



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

KONSTRUKČNÍ NÁVRH PRVKŮ TRIBOMETRU S RECIPROČNÍM POHYBEM

DESIGN OF PARTS OF TRIBOMETER WITH RECIPROCATING MOTION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Dražka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Pavel Čípek

BRNO 2017

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav konstruování
Student:	Ondřej Dražka
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Pavel Čípek
Akademický rok:	2016/17

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:

Konstrukční návrh prvků tribometru s recipročním pohybem

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Poddajné kontakty se vyskytují v mnoha aplikacích. Jako příklad lze uvést styk stěrače a skla nebo kontakt kloubních chrupavek. Laboratoř Ústavu konstruování prozatím nedisponuje experimentálním zařízením, které by umožňovalo analyzovat tloušťku mazacího filmu a součinitel tření při recipročním pohybu. Navržené experimentální zařízení umožní další výzkum v oblasti poddajných kontaktů.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem práce je konstrukční návrh pohybového mechanismu a modulu pro měření tření.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- rešeršní studie současných tribometrů s recipročním pohybem,
- návrh mechanismu pohybu včetně vedení,
- návrh modulu pro měření tření,
- vytvoření 3D modelu,
- vytvoření výkresové dokumentace.

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

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

Struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2017.pdf

Seznam doporučené literatury:

MARJANOVIC, N., et al. Design of Modern Concept Tribometer with Circular and Reciprocating Movement. Tribology in industry. 2006, 28(3,4), 3-8.

MOORE, A. C. a D. L. BURRIS. New Insights Into Joint Lubrication. Tribology & Lubrication Technology, 2016, 72(5), 26-32. ISSN 1545-858X.

MCCANN, L., et al. Tribological testing of articular cartilage of the medial compartment of the knee using a friction simulator. Tribology International, 2008, 41(11), 1126-1133.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem prvků pro tribometr s recipročním pohybem. Na základě stávajících výzkumů je sestaveno několik koncepčních řešení, z nichž je vybráno to nejvhodnější pro danou aplikaci. Tribometr bude sloužit pro experimentální měření na reálné chrupavce, která by měla vést k lepšímu pochopení třecích a mazacích procesů v synoviálním kloubu. Výsledkem této práce jsou jednotlivé navržené prvky spolu s výrobními výkresy.

KLÍČOVÁ SLOVA

Pin-on-slab tribometr, tření, biotribologie, chrupavka, kloubní náhrady

ABSTRACT

The bachelor thesis deals with design of parts of tribometer with reciprocating motion. Several conceptual solutions are made on base of existing studies from which the best solution for given application is selected. The tribometer will be used for experimental measuring on real cartilage which should lead to better understanding of friction and lubrication processes in synovial joint. The outcome of this thesis are component parts along with the manufacturing drawings.

KEYWORDS

Pin-on-slab tribometer, friction, biotribology, cartilage, joint replacement



BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DRAŽKA, O. *Konstrukční návrh prvků s recipročním pohybem*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2017. 43 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Pavel Čípek.



PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Pavla Čípka s využitím informací a zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 19. 05. 2017

.....
Ondřej Dražka



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval svému vedoucímu Ing. Pavlu Čípkovi za mnoho cenných rad a připomínek v průběhu řešení této diplomové práce. Také bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu.



OBSAH

1	Úvod	10
2	Přehled současného stavu poznání	11
2.1	Definice základních pojmů	11
2.1.1	Tření	11
2.1.2	Opotřebenění	11
2.1.3	Mazání	11
2.2	Úvod do tribologie	11
2.2.1	Úvod do biotribologie.....	12
2.2.2	Kloubní náhrady	12
2.2.3	Náhrada kyčelního kloubu.....	13
2.2.4	Náhrada kolenního kloubu.....	14
2.3	Zařízení pro tribologický výzkum	15
2.3.1	Typy tribometrů	15
2.3.2	Tribometry podle typu těles v kontaktu.....	16
2.4	Reálné tribometry Pin-on-slab	19
2.4.1	UMT TriboLab	20
2.4.2	Rtec Universal Tribometer	21
2.4.3	Rozbor stávajících výzkumů s použitím tribometrů s recipročním pohybem	21
3	Analýza problému a cíl práce	24
4	Koncepční řešení	25
4.1	Pohybový mechanismus – Řemenový převod a krokový motor	25
4.2	Pohybový mechanismus – Klikový mechanismus a elektromotor	25
4.3	Pohybový mechanismus – Lineární elektromotor	26
4.4	Pohybový mechanismus – Kuličkový šroub a elektromotor	27
4.5	Lineární vedení	27
4.6	Modul pro měření součinitele tření.....	28
4.6.1	Měření deformace pomocí tenzometrického snímače zatížení.....	28
4.6.2	Měření deformace pomocí optiky	29
5	Konstrukční řešení	30
5.1	Realizace pohybového mechanismu	30
5.2	Realizace lineárního vedení	31
5.3	Realizace modulu pro měření tření	31
6	Diskuze	34
6.1	Pohybový mechanismus	34
6.2	Lineární vedení	34
6.3	Modul pro měření tření	34
7	Závěr	36
8	Seznam použitých zdrojů	37
9	Seznam použitých zkratk, symbolů a veličin	40
10	Seznam obrázků	41
11	Seznam příloh	42

1 ÚVOD

Vědní obor biotribologie se zabývá procesy při styku dvou materiálů, z nichž alespoň jeden je biologický. Mezi tyto procesy patří tření, opotřebení a mazání. Tyto pojmy spolu úzce souvisí. Opotřebení je důsledkem tření, které lze snížit mazáním. K lepšímu poznání těchto procesů se provádí měření přístrojem k tomu určenému – tribometrem. V synoviálních kloubech lidského těla je součinitel tření velmi nízký (řádově desetiny až setiny). Jedním z důvodů je přítomnost synoviální kapaliny, která slouží jako mazivo. Dalším důvodem je specifická pórovitá struktura chrupavky a vlastnosti povrchu. S rostoucím věkem však dochází k opotřebení kloubů a může dojít až k vymizení tkáně chrupavky, což vede ke kloubnímu onemocnění – osteoartróze. Tento proces je doprovázen bolestmi v oblasti kloubu. Experimenty prováděny na reálných kloubních chrupavkách mohou přispět k pochopení biotribologických procesů v synoviálních kloubech lidského těla a následně navrhnout vhodnou konzervační léčbu pro klouby postižené osteoartrózou. V laboratořích Ústavu konstruování (ÚK) na Fakultě strojního inženýrství (FSI) Vysokého učení technického (VUT) v Brně v současné době není tribometr, kterým by bylo možné měřit součinitel tření spolu s tloušťkou mazacího filmu. Cílem této práce je návrh prvků právě takového zařízení. Práce spočívá v rešeršní studii současných tribometrů, následně pak návrhu pohybového mechanismu včetně vedení a modulu pro měření tření s ohledem na zadané parametry a požadavky.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

2

2.1 Definice základních pojmů

2.1

2.1.1 Tření

2.1.1

Tření je odpor, který je kladen objekty v kontaktu při jejich vzájemném pohybu nebo pokusu o pohyb [1]. S třením úzce souvisí třecí síla. Ta v případě suchého tření závisí na normálovém zatížení a na drsnosti povrchů v kontaktu [2].

2.1.2 Opotřebení

2.1.2

V důsledku tření dvou materiálů dochází k jejich opotřebení, tj. úbytku materiálů. Opotřebení je nežádoucí jev, který je snaha eliminovat. Mezi základní typy opotřebení patří:

- abrazivní opotřebení
- adhezivní opotřebení
- erozivní opotřebení
- korozní opotřebení
- únavové opotřebení [2], [3]

2.1.3 Mazání

2.1.3

Pomocí mazání se snižuje tření, opotřebení a zahřívání třecích povrchů. Podle [4] rozlišujeme těchto pět režimů mazání:

- hydrodynamické mazání
- hydrostatické mazání
- elastohydrodynamické mazání
- mezní mazání
- mazání tuhými mazivy

2.2 Úvod do tribologie

2.2

Pojem tribologie vznikl spojením řeckých slov *tribos* a *logos*, což lze přeložit jako *věda o tření*. Termín tribologie se poprvé objevil v roce 1966, kdy byla v Británii komise pod vedením P.H. Josta vydána zpráva zabývající se třením a s ním spojeným opotřebením a mazáním. Tribologie se jako vědní obor zabývá interakcí těles při jejich relativním pohybu nebo pokusu o vzájemný pohyb [5].

Třením se zabýval například Leonardo da Vinci, který jako první přišel na to, že třecí síla je přímo úměrná normálovému zatížení. Mezi další významné vědce v této oblasti patří francouzští fyzici Guillaume Amontons a Charles-Augustin de Coulomb, kteří dali vzniknout dnešním *Amontons-Coulombovým zákonům* (známým také jako *Zákony suchého tření*). Věda o tření patří k poměrně mladým vědním oborům a největší vývoj zaznamenala v 19. století během průmyslové revoluce a po druhé světové válce [6].

2.2.1 Úvod do biotribologie

Pojem biotribologie byl poprvé použit Dowsonem v roce 1970. Ten jej definoval jako „ty aspekty tribologie, které se zabývají biologickými systémy“.

Do této oblasti spadá:

- tribologie kloubů (synovia, chrupavky, kloubní náhrady...)
- tribologie kůže (kontakt kůže s oblečením, podráždění kůže při holení, úchop objektů, péče o pokožku...)
- tribologie ústní dutiny (zuby, zubní implantáty, jazyk, polykání...)
- tribologie ostatních částí těla (buňky, krevní řečiště, vlasy, oko a kontaktní čočky...)

Biotribologie je v poslední době jedním z nejrychleji se rozvíjejících odvětví tribologie [7].

2.2.2 Kloubní náhrady

Za jednu z nejvíce rozšířených oblastí biotribologie se dá považovat první zmíněný příklad, tedy tribologie kloubů, zejména pak kyčelního a kolenního (obr. 2-1, 2-2). Tyto klouby (někdy označované jako velké klouby dolních končetin) mají zásadní význam pro mobilitu člověka a velmi často bývají zasaženy osteoartrózou, či jinými nemocemi. Při tomto chronickém kloubním onemocnění dochází k poškození a postupnému úbytku chrupavky, v krajních případech k jejímu vymizení. Tento proces je doprovázen bolestí v oblasti postižených kloubů. Řešením je pak totální endoprotéza (dále jen TEP), tedy operace, při které je kloub nahrazen kloubní náhradou) [8], [9].

K oddálení operace se využívá tzv. *viskosuplementace*. Jedná se o aplikaci roztoku kyseliny hyaluronové pomocí injekce do prostoru kloubního pouzdra (obr. 2-3). Ta napomáhá k opětovnému navození fyziologického prostředí v kloubu, zejména pak ke zlepšení mazacích procesů a ke snížení nežádoucích účinků mechanické zátěže kloubů [10], [11]. Jak bylo zmíněno, viskosuplementace slouží k oddálení operace. Může tedy poskytnout úlevu od bolesti v rádech měsíců. Tato procedura může být opakována, nicméně její účinnost se může u jednotlivců lišit a v průběhu času již viskosuplementace nemusí poskytovat požadovanou úlevu od bolesti [12].

I přestože jsou kloubní náhrady navrženy tak, aby vydržely co nejdéle, jejich životnost je omezená. V nejlepším případě mohou vydržet přes 20 let. Ze studií vyplývá, že funkčnost kloubních náhrad je asi 97 % po pěti letech, 92 % po osmi letech a 86 % po deseti letech [13]. Životnost kloubních náhrad je ovlivněna mnoha faktory jako věk, váha, aktivita a zdravotní stav pacienta. V některých případech je potřeba provést tzv. revizní operaci. Ta se provádí v případě problémů s náhradou, např. uvolnění implantátu nebo zánětu. Během operace se odstraní původní implantát a je nahrazen novým. Revizní operaci však není možné provádět „do nekonečna“, protože ji lidské tělo není schopno snést. Problémem je také to, že drobné částice materiálu generovány v důsledku opotřebení implantátu jsou roznášeny po těle a mohou způsobovat komplikace, např. osteolýzu [14].



Obr. 2-1 Kyčelní kloub [15]

Obr. 2-2 Kolenní kloub [15]

Obr. 2-3 Injekční aplikace viskosuplementace [12]

První úspěšně operovaným kloubem byl kyčelní kloub. Ze začátku se nahrazovalo pouze zakončení stehenního kloubu. V průběhu let pak docházelo k vývoji náhradní jamky kyčelního kloubu a kolem roku 1940 vznikla tzv. TEP kyčelního kloubu. V dnešní době se dá tímto způsobem nahradit prakticky každý kloub [16].

2.2.3 Náhrada kyčelního kloubu

Existuje několik druhů spojení kosti s kloubní náhradou. Obecně se dají rozdělit podle těchto hlavních kritérií – způsob ukotvení náhrady v kosti, materiál implantátu a kluzná plocha jamka-hlavice [18].

Způsob uchycení kyčelní náhrady v kosti

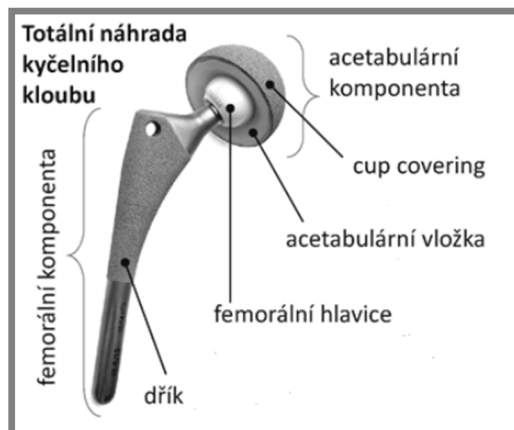
Mezi nejznámější způsoby uchycení kloubní náhrady v kosti patří cementovaná a necementovaná náhrada. Rozdíl mezi nimi je ten, že u cementované náhrady se k zajištění implantátu v kosti používá tzv. kostního cementu. Naopak u necementované náhrady je spojení dosaženo za pomoci přesného opracování implantátu a kostní dutiny, díky kterému kost po určité době proroste do implantátu. V tomto případě musí velikost implantátu odpovídat velikosti kostní dutiny. V případě, že se jedná o speciální typ uchycení pomocí necementované náhrady tzv. „press-fix“, musí být implantát o něco větší (využívá se elasticity kosti, která na určitou dobu kost pevně semkne). Z tohoto důvodu je potřeba velké škály velikostí implantátů a přesných nástrojů. Kombinací dvou předchozích způsobů uchycení pak vzniká třetí typ-hybridní náhrada [17], [18].

Materiál kyčelní náhrady

Pro výrobu implantátů se používají ušlechtilé oceli, titan a jeho slitiny, případně slitiny jiných kovů, dále pak keramika a modifikovaný polyetylen. Pro jednotlivé části implantátů se používají různé materiály (dřík ze slitiny titanu, hlavice z keramiky...). Na obr. 2-4 jsou zobrazeny jednotlivé komponenty náhrady kyčelního kloubu. Pro tyto jsou uvedeny nejčastěji používané materiály:

- Dřík a krček – korozivzdorná ocel, titanová slitina (Ti6Al4V)
- Hlavice – kobalt-chrom-molybdenová slitina (CoCrMo), keramika
- Jamky – ultravysokomolekulární polyetylen (UHMWPE)
- Plášť jamky – titan [19]

- Kluzná plocha mezi hlavicí a jamkou kyčelní náhrady – kontakt mezi jamkou a hlavicí může být realizován jako: kov-kov, kov-polyetylen, keramika-keramika, keramika-polyetylen. Dobrou kombinací je také keramika-polyetylen (UHMWPE) a to díky dobré biokompatibilitě, nízkému součiniteli tření a poměru cena/kvalita. Proto bývá UHMWPE označován jako „zlatý standard“ [20].

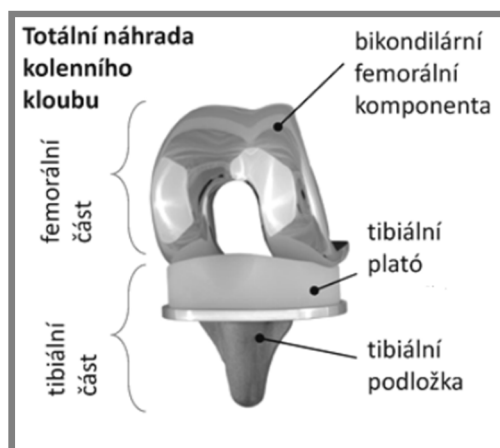


Obr. 2-4 Komponenty náhrady kyčelního kloubu [21]

2.2.4 Náhrada kolenního kloubu

V současné době se nahrazují pouze poškozené plochy kloubu (povrch kloubu a kloubní chrupavky). Způsoby uchycení kloubní náhrady v kosti jsou stejné jako v případě náhrady kyčelního kloubu. Na obr. 2-5 jsou zobrazeny komponenty náhrady kolenního kloubu. Pro tyto jsou uvedeny nejčastěji používané materiály:

- Femorální komponenta – kobalt-chrom-molybdenová slitina
- Tibiální komponenta – titanová slitina, kobalt-chrom-molybdenová slitina
- Tibiální plató (artikulační vložka) – ultravysokomolekulární polyetylen [21]



Obr. 2-5 Komponenty náhrady kolenního kloubu [20]

2.3 Zařízení pro tribologický výzkum

Tribometry spolu se zařízeními pro měření tření a opotřebení se řadí mezi základní technologie používané při výzkumech v oblasti tribologie [22]. Tribometr je přístroj, který slouží pro měření tribologických kvantit (součinitele tření, třecí síly a velikosti opotřebení) mezi dvěma povrchy v kontaktu. Účel tribometru je vytvoření simulace tření a opotřebení za stanovených podmínek. Mezi základní pojmy, kterými se celá klasická tribologie zabývá, patří tření, opotřebení a mazání. Tyto tři pojmy mezi sebou navzájem souvisí a ovlivňují se.

