



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

NÁVRH MODULU UMOŽŇUJÍCÍ MĚŘIT SOUČINITEL TŘENÍ NA BOKU KOLEJNICE

DESIGN OF A MODULE TO MEASURE THE COEFFICIENT OF FRICTION ON THE SIDE OF THE RAIL

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Dominik Chlebek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Martin Valena, Ph.D.

BRNO 2026

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: Dominik Chlebek
Studijní program: Základy strojního inženýrství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: Ing. Martin Valena, Ph.D.
Akademický rok: 2025/26

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

Návrh modulu umožňující měřit součinitel tření na boku kolejnice

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Měření součinitele tření na reálné trati je poměrně náročné s ohledem na modelové zkreslení a časovou náročnost. Na světě existuje pouze několik přenosných zařízení, které dokáží stanovit součinitel tření na temenu i boku kolejnice. Zařízení vyvinuté u nás na ústavu dokáže měřit jen na temenu, ovšem jako jedno z mála dokáže vykreslit součinitel tření v závislosti na skluzu. Dalším krokem je rozšíření jeho použitelnosti na pojižděnou plochu kolejnice. Zařízení by v důsledku mohlo přispět k optimalizaci mazacího procesu okolku a pojižděné hrany, čímž by se prodloužila životnost kola i kolejnice.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je navrhnout výměnný modul traťového tribometru, který bude umožňovat měření součinitele tření na pojižděné hraně kolejnice.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešerše v oblasti měření tření na kolejnici a její analýza,
- vytvoření koncepčních variant modulu traťového tribometru,
- výběr vhodné varianty a její detailní rozpracování,
- sepsání průvodní zprávy a tvorba výkresové dokumentace.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, výkresy součástí, výkres sestavení.

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

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

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

Seznam doporučené literatury:

VALENA, Martin, Milan OMASTA, Daniel KVARDA, Radovan GALAS, Ivan KRUPKA a Martin HARTL. An approach for the creep-curve assessment using a new rail tribometer. Tribology International. 2024, roč. 191, s. 109153. ISSN 0301679X.

HARRISON, H., T. MCCANNEY a J. COTTER. Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface. Wear. 2002, roč. 253, č. 1–2, s. 114–123. ISSN 00431648.

HARRISON, Harold. Producing and measuring the 3rd body layer. In: 2020 Joint Rail Conference. B.m.: American Society of Mechanical Engineers, 2020, s. 1–7. ISBN 978-0-7918-8358-7.

WHITE, Ben, Michael WATSON, Joseph JAFFE a Roger LEWIS. A field methodology to assess the performance of rail cleaning, using a new portable tribometer. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit. 2025, roč. 239, č. 5, s. 421–430. ISSN 0954-4097.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2025/26

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá problematikou měření adhezních a třecích podmínek v kontaktu kola a kolejnice, které zásadně ovlivňují bezpečnost provozu a míru opotřebení železniční infrastruktury. Analýza současného stavu poznání ukázala, že stávající diagnostické nástroje vykazují limity v přesnosti simulace reálných Hertzových kontaktních tlaků a jsou konstrukčně omezeny pouze na měření na temeni kolejnice, čímž opomíjejí kriticky namáhanou vodící hranu.

Hlavním cílem práce je návrh a konstrukce výměnného polohovatelného modulu pro BUT Rail tribometr. Navržené zařízení má za úkol umožnit detailní diagnostiku součinitele tření v šesti definovaných polohách napříč profilem kolejnice, a to při zachování vysoké konstrukční tuhosti, nízké hmotnosti pro snadnou mobilitu v terénu a intuitivní ergonomie obsluhy.

Problém byl vyřešen návrhem kompaktního modulu kombinujícího příčný posuv, výškové nastavení se zatěžovací pružinou a excentrické naklápění celého měřicího mechanismu. Výsledný konstrukční návrh o hmotnosti 5,57 kg spolehlivě generuje Hertzovy kontaktní tlaky v rozmezí 0,7–1 GPa. Modul úspěšně dosahuje všech šesti definovaných měřicích poloh na širokopatní kolejnici a pěti poloh na žlábkové kolejnici, kde je nejnižší poloha omezena konstrukční kolizí s tělesem kolejnice.

Navržené zařízení výrazně rozšiřuje diagnostické možnosti mapování tření na reálných, nepravidelně opotřebovaných profilech tratí přímo v terénu. Získaná detailní data mohou přímo přispět k přesnější optimalizaci mazacích procesů, efektivnímu snížení opotřebení a celkovému prodloužení životnosti železniční infrastruktury, přičemž identifikované konstrukční limity tvoří jasné východisko pro další vývoj modulu.

KLÍČOVÁ SLOVA

tribometr, součinitel tření, valivý skluz, kontakt kola a kolejnice, pojížděná hrana kolejnice

ABSTRACT

This bachelor thesis addresses the measurement of adhesion and friction conditions at the wheel-rail interface, which fundamentally affect operational safety and the wear of railway tracks. An analysis of the current state of knowledge revealed that existing diagnostic tools are limited in their ability to accurately simulate real Hertzian contact pressures and are often structurally restricted to measurements on the rail head, thus neglecting the critically loaded guiding edge.

The main objective of this thesis is to design and construct a swappable, adjustable module for the existing portable BUT Rail tribometer. The proposed device is designed to enable detailed diagnostics of the coefficient of friction at six defined positions across the rail profile, while maintaining high structural rigidity, low weight for ease of field mobility, and ergonomic operation.

The problem was solved by designing a compact module that combines lateral displacement, vertical adjustment using a loading spring, and eccentric tilting of the entire measuring mechanism. The resulting structural design, with a total mass of 5.57 kg, reliably generates the required Hertzian contact pressures in the range of 0.7–1 GPa. The module successfully reaches all six defined measuring positions on standard flat-bottom rails and five positions on grooved rails, where the lowest position is limited by a structural collision with the rail body.

The proposed device significantly expands the diagnostic capabilities for friction mapping on real, irregularly worn rail profiles directly in the field. The detailed data obtained can contribute directly to the optimization of lubrication processes, effective wear reduction, and the overall extension of railway infrastructure service life, while the identified structural limits provide a clear basis for further development of the module.

KEYWORD

Tribometer, coefficient of friction, rolling slip, wheel-rail contact, gauge face

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

CHLEBEK, Dominik. *Návrh modulu umožňující měřit součinitel tření na boku kolejnice*. Bakalářská práce. Martin VALENA (vedoucí práce). Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2026.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé práce Ing. Martinu Valenovi Ph.D. za investovaný čas do konzultací a předané věcné rady. Další poděkování patří mé rodině a přátelům, za podporu při studiu.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Nástroj generativní AI (**Gemini, Google**) jsem použil v omezeném rozsahu pro jazykovou korekturu a stylistické přeformulování mnou napsaných odstavců. AI nebyla použita k vytváření odborných tvrzení ani k nahrazení práce se zdroji. Veškeré formulace jsem po korektuře zkontroloval a odpovědnost za obsah nesu já.

Generativní AI (**Gemini, Google**) jsem použil pro pracovní překlad vybraných pasáží při studiu zahraničních zdrojů. V práci jsou citovány a interpretovány primární zdroje; překlady byly kontrolovány a případně upraveny.

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

.....

Podpis autora

OBSAH

OBSAH	12
1 ÚVOD	15
2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	16
2.1 Mechanika měření tření na kolejnici	16
2.1.1 Mechanika kontaktu a faktory ovlivňující tření	16
2.1.2 Typy skluzů	17
2.2 Stav povrchu kolejnice a vlivy prostředí ovlivňující tření	18
2.2.1 Vliv počátečních podmínek na měření	18
2.2.2 Problematika třetího tělesa a oxidů	19
2.2.3 Nečistoty na kolejnicích	19
2.2.4 Stick-slip efekt a z něj plynoucí rizika	19
2.2.5 Úprava povrchu: mazání a pískování	20
2.3 Charakteristika a tvary kolejnic	21
2.4 Existující traťové tribometry	24
2.4.1 Salient Push Tribometr	24
2.4.2 OnTrak HO tribometr	26
2.4.3 Rivelin Rail PRT300 přenosný tribometr	28
2.4.4 Polo automatický ručně tlačенý tribometr TriboRoll	29
2.4.5 BUT Rail tribometr	30
3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	32
3.1 Analýza problému	32
3.2 Cíl práce	34
4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ	35
4.1 Měřicí modul	35
4.1.1 Koncepce uložení hřídele a měřicího kola	35
4.1.2 Elektromagnetická brzda	36
4.1.3 Způsob upnutí měřicího kola na hřídel	37
4.1.4 Senzor otáček	39
4.1.5 Senzor krouticího momentu	40
4.2 Zatěžovací modul a výškový posuv	41
4.2.1 Koncepce mechanismu výškového posuvu a zatížení	42
4.2.2 Senzor přítláčné síly (Tenzometr)	43

4.3	Naklápěcí modul	44
4.3.1	Koncepce umístění osy rotace	44
4.4	Příčný posuv	46
4.4.1	Koncepce uspořádání lineárního vedení	46
5	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	48
5.1	Měřicí modul	49
5.1.1	Měřicí kolo	50
5.1.2	Výpočet Hertzových kontaktních tlaků	51
5.1.3	Uložení hřídele	54
5.1.4	Ložiska	56
5.1.5	Víko	56
5.2	Zatěžovací modul a výškový posuv	56
5.2.1	Velikost potřebné přitlačné síly pružiny	59
5.3	Naklápěcí modul	60
5.3.1	Pevná část	62
5.3.2	Pohyblivá část	62
5.3.3	Zajištění polohy	63
5.3.4	Svislé vedení	64
5.4	Základní deska	64
5.4.1	Matice pro T drážku	66
5.4.2	Sestava příčného vedení	66
5.4.3	Zaručení rovnoměrnosti příčného posuvu.	66
5.5	Výsledná konstrukce v pracovních polohách	68
5.5.1	Napojení na horizontální lineární pohonnou jednotkou tribometru BUT Rail	68
5.5.2	Pracovní polohy na širokopatní kolejnici	69
5.5.3	Pracovní polohy na blokové žlábkové kolejnici	70
6	DISKUZE	72
6.1	Zhodnocení kompatibility a ergonomie	72
6.2	Hodnocení kinematiky a tuhosti	72
6.3	Dosažení měřicích poloh a konstrukční limity	73
6.4	Možnost dalšího vylepšení zařízení	73
7	ZÁVĚR	75
8	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	76

9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	79
9.1	Seznam použitých fyzikálních veličin	79
9.2	Seznam použitých zkratk	80
10	SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ	81
11	SEZNAM TABULEK	83
12	SEZNAM PŘÍLOH	84

1 ÚVOD

Železniční doprava představuje jeden z nejdůležitějších pilířů moderní dopravní infrastruktury, přičemž její efektivita a bezpečnost přímo závisí na komplexních fyzikálních procesech probíhajících v kontaktu mezi kolem a kolejnicí. Důležitost stanovení a následné řízení součinitele tření (μ) vyplývá ze skutečnosti, že úroveň tření v kontaktu je „dvousečnou zbraní“. Vysoké hodnoty μ vedou k nadměrné spotřebě energie, zvýšenému valivému odporu a rozvoji degradačních mechanismů, jako je intenzivní opotřebení, tvorba vlnovitosti či iniciace kontaktně únavových poškození. Tyto jevy nejen zvyšují hlučnost provozu, ale především výrazně prodražují údržbu infrastruktury. Naopak příliš nízké tření představuje zásadní bezpečnostní riziko, neboť prodlužuje brzdné dráhy, způsobuje prokluzu kol a snižuje trakční výkon lokomotiv. Správná diagnostika je proto nezbytná pro efektivní aplikaci modifikátorů tření a maziv, které upravují tvar skluzové křivky s cílem minimalizovat tečné síly a prodloužit životnost komponent.

Aby bylo možné optimální hodnoty tření v provozu efektivně udržovat, je klíčovým předpokladem jejich přesná a spolehlivá diagnostika. Metodiky měření součinitele tření se liší podle rozsahu i simulovaného prostředí – od komplexního měření pomocí speciálně vybavených diagnostických lokomotiv přes laboratorní zkušební stavy, které simulují reálné podmínky v plném či zmenšeném měřítku, až po praktické aplikace v terénu. V provozním prostředí se využívají měřicí stroje tlačené kolejovými vozidly pro dlouhé úseky trati nebo přenosné traťové tribometry, které umožňují cílenou diagnostiku konkrétních kritických míst.

Hlavním cílem této práce je právě rozšíření diagnostických možností stávajícího traťového tribometru BUT Rail. Přestože je tento měřicí přístroj schopen přesně měřit adhezní charakteristiky, jeho současná verze je omezena pouze na měření na temeni kolejnice. V reálném provozu však dochází k intenzivnímu kontaktu a opotřebení také na vodicí hraně kolejnice, zejména v obloucích, kde dochází k interakci s okolkem kola.

V rámci této práce bude proto navržen nový, polohovatelný měřicí modul, který bude plně kompatibilní s hnacím ústrojím tribometru BUT Rail. Tento výměnný modul umožní, na rozdíl od původního řešení, měření součinitele tření nejen na temeni, ale i v dalších polohách na vodicí hraně kolejnice. Návrh je koncipován jako univerzální řešení použitelné jak pro standardní širokopatní kolejnice, tak pro žlábkové profily využívané v tramvajové dopravě. Výsledkem by měl být komplexní diagnostický nástroj schopný poskytnout detailní rozbor tření na rozhraní kola a kolejnice.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2.1 Mechanika měření tření na kolejnici

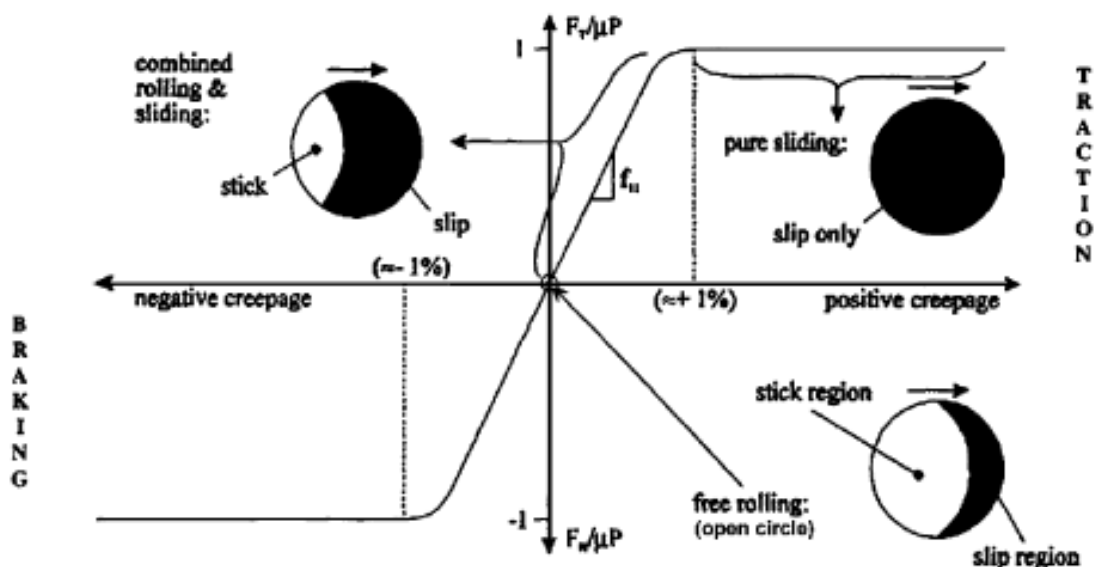
Znalost úrovně tření přímo na železniční trati je klíčová pro pochopení adhezních poměrů. Nejrealističtější měření tření poskytují zkoušky v reálném měřítku. Do této kategorie spadá testování na strojích využívajících skutečné kolo vlaku a ocelový disk reprezentující kolejnici, případně využití přímo samotné kolejnice [4].

Z hlediska nejvyšší reprezentativnosti v terénu je ideální použití měřicího systému instalovaného přímo na lokomotivě, který při vzniku skluzu zaznamenává trakční síly a rychlosti prokluzu u všech podvozků. Tyto experimenty jsou ovšem finančně a provozně velmi náročné. Běžnějším kompromisem pro měření v terénu je proto využití tzv. polních tribometrů. Tato zařízení na skutečné kolejnici simulují pohyb pomocí protikusu (např. ve tvaru kola nebo kužele) a vyvolávají zde valivě-kluzný kontakt [11]. Je však třeba zmínit, že ne u všech běžných tribometrů je známa přesná hodnota skluzu v okamžiku měření. Laboratorní měření pak mají tendenci poskytovat za sucha vyšší hodnoty tření než ta terénní, a to vlivem silnější tvorby oxidačních a otěrových částic [11].

Princip měření často spočívá v postupném zvyšování brzdného momentu měřicího kola, dokud nedojde k jeho prokluzu. Výsledná hodnota součinitele tření (μ) je následně vypočítána z maximálního točivého momentu naměřeného těsně před započítím tohoto prokluzu [11]. Aby však měly naměřené hodnoty vypovídající hodnotu, je absolutně nezbytné znát jejich kontext: při jakém skluzu, jakém Hertzově kontaktním tlaku a u jak starého (zaběhnutého) materiálu k měření došlo [8].

2.1.1 Mechanika kontaktu a faktory ovlivňující tření

Třecí vlastnosti v kontaktu kola a kolejnice jsou popisovány součinitelem trakce (CoT). Závislost CoT na poměrném skluzu mezi povrchy se nazývá skluzová křivka [11]. V oblasti nízkého skluzu CoT strmě stoupá, následně dosahuje nasycení a dále buď mírně roste, nebo má klesající tendenci [2].



Obr. 2-1 Skluzová křivka [8]

Tření v rozhraní je závislé na celé řadě fyzikálních parametrů, mezi které patří [10]:

- **Skluz:** Normalizovaná relativní rychlost prokluzu mezi povrchy.
- **Hertzův kontaktní tlak:** Znatelně ovlivňuje tření. Platí, že zvýšený Hertzův kontaktní tlak snižuje nasycenou mez skluzu (dochází k uzavírání nerovností povrchu), přičemž nárůst CoT s rostoucím tlakem plynule stoupá [8]. Vliv má i eliptičnost kontaktní plošky (odvíjející se od příčného poloměru kol) [2].
- **Čas od posledního průjezdu vlaku:** Vliv atmosférické koroze a usazování polétavých částic.
- **Fyzikální a meteorologické podmínky:** Teplota, viditelná vlhkost a drsnost/tvrдость povrchu (tvrdost kol a kolejnice je přímo úměrná limitnímu skluzu).
- **Přítomnost "třetího tělesa"** (viz. Kap. 2.2.2).

2.1.2 Typy skluzů

Měřicí zařízení mohou vyvolávat prokluz dvěma způsoby. Prvním je **příčný skluz**. Dosahuje se ho natočením měřicího kola pod úhlem náběhu, čímž vzniká oscilace dráhy kola v ose stáčení vůči jeho podélnému pohybu. Poskytuje vynikající kontrolu skluzu v nízkých hodnotách (0–3 %), nevyžaduje složitý brzdňý mechanismus a pro obsluhu je často užitečnější. Je u něj ovšem nezbytné simultánně měřit normálové i příčné síly, což může být na zakřivených profilech kolejnice náročné. [9]

Druhým typem je **podélný valivý skluz**. Tento typ skluzu je vyvolán cíleným brzděním měřicího kola během jeho podélného odvalování po kolejnici. Pro zajištění přesnosti měření je v tomto případě zcela klíčové, aby se kolo pohybovalo striktně v podélné ose kolejnice. Jakékoliv, byť i minimální úhlové vychýlení měřicího kola by totiž nevyhnutelně vedlo ke vzniku nežádoucího příčného skluzu. V takovém případě by zařízení neregistrovalo pouze čistý podélný skluz, ale kombinované namáhání, což by naměřená data o adhezních poměrech výrazně zkreslilo. [11]

2.2 Stav povrchu kolejnice a vlivy prostředí ovlivňující tření

2.2.1 Vliv počátečních podmínek na měření

Měření tření je extrémně citlivé na počáteční stav a čistotu povrchu. Tuto problematiku lze rozdělit do čtyř teoretických případů [10]:

- 1) **Zcela čisté kolo i kolejnice:** Stav dosažitelný pouze v laboratoři po důkladném vybroušení a odmaštění.
- 2) **Čistý měřicí přístroj, reálná kolejnice:** Požadovaný stav v praxi, který jako jediný objektivně reflektuje aktuální nedotčené adhezní podmínky na trati. Čisté (laboratorní) podmínky a počáteční fáze záběhu v terénu jsou považovány za "suché" (bez přítomnosti umělých nečistot) [11], nicméně vedou ke zcela odlišným tvarům skluzové křivky.
- 3) **Znečištěný přístroj, čistá kolejnice:** Teoretický, v praxi nerelevantní stav.
- 4) **Ojeté kolo i kolejnice (plný provoz):** Fáze, kdy na sebe vzájemně působí povrchy pozměněné dlouhodobým provozem.

Zásadní metodickou chybou v terénu bývá opakované nasazení čistého tribometru na stejný úsek trati s cílem dosáhnout "uspokojivějších" výsledků [10]. Samotný měřicí cyklus totiž produkuje produkty otěru, čímž měřicí zařízení pod sebou povrch kolejnice "brousí" a uměle jej mění (přechod z Případu 2 na Případ 4). Pro zjištění reálného stavu trati je tedy nutné brát v potaz hned první získané výsledky, ačkoliv mohou vykazovat nízké hodnoty. Rovněž aplikace laboratorních čisticích rozpouštědel (např. acetonu) v terénu je nežádoucí, neboť narušuje přirozenou vrstvu nečistot a zoxidovaného kovu tvořící ochranný povrch [11].

2.2.2 Problematika třetího tělesa a oxidů

Rozhraní mezi kolem a kolejnicí není tvořeno čistým kovem, ale vrstvou nazývanou „třetí těleso“ [2]. Ta zahrnuje vlhkost, otěrové částice, zbytky listí, uměle nanesené modifikátory, a především oxidy železa, které mohou nabývat různých forem a výrazně tak měnit adhezní poměry [11]. Zejména hromadění hematitu (Fe_2O_3) a magnetitu (Fe_3O_4) na měřicím kole výrazně zvyšuje výsledné hodnoty tření [2,10]. Fyzikální podstata tření na železnici nezávisí jen na hrubosti povrchu, ale přímo na smykové pevnosti této vrstvy – tedy na tom, jak snadno se vrstva nečistot a oxidů „přestřihne“ [2].

2.2.3 Nečistoty na kolejnicích

Velkým problémem provozu je podzimní znečištění. Spadané listí je projíždějícími vlaky rozdrveno a zažehleno do oceli, čímž vzniká tenká, černá a extrémně odolná vrstva. Ve spojení s vlhkostí klesají hodnoty tření k hodnotám pod 0,05, při kterých vlaky nejsou schopny brzdit ani se bezpečně rozjíždět. [4]

Výzkum tohoto jevu je komplikován složitostí sběru dat na reálné trati. Výzkumníci však vyvinuli metodu tvorby umělého listí – aplikací drčeného javorového listí přímo pod napodobeninu vlakového kola lze tuto extrémně kluzkou černou vrstvu na trati nasimulovat celoročně. Testy prokázaly, že i po vyčištění stopy zbytky listí v mikrostruktuře zůstávají a trakce se nevrací na 100 % hodnotu. [4]

2.2.4 Stick-slip efekt a z něj plynoucí rizika

Zcela suchá a čistá kolejnice paradoxně není pro železniční provoz ideální. Při takových podmínkách vykazuje klesající skluzovou křivku, která vyvolává jev zvaný „stick-slip“ – střídavé ulpívání a skluz [2, 11]. Styková plocha se přitom skládá právě z oblastí lpění a skluzu. Při 0 % skluzu tělesa podstupují volné odvalování [8, 9]. Se zvyšujícím se brzdným momentem oblast lpění ubývá, třecí síla lineárně roste, a jakmile oblast lpění zcela vymizí, těleso přechází do „nasyceného“ stavu čistého smýkání [8, 9].

Nežádoucí stick-slip efekt má pro infrastrukturu destrukční následky. Vysoká úroveň tření spojená s tímto jevem podporuje vznik únavových trhlin, nadměrné opotřebení, vlnovitost kolejnic a silný pisklavý hluk, typický pro průjezd vozidel v obloucích [2, 11]. V této souvislosti je důležité chování skluzové křivky v plastickém režimu. Klesající křivka (negativní tření) problémy prohlubuje, proto je cíleně snahou ošetřovat trať tak, aby vykazovala pozitivní tření (rostoucí sklon křivky) a střední úroveň adheze [11].

2.2.5 Úprava povrchu: mazání a pískování

Pískování a zvyšování trakce

K potlačení prokluzu a okamžitému zvýšení CoT disponuje většina vlakových souprav vlastními sypači písku. Nasazení samotného suchého písku pod prokluzující kola však naráží na problém: písek se může spojit s listím či mastnotou do izolační hmoty, která narušuje vodivost a tím pádem funkci zabezpečovacích kolejových obvodů [4]. Alternativou je nasazení adhezních prostředků:

Trakční gely (Sandite): Speciální gel nanášený na trať obsahující tvrdou drť. Zajišťuje potřebnou drsnost povrchu. Aplikuje se do stoupání nebo před stanice, nicméně provozem se rychle ojezdí [2].

Alleviate™: Zvyšovač trakce ve formě vodní suspenze pískových částic určený speciálně do náročných adhezních podmínek (období pádu listí) [2].

Úprava tření a mazání kolejniče

Jako prevence vůči opotřebení, hluku a vzniku únavových trhlin se používají maziva a modifikátory tření, které jsou na trať nanášeny zcela záměrně a tvoří mikro vrstvu (0,5–5 μm), již nelze pouhým okem detekovat [8].

Produkty pro úpravu temene kolejniče (TOR): Jejich cílem není vytvořit extrémně kluzký povrch, ale ustálit CoT na střední hodnotě (0,2 – 0,4) [8, 11]. Zajišťují pozitivní sklon skluzové křivky a zabráňují jevu stick-slip [8, 11]. Na trhu jsou například produkty jako KELTRACK® (vodou ředitelný) nebo INFINITRACK™ (olejový) [2]. Oba poskytují stabilní, často monotónně rostoucí vztah mezi třením a skluzem, byť prostředky na bázi oleje vykazují celkově nižší absolutní hodnoty tření.

