	2,44	0,147	100
6	0,081	2,44	0,150	100
7	0,083	2,44	0,148	100
8	0,082	2,44	0,159	100

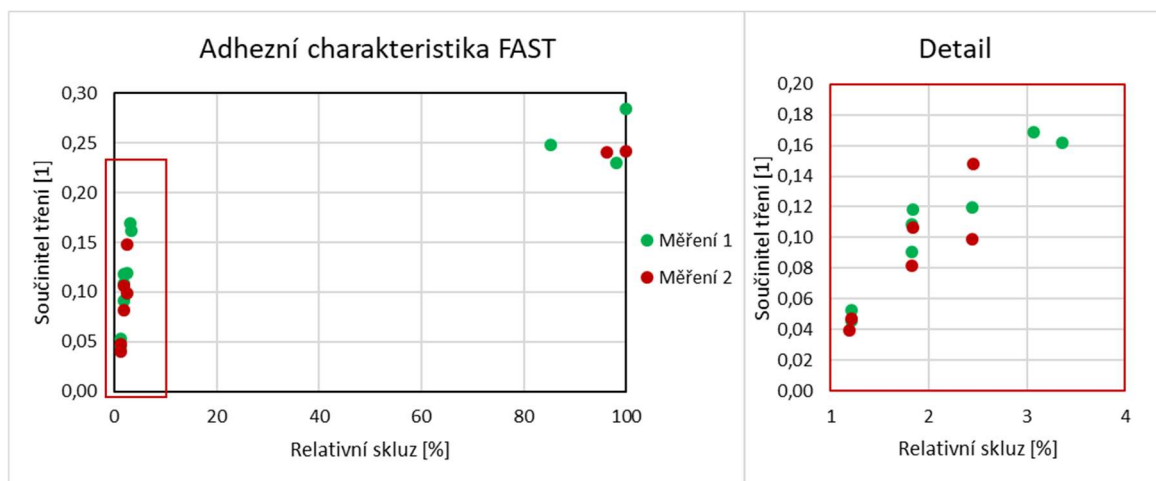
5.7 Experimentální ověření na reálné trati

5.7.1 Měření na širokopatní kolejnici



obr. 5-42 Tribometr na širokopatních kolejnicích

V areálu stavební fakulty VUT v Brně se nachází část kolejového svršku (cca 8 m). Na něm se nachází širokopatní kolejnice, která sice již v praxi neslouží, avšak dříve používána byla. Lze ji tedy považovat za adekvátní variantu reálné tratě. Kolejnice byla lokálně očištěna od povrchové rzi a povrch byl odmaštěn lihem. Tribometr byl upevněn na kolejnici pomocí magnetických držáků. Jako zdroj energie byly použity dva 12 V akumulátory, které byly zapojeny sériově, takže napájely tribometr požadovaným napětím 24 V. Celkově proběhla dvě měření adhezní charakteristiky. Rychlost vozíku byla nastavena na hodnotu $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a brzdný moment se s každým průjezdem zvětšoval. Výsledky měření lze vidět na obr. 5-43 včetně detailu charakteristiky za nízké hodnoty skluzu.



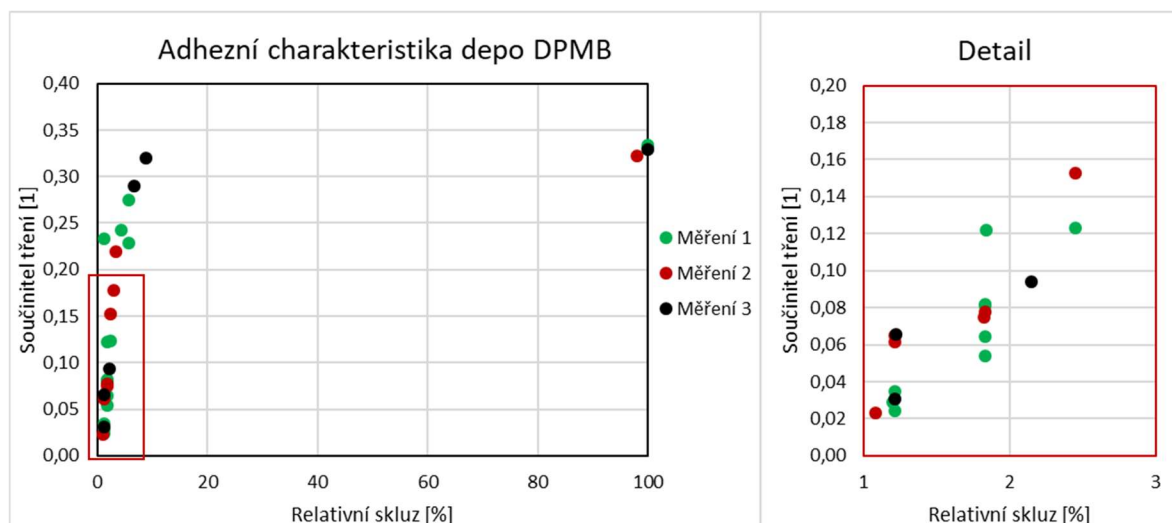
obr. 5-43 Výsledky měření FAST

5.7.2 Měření na žlábkové kolejnici



obr. 5-44 Tribometr na žlábkové kolejnici

Druhé experimentální ověření na reálné trati proběhlo v depu Dopravního podniku města Brna v Pisárkách. Byla vybrána frekventovaná žlábková kolej, která nebyla očištěna ani odmaštěna. Tribometr byl napájen akumulátory a byla provedena tři měření adhezní křivky. Byla nastavena konstantní rychlost měřicího modulu $0,15 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ a brzdný moment stoupal s každým průjezdem. Výsledky lze vidět na obr. 5-45 včetně detailu oblasti s nízkým relativním skluzem.