Součástí každého tribometru je vzorek a zatěžovací tělísko, mezi kterými je uskutečňován kontakt. Dále pak součásti, které v kontaktu vyvolávají zatížení, případně s ním pohybují a přivádějí mazání. Vyspělejší tribometry jsou navíc vybaveny prostředky pro měření dalších důležitých hodnot (součinitele tření, teploty atp.). Society of Tribologists and Lubrication Engineers uvádí, že v současné době existuje přes 240 typů tribometrů, nicméně počet běžně používaných tribometrů je podstatně menší [22].

2.3.1 Typy tribometrů

Tribometry lze rozdělit podle různých hledisek do několika skupin:

a) podle typu styku třecích ploch

- konformní styk (plošný)
- nekonformní styk (liniový, bodový)

b) podle typu těles v kontaktu

- Four-ball
- Falex
- Timken
- Pin-on-disk
- Pin-on-drum
- Ball-on-disk
- Pin-on-slab
- Ball-on-slab
- Pin-on-ring
- Ring-on-ring

c) podle provozních podmínek

- pracující ve vysokých teplotách
- pracující v nízkých teplotách
- pracující ve vakuu
- pracující v korozivních kapalinách

d) speciální tribometry

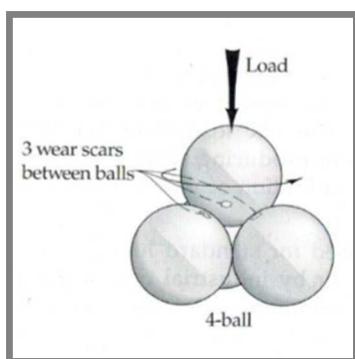
- pro vysoké kluzné rychlosti
- pro opotřebení nárazem
- pro kombinaci valení a klouzání
- pro měření *in-situ*
- pro měření mazacích mechanismů
- pro měření integrity povlaků [22]

2.3.2 Tribometry podle typu těles v kontaktu

Four-ball

Tato metoda slouží pro testování únosnosti maziva. Může být použita pro analýzu jak prevence opotřebení, tak extrémních tlaků. Při testu je použito čtyř ocelových kuliček o průměru 12,7 mm, z nichž tři jsou staticky uloženy v držáku, který je naplněn mazivem. Čtvrtá kulička rotuje rychlostí přibližně 1770 ot/min. Schéma uložení je zobrazeno na obr. 2-6. Provádí se celkem deset sérií měření, a to v desetivteřinových intervalech, přičemž je po každém z intervalů zvýšeno zatížení. Měření je prováděno do doby, než se kuličky zadřou (dojde ke svaření – obr. 2-7). Pro každou ze tří staticky uložených kuliček jsou po každém zatěžovacím cyklu provedena dvě měření opotřebené plochy – jedno vertikálně druhé horizontálně. Tyto hodnoty jsou zprůměrovány a následně použity pro sestavení křivky závislosti opotřebení na zatížení.

Výhodou této metody je samovolné vystředění kuliček, což vede k přesnějším výsledkům. Další výhodou je použití velkých kontaktních tlaků. Nevýhodou je výrazná změna velikosti kontaktních ploch kuliček v průběhu testu z důvodu opotřebení. Ty se mění od velikosti Hertzova kontaktu po mnohem větší v závislosti na opotřebení kuliček [22], [23].



Obr. 2-6 Schéma uložení ocelových kuliček-metoda Four-ball [22]



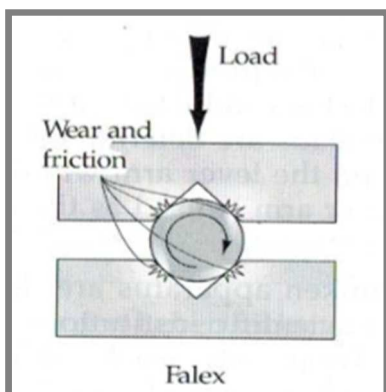
Obr. 2-7 Konec testu-svaření kuliček [23]

Falex

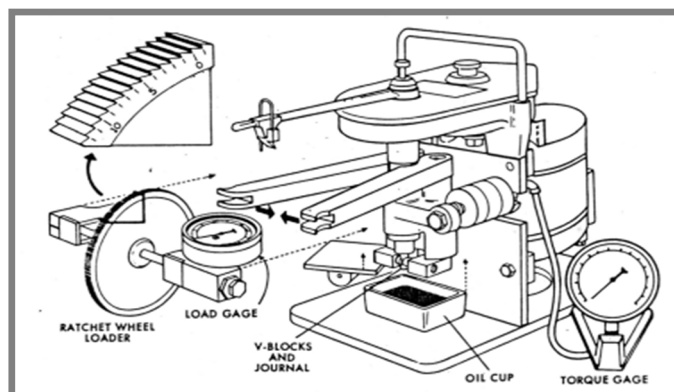
Název této metody pochází od firmy Falex Corporation (dříve Faville-LeValley Corporation), která nese zásluhy na jejím vývoji a je zároveň jedním z největších distributorů přístrojů pro měření fyzikálních vlastností maziv a materiálů. Je možné se setkat s označením „Pin and vee block“. Jádro přístroje tvoří váleček o průměru 6,35 mm, který je uchycen mezi dvěma V-bloky, které váleček stlačují přítlačnou silou (obr. 2-8). V tomto případě dochází ke čtyřem liniovým kontaktům (mezi válečkem a čtyřmi stěnami V-bloků). Tato metoda slouží pro určení součinitele tření a opotřebení válečku a V-bloků a maximálního zatížení před zadřením. Zkouška může být provedena na sucho nebo s mazivem. Celý tribometr je zobrazen na obr. 2-9.

Výhodou jsou vysoké kontaktní tlaky, kterých je dosaženo bez potřeby silných mechanických podpor a přesný výpočet třecí síly bez chyby způsobené třením v ložiscích. Nevýhodou jsou, stejně jako u typu Four-ball, změny kontaktních ploch

z důvodu opotřebení během testu. Mohou také nastat změny v kontaktních silách v případě, že opotřebení je příliš velké [22], [25].



Obr. 2-8 Schéma uložení válečků a V-bloků – metoda Falex [22]

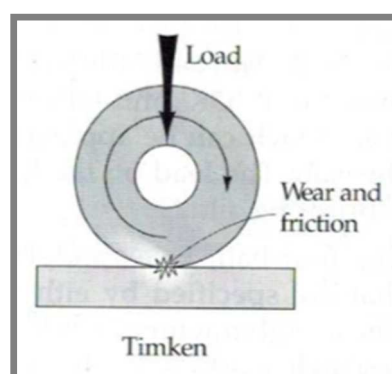


Obr. 2-9 Tribometr typu Falex [25]

Timken

Tribometr typu Timken je jedním z prvních komerčně vyráběných a uznávaných zařízení pro vyhodnocování únosnosti extrémních tlaků maziv. Vyvinut byl v 30. letech firmou Timken Company. Základ přístroje je tvořen válečkem nebo prstencem rotujícím rychlostí 800 ot/min, který je přitlačován k desce (obr. 2-10) přítlačnou silou vyvolanou závažím zavěšeným na rameni tvořící páku v poměru 10:1. Kontakt je zaplaven mazivem. Zatěžování je prováděno v desetiminutových cyklech, přičemž po každém cyklu je zvýšeno zatížení přidáním závaží, a to až do dosažení tzv. „OK zatížení“. To je definováno jako maximální aplikovatelné zatížení, aniž by došlo k rýhování (pokud jsou stopy opotřebení nerovnoměrné).

Jako výhodou lze opět uvést použití velkých kontaktních tlaků. Nevýhodou je, stejně jako u dvou předcházejících typů, že dochází ke změně kontaktních ploch v důsledku opotřebení. Tyto tři typy tribometrů bývají často používány pro komerční testy [22], [24].



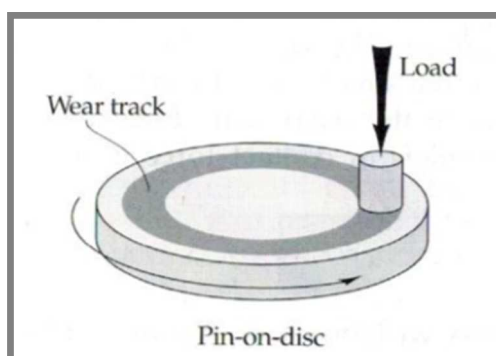
Obr. 2-10 Schéma uložení prstence a desky-metoda Timken [22]

Pin-on-disk

V tomto případě je statické tělísko tlačeno proti rotujícímu disku. Kontakt je uskutečněn mezi čelem (rovnou plochou) disku a tělískem, přičemž váleček je k disku přitlačován v axiálním směru (obr. 2-11) nebo může být tělísko přitlačováno

v radiálním směru na obvod disku. Ve druhém případě hovoříme o tzv. Pin-on-drum metodě. Tělíčko může být váleček (konformní styk) nebo kulička (nekonformní styk) – metoda Ball-on-disk. Přítlačná síla je vyvolána pomocí závaží, pružiny či hydrauliky. Test může být prováděn na sucho nebo za přítomnosti maziva.

Tato metoda nabízí mnohem lepší kontrolu podmínek pro měření. Na rozdíl od předchozích metod zde není problém se změnou kontaktní plochy v důsledku opotřebení. Nevýhodou je však kontrola normálového zatížení. Z počátku je totiž povrch disku hladký, ale v průběhu testu dochází k jeho opotřebení a zdrsňování, které může vést k vibracím a případným nadskokům. Z tohoto důvodu je lepší pro vytvoření zatížení upřednostnit hydrauliku nebo pružinu před závažím [22].

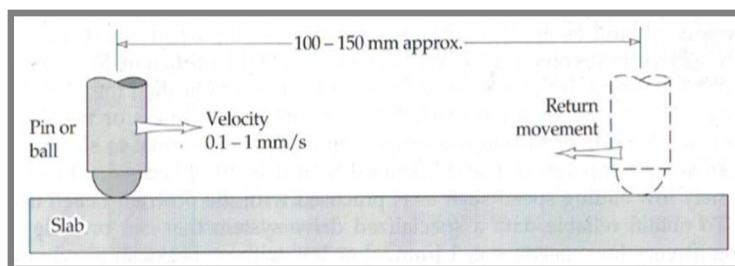


Obr. 2-11 Schéma uložení válečku a disku – metoda Pin-on-disk [22]

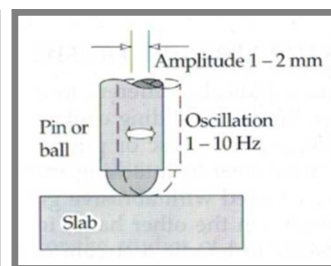
Pin-on-slab

Kontakt se v tomto případě uskutečňuje mezi tělískem, kterým může být opět váleček či kulička, a deskou. Tato metoda je podobná předchozí s tím rozdílem, že disk konal rotační pohyb v jednom směru, kdežto deska/tělíčko koná translační reciproční pohyb. Díky tomu poskytuje výsledky pro reciproční pohyb zkoumaných materiálů, jakými mohou být např. bio-materiály kloubních náhrad [26]. V zásadě lze tuto metodu dále rozdělit, a to podle dvou kritérií – rychlosti, respektive frekvence a délky, respektive amplitudy pohybu. Pokud je délka pohybu velká (100-150 mm) a rychlost pohybu nízká (0,1-1 mm/s) hovoříme o tzv. Bowden-Lebenově metodě (obr. 2-12). Ta je zaměřena především na prvotní fázi opotřebení materiálů. Naopak Cameron-Millsova metoda (obr. 2-13), při které je amplituda malá (1-2 mm) a frekvence relativně vysoká (1-10 Hz), díky čemuž se poměrně rychle dosáhne ustáleného stavu opotřebení.

Výhodou posledních dvou metod je fakt, že jak tělíčko, tak deska, respektive disk, mohou být vyrobeny z různých materiálů. Tímto se význačně odlišují například od metody Four-ball, kde jsou kuličky vyrobeny z oceli [22].



Obr. 2-12 Princip Bowden-Lebenovy metody [22]



Obr. 2-13 Princip Cameron-Millsovy metody [22]

Pin-on-ring

Tato metoda vychází z metody Pin-on-drum (uvedena jako podskupina metody Pin-on-disk). Metody jsou v podstatě totožné s tím rozdílem, že místo disku je použito prstence. Tělíčko, ať už kulička nebo váleček, je tlačeno v radiálním směru proti prstenci na jeho obvodu. Rozměry a typy tělísek se liší v závislosti na typu testovaného kontaktu (obr. 2-14). V případě, že jako tělíška použijeme další prsteneček, bude se jednat o metodu Ring-on-ring. Kontakt může být suchý nebo mazaný, případně v dusíkové atmosféře. V případě použití kuličky jako tělíška, je tato metoda vhodná pro testování tření a opotřebení valivých ložisek [27].



Obr. 2-14 Typy a velikosti tělísek – metoda Pin-on-ring [27]

2.4 Reálné tribometry Pin-on-slab

V této kapitole budou podrobněji popsány dva reálné tribometry: Bruker's Universal Mechanical Tester TriboLab, dále jen UMT TriboLab (obr. 2-15)

2.4



Obr. 2-15 UMT TriboLab od firmy Bruker [28]



Obr. 2-16 Universal Tribometer od firmy Rtec [29]

a Rtec Universal Tribometer (obr 2-16). Rozebrány budou především jejich funkce a možnosti využití a způsoby realizování pohonu.

2.4.1 UMT TriboLab

Tento přístroj se od roku 2000, kdy byl poprvé uveden na trh, řadí k vůbec nejuniverzálnějším a nejvíce využívaným tribometrům. Díky své univerzálnosti dokáže postihnout prakticky všechny běžné tribologické testy v nano i mikro měřítku. Klíčovým elementem je vysoce výkonný elektromotor, který je připojen k modulům (viz popis níže) a servomotory, které se starají o lineární posuv tělíska v ose z a posuv desky v rovině xy . Součástí jsou také čtyři jednoduše vyměnitelné moduly, které přenášejí točivý moment od elektromotoru na rotační a lineární pohyb desky a poskytují tak čtyři testové konfigurace: rotační, lineární, reciproční a konfiguraci Block-on-ring.

Modul pro rotační konfiguraci

Tento modul je navržen pro metodu Pin-on disk (Ball-on-disk) a testování opěrných podložek. Testovací rychlost je od 0,1 do 5 000 ot/min a točivý moment až 5 Nm.

Modul pro lineární konfiguraci

Je vhodný pro metodu Pin-on-slab (Ball-on-slab), studie nízko-rychlostního opotřebení a pro test odolnosti vůči poškrábání. Rychlost se v tomto případě pohybuje v rozmezí od 0,002 do 10 mm/s, délka pohybu je až 120 mm.

Modul pro reciproční konfiguraci

Je navržen pro metodu Pin-on-slab (Ball-on-slab) a testování abrazivního opotřebení s maximální frekvencí pohybu 60 Hz a velikostí amplitudy od 0,1 do 25 mm.

V posledních dvou případech je převod točivého momentu na lineární pohyb realizován za pomoci klikového mechanismu. Velikost frekvence se plynule mění v závislosti na otáčkách elektromotoru. Amplituda se nastavuje na začátku změnou excentricity klikového mechanismu.

Modul pro konfiguraci Block-on-ring

Jak název napovídá, modul je určený pro metodu Block-on-ring. Rychlost i točivý moment jsou stejné jako u modulu pro rotační konfiguraci, tedy 0,1 – 5 000 otáček za minutu a max. 5 Nm.

Všechny tyto moduly splňují podmínky pro testování dle platných norem ASTM. Protože úkolem tribologických testů je pochopení chování materiálů v reálných podmínkách, nabízí tento tribometr možnost tří přídavných zařízení, které tyto podmínky dokáží poskytnout.

Nádoba pro recirkulaci kapaliny

Tato nádoba je určena pro moduly s rotační a reciproční konfigurací, která umožňuje testování materiálů ponořených do maziva. Recirkulace maziva je přirozená, díky pohybu testovaného materiálu. Ten mazivo vhání do speciální komory a následně zpět na vzorek.

Komora s nastavitelnou teplotou a vlhkostí

Dostupné jsou dvě komory pro dvě maximální dosažitelné teploty, a to 400 °C a 1000 °C. Jsou navrženy pro moduly s rotační a reciproční konfigurací. Teplota může být nastavena na pevnou hodnotu, jako postupné snižování či zvyšování nebo dokonce cyklovat.

Chladicí zařízení vhání do komory studený vzduch, pomocí něhož je schopno zredukovat teplotu až na -25 °C. Vlhkost může být nastavena od 5 do 85 % relativní vlhkosti.

Komora pro konfiguraci Block-on-ring

Block-on-ring modul má vlastní speciálně navrženou komoru, díky které je možno provést testování za přítomnosti maziva, teploty až 150 °C a relativní vlhkosti až 99 % [28].

2.4.2 Rtec Universal Tribometer

Tento tribometr je podobný tribometru předchozímu, hlavním účelem je univerzálnost. Té je dosaženo opět několika vyměnitelnými moduly, které dokáží převést točivý moment hlavního elektromotoru na pohyb rotační, lineární a reciproční. Nechybí ani modul pro konfiguraci Block-on-ring. Přístroj nabízí rozmezí zatížení od 500 mN do 5 000 N. Parametry základní platformy pro rovinu *xy*: rozsah pohybu 300 mm, opakovatelnost pozice v rámci 1 μm, maximální rychlost 10 mm/s. Pro směr *z* potom: rozlišení až 0,02 μm, maximální rychlost 10 mm/s, frekvenci 100 Hz. Lineární pohyb desky a tělíška ve třech směrech je uskutečněn servomotory, které pohání pohybové šrouby.

