



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**NÁVRH SIMULÁTORU PRO ANALÝZU TŘENÍ V  
KOLENNÍM KLOUBU**

DESIGN OF SIMULATOR FOR FRICTION ANALYSIS IN A KNEE JOINT

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Lucie Dobrovolná**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.**

**BRNO 2020**

# Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav strojírenské technologie
Studentka:	<b>Lucie Dobrovolná</b>
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	<b>doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.</b>
Akademický rok:	2019/20

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 simulátoru pro analýzu tření v kolenním kloubu

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Analyzovat pohyby kolenního kloubu za chůze, na základě analýzy vyvinout simulátor, který bude simulovat stanovenou kinematiku kolene. V závislosti na kinematice chůze zaznamenávat průběh tření mezi chrupavkou a hlavicí.

### Cíle bakalářské práce:

- Teoretická část – analýza kinematiky kolenního kloubu (za chůze).
- Charakteristika stanovení okrajových podmínek, volba způsobu měření tření.
- Praktická část – konstrukce simulátoru s konkrétní sensorikou a motory (3D model).

### Seznam doporučené literatury:

ANDERSON, M. C., N. A. T. BROWN, K. N. BACHUS a B. A. MACWILLIAMS. A cadaver knee simulator to evaluate the biomechanics of rectus femoris transfer. Elsevier. 2009, 30(1), 87-92. DOI:10.1016/j.gaitpost.2009.03.007. ISSN 09666362.

WIMMER, M. A., S. GRAD, T. KAUP, M. HÄNNI, E. SCHNEIDER, S. GOGOLEWSKI a M. ALINI. Tribology Approach to the Engineering and Study of Articular Cartilage. Tissue Engineering. 2004, 10, 1436-1445. DOI: 10.1089/1076327042500454. ISSN 1076-3279.

MOORE, A. C. a D. L. BURRIS. Tribological rehydration of cartilage and its potential role in preserving joint health. Osteoarthritis and Cartilage. 2017, 25(1), 99-107. DOI: 10.1016/j.joca.2016.09.018. ISSN 10634584.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

---

## ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá konstrukcí zařízení simulujícího kinematiku kolenního kloubu. Okrajové podmínky se inspiřují normou ISO 14243-3 a na jejich základě následuje výběr vhodných komponentů. Simulátor bude schopen zaznamenávat průběh koeficientu tření mezi chrupavkou tvořící translační pohyb, CoCr hlavici tvořící rotační pohyb a přitlačnou sílu, čímž pomáhá lépe pochopit biotribologické procesy mezi zvolenými povrchy. Konstrukce musí být vyvinuta s ohledem na relativní pohyb komponentů, materiál vzorků a mazání.

Úvodní část textu se zabývá přehledem současného poznání, které slouží jako hlavní vstup do tvorby konstrukce. Na základě rešeršní části je vytvořeno několik koncepčních řešení v oblasti konstrukce a způsobu měření tření. Z navržených konceptů je vybráno výsledné řešení, které splňuje předem stanovené podmínky a obsahuje konkrétní pohony i senzorku.

### Klíčová slova

Kolenní kloub, simulátor, chrupavka, biotribologie, konstrukce, tření

## ABSTRACT

This bachelor thesis deals with the construction of a device simulating the kinematics of the knee joint. Boundary conditions are inspired by the ISO 14243-3 standard and are based on the selection of suitable components. The simulator will be able to record the course of the coefficient of friction between the cartilage forming the translational motion, the CoCr head forming the rotational motion and the pressing force, thus helping to better understand the biotribological processes between the selected surfaces. The design must be developed with respect to the relative movement of components, sample material and lubrication.

The introductory part of the text deals with an overview of current knowledge, which serves as the main input to the creation of the structure. Based on the research part, several conceptual solutions are created in the field of construction and method of friction measurement. The resulting solution is selected from the proposed concepts, which meets predetermined conditions and contains specific drives and sensors.

### Key words

Knee joint, simulator, cartilage, biotribology, construction, friction

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

DOBROVOLNÁ, Lucie. *Návrh simulátoru pro analýzu tření v kolenním kloubu* [online]. Brno 2020 Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zavprace/detail/124358>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie. 79 s. 5 příloh. Vedoucí práce doc. Ing. Josef Sedlák, Ph.D.

## PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Návrh simulátoru pro analýzu tření v kolenním kloubu** vypracovala samostatně s použitím odborné literatury a pramenů uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

26.06.2020

-----  
Datum

-----  
Lucie Dobrovolná

## PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych ráda poděkovala svému vedoucímu práce doc. Ing. Josefu Sedlákovi, Ph.D., za mnoho cenných rad, připomínek a trpělivost během tvorby této práce.

Chtěla bych rovněž poděkovat Univerzitě obrany v Brně za spolupráci při měření na tribologickém simulátoru. Poděkování patří také mé rodině a všem blízkým za podporu během celého studia.

---

**OBSAH**

<b>BIBLIOGRAFICKÁ CITACE</b>	<b>3</b>
<b>PROHLÁŠENÍ</b>	<b>4</b>
<b>PODĚKOVÁNÍ</b>	<b>5</b>
<b>OBSAH</b>	<b>6</b>
<b>ÚVOD</b>	<b>8</b>
<b>1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ</b>	<b>9</b>
1.1 Anatomie kolenního kloubu	9
1.1.1 Kloubní chrupavka	10
1.1.2 Artróza	11
1.1.3 Pohyb kloubu	12
1.2 Kolenní náhrada	12
1.2.1 Rozdělení endoprotéz kolene	14
1.2.2 Materiály kolenních náhrad	15
1.3 Typy kolenních simulátorů	16
1.3.1 Simulátor kolena k vyhodnocení biomechaniky u dětí s mozkovou obrnou	16
1.3.2 Bioreaktor	17
1.3.3 VIVO kolenní simulátor	18
1.4 Existující tribometry	19
1.4.1 Simulátor pin-on-slab	19
1.4.2 Reciproční tribometr	20
1.4.3 Bruker UMT Tribometr	21
<b>2 STANOVENÍ PODMÍNEK</b>	<b>23</b>
2.1 Analýza problému	23
2.2 Návrh experimentu	25
<b>3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>33</b>
3.1 Anterio – posterální pohyb	33
3.1.1 Varianta a) lineární vedení	34
3.1.2 Varianta b) vzduchové ložisko	34
3.2 Zatížení hlavice	36
3.2.1 Varianta a) elektrický pohon	37

---

3.2.2	Varianta b) dva krokové motory	38
3.3	Rotace hlavice	39
3.4	Způsoby měření	40
3.4.1	Varianta a) tenzometrická růžice	40
3.4.2	Varianta b) šestiosý senzor	41
3.4.3	Varianta c) tenzometrické snímače síly	41
<b>4</b>	<b>KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ</b>	<b>43</b>
4.1	Zatížení hlavice	43
4.1.1	Elektrický pohon	43
4.2	Konstrukce zatížení	44
4.3	Rotace hlavice	46
4.3.1	Servomotor	46
4.3.2	Konstrukce rotace hlavice	47
4.4	Anterio-posteriální pohyb	47
4.4.1	Lineární pohon	47
4.4.2	Konstrukce anterio-posteriálního pohybu	48
4.5	Aplikované senzory	49
4.6	Konstrukce rámu simulátoru	50
4.7	Návrh výpočtů	51
4.7.1	Výpočet hřídele	51
4.7.2	Zatížení kompaktních pouzder	52
4.8	Testovací sérum	53
<b>5</b>	<b>DISKUSE</b>	<b>54</b>
5.1	Návrhy pokračování řešení	55
<b>6</b>	<b>ZÁVĚR</b>	<b>56</b>
<b>7</b>	<b>SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ</b>	<b>57</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÝCH FYZIKÁLNÍCH SYMBOLŮ A ZKRATEK</b>	<b>61</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH</b>	<b>62</b>
	<b>PŘÍLOHY</b>	<b>63</b>

---



## ÚVOD

Kolenní kloub je největší a nejsložitější kloub v lidském těle, jenž se skládá ze dvou styčných ploch kostí s chrupavkami. Je to nosný kloub, který je vystavován každodenní zátěži. Umožňuje nám stát, napřímit se, ale i chodit. Zodpovídá za pohyblivost a stabilitu, proto jsou na něj kladeny vysoké nároky. V současné době se s rozvojem techniky snižuje dostatek pohybu nebo se pohyb stává jednostranným. Stále častěji se objevuje nutnost implantace u mladších pacientů, kteří se chtějí i nadále věnovat aktivnímu životu, a proto je potřeba lépe pochopit biotribologické a biomechanické vlastnosti kloubu, aby se mohl implantát zdokonalovat a aby se zvyšovala se tak jeho životnost. Největší vliv na opotřebením má v koleni tření, které je ovlivněno mnoha aspekty, například vlivem maziv a kinematiky kloubu. Tření a nemoci způsobují opotřebením chrupavky, která potom není schopna zastávat své funkce, proto se musí kloub nahradit endoprotézou.

Endoprotéza je kloubní náhrada, kterou můžeme použít pro ramena, kolena, lokty atd. Nahrazuje nám části, nebo celý kloub. Ročně se v České republice implantuje až 25 000 různých náhrad kloubů [1]. Endoprotéza má za úkol zbavit pacienta bolesti a vrátit mu plnohodnotný život, což v současné době není vždy úplně možné a pohyblivost kloubu je stále omezená. Největší predispozice pro opotřebením kloubů mají lidé s obezitou, sportovci, staří lidé a pracovníci v jednostranném pracovním zařazení.

Aby se zamezilo vzniku poruch endoprotéz a nutnosti dalších operací, je třeba zvyšovat životnost endoprotéz, na niž mají vliv navrhované komponenty endoprotézy, chirurgický zákrok a specifická anatomie každého pacienta. Poruchovost zvyšuje nároky na experimenty v kontrolovaných podmínkách a zároveň je třeba provést větší četnost experimentů.

Cílem této práce je navrhnout přirozený simulátor kolene, který bude simulovat přirozenou kinematiku kolene při chůzi a z nějž budeme schopni snímat koeficient tření.

## 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

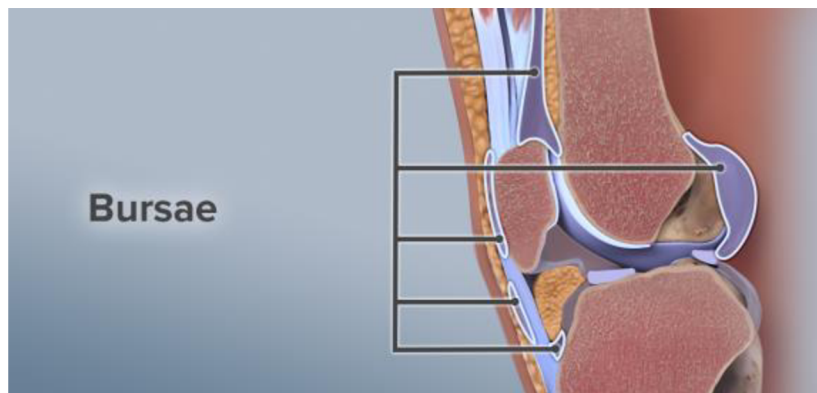
V následující kapitole je rozebrána anatomie kolena a existující tribometry, které slouží jako výstup pro výslednou konstrukci.

### 1.1 Anatomie kolenního kloubu

Kolenní kloub je pohyblivý spoj spojující stehenní (femur), holenní (tibia) kost a čěšku (patela), proto je nejsložitějším kloubem v lidském těle, díky němuž jsme schopni pohybu [2]. Kostí jsou pevnou oporou měkkých částí těla a pákami, které pohybují silou zkracujících se svalů. Kloubní povrchy jsou ve zdravém koleni kryty různě silnou vrstvou pružné chrupavky [3].

Mezi stehenní kostí a holenní kostí se nachází meniskus, což je vazivová chrupavčitá pohyblivá vložka, která je napojena na přední a zadní zkřížené vazy. Zvětšuje plochu kontaktu až o 70 % a vyrovnává zakřivení kloubních ploch [3]. Působí jako tlumič tlakové síly a posouvají se vpřed při extenzi a vzad při flexi. V každém koleni jsou 2 menisky. Střední meniskus je umístěn na vnitřní straně kolena a boční meniskus je umístěn na vnější straně kolena [4].

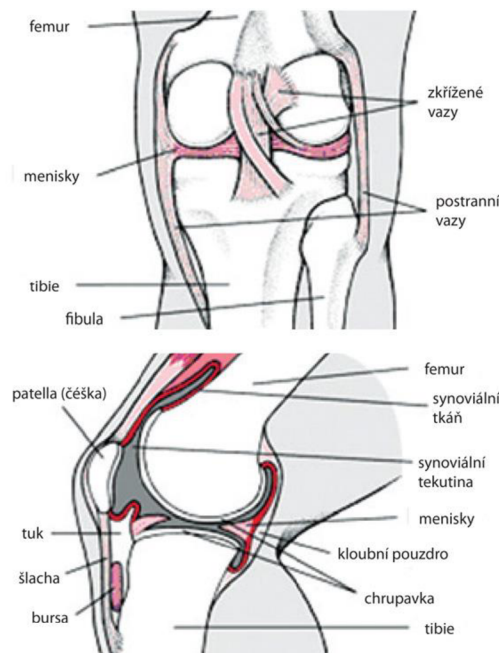
V koleni se nachází malé polštářky zvané bursae, v těle je jich více než 140. Jsou to kluzké vaky, ve kterých se nachází tekutina. Polštářky jsou umístěny u kostí dle obr. 1–1. Skládají se ze synoviální membrány, která tvoří vak bursy. Membrána produkuje synoviální tekutinu, která je ve vakuu [5].



Obr. 1–1 Bursae v koleni [4].

Pro správný pohyb kloubu je důležité mazání synoviální tekutinou, které je složena z filtrátu plazmy, kyseliny hyaluronové a buněk. Množství tekutiny se pohybuje od 2 do 4 ml. Zajišťuje výživu kloubu, zvyšuje pružnost chrupavek a snižuje tření. Kyselina hyaluronová omezuje pohyb látek a tvoří tenkou vrstvu oddělující třecí plochy chrupavek [6]. Synoviální kapalina v kloubu zajišťuje pohyb s minimálním třením. V případě onemocnění kolene a narušení některé z částí ztrácí tento systém funkčnost [7].

Důležitou součástí kolene jsou vazy, jež zajišťují stabilitu kolene. Zkřížené vazy jsou nejmohutnější stabilizátory kloubu a mají pevnost, až 800 N. Přední zkřížené vazy omezují posun tibie dopředu a vnitřní rotace. Zadní zkřížené vazy naopak omezují pohyb dozadu a vnější rotaci. Mediální vazy určují rozsah zevní rotace s pevností až 480 N. Postranní kolenní vazy omezují vbočení a vybočení kolena, dále vnější a vnitřní rotaci a posun [8]. Celková anatomie kolene je zobrazena na obr. 1-2.



Obr. 1–2 Anatomie kolena [9].

Správná anatomická stavba závisí na dynamických, ale i statických stabilizátorech [10].

- statické – menisky, vazivový aparát, kloubní pouzdro,
- dynamické – svalový aparát.

### 1.1.1 Kloubní chrupavka

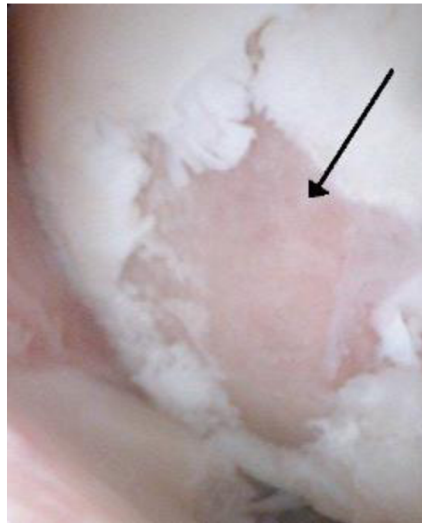
Je pevná a pojivá tkáň, která se skládá z buněk a průsvitné mezibuněčné hmoty. Běžně chrupavky obsahují vazivovou vrstvu, která jí dodává výživu (kromě kloubní chrupavky, jež je vyživována ze synoviální tekutiny, ta je produkována nitrokloubní blankou) [6].