obr. 5-45 Výsledky měření depu DPMB

6 DISKUZE

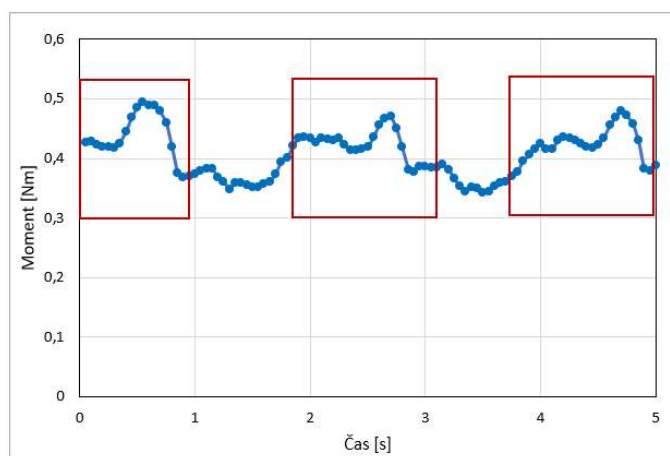
6.1 Zhodnocení navrženého řešení

Výsledkem této diplomové práce je zařízení, které je schopno měřit adhezní charakteristiku ve skutečných podmínkách na reálné trati. Zařízení je kvůli své váze 20 kg dobře přenosné a umožňuje tak měření na jakémkoli rovném úseku tratě.

Zařízení se přichytává ke kolejnici pomocí magnetických základů. Při experimentálním ověření na reálné trati byly otestovány kolejnice žlábkové i širokopatní. Pro správné uchycení je důležité, aby základny byly položeny na kolejnici vodorovně. Při použití teleskopického ramena se však tribometr zcela vodorovně neuloží, protože otočný kloub ramena není dostatečně tuhý a dochází v něm k průhybu až 10 mm. To má za následek nevyhovující uchycení tribometru na kolejnici. V průběhu testů byly použity stabilizační tyčky, které zařízení podpíraly, aby bylo uloženo správně. Pro další postup by bylo vhodné nahradit kloub ramena tužším elementem nebo rameno zcela vynechat a použít pouze stabilizační tyče.

Měřicí disk je přibrzdňovaný elektromagnetickou třecí brzdou. Brzda je schopna opakovaně aplikovat brzdny moment pouze v případě vzrůstajícího ovládacího napětí. Vykazuje totiž jistou hysterezi (vlivem zbytkového magnetismu), která může nastavený brzdny moment měnit až o 0,8 Nm. Na samotné měření a jeho přesnost to nemá žádný vliv, jelikož je brzdny moment měřen senzorem. Další problém spojený s ovládním brzdy spočívá v samotném regulátoru napětí (stmívačem LED). Jeho charakteristika je značně nelineární. Avšak díky analogovému ovládní, kde lze nastavit jemné změny ovládacího napětí (setiny voltu), je možné brzdny moment bez problému ovládat. Pro budoucí iteraci by bylo vhodné ovládat brzdu originálním regulátorem napětí, který dokáže odstranit zbytkový magnetismus.

Elektromagnetická třecí brzda byla zvolena především pro svoji jednoduchost a kompaktní rozměry. Jelikož je však brzda založena na třecím principu, její brzdící vlastnosti podléhají klimatickým podmínkám (vlhkost) a také stavu třecích povrchů (opotrebení, změna drsnosti). Tato brzda je také citlivá na uložení. Při nesouososti rotační části (ocelového disku) a statické části (elektromagnetu) není brzdny moment konstantní, protože třecí plochy už nejsou vůči sobě zcela rovnoběžné. Tento jev vzniká především za nízkých brzdnych momentů a je znázorněn na obr. 6-1, v němž jsou periodicky opakující se výchylky momentu, které značí špatné uložení brzdy. Alternativním řešením jsou magnetické práškové brzdy, kde nedochází ke tření dvou kovových povrchů ale prášku, takže mají stabilnější průběh brzdneho momentu. Také nejsou tak citlivé na uložení, jelikož tyto brzdy disponují vlastními ložisky. Toto řešení je však složitější na řízení a vede k mohutnější konstrukci měřicího modulu.



obr. 6-1 Výchylky momentu vlivem špatného uložení

Naměřené hodnoty součinitele tření lze porovnat s poznatky z rešerše, kde byly zkoumány výsledky měření adheze na reálné trati. Většina publikací se zabývá konkrétně součinitelem tření (tzn. součinitelem adheze při 100% skluzu). V rešerši probíraný ručně tlačný tribometr výsledky za sucha vždy nadhodnocoval. Na obrázku 2-16 jsou vidět hodnoty součinitele tření (pro suchý kontakt) měřené vlakem (cca 0,3) a měřené tlačným tribometrem (cca 0,6). Na dalším obrázku 2-17 je porovnání více zařízení měřících adhezi. Ručně tlačný tribometr opět výsledky oproti palubnímu tribometru nadhodnocoval (0,7 oproti 0,3). Tribometr vyvinutý v této diplomové práci byl podroben měření na reálné trati (v depu DPMB), kde byla měřena frekventovaná kolej (viz obr. 5-45). Součinitel tření se pohybuje okolo 0,33. Hodnoty naměřené tribometrem se přibližují výsledkům měření reálného vlaku.