Dodatečné moduly potom nabízejí rychlost 6 000 ot/min s rozlišením 0,01° u rotačního modulu, frekvenci 60 Hz a nejmenší amplitudu 5 μm u lineárního modulu, frekvenci až 500 Hz a nejmenší amplitudu 1 μm pro reciproční modul (v tomto případě je jako pohonu pro dosažení této frekvence použito kmitací cívkou) a rychlost 5 000 ot/min s rozlišením 0,01° v případě modulu pro konfiguraci Block-on-ring. Přenos točivého momentu a změna amplitudy je řešena stejně jako u tribometru UMT Tribolab – klikovým mechanismem a excentricitou. Stejně jako v předchozím případě, i zde jsou k dispozici komory, které zajišťují vhodné podmínky z hlediska prostředí. Díky nim může být testování provedeno za teploty -100 až 1500 °C, relativní vlhkosti 5-95 %, ve vakuu, v kapalině či inertním plynu [29].

Oba tyto tribometry nachází využití napříč velkým množstvím odvětví průmyslu (automobilovém, leteckém, chemickém, textilním, papírnickém, elektrickém, biomedicíně atd.).

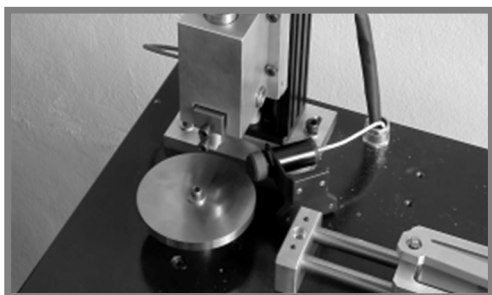
2.4.3 Rozbor stávajících výzkumů s použitím tribometrů s recipročním pohybem

V této podkapitole budou podrobněji popsány konkrétní případy tribometrů s recipročním pohybem a tribometry určené k testování reálné chrupavky. Popsána bude především jejich konstrukce, parametry zatěžování, realizace pohonů a recipročního pohybu.

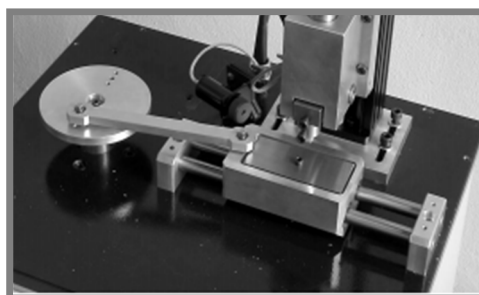
2.4.2

2.4.3

V roce 2006 se M. Marjanovic a kol. [30] zabýval návrhem moderního konceptu tribometru s rotačním a recipročním pohybem. Hlavním cílem bylo navrhnout tribometr pro měření tření a opotřebení polymerů s (bez) použitím maziva. Tribometr byl navržen pro tři typy testu a to Pin-on-disk, Pin-on-disk s oscilačním pohybem a Pin-on-slab. Velikost normálového zatížení byla 5 až 450 N, průměr disku 100 mm, průměr tělíška 10 mm, rychlost 1-20 m/min a pro lineární reciproční test velikost výchylky 50 až 100 mm. Pro dosažení požadovaných zatížení, jejich regulaci a měření bylo použito polohovacího systému BiSlide [31] se stejnosměrným motorem. Zařízení bylo navrženo tak, že celý zatěžovací systém může být přidělán k základní desce ve dvou různých polohách-pro testování rotačním pohybem (obr. 2-17) a pro testování recipročním pohybem (obr. 2-18). Jako pohon pro všechny tři typy tribologických



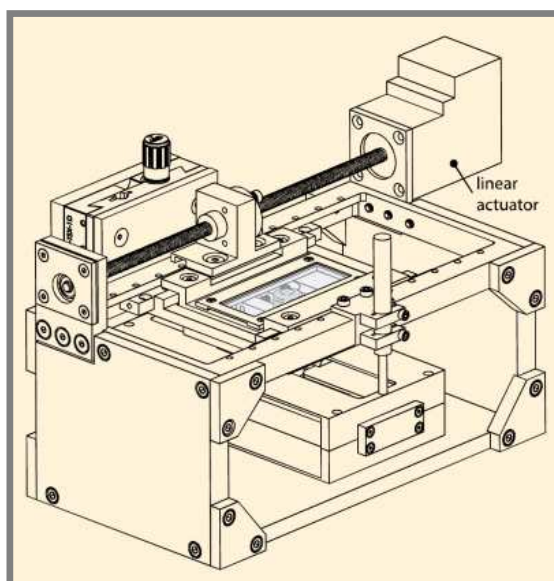
Obr. 2-17 Zatěžovací jednotka připravená pro test v poloze pro rotační pohyb [30]



Obr. 2-18 Zatěžovací jednotka připravená pro test v poloze pro reciproční pohyb [30]

testů bylo použito elektromotoru s řemenovým převodem. Reciproční pohyb je uskutečněn klikovým mechanismem za použití speciálního disku a změna amplitudy pohybu je závislá na excentricitě. Ta může být od 50-100 mm s krokem 10 mm

Axel C. Moore [32] se ve svém výzkumu zabýval pochopením mechanismu mazání kloubní chrupavky. Pro testování bylo použito Pin-on-slab tribometru. Reciproční pohyb vykonával vzorek proti staticky uložené skleněné desce. Vzorkem byla tři osteochondrální jádra (kost s chrupavkou) o průměru 19, 12 a 6 mm.

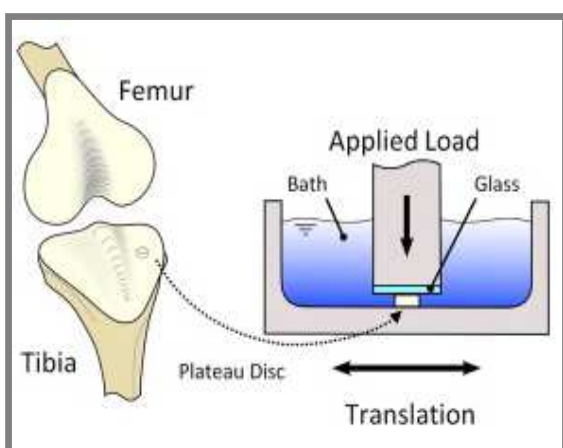


Obr. 2-19 Tribometr použit A. C. Moorem při měření na reálné kloubní chrupavce [54]

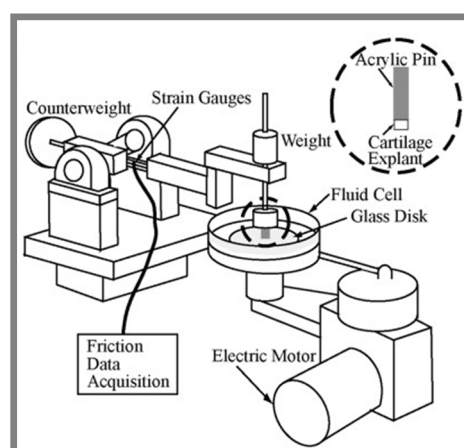
Aplikované normálové zatížení bylo 5 N po dobu dvou minut na dráze dlouhé 20 mm při rychlosti 60 mm/s. Jako pohon sloužil lineární motor. Pro měření výchylek v horizontálním a vertikálním směru bylo použito dvou lineárních diferenčních transformátorových senzorů polohy. Na obr. 2-19 je měřící zařízení zobrazeno. Součinitel tření byl pro větší dva vzorky ($\text{Ø}19$ mm a $\text{Ø}12$ mm) ze tří měren v rozmezí od 0,01 do 0,02.

V článku [33] měřili Sevan R. Oungoulian a kol. míru opotřebení a poškození kloubní chrupavky oproti ortopedickým implantátům. Chrupavka byla hovězí a jako materiál implantátů bylo použito nerezové ocele (316SS) a dvou slitin kobaltu (CoCrLC a CoCrHC). Pro testování byl zvolen tribometr typu Pin-on-slab. Vzorek chrupavky byl připraven s průměrem 4,4 mm a tloušťkou $1,6 \pm 0,05$ mm. Jako mazivo byl použit fosfátový pufr (PBS) doplněn o biocid na bázi isothiazolu. Chrupavka byla připevněna na dno nádoby s tímto roztokem. Nádoba vykonávala reciproční pohyb s amplitudou 10 mm při rychlosti 1 mm/s. Normálové zatížení o velikosti 2,2 N bylo aplikováno shora. V článku se bohužel nevyskytla zmínka o realizaci pohonu. Na obr. 2-20 je schematicky zobrazena příprava vzorku a schéma použitého tribometru. Minimální naměřený součinitel tření se pohyboval v rozmezí 0,004-0,007. Po 4 hodinách testování byl naměřen v hodnotách od 0,16 do 0,33.

S. M. T. Chan a kol. [34] zkoumali tření a adhezi v kloubní chrupavce (hovězí). Testování bylo provedeno na tribometru Pin-on-disk s rotačním recipročním pohybem (schéma je vidět na obr. 2-21). Vzorek chrupavky měl 4 mm. Ten byl upevněn na staticky uloženém tělísku a následně ponořen do nádoby s mazivem, kterým bylo, stejně jako v předchozím případě PBS. Skleněný disk byl umístěn na dně této nádoby. Normálové zatížení bylo aplikováno shora za pomoci páky a závaží a jeho velikost se zvětšovala v celkem šesti krocích od 0,9 do 24,3 N. Reciproční pohyb zajišťoval rotující disk oproti statickému tělísku.



Obr. 2-20 Schematická příprava vzorku chrupavky (vlevo) a schéma tribometru (vpravo) [33]



Obr. 21 Schéma použitého tribometru typu Pin-on-disk [34]

Posuvná rychlost v místě kontaktu měla velikost 0,5 mm/s. Poloměr dráhy byl nastaven na 5 mm, což odpovídalo délce dráhy 7,85 mm na jedno pootočení ($1/4$ kružnice). Jako pohon byl zvolen elektromotor. Součinitel tření byl naměřen v rozmezí 0,03-0,24.

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

Vědní obor biotribologie zkoumá tření, opotřebení a mazání v biologických systémech. Biotribology Research Group na ÚK FSI VUT v Brně se především zabývá biotribologií v kloubech lidského těla a kloubních náhradách. V předcházející kapitole byly definovány základní pojmy z oblasti tribologie a biotribologie, následně popsány materiály používané v současné době pro výrobu kloubních implantátů, dále rozebrány typy zařízení pro měření tribologických parametrů s detailnějším zaměřením na reálné univerzální tribometry a tribometry, které byly zkonstruovány pro konkrétní případy výzkumu a experimentů zaměřených na biotribologické tkáně chrupavky. Z rešerše je zřejmé, že těchto zařízení existuje velké množství, a to pro různý účel a s různým konstrukčním řešením.

Cílem práce je konstrukční návrh pohybového mechanismu a modulu pro měření tření pro tribometr, který bude určen pro tribologické testy s tkání chrupavky.

Experimenty budou zaměřeny především na tření v synoviálním kloubu a analýzu tloušťky mazacího filmu v kontaktu chrupavky se sklem. Konstrukce bude vycházet z výše uvedeného rozboru stávajících výzkumů. Tělísko je ocelové se zakončením z chrupavky, disk je vyroben ze skla případně slitin používaných k výrobě kloubních implantátů. Reciproční pohyb může být realizován dvěma typy pohybu – rotačním recipročním nebo translačním recipročním pohybem. Rotační reciproční pohyb bývá realizován řemenovým převodem a krokovým motorem. Pohyb vykonává rotující disk oproti statickému tělísku. Translační reciproční pohyb může být realizován opět pomocí řemenového převodu s krokovým motorem nebo pohybovým šroubem případně klikovým mechanismem a elektromotorem či pouze lineárním motorem. V případě konfigurace Pin-on-slab testování je třeba lineárního vedení. To může být kluzné nebo valivé.

Pro dané testování pomocí recipročního pohybu je možné použít konfiguraci Pin-on-disk či Pin-on-slab. Jak bylo uvedeno v podkapitole 2.3.2, konfigurace Pin-on-slab je vhodná pro měření bio-materiálů kloubních náhrad, a proto se práce bude dále zabývat pouze touto konfigurací. Reciproční pohyb může vykonávat tělísko oproti staticky uložené desce nebo naopak deska oproti staticky uloženému tělísku. Protože bude kontakt v průběhu testování sledován speciální kamerou, bylo by nutné v prvním případě synchronizovat pohyb tělíska a kamery. Toto řešení je však konstrukčně mnohem náročnější než řešení, při kterém kamera snímá statické tělísko. Z tohoto důvodu je zvoleno konstrukční řešení se staticky uloženým tělískem.

Následující parametry tribometru, pro který je navrhován pohybový mechanismus a modul pro měření tření, vycházejí z parametrů a výsledků uvedených v rozboru stávajících výzkumů:

- Reciproční pohyb realizován pro rozsah 1-50 mm s rychlostí 0,1-50 mm/s
- Normálové zatížení kontaktu o velikosti 0,2-25 N
- Měření součinitel tření v rozsahu 0,01-0,4

4 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

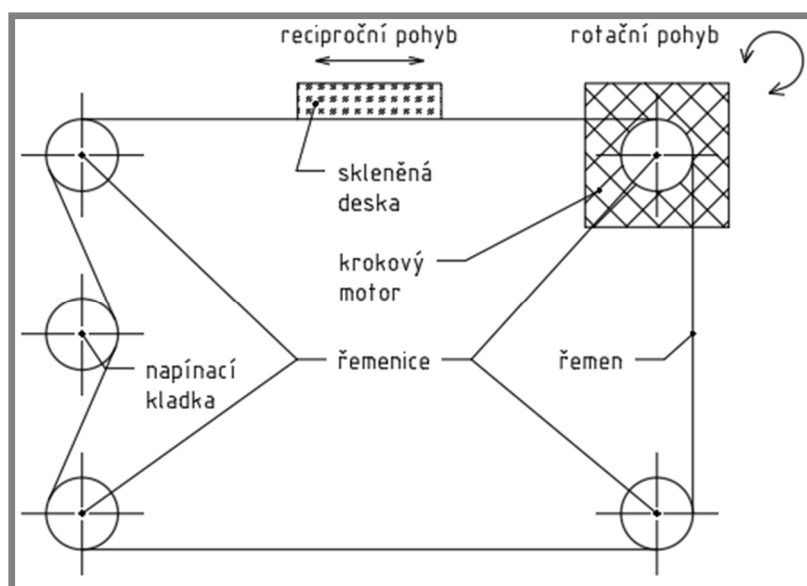
4

4.1 Pohybový mechanismus – Řemenový převod a krokový motor

4.1

Reciproční pohyb je realizován za pomoci řemenového převodu, který zajišťuje přeměnu rotačního pohybu na translační. Pohyb vykonává skleněná deska po lineárním vedení oproti staticky uloženému tělísku (chrupavce). Řemen je s touto deskou pevně spojen a veden přes řemenice a napínací kladku. Schéma je zobrazeno na obr. 4-1. Existují tři základní typy řemenů – plochý, klínový a ozubený.

Řemenový převod dobře tlumí rázy a vibrace a má tichý chod, nevyžaduje mazání a je málo náročný na údržbu. Pořizovací cena řemenů není nijak vysoká. Velkou výhodou je zajištění konstantní rychlosti v téměř celém rozsahu pohybu. Řemenové převody obecně vykazují vysokou účinnost (ozubený řemen až 99 %). V případě použití plochého či klínového typu je možné, že by v průběhu pohybu mohlo dojít k prokluzu nebo propružení řemene. Prokluzu je možné se vyhnout volbou třetího typu řemene – ozubeného. I u tohoto typu však zůstává problém s možným propružením. Řemenový převod špatně odolává vyšším teplotám, nečistotám a mastnotám. U plochého a klínového řemene je zapotřebí velkých napínacích sil, což vede k namáhání hřídelů a ložisek.



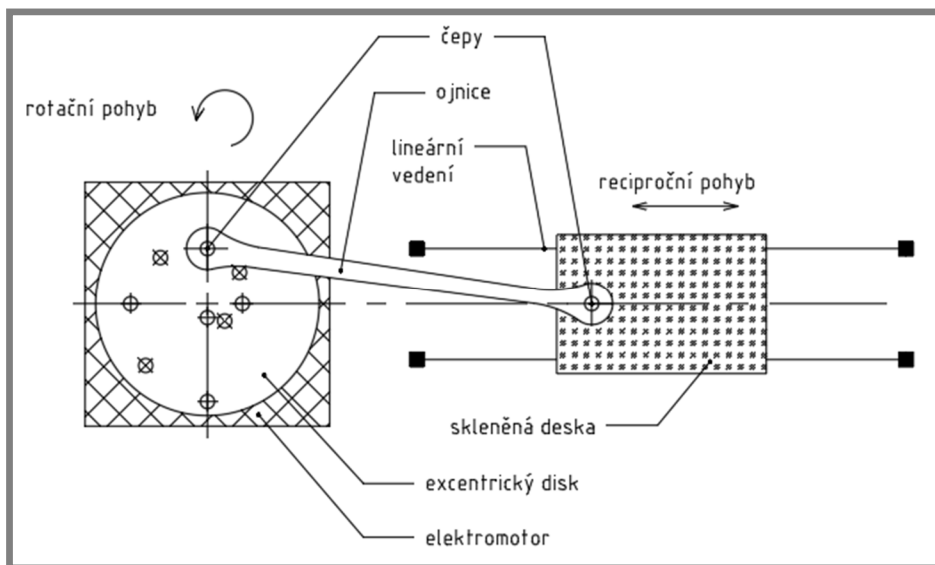
Obr. 4-1 Schéma pohybového mechanismu Řemenový převod a krokový motor

4.2 Pohybový mechanismus – Klikový mechanismus a elektromotor

4.2

Reciproční pohyb je realizován klikovým mechanismem, který přeměňuje rotační pohyb na pohyb translační. Rotační pohyb zajišťuje elektromotor. Pohyb vykonává skleněná deska po lineárním vedení oproti staticky uloženému tělísku. Elektromotor pohání excentrický disk, do kterého je vyvrtáno několik děr s různou vzdáleností od středu (tím je možno dosáhnout různých délek translačního pohybu skleněné desky). K jedné z děr je následně pomocí čepu připevněn jeden konec ojnice. Druhý konec je připevněn ke skleněné desce (také pomocí čepu). Schéma je zobrazeno na obr. 4-2.