Chrupavka kryje pohybující se povrchy kolene, proto je pro pohyb kolene nutné, aby byla chrupavka zdravá a bez tření. V kolenu slouží k odpružení, absorpci otřesů a snižuje tření mezi klouby. Je to živá tkáň s minimální schopností pro růst a obnovu. Tato schopnost je podmíněna věkem. Chrupavka je nejvíce opotřebována při vysoké aktivitě, nesprávném postoji nohou nebo u lidí s velkou hmotností [8]. Poškozená chrupavka je zobrazena na obr. 1-3.

Základní druhy [11]:

- elastická chrupavka – ušní boltec, hrtanová přiklopka,
- vazivová chrupavka – meziobratlové ploténky,
- hyalinní chrupavka – kloubní chrupavky, spojení žeber na hrudní kost.

V kolenním kloubu jsou dva typy chrupavky. První je chrupavka, jež obaluje stehenní a holenní kost, druhým typem chrupavky je meniskus popsany v podkapitole 1.1 [7].



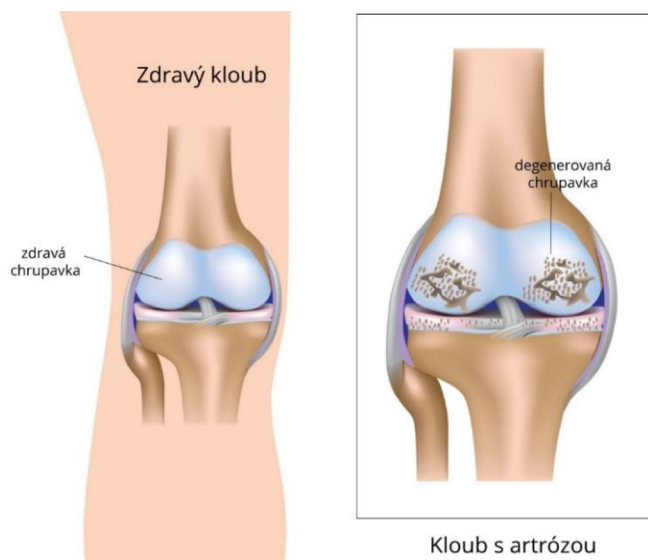
Obr. 1–3 Rozsáhlý defekt chrupavky stehenní kosti [12].

### 1.1.2 Artróza

Klouby jsou nejnáchylnější částí k onemocnění v pohybovém systému. Nejčastěji onemocnění vzniká u lidí s obezitou, s vadným držením těla, s dědičnou predispozicí, u seniorů a sportovců. Rozlišuje se až 200 druhů artrózy [13]. Vzniká v celém kolenním kloubu, nebo v jedné oblasti [14].

Onemocnění souvisí s věkem a fyzickou zátěží. Je to degenerativní, nezánettivé onemocnění postihující především velké klouby a drobné klouby ruky. Objevuje se až u 12 % dospělé populace, často vede až k trvalé invaliditě. Artróza se objevuje primárně u lidí v pokročilém věku, kde je výskyt až 60 %.

Bolest v koleni způsobují kostěné výrůstky, vznikající z důvodu ztenčení a zdrsnění hladké chrupavky, jež leží na nosných kostech. Kloub bývá oteklý, zarudlý a mohou se vyskytovat i deformity (nohy do O) [15]. Porovnání zdravého a postiženého kolene je vidět na obr. 1–4.



Obr. 1–4 Porovnání zdravého a postiženého kolene [16].

### 1.1.3 Pohyb kloubu

Osa kloubu se může pohybovat v 5 směrech. Jedná se o valivé a kluzné pohyby stehenní kosti na holenní. Při ohybu jsou umožněny rotace, které jsou blokovány natažením [3]. Flexi kolena zajišťují zkřížené vazy.

Pohyby při chůzi [10]:

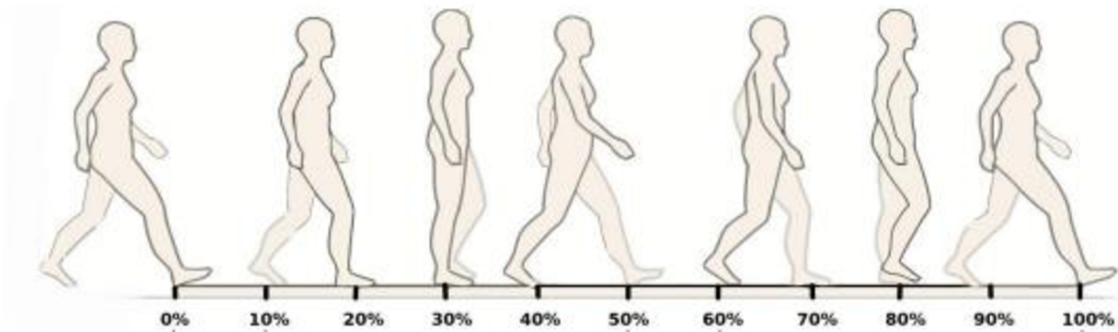
- počáteční rotace (odemknutí kolena – flexe 5°),
- valivý pohyb (flexe 10° až 20°),
- posuvný pohyb (od flexe 20° do asi 140°),
- závěrečnou rotaci.

Extenze je flexe v opačném pořadí. Rotace (externí a interní) od 2° do 6°. Translace A/P (anterio-posteriální posuv) stehenní kosti v ose x, hodnoty od -7 do 2 mm.

Základním stabilním postavením kloubu je jeho plná extenze. Napnuty jsou postranní vazy a vazy na zadní straně kloubu. Femur leží na tibia, koleno je propnuté, tudíž uzamčené [10].

Odemknutí probíhá uvolněním postranních vazů a předního zkříženého vazy. Vyvoláno je malou rotací. Díky odemknutí je možno provést flexi [10].

Základním pohybem kolenního kloubu je flexe a následná extenze. Krok začíná kontaktem pravé nohy. Stojná fáze pravé nohy je od 10 % do 50 % kroku. Její švihová fáze nastává od 60 % do 100 % kroku. Švihová fáze levé nohy začíná na 10 % a končí v 50 % kroku. V 60 % nastává stojná fáze nohy. Znázornění na obr. 1–5.



Obr. 1–5 Jednotlivé fáze kroku [17].

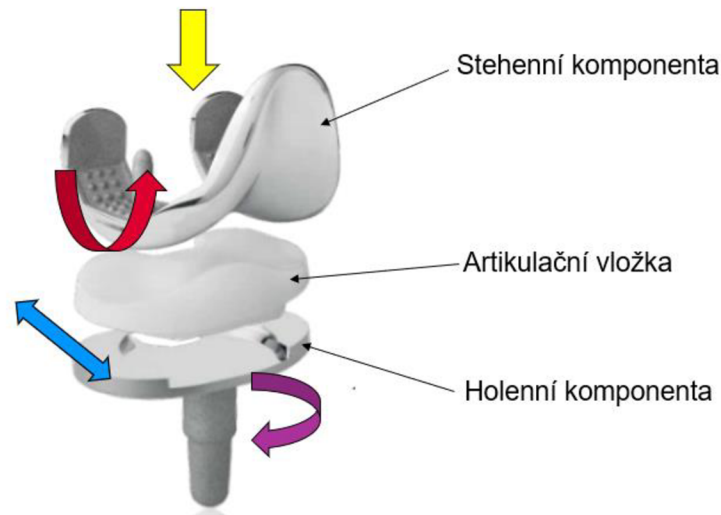
## 1.2 Kolenní náhrada

Kolenní náhrada (endoprotéza) je implantát, který je vkládán do kolene ve chvíli, kdy je koleno postiženo nemocí nebo zraněním. Je to invazivní způsob léčby. Liší se tvary, materiály i konstrukcí. Základní rozdělení náhrady se dělí na částečné a totální. Dále lze rozdělit náhrady podle způsobu implantace [18]:

- cementované,
- necementované,
- hybridní – cementovaná je pouze femorální komponenta.

Dle konstrukce [18]:

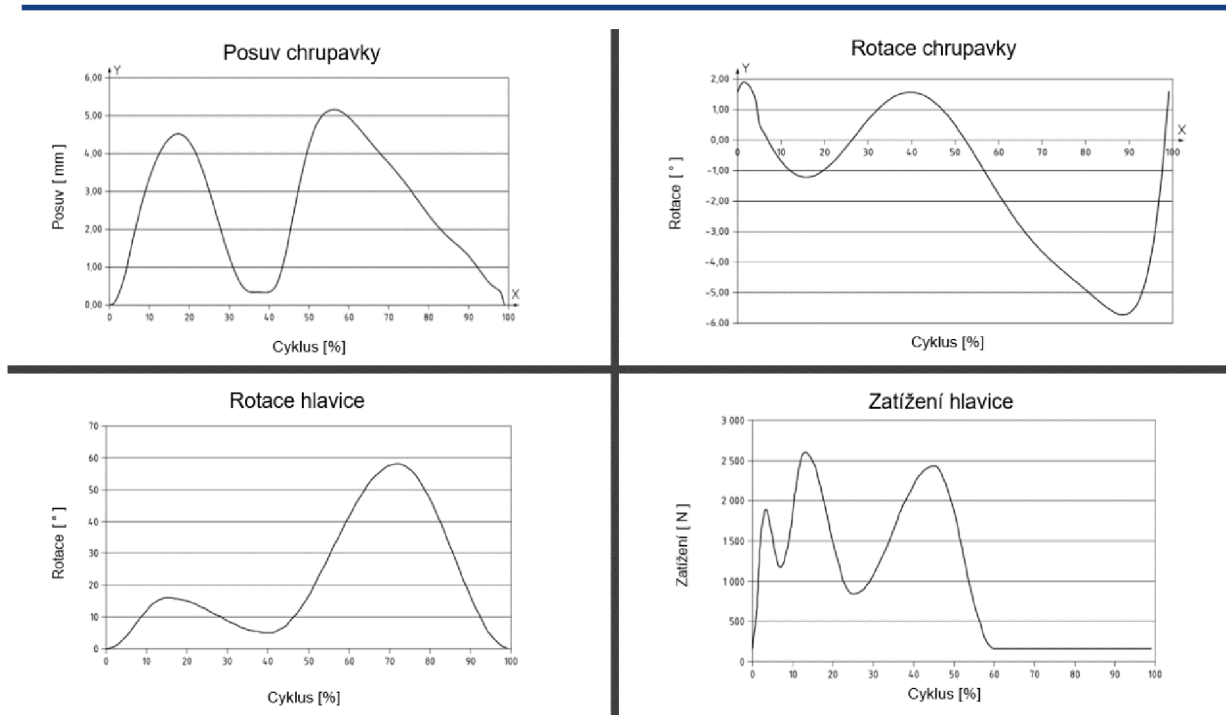
- povrchová endoprotéza,
- povrchová náhrada,
- závěsná endoprotéza s částečnou rotací kolem osy bércevé kosti,
- závěsná pantová endoprotéza.



Obr. 1–6 Pohyby na endoprotéze – žlutá – axiální zatížení; červená – rotace flexe/extenze; modrá – translace; fialová – rotace [18].

Po implantaci totální endoprotézy není pacient schopen dosáhnout pohybů jako se zdravým kolenem, viz obr. 1–6. Tyto pohyby jsou popsány normou ISO 14243-3. Znárodnění jednotlivých pohybů za cyklus, který je roven 1 s, je na obr. 1–7. V levém horním kvadrantu je posuv chrupavky, v dolním levém rotace hlavice. V pravém horním kvadrantu je rotace chrupavky a v levém dolním zatížení hlavice [19].

Přestože je operace již rutinním zákrokem, stále dochází k tomu, že endoprotéza selže. Mezi faktory, které mohou selhání způsobit, patří design endoprotézy, který má každý pacient přizpůsoben, dále je důležitý materiál, z něhož je endoprotéza vyrobena, způsob fixace, kvalita kosti a měkkých tkání s následnou operací a péčí o pacienta. Životnost endoprotézy zásadně ovlivňuje věk pacienta. Nejzásadnějšími faktory jsou chybná implantace a infekce [20].



Obr. 1–7 Pohyb endoprotézy podle normy ISO 14243-3 [19].

### 1.2.1 Rozdělení endoprotéz kolene

Můžeme rozlišit endoprotézu částečnou a totální, které se volí dle míry poškození kolene. Totální endoprotézou se nahrazují obě stykové části a částečnou pouze jeden povrch.

V případě vážného poškození kolenního kloubu se nahrazuje celý kloub, a to totální endoprotézou, která obsahuje stehenní a holenní komponenty s artikulační vložkou. Spolu s pohyby je popsána na obr. 1–8 v podkapitole 1.2.

Částečná náhrada kolena je alternativou totální endoprotézy, používá se v případech, kdy není porušení kloubu tak invazivní po celé ploše, ale je omezeno pouze na jednu oblast. Díky tomu, že není tak náročná a je prováděna menším řezem, má rychlejší rekonvalescenci než u totální náhrady. Částečná náhrada méně ovlivňuje ohyb kolene.

Při zákroku se nejprve odstraní poškozená chrupavka z kosti, umístí se kovové části a mezi ty se vloží artikulační vložka [14]. Po zákroku je nutná rehabilitace. Pro testování kolenních náhrad a podmínek kolene jsou vyvíjeny speciální tribometry a simulátory kolen, na kterých jsme schopni sledovat opotřebení endoprotéz a chrupavky.



Obr. 1–8 Částečná (vlevo) a totální (vpravo) endoprotéza kolene [15].

Další rozdělení endoprotéz je dle způsobu fixace. Volí se mezi cementovaným, necementovaným nebo hybridním.

Cementované endoprotézy mají čtenější využití. V nahrazované části kloubu je odstraněna poškozená chrupavka, do níž je implantován kostní cement.

Fixace necementované endoprotézy ke kosti je pomocí upraveného kostního lůžka, do kterého náhrada zapadne.

Hybridní fixace je kombinací fixace cementované do femorální a necementované do tibiální komponenty [21].

### 1.2.2 Materiály kolenních náhrad

Nejdůležitější vlastností materiálu je jeho biokompatibilita s živou tkání. Jedná se o reakci živé tkáně na materiál. Výběr těla implantátu závisí na jeho mechanicko-fyzikálních vlastnostech. Při snížené biokompatibilitě se využívá povrchových úprav, nebo nanesení povrchové vrstvy [21].

Biokompatibilitu rozdělujeme na [22]:

- Biotolerantní materiály – ty, které jsou tkáněmi pouze tolerovány, což není vhodné pro dlouhodobé užívání. Patří sem např. kobaltové slitiny CoCrMo, korozivzdorná ocel a další.
- Bioinertní materiály – tělem akceptovatelné. Patří mezi ně titan a jeho slitiny.
- Bioaktivní materiály – nejvhodnější materiály pro kontakt s živou tkání. Patří sem např. hydroxyapatitová keramika, trikalcium a tetrakalcium fosfátová keramika, bioaktivní sklokeramika. Z materiálů se vylučují kalciové a fosfátové ionty, které způsobují naprostou biointegraci.

Keramika – zajišťuje nižší opotřebení ve srovnání s kovy. Další výhodou je, že je vhodná pro pacienty s alergií na kovy, není běžně používána, protože nemá ve všech zemích



---

schválené použití [23]. Integrace keramiky do skeletu nastává už po 3 až 6 měsících a na hranici implantátu je novotvořená kost [21].

Kobalt-chrom – je označován jako stellit. Pro implantáty se volí varianta s nízkým obsahem uhlíku. Je odolný proti poškrábání, proto je nejčastěji používaným materiálem [24].

Dále se používá titan, který je oproti kobalt-chromu měkký a snadno se poškrábe. Jeho největší výhodou je odolávání korozi [24].