6.2 Analýza přesnosti měření

Celková přesnost měření je dána několika faktory. Jedná se o samotné přesnosti senzorů a také záleží na předpokladech, které vedou ke zjednodušení, čímž se vnáší do měření chyby.

Při kalibraci snímače momentu bylo zjištěno, že snímač je velmi citlivý na uložení. Dotahováním snímače k přírubě se deformují tenzometry uvnitř snímače, takže se mění jejich odpor a tím i výstupní napětí. Přílišným dotažením se měnilo napětí až o 0,5 V, což má za následek nepřístupnou chybu 10 % z celého rozsahu. Při montáži je proto potřeba sledovat výstup senzoru a dotahovat ho takovým způsobem, aby k deformaci nedocházelo.

Rozsah snímače momentu je 5 Nm s dovoleným přetížením 150 %. Přesnosti snímačů bývají okolo jedné tisícině rozsahu (tzn. 0,005 Nm). Při měření nízkého momentu, který byl ve většině případů měřen, tato přesnost vnáší větší chybu. Například při měření momentu 0,5 Nm (který je při měření běžný) se chyba pohybuje kolem 1 %.

Pro měření rychlosti platí předpoklad, že nedochází k deformaci pružného řemene. Ve skutečnosti k určité deformaci řemenu dochází, hlavně při rozjezdu. Avšak maximální rychlost pojezdu je již konstantní, takže lze tvrdit, že v okamžiku jejího dosažení se řemen již dále nedeformuje a neovlivňuje hodnotu rychlosti. Avšak při vyšším brzděném momentu, kdy dochází ke 100% skluzu, je odpor kola velký natolik, že se promítne do deformace řemene.

Pro měření rychlosti slouží enkodéry, které počítají pulzy. Na základě známého obvodu měřicího disku a řemenice lze spočítat ujetou dráhu a následně pomocí numerické derivace rychlost. Měřicí disk se však časem opotřebovává, čímž se mění jeho obvod. S měřicím diskem bylo provedeno přes 500 průjezdů po ocelovém povrchu (asi v 5 % případů byl 100% skluz). Průměr disku se zmenšil asi o 0,01 mm. Chyba vnesená do měření je tím pádem minimální. Pro další používání tribometru by však bylo vhodné měřicí disk vyrobít například z ložiskové oceli, aby se opotřebení minimalizovalo.

V analýze přesnosti je třeba zmínit rozdíly mezi modelovou a skutečnou situací. Jak již bylo zmíněno v analýze měření rychlosti, měřicí disk se postupem času opotřebovává. Kontakt se tedy nechová jako v modelové situaci. Reálný kontaktní tlak se může od vypočteného lišit. Jelikož je opotřebení kola pouze 0,01 mm, je chyba kontaktního tlaku zanedbatelná. Kontakt také není ideální z hlediska povrchu. I když je očištěn a odmaštěn, zůstávají v povrchu vrypy a nerovnosti způsobené opotřebením.

Další chyby mohou vzniknout vlivem vibrací motoru. Motor je připojen k řemenici pomocí pružné spojky a uložen k přírubě přes gumovou vložku, aby došlo k omezení přenosu vibrací na vedení. Snímač momentu však tyto vibrace snímá a vnáší tak chyby do naměřených dat.

Při zpracování naměřených dat se vnáší do výsledků chyby. Jedná se především o chyby zaokrouhlovací, jelikož hodnota skluzu přichází do měřicí karty maximálně se dvěma desetinnými místy. Tato hodnota je omezena samotnou programovací deskou Arduino. Další chyba může být způsobena numerickou derivací, kterou probíhá výpočet rychlosti. Pro vytvoření jednoho bodu křivky se využívá dat z celého průjezdu. Jako zastupující prvky souboru dat jsou brány mediány brzděného momentu a skluzu. Tento předpoklad však může vnést chybu do vyhodnocení, jelikož ani jedna z těchto hodnot nemá konstantní průběh.

6.3 Parametry vyvinutého zařízení

Maximální délka měřicí dráhy je 1000 mm. O pohyb měřicího modulu připojeného k vozíku vedení se stará krokový motor připojený k řemenici vedení. Maximální krouticí moment motoru je až 4,1 Nm, který sice se vzrůstajícími otáčkami klesá, ale maximální otáčky motoru v této aplikaci jsou do 240 min^{-1} , kdy k poklesu momentu ještě nedochází. Maximální dopředná rychlost měřicího modulu je $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. Elektromagnetická brzda je schopna vyvinout brzdňý moment o velikosti 7,3 Nm, avšak pouze při vertikálním uložení. Při uložení horizontálním, které odpovídá této aplikaci, je maximální brzdňý moment 4,6 Nm. Ovládání brzdy může být velmi jemné – lze měnit ovládací napětí o 0,01 V z celkového rozsahu 10 V. Pro vyvození kontaktního tlaku 1 GPa (je třeba normálové síly o velikosti 150 N) slouží závaží o hmotnosti 2,2 kg umístěné na měřicím modulu. Normálová síla byla kalibrována senzorem síly. Tribometr je napájen akumulátorem s napětím 24 V. V pohotovostním režimu je odběr zařízení 0,3 A a při maximální zátěži 1 A.