Klikový mechanismus se vyznačuje poměrně jednoduchou výrobou a tichým chodem. Velkou nevýhodou je nezajištění konstantní rychlosti ve většině rozsahu pohybu (pohyb je v horní úvrati rychlejší, než v dolní úvrati). Další nevýhodou je nutnost posouvání (a s tím spojené nové upevňování) ojnice po excentrickém disku pro dosažení požadované délky dráhy pohybu skleněné desky.

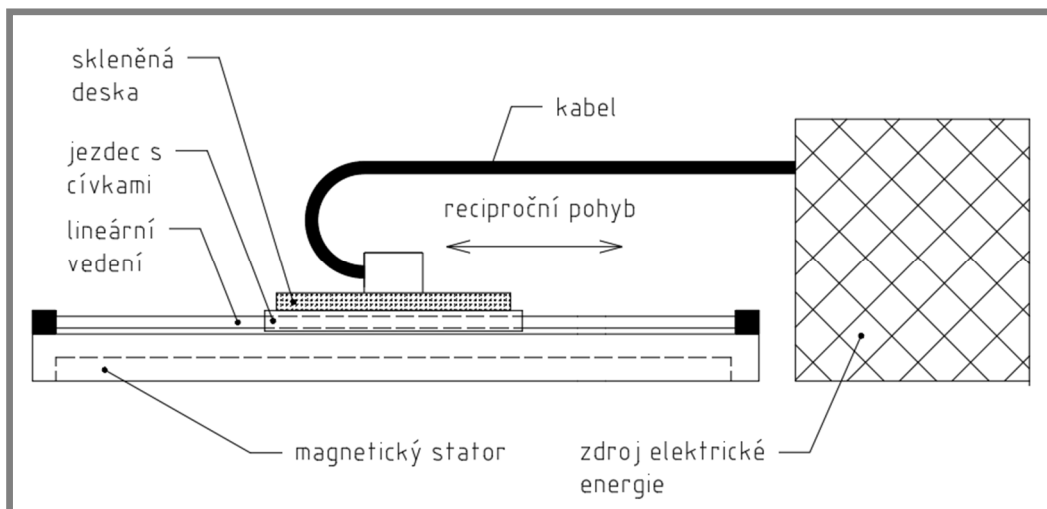


Obr. 4-2 Schéma pohybového mechanismu Klikový mechanismu a elektromotor

4.3 Pohybový mechanismus – Lineární elektromotor

Reciproční pohyb zajišťuje lineární elektromotor, který je pevně spojen se skleněnou deskou. Ta vykonává translační reciproční pohyb po lineárním vedení oproti staticky uloženému tělísku. Schéma je zobrazeno na obr. 4-3.

Velkou výhodou, na rozdíl od klikového mechanismu, je zajištění konstantní rychlosti téměř v celém průběhu pohybu. Dalšími výhodami je přesné polohování, opakovatelnost a také téměř bezúdržbový provoz. Naproti tomu stojí vyšší pořizovací cena a nutnost vyřešení prostoru skrz přívod elektrické energie pomocí kabelů.



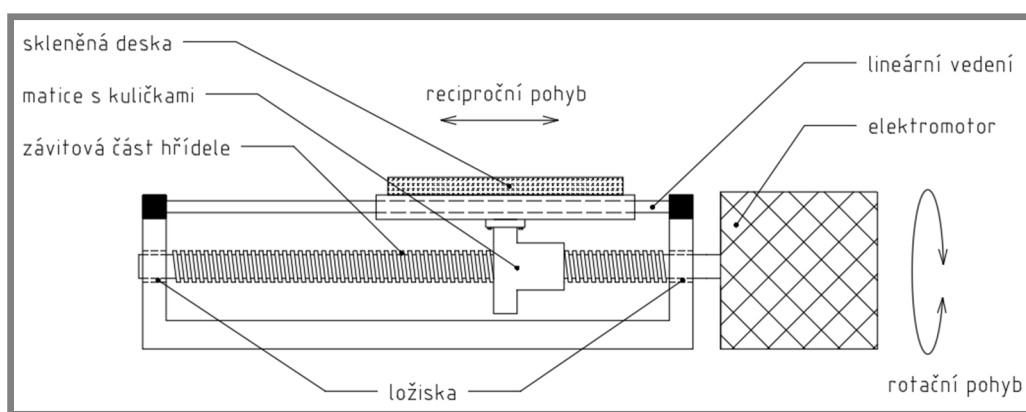
Obr. 4-3 Schéma pohybového mechanismu Lineární elektromotor

4.4 Pohybový mechanismus – Kuličkový šroub a elektromotor

4.4

Reciproční pohyb je uskutečněn pomocí pohybového šroubu (v tomto případě kuličkového), který transformuje rotační pohyb od elektromotoru na translační pohyb skleněné desky. Ta se pohybuje po lineárním vedení oproti staticky uloženému tělísku. Schéma je zobrazeno na obr. 4-4.

Kuličkový pohybový šroub vykazuje poměrně dobrou účinnost (až 98 %). Tření je díky valivým elementům minimální. S tím je spojeno nízké zahřívání a tichý chod. Při použití tohoto pohybového mechanismu také odpadá problém s prokluzem nebo propružením jako v případě řemenového převodu. Na druhou stranu se však musejí mazat, je zde možnost poškození při montáži a v porovnání s řemenovým převodem jsou i dražší.



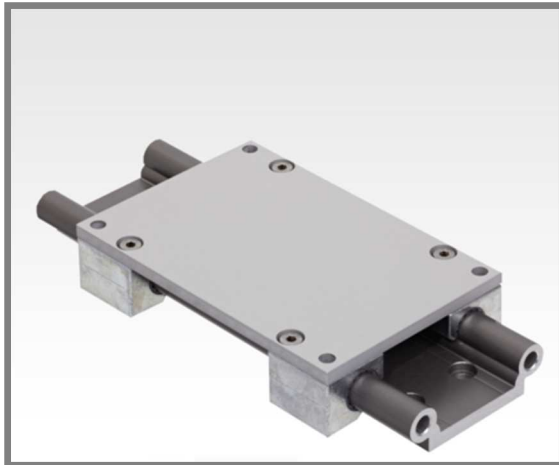
Obr. 4-4 Schéma pohybového mechanismu Kuličkový šroub a elektromotor

4.5 Lineární vedení

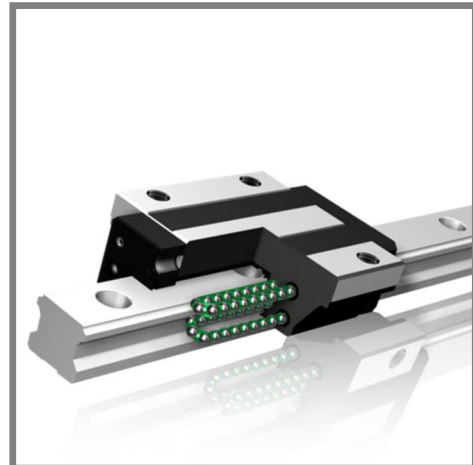
4.5

Lineární vedení je strojní součást, která umožňuje pohyb části zařízení-vozíku po přímé dráze – kolejnici. Slouží k držení (vedení) vozíku při translačním pohybu po kolejnici. Zároveň minimalizuje tření mezi těmito dvěma komponentami. Lineární vedení se dělí na kluzná (obr. 4-5) a valivá (obr. 4-6), případně na otevřená a uzavřená. V případě kluzného vedení dochází ke smýkání (kluzu) vozíku po kolejnici. Vedení může být profilované (profilová drážka s hranolem odpovídajícího tvaru) nebo jednoduchého kruhového tvaru (hřídel a jezdec s dírou). Valivá vedení využívají valivého odporu, který je mnohem menší než smykové tření. Hlavním komponentem jsou válečky nebo kuličky, které se odvalují mezi plochami vozíku a kolejnice.

Valivá vedení mají oproti kluzným vedením nízké pasivní odpory a dochází u nich jen k malému opotřebení. Systém mazání zajišťuje snížení tření, chrání kovové části před korozí a snižuje náklady na údržbu. Naproti tomu hůře tlumí rázy a vibrace a pořizovací cena je vyšší.



Obr. 4-5 Lineární kluzné vedení [35]



Obr. 4-6 Lineární valivé vedení [35]

4.6 Modul pro měření součinitele tření

Součinitel smykového tření je fyzikální veličina, která udává poměr mezi třecí a normálovou silou při smykovém tření dvou těles. Pro jeho určení je tedy potřeba znát normálovou sílu (v našem případě zatěžující) a třecí sílu. Obě tyto síly lze vypočítat z deformace zkoumaného materiálu, a to na základě znalosti Hookova zákona, podle kterého je deformace přímo úměrná napětí. Pokud známe modul pružnosti materiálu a jeho poměrné prodloužení způsobené působící silou, jsme schopni vypočítat napětí v deformovaném materiálu. Z tohoto napětí pak vypočítáme třecí, respektive zatěžující sílu.

4.6.1 Měření deformace pomocí tenzometrického snímače zatížení

Jednou z možností měření deformace je použití tenzometrického snímače zatížení (dále jen snímače). Ten se skládá z tělesa snímače a tenzometru – elektrotechnické součástky tvořené tenkými drátky. Snímač je připevněn ke zkoumanému materiálu, který je zatížen a následně se deformuje. Spolu s materiálem se deformuje i snímač. Deformace drátků má za následek změnu jejich elektrického odporu (změna je přímo úměrná délce a nepřímo úměrná průřezu drátku), ze které je možné tuto deformaci (poměrné prodloužení) spočítat.

Tribometr bude použit pro účely ÚK. Je kladen požadavek, aby bylo možné zkoumaný kontakt sledovat kamerou shora. Z tohoto důvodu bude zatížení aplikováno zesponu přes rameno. Toto rameno sestává ze dvou částí spojených šroubovým spojem. Kontakt bude zcela zaplaven synoviální kapalinou a umístěn ve speciální rozebíratelné vaně. Protože zatěžující síla a součinitel tření budou velmi malé, třecí síla a s ní spojená deformace ramene budou také velmi malé. Je tedy zapotřebí použít citlivý snímač. To však vyvolává problematiku možného poškození snímače při demontáži ramene (povolování šroubu by mohlo způsobit deformaci ramene, respektive drátků tenzometru tak velkou, že by se tenzometr nenávratně poškodil).

4.6.2 Měření deformace pomocí optiky

4.6.2

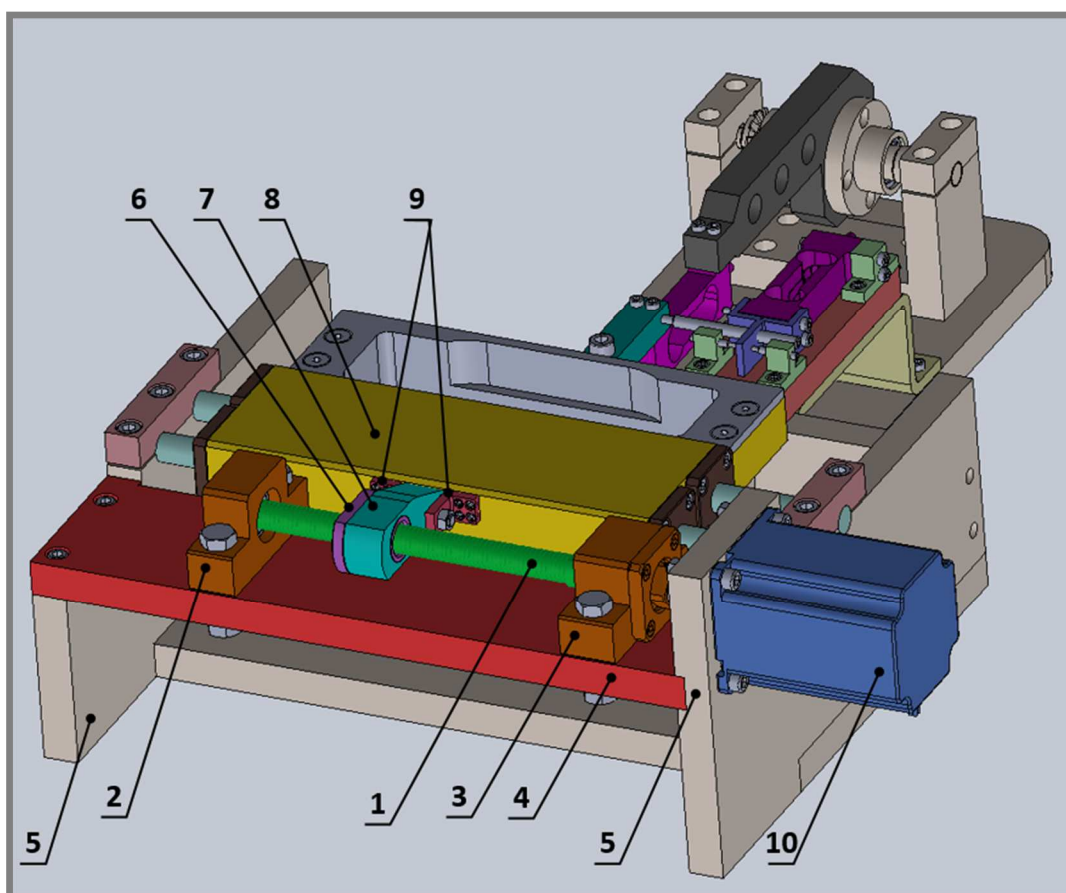
Druhou možností měření deformace je využití optického měření. Na zkoumaný materiál jsou naneseny body, mřížky nebo kontrastní nástřík. Ty jsou následně snímány speciální kamerou, která zaznamená jejich posuvy. Tyto posuvy odpovídají deformaci zkoumaného materiálu. V tomto případě odpadá problém s nepřijatelnými deformacemi, které by mohly poškodit snímač. Na druhou stranu zde vyvstává problematika umístění kamery a osvětlení. Navíc je toto řešení poměrně drahé.

5 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Po zhodnocení všech koncepčních řešení uvedených v předchozí kapitole, bylo s ohledem na účel zařízení a zadaným parametrům vybráno řešení pohybového mechanismu pomocí kuličkového šroubu a elektromotoru. Lineární vedení je zvoleno valivé a měření tření je realizováno pomocí dvou snímačů. Navrhované prvky jsou určeny pro tribometr s recipročním pohybem.

5.1 Realizace pohybového mechanismu

Prvky pohybového mechanismu jsou zobrazeny na obr. 5-1. Jedním z důležitých faktorů kuličkového šroubu je stoupání závitu. S rostoucím stoupáním roste rychlost posuvu a klesá přesnost a polohovatelnost (čím větší stoupání závitu, tím delší vzdálenost přímočarého pohybu, kterou matice urazí na jedno pootočení krokového motoru). Rychlost posuvu je v našem případě 0,1 – 50 mm/s, proto je zvolen kuličkový šroub (1) s průměrem 12 mm a k němu nejmenším možným stoupáním závitu 2 mm (typ BNK 1202-3RRG0+204LC3Y viz příloha 1). Pracovní rozsah pohybu toho typu šroubu je 100 mm, což splňuje zadaný rozsah recipročního pohybu. Šroub je dodáván s konci opracovanými na hotovo. Jejich uložení je provedeno dle doporučení výrobce – ve volné podpoře s radiálním ložiskem (2) a v pevné podpoře s radiálně-axiálním ložiskem (3). Podpory jsou umístěny na podložce (4) a zajištěny každá dvěma šrouby DIN 931 M8x40. Podložka je čtyřmi šrouby DIN 912 M5x25 připevněna



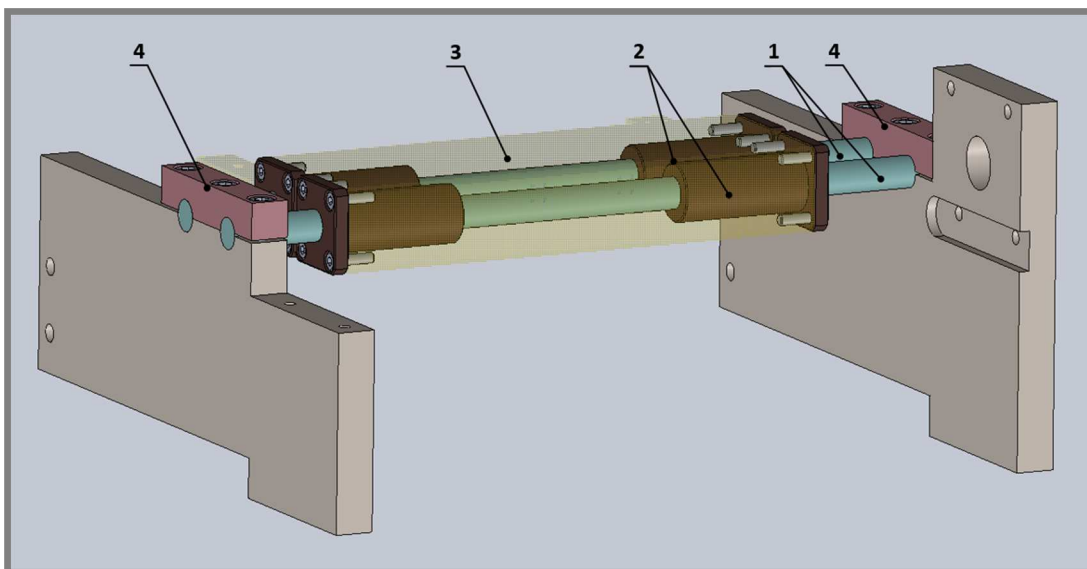
Obr. 5-1 Prvky pohybového mechanismu

k bočnicím (5). Konec šroubu v opěrné části je zajištěn pojistným kroužkem, v pevné části pak maticí se stavěcím šroubem. Matice (6) je uložena ve vyráběném domečku (7) a je předepnuta z důvodu zvýšení tuhosti převodu a vymezení axiálních vůlí mezi kuličkami matice a závity šroubu. Spojení domečku s vozíkem (8) je docíleno za pomoci dvou příložek (9) a šroubů (8x DIN 912 M2x5 pro spoj příložka-vozik a 1x DIN 931 M8x30 pro spoj příložka-domeček). Jako pohon kuličkového šroubu je zvolen krokový motor (10) od firmy Raveo s.r.o. (konkrétně typ Ezi-STEP-MPB-56L viz příloha 2). Spojení s bočnicí je provedeno pomocí čtyř šroubů DIN M5x25.