Na artikulaci vložku se převážně používá nízkotlaký ultravysokomolekulární polyetylen označovaný chirulen, který slouží jako chrupavka mezi femorální a tibiální komponentou. Při využití plastů se musí uvažovat o špatné biokompatibilitě s živou tkání. Podmínkou pro přijetí plastu je nepřítomnost nízkomolekulárních látek, ty se využívají při přípravě nebo při ovlivňování mechanických a fyzikálních vlastností materiálu. Tyto látky způsobují výrazné reakce tkání v těle. Snášlivost závisí na schopnosti přijímat vodu, tedy v těle tkáňové tekutiny s bílkoviny, což způsobuje změnu mechanických vlastností a zvyšuje nežádoucí tření. Zhoršené vlastnosti způsobují po 2 až 4 letech těžké zánětlivé onemocnění v organismu. Chirulen má velmi dobrou biokompatibilitu, nízké tření, vysokou vrubovou houževnatost i při vyšších teplotách a minimální nasákavost. Není možno ho sterilizovat klasickým způsobem kvůli jeho nízké teplotě tání, proto se musí sterilizovat za studena, například ozářením gama paprsky [24].

### 1.3 Typy kolenních simulátorů

V následující podkapitole budou rozebrány existující simulátory, které slouží jako inspirace v oblasti konstrukce. Simulují kinematiku kolene, mazání a sledují jejich vliv na opotřebení povrchu.

#### 1.3.1 Simulátor kolena k vyhodnocení biomechaniky u dětí s mozkovou obrnou

Tento simulátor je zde uveden jako příklad vývoje simulátoru pro simulaci kompletní chůze s postižením. Je vyvinut pro zkoumání biomechaniky kolene u dětí s obrnou. Nemoc se identifikuje ztuhlou chůzí a sníženou flexí kolene během otočení. Tito pacienti chodí příkrčeni. Za účelem zlepšení chůze jsou proto operováni, přičemž jsou tyto operace zaměřeny na zvětšení flexe kolenního kloubu [25].

Simulátor umožňuje šest stupňů volnosti, je schopen simulovat fázi kývání i postojovou fázi. Dokáže simulovat celé koleno. Skládá se z hlavního rámu, řídicího počítačového systému, kyčle a kotníku, ve kterých je upevněn vzorek kolene pro testování. Konstrukce je vidět na obr. 1–9. Písty a motory jsou simulovány pohyby svalů. Kyčelní kloub rotuje v axiální a sagitální rovině (předozadní rovina, která dělí tělo na pravou a levou polovinu) a nahýbá se vertikálně. Modelování postoje bylo vytvořeno změnami úhlů v kyčli, kolenu i kotníku a vertikálním posunem kyčle. Fyziologický náklon kolenního kloubu byl vytvořen posunutím kotníku o 40 mm od bederní roviny [25].



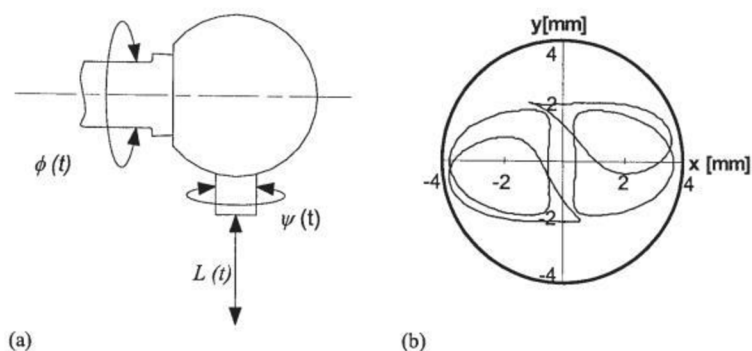
Obr. 1–9 Simulátor kolena pro děti s mozkovou obrnou [25].

Simulátor je určen pro simulaci chůze dětí s mozkovou obrnou a snaží se navodit přesné podmínky jejich chůze za simulace kyčle i kotníku [25]. Z toho důvodu to není vhodný simulátor pro tuto práci, kde je zkoumán jen vliv tření za reálné kinematiky kloubu. Přínosem simulátoru pro tuto práci byl způsob natáčení kloubů pomocí servomotorů a jeho celková konstrukce.

### 1.3.2 Bioreaktor

Simulátor je založen na kontaktu pin-on-ball a je přizpůsoben pro studium artikulární chrupavky. Dokáže simulovat různé a vzájemně provázané podněty podle tribologického stavu v kloubu [26]. Zatížení hlavice a trajektorie pohybu kyčle je zobrazena na obr. 1–10.

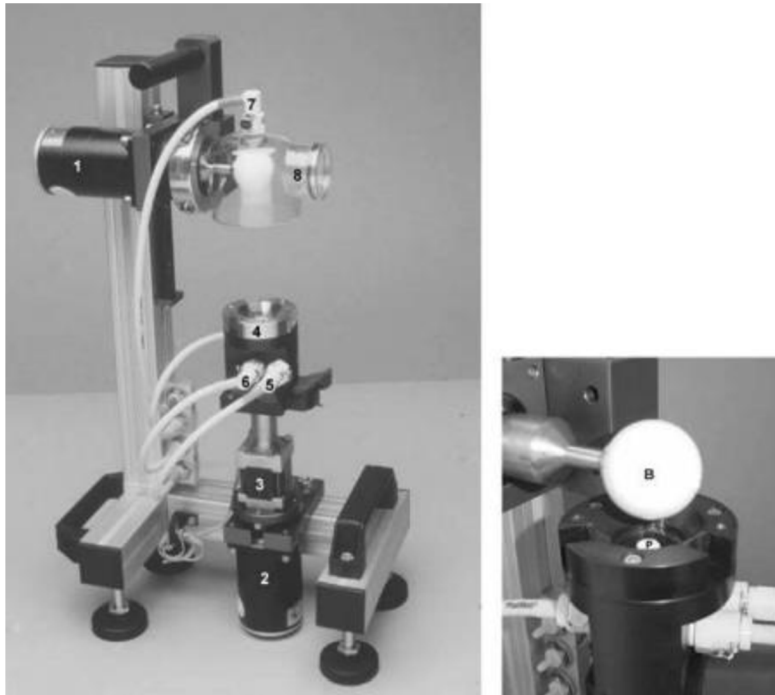
Pin obsahuje chrupavku, kterou tlačí na hlavici 250 N, rotace je  $6^\circ$  a  $60^\circ$  [26]. Uvažovaná teplota prostředí je  $37^\circ\text{C}$ .



Obr. 1–10 Zatížení hlavice a trajektorie pohybu kyčle [26].

Konstrukce simulátoru je zobrazena na obr. 1–11. Rotace pinu a hlavice je zprostředkovávána přímo přes krokové motory (1 a 2). Translace je tvořena přes lineární pohon, krokový šroub (3) a zatížení je možno měřit přes senzor zatížení. Dále simulátor obsahuje držák vzorku s výživou (4) a kanály pro poskytnutí různých cest pro výživu (5–7), skleněný kryt (8). Bioreaktor je momentálně vyvíjen i pro možnost konfigurace s více stanicemi [26].

Vzhledem k podobnosti bioreaktoru se zadáním bude uvažovaná síla 250 N i v této práci.

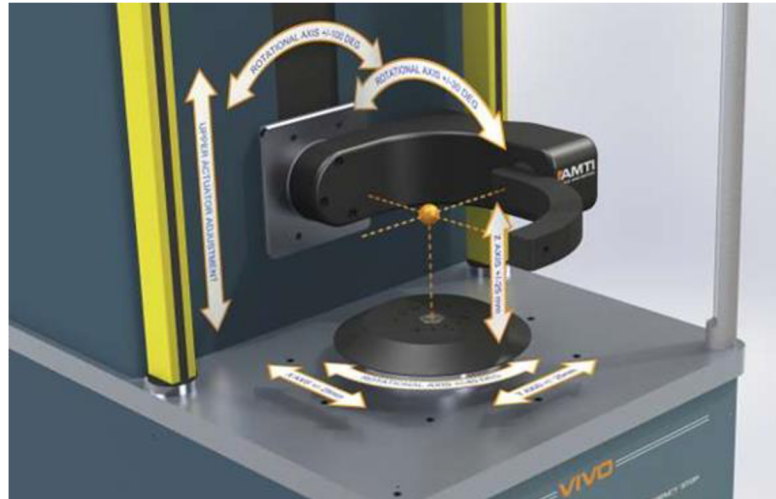


Obr. 1–11 Simulátor a detail na hlavici s pinem [26].

### 1.3.3 VIVO kolenní simulátor

Simulátor od společnosti AMTI má šest stupňů volnosti. Testují se na něm endoprotézy a vzorky biologických kloubů. Dokáže simulovat zatížení až 4500 N v axiálním směru a v radiálním až 1000 N, každá osa je schopna zatížení. Umožňuje testování za reálných podmínek od standardního každodenního života po extrémní sporty, včetně náhodných zatěžujících situací. Pohyby simulátoru jsou zobrazeny na obr. 1–12. Je zde využit šestiosý snímač síly a v každé ose je nezávisle hydraulicky ovládán. Má schopnost simulace virtuální měkké tkáně chrupavky, kterou je patentovaná. Simulátor je ovládaný pomocí softwaru [27].

Je schopen různých situací (běh, hluboké kolenní ohyby a další), které navrhovaný simulátor nebude posuzovat, protože bude posuzovat kinematiku pouze za chůze s možností různých zatížení. Stejně jako vyvíjený simulátor sleduje normu ISO 14243 [27].



Obr. 1–12 Pohyby simulátoru VIVO [27].

## 1.4 Existující tribometry

V následující kapitole jsou rozebrány existující tribometry, které byly využity jako inspirace pro měření tření. Jsou vyvíjeny pro sledování mazání, tření a opotřebování povrchů.

### 1.4.1 Simulátor pin-on-slab

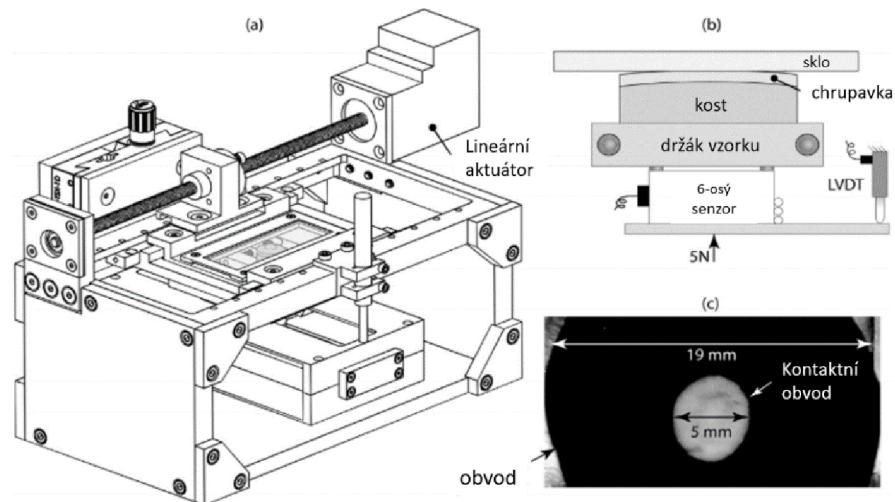
Simulátor byl vytvořen za účelem pochopení mazání v kloubu. Sleduje obnovu synoviální kapaliny, kompresi, tření a vliv velikosti vzorku.

Využívá mechanismu pin-on-slab, což znamená, že je složen z pinu, který koná vratný pohyb na desce. Pin je kulička, nebo váleček (pro konformní, nebo nekonformní plochy). Deska je uložena staticky a vzorek vykonává reciproční pohyb. Chrupavka může mít průměr 6, 12, nebo 19 mm [28].

Standardní experiment je zatěžován 5 N. Test trvá 2 minuty, reciproční pohyb má 20 mm a pin se pohybuje rychlostí 60 mm/s [28].

Reciproční pohyb je tvořen lineárním pohonem, který pohybuje sklíčkem až 60 mm/s. Polohu sklíčka měří LVDT (Linear Variable Differential Transformer) transformátor včetně vertikální polohy, která souvisí s kompresí a s tloušťkou filmu. Zatížení měří šestiosý snímač. Experiment lze pozorovat přes sklíčko, schéma měření je znázorněno na obr. 1–13 v části b).

Simuluje pouze pohyb translační a zatížení, vynechává rotaci, která je pro měření tření za daných podmínek nezbytná a ovlivňuje výsledky experimentu. Pro vyvíjený simulátor se nebude uvažovat zkoumání optikou během experimentu [28].

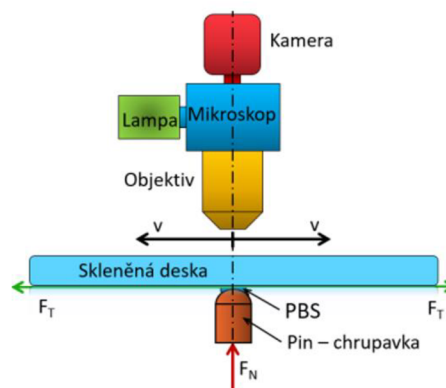


Obr. 1–13 a) Schéma simulátoru; b) schéma testu; c) schéma testu optického obrazu, kde vzorek měří 19 mm a kontaktní plocha je 5 mm díky přirozenému zakřivení vzorku [28].

### 1.4.2 Reciproční tribometr

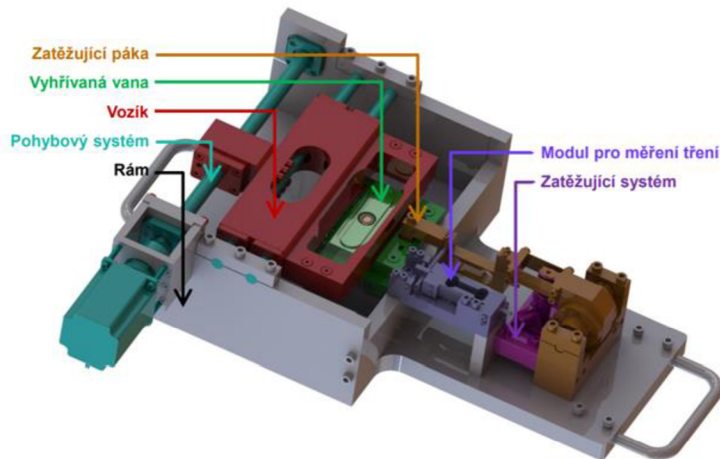
Pomocí tohoto tribometru se zkoumá a sleduje mazivo na povrchu chrupavky při recipročním pohybu, měří se tření a zobrazuje se mazací film.

Mechanismus tribometru je v konfiguraci pin-on-plate, která je zobrazena na obr. 1–14. Reciproční pohyb tvoří sklo rychlostí 5 nebo 10 mm/s a pomocí pinu je zatěžován silou 15 nebo 20 N. Mazací film je sledován pomocí mikroskopu a třecí síla je zaznamenávána pomocí tenzometru [29].



Obr. 1–14 Detail měření na tribometru [29].

Reciproční pohyb je tvořen pohyblivým systémem, který tvoří pohon s pohybovým šroubem. Na šroubu je uložený vozík se sklem, přes které lze sledovat opotřebení chrupavky. Zátěžný systém tvoří sílu, která působí přes pin na chrupavku a třecí síla je měřena pomocí tenzometru. Celá sestava leží v rámu. Konstrukce je zobrazena na obr. 1–15 [29].



Obr. 1–15 Konstrukce tribometru [29].

Měření na tribometru neuvažuje rotaci stejně jako předchozí simulátor od Axela C. Moora [29]. Konfigurace pin-on-plate je určena na jiné experimenty, které sledují test pomocí optiky.

### 1.4.3 Bruker UMT Tribometr

Tribometr dokáže testovat mechanické podmínky a tribologické vlastnosti. Je schopen měřit tření a otěr kapalných i měkkých materiálů. Měření je možno provozovat za aplikování více sil a různých pohybů. Pomocí sond je schopen napodobovat různé testovací podmínky. Zajišťuje kontrolované podmínky prostředí, včetně teploty a vlhkosti.