Délka tribometru je 1448 mm a jeho výška 210 mm. Jeho maximální šířka závisí na teleskopickém rameni. Se sklopeným ramenem je šířka 500 mm. Při jeho vyklopení je pak možno pomocí teleskopického uchycení měnit šířku tribometru od 1217 mm do 1667 mm. Tribometr umožňuje měření celé plochy temena hlavy kolejnice díky možnému posuvu vedení (respektive měřicího disku) v laterálním směru. Od pomyslné střednice hlavy kolejnice je možné provést posunutí o $\pm 35 \text{ mm}$. Naklonění měřicího modulu okolo pantu je omezeno na $\pm 6^\circ$. Měření boku kolejnice možné není. Celý tribometr bez akumulátoru a externího PC váží 20 kg.

7 ZÁVĚR

Diplomová práce se zabývá vývojem přenosného tribometru pro měření adheze na reálné trati. Tyto výsledky lépe popisují chování kontaktu v různých klimatických podmínkách, které se v laboratoři špatně simulují. Zařízení umožňuje sestavení adhezní charakteristiky pomocí principu zvyšování brzdného momentu a měření skluzu. Měření je možné provádět na širokopatní i žlábkové kolejnici. Tribometr je napájen akumulátorem a jeho hmotnost je 20 kg. Díky teleskopickému sklápěcímu ramenu je kompaktní.

Průvodní zpráva obsahuje přehled současného stavu poznání, na jehož začátku je obecně popsán kontakt kola a kolejnice. Následuje popis různých zařízení, která jsou schopna stanovit adhezní charakteristiku nebo součinitel tření na reálné trati. Varianty ručních tribometrů jsou popsány detailněji včetně výsledků měření. Další kapitola se soustředí na možné koncepční varianty zařízení, způsobu vyhodnocení součinitele adheze, vyvození normálové síly a parametrů měřicího disku. V konstrukční části jsou definovány požadavky na zařízení, navržen měřicí řetězec včetně metodiky měření a popsán princip měření. Měřicí modul je unášen po kolejnici lineárním vedením s krokovým motorem. Měřicí kolo, které se odvaluje po kolejnici, je přibrzdováno elektromagnetickou brzdou. Ta zvyšuje brzdný moment s každým průjezdem až do okamžiku, kdy je v kontaktu 100% skluz. Následně je možné vytvořit adhezní charakteristiku. V práci je také popsána konstrukce celého tribometru včetně jednotlivých uzlů. Na konci práce jsou zhodnoceny výsledky a popsány návrhy na vylepšení nové generace tribometru.

Výsledkem této práce je funkční vzorek, který byl podroben několika experimentům. Z nich vyšlo najevo, že stanovení adhezní charakteristiky pomocí tohoto zařízení je nezávislé na počtu opakovaných průjezdů jednou stopou. To znamená, že měření není ovlivněno předchozím průjezdem. Charakteristika se výrazně nemění ani při odlišných dopředných rychlostech měřicího modulu. Dále bylo zjištěno, že měření je opakovatelné. Proběhla dvě měření pro ověření funkčnosti tribometru na reálné trati. V prvním případě se jednalo o širokopatní kolejnici v areálu FAST a ve druhém o kolejnici v depu DPMB. Výsledky měření byly porovnány s hodnotami z rešerše. Data naměřená pomocí tohoto tribometru se přibližují hodnotám, které uvádí reálný vlak.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] LATA, Michael. *Konstrukce kolejových vozidel II*. Pardubice: Univerzita Pardubice, 2004. ISBN 80-7194-696-6.
- [2] ČÁP, Jaroslav. Adhezní limity procesu trakce a brzdění. *Scientific Papers of the University of Pardubice*. 2000, **6**, B, s. 53-69.
- [3] POPOVICI, Radu. *Friction in Wheel - Rail Contacts*. B.m., 2010. Doctoral Thesis, University of Twente.
- [4] AREIZA, Y. A., S. I. GARCÉS, J. F. SANTA, G. VARGAS a A. TORO. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. In: *40th Leeds-Lyon Symposium on Tribology & Tribochemistry Forum 2013*. 2013. ISBN 0301-679X.
- [5] SALIENT_SYSTEMS. *Tribometer Datasheet* [online]. [cit. 18. 3. 2018]. Dostupné z: www.lbfoster-salientsystems.com/
- [6] Pojednání o styku kola a kolejnice. *ŽelPage* [online]. [cit. 18. 3. 2018] 2011. Dostupné z: <http://www.zelpage.cz/clanky/pojednani-o-styku-kola-a-kolejnice?lang=cs>
- [7] ZHU, Y. *Adhesion in the wheel – rail contact under contaminated conditions*. B.m., 2011. Ph.D. Thesis, Royal Institute of Technology.
- [8] HARRISON, H., T. MCCANNEY a J. COTTER. Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface. *Wear*. 2002, **253**(1–2), 114–123. ISSN 00431648.
- [9] LEWIS, R. a U. OLOFSSON. *Wheel-rail interface handbook*. 1. vyd. Cambridge: Woodhead: Woodhead publishing in mechanical engineering, 2009. ISBN 9781845694128.
- [10] MACHATKA, Milan. *Experimentální výzkum pískování v kontaktu kola a kolejnice*. B.m., 2014. Vysoké učení technické v Brně.
- [11] KNÁPEK, Jiří. *Experimentální studium modifikátorů tření v kolejové dopravě*. B.m., 2017. Vysoké učení technické v Brně.
- [12] FOUFOUNIS, J. T. Device for Measuring the Degree of Adhesion of Vehicle Wheels to their Tracks. US 2,496,405. 1950.
- [13] NAGASE, K. An Investigation into Slipping Adhesion between the Rails and Wheels. *Bulletin of JSME*. 1986, **29**(254), 2647–2652. ISSN 09168451.
- [14] NAGASE, K. A study of adhesion between the rails and running wheels on main lines: Results of investigations by slipping adhesion test bogie. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 1989, **203**(1), 33–43. ISSN 20413017.
- [15] M. PALINKO. *Estimation of wheel-rail friction at vehicle certification measurements* $M' \text{ arton } P'$. B.m., 2016. THESIS.
- [16] CLEM, George K. Tribometer for Testing the Efficiency of Lubrication Upon a Railroad Track Surface. 2001.