5.2 Realizace lineárního vedení

5.2

Prvky lineárního vedení jsou zobrazeny na obr. 5-2. Jako lineární vedení je použito dvou vodících tyčí (1) typu WRA o průměru 12 mm od firmy Matis s.r.o. viz příloha 3. Ty se vyznačují vysokou tvrdostí (57 ± 2 HRC), odolností proti korozi a částečně i proti chemikáliím. Od stejné firmy jsou vybrána přírubová tandemová kuličková pouzdra (2) typu LMEK-L délky 57 mm viz příloha 4. Tolerance uložení je H6/h6. Tato kombinace zajišťuje velmi přesný přímočarý pohyb vozíku (3). Pouzdra jsou k vozíku připevněna čtyřmi šrouby DIN 912 M4x10. Uložení vodících tyčí (4) je tandemového typu TAA viz příloha 5. K zajištění každého uložení je použito třech šroubů DIN 912 M6x35.



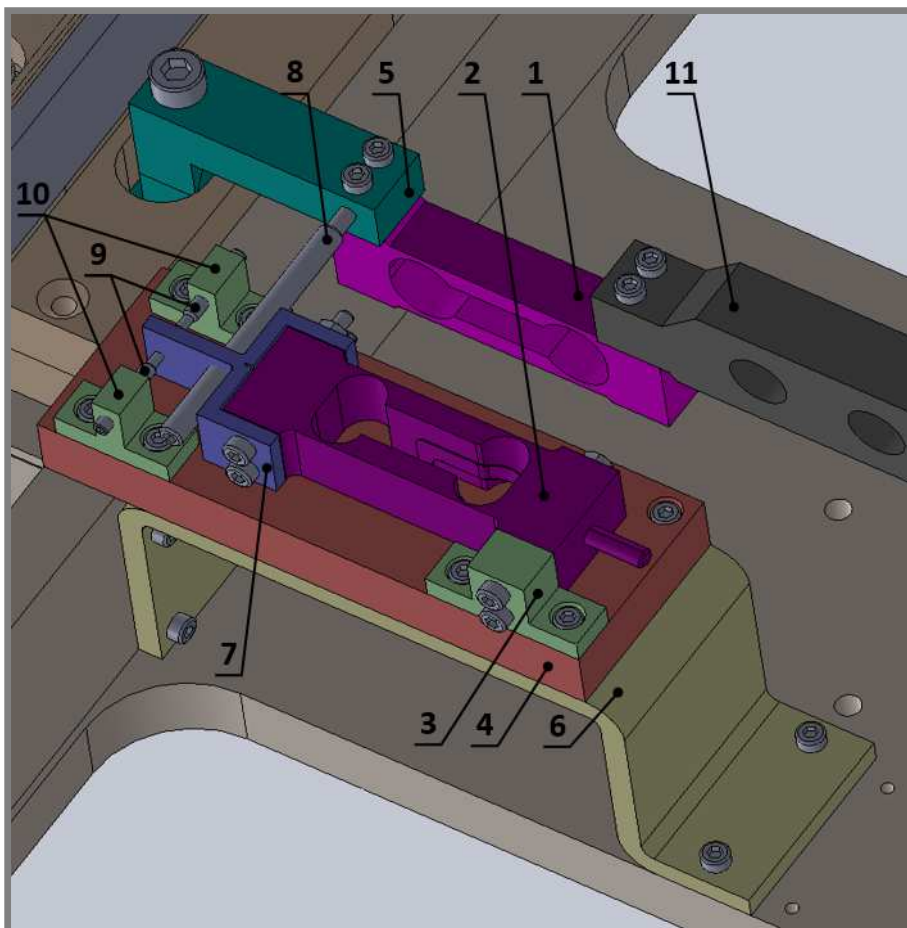
Obr. 5-2 Lineární vedení

5.3 Realizace modulu pro měření tření

5.3

Prvky modulu pro měření tření jsou zobrazeny na obr. 5-3. Obě síly potřebné pro určení součinitele tření (zatěžující a třecí) lze změřit pomocí snímačů. Pro měření zatěžující síly je zvolen snímač typu 1-PW4C3/3KG-1 (1) s rozlišitelností 0,005 N, což je pro minimální uvažovanou zatěžující sílu 0,2 N více než dostačující. Tento snímač lze zatížit silou maximálně 30 N (největší uvažovaná hodnota zatěžující síly je 25 N). Třecí síla ve zkoumaném kontaktu bude měřena snímačem typu 1-PW4C3/2KG-1 (2). Jeho rozlišitelnost je 0,002 N, což splňuje požadavek pro měření

nejmenší možné třecí síly při uvážení minimálního součinitele tření 0,01 a nejmenší zatěžující síly 0,2 N. Zároveň je zajištěno, že snímač nebude přetížen, jelikož únosnost snímače je 20 N, což je 4x více, než je velikost třecí síly, která by vznikla v případě zatížení kontaktu největší možnou silou 25 N a uvažování maximálního součinitele tření 0,4. Oba tyto snímače jsou od firmy HBM s.r.o. (viz příloha 6).

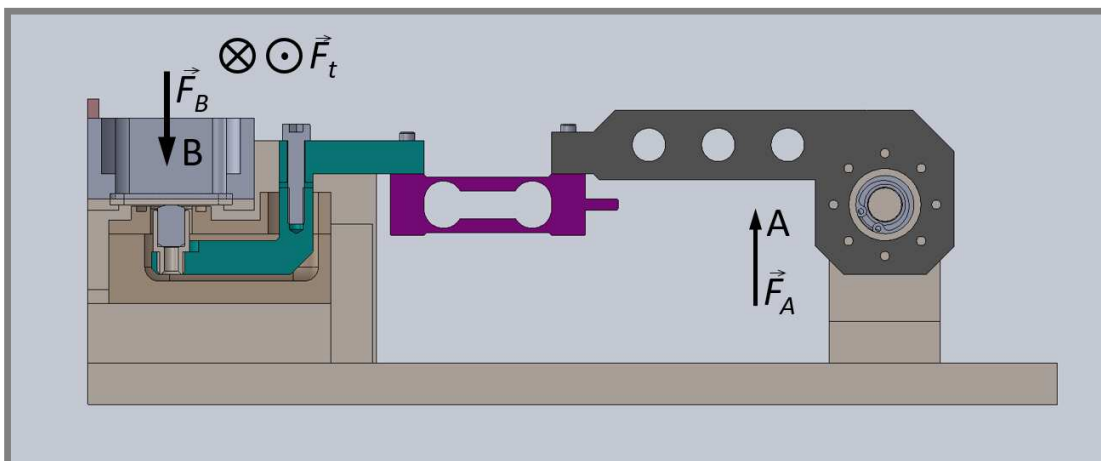


Obr. 5-3 Modul pro měření tření

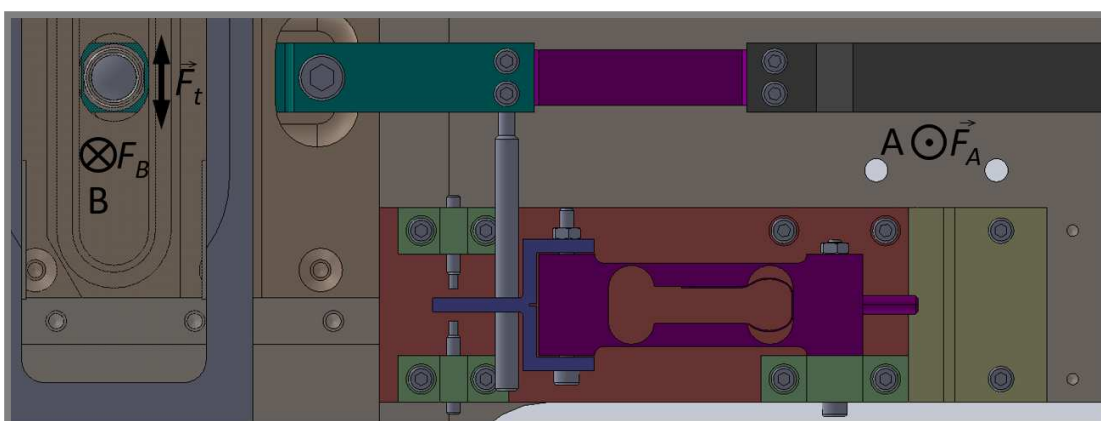
Snímač pro měření třecí síly je na jednom koci přišroubován dvěma šrouby DIN 912 M3x35 k úchytce (3), ta je dvěma šrouby DIN 912 M3x25 spojena s podložkou (4), která je umístěna rovnoběžně s ramenem (5). Pozice (6) slouží jako podpora pro podložku. K druhému konci snímače je dvěma šrouby DIN 912 M3x25 připevněn deformační člen (7). Závitovou dírou v deformačním členu je veden stavěcí šroub (8) DIN 915 M5x45, který je při měření třecí síly v kontaktu s ramenem. Pokud se rameno pod působení třecí síly v kontaktu deformuje, přenáší se tato deformace na stavěcí šroub, deformační člen a následně na snímač. Před měřením je potřeba pomocí stavěcího šroubu snímač předepnout cca na polovinu jeho měřicího rozsahu, aby bylo možné měřit třecí sílu v obou směrech recipročního pohybu. V případě demontáže ramene je nejprve částečným vyšroubováním stavěcího šroubu dosaženo vůle mezi ramenem tribometru a stavěcím šroubem. Následná demontáž probíhá bez nežádoucích silových účinků na snímač. Tento způsob řeší problém s poškozením snímače (viz kap. 4.6.1). I přesto je však potřeba zajistit, aby nedošlo k nepřijatelné deformaci následkem nechtěného zavádění o snímač (například při manipulaci se

stavěcím šroubem). Toho je docíleno dalšími dvěma stavěcími šrouby (9) DIN 915 M3x25, které jsou zašroubovány v zarážkách (10). Ty jsou k podložce připevněny stejným způsobem jako úchytka. Pomocí dvojice stavěcích šroubů lze vymezit maximální možnou vůli, která odpovídá maximální přípustné deformaci.

Snímač pro měření zatěžující síly je na jednom konci spojen dvěma šrouby DIN 912 M3x25 s pákou (11) a na druhém konci je stejným způsobem spojen s ramenem.



Obr. 5-4 Zatěžování a síly měřené snímači – řez



Obr. 5-5 Zatěžování a síly měřené snímači – půdorys

Obr. 5-4 a 5-5 zobrazují zatěžování a síly měřené snímači. Zatěžovací síla F_A je aplikována v bodě A (zespodu páky). Přes snímač a rameno je přenesena do bodu B, kde dochází ke kontaktu mezi tělískem a skleněnou deskou. V tomto bodě vzniká reakční síla F_B , která se svou velikostí rovná síle F_A a má opačný směr. Tato síla je následně měřena snímačem. V důsledku přítomnosti síly F_B , drsnosti povrchů tělíska a skleněné desky a vzájemnému pohybu vzniká mezi těmito povrchy třecí síla F_t . Ta je přes rameno, stavěcí šroub a pružný člen přenesena na snímač, který tuto sílu následně snímá.

6 DISKUZE

Výsledné konstrukční řešení vychází z kladených parametrů a požadavků na experimentální zařízení, které bude sloužit k experimentálnímu výzkumu v oblasti biotribologie synoviálního kloubu. Zadané parametry byly stanoveny na základě stávajících výzkumů takto:

- zdvih recipročního pohybu – 1 – 50 mm
- rychlost recipročního pohybu – 0,1 – 50 mm/s
- normálové zatížení kontaktu – 0,2 – 25 N
- měřený součinitel smykového tření – 0,01 – 0,4

Všechny zadané parametry byly konstrukčním řešením splněny. Všechny součásti navrhovaného zařízení budou vyrobeny z nerezové oceli s výjimkou vozíku, ve kterém je upnuto sklíčko přicházející do kontaktu s experimentálním vzorkem tkáně chrupavky. Tento vozík bude vyroben z duralu, viz podkapitola 6.2.

6.1 Pohybový mechanismus

Pohybový mechanismus by měl zajistit konstantní rychlost v téměř celém rozsahu pohybu. Výsledné řešení uvažuje reciproční pohyb realizován kuličkovým šroubem, který je poháněn krokovým motorem. Tento mechanismus zajišťuje konstantní rychlost v téměř celé délce pohybu, na rozdíl od klikového mechanismu, který má průběh rychlosti přibližně sinusového průběhu. Lineární elektromotor je dražší, a navíc vykazuje komplikace s prostorem pro kabeláž. Řemenový převod nebyl vybrán kvůli možnému propružení, které by mohlo nastat z důvodu nízkých posuvných rychlostí a vysokého tření mezi skleněnou deskou a těsněním. To musí být přítomno, protože testovaný kontakt bude celý zaplaven synoviální kapalinou. Díky vhodné zvolenému typu kuličkového šroubu jsou splněny všechny požadované parametry pohybu (rozsah a rychlost).

6.2 Lineární vedení

Zvolená valivá pouzdra eliminují problém se smykovým třením, které by se vyskytlo v případě použití kluzných pouzder. Zároveň u valivých pouzder dochází k menšímu opotřebení a s tím spojenou delší životností. Pouzdra jsou uložena ve vozíku, který je vyroben z duralu pro dosažení menší hmotnosti, což má za následek nižší účinky setrvačných sil vyvozených recipročním pohybem vozíku.

6.3 Modul pro měření tření

Součinitel smykového tření je určován ze dvou sil – zatěžující (normálové) a třecí. Tyto síly jsou měřeny tenzometrickými snímači. Při jejich výběru byl brán zřetel na splnění zadaných parametrů zatěžování (zatěžující síly a součinitele tření). Možnost měření třecí síly (respektive deformace ramene tribometru v důsledku působení třecí síly) pomocí optiky bylo zavrhnuto z důvodu podstatně nižší ceny tenzometrických snímačů oproti optickému zařízení a odpadá zde problém s umístěním tohoto optického zařízení. Při řešení upnutí tenzometrického snímače pro měření třecí síly vyvstal problém s možným poškozením tohoto snímače během montáže, respektive demontáže ramene tribometru. Snímač se svojí vysokou citlivostí a nízkou hodnotou maximálního zatížení by nemusel tuto montáž, respektive demontáž vydržet. Proto byl snímač umístěn mimo rameno a připojen k rameni tribometru paralelně pomocí

stavěcího šroubu. Pomocí stavěcího šroubu (který je veden závitem deformačního členu co nejbližší ke snímači) je pak docíleno kontaktu mezi snímačem a ramenem pouze během měření. Dalšími dvěma stavěcími šrouby je pak zamezeno nepřípustné deformaci snímače, ke které by mohlo dojít například nechtěným zaváděním o snímač. Tímto způsobem je poměrně jednoduše vyřešen problém s nenávratným poškozením snímače pro měření třecí síly. Mezi vnitřními plochami deformačního členu a vnějšími plochami snímače je vůle 0,2 mm na plochu. Ta je přítomna z důvodu jednoduché montáže a výrobních nepřesností deformačního členu a snímače. Po dotažení šroubového spoje na sebe plochy dosednou a vůle se vymezí. Aby nedocházelo k plastické deformaci a nadměrnému vnitřnímu pnutí deformačního členu, je uprostřed deformačního členu vyfrézována drážka, která šířkou odpovídá vůli. Při dotažení tenzometrického snímače mezi čelisti deformačního členu dojde ke stlačení této drážky na úkor deformace deformačního členu.

7 ZÁVĚR

Tato práce je zaměřena na konstrukci prvků tribometru s recipročním pohybem. Jedná se o pohybový mechanismus, lineární vedení a modul pro měření tření. Tribometr bude použit v laboratořích ÚK pro experimentální výzkum v oblasti biotribologie. Jednotlivé prvky byly navrženy s ohledem na zadané parametry a požadavky, kterými byly zejména zdvih recipročního pohybu 1-50 mm, rychlost pohybu 0,1-50 mm/s a konstantní rychlost v téměř celém rozsahu pohybu. Navrhnutý pohybový mechanismus sestávající z kuličkového šroubu a krokového motoru zadané parametry splňuje. Lineární vedení zajišťuje přímé a přesné vedení vozíku, a to díky kombinaci kuličkových pouzder a vodících tyčí s vysokou tvrdostí a odolností vůči korozi a chemikáliím. Tato kombinace se navíc vyznačuje dobrou životností. Dalšími parametry je velikost zatěžující (normálové) síly – 0,2-25 N a velikost součinitele tření – 0,01-0,4. Vhodnou volbou obou snímačů je těchto parametrů dosaženo. Návrh modulu pro měření tření také obsahuje řešení problému s poškozením snímače pro měření tření z důvodu výskytu nepřijatelných deformací v důsledku montáže, respektive demontáže ramene tribometru. Toho je docíleno umístěním snímače mimo rameno a následně paralelní spojení snímače přes stavěcí šroub k rameni. Celé konstrukční řešení čítá 32 součástí, z nichž 9 je vyráběných. Jejich výrobní výkresy jsou k této práci přiloženy i s výkresem sestavení (viz příloha 7). Tribometr, pro který jsou jednotlivé prvky navrženy, má sloužit k testování reálné chrupavky, zejména pak by mělo zařízení umožnit lepší pochopení třecích a mazacích procesů v synoviálním kloubu. Pokud věda pronikne do tajů těchto zatím nepoznaných skutečností v oblasti mazání synoviálních kloubů, bude možné na základě nových poznatků z této oblasti navrhnout vhodnou konzervační léčbu v případě onemocnění velkých kloubů u člověka, které jsou zvláště v pokročilejším věku značně rozšířené.