Využívanou metodou je tzv. Ball on Disc, která probíhá vtačováním kuličky do testovaného rotujícího vzorku. Experiment může probíhat za sucha i za použití mazací kapaliny. Lineární pohon je schopen rychlosti až 10 mm/s, rotační pohon až 5000 ot/min, reciproční pohon až 60 Hz. Tribometr dokáže zajistit teplotu prostředí až 350 °C a působit silou až 200 N.

Lze ho použít pro potraviny, biologické i syntetické materiály [30]. Před každým měřením je nutno zkalibrovat senzory na 0.

Působící sílu zajišťuje pohybový šroub se servopohonem a pohyb portálu je zajištěn vždy podle daného typu portálu. Pokud je experiment v kapalině a určité teplotě, využívá se poklopu na portál. Kapalina se lépe používá v případě rotačního portálu, u lineárního posunu vyšplíhá ven, tudíž je použití v tomto případě obtížnější.



Obr. 1–16 Simulátor Bruker UMT Tribometr s variantami podstavy [31].

Nevýhodou tribometru je nutnost neustálé změny konstrukce, viz obr. 1–16, kde lze vidět typy různých portálů. Tribometr není schopen zajistit všechny pohyby zároveň.

## 2 STANOVENÍ PODMÍNEK

V následující kapitole bude rozebrána analýza problému a stanovení výchozích podmínek pro experiment.

### 2.1 Analýza problému

V současné době se stává náhrada kolenního kloubu čím dál běžnější v našich životech i kvůli nedostatečným pohybovým aktivitám, nebo naopak příliš velkým, a proto je potřeba se více zabývat vědním oborem biotribologie, který zkoumá především tribologii uvnitř kloubů. Četnost těchto operativních zákroků snižuje cenu, zároveň zvyšuje bezpečnost a kvalitu operace, přesto je potřeba neustálého zdokonalování současných technologií a vylepšování materiálů, které ovlivňují cenu, hmotnost a hlavně životnost, která je žádoucí u mladších uživatelů. Největší procento uživatelů je ve věku nad 60 let, ale nevyhýbá se ani mladším generacím. Životnost se pohybuje v rozmezí od 1 do 10 let, protože každý pacient je jiný a nikdy nelze přesně stanovit, kdy bude potřeba kloub znovu vyměnit. Všechny operace nejsou stejné a vždy je třeba zvolit správný přístup. Operace probíhá individuálně s ohledem na koleno konkrétního jedince nebo na typ náhrady s ohledem na intenzitu poškození. Náhrada kolene totální endoprotézou je velmi složitá a zároveň přesná operace, jejímž výsledkem má být ztráta bolesti kloubu, obtíží a vrátit rozsah pohyblivosti kolenního kloubu.

Vzhledem k tomu, že nejsme schopni měřit tření v kolenním kloubu, je potřeba vyvíjet simulátory, které splňují kinematiku skutečného kloubu. Dále je zapotřebí zkoumat cyklus chůze a její působení. Analýza procesů v kloubech posunuje kupředu vývoj implantátů kloubů.

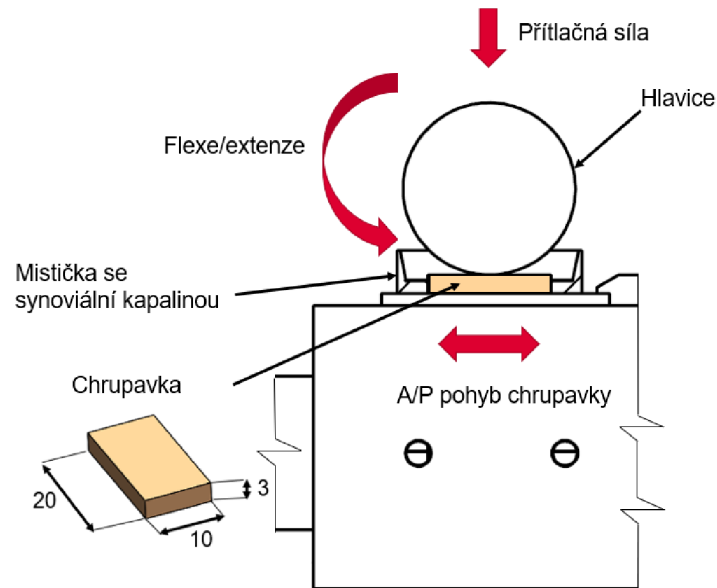
Tato práce se zabývá vývojem konstrukce simulátoru pro simulaci tření mezi chrupavkou a standardizovanou kovovou hlavici. Vstupní informace a základní podmínky jsou řízeny normou ISO 14243-3, která shrnuje normu pro pohyb endoprotézy za chůze.

Základním cílem je navrhnout měření tření a koncepci simulátoru tak, aby nebyl cenově náročný a aby měření bylo zároveň dostatečně přesné. Uložení musí být prakticky bez tření, aby nezkreslovalo výsledky na tenzometru a umožňovalo potřebný pohyb. Pro zjednodušení geometrie a zlepšení měřitelnosti koeficientu tření byla endoprotéza nahrazena hlavici, na niž bude působit menší zatížení, schéma je znázorněno na obr. 2–1.

Simulovaný pohyb bude probíhat mezi standardizovanou hlavici a prasečí chrupavkou. Průměr hlavice je 28 mm a chrupavka má rozměry  $20 \times 10 \times 3$  mm, schéma chrupavky a hlavice je zobrazeno na obr. 2–1. Materiál hlavice je CoCr (kobalt – chrom), ta bude k hřídeli připevněna kuželem, který je standardizovaný firmou Zimmer Czech, s.r.o., pro kyčelní klouby. Uvažuje se, že celý test probíhá v synoviální kapalině, která se viskozitou podobá reálné kapalině v kolenu. Tato kapalina je drahá, proto je třeba zamezit její zbytečné spotřebu. Základní pohyby, které má implantované koleno za chůze, je rotace hlavice od  $0^\circ$  do  $60^\circ$ , rotace chrupavky od  $2^\circ$  do  $6^\circ$  a translace chrupavky od 0 do 6 mm. V simulátoru se uvažuje pouze translační pohyb chrupavky a rotace hlavice. Na endoprotézu dle normy ISO 14543-3 působí maximální zatížení 2600 N, ale při uvažování hlavice je nutno zatížení přizpůsobit na menší plochu. Při rychlých změnách pohybu je třeba myslet na setrvačnou energii, která znesnadňuje měření odporové síly. Cyklus chůze trvá 1 s.

Při měření bude získána třecí síla v Newtonech a ta bude přepočítávána pomocí normálové síly na koeficient tření.





Obr. 2–1 Schéma chrupavky a hlavice.

Modul pružnosti v tahu, Poissonovo číslo chrupavky a hlavice jsou zobrazeny v tab. 2–1. Byly provedeny četné studie, které zkoumají jak biotribologii, tak biomechaniku kloubu.

Tab. 2.1 Modul pružnosti v tahu a Poissonovo číslo [32].

	modul pružnosti v tahu E [MPa]		Poissonovo číslo $\mu$
jamka	polyetylén	500	0,3
hlavice	keramická	$3,9 \cdot 10^5$	0,3
chrupavka		60	0,3
dřík THR, femorální komponenta, jamka	kovový	$2,1 \cdot 10^5$	0,3
kostní cement		2500	0,3
kompaktní kost		14100	0,3
spongiózní kost		490	0,3

Zkoušky popsané zde v rešeršní práci nesplňují požadavky na celkový pohyb kloubu za chůze a jeho zkoumání.

Cílem práce je vyvinout simulátor, který bude schopen simulovat správnou kinematiku kolene a dosáhne jeho relativních rychlostí jako jedinec při chůzi. Kinematika kloubů a jejich vzájemné pohyby mají vliv na opotřebení povrchů ovlivňující koeficient tření, který je výsledkem uvažovaného experimentu. Na základě analýzy kolenního kloubu, stanovení okrajových podmínek s následnou volbou konkrétních komponentů, které je budou splňovat, bude navržen simulátor.

Konečný návrh bude obsahovat 3D model včetně zvolených komponent a jeho výkres sestavy. V bakalářské práci budou obsaženy výpočty, které jsou nezbytné pro práci a volbu komponentů.

## 2.2 Návrh experimentu

Pro výchozí hodnoty koeficientu tření byl zahrnut i experiment, který probíhal na Univerzitě obrany v Brně. Na experimentu jsme spolupracovali s Ing. Matúšem Varhaníkem, který se ve své práci zabývá obdobnou problematikou pod vedením doc. Josefa Sedláka.

Podmínky byly stanoveny na základě norem ISO 14243-3.

Pro zjištění tření byly zvoleny dva materiály běžně užívané při náhradě kloubů s různou intenzitou zatížení 10 N, 15 N a 20 N. Každý materiál byl testován bez přítomnosti synoviální kapaliny, tzv. suché tření, kde jsou povrchy tělesa v přímém kontaktu a následně se získávalo tření za přítomnosti synoviální kapaliny, tzv. kapalinové tření. Jako kapalina bylo zvoleno hovězí sérum, zředěné na požadovanou koncentraci proteinu.

Experiment probíhal na simulátoru Bruker unit, který je popsán v kapitole 1.4.3. Zkušební vzorkem byla kulička o průměru 6,350 mm a z materiálu Ti6Al4V, vyrobená podle ISO 3290, s chemickým složením popsáním v tab. 2.2. Kulička kroužila po povrchu bílé destičky, experiment je vyfocen na obr. 2-2.

Druhá destička je z materiálu UHMW PE, který je pro všechny experimenty stejný.

Druhý experiment probíhal na stejném zařízení za použití stellite, což je slitina kobaltu, chromu a molybdenu, chemické složení je vypsáno v tab. 2.3.

Tab. 2.2 Chemické složení Ti6Al4V [hm. %] [33].

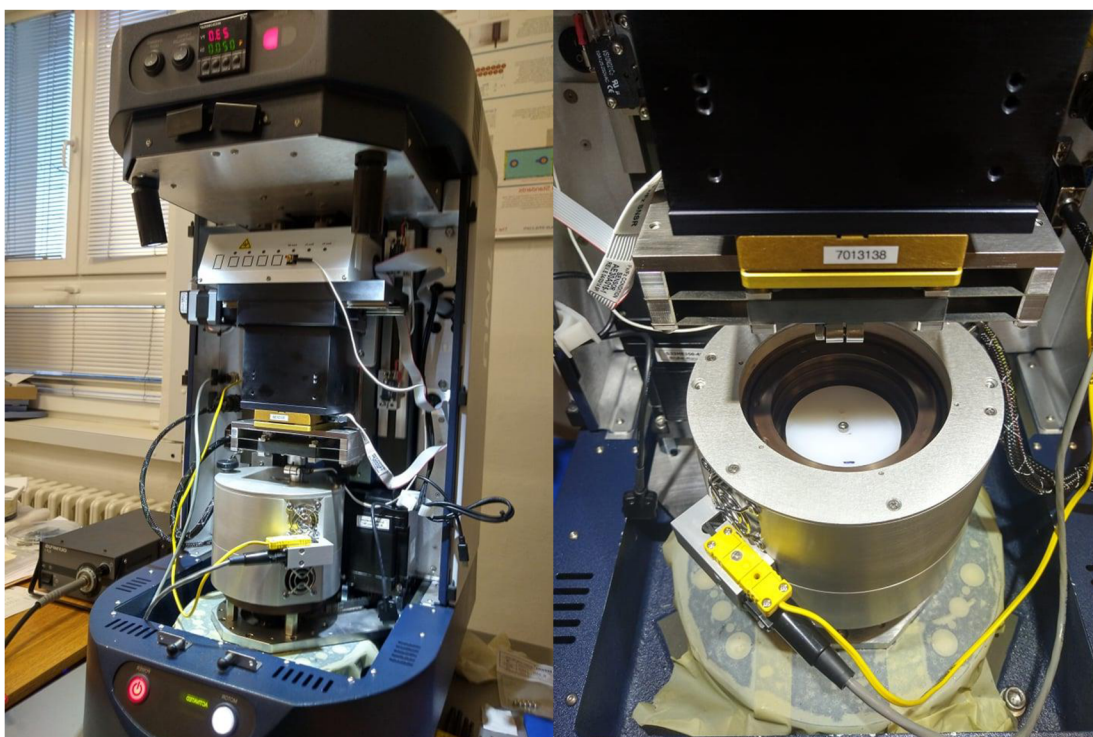
C	N	Ti	Al	V	Fe	O	H
0,080 max	0,050 max	zbytek	5,50–6,75	3,50–4,50	0,30 max	0,20 max	0,015 max

Tab. 2.3 Chemické složení stellite [hm. %] [34].

C	Si	Mn	Cr	Ni	Mo	Co	W	B	Fe
1,90- 2,95	1,50 max	1,00 max	31,00– 35,50	3,00 max	1,00 max	zbytek	16,50– 19,50	0,30 max	3,00 max

Výchozí hodnoty pro oba zkoušené materiály zůstávají stejné:

- $v = 20$  mm/s.
- $t = 37$  °C  $\pm 2$ .
- $F = 10$  N, 15 N a 20 N.



Obr. 2–2 Experiment na simulátoru Bruker unit.

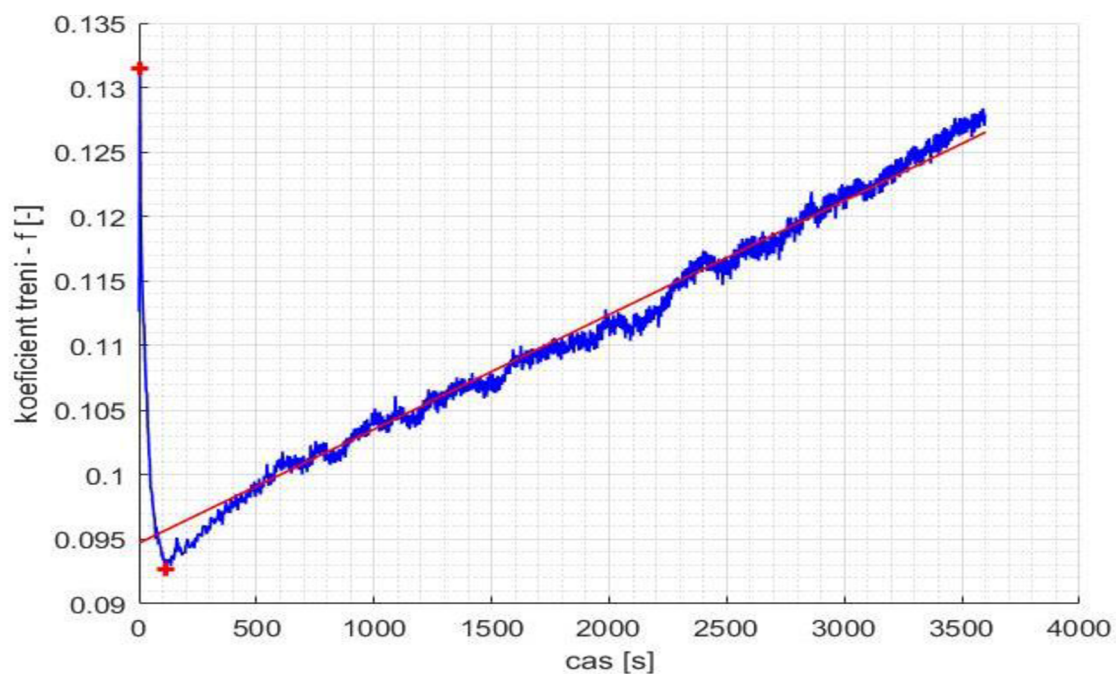
Tab. 2.4 Výsledky prvního experimentu za použití Ti6Al4V.