- [17] INTERNATIONAL_ENGINEERING. *Friction Measurement Systems* [online]. 2019. Dostupné z: <http://international-engineering.com/en/divisions/monitoring-division/Friction-Measurement-Systems.php>
- [18] VAN STEENIS, Niels. *Monitoring train performance in case of low adhesion : acquiring knowledge for the development of low adhesion measures*. Enschede, The Netherlands, 2010. Ph.D. Thesis, University of Twente.
- [19] AREIZA, Y. A., S. I. GARCÉS, J. F. SANTA, G. VARGAS a A. TORO. Field measurement of coefficient of friction in rails using a hand-pushed tribometer. *Tribology International*. 2014, **82**(PB), 274–279. ISSN 0301679X.
- [20] HARRISON, Harold. The development of a low creep regime, hand-operated tribometer. *Wear*. 2008, **265**(9–10), 1526–1531. ISSN 00431648.
- [21] LUNDBERG, Jan, Matti RANTATALO, Christina WANHAINEN a Johan CASSELGREN. Measurements of friction coefficients between rails lubricated with a friction modifier and the wheels of an IORE locomotive during real working conditions. *Wear*. 2015, **324–325**, 109–117. ISSN 00431648.
- [22] AREIZA, Y.A. *Efecto de la fuerza de fricción en el contacto rueda-riel sobre el consumo medio de energía en operación del metro de Medellín*. B.m., 2014. Master Thesis, Universidad Nacional de Columbia.
- [23] Laboratorní zdroj. *Tipa* [online obrázek]. [cit. 2019-05-1] Dostupné z: <https://img.tipa.eu/fotocache/productGallery/images/orig/04220124.jpg>
- [24] PWM regulátor. GM electronic [online obrázek]. [cit. 2019-05-1]. Dostupné z: https://www.gme.cz/data/product/1024_1024/pctdetail.773-026.1.jpg
- [25] Multimetr. *VPcentrum* [online obrázek]. [cit. 2019-05-1]. Dostupné z: <https://www.vpcentrum.eu/image/cache/data/prods/prod7/24537-multimetr-re64-range-1-500x500.jpg>
- [26] STEP-DOWN. *ArduinoShop* [online obrázek]. [cit. 2019-05-1] Dostupné z: <https://arduino-shop.cz/photos/produkty/d/1/1303.jpg?m=1502871317>
- [27] Stmívač LED. *TopLux* [online obrázek]. [cit. 2019-05-1] Dostupné z: https://cdn.myshoptet.com/usr/www.toplux.cz/user/shop/big/3801_rf-prijimac-stmivac-led-1x8-a-5-36-v-dc--maximalni-zatizeni-pri-12-v-96-w--pri-24-v-192-w--pro-dalkove-ovladace-dimled--rozmery-97-x-33-x-18-mm.jpg?5c6976b2

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

IWT4	Instrumented Wheelset Technology, generation 4
GPS	Global Positioning System
BR	British Rail
AAR	Association of American Railroads
NI	National Instruments
DO	Digital Output
DI	Digital Input
AO	Analog Output
AI	Analog Input
PWM	Pulse Width Modulation
PC	Personal Computer
DPBM	Dopravní podnik města Brna
FAST	Fakulta stavební
μ	součinitel adheze
F_T	tečná síla
F_t	třecí síla
F_N	normálová síla
R	poloměr kola
ω	úhlová rychlost kola
v	dopředná rychlost kola po kolejnici
w	skluzová rychlost
s	relativní skluz
V	rychlost vozidla
T_1	moment referenční nápravy
T_2	moment skluzové nápravy

F_1	tečná síla na referenční nápravě
W_2	normálová síla na skluzové nápravě
r_1	poloměr kola referenční nápravy
r_2	poloměr kola skluzové nápravy
M_B	brzdny moment
M_O	moment odvalování
F_{yG}	tíhová síla
F_{yK}	síla v kontaktu
F_{zP}	síla pružiny
F_{yZ}	síla závaží
z_1, z_2, z_3	vzdálenosti v ose z
y	vzdálenost v ose y
F_{xt}	třecí síla v kontaktu
F_{xs}	setrvačná síla
F_{yN}	síla zvedající vozík vedení
F_x, F_y, F_z	složky síly v osách
M_x, M_y, M_z	složky momentu k osám
F	síla ve vedení
P	vzdálenost na vedení
S_i	bezpečnostní faktor
M_n	krouticí moment bez zátěže
n	otáčky
M_a	moment potřebný k pohonu vedení
P_a	výkon motoru
f	prohnutí vedení
L	celková délka vedení
E	modul pružnosti
I	moment setrvačnosti