8 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] GHOSE, Tia. What is Friction? *LiveScience* [online]. 2013 [cit. 2016-11-28]. Dostupné z: <http://www.livescience.com/37161-what-is-friction.html>
- [2] HARTL, Martin. *Konstruování strojů: Přednáška 4.* [online]. 2015 [cit. 2017-01-07]. Dostupné také z: https://moodle.vutbr.cz/pluginfile.php/186404/mod_resource/content/1/5KS%204%202015%20nahled.pdf
- [3] JANÍČEK, Přemysl a Jiří MAREK. *Expertní inženýrství v systémovém pojetí.* Praha: Grada, 2013. Expert (Grada). ISBN 978-80-247-4127-7.
- [4] SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Konstruování strojních součástí.* V Brně: VUTIUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [5] BHUSHAN, Bharat, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. *Introduction to tribology.* New York: John Wiley, c2002, 732 s. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 04-711-5893-3.
- [6] STACHOWIAK, G. W. a A. W. BATCHELOR. *Engineering tribology.* Boston: Butterworth-Heinemann, 2001, 744 s. ISBN 07-506-7304-4.
- [7] ZHOU, Z.R. a Z.M. JIN. Biotribology: Recent progresses and future perspectives. *Biosurface and Biotribology* [online]. Elsevier B.V, 1503, **1**(1), 3-24 [cit. 2016-11-20]. DOI: 10.1016/j.bsbt.2015.03.001. ISSN 24054518. Dostupné z: <https://doi.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/10.1016/j.bsbt.2015.03.001>
- [8] Co je artróza? *Orthes* [online]. [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: <http://www.orthes.cz/index.php?module=page&record=35>
- [9] URBANOVÁ, Monika. Osteoartróza - projevy a léčba. *Orthes* [online]. [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.revmaliga.cz/node/591>
- [10] FREI, Robert. Viskosuplementace v léčbě osteoartrózy. *Farmakoterapie v praxi* [online]. **2014**(5), 2-6 [cit. 2016-11-20]. ISSN 1801-1209. Dostupné z: http://www.farmakoterapievpraxi.cz/dokumenty/farmakoterapievpraxi/FTvP_2014_05.pdf
- [11] TRČ, Tomáš. Současný stav viskosuplementace v léčbě osteoartrózy. *Farmakoterapie* [online]. **2012**(6), 593-600 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: http://www.farm-servis.cz/ext/files/article/3303/ftp_viskosuplementace.pdf
- [12] VAD, Vijay B. *Viscosupplementation for Knee Osteoarthritis* [online]. 2013 [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: <http://www.arthritis-health.com/treatment/injections/viscosupplementation-knee-osteoarthritis>
- [13] Long-term survival rate of implants and modes of failure after revision total knee arthroplasty by a single surgeon. *NCBI: PubMed* [online]. 2013 [cit. 2017-01-15]. Dostupné z: <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/23219625>
- [14] HINAREJOS, Pedro, Ignasi PIÑOL, Alberto TORRES, Eva PRATS, Gabriel GIL-GÓMEZ a Lluís PUIG-VERDIE. Highly Crosslinked Polyethylene Does Not Reduce the Wear in Total Knee Arthroplasty: In Vivo Study of Particles in Synovial Fluid. *The Journal of Arthroplasty* [online]. Elsevier, 1309, **28**(8), 1333-1337 [cit. 2017-01-15].

- DOI: 10.1016/j.arth.2013.01.026. ISSN 08835403. Dostupné z: [http://www.arthroplastyjournal.org/article/S0883-5403\(13\)00153-8/fulltext](http://www.arthroplastyjournal.org/article/S0883-5403(13)00153-8/fulltext)
- [15] Ortopedie. *SurgalClinic* [online]. 2016 [cit. 2016-11-12]. Dostupné z: <http://www.surgalclinic.cz/index.php?pg=spektrum-vykonu--ortopedie>
- [16] KOUKAL, Milan. Češi, kteří naučili svět zase chodit. *21. století* [online]. 2009 [cit. 2016-02-21]. Dostupné z: <http://21stoleti.cz/2009/11/19/cesi-kteri-naucili-svet-zase-chodit/>
- [17] Typy kyčelních náhrad a jejich upevnění. *Orthes* [online]. 2016 [cit. 2016-11-13]. Dostupné z: <http://www.orthes.cz/index.php?module=page&record=16>
- [18] TRČ, Tomáš. Náhrady kyčelního kloubu. *Postgraduální medicína* [online]. 2008, **08**, 906 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://zdravi.euro.cz/clanek/postgradualni-medicina/nahrady-kycelniho-kloubu-388282>
- [19] Primoimplantáty. *Beznoska* [online]. 2015 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: http://www.beznoska.cz/wp-content/uploads/2013/11/katalog_Primoimplantaty_CZ_final_26.06.2015.pdf
- [20] ŠOUFL, Miroslav, Tařana VACKOVÁ, Martina NEVORALOVÁ, et al. Ultravysokomolekulární polyetylen pro kloubní náhrady se zvýšenou životností. *Chemické listy* [online]. 2013, (107), 783-790 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2013_10_783-790.pdf
- [21] Co je totální endoprotéza kolene. *Orthes* [online]. 2017 [cit. 2017-01-07]. Dostupné z: <http://www.orthes.cz/index.php?module=page&record=38>
- [22] STACHOWIAK, G. W. *Experimental methods in tribology*. Amsterdam: Elsevier, 2004. Tribology series. ISBN 0-444-51589-5.
- [23] SEVEN, Davox Max. *Four ball wear tester procedure: Extreme pressure* [online]. ©2017 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <https://www.scribd.com/document/102384043/Four-Ball-EP-Test-Procedure>
- [24] Falex four-ball extreme pressure machine: High Hertzian 3-point contact (4 balls). *Tribolab* [online]. [cit. 2017-01-31]. Dostupné z: <http://tribolab.teipir.gr/images/FourBallTest.jpg>
- [25] Testing instruments: Tribology. *Falex* [online]. ©2017 [cit. 2017-01-31]. Dostupné z: <http://www.falex.com/tribology/>
- [26] Linear Reciprocating Tribometer (LRT). *Ducom Instruments* [online]. ©2017 [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://ducom.com/test-instruments/tribometers/linear-reciprocating-tribometer-lrt/>
- [27] Measuring devices: Pin-on-ring. *Engineering-abc* [online]. [cit. 2017-02-05]. Dostupné z: <http://www.tribology-abc.com/sub5.htm>
- [28] BRUKER: UMT TriboLab Trade-In [online]. [cit. 2017-02-09]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/tribometers-and-mechanical-testers/umt-tribolab/learn-more.html>
- [29] Rtec Instruments: Universal Tribometer [online]. [cit. 2017-02-15]. Dostupné z: <http://www.rtec-instruments.com/universal-tribometer.htm>

[30] MARJANOVIC, M. a kol. : Design of Modern Concept Tribometer with Circular and Reciprocating Movement. *Tribology in industry* [online]. 2006, (28) [cit. 2017-02-18]. Dostupné z: <http://www.tribology.fink.rs/journals/2006/3-4/1.pdf>

[31] *Velmex: BiSlide* [online]. [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: http://velmex.com/Products/BiSlide/BiSlide_Motorized.html

[32] MOORE, Axel C. New insights into joint lubrication. *Tribology and lubrication technology* [online]. 2016, 26-32 [cit. 2017-02-19]. Dostupné z: [http://digitaleditions.walworthprintgroup.com/publication/index.php?i=298826&m=&l=&p=3&pre=&ver=html5#{"page":28,"issue_id":298826}](http://digitaleditions.walworthprintgroup.com/publication/index.php?i=298826&m=&l=&p=3&pre=&ver=html5#{)

[33] OUNGOULIAN, Sevan R., Krista M. DURNEY, Brian K. JONES, Christopher S. AHMAD, Clark T. HUNG a Gerard A. ATESHIAN. Wear and damage of articular cartilage with friction against orthopedic implant materials. *Journal of Biomechanics* [online]. Elsevier, 2015, **48**(10), 1957-1964 [cit. 2017-02-19]. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2015.04.008. ISSN 0021-9290. Dostupné z: [http://www.jbiomech.com/article/S0021-9290\(15\)00224-9/fulltext](http://www.jbiomech.com/article/S0021-9290(15)00224-9/fulltext)

[34] CHAN, S.M.T., C.P. NEU, K. KOMVOPOULOS a A.H. REDDI. The role of lubricant entrapment at biological interfaces: Reduction of friction and adhesion in articular cartilage. *Journal of Biomechanics* [online]. Elsevier, 2011, **44**(11), 2015-2020 [cit. 2017-02-19]. DOI: 10.1016/j.jbiomech.2011.04.015. ISSN 00219290. Dostupné z: [http://www.jbiomech.com/article/S0021-9290\(11\)00333-2/fulltext](http://www.jbiomech.com/article/S0021-9290(11)00333-2/fulltext)

[35] Produkty: Lineární vedení a kuličkové šrouby. *Hennlich: Lin-Tech* [online]. ©2017 [cit. 2017-03-23]. Dostupné z: <http://lin-tech.hennlich.cz/produkty/linearni-vedeni-a-kulickove-srouby-2471.htm>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Zkratka	Význam
ÚK	- Ústav konstruování
FSI	- Fakulta strojního inženýrství
VUT	- Vysoké učení technické
TEP	- Totální endoprotéza
UHMWPE	- Ultravysokomolekulární polyethylen
UMT	- Universal Mechanical Tester
ASTM	- American Society of Testing and Materials
PBS	- Fosfátový pufr

Symbol	Jednotka	Popis
\emptyset	[mm]	- průměr
F_a	[N]	- zatěžující síla
F_b	[N]	- reakční síla
F_t	[N]	- třecí síla

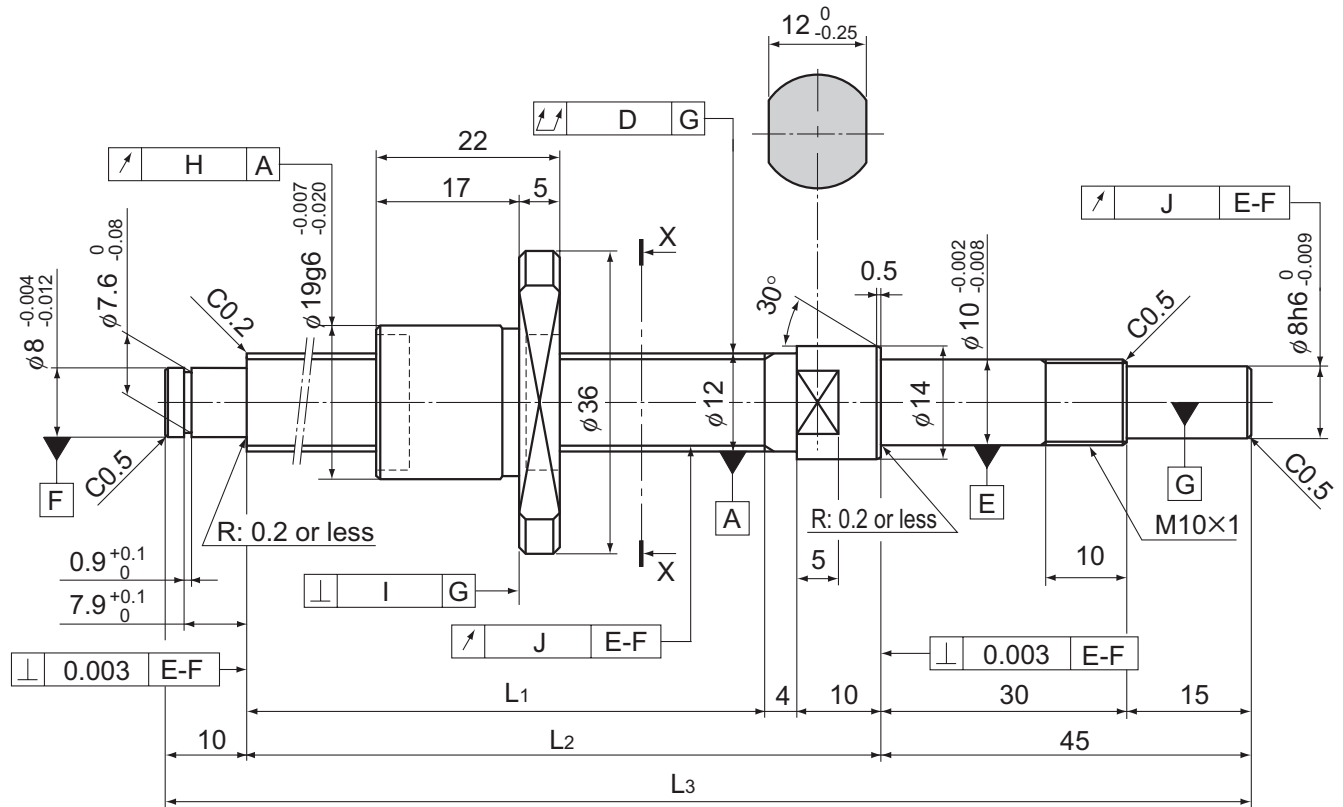
10 SEZNAM OBRÁZKŮ

- Obr. 2-1** Kyčelní kloub [15]
Obr. 2-2 Kolenní kloub [15]
Obr. 2-3 Injekční aplikace viskosuplementace [12]
Obr. 2-4 Komponenty náhrady kyčelního kloubu [20]
Obr. 2-5 Komponenty náhrady kolenního kloubu [20]
Obr. 2-6 Schéma uložení ocelových kuliček – metoda Four-ball [22]
Obr. 2-7 Konec testu – svaření kuliček [23]
Obr. 2-8 Schéma uložení válečků a V-bloků – metoda Falex [22]
Obr. 2-9 Tribometr typu Falex [25]
Obr. 2-10 Schéma uložení prstence a desky – metoda Timken [22]
Obr. 2-11 Schéma uložení válečku a disku – metoda Pin-on-disk [22]
Obr. 2-12 Princip Bowden-Lebenovy metody [22]
Obr. 2-13 Princip Cameron-Millsovy metody [22]
Obr. 2-14 Typy a velikosti tělísek – metoda Pin-on-ring [27]
Obr. 2-15 UMT TriboLab od firmy Bruker [28]
Obr. 2-16 Universal Tribometer od firmy Rtec [29]
Obr. 2-17 Zatěžovací jednotka připravená pro test v poloze pro rotační pohyb [30]
Obr. 2-18 Zatěžovací jednotka připravená pro test v poloze pro reciproční pohyb [30]
Obr. 2-19 Schematická příprava vzorku chrupavky (vlevo) a schéma tribometru (vpravo) [33]
Obr. 2-20 Schematická příprava vzorku chrupavky (vlevo) a schéma tribometru (vpravo) [33]
Obr. 2-21 Schéma použitého tribometru typu Pin-on-disk [34]
Obr. 4-1 Schéma pohybového mechanismu Řemenový převod a krokový motor
Obr. 4-2 Schéma pohybového mechanismu Klikový mechanismu a elektromotor
Obr. 4-3 Schéma pohybového mechanismu Lineární elektromotor
Obr. 4-4 Schéma pohybového mechanismu Kuličkový šroub a elektromotor
Obr. 4-5 Lineární kluzné vedení [35]
Obr. 4-6 Lineární valivé vedení [35]
Obr. 5-1 Prvky pohybového mechanismu
Obr. 5-2 Lineární vedení
Obr. 5-3 Modul pro měření tření
Obr. 5-4 Zatěžování a síly měřené snímači – řez
Obr. 5-5 Zatěžování a síly měřené snímači – půdorys

11 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1	Katalog Hennlich – Kuličkový šroub BNK
Příloha 2	Katalog Raveo – Krokový motor EziSTEP-ST
Příloha 3	Katalog Matis – Vodící tyče WR/WH
Příloha 4	Katalog Matis – Kuličková a kluzná pouzdra LMEK(F)-L
Příloha 5	Katalog Matis – Uchycení tyčí TAA
Příloha 6	Katalog HBM – Single point snímače PW4M
Příloha 7	Výkresová dokumentace

BNK1202-3 Shaft diameter: 12; lead: 2



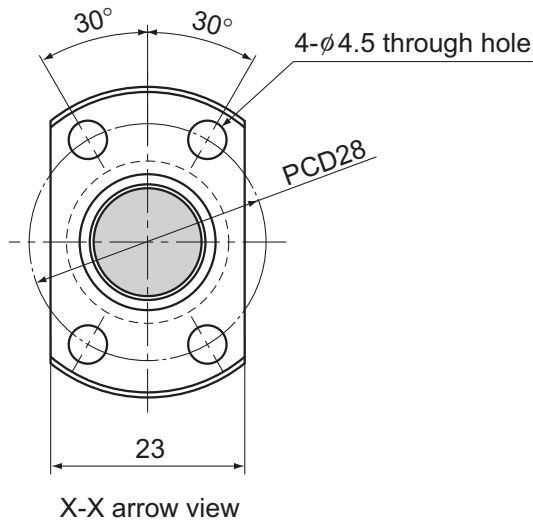
Model No.	Stroke	Screw shaft length		
		L ₁	L ₂	L ₃
BNK 1202-3RRG0+154LC3Y	50	85	99	154
BNK 1202-3RRG0+154LC5Y				
BNK 1202-3RRG2+154LC7Y				
BNK 1202-3RRG0+204LC3Y	100	135	149	204
BNK 1202-3RRG0+204LC5Y				
BNK 1202-3RRG2+204LC7Y				
BNK 1202-3RRG0+254LC3Y	150	185	199	254
BNK 1202-3RRG0+254LC5Y				
BNK 1202-3RRG2+254LC7Y				
BNK 1202-3RRG0+304LC3Y	200	235	249	304
BNK 1202-3RRG0+304LC5Y				
BNK 1202-3RRG2+304LC7Y				
BNK 1202-3RRG0+354LC3Y	250	285	299	354
BNK 1202-3RRG0+354LC5Y				
BNK 1202-3RRG2+354LC7Y				

Note) A stainless steel type is also available for model BNK1202. When placing an order, add symbol "M" to the end of the model number.

(Example) BNK1202-3RRG0+154LC3Y M

Symbol for stainless steel type

For accuracy grades C3 and C5, clearance GT is also available as standard.