Mazání okolků: Omezuje opotřebení styku na vodící hraně, často se realizuje stacionárními maznicemi v obloucích. V případě měření adheze je třeba dbát opatrnosti, aby toto mazivo nekontaminovalo temeno kolejniče a nezkreslilo výsledek [11].

Životnost modifikátorů závisí na tom, k čemu mají sloužit. V režimu nízkého skluzu, který je nezbytný pro eliminaci kvílení v obloucích, se film aplikované vrstvy rychle degraduje (jeho účinnost obvykle vydrží na vzdálenost cca 250 m od maznice). V režimu vyššího skluzu (nezbytného pro redukci bočních sil mezi kolejnici a okolkem) si naproti tomu tenze udrží integritu a účinnost na podstatně větší vzdálenosti v řádech kilometrů. [8]

2.3 Charakteristika a tvary kolejnic

Kolejnice lze rozdělit podle funkcí a tvarů do několika kategorií:

Širokopatní

Žlábkové

Blokové

Výhybkové

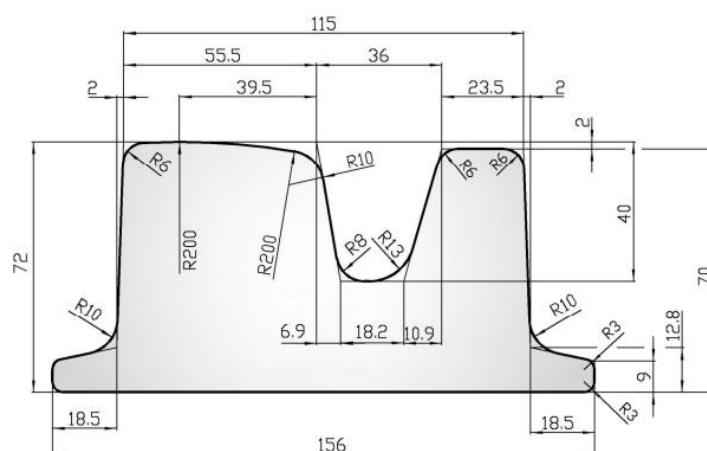
Jeřábové



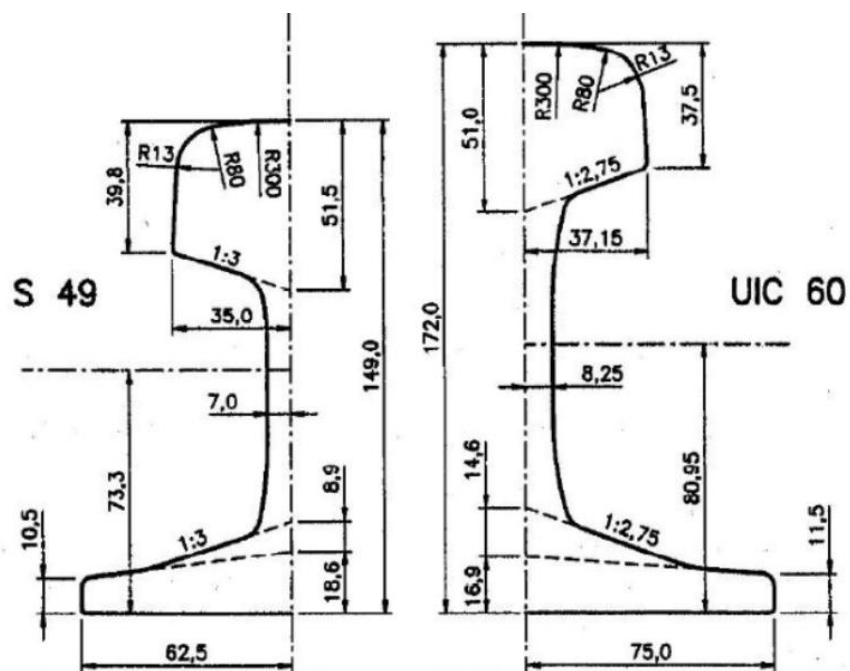
Obr. 2-2 Základní typy kolejnic [7]

V celosvětovém měřítku dnes jednoznačně dominují širokopatní kolejnice. Žlábkové a blokové kolejnice nacházejí uplatnění především v tramvajové dopravě, a to v úsecích, kde je trať zabudována přímo do vozovky. Pokud je však tramvajová trať vedena na samostatném tělese mimo pozemní komunikaci, využívají se i zde běžné širokopatní kolejnice. Ostatní tvary kolejnic se v současnosti používají jen zcela výjimečně.

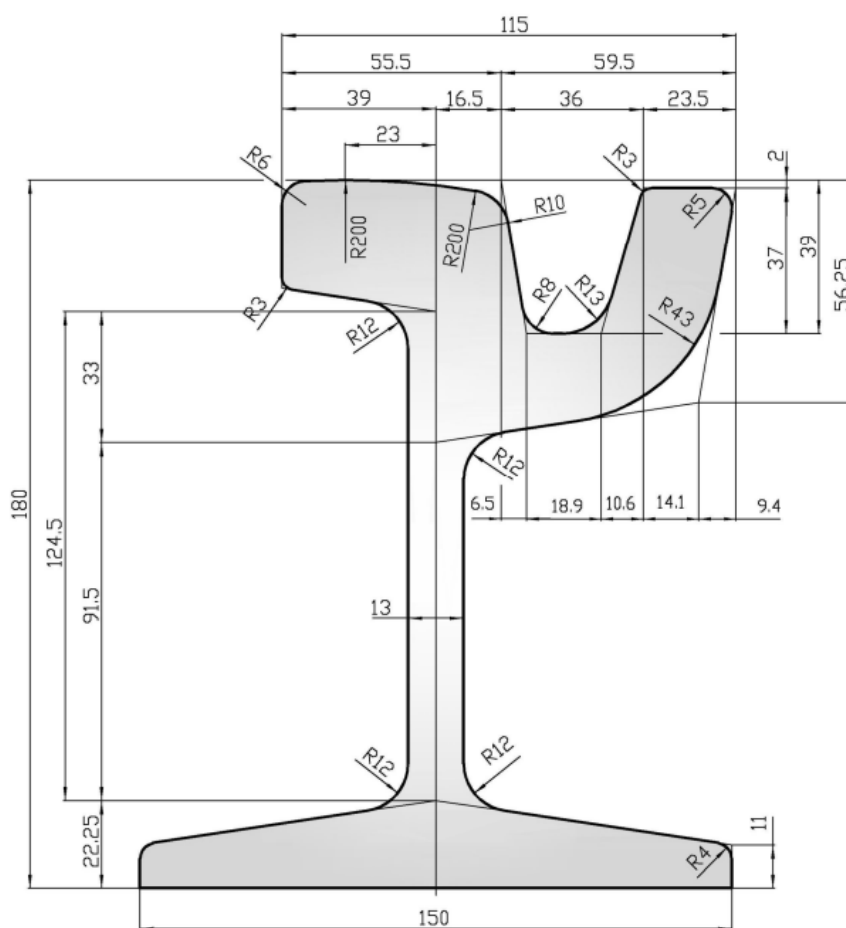
Co se týče situace v České republice, nová výroba se omezuje již jen na několik standardizovaných typů. V případě širokopatných kolejnic se u nás v současnosti vyrábějí profily S 49 a UIC 60, zatímco u žlábkových kolejnic jde o NT1 a NT3, u blokových žlábkových kolejnic jde o profily B1 a B3 [5].



Obr. 2-3 Standardizovaný profil B1



Obr. 2-4 Zakótovaný profil kolejnice a) S 49; b) UIC 60 [5]



Obr. 2-5 Standardizovaný profil NT1

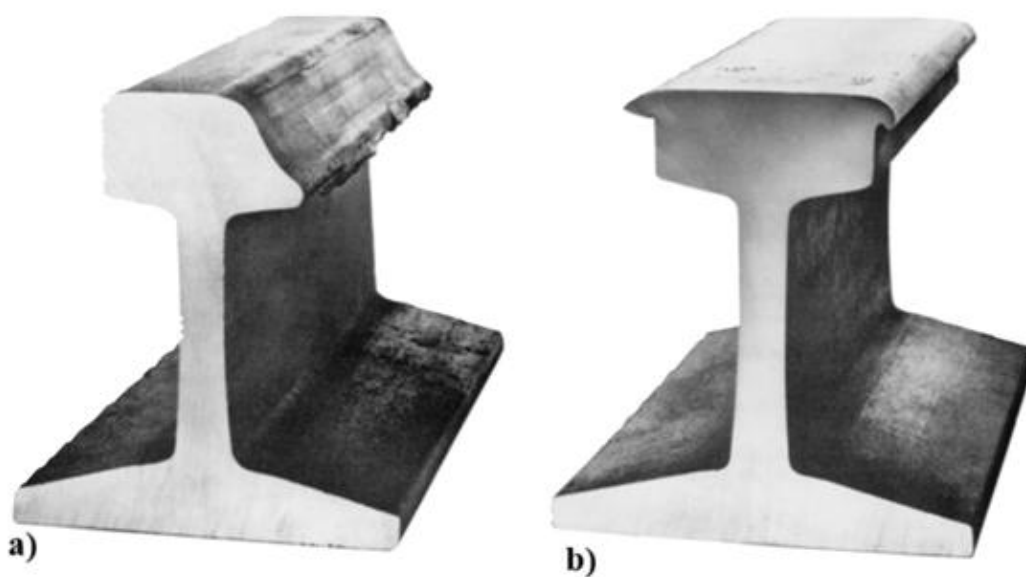
Během železničního provozu navíc dochází k výraznému opotřebení a tvarové deformaci profilu kolejnice. Jak je patrné z Obr. 2-13, reálné opotřebené profily již nevykazují původní normované poloměry zaoblení. Tato degradace tvaru zásadně komplikuje proces tribometrického měření, a to především ve dvou ohledech:

Nastavení kontaktního tlaku: Dosažení a udržení ideálního Hertzova kontaktního tlaku je na nepravidelném povrchu značně obtížné.

Geometrické ustavení měřidla: Ztráta původní geometrie ztěžuje přesné prostorové ustavení měřicího kola tak, aby jeho poloha byla striktně kolmá k tečně právě analyzované plochy.

K bočnímu opotřebení (ojetí) dochází primárně na vnějších kolejnicových pásech ve směrových obloucích vlivem příčného namáhání od projíždějících vozidel. Průběh bočního opotřebení podél oblouku má obecně sinusový charakter, přičemž lokálních minim dosahuje bezprostředně v místech kolejnicových styků [6].

Svislé opotřebení je primárně vyvoláno vertikálním zatěžováním od náprav vozidel. Velikost svislého opotřebení přímo úměrně narůstá s celkovým provozním zatížením posuzované trati [6].



Obr. 2-6 a) Boční opotřebení (ojetí) hlavy kolejnice; b) Svislé opotřebení [6]

2.4 Existující traťové tribometry

2.4.1 Salient Push Tribometr



Obr. 2-7 Ručně tlačенý Salient Push tribometr [29]

Ručně tlačené tribometry představují v železničním oboru zavedený průmyslový standard, se kterým je technický personál velmi dobře obeznámen. Původní koncepce ručního tribometru byla vyvinuta pro měření tření na temeni kolejnice. Tento systém využíval zátěžový mechanismus řízený gravitací, při němž bylo známé zatížení přenášeno přes kolo na kolejnici pomocí standardního závaží umístěného na rameni páky [8]. Měřicí kolo bylo spojeno s magnetickou spojkou, jejíž prokluz byl manuálně regulován pomocí proměnného odporu. Zvyšováním tohoto odporu rostl podélný valivý odpor působící na kolo. Okamžik, kdy došlo k prokluzu kola, definoval bod maximální adheze. Výsledná síla se přenášela na analogovou váhovou stupnici, která byla zkalibrována tak, aby přímo zobrazovala hodnoty tření na temeni kolejnice v okamžiku prokluzu [8].

Zásadní nevýhodou této původní koncepce byla nemožnost přístroj snadno přestavět pro měření na vodící hraně kolejnice. Vodící hrana se opotřebovává do široké škály tvarů a sklonů, což znemožňovalo specifikovat společný úhel naklopení kola. Použití gravitačního mechanismu by pro udržení konstantního zatížení v těchto podmínkách vyžadovalo složitý pákový systém s nekonečnými možnostmi nastavení. Následné konstrukční úpravy tento problém vyřešily nahrazením gravitačně zatěžované páky pružinovým otočným čepem, který zajišťuje lineární sílu. Operátor tak může provádět jemné doladění vertikálního nebo bočního zatížení pomocí nastavovacího šroubu, což umožnilo měření součinitele tření nejen na temeni, ale i na vodící hraně kolejnice. [8]

Tribometr Salient pracuje na principu podélného skluzu. Zařízení aplikuje na měřicí kolo, které na kolejnici působí známou přitlačnou silou, postupně narůstající brzdny účinek prostřednictvím elektromagnetické brzdy. Brzdná síla je průběžně snímána siloměrem. Valivý pohyb kola je monitorován otáčkoměrem (enkodérem). Řídící smyčka plynule zvyšuje brzdny účinek, dokud enkodér nezaznamená, že se kolo zcela zastavilo. Pro určení výsledného součinitele tření se zprůměruje několik posledních měření síly a zobrazí se jako jeden výsledek, načež může začít nový měřicí cyklus. Z podstaty této definice naměřené výsledky představují 100% skluz, tedy stav čistého smýkání. V praxi se naměřené hodnoty součinitele tření u těchto typů zařízení pohybují typicky od 0,2 (u silně mazaných kolejnic) až po 0,8 (u velmi suchých kolejnic). [8]

Metodika měření v terénu

Pro zajištění relevantních výsledků je nutné dodržet správný postup použití tribometru v terénu [8]:

- Položení stroje na testovanou kolejnici.
- Vysunutí opěrného ramene pro zajištění stability.
- Nastavení měřicí hlavy tak, aby se měřicí kolo dostalo do kontaktu s kolejnicí v požadované příčné poloze.
- Přesná orientace hlavy tak, aby bylo kolo kolmo k bodu kontaktu

Nevýhody

Testy odhalily, že přístroj často nadhodnocuje součinitel tření. Tribometr typicky nezachytí menší hodnoty v podmínkách očekávaného nízkého skluzu, ale zaznamenává vyšší hodnoty za podmínek skluzu vysokého [8,9]. Během testování nemá operátor přesnou informaci o úrovni skluzu v konkrétním okamžiku měření. Přístroj poskytuje průměrné hodnoty z delších úseků trati (např. po 30 metrech). Takto hrubá data neumožňují přesné určení skluzové křivky v jednom konkrétním lokálním bodě [8,9]. Modely neumožňují provádět měření na temeni kolejnice a na vodící hraně současně [8]. Tribometry pracují s relativně nízkým Hertzovým kontaktním tlakem (cca 400 MPa). Z fyzikálního hlediska to odpovídá provoznímu zatížení od lehkých nákladních vozů nebo osobních vagónů, avšak nedokáže to plně simulovat podmínky těžké nákladní dopravy [8,9].

2.4.2 OnTrak HO tribometr



Obr. 2-8 OnTrak Ho (ručně ovládaný) tribometr [30]

OnTrak HO (ručně ovládaný) je moderní, ručně ovládaný tribometr navržený pro měření podmínek tření a mikro skluzu přímo v terénu. Na rozdíl od starších přístrojů, které poskytovaly pouze jedinou hodnotu statického tření, OnTrak HO umožňuje popsat celou skluzovou křivku (vztah mezi CoT a mikro skluzem). Díky tomu lze simulovat různé režimy jízdy vozidla, identifikovat nebezpečnou klesající skluzovou křivku (riziko smyku) a zkoumat vliv modifikátorů tření či oxidů železa na výslednou adhezi. [2]

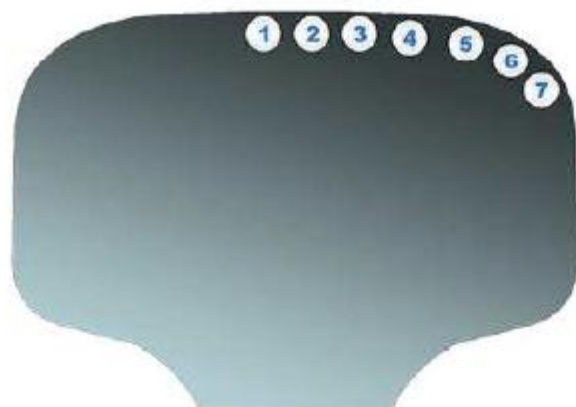
Princip vyvolání skluzu a měření

K simulaci valivě-kluzných podmínek je příčný skluz generován nastavením úhlu náběhu měřicího kola vůči kolejnici. Úhel je nastavitelný v širokém rozmezí 1–150 mrad, což odpovídá příčnému skluzu od 0,1 % do 15 %. Měření probíhá na úseku 30 cm v obou směrech. Výsledný součinitel tření je určen jako průměr z 97. percentilu výsledků z obou směrů, vyjádřený jako poměr příčného zatížení a normálové síly. Ačkoliv byl přístroj vyvíjen pro plynulou změnu úhlu během jednoho průjezdu, jako spolehlivější se v současnosti ukazuje krokové měření (postupné sekvence od 0,1 % do 15 %). [2]

Mapování profilu a polohy na kolejnici

Zařízení umožňuje operátorovi definovat přesné pozice měřicího kola pro kompletní zmapování profilu hlavy kolejnice [2]:

- 5) Pozice 1–4: Odpovídají pojížděnému pásmu na temeni kolejnice.
- 6) Pozice 5–7: Horní, střední a spodní část vodící hrany.



Obr. 2-9 Pozice měřicího kola OnTrak Ho tribometr [2]

Zařízení lze otočit o 180 stupňů a indexovat jej vůči vnější straně kolejnice. Operátor během měření volí pozici tak, aby co nejlépe odpovídala skutečnému viditelnému pojížděnému pásmu v daném místě.

Simulace reálného zatížení (Hertzovy kontaktní tlaky)

Jednou z hlavních předností je schopnost pracovat s vysokými Hertzovými kontaktními tlaky, které se blíží reálnému zatížení od náprav vlaků (např. 700 MPa), což eliminuje zkreslení výsledků běžné u starších přístrojů. Zařízení umožňuje měnit normálovou sílu (v poměru 6:1) a příčné zakřivení věnce měřicího kola (v poměru 4:1), což dává celkový pětinasobný rozsah Hertzových kontaktních tlaků. Změnou příčného poloměru měřicího věnce lze v terénu dosáhnout okamžité trojnásobné změny Hertzova kontaktního tlaku. [2]

Praktické výhody a konektivita

I přes pokročilé funkce zůstává zařízení vysoce mobilní, lehké a ovladatelné jednou osobou. Data jsou v reálném čase přenášena do externího terminálu k okamžité analýze. Přístroj je klíčovým nástrojem v moderních studiích zaměřených na interakci materiálu „třetího tělesa“ a modifikátorů tření s povrchem kolejnice. [2]

2.4.3 Rivelin Rail PRT300 přenosný tribometr



Obr. 2-10 Rivelin Rail PRT300 přenosný tribometr [4]

Přístroj Rivelin Rail PRT300 je špičkový přenosný tribometr, navržený speciálně pro potřeby železničního průmyslu. Jeho hlavním úkolem je přesně měřit součinitel tření přímo na temeni kolejnice, což je klíčové pro zvládání problémů s nízkou adhezí způsobenou listím nebo mastnotou. [4]

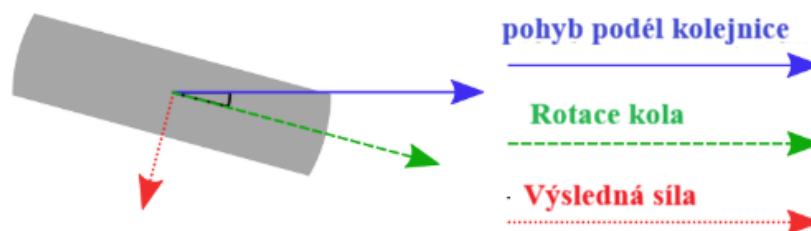
Hlavní výhody a konstrukce:

Zařízení je velice mobilní. Jeden člověk je schopen přístroj snadno odnést na trať a provést měření. To je nesrovnatelně levnější řešení než vypravování speciálního měřicího vlaku. Přístroj se ke kolejnici pevně přichytí pomocí silných magnetů. To zajišťuje stabilitu a konzistentní měření, aniž by se přístroj při měření, jakkoliv nechtěně pohyboval. Tribometr má vysokou citlivost. Starší přístroje měly problém naměřit hodnoty součinitele tření pod 0,05 (všechny extrémně kluzké povrchy pro ně vypadaly stejně). PRT300 je navržen tak, aby spolehlivě a přesně změřil i ty absolutně nekluzčí povrchy. [4]

Simulace reálných podmínek

Jako protikus ke kolejnici se používá malé, výměnné, volně rotující ocelové kolo. Standardně je vyrobeno z oceli typu ER8, což odpovídá materiálu reálných vlakových kol. Zařízení dokáže vyvinout přitlačnou sílu až 200 N. To v malém měřítku vytváří maximální Hertzův kontaktní tlak 1 GPa, který realisticky simuluje obrovské tlaky v bodě kontaktu mezi plochou skutečného kola vlaku a temenem kolejnice. [4]

Přístroj neměří jen obyčejné „valení“. Osa rotace kolečka je natočena pod mírným úhlem ke směru pohybu. Tím v kontaktu vzniká boční skluz, který mnohem přesněji simuluje chování vlaku při brzdění nebo rozjezdu. [4]



Obr. 2-11 Mechanismus Rivelin Rail PRT300 [3]

Průběh měření a zpracování dat

Měřicí kolečko se odvaluje po 300 mm dlouhém úseku kolejnice konstantní rychlostí 200 mm/s. Výsledná síla působící na kolečko je měřena se vzorkovací frekvencí 100 Hz [3]. To znamená, že i na takto krátkém úseku lze získat stovky datových bodů, které odhalí i velmi malé „skvrny“ listí, jež by lidské oko mohlo snadno přehlédnout [4]. Digitální displej přístroje okamžitě ukáže průměrný součinitel tření. Všechna detailní data se zároveň ukládají do paměti pro pozdější hlubší analýzu v počítači [3].

2.4.4 Polo automatický ručně tlačенý tribometr TriboRoll

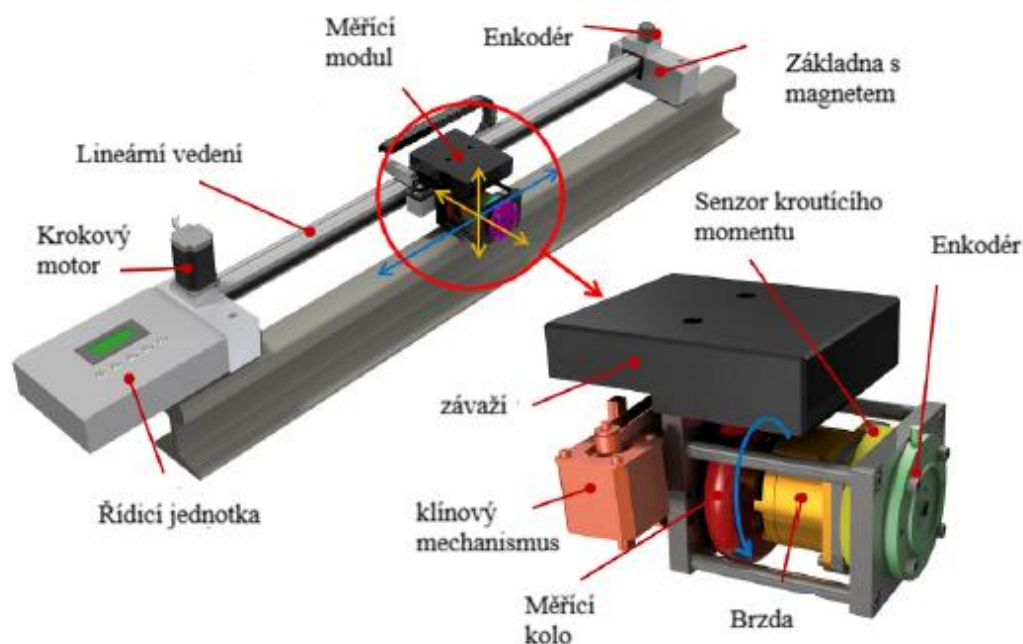


Obr. 2-12 Ručně tlačенý tribometr TriboRoll [31]

TriboRoll měří součinitel tření v kontaktní ploše mezi kolejnicí a kolem. Tento ručně ovládaný přístroj umožňuje snadnou manipulaci v provozních podmínkách a poskytuje rychlou diagnostiku sledovaných parametrů. Zařízení je navrženo tak, aby bylo schopno měřit třecí poměry jak na temeni kolejnice, tak na její vodící hraně. Konstrukční řešení dovoluje nastavení měřicího mechanismu ve 14 definovaných úhlech, čímž je zajištěna vysoká variabilita měření. [1]

Výpočet samotného součinitele tření probíhá prostřednictvím softwaru, který zpracovává naměřené síly. Získaná data jsou následně ukládána a systém umožňuje jejich automatizovaný export do formátu PDF ve formě měřicích protokolů. Hlavním účelem využití přístroje TriboRoll je praktická optimalizace mazání kolejnic.[1]

2.4.5 BUT Rail tribometr



Obr. 2-13 BUT Rail tribometr a měřicí modul [11]

Tribometr vyvinutý na Vysokém učení technickém v Brně (BUT Rail Tribometr) je přenosné bateriově napájené zařízení určené k detailní analýze třecích podmínek. Jeho základem je horizontální lineární jednotka s pohonem na ozubený řemen, po které se pohybuje vozík s měřicím modulem. Pro zajištění stability během zkoušky je celá konstrukce fixována k testované kolejnici pomocí základen osazených silnými magnety. Přesná lokalizace měřicího modulu během pohybu je zajištěna prostřednictvím rotačního enkodéru instalovaného přímo na pohonu jednotky. [11]

Samotný měřicí modul je k vozíku uchycen přes lineární vedení. Toto konstrukční řešení poskytuje modulu volnost ve vertikálním směru, což umožňuje přesnou aplikaci normálové kontaktní síly pomocí sady přidavných závaží. Hmotnost samotného modulu v kombinaci s těmito závažími je navržena tak, aby v místě styku generovala teoretický Hertzův kontaktní tlak o hodnotách 0,8, 0,9 nebo 1,0 GPa. [11]

Měřicí kolo je vyrobeno z kvalitní ložiskové oceli. Disponuje průměrem 100 mm a příčným poloměrem 10 mm, což jsou geometrické parametry zvolené tak, aby simulovaly šířku kontaktní plochy v příčném směru v měřítku 1:10. Kolo lze na temeni kolejnice příčně polohovat (a měřit tak v různých kontaktních stopách) plně automaticky díky integrovanému klínovému mechanismu poháněnému krokovým motorem. Sběr dat na samotném kole zajišťuje snímač točivého momentu spojený s brzdou a enkodér zaznamenávající otáčky hřídele. [11]

Měření probíhá za typických valivě-kluzných podmínek. Krokový motor lineární jednotky uvede měřicí modul do pohybu, přičemž po dosažení konstantní pojezdové rychlosti 260 mm/s začne brzda aplikovat požadovaný brzdňý moment. Vlivem trakční síly v kontaktu se kolo odvaluje. Jakmile však brzda vyvine dostatečně vysoký moment, míra skluzu začne strmě narůstat, což nakonec vede k úplnému zablokování kola a přechodu do stavu čistého smýkání. [11]

Cílem tohoto procesu je získat data pro sestrojení typické skluzové křivky (závislosti CoT na skluzu). CoT je softwarem odvozen z hodnot naměřených snímačem točivého momentu. Hodnota samotného skluzu se kontinuálně vypočítává na základě rozdílu mezi podélnou rychlostí pohybujícího se modulu a tangenciální rychlostí měřicího kola. Na konci každého měřicího průjezdu jsou data automaticky zpracována do grafických výstupů, které zobrazují vývoj skluzu a brzdňého momentu v závislosti na poloze a z nich plynoucí výslednou skluzovou křivku. [11]

Provozní režimy tribometru

Variabilitu testování zajišťuje možnost volby ze tří specifických měřicích režimů. Průběh každého režimu je definován třemi vstupními parametry: počátečním brzdňým momentem, konečným brzdňým momentem a počtem kroků [11].