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

obr. 2-1	Schéma styku kola a kolejnice [7]	16
obr. 2-2	a) Kontaktní plocha, b) Odvalování kola [9]	17
obr. 2-3	Trakční křivka s kontaktní oblastí.....	18
obr. 2-4	Schéma patentu od Foufounise [12].....	20
obr. 2-5	Měřicí podvozek od Nagaseho [13]	21
obr. 2-6	Podvozek IWT4 [15]	22
obr. 2-7	Měřicí vozidlo Britských drah [15].....	22
obr. 2-8	TriboRailer [3].....	23
obr. 2-9	Surveyor [3].....	23
obr. 2-10	Automatický přenosný tribometr [17]	24
obr. 2-11	Součásti ručního tribometru [15]	24
obr. 2-12	Šroubová pružina [22].....	25
obr. 2-13	Měřicí komponenty TriboMetro FR 101 [4].....	27
obr. 2-14	Vliv kontaktního tlaku na součinitel tření [20]	27
obr. 2-15	Měření souč. adheze pomocí ručního tribometru s kont. tlakem 1 GPa [4]	28
obr. 2-16	Porovnání výsledků součinitele tření pro různá měřicí zařízení [18]	28
obr. 2-17	Porovnání součinitele tření naměřené ručním tribometrem a podvozkem [21]	29
obr. 4-1	Ručně tlačená varianta	33
obr. 4-2	Varianta s automatickým pojezdem	34
obr. 4-3	Měřicí řetězec s A) - brzdou, B) - elektromotorem	35
obr. 5-1	Měřicí schéma.....	41
obr. 5-2	Princip stanovení adhezní charakteristiky.....	41
obr. 5-3	Konstrukční řešení s maximálními rozměry (mm).....	42
obr. 5-4	Měřicí modul	42
obr. 5-5	Řez měřicím modulem	43
obr. 5-6	Uložení hřídele.....	45
obr. 5-7	Spojovací tyč se závity.....	45
obr. 5-8	Uložení modulu přes panty (pohled zespodu)	46

obr. 5-9 Zjednodušený silový rozbor	47
obr. 5-10 Silový rozbor s pružinou	47
obr. 5-11 Silový rozbor se závažím.....	47
obr. 5-12 Lineární vedení	48
obr. 5-13 Profil jízdy.....	48
obr. 5-14 Silové schéma pro výpočet vedení.....	49
obr. 5-15 Výpočet z katalogu vedení.....	50
obr. 5-16 Napojení motoru	50
obr. 5-17 Uložení vedení	51
obr. 5-18 Enkodér a spínače na vedení	51
obr. 5-19 Rám tribometru	52
obr. 5-20 Teleskopické rameno	52
obr. 5-21 Uchycení magnetické základny	53
obr. 5-22 Schéma měřicího řetězce.....	54
obr. 5-23 Ovládací rozhraní v programu Labview	55
obr. 5-24 Kalibrace momentového senzoru.....	56
obr. 5-25 Charakteristika momentového senzoru.....	56
obr. 5-26 Elektromagnetická brzda uložená v měřicím modulu.....	57
obr. 5-27 Experiment s PWM regulátorem [23–25]	57
obr. 5-28 Charakteristika PWM regulátoru	58
obr. 5-29 Experiment se step-down modulem [23, 25, 26]	58
obr. 5-30 Charakteristika step-down modulu	58
obr. 5-31 Experiment se stmívačem LED [23, 25, 27]	59
obr. 5-32 Charakteristika stmívače LED	59
obr. 5-33 Měření brzdného momentu.....	60
obr. 5-34 Charakteristika brzdy s laboratorním zdrojem.....	61
obr. 5-35 Charakteristika brzdy se stmívačem LED.....	61
obr. 5-36 Komponenty elektrické skříně	62
obr. 5-37 Energetický řetěz.....	62
obr. 5-38 Příklad sestavení adhezní charakteristiky	64

obr. 5-39 Adhezní charakteristika – vliv opakovaného průjezdu	64
obr. 5-40 Adhezní charakteristika – vliv rychlosti	65
obr. 5-41 Adhezní charakteristika – vliv normálové síly.....	65
obr. 5-42 Tribometr na širokopatných kolejnicích	67
obr. 5-43 Výsledky měření FAST	67
obr. 5-44 Tribometr na žlábkové kolejnici	68
obr. 5-45 Výsledky měření depo DPMB.....	68
obr. 6-1 Výchyšky momentu vlivem špatného uložení	70

11 SEZNAM TABULEK

tab. 4-1 Parametry měřicího kola.....	36
tab. 5-2 Porovnání výpočtu a parametrů vedení.....	49
tab. 5-4 Opakovatelnost měření.....	66