	Suché tření			Kapalinové tření			Převzato
	10 N	15 N	20 N	10 N	15 N	20 N	
max	0,1315	0,1410	0,1621	0,0940	0,1430	0,1389	0,05
min	0,0927	0,1086	0,1109	0,0691	0,0720	0,0803	

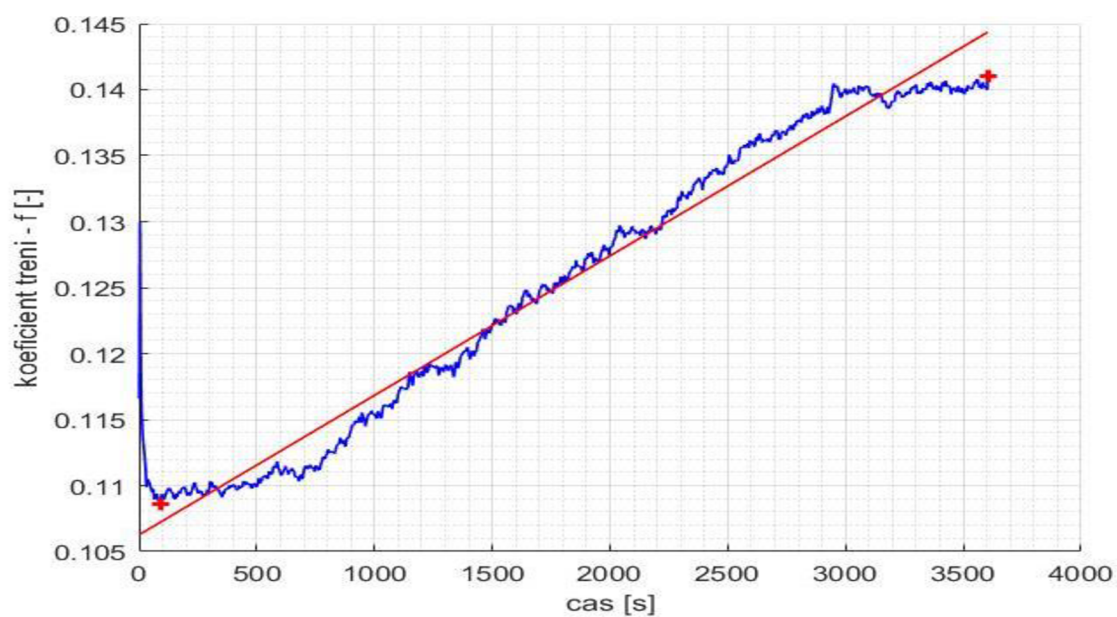
Tab. 2.5 Výsledky druhého experimentu za použití stellite.

	Suché tření			Kapalinové tření		
	10 N	15 N	20 N	10 N	15 N	20 N
max	0,0886	0,1212	0,1261	0,1311	0,1362	0,1528
min	0,0523	0,0578	0,0696	0,0556	0,0868	0,0862

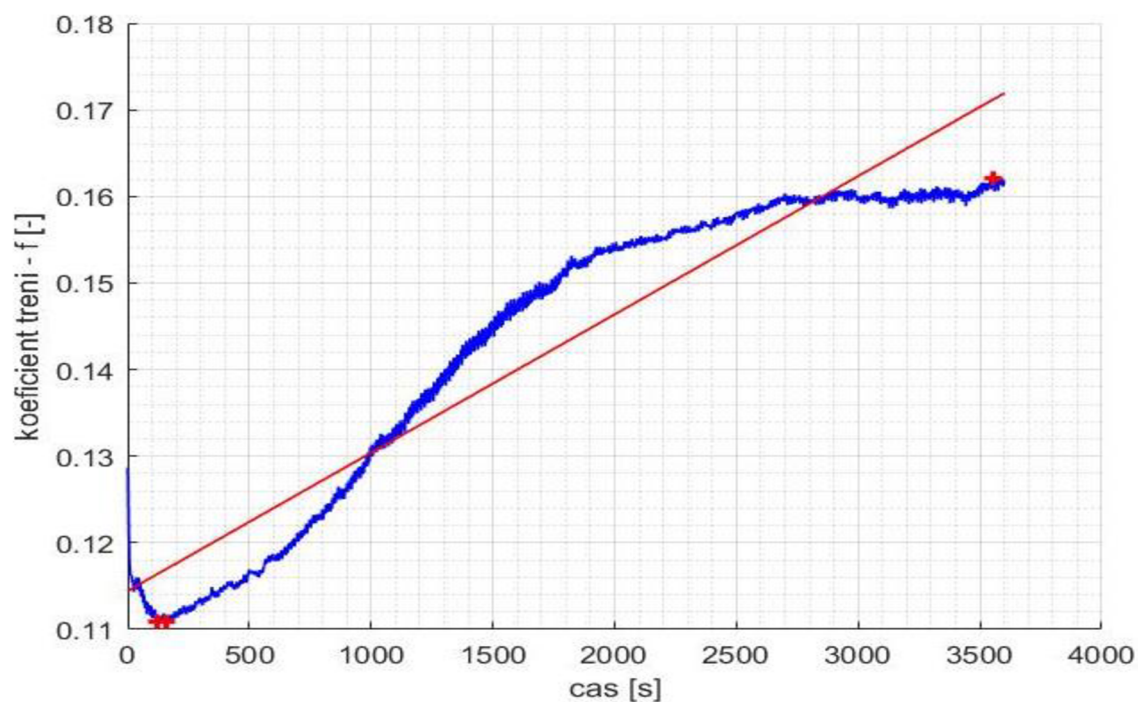
Na následujících obrázcích obr. 2.3–2.14 jsou znázorněny grafické závislosti – je vykreslena závislost koeficientu tření na čase.



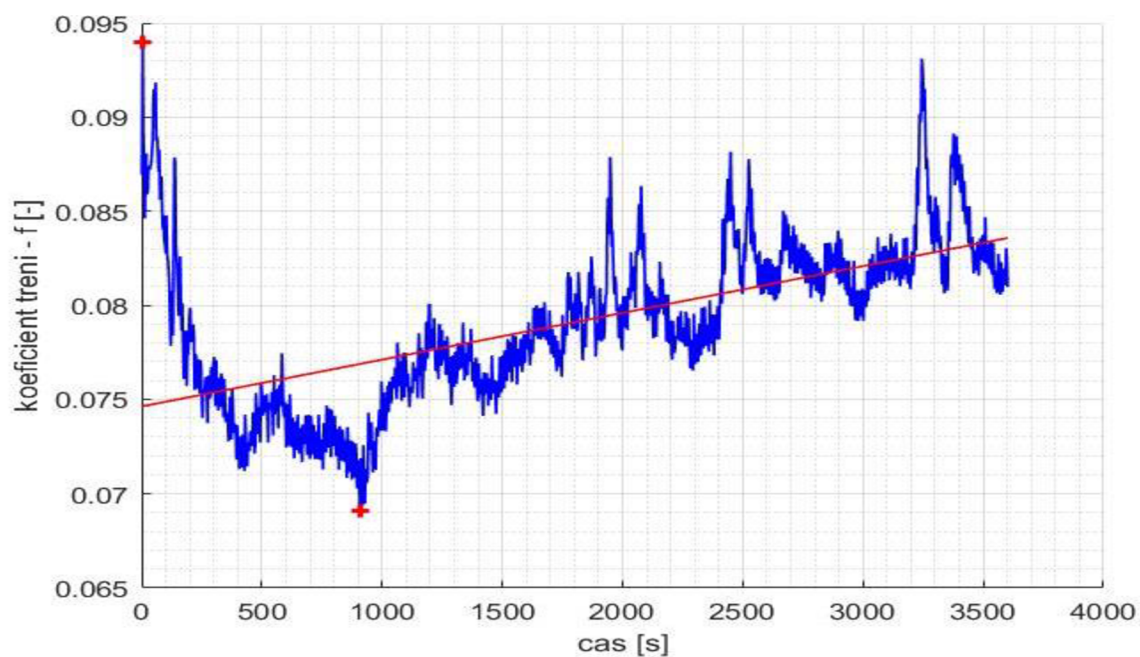
Obr. 2–3 Suché tření – Ti6Al4V – 10 N.



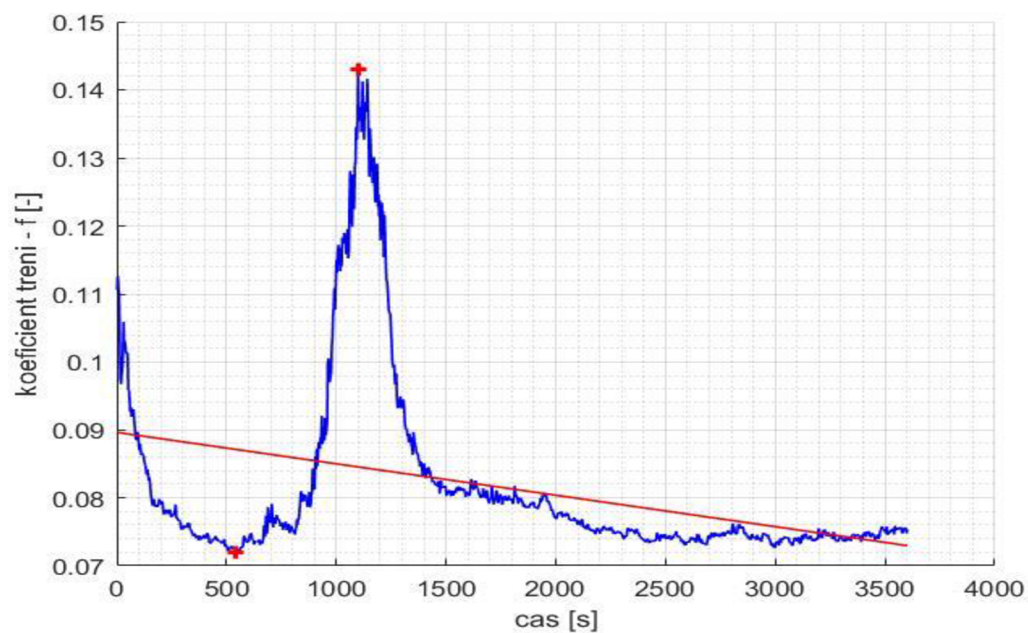
Obr. 2–4 Suché tření – Ti6Al4V – 15 N.



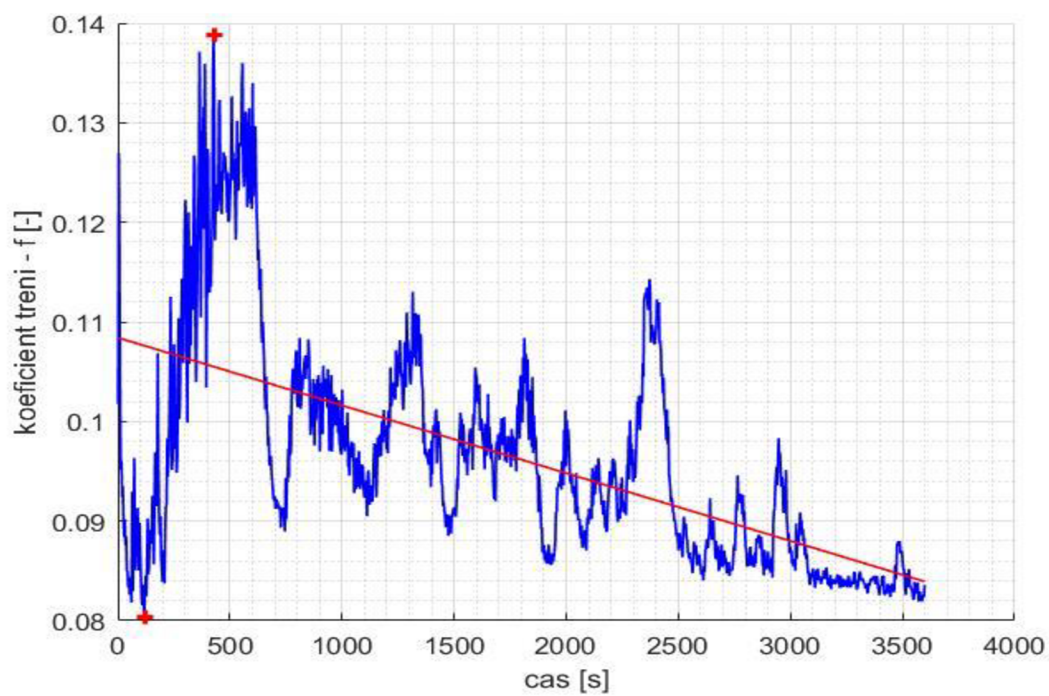
Obr. 2-5 Suché tření – Ti6Al4V – 20 N.



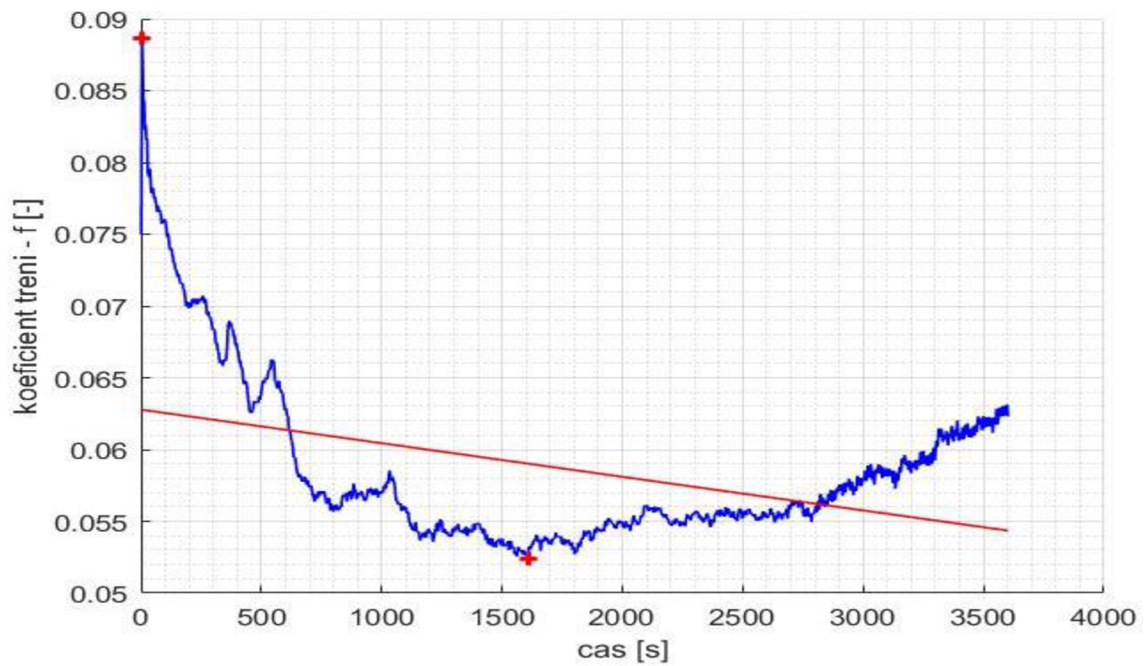
Obr. 2-6 Mokrý tření – Ti6Al4V – 10 N.