- 1) **Konstantní režim:** Měřicí modul projíždí vymezený úsek kolejnice s trvale konstantním brzdňým momentem. Tento přístup je velmi užitečný při analýze úseků hlavy kolejnice, které vykazují výrazně odlišný CoT a jsou příliš krátké na to, aby mohly být zkoumány samostatně
- 2) **Kroková rampa:** Brzdňý moment se během průjezdu postupně, v rovnoměrně rozložených krocích, zvyšuje nebo snižuje podle nastavených hraničních hodnot. Hlavní výhodou tohoto režimu je schopnost přístroje vygenerovat kompletní skluzovou skřivku během jediného průjezdu po kolejnici.
- 3) **Pulzní režim:** Během měření dochází ke střídání dvou nastavených hodnot brzdňého momentu, přičemž zadaný „počet kroků“ v tomto případě definuje počet těchto skokových změn. Režim se využívá při simulacích, které vyžadují opakované přechody mezi fázemi odvalování a smýkání.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Jak vyplynulo z provedené analýzy současného stavu poznání, přesná diagnostika adhezních poměrů v kontaktu kola a kolejnice je nezbytná pro potlačení negativních jevů v provozu jako je stick-slip efekt či vliv třetího tělesa [11]. Literární rešerše ukázala, že ačkoliv existuje řada přenosných traťových tribometrů, většina z nich naráží na zásadní limity. Přístroje buď nedokážou vyvinout dostatečně vysoký Hertzův kontaktní tlak pro věrnou simulaci reálného zatížení vlakem, nebo jsou konstrukčně omezeny pouze na měření na temeni kolejnice [8, 11].

V reálném provozu však dochází k intenzivnímu kontaktu a opotřebení i na vodící hraně kolejnice. Navíc se reálný tvar opotřebované kolejnice často výrazně odchyluje od normovaného profilu, s čímž si jednodušší gravitační nebo pevně fixované tribometry nedokážou poradit [8].

Z těchto teoretických poznatků přímo vyplývají nároky na nově navrhované řešení. Aby měřicí modul poskytoval relevantní data překonávající stávající limity, musí splňovat tři základní body vycházející z rešerše:

Realistickou simulaci kontaktu vyvozením dostatečných Hertzových kontaktních tlaků (až 1 GPa) a aplikace striktně podélného valivého skluzu [11].

Schopnost přesného měření nejen na temeni, ale i na vodící hraně, a to i v případě asymetricky opotřebovaných profilů [8, 11].

Modul musí být schopný pracovat jak s širokopatními, tak se žlábkovými kolejnicemi.

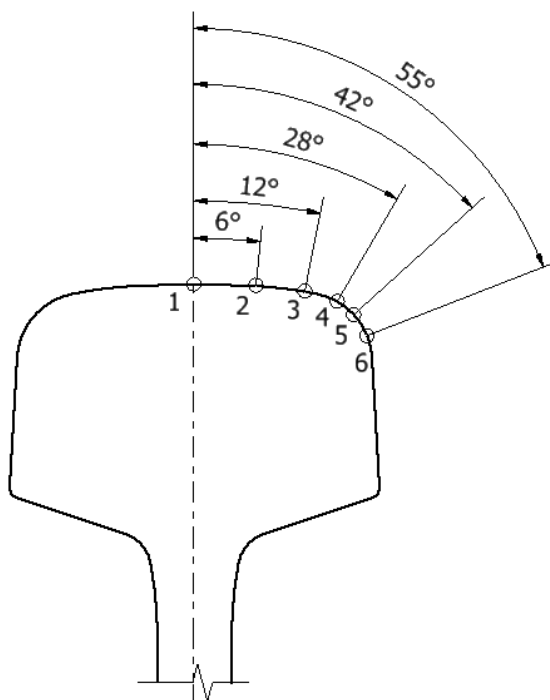
Tyto obecné závěry z literatury jsou v následující podkapitole transformovány do konkrétních technických a konstrukčních požadavků na samotný mechanismus.

3.1 Analýza problému

Pro úspěšný návrh polohovatelného modulu tribometru je nutné analyzovat a zohlednit několik klíčových konstrukčních a funkčních požadavků. Jelikož se celý modul konstruuje tak, aby byl kompatibilní s lineárním vedením stávajícího BUT Rail tribometru, předpokládá se i zachování kompatibility s jeho řídicí jednotkou a softwarem [11]. Z tohoto důvodu je měřicí modul navrhován pro princip podélného valivého skluzu [11].

Aby bylo zamezeno zkreslení výsledků měření je nezbytné zaručit rovnoběžný pohyb modulu s osou kolejnice. Konstrukce musí absolutně zamezit příčnému skluzu a případnému zpříčení mechanismu. Z tohoto důvodu je vyžadováno tuhé a spolehlivé upnutí příčného posuvu.

Komplexní charakterizace třecích poměrů vyžaduje měření jak na temeni, tak i na vodící hraně kolejnice. Z tohoto důvodu je nutné definovat minimálně 6 měřicích bodů, rozložených od středu temene až po spodní polovinu zakřivené vodící hrany (Obr. 3-1) [2]. Ačkoliv jsou tyto polohy primárně definovány pro neopotřeбенý (tovární) profil kolejnice vhodný pro laboratorní účely, reálné traťové profily bývají často značně deformované (Obr. 2-6). Modul proto musí být navržen univerzálně, s možností plynulého nastavení a přizpůsobení i pro měření na těchto opotřebovaných profilech.



Obr. 3-1 Měřená místa na širokopatní kolejnici

Na základě poznatků z odborné literatury byl průměr měřicího kola stanoven na 100 mm, což přibližně odpovídá měřítku 1:10 vůči reálnému vlakovému kolu (v závislosti na konkrétním typu) [11]. Pro dosažení Hertzových kontaktních tlaků v rozmezí 0,7–1 GPa na různých poloměrech kolejnic bude na kolo aplikována normálová přitlačná síla v rozsahu 40–120 N [11].

Vzhledem k nutnosti naklápění modulu při měření na vodící hraně kolejnice nelze k vyvození přitlačné síly využít pouze gravitaci (tíhovou sílu modulu). Konstrukce musí obsahovat přitlačný mechanismus, který zajistí kolmé působení síly na povrch kolejnice v jakékoliv poloze. S tímto požadavkem přímo souvisí nutnost minimalizovat vlastní hmotnost měřicího modulu. Čím nižší bude podíl tíhové síly, tím přesněji bude výsledná síla definována samotným přitlačným mechanismem.

Zásadním požadavkem na celý systém je vysoká celková tuhost. Ta je nutná pro eliminaci vibrací, zamezení vzájemnému pohybu součástí vlivem vůlí a předcházení viklání celého polohovatelného modulu. Poloha měřicího ústrojí musí být v každém okamžiku pevně a jednoznačně definovaná.

Z hlediska provozní ergonomie musí konstrukce modulu umožňovat snadný přístup k měřicímu kolu. To je nezbytné pro jeho pravidelné čištění od částic třetího tělesa, aby bylo možné dodržet počáteční podmínky měření (případ 2: čistý měřicí přístroj a reálná kolejnice) [10].

3.2 Cíl práce

Hlavním cílem této práce je návrh a konstrukce polohovatelného modulu tribometru. Tento modul musí být schopen měřit tření v šesti různých pozicích (Obr. 3-1), a to jak na širokopatní, tak i na blokové žlábkové kolejnici.

Klíčovým požadavkem na navrhované řešení je zajištění kompatibility s horizontální lineární jednotkou zařízení BUT Rail tribometr, konkrétně možnost snadného upnutí modulu na vozík pohybující se po tomto vedení. Důraz je kladen rovněž na ergonomii zařízení; mechanismus nastavování jednotlivých poloh musí být pro uživatele intuitivní, rychlý a jednoduchý.

V neposlední řadě je nutné při návrhu dbát na optimalizaci hmotnosti a minimalizaci rozměrů samotného modulu. Nízká hmotnost je nezbytná pro snadnou manipulaci a obsluhu zařízení jedním operátorem. Kompaktní rozměry jsou pak klíčové nejen pro transport, ale zejména pro zachování optimální vzdálenosti lineárního vedení od osy kolejnice. Příliš rozměrný modul by vyžadoval umístění lineární jednotky ve větší vzdálenosti od kolejnice, což je z hlediska konstrukčního uspořádání a přesnosti měření nežádoucí.

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

Konstrukci výměnného polohovatelného modulu lze z hlediska funkce a kinematiky rozdělit na čtyři hlavní, na sebe navazující konstrukční uzly. Tyto uzly byly řešeny postupně a v této kapitole jsou detailně rozebrány:

- **Měřicí modul:** Srdce celého zařízení zajišťující uchycení měřicího kola, senzoriky a vyvození přesného brzdného momentu.
- **Zatěžovací modul a výškový posuv:** Mechanismus vyvozující požadovanou normálovou sílu (Hertzův kontaktní tlak) a zajišťující svislou manipulaci s měřicím modulem.
- **Naklápěcí modul:** Uzel umožňující přesné natočení měřicího kola pro realizaci měření na vodící hraně kolejnice.
- **Příčný posuv:** Vedení pro plynulé a tuhé polohování celého mechanismu napříč profilem kolejnice.

Jelikož se jedná o poměrně složitou sestavu, probíhal samotný návrh postupně. Výchozím bodem byl měřicí modul, od kterého se následně odvíjela konstrukce všech ostatních dílů. Při navrhování se postupovalo tak, že pro každou navazující část bylo vždy vytvořeno několik variant řešení. Tyto návrhy se navzájem porovnaly, vyhodnotily a pro další rozpracování se vybrala ta nejlepší varianta. Na tu se pak přímo navázalo při konstruování další části sestavy.

4.1 Měřicí modul

Měřicí modul je hlavní částí zařízení a obsahuje všechny měřicí senzory tribometru. Tyto komponenty jsou zakomponovány mezi dvěma bočnicemi, okolo hřídele a na ní usazeném měřicím kole. Zásadním krokem při návrhu této části bylo určení způsobu spojení kola s hřídelí, od kterého se odvíjel výběr dalších komponent.

4.1.1 Koncepce uložení hřídele a měřicího kola

Pro uložení hřídele, měřicího kola a rotujících částí byly zvažovány dva základní přístupy:

Pevná osa

Tato konstrukce spočívá v tom, že osa je pevně upnuta v bočnicích a měřicí kolo je umístěno na jednom soudečkovém ložisku, takže se volně otáčí přímo na ose. Brzdný moment je přenášen pomocí přírubové elektromagnetické brzdy, jejíž kotva je upevněna přímo na měřicím kole. Výhodou je razantní snížení počtu součástí v měřicím modulu. Nevýhodou však je složité přesné zajištění axiální polohy měřicího kola na ose. Nutnost využití specifické jednokotoučové brzdy s kotvou a pravděpodobně indukčního otáčkoměru upnutého přímo na kole.

Rotační (hybná) hřídel

V tomto případě je v každé bočnici uloženo ložisko. V těchto ložiskách je uložena hřídel, se kterou je pevně spojeno měřicí kolo. Velkou výhodou je volnost při výběru komponent (brzda může být jak jednokotoučová s kotvou, tak s přírubou připevněnou na hřídeli), jednoduché upnutí měřicího kola a možnost použití přesných enkodérů i indukčních snímačů.

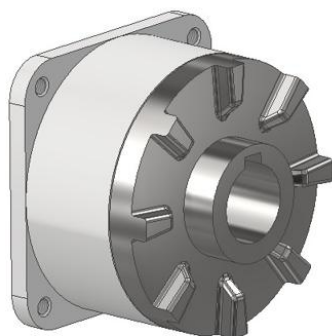
Pro další rozpracování byla zvolena varianta rotační hřídel. Ačkoliv obsahuje více součástí, její variabilita z hlediska volby dalších komponent a konstrukčně snazší upínání měřicího kola i senzoriky jednoznačně převyšují nevýhody.

4.1.2 Elektromagnetická brzda

Při výběru brzdy se rozhodovalo mezi jednodeskovou elektromagnetickou brzdou suchého typu (série TB, využívaná na předchozím modulu BUT Rail tribometru) a jednokotoučovou brzdou s kotvou (EFAL).

Brzda typu TB (modely TB-260/FMS a TB-400/FMS)

Tyto modely nabízejí maximální brzdný moment 3 Nm, respektive 10 Nm. Brzdu lze jednoduše zakomponovat do sestavy a její spojení s hřídelí je realizováno klasicky pomocí pera. Zásadní nevýhodou je však její délka (51 mm), která by nepříjemně prodloužila celý měřicí modul. [12]



Obr. 4-1 Model brzdy TB-260/FMS

Brzda typu EFAL (model EFAL 063)

Tato varianta nabízí maximální brzdňý moment 7 Nm, což plně vyhovuje požadovanému rozsahu měření. Její hlavní předností je velmi kompaktní konstrukce s délkou pouhých 22 mm, což výrazně přispívá k minimalizaci celkových rozměrů měřicího modulu. Nutností je zde ale dodržení přesné montážní vůle 0,2 mm mezi kotvou a magnetickou miskou. [13]

Z důvodu vysokého požadavku na kompaktnost celého zařízení a příznivějšímu rozsahu brzdňého momentu byla vybrána brzda EFAL 063.



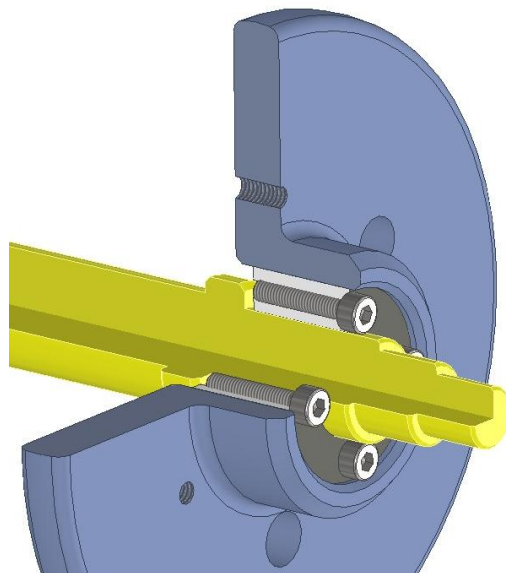
Obr. 4-2 Jednokotoučová brzda s laminovou kotvou EFAL [13]

4.1.3 Způsob upnutí měřicího kola na hřídel

Pro bezpečný přenos sil a momentů mezi kolem a hřídelí byly zvažovány dvě metody

Upnutí pomocí svěrného pouzdra

Toto upnutí vyžaduje axiální přístup z čelní strany měřicího modulu (podél hřídele) pro dotažení šroubů. Velkou výhodou je jistota velmi pevného a přesného upnutí, nevýhodou je nutnost fixovat kolo v přesně definovaném kroku v průběhu skládání sestavy z důvodu pozdější nepřístupnosti upínacích šroubů pouzdra.

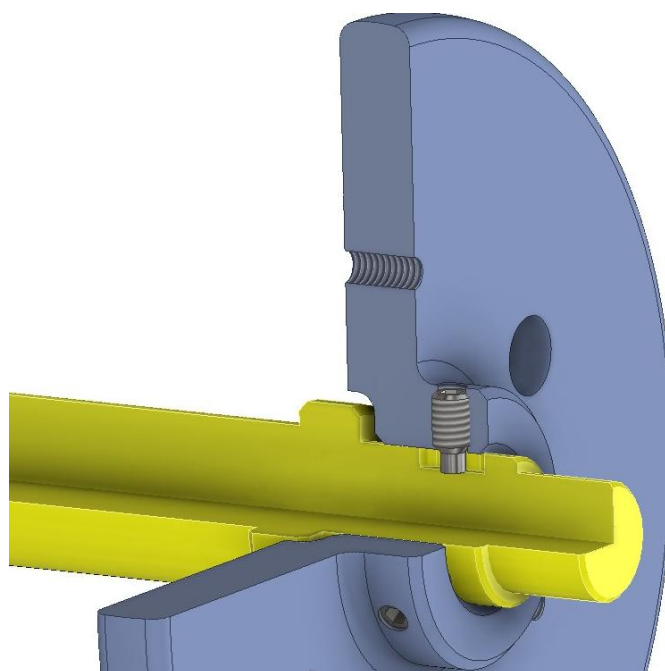


Obr. 4-3 Upnutí pomocí svěrného pouzdra

Upnutí pomocí stavěcích šroubů s čípkem

Použití tohoto upnutí zahrnuje potřebu výroby tří drážek do hřídele. Tři stavěcí šrouby vytvářejí dostatečný tlak na dno drážek, čímž je zajištěno axiální pojištění. Krouticí moment je přenášen vyvozeným tlakem šroubů a částečně i tvarovým stykem (v případě vymezení vůlí) mezi čípkem a drážkou. Zásadní montážní výhodou je, že se měřicí kolo nejprve nasadí volně a jeho přesné ustavení – zajišťující požadovanou vůli 0,2 mm mezi kotvou a miskou brzdy – se provádí až jako finální operace.

Na základě montážních požadavků bylo pro další návrh vybráno upnutí pomocí stavěcích šroubů s čípkem. Zvolené řešení jako jediné spolehlivě umožňuje přesné finální dostavení polohy kola (a tím i elektromagnetické brzdy).



Obr. 4-4 Upnutí pomocí stavěcích šroubů s čípkem

4.1.4 Senzor otáček

Na trhu existuje široký výběr senzorů pro snímání otáček (indukční, Hallovy sondy, enkodéry). Vzhledem ke zvolené koncepci rotační hřídele a požadavkům na vysokou přesnost bylo rozhodnuto pro použití enkodéru.

Hlavním požadavkem bylo inkrementální snímání. To zajistí, že v případě krátkého prokluzu, po kterém se kolo začne opět odvalovat, bude měření plynule pokračovat a neresetuje se. Pro dostatečnou přesnost bylo požadováno rozlišení minimálně 1000 pulsů na otáčku.

Těmto parametrům ideálně vyhovuje přírubový enkodér MIG NOVA+, který je dostupný s rozlišením 1 až 2048 pulsů na otáčku. Díky minimální šířce zástavby (7 mm) nenarušuje požadavek na celkovou kompaktnost modulu. [16]



Obr. 4-5 Přírubový enkodér MIG NOVA+ [16]

4.1.5 Senzor krouticího momentu

Senzor krouticího momentu tvoří klíčový prvek měřicího řetězce. Je ukotven z jedné strany k pevné bočnici a z druhé strany spojen přes mezikus s elektromagnetickou brzdou EFAL. Rozhodujícími parametry při výběru byly měřicí rozsah a stavební rozměry určující schopnost zakomponování do sestavy.

Statický senzor T903B

Tento senzor disponuje velmi variabilním rozsahem měřitelných krouticích momentů (2, 5, 6 nebo 10 Nm) a velmi malým vnějším průměrem (42 mm). Nevýhodou je však jeho výška (25 mm). Zásadní problém u tohoto senzoru činil malý průměr roztečné kružnice upínacích děr. Díry přímo zasahovaly do dutiny v bočnici určené pro ložisko, což by si vyžádalo značné a nevýhodné komplikace při konstrukci samotné bočnice. [15]



Obr. 4-6 Statický senzor krouticího momentu T903B [15]

Statický senzor FTBH

Tento model vyniká velmi malou výškou (12 mm), což je z hlediska kompaktnosti tribometru ideální. Větší vnější průměr (80 mm) v tomto případě nepředstavuje překážku, jelikož dostatečný průměr měřicího kola zabraňuje jakékoliv kolizi senzoru s kolejnicí. Senzor měří moment až do 5 Nm, což představuje pro daný modul nejvhodnější rozlišení. [14]

Z důvodu snazší implementace do sestavy (bez nutnosti složitých úprav bočnice pro uložení ložisek) a vhodnějších zástavbových rozměrů byl zvolen senzor FTBH (konkrétně FTBH-5NM). Jeho upínací prvky ideálně pasují do celkové kompozice měřicího modulu.



Obr. 4-7 Senzor krouticího momentu FTBH-5NM [14]

4.2 Zatěžovací modul a výškový posuv

Pro správnou funkci tribometru je nutné nastavovat výškovou polohu měřicího kola (pohyb celého měřicího modulu) a zároveň na toto kolo působit definovanou přitlačnou silou směrem ke kolejnici. Z důvodu zjednodušení obsluhy bylo rozhodnuto tyto dvě činnosti sloučit do jednoho mechanismu. Vzhledem k potřebné volnosti při nastavování polohovatelného modulu, přiklonilo se k ručnímu ovládání.

Základem je šroubový mechanismus s lichoběžníkovým závitem. Otáčením čepu se nejprve výškově nastavuje poloha modulu, dokud se měřicí kolo nedotkne kolejnice. Následným dalším šroubováním dochází ke stlačování vložené pružiny, čímž se vyvodí požadovaný přítlak.

Při návrhu pružného elementu se zvažovalo více typů pružin. Talířové pružiny mají sice výborné kompaktní rozměry, jsou však obvykle dimenzovány na mnohem vyšší síly, než je náš požadovaný pracovní rozsah 40–120 N. Při ručním ovládání zdvihu by navíc bylo velice obtížné dosáhnout přesného nastavení síly. Pryžové pružiny by svými rozměry i tuhostí vyhovovaly, nepodařilo se však nalézt model s vnitřním otvorem, který je nezbytný pro zasouvání vodící části čepu při výškovém posunu. Z těchto důvodů byla pro mechanismus zvolena klasická tlačná válcová pružina, která nabízí ideální charakteristiky.

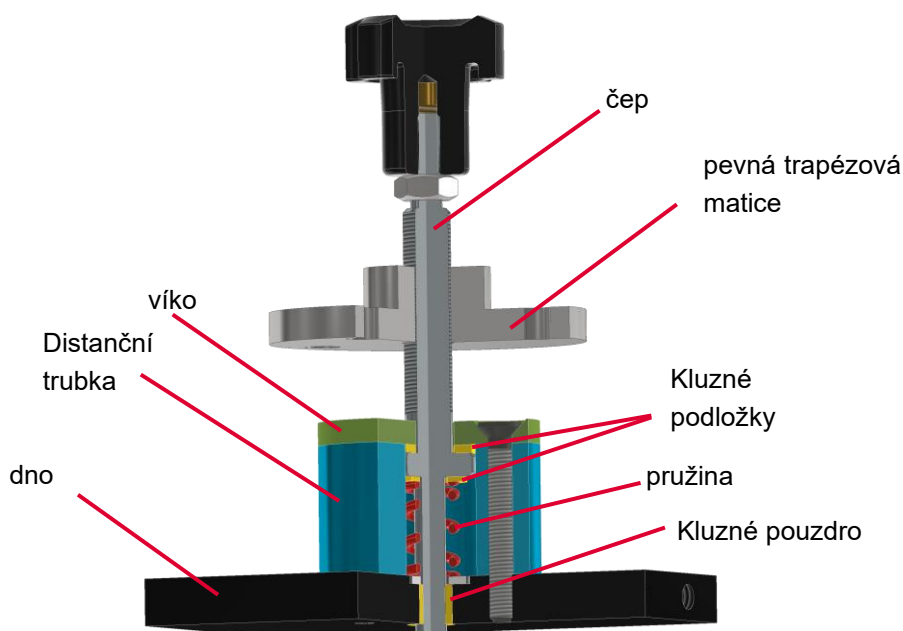
Celý mechanismus je umístěn nad středem měřicího modulu. Zásadním konstrukčním uzlem bylo navrhnout uložení tak, aby umožňovalo přesné zjištění působící přitlačné síly (buď přímým měřením, nebo odečtem ze stupnice). Vznikly dvě koncepční varianty:

4.2.1 Koncepce mechanismu výškového posuvu a zatížení

Pevná trapézová matice a posuvný čep

V tomto uspořádání je trapézová matice pevně spojena s naklápěcím modulem a otáčením čepu se měřicí modul pohybuje svisle nahoru a dolů. Čep je axiálně zachycen v pouzdře tvořeném víkem a distančním kroužkem. Při zašroubování stlačuje pružinu, která působí na dno pevně spojené s měřicím modulem. Při vyšroubování čep tlačí zespolu na víko, čímž celý měřicí modul zvedá. Mezi stykovými plochami jsou umístěny kluzné podložky a pro zajištění přesného vedení je čep uložen v kluzném ložisku ve dně.