Ball Screw Specifications			
Lead (mm)	2		
BCD(mm)	12.3		
Thread minor diameter (mm)	11		
Threading direction, No. of threaded grooves	Rightward, 1		
No. of circuits	1 turn × 3 rows		
Clearance symbol	G0	GT	G2
Axial clearance (mm)	0	0.005 or less	0.02 or less
Basic dynamic load rating C_a (kN)	1.7	1.7	1.7
Basic static load rating C_{0a} (kN)	3.6	3.6	3.6
Preload torque (N-m)	9.8×10^{-3} to 3.4×10^{-2}	—	—
Spacer ball	None	None	None
Rigidity value (N/ μ m)	120		
Circulation method	Deflector		

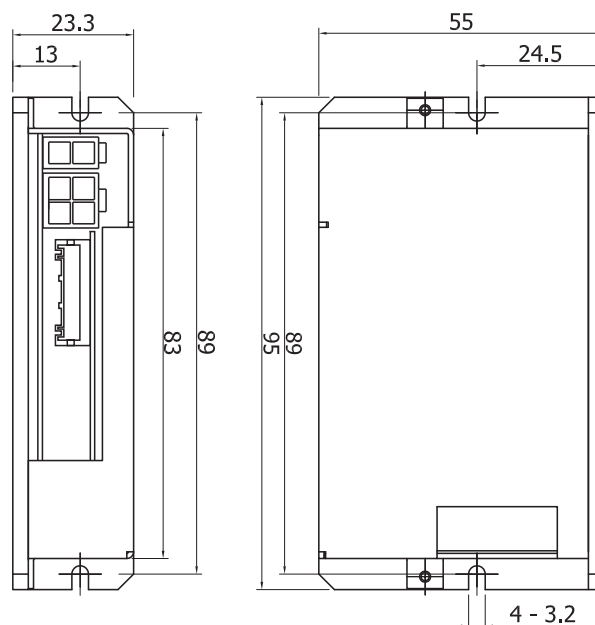
Unit: mm

	Runout of the screw shaft axis	Runout of the nut circumference	Flange perpendicularity	Runout of the thread groove surface	Lead angle accuracy		Nut mass kg	Shaft mass kg/m
	D	H	I	J	Representative travel distance error	Fluctuation		
	0.02	0.01	0.008	0.007	± 0.008	0.008	0.05	0.71
	0.035	0.012	0.01	0.011	± 0.018	0.018	0.05	0.71
	0.04	0.02	0.014	0.014	Travel distance: $\pm 0.05/300$		0.05	0.71
	0.03	0.01	0.008	0.007	± 0.01	0.008	0.05	0.71
	0.04	0.012	0.01	0.011	± 0.02	0.018	0.05	0.71
	0.055	0.02	0.014	0.014	Travel distance: $\pm 0.05/300$		0.05	0.71
	0.03	0.01	0.008	0.007	± 0.01	0.008	0.05	0.71
	0.04	0.012	0.01	0.011	± 0.02	0.018	0.05	0.71
	0.055	0.02	0.014	0.014	Travel distance: $\pm 0.05/300$		0.05	0.71
	0.04	0.01	0.008	0.007	± 0.012	0.008	0.05	0.71
	0.05	0.012	0.01	0.011	± 0.023	0.018	0.05	0.71
	0.055	0.02	0.014	0.014	Travel distance: $\pm 0.05/300$		0.05	0.71
	0.04	0.01	0.008	0.007	± 0.012	0.008	0.05	0.71
	0.05	0.012	0.01	0.011	± 0.023	0.018	0.05	0.71
	0.065	0.02	0.014	0.014	Travel distance: $\pm 0.05/300$		0.05	0.71

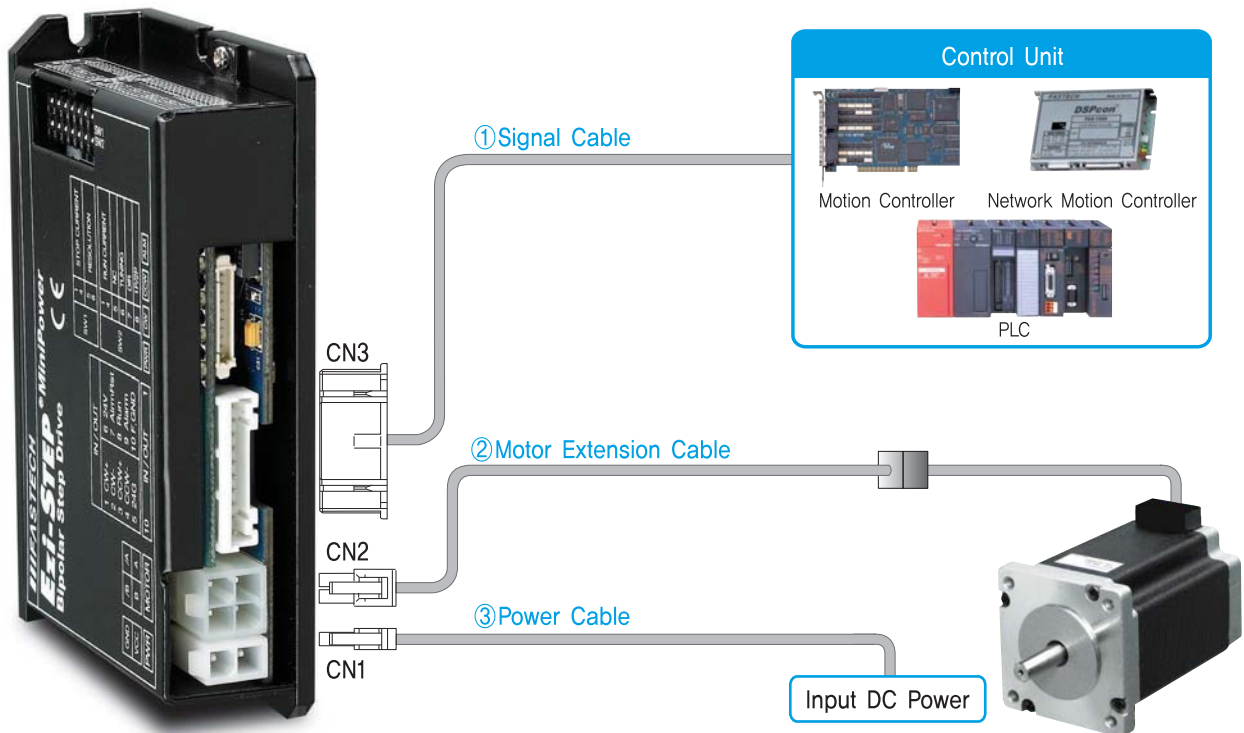
● Drive Specifications [MPB Series]

Motor	BM-42 Series	BM-56 Series	BM-60 Series	BM-71 Series
Drive	EzStep-MPB-42 Series	EzStep-MPB-56 Series	EzStep-MPB-60 Series	EzStep-MPB-71 Series
Input Voltage	24VDC±10%			
Drive Method	Bipolar PWM drive with 32bit DSP			
Curren	Max : 500mA(Except motor current)			
Operating Condition	Temperature	In Use : 0~50°C In Storage : -20~70°C		
	Humidity	In Use : 35~85%RH (Non-Condensing) In Storage : 10~90%RH (Non-Condensing)		
	Vib. Resist.	0.5G		
Function	Resolution(P/R)	500, 1000, 1600, 2000, 3200, 3600, 40000, 50000, 6400, 8000, 10000, 20000, 25000, 36000, 40000, 50000 (Set by DIP Switch) *Default : 10000		
	Maximum Frequency	500KHz (Duty 50%)		
	Protection Function	Over current, Over speed, Step out, Over temperature, Over regenerated voltage, Motor connect error, Low input voltage, System error, ROM error, High input voltage (Identifiable which alarm is activated by counting the blinking times of status monitor LED)		
	LED Display	Power Status(Green), Alarm Status(Red), CW Rotation(Yellow), CCW Rotation(Orange)		
	STOP Current	10%~100% (Set by DIP Switch) Be setted to set value of STOP Current after 0,1 second after motor stop. *Default : 50%		
	Pulse Input Method	1 Pulse / 2 Pulse (Set by DIP Switch) 1 Pulse: Pulse / Direction, 2 Pulse: CW / CCW *Default : 2 Pulse		
	Rotational Dir.	CW / CCW (Set by DIP Switch) Used when changing the direction of motor rotate. *Default : CW		
	Speed/Position Command	Pulse train input (Photocoupler Input)		
	Input Signals	Motor Free / Alarm Reset (Photocoupler Input)		
Output Signals	Alarm, Run/Stop (Photocoupler Output)			

● Drive Size [mm]



● Setting and Operating [MPB Series]



Type	Power Cable	Motor Cable	Power Cable
Standard Length	–	30cm	–
Max. Length	20m	20m	2m

1. Cable Option

①Signal Cable

Available to connect between Control Unit and Ezi-STEP MPB.

Item	Length[m]	Remark
CMNB-S-□□□F	□□□	Normal Cable
CMNB-S-□□□M	□□□	Robot Cable

□ is for Cable Length, The unit is 1m and Max, 20m length.

③Power Cable

Available to connect between Power and Ezi-STEP MPB.

Item	Length[m]	Remark
CSVO-P-□□□F	□□□	Normal Cable
CSVO-P-□□□M	□□□	Robot Cable

□ is for Cable Length, The unit is 1m and Max, 2m length.

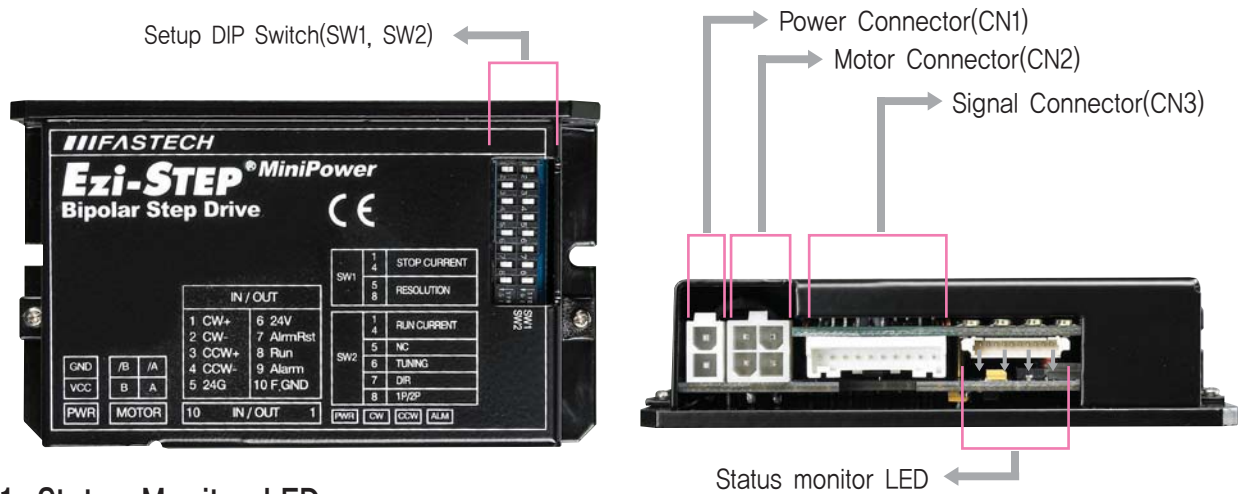
②Motor Extension Cable

Available to connect between motor and Ezi-STEP MPB.

Item	Length[m]	Remark
CSVO-M-□□□F	□□□	Normal Cable
CSVO-M-□□□M	□□□	Robot Cable

□ is for Cable Length, The unit is 1m and Max, 20m length.

● Setting and Operating [MPB Series]

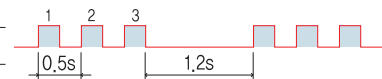


1. Status Monitor LED

Indication	Color	Function	Flash Condition
PWR	Green	Power Input Indication	Lights when power is ON Flashes when motor is Free status
ALM	Red	Alarm Indication	Flash when protection function is activated (Identifiable which protection mode is activated by counting the flash times)
CW	Yellow	Motor Rotation Direction	Lights when motor rotate CW direction
CCW	Orange	Motor Rotation Direction	Lights when motor rotate CCW direction

◆ Protection functions and LED flash times

Times	Protection	Conditions
1	Over current	Excessive current flowed into a motor
2	Over speed	Motor speed exceeded 3000 rpm
3	Step out	Abnormally motor do not followed pulsed input
5	Over temperature	Internal temperature of a motor drive exceeded 55°C
6	Over regenerative voltage	Back EMF more than 50V
7	Motor connect error	Power is ON without connection of motor cable to drive
9	Motor voltage error	Motor voltage is below 20V
11	System error	Error occurs in drive system
12	ROM error	Error occurs in Parameter storage Device(ROM)
14	Input voltage error	Power source voltage is out of limited value [20V~28V]



Alarm LED flash
(ex: Synchronization error)

2. Stop Current Selection(SW1.1~SW1.4)

Stop Current means the motor current value automatically set in 0.1 sec after motor stops. This is to prevent the overheat of a motor when the motor is under long time idling. The unit of the selection value is a percentage.

Switch Position(SW1)				STOP Current(%)	Switch Position(SW1)				STOP Current(%)
4	3	2	1		4	3	2	1	
ON	ON	ON	ON	10	OFF	ON	ON	ON	90
ON	ON	ON	OFF	20	OFF	ON	ON	OFF	100
ON	ON	OFF	ON	30	OFF	ON	OFF	ON	10
ON	ON	OFF	OFF	40	OFF	ON	OFF	OFF	10
ON	OFF	ON	ON	50	OFF	OFF	ON	ON	10
ON	OFF	ON	OFF	60	OFF	OFF	ON	OFF	10
ON	OFF	OFF	ON	70	OFF	OFF	OFF	ON	10
ON	OFF	OFF	OFF	80	OFF	OFF	OFF	OFF	10

3. Resolution Selection Switch (SW1.5~SW1.8)

The number of pulse per revolution.

Switch Position(SW1)				Pulse/ Revolution	Switch Position(SW1)				Pulse/ Revolution
8	7	6	5		8	7	6	5	
ON	ON	ON	ON	500	OFF	ON	ON	ON	6,400
ON	ON	ON	OFF	1,000	OFF	ON	ON	OFF	8,000
ON	ON	OFF	ON	1,600	OFF	ON	OFF	ON	10,000
ON	ON	OFF	OFF	2,000	OFF	ON	OFF	OFF	20,000
ON	OFF	ON	ON	3,200	OFF	OFF	ON	ON	25,000
ON	OFF	ON	OFF	3,600	OFF	OFF	ON	OFF	36,000
ON	OFF	OFF	ON	4,000	OFF	OFF	OFF	ON	40,000
ON	OFF	OFF	OFF	5,000	OFF	OFF	OFF	OFF	50,000

※The default factory setting is 10,000

4. Rotational Direction Selection Switch (SW2.7)

Indication	Switch Name	Functions
DIR	Rotational Direction Select Switch	Based on CW(+Dir signal) input to drive. ON : CCW(-Direction) OFF : CW(-Direction) ※The default factory setting is CW(clockwise).

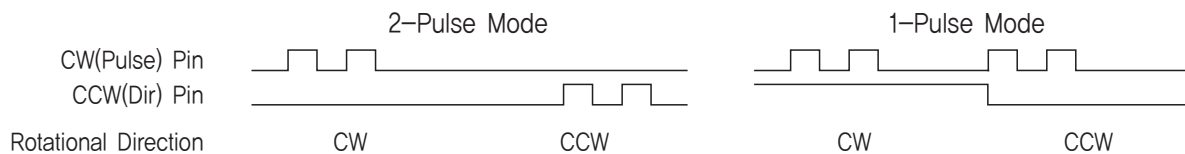
Direction selection switch :
1
CCW Dir.



Direction selection switch :
0
CW Dir.