12 SEZNAM PŘÍLOH

Přiložené přílohy

PŘÍLOHA 1 – Fotodokumentace

PŘÍLOHA 2 – Elektrické schéma

PŘÍLOHA 3 – Průběhy momentu a skluzu v čase

Samostatné přílohy

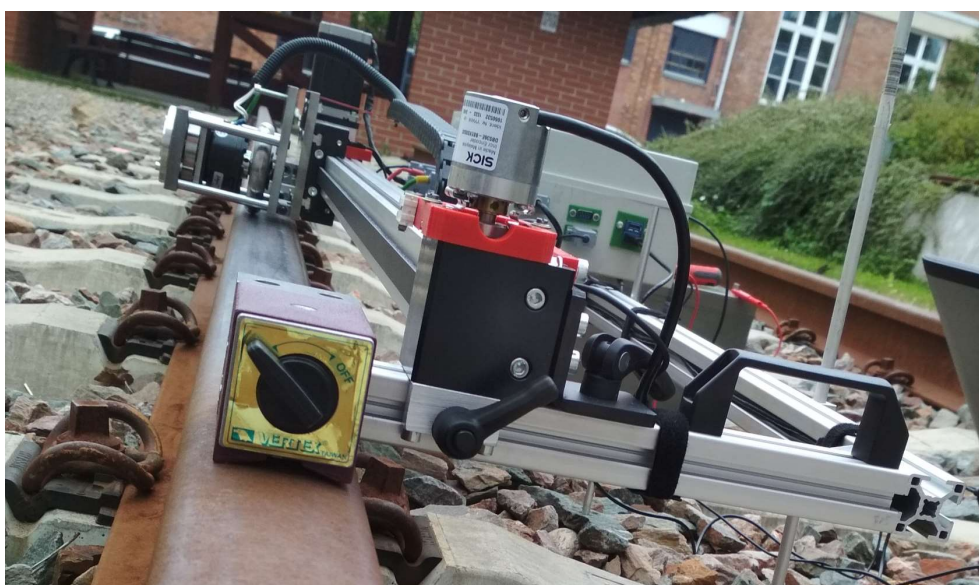
Výkresová dokumentace

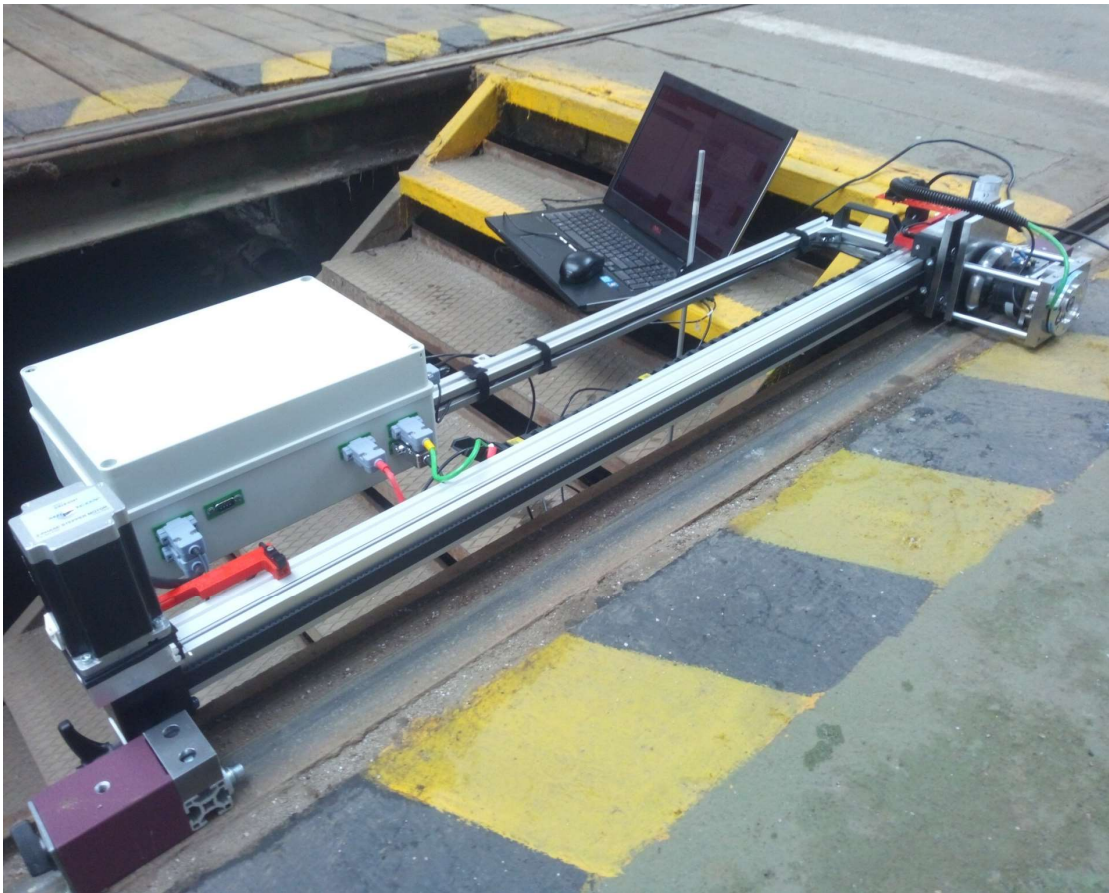
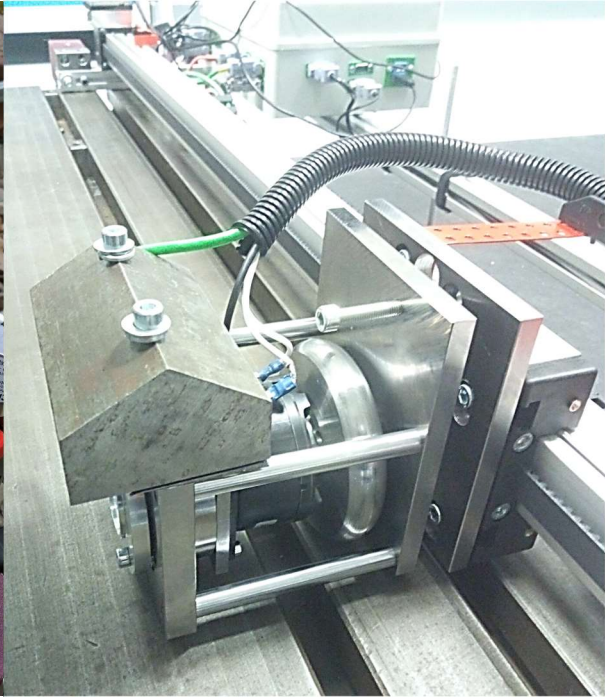
Manuál k zařízení