Nevýhodou je neschopnost jednoduše měřit přítlačnou sílu. Vzhledem k tomu, že se čep vysouvá skrz dno, musel by se použít speciální prstencový tenzometr s otvorem, kterým by mohl čep bezkontaktně procházet. Alternativou by byl pouze nepřesný odečet na základě stlačení pružiny ze stupnice vyryté na distančním kroužku.



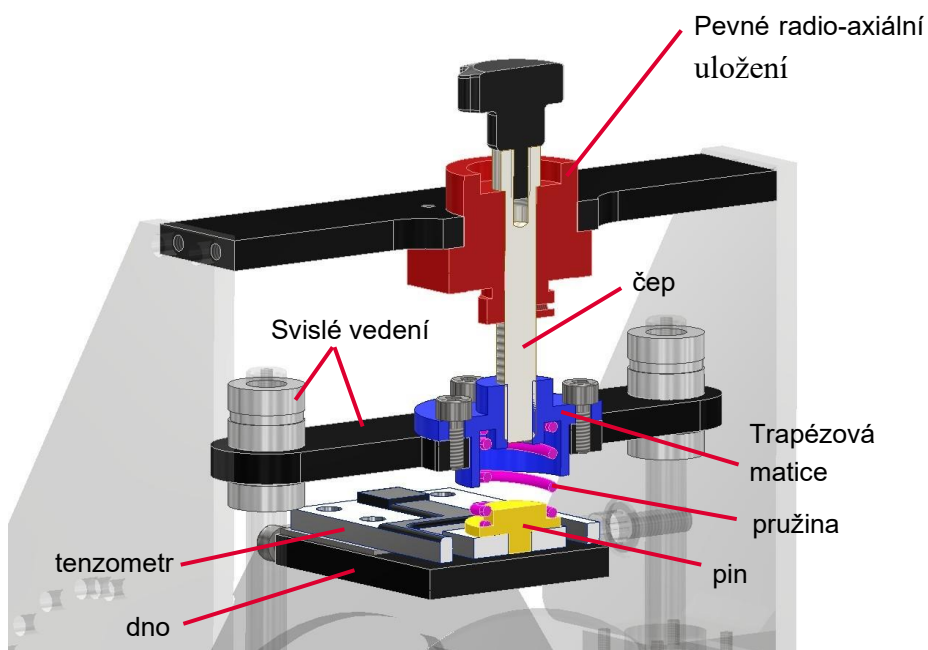
Obr. 4-8 Pevná trapézová matice, posuvný čep

Otočný čep s pevným svislým uložením a posuvnou maticí

V této verzi je trapézová matice součástí svislého vedení zatěžovacího modulu a pohybuje se po vodicích tyčích, které jsou součástí měřicího modulu. Čep je naopak umístěn v pevném radiálně-axiálním uložení spojeném s naklápěcím modulem. Otáčením šroubu se matice pohybuje svisle. Při pohybu vzhůru zvedá přes dorazy svislého vedení celý měřicí modul. Při pohybu dolů matice tlačí na pružinu, ta přenáší sílu na přítlačný prvek (pin), který se opírá o tenzometr umístěný na dně spojeném s měřicím modulem. Po dosednutí kola na kolejnici se dalším otáčením šroubu svislé vedení pohybuje samostatně dolů a stlačuje pružinu.

Jedná se o složitější a stavebně mírně vyšší konstrukci. Zásadním benefitem je však možnost snadné a přesné integrace standardního tenzometru přímo do osy působení síly.

Kvůli nutnosti spolehlivě a elektronicky měřit přítlačnou sílu se pro finální návrh vybrala varianta s posuvnou maticí.



Obr. 4-9 Otočný čep s pevným svislým uložením a posuvnou maticí

4.2.2 Senzor přítlačné síly (Tenzometr)

Pro elektronické snímání síly bylo nutné zvolit tenzometr, který disponuje velmi malou výškou, aby se zbytečně nenavýšovaly rozměry již tak poměrně vysokého zatěžovacího modulu. Dalším požadavkem bylo, aby optimálně pokrýval rozsah potřebné přítlačné síly (40–115 N), ideální je tedy snímač s rozsahem do cca 200 N (zhruba 20 kg).

Tenzometr VPG Celtron LPS

Tento model disponuje ideálním měřicím rozsahem (0–30 kg) a kombinovanou chybou pouhých $\pm 0,02\%$. Jedná se o lehký snímač určený pro jednobodové vážicí platformy. Jeho vnější rozměry jsou ovšem lehce větší. [17]



Obr. 4-10 Tenzometr VPG Celtron LPS [17]

Tenzometr VPG Tedeo-Huntleigh Model 380 (PB-15 kg)

edná se o hliníkový senzor vyznačující se extrémně nízkým profilem s výškou pouhých 2,5 mm. Je konstruován na destruktivní statické přetížení až 400 % jmenovité kapacity a odolá bočnímu zatížení až 200 %. Senzor disponuje schválením OIML R60 a NTEP. Jeho měřicí rozsah je 0–15 kg, což dokonale vyhovuje požadovanému intervalu 40–120 N. Kombinovaná chyba dosahuje hodnoty pouhých 0,02 % z celkového rozsahu. [18]



Obr. 4-11 Tenzometr VPG model 380 [18]

Z důvodu bezkonkurenčně nízké výšky zástavby (2,5 mm) a vynikajících parametrů přesnosti v požadovaném rozsahu zatížení byl použit senzor VPG Tedeo-Huntleigh Model 380.

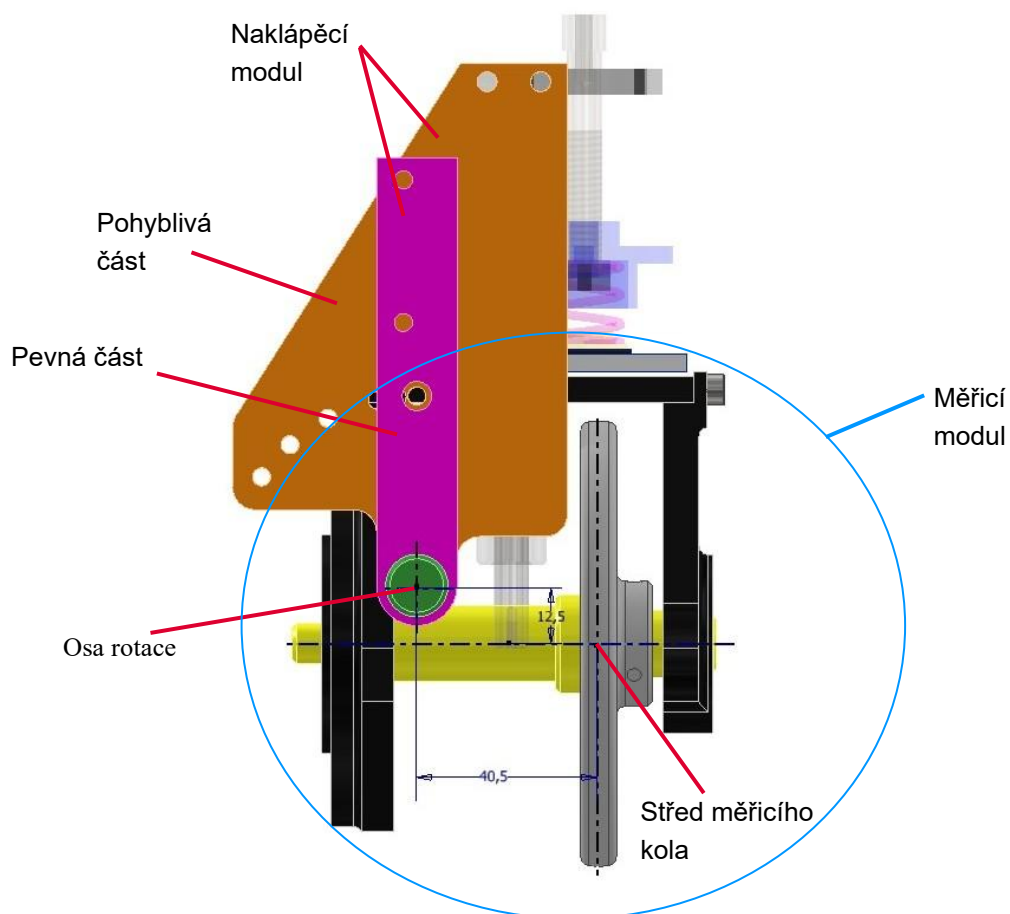
4.3 Naklápěcí modul

Naklápěcí modul slouží k natáčení měřicího kola tak, aby bylo možné provádět měření ve všech šesti požadovaných pozicích na profilu kolejnice. Je na něm také připevněno vedení pro svislé vodící tyče, takže se při naklápění natáčí i celý měřicí modul jako jeden celek (včetně zatěžovacího mechanismu). Při návrhu tohoto uzlu bylo klíčovým úkolem určit ideální polohu osy rotace, kolem které se bude celý systém naklápět.

4.3.1 Koncepte umístění osy rotace

Osa rotace ve středu měřicího kola

Nejlogičtější a nejintuitivnější přístupem je umístění osy rotace přímo do geometrického středu měřicího kola. Jednoduše se definují potřebné úhly naklopení a celkové nastavování polohy je pro obsluhu představitelnější. Při vodorovném (příčném) posuvu modulu mezi jednotlivými měřicími polohami vzniká nutnost velkých výškových korekcí. Vzhledem k tomu, že je výškový zdvih ovládán ručním mechanismem (zatěžovacím čepem), je takto rozsáhlé pře nastavování výšky značně zdlouhavé a neideální.



Obr. 4-12 Excentricita osy rotace

Osa rotace mimo střed měřicího kola (excentrická)

V tomto uspořádání je osa naklápění posunuta mimo střed měřicího kola směrem k lineárně poháněnému vedení. Při naklápění modulu tak samotná osa měřicího kola nezůstává na místě, ale opisuje rádius, čímž se částečně posouvá i svisle nahoru a dolů. Postupnou optimalizací této excentrické polohy se podařilo dosáhnout minimální nutný výškový posun při změně úhlu naklopení mezi jednotlivými polohami. Na úkor této úspory je však zvětšení potřebného rozsahu příčného posuvu.

Z důvodu urychlení a zjednodušení manipulace při měření byla zvolena osa rotace mimo střed. Zvýšený nárok na délku příčného posuvu lze bez problémů akceptovat, jelikož jeho pře nastavování je z pohledu konstrukce celého stroje podstatně rychlejší než manipulace s výškovým posuvem.

4.4 Příčný posuv

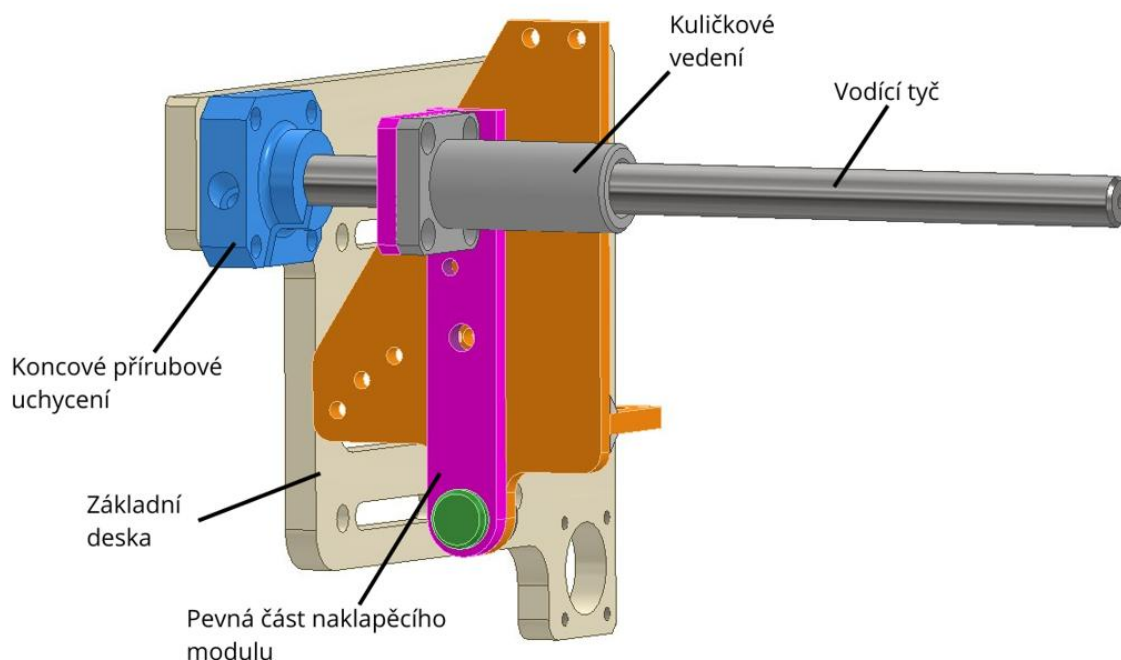
Příčný posuv bude, podobně jako předchozí mechanismy, ovládán ručně. U tohoto pohybu je vyžadován největší rozsah a zároveň nutnost rychlého přestavování. Z tohoto důvodu byl zvolen koncept kuličkového lineárního vedení tvořeného vodicími tyčemi a pouzdry.

Klíčovým požadavkem bylo zajištění dostatečné tuhosti posuvu. Ačkoliv by z hlediska čistě provozního zatížení (odvalování kola po kolejnici) postačovala pouze dvě uložení, z důvodu obav z klopných momentů vyvolaných vlastní tíhou při manipulaci a převozu tribometru bylo uvažováno použití tří paralelních vedení.

4.4.1 Koncepce uspořádání lineárního vedení

Vodicí tyče na základní desce, pouzdra na naklápěcím modulu

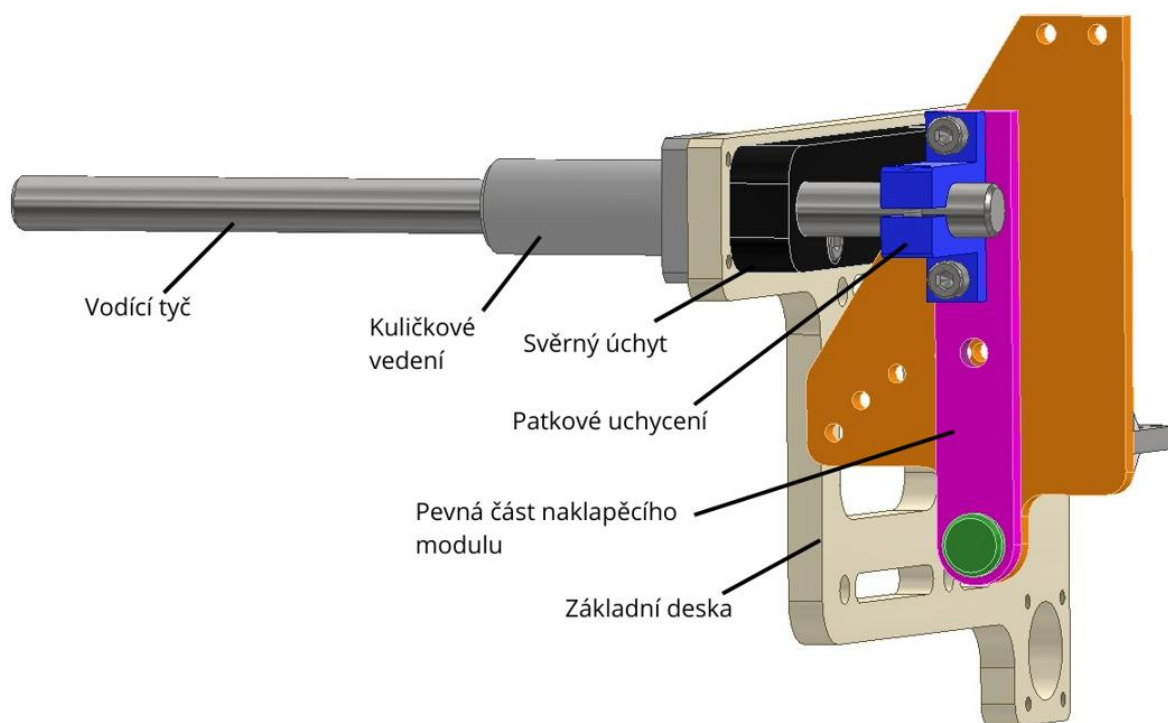
Vodicí tyče jsou pomocí koncových přírubových upevnění upevněny na čele základní desky. Vodicí pouzdra jsou připevněna na pevné části naklápěcího modulu. Při přestavování se pohybuje pouze sestava s pouzdry, zatímco tyče zůstávají nehybné vůči základní desce. Výhodou je značně jednodušší montáž a snazší seřízení rovnoběžnosti vodicích tyčí, což zajišťuje hladký chod posuvu. Komplikace přichází u zajištění (aretace) pozice příčného posuvu, které by si vyžádalo složitější vícenásobný mechanismus. Zásadní nevýhodou je také velký přesah tyčí mimo kolejnici do volného prostoru, což výrazně zvětšuje celkovou šířku tribometru.



Obr. 4-13 Vodicí tyče na základní desce, pouzdra na naklápěcím modulu

Vodící tyče na naklápěcím modulu, pouzdra na základní desce

V tomto uspořádání jsou vodící tyče uchyceny na pevné části polohovatelného modulu pomocí patkových uchycení. Vodící pouzdra jsou naopak připevněna na záda základní desky. Při přestavování se tedy s měřicím modulem pohybují i samotné tyče. Výhodou je zástavbově efektivnější řešení. Tyče v tomto případě přesahují na opačnou stranu (do prostoru, kde se již nachází hnané lineární vedení celého zařízení), čímž se zmenšuje celková šířka tribometru. Uspořádání umožňuje snadnou aretaci příčného posuvu pomocí pouze jednoho svěrného úchytu. Dalším benefitem je přesun části hmotnosti (těžká pouzdra) na základní desku, kterou nese lineární pohon, čímž se snižuje vlastní hmotnost naklápěného měřicího modulu, jež by přispívala k přetížení kola.



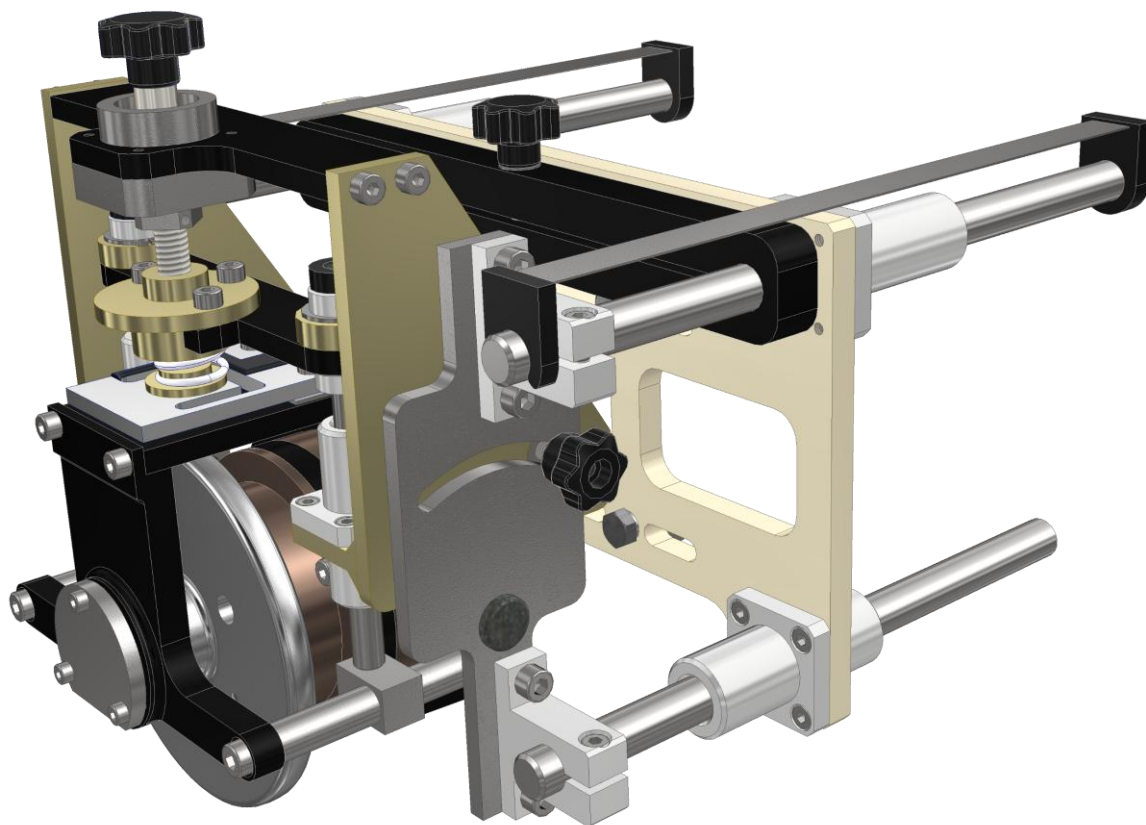
Obr. 4-14 Vodící tyče na naklápěcím modulu, pouzdra na základní desce

Pro finální konstrukci byla zvolena varianta vodící tyče na naklápěcím modulu. Výhody v podobě kompaktnějších rozměrů (úspora šířky stroje), jednoduché a spolehlivé aretace polohy a příznivějšího rozložení hmotnosti sestavy jednoznačně převážily nad drobnou nevýhodou v podobě přesouvání samotných tyčí. Zvolena tak byla robustní a prostorově úspornější koncepce.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Na základě analýzy konstrukčních uzlů a výběru optimálních koncepčních variant v předchozí kapitole byl vypracován finální 3D model a detailní konstrukční návrh výměnného polohovatelného modulu. Hlavní prioritou při finálním návrhu bylo dosažení vysoké celkové tuhosti, minimalizace hmotnosti pro usnadnění manuální manipulace v terénu a zajištění striktní kinematiky pro přesné vedení měřicího kola vůči kolejnici.

Tato kapitola detailně popisuje konečné technické uspořádání celého zařízení. Postupně jsou rozebrány jednotlivé stavební celky, jejichž návaznost tvoří kompletní funkční mechanismus. Od měřicího modulu nesoucího senzoriku, přes zatěžovací a naklápěcí mechanismus, až po základní desku zprostředkovávající spojení s horizontální pohonnou jednotkou stávajícího tribometru BUT Rail. Součástí popisu je rovněž specifikace vybraných materiálů, volba normalizovaných i na míru vyráběných strojírenských komponent a nezbytné analytické výpočty Hertzových kontaktních tlaků, které prokazují, že navržená geometrie a zatěžovací síly věrně simulují reálné podmínky v kontaktu vlakového kola s kolejnici.



Obr. 5-1 Konstrukční řešení polohovatelného modulu tribometru

5.1 Měřicí modul

Měřicí modul představuje hlavní část celého tribometru. Obsahuje všechny nezbytné snímače, které jsou integrovány přímo do jeho nosné kostry. Samotná kostra se skládá ze zadní bočnice, čelní bočnice, dna a dvou spojovacích tyčí.

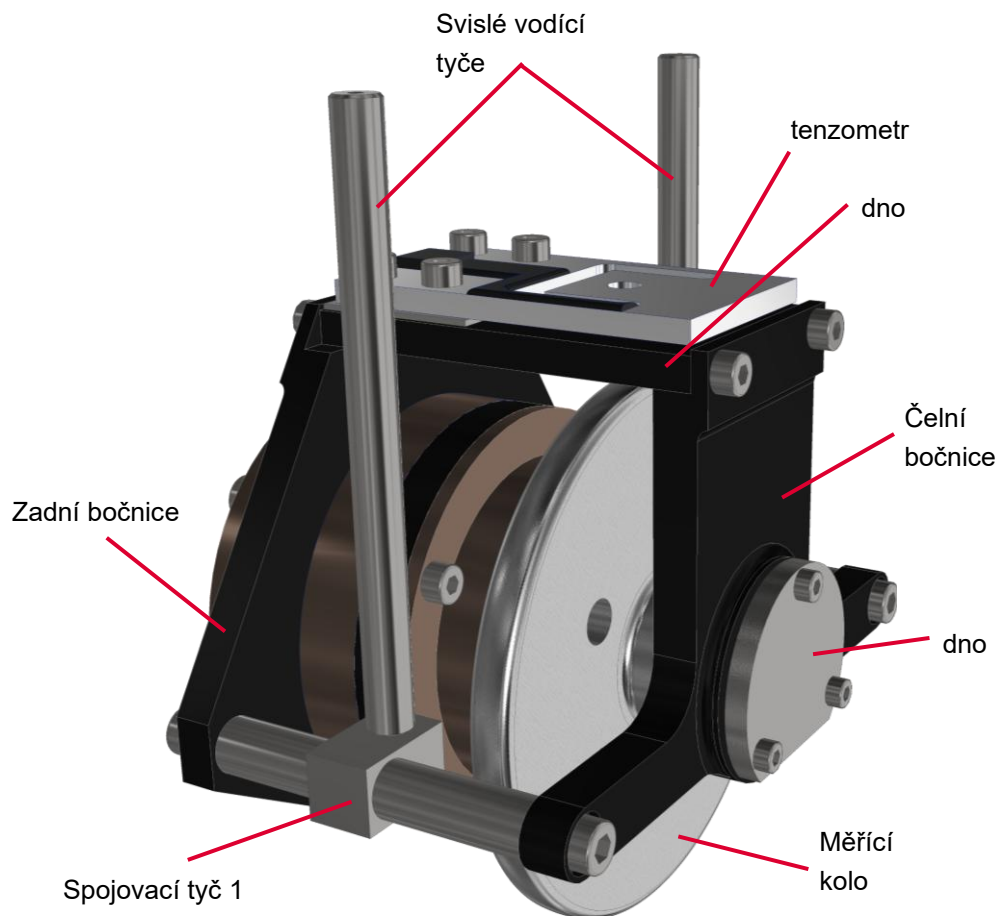
Čelní bočnice je konstrukčně uzpůsobena tak, aby umožňovala snadný přístup k měřicímu kolu za účelem jeho čištění a údržby. Toto konstrukční řešení má zároveň příznivý vliv na minimalizaci celkové hmotnosti dílu.