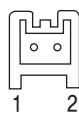
5. Pulse Input Selection Switch (SW2.8)

Indication	Switch Name	Functions
1P/2P	Pulse Input Mode Select Switch	Selectable 1-Pulse input mode of 2-Pulse input mode as pulse input signal. ON : 1-Pulse mode OFF : 2-Pulse mode ※The default factory setting is 2-Pulse mode



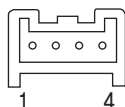
6. Power Connector(CN1)

NO.	Function
1	24VDC ±10%
2	GND



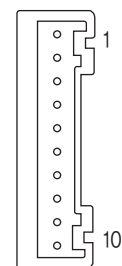
7. Motor Connector(CN2)

NO.	Function
1	B
2	/B
3	/A
4	A

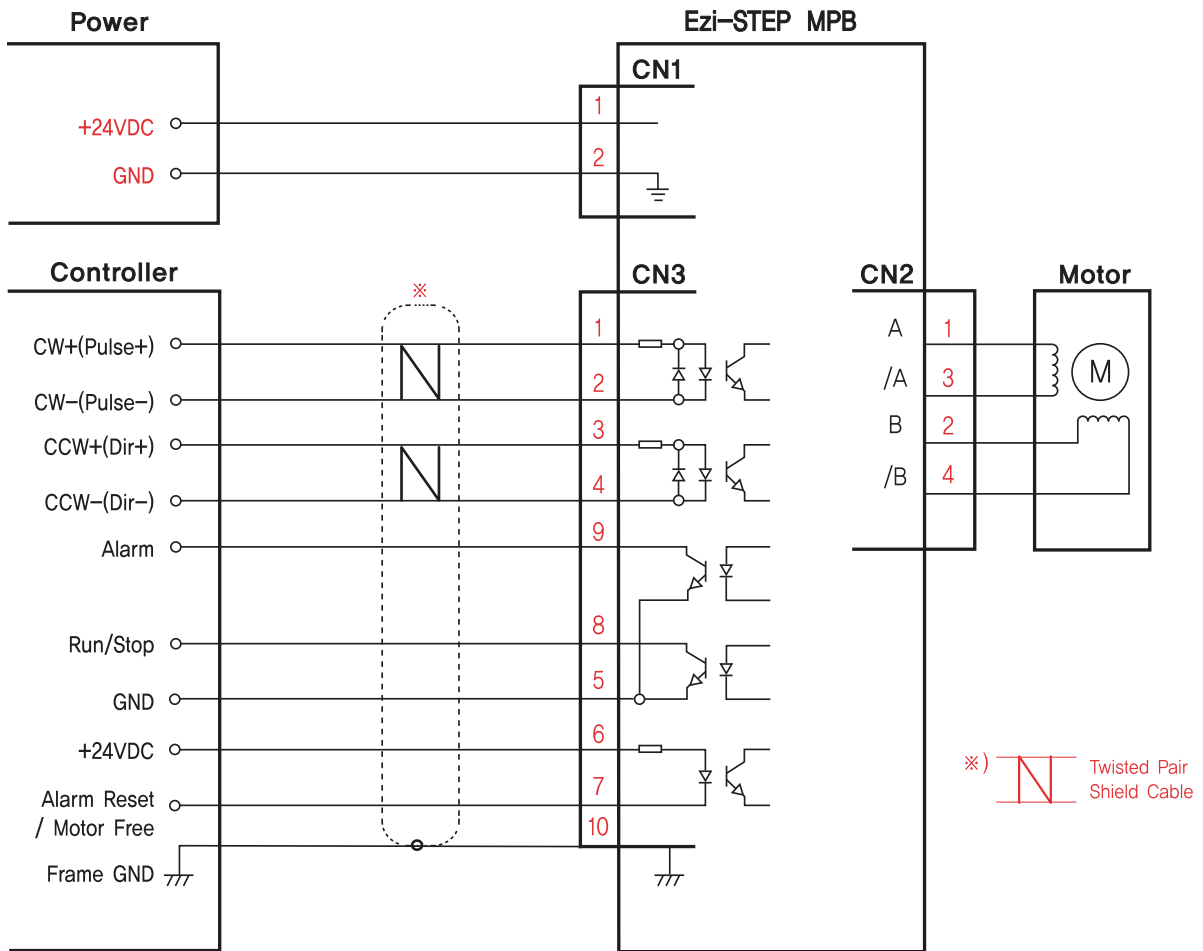


8. Signal Connector(CN3)

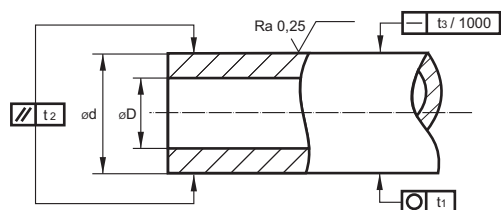
NO.	Function	Input/Output
1	CW+(PULSE+)	Input
2	CW-(PULSE-)	Input
3	CCW+(DIR+)	Input
4	CCW-(DIR-)	Input
5	GND	Input
6	+24VDC	Input
7	ALARM RESET	Input
8	RUN/STOP	Output
9	ALARM	Output
10	F. GND	----



External Wiring Diagram [MPB Series]



*Alarm Reset Signal line is also used for Motor FREE signal.
 (For details, please refer to the section for Control Input/Output signal)



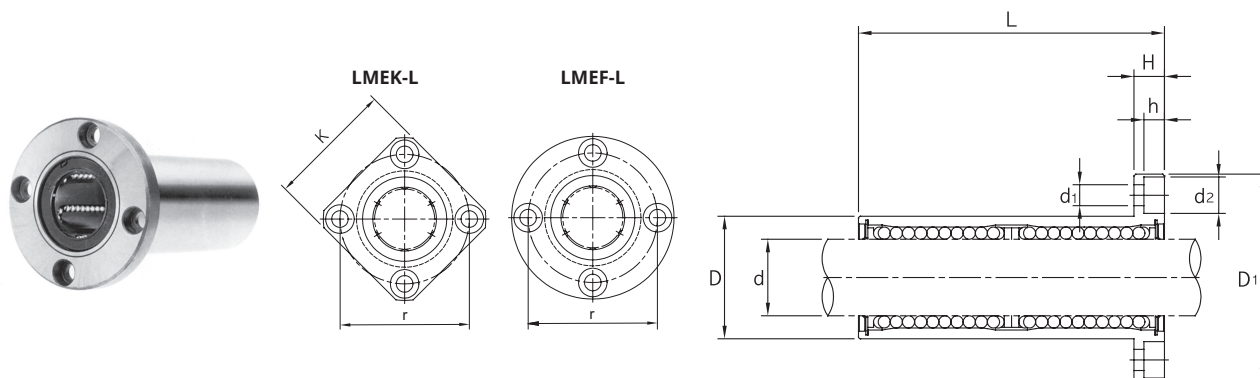
WRB Nerezové plné vodící tyče, indukčně kalené, HRC 51–55, broušené, materiál X-46Cr13 (1.4043)

WRA Nerezové plné vodící tyče, indukčně kalené, HRC 52–56, broušené, odolné chemikáliím, materiál X-90CrMoV18 (1.4112)

WH Duté vodící tyče, indukčně kalené, HRC 62 ± 2, broušené, materiál C60 nebo 100Cr6

Označení tyče	Průměr tyče $\varnothing d$ [mm]	Vnitřní průměr tyče $\varnothing D$ [mm]	Tloušťka kalené vrstvy [mm]	Standard. tolerance ISO h6 [μm]	Max. výrobní délka [mm]	Kruhovitost t_1 [μm]	Přímost t_2 [μm]	Rovinnost t_3 [μm]	Hmotnost na 1 m [kg]
WRB									
WRB05	5		0,7	0–8	1000	4	5	0,16	0,154
WRB06	6		0,7	0–9	3900	4	6	0,16	0,222
WRB08	8		0,9	0–9	3900	4	6	0,16	0,395
WRB10	10		1,1	0–11	3900	4	6	0,16	0,617
WRB12	12		1,3	0–11	4900	5	8	0,12	0,888
WRB14	14		1,5	0–11	4900	5	8	0,12	1,208
WRB15	15		1,6	0–11	4900	5	8	0,12	1,387
WRB16	16		1,6	0–11	4900	5	8	0,12	1,578
WRB20	20		1,8	0–13	4900	6	9	0,10	2,466
WRB25	25		2	0–13	4900	6	9	0,10	3,853
WRB30	30		2,4	0–13	4900	6	9	0,10	5,549
WRB40	40		2,6	0–13	4900	7	11	0,10	9,865
WRB50	50		2,9	0–13	4900	7	11	0,10	15,41
WRB60	60		3	0–16	4900	8	13	0,10	22,2
WRA									
WRA05	5		0,7	0–8	3800	4	5	0,16	0,154
WRA06	6		0,7	0–9	3800	4	6	0,16	0,222
WRA08	8		0,9	0–9	3800	4	6	0,16	0,395
WRA10	10		1,1	0–11	3800	4	6	0,16	0,617
WRA12	12		1,3	0–11	7800	5	8	0,12	0,888
WRA14	14		1,5	0–11	7800	5	8	0,12	1,208
WRA15	15		1,6	0–11	7800	5	8	0,12	1,387
WRA16	16		1,6	0–11	7800	5	8	0,12	1,578
WRA20	20		1,8	0–13	7800	6	9	0,10	2,466
WRA25	25		2	0–13	7800	6	9	0,10	3,853
WRA30	30		2,4	0–13	7800	6	9	0,10	5,549
WRA40	40		2,6	0–13	7800	7	11	0,10	9,865
WRA50	50		2,9	0–13	7800	7	11	0,10	15,41
WRA60	60		3	0–16	7800	8	13	0,10	22,2
WH									
WH-12	12	4	1,3	0–11	6000	5	8	0,12	79
WH-16	16	7	1,6	0–11	6000	5	8	0,12	1,28
WH-20	20	14	1,8	0–13	6000	6	9	0,10	1,25
WH-25	25	15,6	2	0–13	6000	6	9	0,10	2,35
WH-30	30	18,3	2,4	0–13	6000	6	9	0,10	3,5
WH-40	40	28	2,6	0–16	6000	7	11	0,10	4,99
WH-50	50	29,7	2,9	0–16	6000	7	11	0,10	9,91
WH-60	60	36	3	0–19	6000	8	13	0,10	14,2
WH-80	80	57	3,2	0–19	6000	8	13	0,10	19,43

LMEK(F)-L



Přírubové tandemové kuličkové pouzdro

Ocelový plášť / plastová klec

Označení	Rozměry [mm]										Únosnost [N]		Hmotnost [kg]
	$\varnothing d_{H6}$	$\varnothing D_{h6}$	L	D1	H	h	$\varnothing d_1$	$\varnothing d_2$	r	K	C_d	C_o	
LMEK(F)-08-L	8	16	45	32	5	3,3	3,4	6,5	24	25	431	784	0,050
LMEK(F)-12-L	12	22	57	42	6	4,4	4,5	8	32	32	657	1200	0,100
LMEK(F)-16-L	16	26	70	46	6	4,4	4,5	8	36	35	1230	2350	0,190
LMEK(F)-20-L	20	32	80	54	8	5,4	5,5	9,5	43	42	1400	2750	0,260
LMEK(F)-25-L	25	40	112	62	8	5,4	5,5	9,5	51	50	1560	3140	0,520
LMEK(F)-30-L	30	47	123	76	10	6,5	6,6	11	62	60	2490	5490	0,670
LMEK(F)-40-L	40	62	154	98	13	8,6	9	14	80	75	3430	8040	1,590
LMEK(F)-50-L	50	75	192	112	13	8,6	9	14	94	88	6080	15900	3,570
LMEK(F)-60-L	60	90	211	134	18	10,8	11	17,5	112	106	7650	20000	4,590

Kuličková pouzdra je možné dodat také v metrických rozměrech obvyklých v Japonsku (LM).

Objednací číslo:

přírubové tandemové kuličkové pouzdro LMEK(F)-L

průměr vodicí tyče / tandemové provedení

U – jednostranně, UU – oboustranně utěsněné

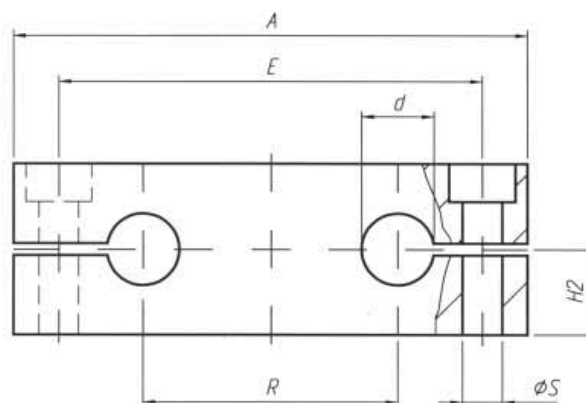
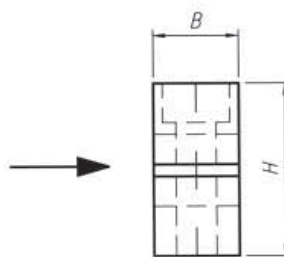
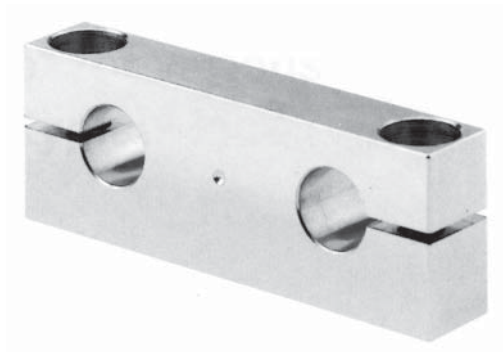
LMEF

Ø - L

UU

Z legovaného hliníku

Pevné uchycení



Označení	Rozměry [mm]								Hmotnost [kg]
	ød	A	B	H	H2 ^{±0,015}	R	øS	E	
TAA-08	8	65	12	23	12,5	32	5,5	52	0,04
TAA-12	12	85	14	32	18	42	6,6	70	0,09
TAA-16	16	100	18	36	20	54	9	82	0,14
TAA-20	20	130	20	46	25	72	11	108	0,25
TAA-25	25	160	25	56	30	88	13,5	132	0,47
TAA-30	30	180	25	64	35	96	13,5	150	0,62
TAA-40	40	230	30	80	44	122	17,5	190	1,15

Rozteč otvorů pro uchycení tyčí „R“ odpovídá roztečím u linear-setů QAG a QAG-OP - viz str. 40-41.
Odpovídající typy vodicích tyčí - viz str. 66-69.

PW4M...

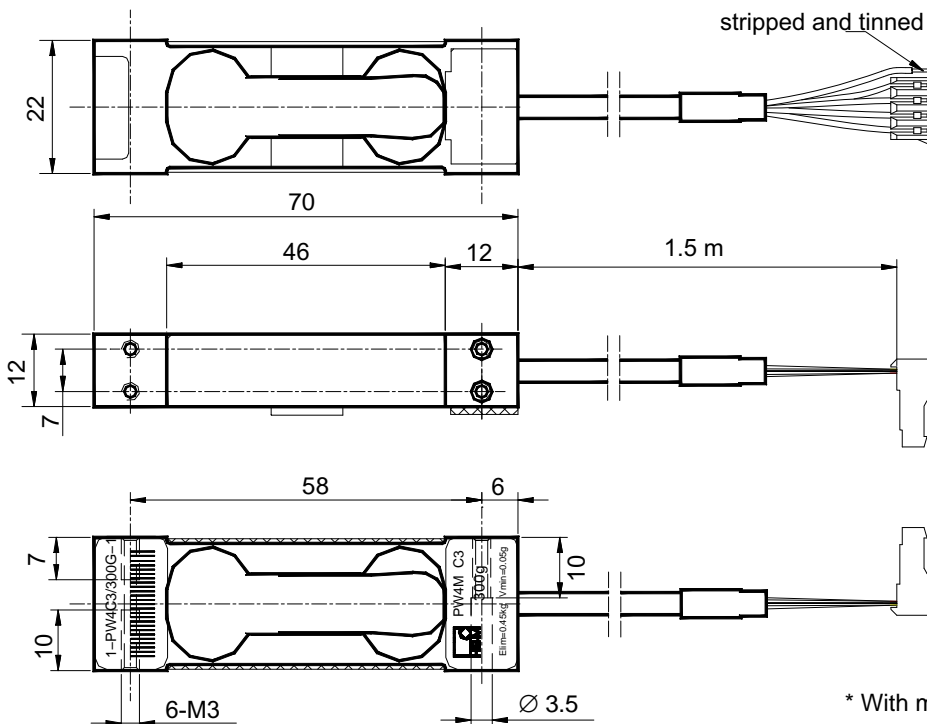
Single point load cells

Special features

- For determining small masses (0.3 kg ... 3 kg)
- Aluminum
- Off center load compensated
- Shielded connection cable



Dimensions (in mm; 1 mm= 0.03937 inches)



Plug: CE 100F26-4 (Pancon)
Wiring code (4-core)
Pin1: Excitation (+) blue
Pin2: Signal (+) white
Pin3: Signal (-) red
Pin4: Excitation (-) black
Shield yellow
(connected to load cell body)

Mounting:
Cylindrical head screws: M3 - 8.8
Tightening torque: 1.3 N·m

* With max. capacities 2 kg and 3 kg: 15 ± 0.2

Specifications

Type			PW4MC3...			
Order-No.			1-PW4C3/300G-1	1-PW4C3/500G-1	1-PW4C3/2KG-1	1-PW4C3/3KG-1
Accuracy class ¹⁾			C3			
Maximum number of load cell intervals	n_{LC}		3000			
Maximum capacity ²⁾	E_{max}	kg	0.300	0.500	2	3
Minimum LC verification interval	v_{min}	g	0.05	0.1	0.2	0.5
Temperature effect on zero balance	TK_0	% of C_n / 10 K	0.0233	0.0280	0.0140	0.0233
Ratio of minimum verification interval	Y		6000	5000	10000	6000
Max. platform size		mm	200 x 200			
Sensitivity	C_n	mV/V	1.0 ± 0.1		2.0 ± 0.2	
Zero signal			0 ± 0.1			
Temperature effect on sensitivity ³⁾	TK_C	% of C_n / 10 K	± 0.0175 ± 0.0117			
Temperature range: +20 ... +40 °C [68...104 °F] -10 ... +20 °C [14...68 °F]						
Hysteresis error ³⁾	d_{hy}	% of C_n	± 0.0150			
Non-linearity ³⁾	d_{lin}		± 0.0150			
Minimum dead load output return	DR		± 0.0166			
Off center load error ⁴⁾			± 0.0233			
Input resistance	R_{LC}	Ω	300 ... 500			
Output resistance	R_0		300 ... 500			
Reference excitation voltage	U_{ref}	V	5			
Nominal range of excitation voltage	B_U		1 ... 8			
Max. excitation voltage		V	10			
Insulation resistance at 100 V _{DC}	R_{is}	GΩ	> 2			
Nominal temperature range	B_T	°C [°F]	-10 ... +40 [+14...+104]			
Operating temperature range	B_{tu}		-10 ... +50 [+14...+122]			
Storage temperature range	B_{tl}		-25 ... +70 [-13...+158]			
Limit load ⁴⁾ at max. eccentricity	E_L	% of E_{max}	150			
		mm	100			
Lateral load limit, static	E_{lq}	% of E_{max}	200			
Breaking load	E_d		> 300			
Deflection at E_{max} , approx.	s_{nom}	mm	< 0.4			
Weight, without cable, approx.	m	kg	0.07			
Degree of protection ⁵⁾			IP65			
Material:	Measuring body Coating Cable sheath		Aluminum Silicone rubber PVC			

1) In accordance to OIML R60 with $P_{LC} = 0.7$

2) Max. eccentric load according to OIML R76

3) The data for Non-linearity (d_{lin}), Hysteresis error (d_{hy}) and Temperature effect on sensitivity (TK_C) are typical values. The sum of these data meets the requirements according to OIML R60.

4) According to OIML R76

5) According to IEC529

Subject to modifications.

All product descriptions are for general information only. They are not to be understood as a guarantee of quality or durability.

Hottinger Baldwin Messtechnik GmbH
Im Tiefen See 45 · 64293 Darmstadt · Germany
Tel. +49 6151 803-0 · Fax +49 6151 803-9100
Email: info@hbm.com · www.hbm.com

measure and predict with confidence