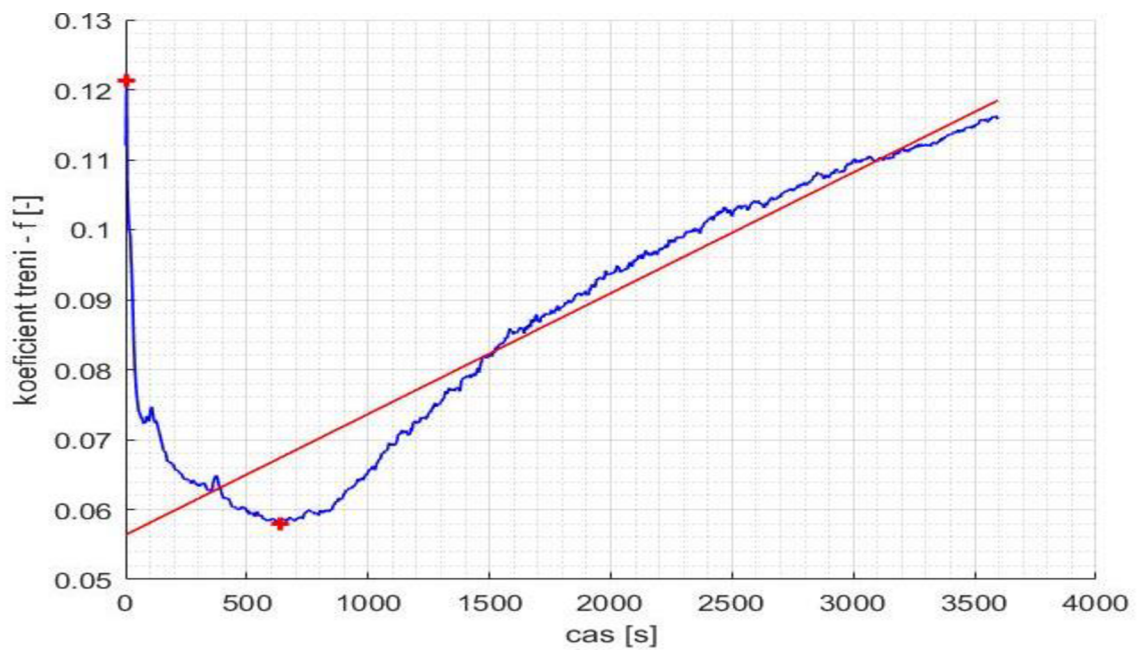
Obr. 2-7 Mokr  týrání – Ti6Al4V – 15 N.



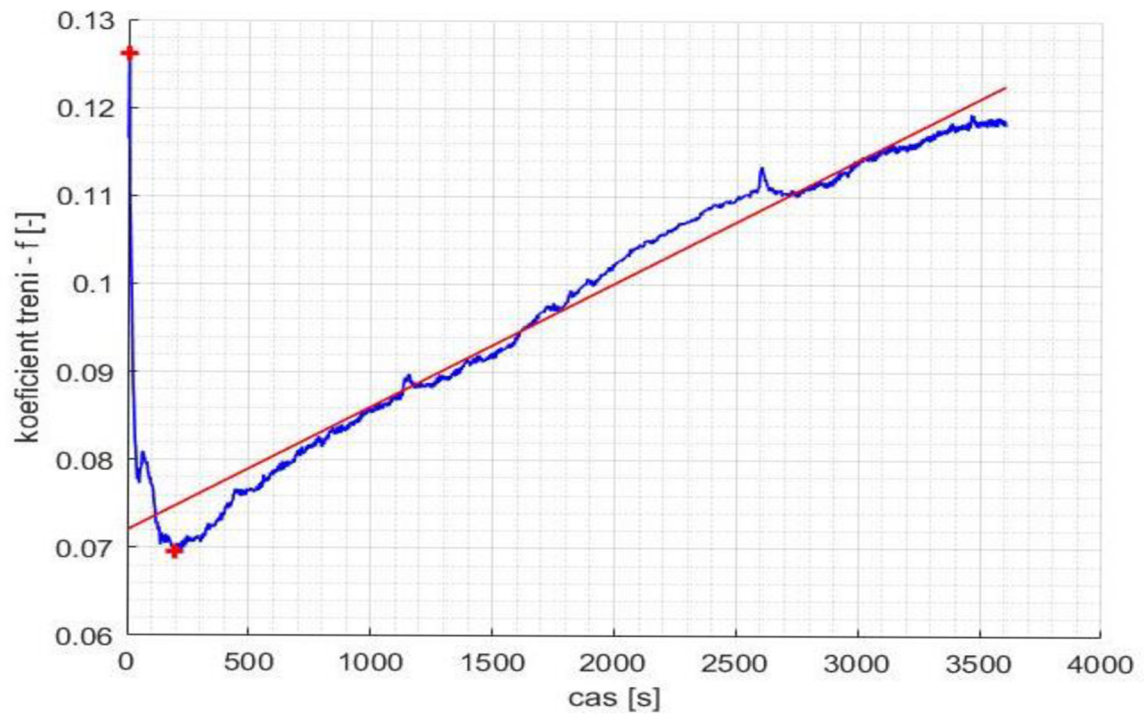
Obr. 2-8 Mokr  týrání – Ti6Al4V – 20 N.



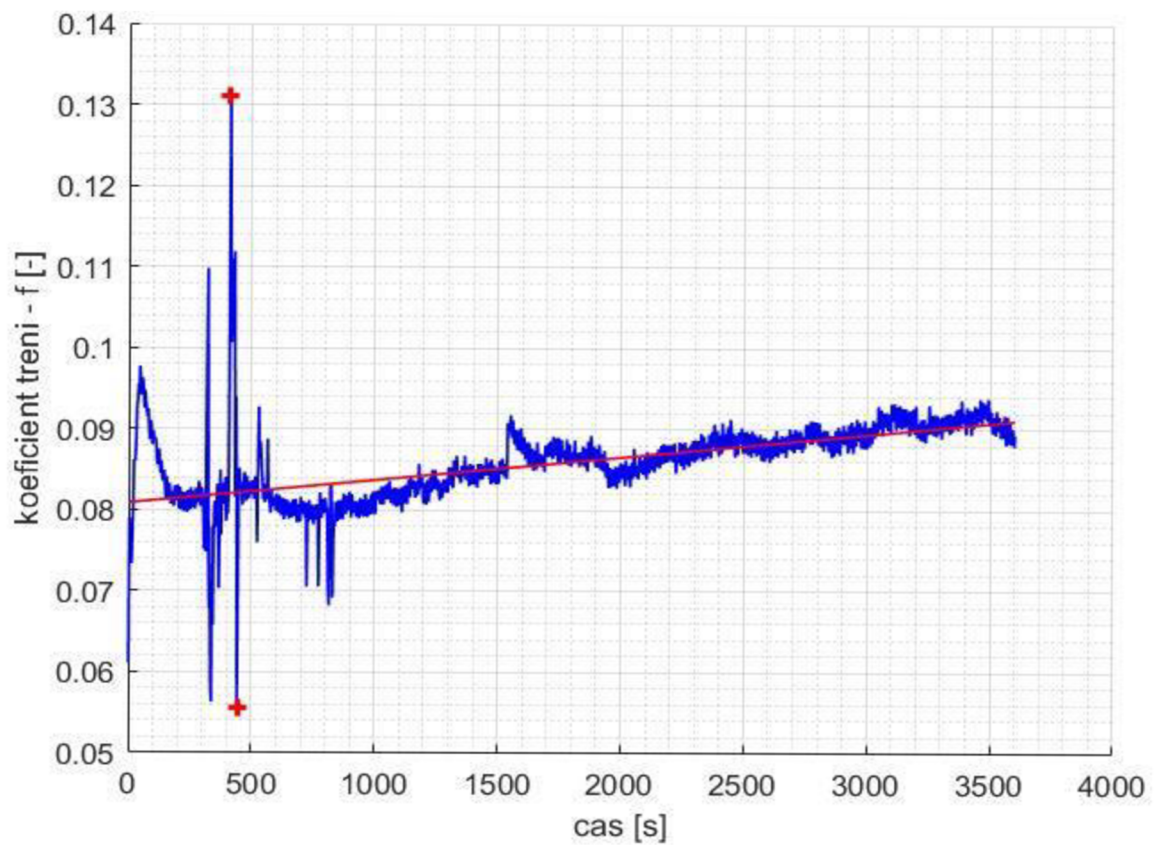
Obr. 2–9 Suché tření – stellite 10 N.



Obr. 2–10 Suché tření – stellite 15 N.

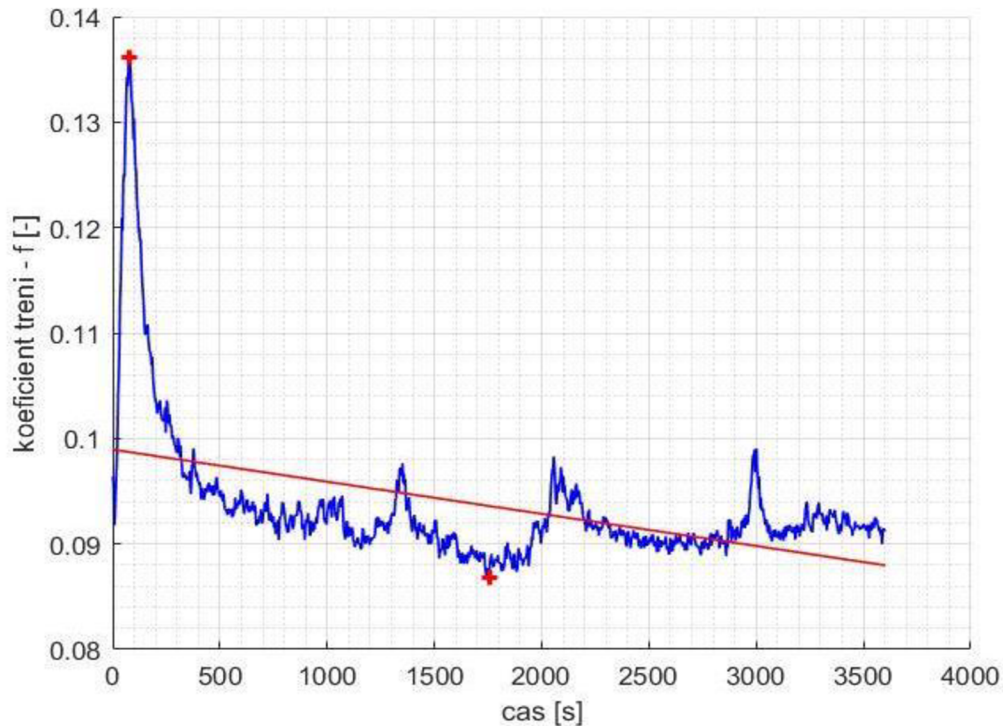


Obr. 2–11 Suché tření – stellite 20 N.

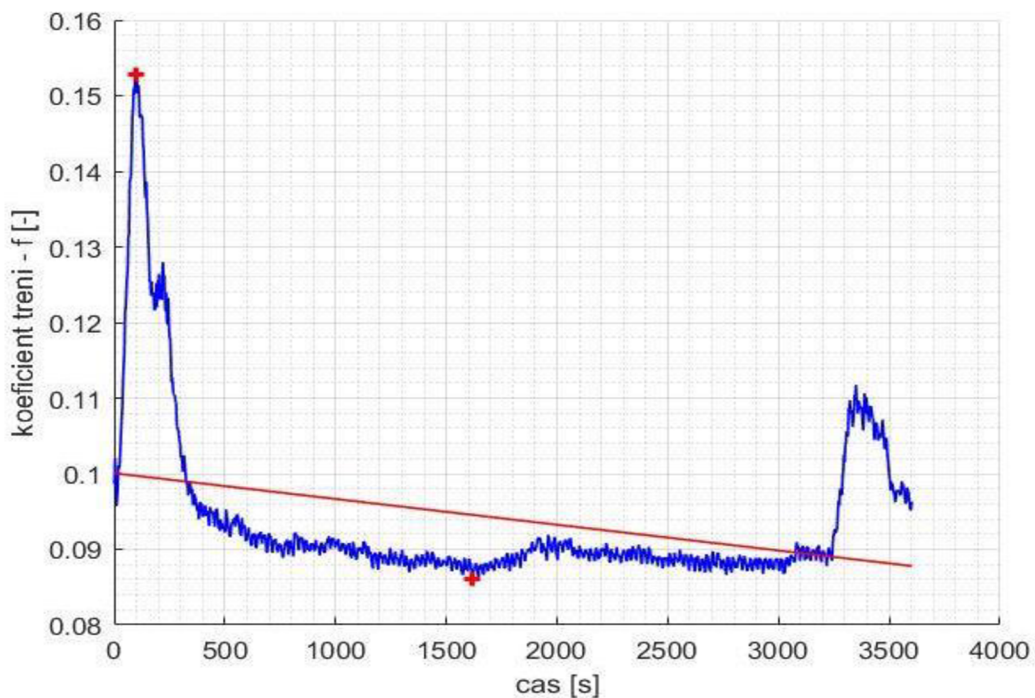


Obr. 2–12 Kapalinové tření – stellite 10 N.





Obr. 2–13 Kapalinové tření – stellite 15 N.



Obr. 2–14 Kapalinové tření – stellite 20 N.

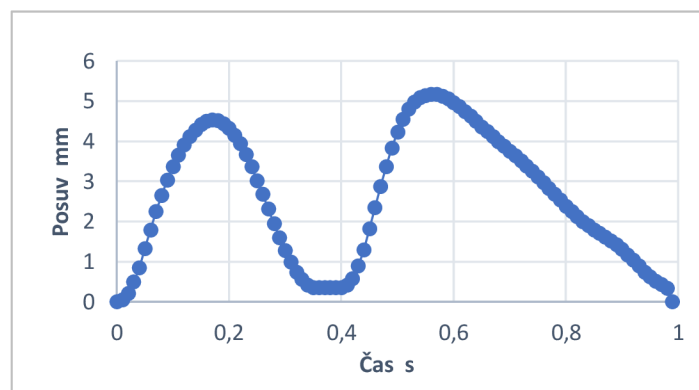
Maximální hodnota koeficientu tření je dle předpokladu nejvyšší bez maziva a za působení síly 20 N. Hodnota koeficientu tření 0,1621 je uvažována jako výchozí pro tvorbu konstrukce a volbu jejích komponent. Při proložení křivkou vykazuje koeficient tření téměř konstantní průběh. Ačkoliv se tato křivka jeví vždy jako stoupající, nebo klesající, její směrnice je téměř nulová. Tohle zkusení je vyvoláno pouze dlouhodobým měřením, které při koncentraci na krátký úsek zkusení její sklon.

### 3 KONCEPČNÍ ŘEŠENÍ

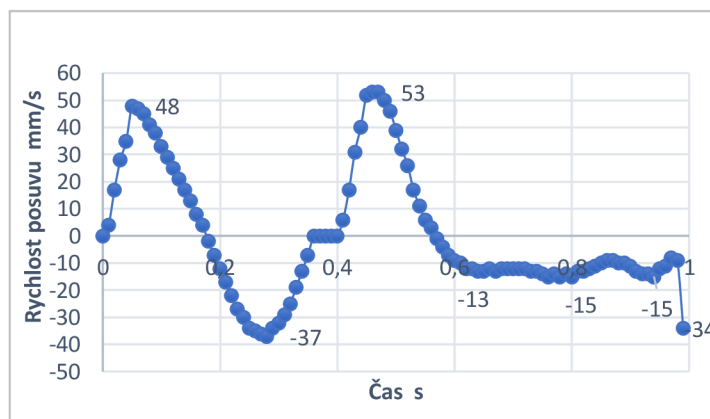
V první řadě bylo potřeba zvolit vhodnou konstrukci, která bude splňovat kinematiku pohybu. Pro každý pohyb a zatížení je nutno vyřešit konstrukci podle předem stanovených podmínek, které jsou stanoveny na základě předchozích studií, normy ISO 14243-3, experimentu nebo výpočtů. Konstrukce s endoprotézou je nahrazena hlavicí, která má jednodušší geometrii a zmenšuje požadavky na pohon tvořící zatížení. Všechny návrhy jsou tvořeny v programu SolidWorks.

#### 3.1 Anterio – posteriální pohyb

Anterio-posteriální pohyb je lineární pohyb chrupavky, jeho znázornění v grafické závislosti na obr. 3–1 vychází z hodnot normy ISO 14243-3 [19]. Derivací posuvu byla vykreslena rychlost, která je vykreslena v grafické závislosti na obr. 3–2 a následnou derivací se získaly hodnoty zrychlení. Posuv je v rozsahu 0 až 5,2 mm. Maximální rychlost, které je třeba dosáhnout, je 53 mm/s. Maximální zrychlení dosahuje hodnoty 2500 mm/s<sup>2</sup>.