Obě bočnice zároveň plní funkci ložiskových těles (pouzder). V horní části jsou vzájemně spojeny dnem zatěžovacího modulu, ve spodní části je spojení realizováno pomocí dvou spojovacích tyčí. Vzhledem k požadavku na nízkou hmotnost a s ohledem na relativně nízké mechanické namáhání jsou tyto konstrukční díly vyrobeny z hliníkové slitiny EN AW-6082 [19]. Tento materiál je vhodný pro povrchovou úpravu černým eloxováním, čímž je zajištěna dostatečná ochrana proti korozi.

Na obdélníkové části profilu spojovacích tyčí jsou přišroubovány vodící tyče ($\varnothing$ 8 mm) svislého vedení.

Snímání otáček je řešeno pomocí enkodéru, který je přišroubován na vnější straně zadní bočnice. Pro jeho přesné a snadné vystředění při montáži je na bočnici obrobena středící osazení. Na vnitřní straně téže bočnice je upevněn snímač krouticího momentu. Krouticí moment generovaný brzdou je na tento snímač přenášen prostřednictvím spojovacího mezikusu.

Měření síly je zajištěno tenzometrickým snímačem, který je upevněn ke dnu zatěžovacího modulu. Mezi snímač a dno je vložena podložka, která zajišťuje nezbytný volný prostor pro deformační průhyb tenzometru během probíhajícího měření.



Obr. 5-2 Měřicí modul

5.1.1 Měřicí kolo

Měřicí kolo je mechanicky spojeno s kotvou elektromagnetické brzdy. Přenos krouticího momentu je zajištěn tvarovým stykem prostřednictvím tří hlav nýtů, které jsou součástí kotvy a zapadají do odpovídajících otvorů obrobených v tělese kola. Samotná kotva je ke kolu dodatečně axiálně zajištěna třemi šrouby.

Spojení měřicího kola s hřídelí je realizováno pomocí tří stavěcích šroubů s čípkem. Konstrukční řešení zajišťuje, že jsou tyto šrouby snadno přístupné i po celkovém sestavení měřicího modulu. To umožňuje provést přesná axiální ustavení měřicího kola společně s kotvou až jako finální montážní operaci. K samotnému ustavení se využívá přesná distanční měrka o tloušťce 0,2 mm, čímž je zaručeno dodržení předepsané vůle mezi kotvou a tělesem elektromagnetické brzdy.

Hlavní poloměr měřicího kola (r_{1x}) činí 50 mm, aby přibližně simuloval geometrii reálného železničního kola v měřítku 1:10. Poloměr příčného zaoblení stykové plochy (r_{1y}) byl zvolen 15 mm s ohledem na dosažení požadovaných hodnot Hertzova kontaktního tlaku při zatěžování.

5.1.2 Výpočet Hertzových kontaktních tlaků

Kontakt měřicího kola a kolejnice lze z hlediska mechaniky popsat jako kontakt dvou elipsoidů. Měřicí kolo je definováno hlavním poloměrem $r_{1x} = 50$ mm a poloměrem příčného zaoblení $r_{1y} = 15$ mm. Kolejnice je v podélném směru uvažována jako těleso s nekonečným poloměrem $r_{2x} = \infty$. Poloměr příčného profilu hlavy kolejnice r_{2y} je proměnlivý a závisí na konkrétním typu kolejnice a přesném místě styku.

Pro uvažované typy kolejnic nabývá příčný poloměr (r_{2y}) následujících hodnot (v závislosti na poloze kontaktního bodu):

Širokopatní kolejnice: 300 mm, 80 mm nebo 13 mm.

Bloková žlábková kolejnice: 200 mm nebo 10 mm.

V České republice i v celé Evropě se kolejnice standardně vyrábějí z oceli jakosti R260 [21]. Materiálové charakteristiky této oceli nezbytné pro výpočet jsou: modul pružnosti v tahu $E_1 = 210$ GPa a Poissonovo číslo $\mu_1 = 0,3$ [22].

Měřicí kolo je navrženo z martenzitické korozivzdorné oceli AISI 440 C. Materiálové charakteristiky této oceli jsou: modul pružnosti v tahu $E_2 = 200$ GPa a Poissonovo číslo $\mu_2 = 0,28$ [33].

Vzorový výpočet Hertzova kontaktního tlaku podle Hertzovy teorie pro příčný poloměr $r_{2y} = 200$ mm a normálovou sílu působící na kolejnici $F_n = 115$ N [23]:

$$E_r = \frac{1}{\frac{1-\mu_1^2}{E_1} + \frac{1-\mu_2^2}{E_2}} = 111,87 \text{ GPa} \quad (1)$$

kde E_r je Redukovaný modul pružnosti v GPa

$$\rho_{2x} = \frac{1}{r_{2x}} = 0 \text{ mm}^{-1} \quad (2)$$

$$\rho_{2y} = \frac{1}{r_{2y}} = 0,005 \text{ mm}^{-1} \quad (3)$$

kde ρ_2 jsou křivosti kolejnice v mm^{-1}

$$\rho_{1x} = \frac{1}{r_{1x}} = 0,02 \text{ mm}^{-1} \quad (4)$$

$$\rho_{1y} = \frac{1}{r_{1y}} = 0,0667 \text{ mm}^{-1} \quad (5)$$

kde ρ_1 jsou křivosti měřicího kola v mm^{-1}

$$\theta_1 = \frac{4 \cdot (1-\mu_1^2)}{E_1} = 1,7554 \cdot 10^{-11} \frac{\text{m} \cdot \text{s}^2}{\text{kg}} \quad (6)$$

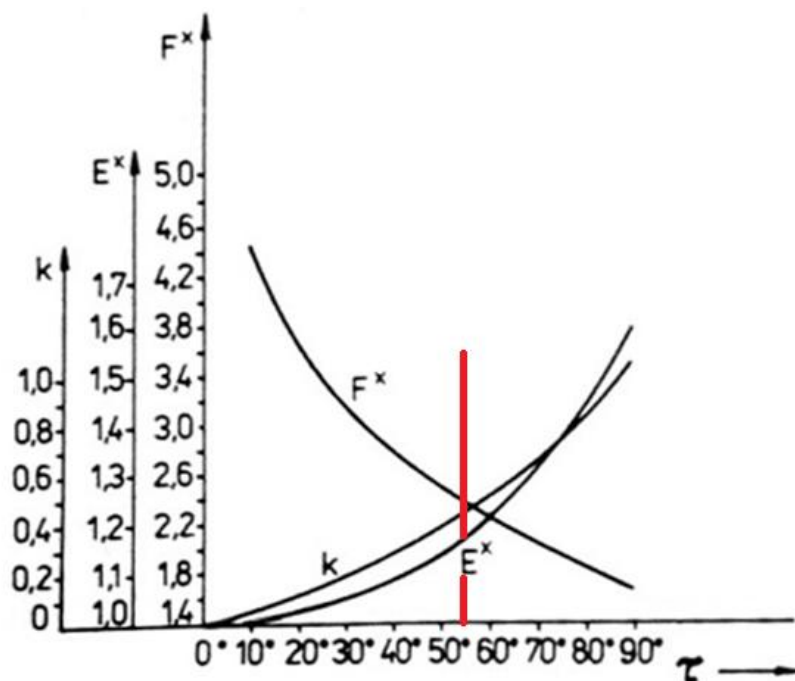
$$\theta_2 = \frac{4 \cdot (1 - \mu_2^2)}{E_2} = 1,82 \cdot 10^{-11} \frac{m \cdot s^2}{kg} \quad (7)$$

kde θ jsou elastické konstanty v $(m \cdot s^2) / kg$

$$\tau = \left| \cos^{-1} \left(\frac{(\rho_{1x} + \rho_{2x}) - (\rho_{1y} + \rho_{2y})}{\rho_{1x} + \rho_{1y} + \rho_{2x} + \rho_{2y}} \right) - 180^\circ \right| = 55,6923^\circ \quad (8)$$

kde τ je pomocný úhel v $^\circ$

Odečteme z grafu



Obr. 5-3 Závislost F^x , E^x a k na τ

$$E^x = 1,185$$

$$F^x = 2,39$$

$$k = 0,48$$

Kde k je poměr poloměrů dotykové elipsy, F^x je úplný eliptický integrál 1. druhu, E^x je úplný eliptický integrál 2. druhu, všechno bezrozměrné veličiny

$$a = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_n}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\theta_1 + \theta_2}{\rho_{1x} + \rho_{1y} + \rho_{2x} + \rho_{2y}} \cdot \frac{E^x}{k^2}} = 0,3805 \text{ mm} \quad (9)$$

$$b = \sqrt[3]{\frac{3 \cdot F_n}{4 \cdot \pi} \cdot \frac{\theta_1 + \theta_2}{\rho_{1x} + \rho_{1y} + \rho_{2x} + \rho_{2y}} \cdot E^x \cdot k} = 0,1826 \text{ mm} \quad (10)$$

kde a , b jsou poloměry dotykové elipsy v mm

$$p_{max} = \frac{3 \cdot F_n}{2 \cdot \pi \cdot a \cdot b} = 0,7902 \text{ GPa} \quad (11)$$

Kde p_{max} je maximální Hertzův tlak v dotyku kola a kolejnice

Návrhový výpočet třecí síly a vzniklého krouticího momentu, na jehož základě byly následně zvoleny mechanické komponenty a snímače. Výpočet je proveden s uvažováním návrhového součinitele tření $f_n = 0,8$:

$$F_t = F_n \cdot f_n = 92 \text{ N} \quad (12)$$

$$M_K = F_t \cdot r_{1x} = 4,6 \text{ Nm} \quad (13)$$

Kde F_t je třecí síla v N, M_K je krouticí moment na měřicím kole v Nm

The screenshot shows the HertzWin 2.6.0 software interface. It is divided into several sections:

- Material properties:**
 - Body 1:** Select material (dropdown), Young's modulus: 210 GPa, Poisson's ratio: 0,28, Maximum stress: 0 MPa.
 - Body 2:** Select material (dropdown), Young's modulus: 200 GPa, Poisson's ratio: 0,3, Maximum stress: 0 MPa.
- Force:** Normal: 115 Newton, Traction: 0,8 Newton, Slip checkbox.
- Dimensions and contact type:**
 - Contact type:** Circular/elliptical contact (selected), Line contact (unselected).
 - Body 1:** Radius 1x: 50 mm, Radius 1y: 15 mm (Infinite checkbox), Roughness: 0 um.
 - Body 2:** Radius 2x: Infinite (checked), Radius 2y: 200 mm (Infinite checkbox), Roughness: 0 um.
 - Angle:** 0 degrees.
- Contact:** Diagram showing a sphere (Body 1) in contact with a cylinder (Body 2). Labels include F normal, 2a, and 2b.
- Results:**
 - Contact radius a: 407,7 um, Contact radius b: 175,2 um.
 - Hertz contact stress: 769,0 MPa.
 - Max. shear stress 1: 253,3 MPa, Max. shear stress 2: 250,0 MPa.
 - Von Mises body 1: 475,2 MPa, Von Mises body 2: 466,7 MPa.
 - Max. shear stress: Z=-114,8 um, Max. Von Mises stress: Z=-112,0 um.
 - Tensile stress at radius a: 110,3 MPa, Tensile stress at radius b: 79,0 MPa.
 - Impression: 2,761 um.
 - Hertz contact stiffness Cz: 6,25E07 N/m.
 - Hertz traction stiffness Ca: 4,75E07 N/m, Hertz traction stiffness Cb: 2,96E07 N/m.
- Lifetime:** Select lubrication regime (dropdown), Nr. of load cycles (dropdown), Body 1: 0, Body 2: 0.
- Settings:** Units: SI (selected), Imperial (unselected), Language: English (dropdown).

Obr. 5-4 Výpočet v programu HertzWin

Pro následné výpočty kontaktních tlaků byl využit specializovaný výpočtový software **HertzWin (verze 2.6.0)**. Výsledky z tohoto softwaru vykazují vysokou shodu s analytickým teoretickým výpočtem, přičemž odchylka v hodnotě maximálního Hertzova kontaktního tlaku činí pouhé dvě setiny GPa (0,022 GPa).

Tabulka Vypočtených hodnot pro normalizované profily kolejnic

Tab. 5-1 Hodnoty Hertzova kontaktního tlaku pro různé normálové síly

r_{2y} [mm]	F_N [N]	a [mm]	b [mm]	p_{max} [GPa]	F_t [N]	M_K [Nm]
13	40	0,311	0,085	0,720	32	1,6
13	70	0,374	0,102	0,868	56	2,8
13	100	0,422	0,115	0,977	80	4,0
13	120	0,448	0,123	1,040	96	4,8
80	40	0,290	0,116	0,563	32	1,6
80	70	0,349	0,140	0,678	56	2,8
80	100	0,394	0,016	0,763	80	4,0
80	120	0,418	0,168	0,811	96	4,8
300	40	0,285	0,124	0,536	32	1,6
300	70	0,344	0,150	0,645	56	2,8
300	100	0,388	0,169	0,727	80	4,0
300	120	0,412	0,179	0,772	96	4,8
10	40	0,315	0,078	0,768	32	1,6
10	70	0,380	0,094	0,925	56	2,8
10	100	0,480	0,107	1,040	80	4,0
10	120	0,455	0,113	1,110	96	4,8
200	40	0,286	0,123	0,541	32	1,6
200	70	0,345	0,148	0,651	56	2,8
200	100	0,389	0,167	0,734	80	4,0
200	120	0,413	0,177	0,780	96	4,8

V případě požadavku na měření s přesně definovaným kontaktním tlakem v terénu – typicky na nedefinovaných a opotřebovaných profilech kolejnic – je nezbytné před zahájením zkoušky nejprve zjistit příčný poloměr hlavy kolejnice (r_{2y}) v místě předpokládaného kontaktu.

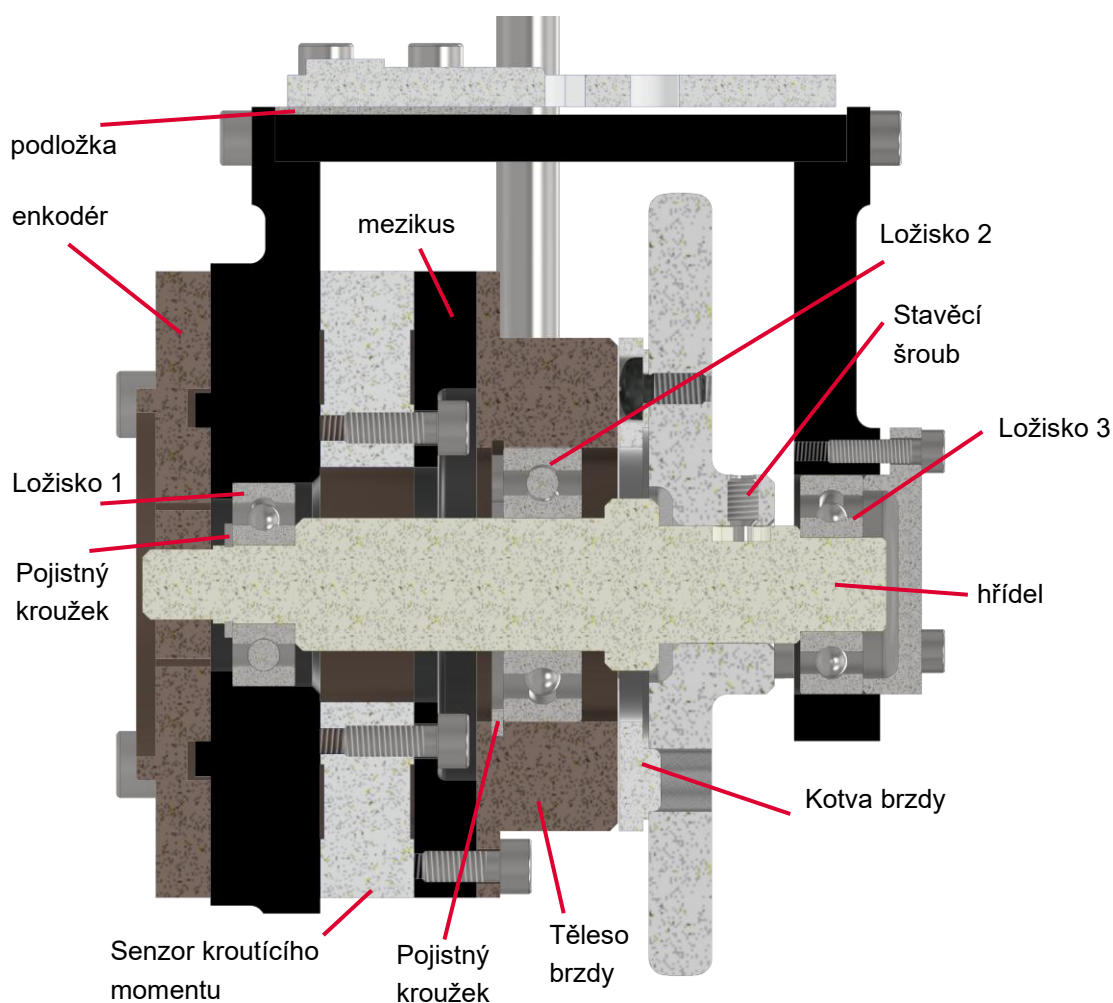
5.1.3 Uložení hřídele

Hřídel je uložena ve třech jednořadých kuličkových ložiscích. Ložisko 1 (typ 6000) je uloženo v zadní bočnici. V tělese bočnice je zvoleno přechodné uložení, které umožňuje instalaci ložiska i v laboratorních podmínkách (například lehkým poklepem gumové paličky) bez nutnosti použití lisu. Na hřídeli je toto ložisko uloženo s vůlí (v toleranci g6), což umožňuje jeho volné nasunutí. Axiálně je z vnější strany hřídele zajištěno pojistným kroužkem.

Ložisko 2 (typ 6003) slouží především k přesnému radiálnímu vystředění tělesa brzdy. Jak na hřídeli, tak v tělese brzdy je uloženo s mírnou vůlí. Toto řešení usnadňuje montáž a umožňuje volný axiální posuv. Axiálnímu vysunutí ložiska z tělesa brzdy brání na jedné straně osazení přímo na hřídeli a na straně druhé pojistný kroužek umístěný v tělese brzdy. Při montáži sestavy je nutné nejprve zasunout ložisko mezi těleso brzdy a hřídel, čímž dojde k přesnému vystředění tělesa brzdy, a teprve poté finálně dotáhnout její upevňovací šrouby.

Ložisko 3 (typ 6001) je na hřídeli uloženo s přechodným uložením (v toleranci js6), což rovněž usnadňuje montáž. Na toto ložisko se následně nasazuje čelní bočnice.

Pro dosažení a udržení předepsané vůle 0,2 mm mezi kotvou a tělesem brzdy je nezbytné vymezit vnitřní vůle samotných ložisek, a to jejich axiálním předepnutím (týká se ložisek 1 a 3). Po montáži čelní bočnice se na její přední stranu připevňuje víko. Toto víko nedosedá na čelní plochu bočnice, nýbrž svým osazením působí přímo na vnější kroužek ložiska 3. Pomocí tří upínacích šroubů se víko postupně přitahuje k bočnici do optimální polohy, kdy dojde k vymezení vůlí v uložení, ale zároveň ještě nedochází k nežádoucímu nárůstu pasivních odporů vlivem nadměrného předpětí.



Obr. 5-5 Uložení hřídele

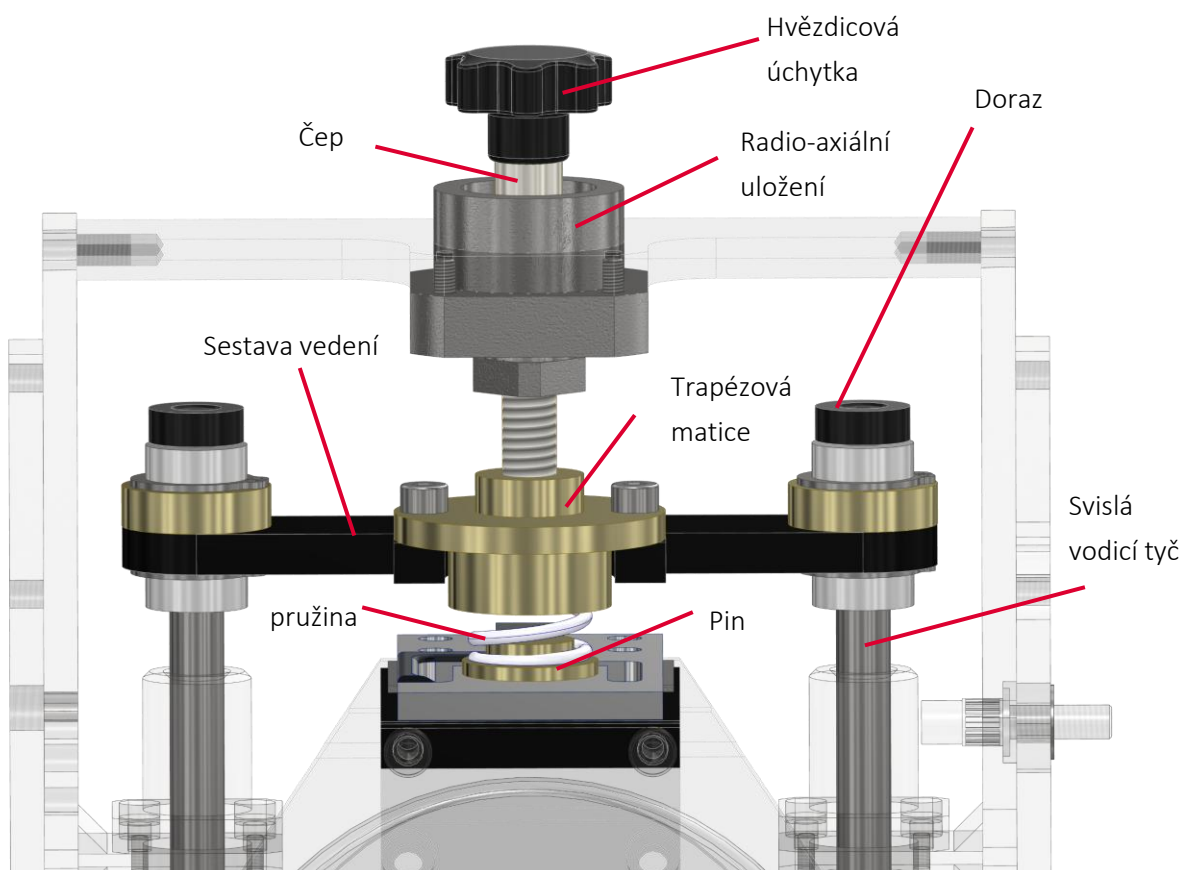
5.1.4 Ložiska

Pro uložení jsou zvolena standardní jednořadá kuličková ložiska výrobce SKF odpovídající normě ČSN 02 4630. Konkrétně se jedná o velikosti 6000, 6001 a 6003. Všechna použitá ložiska jsou v otevřeném provedení (bez krytování). Důvodem je minimalizace pasivních odporů, které by jinak vznikaly třením o těsnicí manžety nebo krycí plechy, a nepříznivě by tak ovlivňovaly přesnost celého měření. [20]

5.1.5 Víko

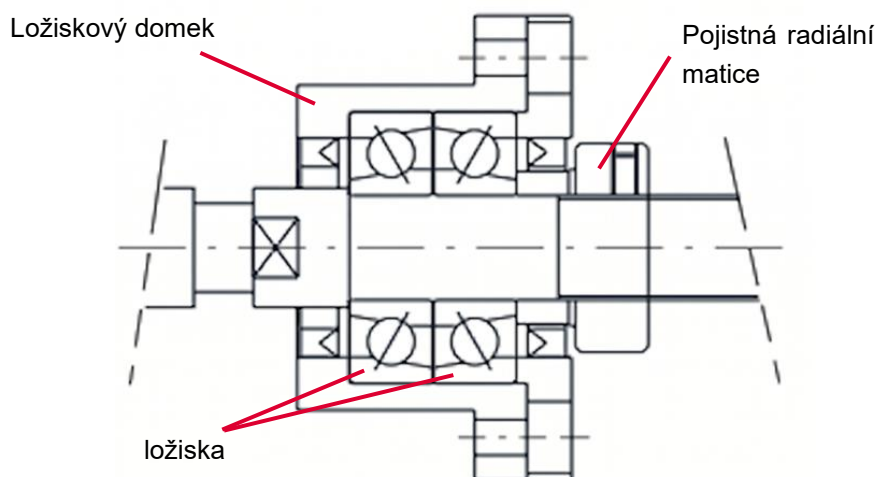
Víko je vyrobeno z oceli a proti korozi je chráněno povrchovou úpravou – zinkováním. Jeho spodní část je seříznutá, aby při nasazení tribometru na žlábkovou kolejnici nedocházelo ke kolizi mezi víkem a tělesem kolejnice.