Cenová rozvaha

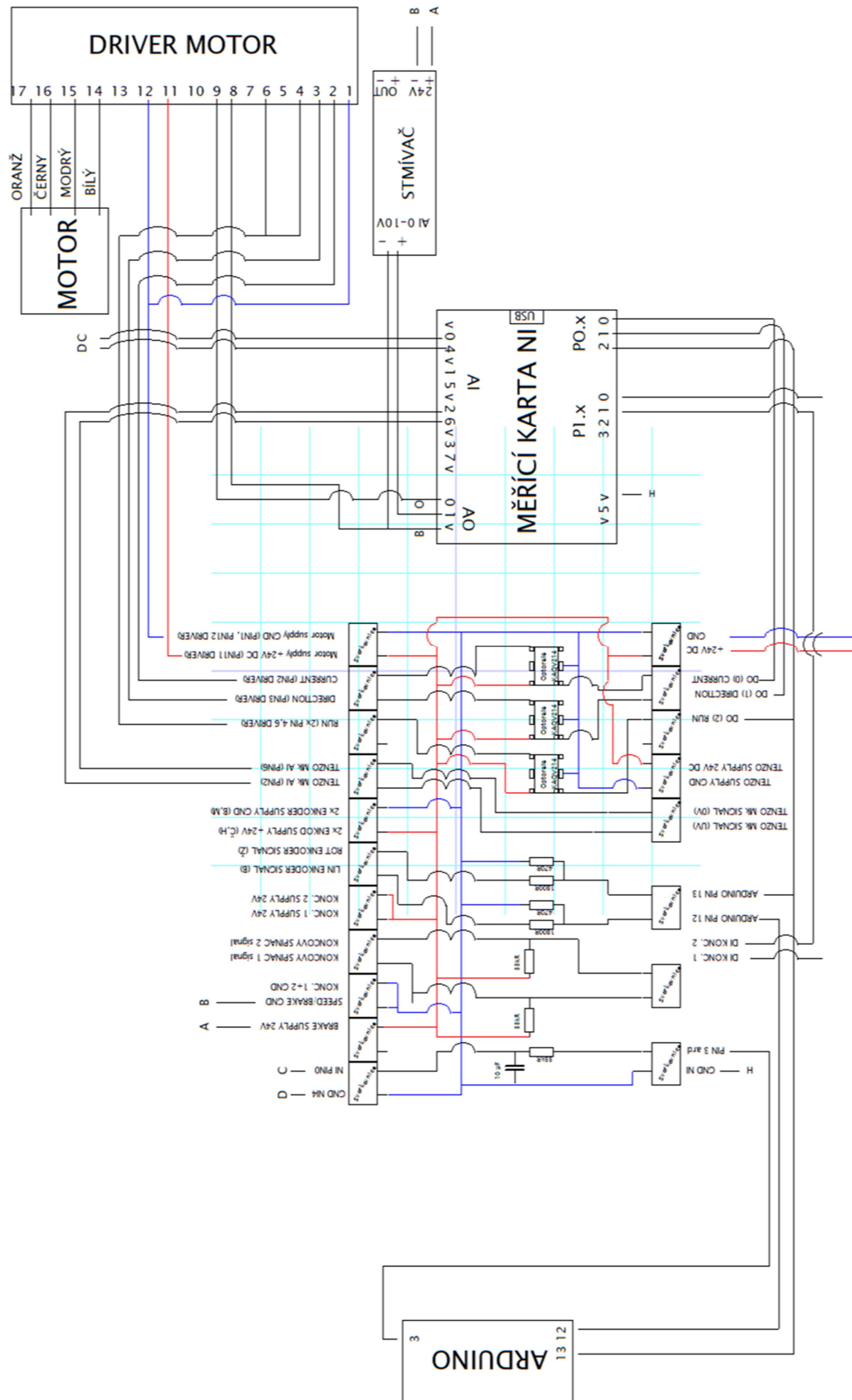
13 PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1 – Fotodokumentace





PŘÍLOHA 2 – Elektrické schéma



PŘÍLOHA 3 – Průběhy momentu a skluzu v čase