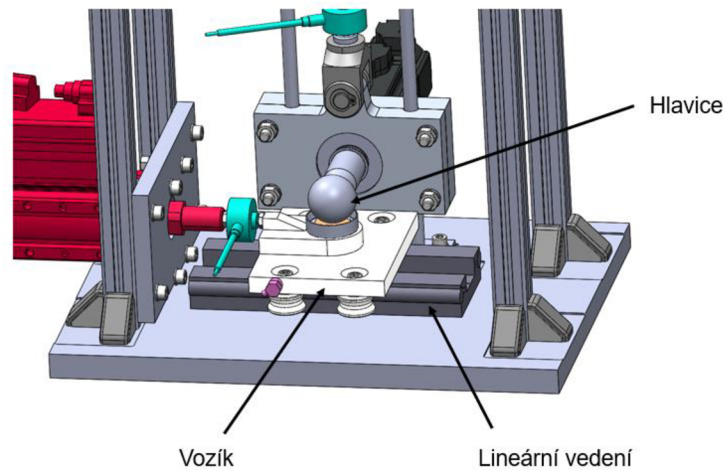
Obr. 3–1 Anterio-posteriální pohyb.



Obr. 3–2 Rychlost anterio-posteriálního pohybu.

### 3.1.1 Varianta a) lineární vedení

Jako první, nejjednodušší a cenově přijatelnou variantou bylo uvažováno lineární rolničkové vedení. Vozík jezdí na čtyřech rolnách a jeho lineární pohyb je realizován pomocí elektrického šroubového pohonu, viz obr. 3–3.



Obr. 3–3 Lineární vedení s rolnami.

Vedení je jednoduché a zvládne vyšší rychlosti, ale jeho zásadním problémem je tření. V případě použití senzoru na pístnici pohonu zkresluje výsledky, což je problém ve většině cenově dostupných variant nabízených na principu kluzného, nebo valivého pohybu.

### 3.1.2 Varianta b) vzduchové ložisko

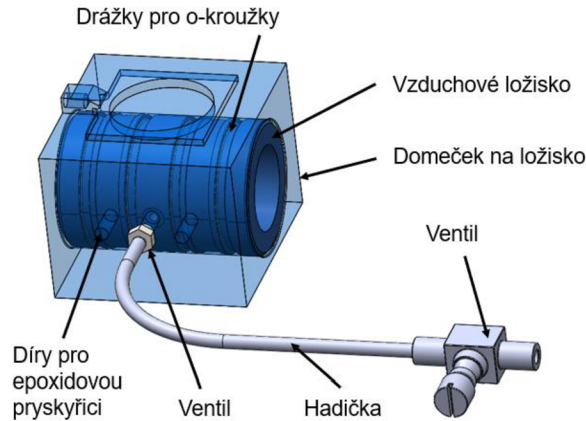
Další možností pro lineární pohyb je vzduchové ložisko ležící na hřídeli. Pohyb je zajištěn elektrickým šroubovým pohonem v horizontálním směru, stejně jako je to vyřešeno ve variantě a), rozdíl je zde ve způsobu přenášení lineárního pohybu, který je vykonáván vzduchovým ložiskem.

Ložisko je uloženo v domečku, do něhož je pomocí ventilů a hadičky dováděn vzduch. Přes ložisko se vzduch dostává až k hřídeli s potřebným tlakem vzduchu 0,41 MPa. K ložisku je potřeba zajistit přísun vzduchu například kompresorem [35]. Potřebný domeček a hřídel je možno objednat spolu s ložiskem, nebo lze zvolit vlastní výrobu.

Jsou tři způsoby instalace ložiska do domečku [35]:

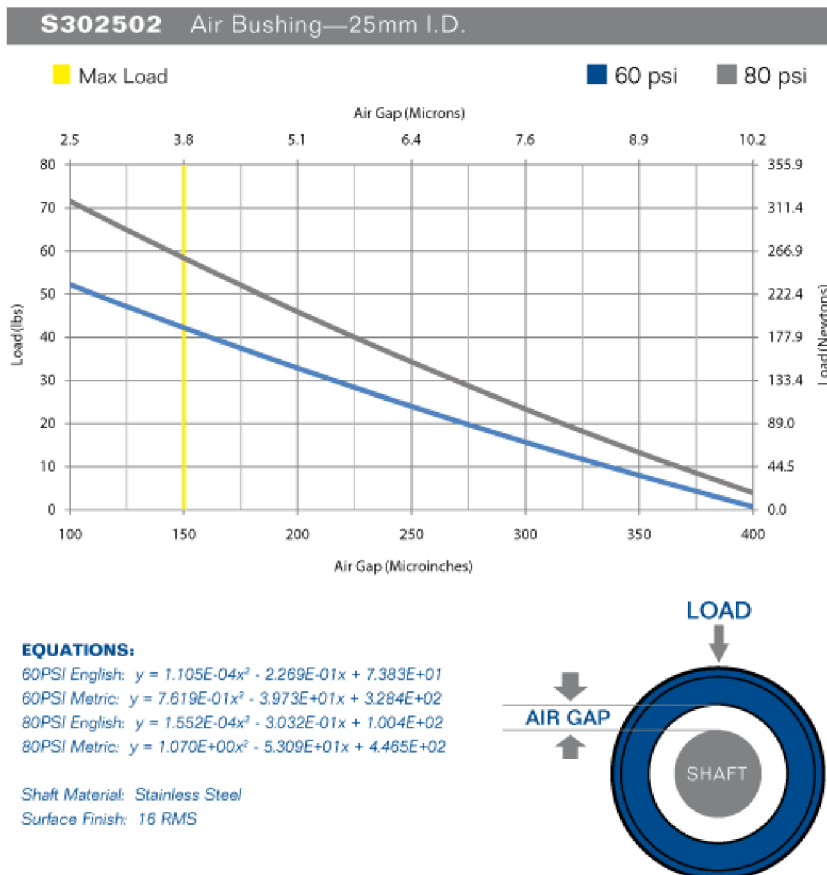
- s epoxidovou pryskyřicí – pryskyřice se injekcí přidá do děr v domečku, k variantě je třeba přobjednat 2 až 3 o-kroužky,
- o-kroužky – přidávají se do drážek, které jsou na ložisku,
- nalisováním – je možné ložisko do domečku lehce nalisovat.

V konstrukci je uvažována varianta využívající epoxidové injekce, které zajistí fixaci ložiska v domečku bez možnosti pootočení. Varianta využívaná v konstrukci spolu s navrženým domečkem je zobrazena na obr. 3–4.



Obr. 3–4 Sestavení vzduchového ložiska.

Velkou výhodou ložiska je, že pracuje bez tření, které by zkreslovalo výsledky měření. Závislost velikosti vzduchové mezery na síle mezi hřídelí a ložiskem lze vidět na obr. 3.5 od firmy New Way Air Bearings. Jejich montáž je jednoduchá a dají se lehce vyměnit. Oproti jeho značným výhodám je zde vyšší cena, přesto je ložisko vybráno jako výsledná varianta. Další nevýhodou je nutnost zakomponování kompresoru nebo jiného přívodu vzduchu.



Obr. 3–5 Závislost vzduchové mezery na zatížení [35].

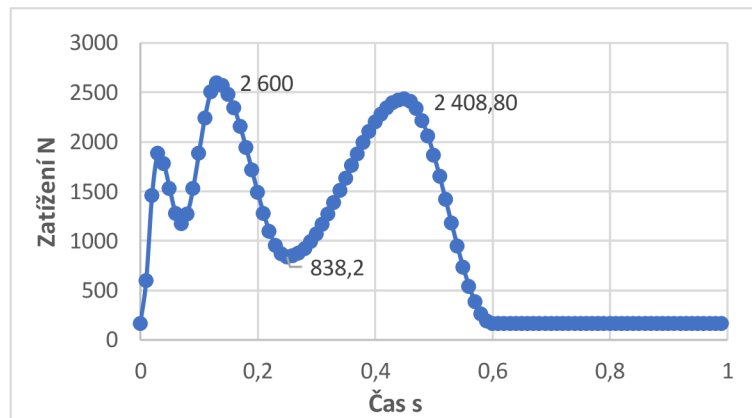
### 3.2 Zatížení hlavice

Hlavice byla zvolena pro zjednodušení mechanismu endoprotézy kolene. Na základě normy ISO 14243-3 je normované maximální zatížení endoprotézy 2600 N, jeho průběh je zobrazen na obrázku grafické závislosti 3–6 [19]. Na hlavici v bakalářské práci je uvažováno zatížení pouze 250 N, hodnota je převzata ze simulátoru bioreaktor [18], přičemž se uvažuje pouze 200 N, protože jsme omezeni nosností ložisek.

Uvažované hodnoty dle tab. 2.1:

- tvar koule na plochu,
- Poissonovo číslo – pro hlavici 0,3 a pro chrupavku 0,3,
- modul pružnosti – pro hlavici 210 000 MPa a pro chrupavku 60 MPa,
- průměr objektu hlavice 28 mm,
- síla 200 N,
- zatížení endoprotézy 2600 N.

Uvažovaný posuv je v řádech setin, proto není třeba ověřovat maximální rychlosti a zrychlení.



Obr. 3–6 Zatížení endoprotézy.

Při uvažovaném maximálním zatížení endoprotézy 2600 N a zatížení hlavice 250 N byl proveden přepočít na dynamickou sílu, znázornění je vyobrazeno na obrázku grafické závislosti 3.7.

- Koeficient  $k$ ,
- Maximální síla endoprotézy  $F_{emax}$ ,
- Maximální síla hlavice  $F_{hmax}$ ,
- Síla hlavice  $F_h$ ,
- Síla endoprotézy  $F_e$ ,

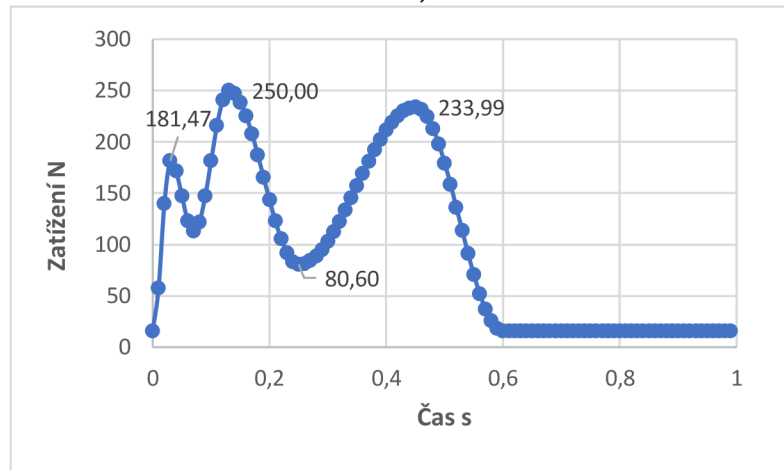
$$k = \frac{F_{emax}}{F_{hmax}} \quad (3.1)$$

$$k = 10,4$$

Příklad výpočtu pro hodnotu síly hlavice  $F_h$  pro čas  $t = 0,25$  s

$$F_h = \frac{F_e}{k} \quad (3.2)$$

$$F_h = \frac{838,2}{10,4} = 80,6 \text{ N}$$

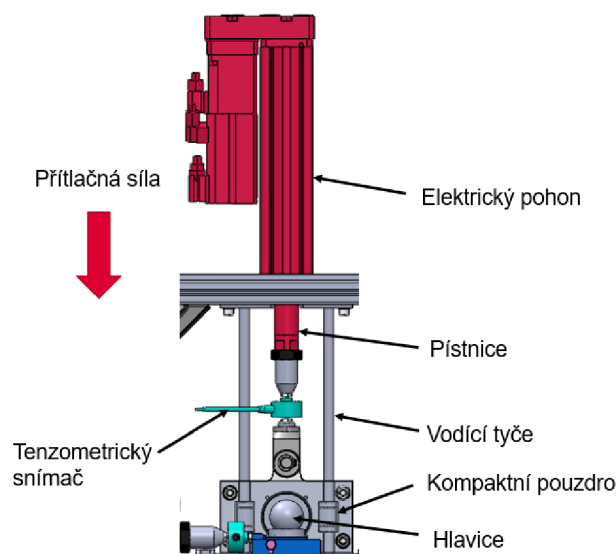


Obr. 3–7 Zatížení hlavice.

### 3.2.1 Varianta a) elektrický pohon

V této variantě je uvažováno, že přitlačnou sílu bude tvořit elektrický pohon. Byl zvolen elektrický šroubový pohon s pístnicí. Pohon je tvořen servomotorem, který tvoří rotační pohyb, ten je převáděn na lineární pomocí kuličkového šroubu s vedením kluzným ložiskem. Šroub je ideální řešení z důvodu nutnosti přesného polohování.

Lineární pohyb musí být vyrovnáván pomocí vodících tyčí, na nichž jsou nasazena kompaktní pouzdra pro průměr tyče 8 mm, ta zajišťují tichý chod s nízkým třením. Pouzdra jsou uložena v nosných destičkách. Zátěž pohonu je možné měřit pod pístnicí, kde je našroubován tenzometrický snímač tahu/tlaku. Schéma je zobrazeno na obr. 3–8.



Obr. 3–8 Zatížení elektrickým pohonem.

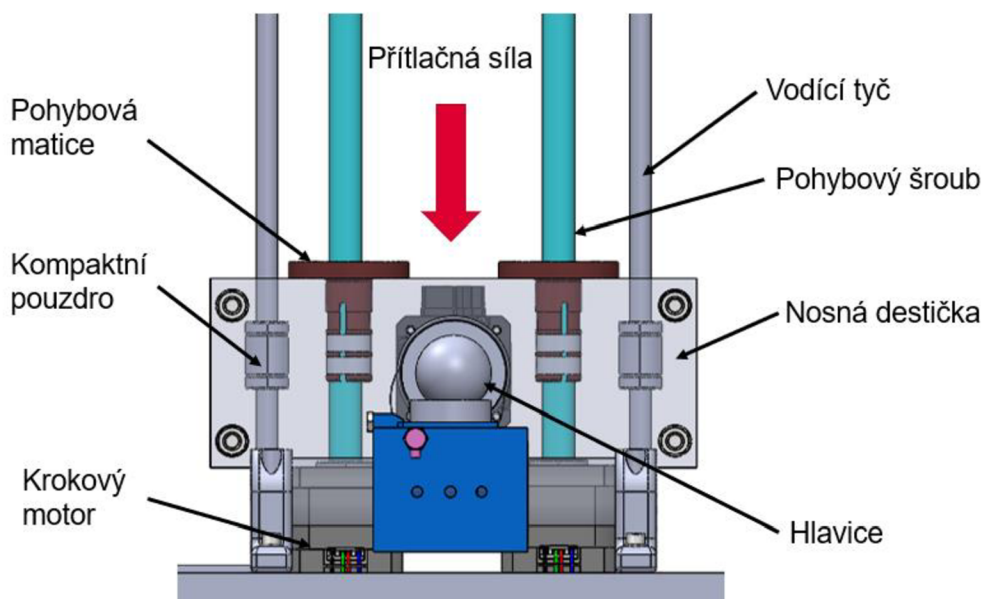
Nevýhodou této varianty je velikost pohonu. Jeho zatížení nepůsobí v ose, a proto způsobuje moment, ale navzdory tomu je to stále nejvýhodnější varianta díky přesnosti polohování.

### 3.2.2 Varianta b) dva krokové motory

V následující variantě jsou pro vertikální pohyb využity krokové pohony podobně, jako to bývá řešeno na 3D tiskárnách. Konstrukce motoru ve verzi externí lineární, což znamená, že krokový motor rotuje pohybovým šroubem, který má na sobě pohybovou matici, pomocí té se pohyb převádí na lineární, viz obr. 3–9. Na volné konce pohybových šroubů je nutné připevnit držák tyče, který zajišťuje polohu tyče.

Nevýhodami konstrukce je zvětšení celého simulátoru. Pro pohybové šrouby se musí rozšířit nosná destička, která zvětšuje rozměry a hmotnost konstrukce. Tenzometr by bylo nutné umístit pod chrupavku, což by způsobovalo nepřesnosti měření, protože by byl snímač ovlivňován silami v horizontálním směru. V motorech je nutné zajistit přesný stejnoměrný chod. Při výpadku jednoho motoru přestávají být synchronizované, tím dojde k vytvoření nežádoucího momentu na vodicích tyčích, což může vést k narušení konstrukce nebo až ke spálení samotného motoru. Výhodou motoru je schopnost aretace v dané pozici díky pohybovým šroubům.