5.2 Zatěžovací modul a výškový posuv



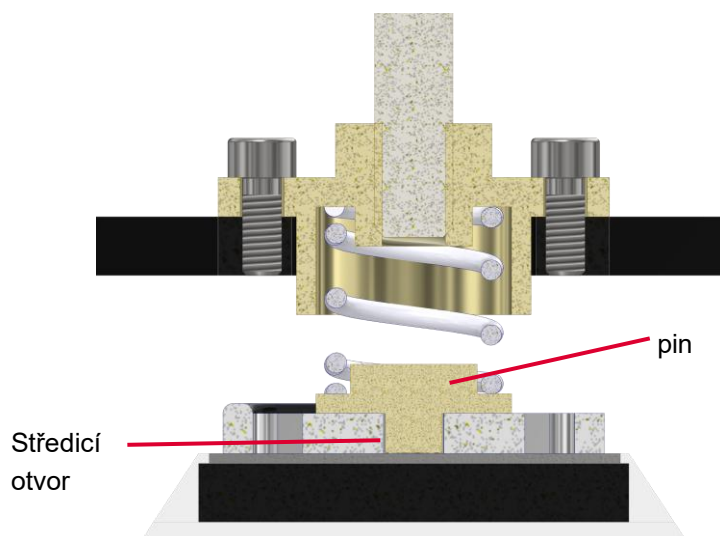
Obr. 5-6 Zatěžovací modul a výškový posuv

Tento modul je založen na šroubovém mechanismu. Otáčením čepu s lichoběžníkovým závitem dochází k přímočarému pohybu trapézové matice směrem nahoru nebo dolů. Čep o jmenovitém průměru 8 mm je uložen v pevném radiálně-axiálním ložiskovém uložení FK 08 od výrobce Matis. Toto uložení je přišroubováno k pohyblivé části naklápěcího modulu. V sestavě uložení FK 08 jsou integrována dvě kuličková ložiska s kosoúhlým stykem (typ 708) umístěná v ocelovém ložiskovém domku [24]. Tato ložiska zajišťují nízký valivý odpor a bezúdržbový provoz mechanismu bez nutnosti pravidelného mazání. Axiální zajištění ložisek je realizováno pojistnou radiální maticí [24].



Obr. 5-7 Ukázka pevného přírubového uložení FK 08 [24]

Ocelová trapézová matice je opatřena vnitřním osazením, které slouží pro přesné usazení a vedení šroubovitě válcové tlačné pružiny. Z opačné strany je pružina nasazena na vodící člene (pin), který zajišťuje vystředění na tenzometrickém snímači síly prostřednictvím vodícího čepu a otvoru situovaného ve středu tlačné plochy tenzometru.

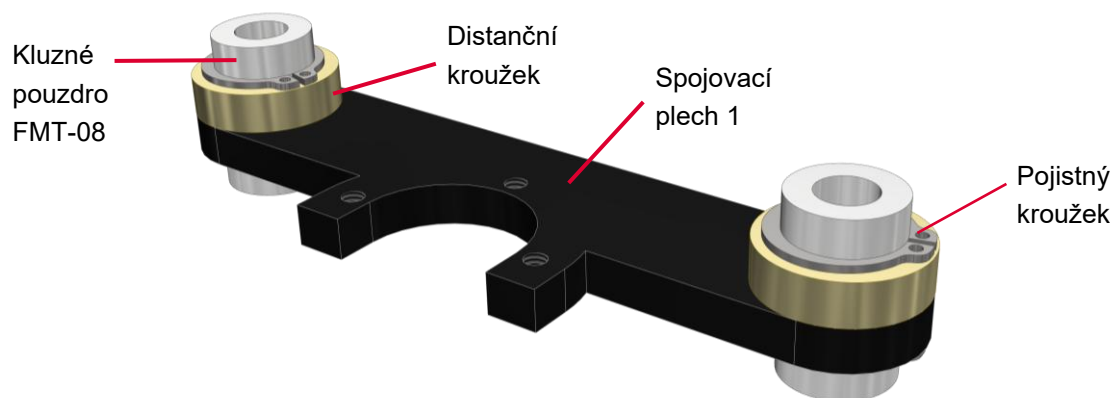


Obr. 5-8 Uložení pružiny

Tlačná pružina od firmy Sodemann byla zvolena s ohledem na minimální zástavbové rozměry a optimální pracovní zdvih. Maximální stlačení pružiny činí 7,06 mm. Tento zdvih je dostatečný pro přesné manuální nastavení zatěžující síly prostřednictvím otáčení čepu s trapézovým závitem. Maximální přípustné zatížení pružiny je 127,75 N. [25].

Trapézová matice je přišroubovaná k sestavě svislého vedení, kterou tvoří dvě samomazná kluzná pouzdra řady Compact FMT-08. Tato pouzdra s hliníkovým tělesem jsou bezúdržbová a disponují dvěma obvodovými drážkami pro axiální zajištění. Pro uložení kluzných pouzder ve spojovacím plechu je zvoleno přechodné uložení, které zaručuje pevnost spoje, přičemž axiální pojištění je v drážkách finálně realizováno pomocí dvou pojistných kroužků. Vybrání ve spojovacím plechu je navíc jednostranně otevřené. Toto konstrukční uspořádání umožňuje snadnou dodatečnou montáž trapézové matice spolu se čepem a jeho uložení až po zkompletování a nasazení samotné sestavy svislého vedení.

Trapézová matice je přišroubovaná k sestavě svislého vedení, kterou tvoří dvě samomazná kluzná pouzdra řady Compact FMT-08. Tato pouzdra s hliníkovým tělesem jsou bezúdržbová a disponují dvěma obvodovými drážkami pro axiální zajištění. Pro uložení kluzných pouzder ve spojovacím plechu je zvoleno přechodné uložení, které zaručuje pevnost spoje, přičemž axiální pojištění je v drážkách finálně realizováno pomocí dvou pojistných kroužků. Vybrání ve spojovacím plechu je navíc jednostranně otevřené. Toto konstrukční uspořádání umožňuje snadnou dodatečnou montáž trapézové matice spolu se čepem a jeho uložení až po zkompletování a nasazení samotné sestavy svislého vedení.



Obr. 5-9 Sestava svislého vedení zatěžovacího modulu

Při otáčení šroubu v příslušném směru se matice pohybuje dolů, čímž přes tlačnou pružinu, vodící člen a tenzometr přenáší pohyb na celý měřicí modul, který se posouvá dolů ve svislém vedení naklápacího modulu. V okamžiku kontaktu měřicího kola s kolejnicí dochází k postupnému stlačování pružiny. Tím se vyvozuje požadovaná přitlačná síla, která v kombinaci s vlastní hmotností měřicího modulu definuje výslednou normálovou sílu (F_N), kterou kolo působí na kolejnici. Aby bylo umožněno stlačování pružiny i po dosednutí kola na kolejnici, matice se sestavou svislého vedení pohybuje dolů vůči rámu měřicího modulu.

Při opačném pohybu matice směrem nahoru dochází nejprve k volnému zdvihu v rámci sestavy svislého vedení. Jakmile matice dosáhne hliníkových dorazů přišroubovaných na koncích svislých vodicích tyčí měřicího modulu, začne s sebou unášet a zvedat celý měřicí modul. Krajní horní poloha tohoto pohybu je vymezena kontaktem trapézové matice s pojistnou maticí ložiskového uložení čepu. Do čelní plochy čepu je našroubován ovládací šroub s ergonomickým hvězdicovým kolečkem pro snadné ruční ovládání.

5.2.1 Velikost potřebné přitlačné síly pružiny

Jak již bylo zmíněno, celková normálová síla F_N působící v místě styku mezi měřicím kolem a kolejnici se skládá ze dvou složek: z přitlačné síly vyvozené pružinou (F_p) a z vlastní tíhové síly měřicího modulu (G). Složka tíhové síly působící v normálovém směru ke kolejnici se však mění v závislosti na úhlu naklopení modulu při měření v různých pozicích.

Z tohoto důvodu byla analyticky stanovena hmotnost ($m_i=3,818$ kg) všech příslušných komponent, které svou tíhou působí na měřený kontakt (s výjimkou dílů, jež jsou zavěšeny na základní desce). Následně byla pro každou definovanou polohu měření vypočtena odpovídající normálová složka tíhové síly (G_N).

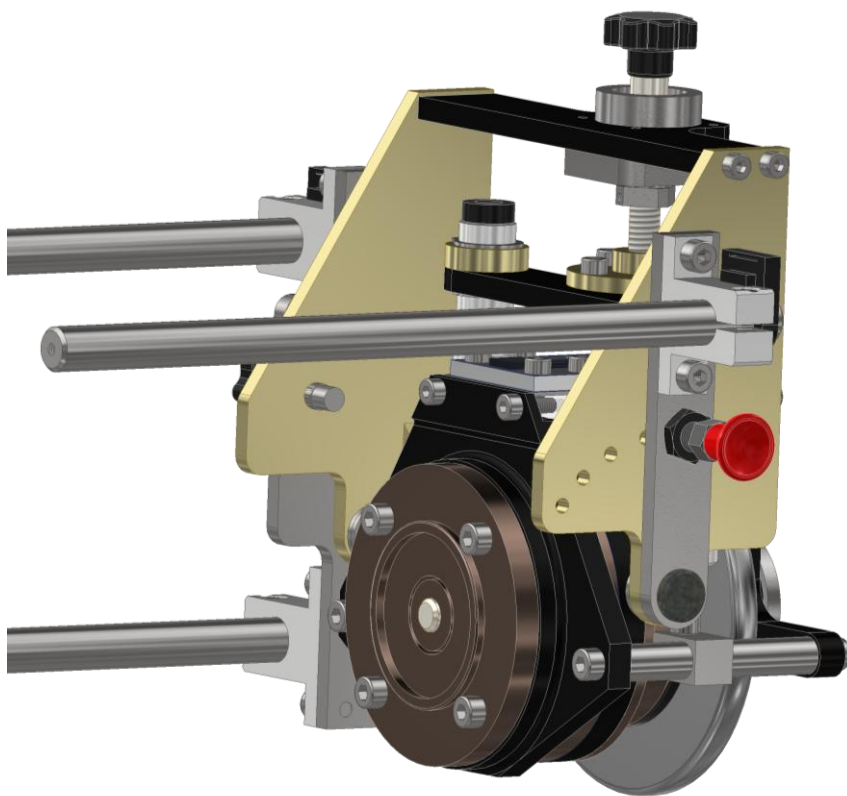
$$G_N = G \cdot \cos \alpha = g \cdot m_i \cdot \cos \alpha \quad (14)$$

Kde G je tíhová síla modulu tribometru v N, α je úhel natočení měřicího modulu (Obr. 3-1) v °, m_i je izolovaná hmotnost součástí působících převážně na kolejnici v kg, g je gravitační zrychlení N/kg

Tab. 5-2 Hodnoty tíhové síly v normálovém směru

č. pozice	α	G_N [N]
1	0°	37,5
2	6°	37,3
3	12°	36,7
4	28°	33
5	42°	27,9
6	55°	21,5

Při samotném měření pak obsluha do řídicí jednotky vždy zadá, v jaké konkrétní pozici (1 až 6) aktuálně měří. Systém následně k hodnotě přitlačné síly, kterou snímá tenzometr, automaticky připočítá odpovídající tíhovou složku pro danou polohu. Na displeji řídicí jednotky se tak obsluze rovnou zobrazuje výsledná hodnota celkové normálové síly F_N .

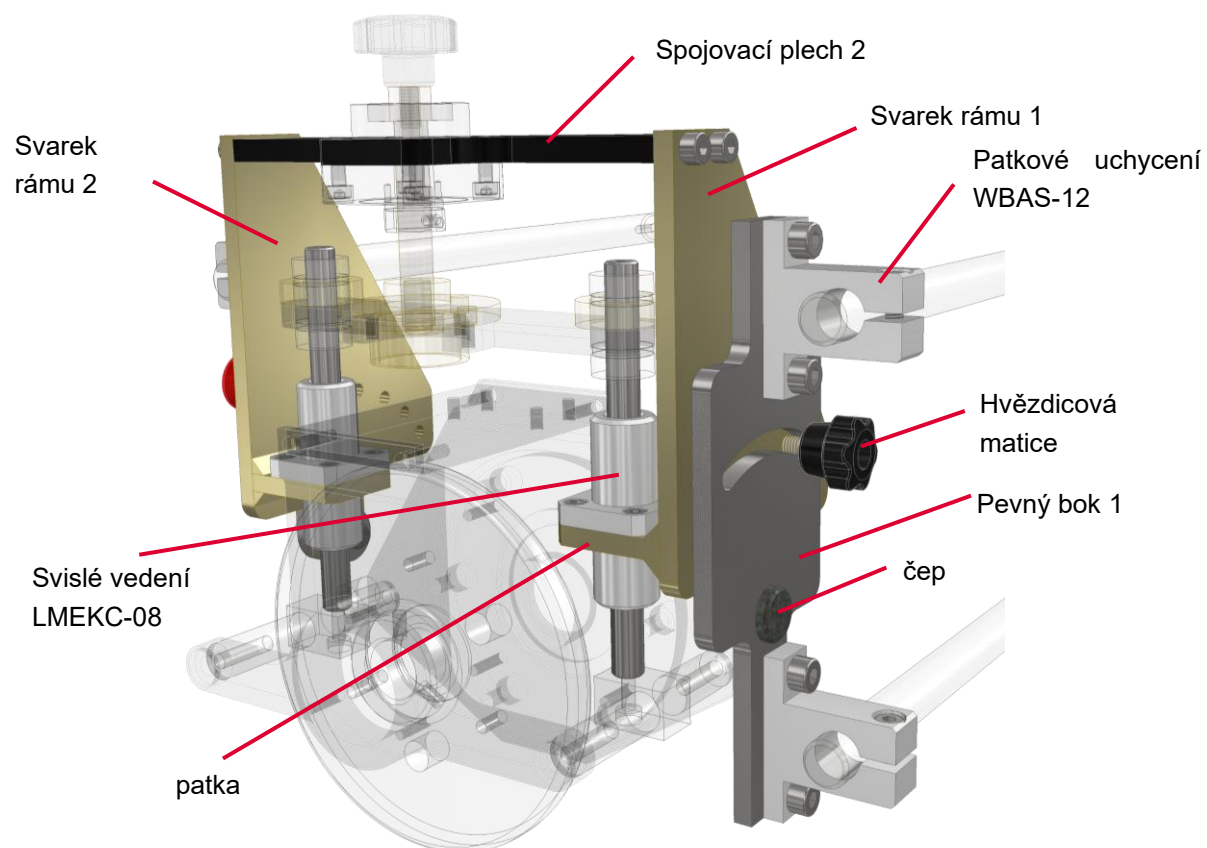


Obr. 5-10 Izolované součásti jejichž váha působí na kolejnici

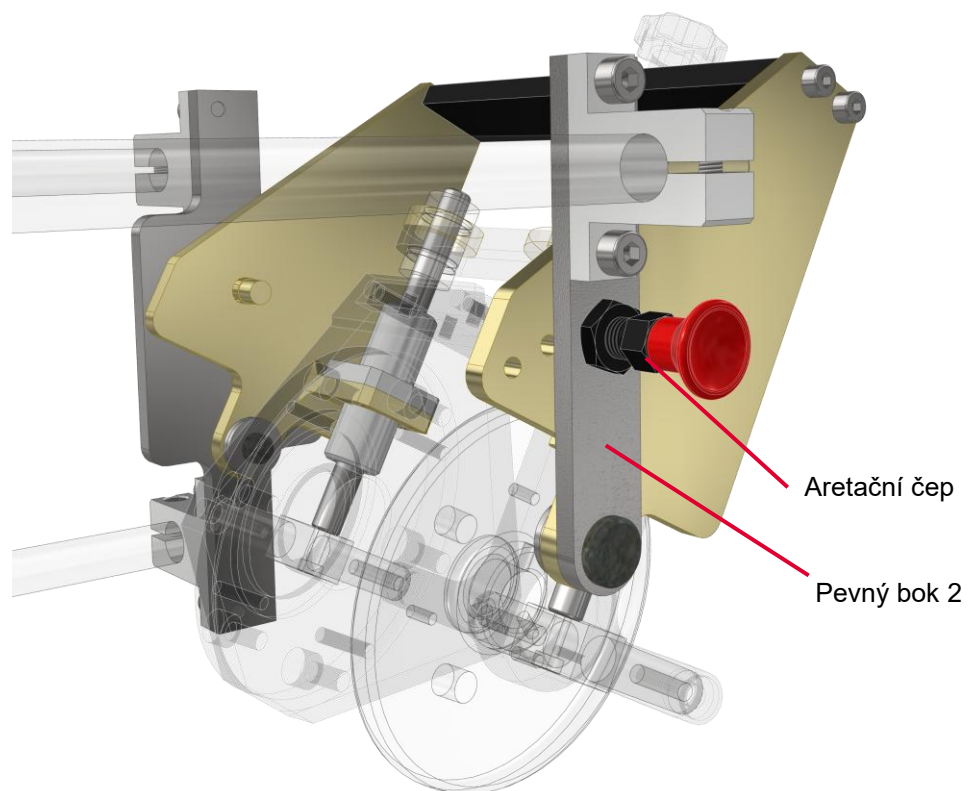
5.3 Naklápěcí modul

Tento modul slouží k naklápění měřicího modulu do požadovaných poloh měření. Skládá se ze dvou hlavních částí – pevné a pohyblivé (naklápěcí). Excentrická poloha osy rotace zajišťuje pohyb celého měřicího a zatěžovacího modulu po kruhové dráze. Rotační pohyb je realizován na dvou čepech, které jsou axiálně zajištěny závlačkami. V obou částech konstrukce jsou zalisována a s povrchem dílu zabroušena samomazná kluzná pouzdra ze slinutého bronzu SELFOIL B70A [26], což zaručuje plynulý chod naklápění.

Všechny hlavní konstrukční díly jsou navrženy jako plechové součásti. Původně zvažované použití hliníkových slitin bylo zavrženo z důvodu nižší tuhosti a nemožnosti dodržet technologické pravidlo minimální délky závitu v hliníku (dvojnásobek průměru). Jako výchozí materiál byla proto zvolena dobře svařitelná konstrukční ocel S235JR, která je vhodná pro povrchovou ochranu zinkováním [32].



Obr. 5-11 Pohled na naklápěcí modul v měřicí poloze 1



Obr. 5-12 Pohled na naklápěcí modul v měřicí poloze 4

5.3.1 Pevná část

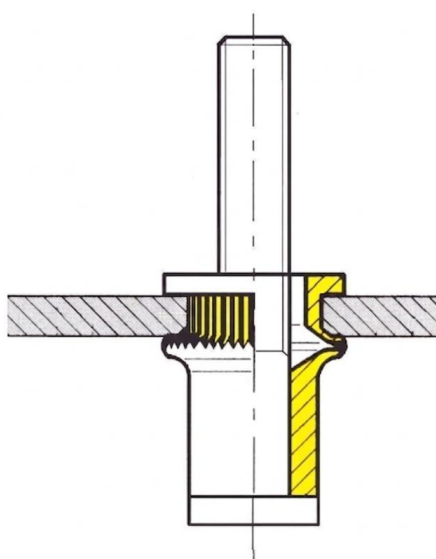
Pevnou část tvoří dva postranní díly – pevný bok 1 a 2 (pravý a levý). K levému boku je v horní části dvěma šrouby připevněno patkové uchycení vodící tyče příčného posuvu (WBAS-12). V ose rotace je do boku nalisováno a s povrchem dílu zabroušeno výše zmíněné kluzné pouzdro. Ačkoliv v pevném dílu k rotačnímu pohybu nedochází, bylo zde pouzdro použito z důvodu zachování stejnorodosti a jednotnosti lícovaných stykových ploch rotačního spoje. Ve střední části levého boku je dále upevněna sestava aretačního čepu.

V pevném pravém boku je vyfrézována vodící drážka, která kopíruje dráhu nýtovacího šroubu upevněného na pohyblivé části. Na tomto pravém boku se dále nacházejí dvě patky pro upevnění tyčí příčného posuvu – jedna v horní části a druhá ve spodní části pod osou rotace.

5.3.2 Pohyblivá část

Pohyblivou část tvoří rámová konstrukce skládající se ze dvou svařenců (levého a pravého rámu), které jsou v horní části pevně spojeny spojovacím plechem pomocí čtyř šroubů (dvou na každé straně). Do tohoto plechu se následně montuje radiálně-axiální uložení čepu zatěžovacího modulu. V ose rotace obou rámu je opět využito kluzné pouzdro a na vnitřní straně každého rámu je přivařena patka sloužící k uložení svislého vedení.

V levém rámu je na roztečné kružnici vyvrtáno celkem 6 otvorů. Tyto otvory jsou rozmístěny v definovaných úhlech α (Obr. 3-1, Tab. 5-2) vzhledem k základně a slouží pro přesné polohování modulu zasunutím aretačního čepu. Na pravém rámu je na identické roztečné kružnici připevněn ocelový tvářený nýtovací šroub s plochou hlavou a rýhovaným dřikem [27].

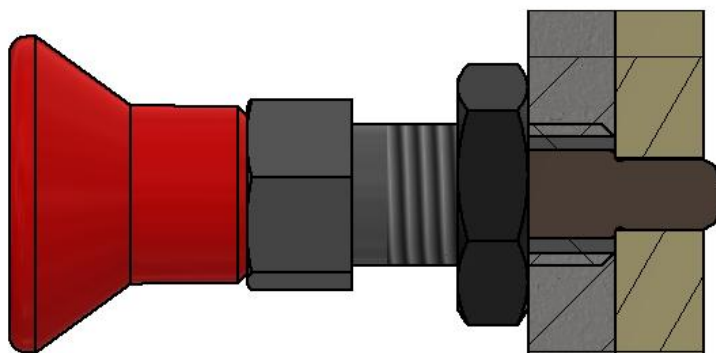


Obr. 5-13 Nýtovací šroub po montáži [27]

Pro zajištění maximální celkové tuhosti tribometru jsou stykové plochy pevné a pohyblivé části (vnitřní plochy pevných boků a vnější plochy svařených rámců) navrženy jako kluzné – díly se o sebe plošně opírají. Ponechání malých funkčních vůlí by při zatížení a zkroucení mohlo vést k nerovnoměrnému lokálnímu kontaktu, příliš velké vůle by naopak vyžadovaly vymezení distančními prvky a zvětšily zástavbové rozměry. Z tohoto důvodu jsou tyto stykové plochy plošně broušeny na přesnou tloušťku plechu, požadovanou rovinnost a drsnost povrchu ($R_a\ 0,8\ \mu m$).

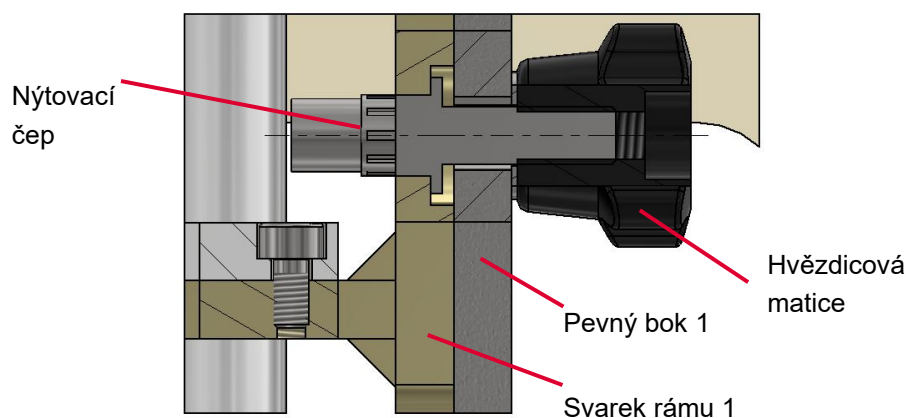
5.3.3 Zajištění polohy

Aretace pohyblivé části se z důvodu eliminace vůlí skládá ze dvou prvků. Na levé straně je poloha fixována pomocí sestavy pružinového aretačního šroubu (pevné pouzdro, vnitřní tlačná pružina a pohyblivý dřík). Zatažením za ergonomické madlo se čep vytáhne z protikusu, pohyblivou část lze uvolnit a po uvolnění madla čep automaticky zaskočí do zvolené polohy. Pro zaručení vysoké stability a odolnosti je tento normovaný prvek vyroben z korozivzdorné oceli [28].



Obr. 5-14 Aretační čep v zasunuté poloze

Použití samotného aretačního čepu by však nebylo dostačující, jelikož ve vodicích otvorech vykazuje určitou lícovací vůli, což by vedlo k viklání a zvětšeným vibračním modulům. Proto je na pravé straně poloha fixována pomocí ergonomické hvězdicové matice, která se dotahuje na nýtovací šroub pohyblivého rámu. Tím dojde k axiálnímu stažení pevné a pohyblivé části k sobě, čímž se stoprocentně vymezí veškeré vůle a zajistí se požadovaná tuhost modulu během měření.



Obr. 5-15 Zajištění nýtovacím šroubem

5.3.4 Svislé vedení

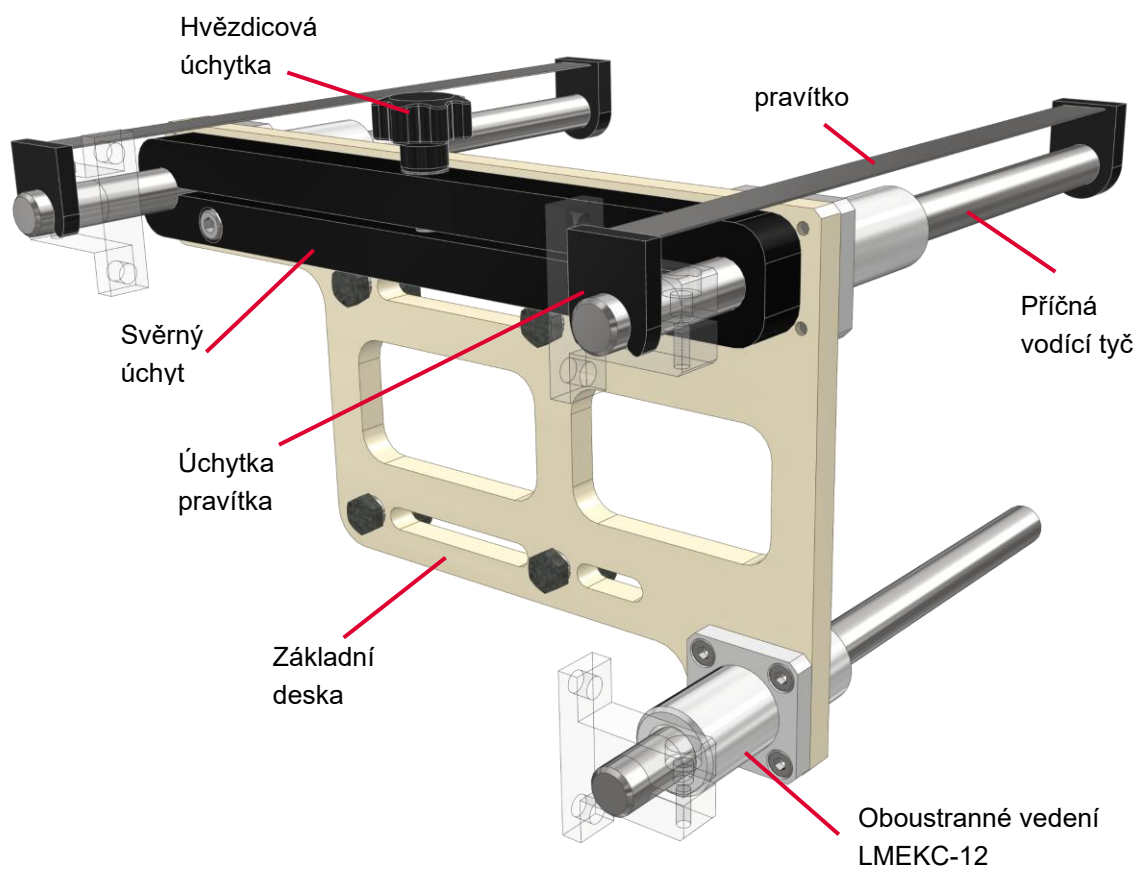
Svislé vedení slouží k přesnému přímočarému vedení měřicího modulu při jeho svislém polohování a zatěžování, přičemž zároveň zajišťuje přenos naklápěcího pohybu z pohyblivého rámu na samotný modul. Vedení je realizováno dvěma kuličkovými pouzdry s centrální přírubou LMEKC-08, které jsou zasunuty a přišroubovány na výše zmíněných patkách svařeného rámu.

5.4 Základní deska

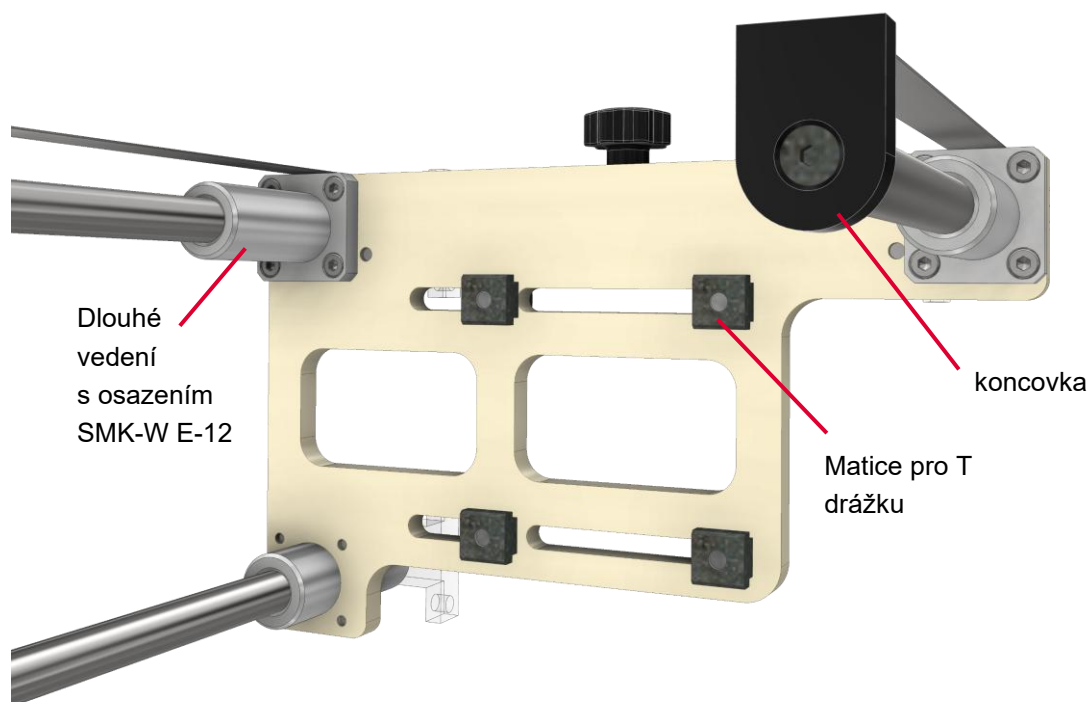
Základní deska tvoří klíčový spojovací prvek mezi horizontální lineární pohonnou jednotkou tribometru BUT Rail a polohovatelným měřicím modulem. Konstrukce desky je topologicky optimalizována s ohledem na dosažení vyšší tuhosti při zachování co nejnižší hmotnosti. Jako výchozí materiál byla zvolena konstrukční ocel S235J0, která vyhovuje pevnostním požadavkům a je vhodná pro následnou povrchovou ochranu zinkováním [33].

Spojení desky s vozíkem lineární jednotky je realizováno pomocí čtyř matic pro T-drážku se závitem M6. Pro příčný posuv měřicího modulu jsou na desce uchycena tři přírubová lineární kuličková pouzdra. Ta společně s jimi procházejícími vodicími tyčemi o průměru 12 mm zajišťují příčný posuv polohovatelného modulu. Tyto tyče jsou na svém druhém konci pevně spojeny s naklápěcím modulem.

K desce je dále připevněn svěrný doraz, kterým procházejí obě horní vodicí tyče. Tento úchyt je z důvodu úspory hmotnosti a využití elastické deformace materiálu vyroben z odolné hliníkové slitiny EN AW-2017 [19]. Zajištění polohy tyčí se provádí utažením středového šroubu s ergonomickou hvězdicovou úchytkou, čímž dojde k pevnému sevření úchyty a zajištění příčného posuvu modulu.



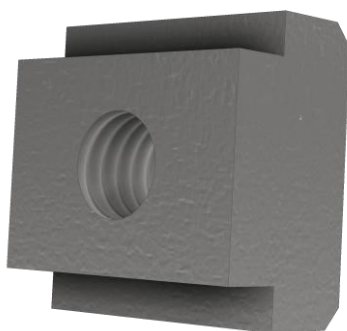
Obr. 5-16 Základní deska z čelní strany



Obr. 5-17 Základní deska ze zadní strany

5.4.1 Matice pro T drážku

Vzhledem k nekompatibilitě vozíku lineární jednotky s běžně dostupnými normovanými díly bylo nutné navrhnout a vyrobit vlastní T-matice. Ty mají přesně definovanou polohu upnutí pomocí otvorů pro šrouby v základní desce. Konstrukce desky navíc obsahuje podélné drážky, které v případě potřeby umožňují variabilní nastavení délkové rozteče matic.



Obr. 5-18 Matice M6 pro T drážku

5.4.2 Sestava příčného vedení

Pro zajištění spolehlivého příčného posuvu je využita kombinace dvou typů přírubových kuličkových pouzder. Dvě horní pozice jsou osazeny prodlouženými pouzdry s osazením SMK-W E-12. Tento typ byl zvolen pro svou delší vodící plochu, která je nezbytná pro zachycení klopných momentů vznikajících při pojezdu měřicího modulu po kolejnici.

Spodní kuličkové vedení je oboustranně přírubového typu LMEKC-12. Je orientováno tak, aby vodící plocha pouzdra zasahovala co nejbližší k měřicímu modulu. Tím je zajištěna maximální opora proti působení tíhové síly během převozu a dostatečná tuhost proti normálové síle, která vzniká v kontaktu mezi kolejnicí a měřicím kolem.

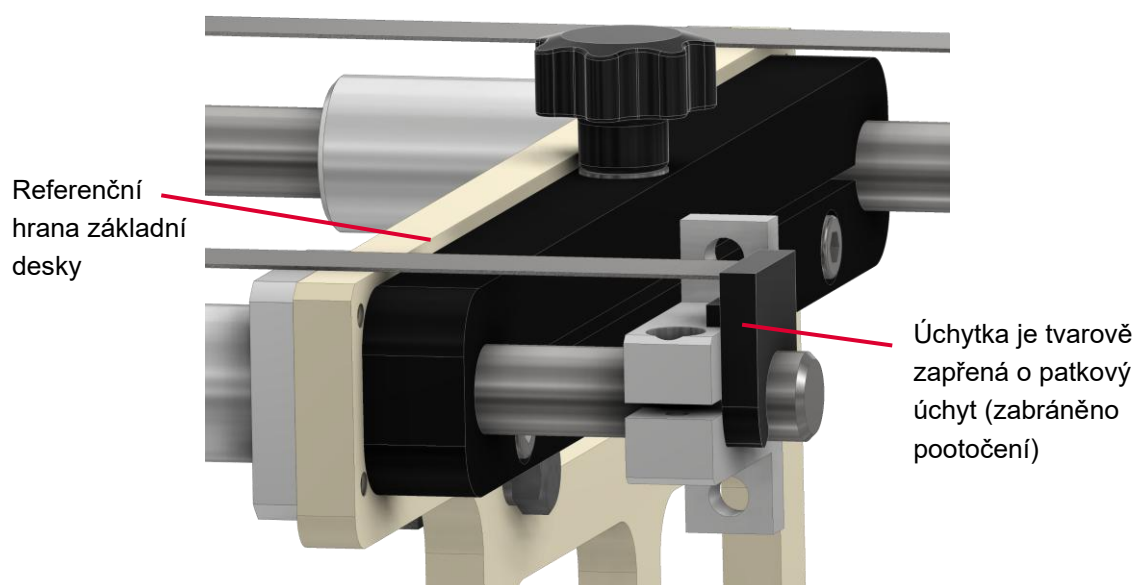
Každé pouzdro je k základní desce uchyceno čtyřmi šrouby M4. Vnější montážní průměr pouzder je vyroben v toleranci h6, což umožňuje přesné obrobení ustavovacích otvorů v základní desce pro dosažení uložení s ideální lícovací vůlí [34].

5.4.3 Zaručení rovnoměrnosti příčného posuvu.

Pro správnou funkci zařízení je nezbytné, aby se měřicí kolo pohybovalo v přesném podélném směru bez nežádoucího úhlového natočení, které by způsobovalo příčný skluz. Toho je docíleno rovnoměrným příčným posuvem celého modulu, čímž se zamezí asymetrickému vysunutí jedné strany vůči druhé.

Kontrola rovnoměrnosti polohy se provádí pomocí dvou pravítek s rozlišením 0,5 mm. Pravítka jsou na horních tyčích příčného posuvu upevněna prostřednictvím 3D tištěných plastových úchytů. První úchyt je na vodící tyči upevněn tvarovým spojem (nacvaknutím), zatímco druhý je pevně přišroubován k jejímu konci. Tento šroubovaný úchyt zde současně plní funkci koncového dorazu, který zabraňuje nechtěnému vysunutí celého modulu z příčného vedení.

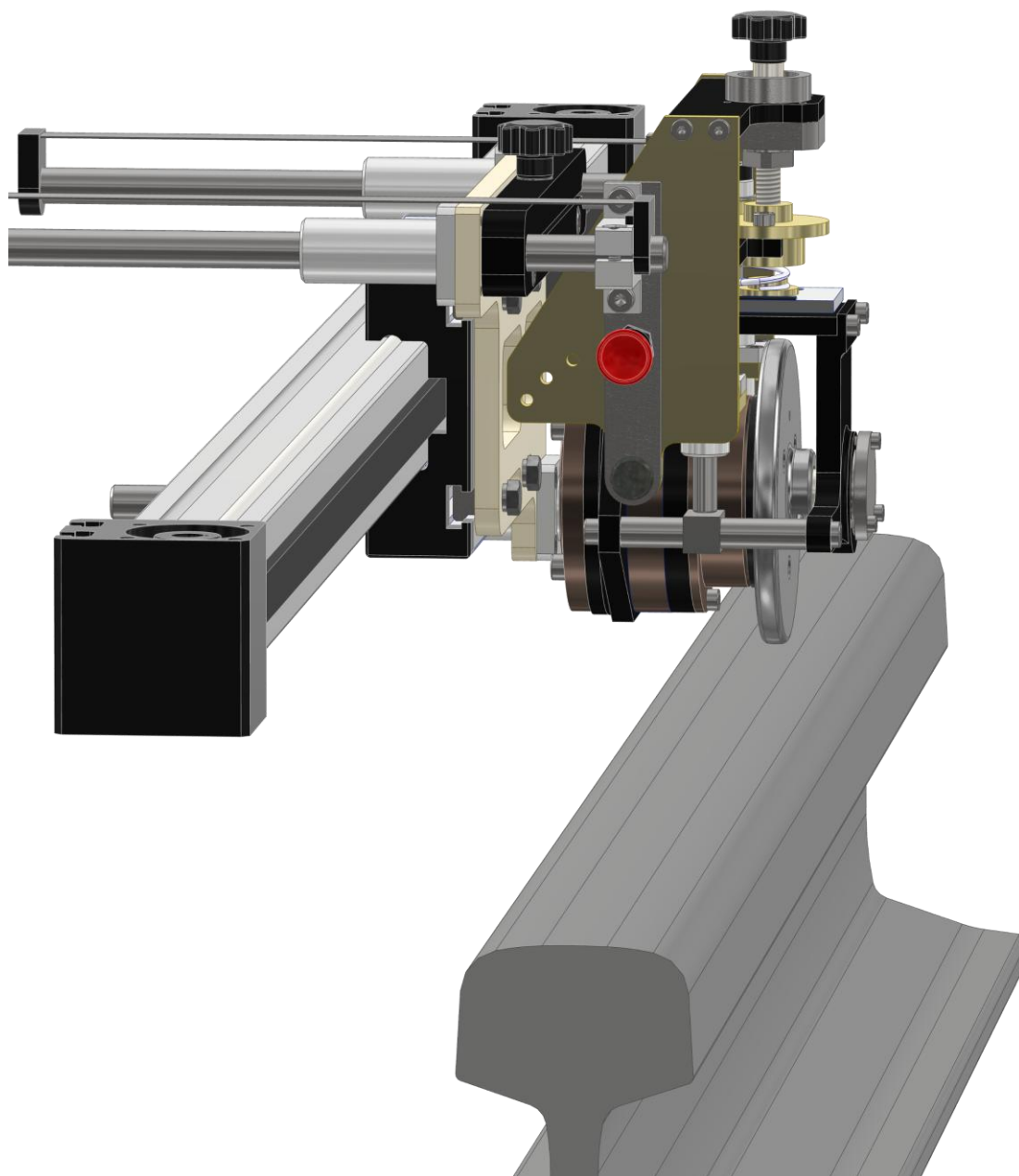
Pravítka jsou do úchytů vlepena a pozičně se nacházejí těsně nad úrovní základní desky. Toto prostorové uspořádání umožňuje snadné a rychlé odečítání délky vysunutí u předního i zadního vedení s využitím čelní hrany základní desky jako referenční roviny. Nastavení shodných hodnot vysunutí na obou pravítkách a následné zajištění posuvu svěrným úchytem je klíčovým předpokladem pro zaručení striktně podélného pohybu měřicího kola.



Obr. 5-19 Uložení pravítek

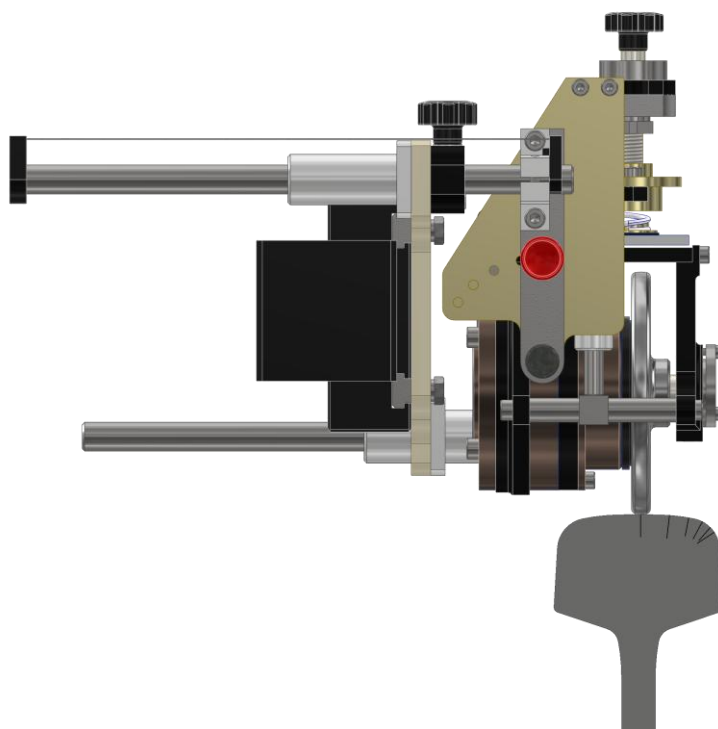
5.5 Výsledná konstrukce v pracovních polohách

5.5.1 Napojení na horizontální lineární pohonnou jednotkou tribometru BUT Rail

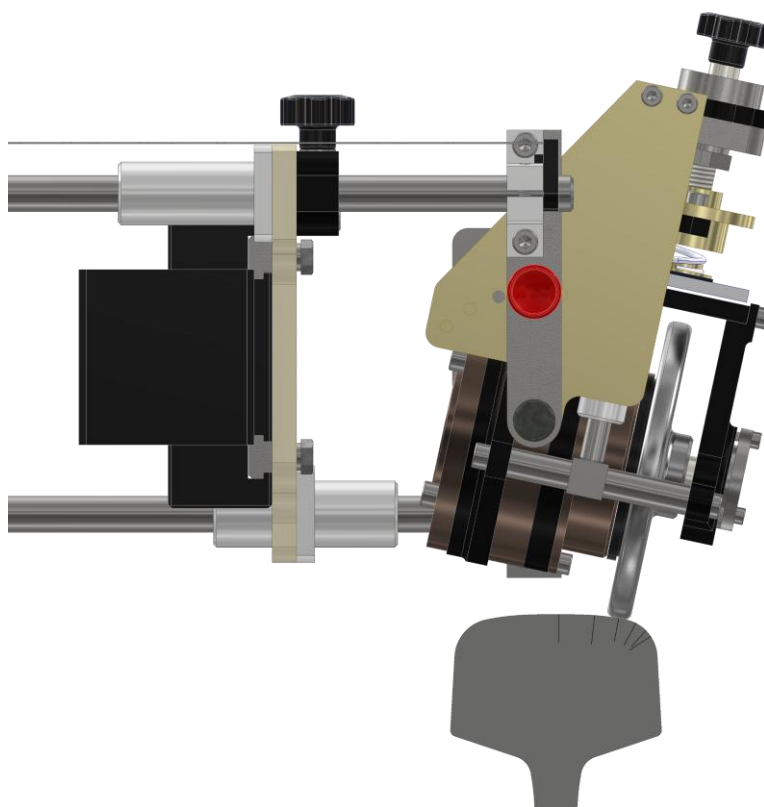


Obr. 5-20 Napojení na horizontální pohonnou jednotku BUT Rail tribometru

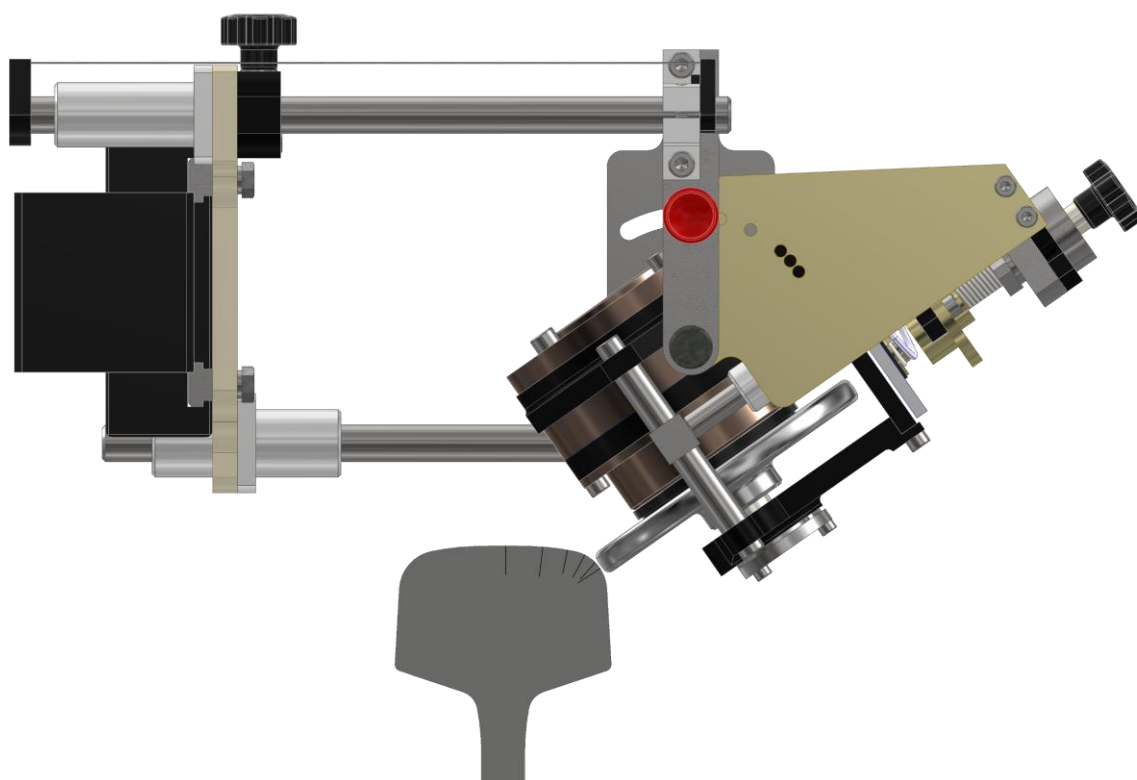
5.5.2 Pracovní polohy na širokopatní kolejnici



Obr. 5-21 Širokopatní kolejnice měřicí poloha 1

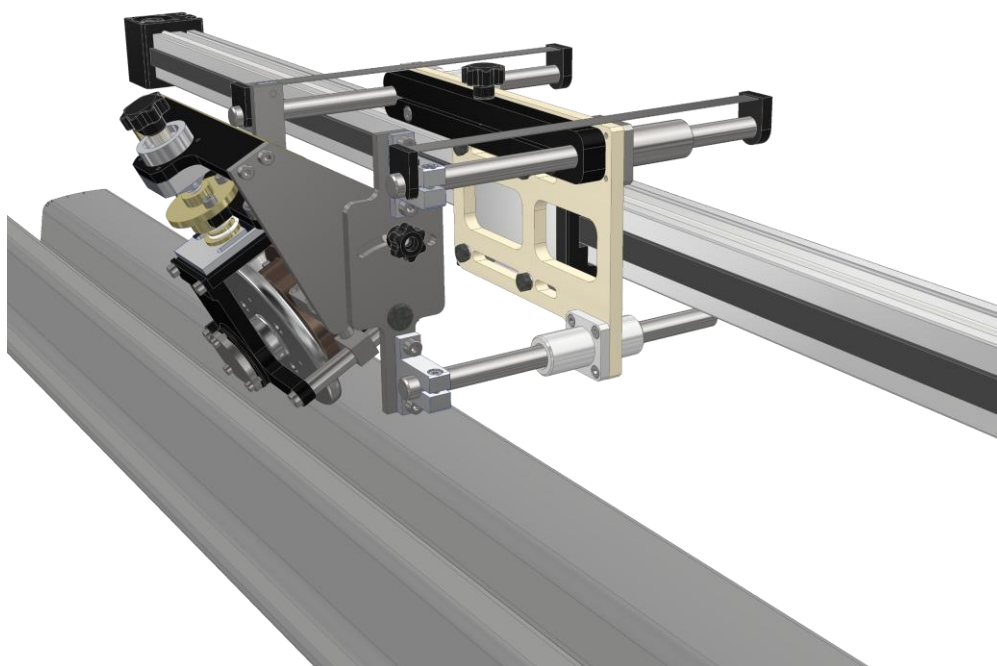


Obr. 5-22 Širokopatní kolejnice měřicí poloha 3

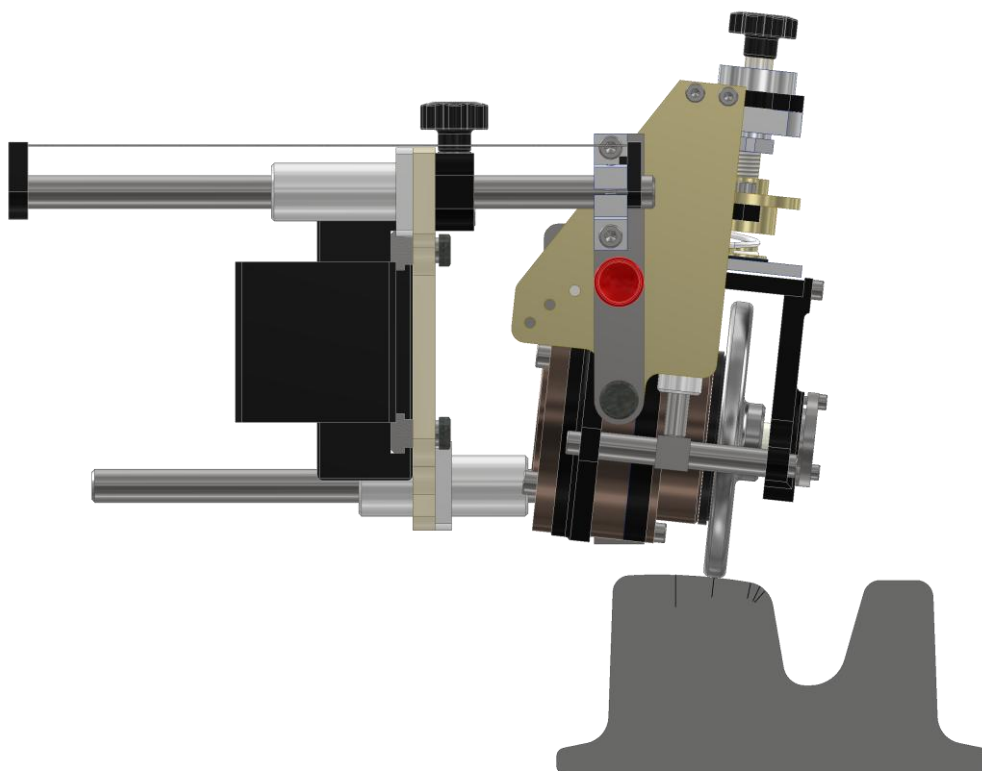


Obr. 5-23 Širokopatní kolejnice měřicí poloha 6

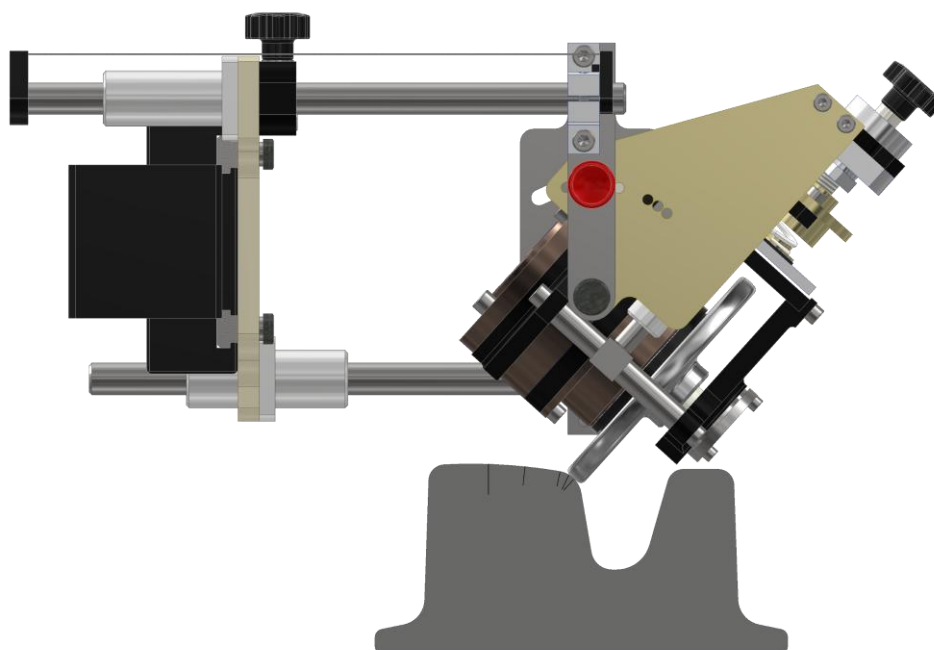
5.5.3 Pracovní polohy na blokové žlábkové kolejnici



Obr. 5-24 Blokovaná žlábková kolejnice měřicí poloha 4



Obr. 5-25 Bloková žlábková kolejnice měřicí poloha 2



Obr. 5-26 Bloková žlábková kolejnice měřicí poloha 5

6 DISKUZE

Při návrhu a konstrukci polohovatelného modulu tribometru bylo nutné čelit řadě technických a praktických výzev definovaných v úvodní analýze. Cílem bylo vytvořit zařízení kompatibilní se stávajícím tribometrem BUT Rail, které umožní přesné měření v šesti definovaných polohách na dvou typech kolejnic, a to při zachování vysoké tuhosti, nízké hmotnosti a ergonomického ovládání.

6.1 Zhodnocení kompatibility a ergonomie

Požadavek na kompatibilitu s horizontální lineární pohonnou jednotkou tribometru BUT Rail byl úspěšně naplněn. Uchycení modulu je realizováno pomocí čtyř matic pro T-drážku, což umožňuje snadnou montáž a výměnu modulů. Měřicí modul využívá stejný princip podélného valivého skluzu jako výchozí zařízení. Z hlediska řídicího softwaru bude nutná pouze částečná úprava – konkrétně re kalibrace programu na rozsahy nově použitých senzorů a doplnění výpočetního modulu pro zobrazování normálové síly působící na kolejnici.

Zásadním úspěchem je splnění cíle týkajícího se ergonomie a hmotnosti. Celý polohovatelný modul má příznivou hmotnost 5,57 kg, což splňuje požadavek na snadnou manipulaci jedním operátorem a minimalizuje parazitní vliv tíhové síly na zatěžovací mechanismus. Samotné polohování modulu je velmi intuitivní a vyžaduje interakci pouze se čtyřmi ergonomickými prvky. Hrubé polohování (největší posuvy) je řešeno rychlým ručním posunutím, zatímco přesné výškové polohování probíhá pomocí otáčení polohovacího čepu. Konstrukce rovněž plně vyhovuje požadavku na snadnou údržbu – čelní bočnice je navržena tak, aby byl zajištěn bezproblémový přístup k měřicímu kolu pro jeho pravidelné čištění od částic třetího tělesa.

6.2 Hodnocení kinematiky a tuhosti

Pro zamezení zkreslení výsledků bylo klíčové zajistit přísně rovnoběžný pohyb s osou kolejnice. Tohoto stavu bylo dosaženo pevnou aretací poloh příčného i výškového posuvu a eliminací asymetrie příčného posuvu pomocí kontrolních pravítek. Díky vymezení vůlí v naklápěcím mechanismu konstrukce vykazuje vysokou celkovou tuhost. Měřicí kolo je v prostoru přesně a stabilně definováno, čímž je zaručen čistý valivý skluz bez nežádoucího příčného smýkání a zvýšených vibrací.

Z hlediska kontaktní mechaniky byla provedena analýza Hertzových kontaktních tlaků pro normálové síly v rozsahu 40–120 N. Na základě výpočtů na všech uvažovaných poloměrech křivosti (Tab. 5-1) je prokazatelné, že systém dosahuje požadovaných kontaktních tlaků 0,7–1 GPa. Nastavení a kontrola této normálové síly je díky implementovanému tenzometrickému snímači a zatěžovacímu modulu pro obsluhu velmi jednoduchá.

6.3 Dosažení měřicích poloh a konstrukční limity

Požadavek na adaptabilitu profilu byl vyřešen kombinací tří nezávislých pohybů: příčného posuvu, výškového posuvu a excentrického naklápění měřicího modulu. Tato trojkombinace poskytuje modulu dostatečnou univerzálnost, díky níž je schopen měřit i v terénu na reálných, opotřebovaných profilech kolejnic.

Při hodnocení splnění hlavního cíle – tedy měření v šesti definovaných polohách na širokopatní i blokové žlábkové kolejnici – je však nutné upozornit na konstrukční nedostatek. Zatímco na širokopatní kolejnici lze bez problému změřit všech 6 poloh, u blokové žlábkové kolejnice nelze dosáhnout měřicí polohy č. 6 (nejnižší bod na vodící hraně). Při naklopení mechanismu do tohoto úhlu dochází ke kolizi samotného těla měřicího modulu s tělesem kolejnice. Zbylých 5 poloh lze na žlábkové kolejnici měřit standardně. K úplnému odstranění tohoto nedostatku by bylo nutné změnit konstrukci měřicího modulu, ideálně přechodem na jednostranné zavěšení kola.

6.4 Možnost dalšího vylepšení zařízení

Jako další vývojový krok je navrhována úprava celkové koncepce měřicího modulu. Přechodem na jednostranné zavěšení měřicího kola by byl definitivně vyřešen problém s kolizí u blokové žlábkové kolejnice, čímž by byla zpřístupněna i poslední měřicí poloha na vodící hraně.

Systém by bylo možné osadit elektronickou detekcí polohy naklápěcího modulu (pro pozice 1–6). Řídící jednotka by následně mohla automaticky dopočítávat potřebnou přitlačnou sílu zatěžovacího mechanismu v závislosti na úhlu naklopení, bez nutnosti ručního zadávání.

Vzhledem k častému měření na značně opotřebovaných profilech kolejnic mimo laboratoř by bylo vhodné vybavit měřicí modul laserovým snímačem. Ten by kontroloval exaktní kolmost měřicího kola vůči aktuální tečně povrchu kolejnice, což by výrazně omezilo chyby vnesené odhadem operátora.

Pro jemnější regulaci a zpřesnění měření odporů se dále nabízí implementace elektromagnetické brzdy s nižším maximálním momentem. Pro navrženou konfiguraci zařízení by byla dostačující brzda s maximálním brzdným momentem 5 Nm. Jelikož brzda s touto specifikací a požadovanou prostorově úspornou konstrukcí není na trhu běžně dostupná, k realizaci tohoto vylepšení by bylo nezbytné dojednat zakázkovou úpravu přímo s výrobcem.

7 ZÁVĚR

Tato bakalářská práce se zabývala návrhem a konstrukcí výměnného polohovatelného modulu pro přenosný tribometr BUT Rail, určeného pro detailní diagnostiku adhezních a třecích vlastností v rozhraní kola a kolejnice. Hlavním cílem práce bylo vyvinout mechanismus, který věrně simuluje princip podélného valivého skluzu a umožňuje přesné měření součinitele tření v šesti definovaných polohách napříč profilem temene a vodící hrany kolejnice.

Při řešení této problematiky byl uplatněn systematický konstrukční přístup. Pro každý hlavní uzel sestavy – měřicí modul, zatěžovací mechanismus s výškovým posuvem, naklápěcí modul a lineární vedení příčného posuvu – bylo nejprve vypracováno několik koncepčních variant. Tyto varianty byly následně podrobeny kritickému zhodnocení z hlediska celkové tuhosti, prostorové náročnosti, hmotnosti a ergonomie obsluhy. Na základě tohoto zhodnocení byla pro každou část vybrána optimální koncepce, z nichž byl následně sestaven finální 3D model celého zařízení.

Výsledkem práce je detailní konstrukční návrh polohovatelného měřicího uzlu, který se vyznačuje příznivou celkovou hmotností (5,57 kg), což usnadňuje jeho mobilitu a obsluhu v terénu. Návrh prokazuje, že rozdělení polohování do tří nezávislých rovin – příčného posuvu, výškového posuvu se zatěžovacím mechanismem a excentrického naklápění – představuje efektivní koncepci. Toto prostorové uspořádání zajišťuje požadovanou univerzálnost nezbytnou pro měření na reálných, často nepravidelně opotřebených profilech kolejnic. Provedené analytické výpočty, následně ověřené ve specializovaném simulačním softwaru, potvrdily, že navržený zatěžovací mechanismus s integrovaným tenzometrickým snímačem spolehlivě generuje požadované Hertzovy kontaktní tlaky. Ty plně odpovídají reálnému provoznímu zatížení v rozmezí 0,7 až 1 GPa, a to napříč všemi uvažovanými poloměry křivosti kolejnic.

Z hlediska splnění cílů lze konstatovat, že zadání bylo úspěšně naplněno. Navržené zařízení je plně kompatibilní s horizontální lineární jednotkou stávajícího tribometru a splňuje nároky na snadnou ergonomii i údržbu. Na standardní širokopatní kolejnici modul bez problémů dosahuje všech šesti požadovaných měřicích poloh. Během detailního prostorového návrhu však byl identifikován konstrukční limit týkající se blokové žlábkové kolejnice. Z důvodu geometrické kolize tělesa modulu s hranou tohoto specifického typu kolejnice nelze bezpečně dosáhnout nejnižší měřicí polohy číslo 6. K úplnému vyřešení tohoto nedostatku by byla nutná změna koncepce měřicího uzlu (např. přechod na jednostranné zavěšení kola), což je navrženo jako hlavní krok pro případný další vývoj zařízení.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. METALELEKTRO MEASURING TECHNIQUE LTD. *Rail lubrication*. Online. METALELEKTRO MEASURING TECHNIQUE LTD. Metalelektro Measuring Technique. 2018. Dostupné z: <https://www.metalelektro.eu/rail-lubrication>. [cit. 2026-05-21].
2. EADIE, Donald T. a A KOL. Field assessment of friction and creepage with a new tribometer. In: *11th International Conference on Contact Mechanics and Wear of Rail/Wheel Systems (CM2018)*. Delft, The Netherlands: TU Delft, 2018, s. 208-217. ISBN 978-94-6186-963-0. ISSN -.
3. RIVELIN RAIL. *PRT300 Portable Rail Tribometer*. Online. Rivelin Rail. 2025. Dostupné z: <https://rivelinrail.com/tribometer>. [cit. 2026-05-21].
4. WHITE, Ben; WATSON, Michael; JAFFE, Joseph a LEWIS, Roger. A field methodology to assess the performance of rail cleaning, using a new portable tribometer. Online. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*. 2025, roč. 239, č. 5, s. 421-430. ISSN 0954-4097. Dostupné z: <https://doi.org/10.1177/09544097251321031>. [cit. 2026-05-21].
5. *Kolejový svršek tvořený kolejnicí S49*. Online. Pražské tramvaje. 2010. Dostupné z: <https://www.prazsketramvaje.cz/view.php?cislocclanku=2010031701>. [cit. 2026-05-21].
6. ČESKÉ DRÁHY. *S67: Vady a lomy kolejnic*. Online. Iwan.eu07.pl. 1997. Dostupné z: http://iwan.eu07.pl/jw/john_woods2008/predpisy/S/S67.pdf. [cit. 2026-05-21].
7. PLÁŠEK, Otto. *Železniční stavby: železniční spodek a svršek*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004. ISBN 80-214-2621-7. Dostupné také z: <http://krameriusndk.nkp.cz/search/handle/uuid:f051e190-dc5f-11e5-a3e0-005056827e51>.
8. HARRISON, H; MCCANNEY, T a COTTER, J. Recent developments in coefficient of friction measurements at the rail/wheel interface. Online. *Wear*. 2002, roč. 253, č. 1-2, s. 114-123. ISSN 0043-1648. Dostupné z: [https://doi.org/10.1016/s0043-1648\(02\)00090-x](https://doi.org/10.1016/s0043-1648(02)00090-x). [cit. 2026-05-22].
9. HARRISON, Harold. The development of a low creep regime, hand-operated tribometer. Online. *Wear*. 2008, roč. 265, č. 9-10, s. 1526-1531. ISSN 0043-1648. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.wear.2008.03.028>. [cit. 2026-05-21].
10. HARRISON, Harold. Producing and Measuring the 3rd Body Layer. In: *2020 Joint Rail Conference*. St. Louis: American Society of Mechanical Engineers, 2020, s. 1-7. ISBN 978-0-7918-8358-7. ISSN 2590-0609. Dostupné z: <https://doi.org/10.1115/jrc2020-8095>.

11. VALENA, Martin; OMASTA, Milan; KVARDA, Daniel; GALAS, Radovan; KRUPKA, Ivan et al. An approach for the creep-curve assessment using a new rail tribometer. Online. *Tribology International*. 2024, roč. 191, s. 109153. ISSN 0301-679X. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.triboint.2023.109153>.
12. SINFONIA TECHNOLOGY CO., LTD. *Clutches and Brakes*. Online. SINFONIA TECHNOLOGY. Bez roku. Dostupné z: <https://www.sinfo-t.com/clutches-brakes/download-products/>. [cit. 2026-05-21].
13. MN SYSTEMS. *Elektromagnetické brzdy : Brzda EFAL*. Online. MN systems. [2026]. Dostupné z: <https://mnsystems.cz/spojky-brzdy-omezovace-momentu/brzdy/elektromagneticke-brzdy/brzda-efal-detail>. [cit. 2026-05-21].
14. FORSENTEK CO., LIMITED. *Torque sensor FTHB*. Online. Forsentek. [2026]. Dostupné z: http://www.forsentek.com/down/torque_sensor_FTHB.pdf. [cit. 2026-05-21].
15. RITCLFS. *Static Torque Sensor T903B*. Online. RITCLFS. [2026]. Dostupné z: <https://www.ritclfs.com/static-torque-sensor/static-torque-sensor-t903b>. [cit. 2026-05-21].
16. RAVEO. *BEGE MIG NOVA: Technický katalog*. Online. RAVEO. 2023. Dostupné z: https://www.raveo.cz/productmanager/wp-content/uploads/2023/01/bege_mig_nova_cz.pdf. [cit. 2026-05-21].
17. VPG FORCE SENSORS. *Low Profile Single-Point*. Online. VPG Force Sensors. 2024. Dostupné z: <https://docs.vpgforcesensors.com/?id=2726>. [cit. 2026-05-21].
18. VPG FORCE SENSORS. *Model 380 Co-Planar Beam Load Cell*. Online. VPG Force Sensors. 2023. Dostupné z: <https://docs.vpgforcesensors.com/?id=8530>. [cit. 2026-05-21].
19. ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. ČSN EN 755-2, *Hliník a slitiny hliníku – Tyče, trubky a profily tažené – Část 2: Mechanické vlastnosti*. Praha: ÚNMZ, 2016.
20. SKF GROUP. *Deep groove ball bearings*. Online. SKF. 2026. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings>. [cit. 2026-05-21].
21. *MATERIÁLY A TVARY KOLEJNIC V KOLEJOVÉ DOPRAVĚ*. BAKALÁŘSKÁ PRÁCE. Brno: VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ, 2019.
22. TOTAL MATERIA. *EN R260 Structural and constructional steels*. Online. Total Materia. 2026. Dostupné z: <https://www.totalmateria.com/en-us/material/1470353>. [cit. 2026-05-21].
23. BOHÁČEK, František. *Části a mechanismy strojů I. Zásady konstruování. Spoje*. 2., dopl. vyd. Brno: Ediční středisko VUT, 1984.
24. MATIS S.R.O. *FK - uložení přírubové pevné*. Online. Matis. 2026. Dostupné z: <https://www.matis.cz/cs/produkt/fk-ulozeni-prirubove-pevne>. [cit. 2026-05-21].

25. SODEMANN PRUŽINY. *Pružina C07200810750M*. Online. Sodemann Pružiny. 2026. Dostupné z: <https://www.sodemannpruziny.cz/c07200810750m>. [cit. 2026-05-21].
26. PRŮMEX. *SELFOIL B70A 324035 pouzdro kluzné, slinutý bronz*. Online. PRŮMEX. 2026. Dostupné z: <https://www.prumex.cz/selfoil-b70a-324035-pouzdro-kluzne-slinuty-bronz/>. [cit. 2026-05-21].
27. SIMAF. *Nýtovací šroub M5*. Online. SIMAF. 2026. Dostupné z: <https://shop.simaf.cz/nytovaci-technika/nytovaci-sroub-m5/>. [cit. 2026-05-21].
28. MAREK INDUSTRIAL. *Aretační čepy*. Online. MAREK Industrial. 2026. Dostupné z: <https://www.marek.eu/zajistovaci-prvky/aretacni-cepy/>. [cit. 2026-05-21].
29. *Friction management at the wheel-rail interface*. Online. In: INSTITUTE OF RAILWAY TECHNOLOGY, MONASH UNIVERSITY. Monash University. 2015. Dostupné z: https://www.monash.edu/_data/assets/pdf_file/0005/879611/Friction-management-at-the-wheel-rail-interface.pdf. [cit. 2026-05-21].
30. SPIRYAGIN, Maksym; HARRISON, Harold; WU, Qing; NIELSEN, Dwayne; COLE, Colin et al. *Locomotive Adhesion Control Rail Friction Field Measurements = ?*. In: *Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Cham: Springer International Publishing, 2020, s. 433-441. ISBN 9783030380762. ISSN 2195-4356. Dostupné z: https://doi.org/10.1007/978-3-030-38077-9_51.
31. *Semi Automatic hand push rail tribometer: Model HPRTM/3/ACNC*. Online. In: ACCURATE TECHNOLOGIES. IndiaMART. 2026. Dostupné z: <https://www.indiamart.com/proddetail/hand-push-rail-tribometer-2855723008362.html>. [cit. 2026-05-21].
32. ÚNMZ. ČSN EN 10025-2, *Výrobky z konstrukčních ocelí – Část 2: Technické dodací podmínky pro nelegované konstrukční oceli*. Praha: ÚNMZ, 2020.
33. ÚNMZ. ČSN EN 10088-3, *Korozivzdorné oceli – Část 3: Technické dodací podmínky pro polotovary z korozivzdorných ocelí pro všeobecné použití*. Praha: ÚNMZ, 2015.
34. MATIS S.R.O. *MK-W E - s osazením, dlouhé (NB)*. Online. Matis. 2026. Dostupné z: <https://www.matis.cz/cs/produkt/smk-w-e-s-osazenim-dlouhe-nb>. [cit. 2026-05-22].

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

9.1 Seznam použitých fyzikálních veličin

r_{1x}	[mm]	hlavní poloměr měřicího kola
r_{1y}	[mm]	poloměr příčného zaoblení měřicího kola
r_{2x}	[mm]	poloměr kolejnice v podélném směru
r_{y2}	[mm]	poloměr příčného profilu hlavy kolejnice
E_1, E_2	[GPa]	modul pružnosti v tahu
μ_1, μ_2	[-]	Poissonovo číslo
E_r	[GPa]	redukovaný modul pružnosti
$\rho_{1x}, \rho_{1y}, \rho_{2x}, \rho_{2y}$	[mm ⁻¹]	křivosti poloměrů
θ_1, θ_2	[(m*s ²) /kg]	elastické konstanty
τ	[°]	pomocný úhel
a, b	[mm]	poloměry dotykové elipsy
k	[-]	poměr poloměrů dotykové elipsy
F^x	[-]	úplný eliptický integrál 1. druhu
E^x	[-]	úplný eliptický integrál 2. druhu
p_{max}	[GPa]	maximální Hertzův tlak v dotyku kola a kolejnice
f_n	[-]	návrhový součinitel tření
F_n	[N]	návrhová normálová síla
F_t	[N]	třecí síla
F_N	[N]	normálová síla
F_p	[N]	přítlačná síla zatěžujícího modulu
M_K	[Nm]	krouticí moment
g	[m/s ²]	gravitační zrychlení
α	[°]	úhel naklopení měřicího kola
G	[N]	tíhová síla polohovatelného tribometru
G_N	[N]	tíhová síla v normálovém směru

m	[kg]	celková hmotnost polohovatelného modulu
m_i	[kg]	izolovaná hmotnost součástí působících na kolejnici

9.2 Seznam použitých zkratk

μ	součinitel tření
CoT	součinitel trakce
HO	ručně ovládaný

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1 Skluzová křivka [8]	17
Obr. 2-2 Základní typy kolejnic [7]	21
Obr. 2-3 Standardizovaný profil B1	21
Obr. 2-4 Zakótovaný profil kolejnice a) S 49; b) UIC 60 [5]	22
Obr. 2-5 Standardizovaný profil NT1	22
Obr. 2-6 a) Boční opotřebení (ojetí) hlavy kolejnice; b) Svislé opotřebení [6].....	23
Obr. 2-7 Ručně tlačенý Salient Push tribometr [29]	24
Obr. 2-8 OnTrak Ho (ručně ovládaný) tribometr [30]	26
Obr. 2-9 Pozice měřicího kola OnTrak Ho tribometr [2].....	27
Obr. 2-10 Rivelin Rail PRT300 přenosný tribometr [4]	28
Obr. 2-11 Mechanismus Rivelin Rail PRT300 [3]	29
Obr. 2-12 Ručně tlačенý tribometr TriboRoll [31]	29
Obr. 2-13 BUT Rail tribometr a měřicí modul [11]	30
Obr. 3-1 Měřená místa na širokopatní kolejnici	33
Obr. 4-1 Model brzdy TB-260/FMS	37
Obr. 4-2 Jednokotoučová brzda s laminovou kotvou EFAL [13].....	37
Obr. 4-3 Upnutí pomocí svěrného pouzdra	38
Obr. 4-4 Upnutí pomocí stavěcích šroubů s čípkem.....	39
Obr. 4-5 Přírubový enkodér MIG NOVA+ [16]	39
Obr. 4-6 Statický senzor krouticího momentu T903B [15]	40
Obr. 4-7 Senzor krouticího momentu FTBH-5NM [14]	41
Obr. 4-8 Pevná trapézová matice, posuvný čep.....	42
Obr. 4-9 Otočný čep s pevným svislým uložením a posuvnou maticí.....	43
Obr. 4-10 Tenzometr VPG Celtron LPS [17]	43
Obr. 4-11 Tenzometr VPG model 380 [18].....	44
Obr. 4-12 Excentricita osy rotace	45
Obr. 4-13 Vodící tyče na základní desce, pouzdra na naklápěcím modulu	46
Obr. 4-14 Vodící tyče na naklápěcím modulu, pouzdra na základní desce	47

Obr. 5-1 Konstrukční řešení polohovatelného modulu tribometru.....	48
Obr. 5-2 Měřicí modul	50
Obr. 5-3 Závislost F^x , E^x a k na τ	52
Obr. 5-4 Výpočet v programu HertzWin.....	53
Obr. 5-5 Uložení hřídele	55
Obr. 5-6 Zatěžovací modul a výškový posuv	56
Obr. 5-7 Ukázka pevného přírubového uložení FK 08 [24].....	57
Obr. 5-8 Uložení pružiny.....	57
Obr. 5-9 Sestava svislého vedení zatěžovacího modulu	58
Obr. 5-10 Izolované součásti jejichž váha působí na kolejnici	60
Obr. 5-11 Pohled na naklápěcí modul v měřicí poloze 1	61
Obr. 5-12 Pohled na naklápěcí modul v měřicí poloze 4	61
Obr. 5-13 Nýtovací šroub po montáži [27]	62
Obr. 5-14 Aretační čep v zasunuté poloze	63
Obr. 5-15 Zajištění nýtovacím šroubem.....	64
Obr. 5-16 Základní deska z čelní strany	65
Obr. 5-17 Základní deska ze zadní strany.....	65
Obr. 5-18 Matice M6 pro T drážku.....	66
Obr. 5-19 Uložení pravítek.....	67
Obr. 5-20 Napojení na horizontální pohonnou jednotku BUT Rail tribometru	68
Obr. 5-21 Širokopatní kolejnice měřicí poloha 1	69
Obr. 5-22 Širokopatní kolejnice měřicí poloha 3	69
Obr. 5-23 Širokopatní kolejnice měřicí poloha 6	70
Obr. 5-24 Blokova žlábková kolejnice měřicí poloha 4	70
Obr. 5-25 Blokova žlábková kolejnice měřicí poloha 2	71
Obr. 5-26 Blokova žlábková kolejnice měřicí poloha 5	71

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 5-1 Hodnoty Hertzova kontaktního tlaku pro různé normálové síly	54
Tab. 5-2 Hodnoty tíhové síly v normálovém směru	59

12 SEZNAM PŘÍLOH

- A: Výkres sestavy polohovatelného modulu
- B: Kusovník sestavy polohovatelného modulu
- C: Výkres sestavy měřicího modulu
- D: Kusovník sestavy měřicího modulu
- E: Výrobní součásti hřídele
- F: Výrobní výkres bočnice 1
- H: Výkres svařence svarek rámu 1