Případně by se dal využít pouze jeden krokový motor, jako vedení by byly použity dvě vodicí tyče. Takle varianta by vyřešila problém se synchronizací motorů, ale i přesto zůstávají ostatní nevýhody.



Obr. 3–9 Zatížení krokovými motory.

### 3.3 Rotace hlavice

Pro znázornění rotace byla vytvořena grafická závislost na obr. 3–10, který vychází z normy ISO 14243-3, derivací získaných hodnot byla vytvořena grafická závislost rychlostí na obr. 3–11. Rotace hlavice se pohybuje v rozmezí od 0° do 60°. Maximální rychlost je 5,67 rad/s. Následnou derivací rychlosti byla získána maximální hodnota zrychlení hlavice 64,54 rad/s<sup>2</sup>. Výsledné hodnoty jsou klíčové parametry pro výběr motoru.

Při uvažování maximálních podmínek je zatížení normálovou silou 200 N s koeficientem tření 0,1621.

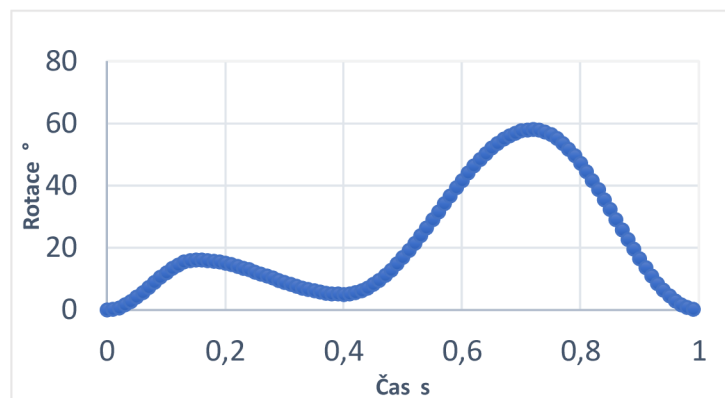
$$F_t = N \cdot f \quad (3.3)$$

$$F_t = 200 \cdot 0,1621 = 32,42 \text{ N}$$

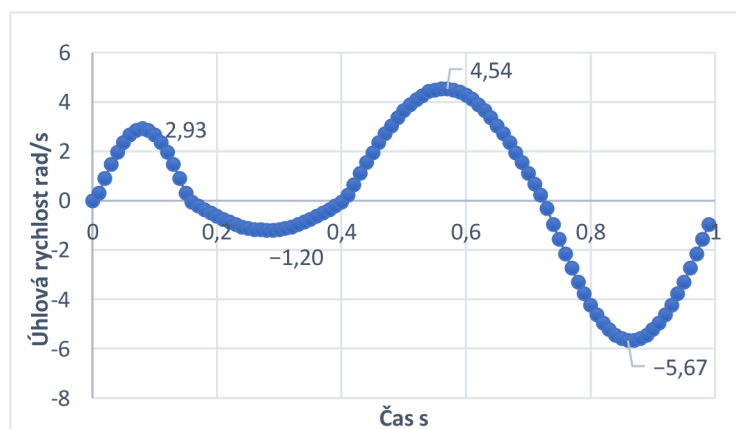
$$M_k = r \cdot F_t \quad (3.4)$$

$$M_k = 0,014 \cdot 32,42 = 0,45 \text{ Nm}$$

Třecí síla vychází 32,42 N. Při použití uvažované hlavice o průměru 28 mm je krouticí moment 0,45 Nm.



Obr. 3–10 Flexe/extenze.



Obr. 3–11 Úhlová rychlost hlavice.



### 3.4 Způsoby měření

V následující části je třeba zvolit správný způsob měření třecí síly. Je potřeba uvažovat s co nejmenší chybovostí, protože předpokládaná uvažovaná maximální síla zatížení je 200 N a třecí síla 32,42 N.

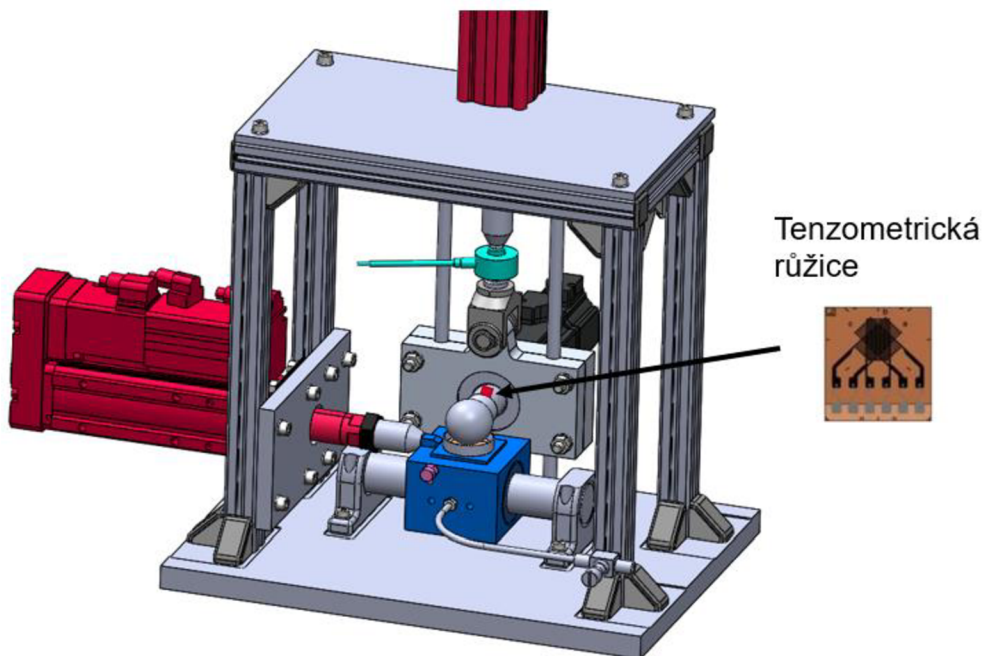
#### 3.4.1 Varianta a) tenzometrická růžice

Varianta spočívá v měření krouticího momentu pomocí tenzometru na hřídeli, která vychází ze servomotoru. Maximální uvažovaný krouticí moment je 0,45 Nm. Řešení je zobrazeno schematicky na obr. 3–12. Byla zvolena tenzometrická růžice, protože dokáže odolávat velkým dynamickým změnám a má velkou cyklickou výdrž. Používá se, pokud není znám přesný směr zatížení.

Pro měření zatížení bylo zvoleno umístění senzoru mezi hřídel a destičku.

Zatěžující síla je měřena na vertikálním pohonu mezi pístnicí a závěsem, kde je našroubován tenzometrický snímač.

Problém v navrženém konceptu spočívá v přepočítávání na krouticí moment a z toho výslednou sílu. Výhodou sice je, že ačkoli neznáme hlavní směry napětí, lze je určit z výsledných hodnot. K tomu je možné využít například Mohrovu kružnici. Tento způsob měření je však zdlouhavý a nemusí být vždy příliš přesný. Při působení zatěžující silou zde vzniká nechtěný ohybový moment, který zkresluje měření. Dále musí být růžice umístěna v místě, kde jsou homogenní mechanické vlastnosti.



Obr. 3–12 Měření tenzometrickou růžicí.

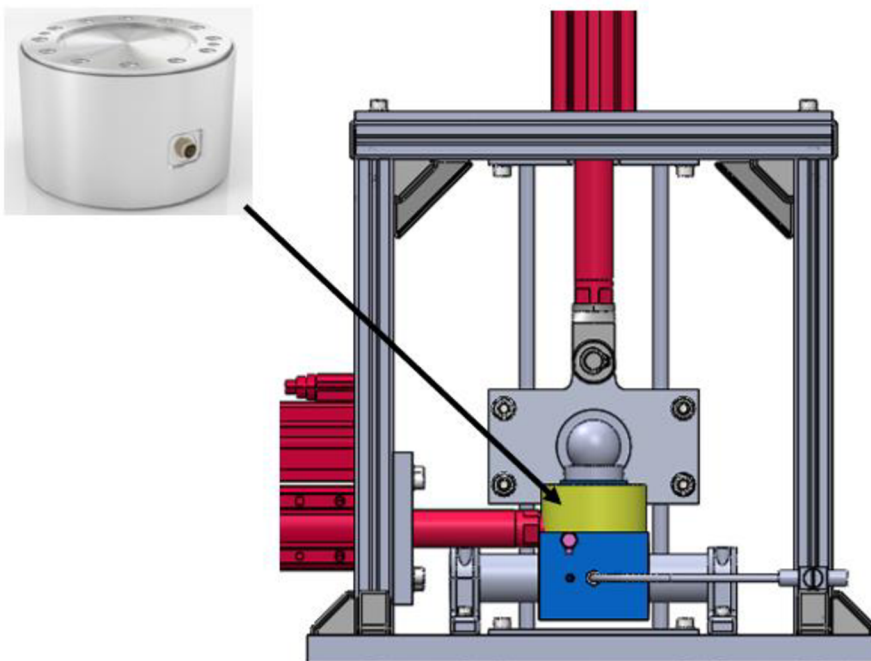
### 3.4.2 Varianta b) šestiosý senzor

V této variantě je pro měření třecí síly zvolen šestiosý senzor (případně tříosý), který je umístěn pod miskou s chrupavkou na obr. 3–13. Měří třecí i zatěžující sílu.

$$U = \frac{F_t}{100} \cdot 1\% \quad (3.5)$$

$$U = \frac{32,42}{100} \cdot 1\% = \pm 0,0032 \text{ N}$$

Byl zvolen šestiosý senzor 6A27 od firmy Interface s.r.o., který je schopen měřit síly ve třech osách a moment kolem těchto os. Jeho nepřesnost měření síly je 0,0032 N, což je při předpokládané třecí síle 32,42 N přijatelná hodnota. Nevýhodou tohoto senzoru je vysoká cena.



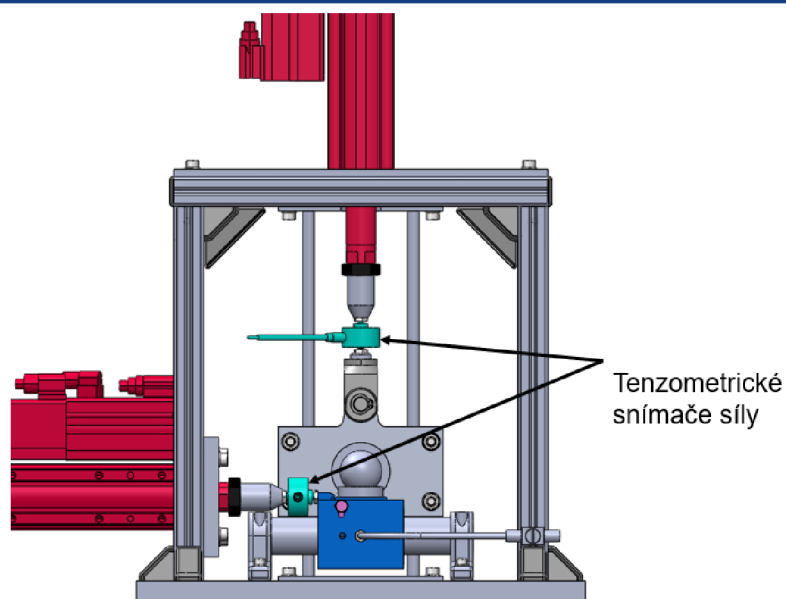
Obr. 3–13 Měření pomocí šestiosého senzoru.

### 3.4.3 Varianta c) tenzometrické snímače síly

V této variantě se uvažuje s měřením namáhání tah/tlak na hřídeli, která vystupuje z elektrického šroubového pohonu.

Lineární pohon vytváří pohyb a přenáší ho pomocí pístnice na vzduchové ložisko, které je bez tření uloženo na hřídeli lineárního vedení. Způsob, kterým je zde měřen odpor, je sice náročný, ale přesný. Celé schéma je znázorněno na obr. 3–14. Pro měření zatížení byl zvolen stejný tenzometrický snímač.

Je nutno počítat se setrvačností konstrukce, kterou hýbe pístnice.



Obr. 3–14 Měření za použití tenzometrických snímačů.

Výhodou tohoto snímače je jeho malá velikost a vysoká přesnost měření. Síla je uvnitř měřena pomocí tenzometrického můstku. Výstupní napětí je přímo úměrné síle působící na snímač [36].

---

## 4 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

V předchozí kapitole byly rozebrány koncepční varianty jak pro konstrukci, tak pro měření. Na základě jejich analýzy byly vybrány nejvhodnější varianty – konstrukce se zatížením pomocí elektrického pohonu, lineární pohyb pomocí vzduchového ložiska a měření třecí síly pomocí senzoru na hřídeli lineárního elektrického pohonu. V následující podkapitole je rozebrána volba konkrétních motorů a příslušných senzorů.

### 4.1 Zatížení hlavice

Z navrhovaných variant konceptu byla vybrána varianta dle kapitoly 3.2.1, která obsahuje elektrický pohon splňující podmínku zatížení 200 N podle okrajových podmínek v kapitole 4.2.

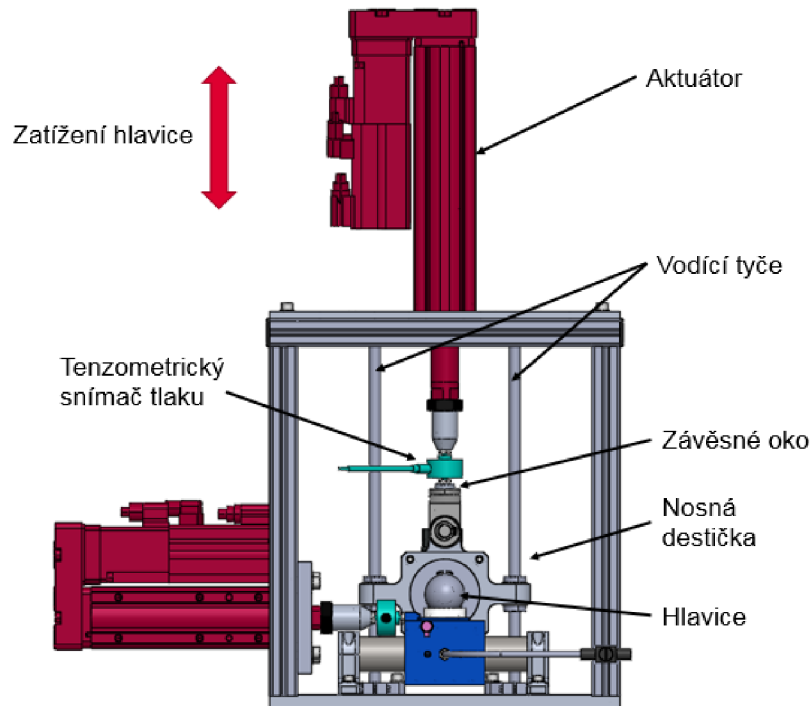
#### 4.1.1 Elektrický pohon

Elektrický šroubový pohon tvoří vertikální pohyb celé soustavy, tou je hlavice se servomotorem. Zatížení dosahuje maximálně 200 N a je měřeno mezi pístnicí a závěsem pohonu, viz obr. 4–1.

Pohon byl zvolen LEY H25 R S2 C–100 BM–S 2 A1 od společnosti SMC s.r.o. Zatížení bude ověřováno pomocí senzoru umístěného v konstrukci. To se dynamicky mění podle grafické závislosti na obr. 3–6 v podkapitole 3.2. Parametry elektrického pohonu jsou převzaty z přílohy 2.

- výkon 100 W,
- zdvih 100 mm,
- varianta s brzdou,
- standardní kabel délky 2 m,
- síla 238 N,
- rychlost od 9 do 250 mm/s,
- vertikální pracovní zátěž 16 kg,
- zrychlení 3000 mm/s<sup>2</sup>.

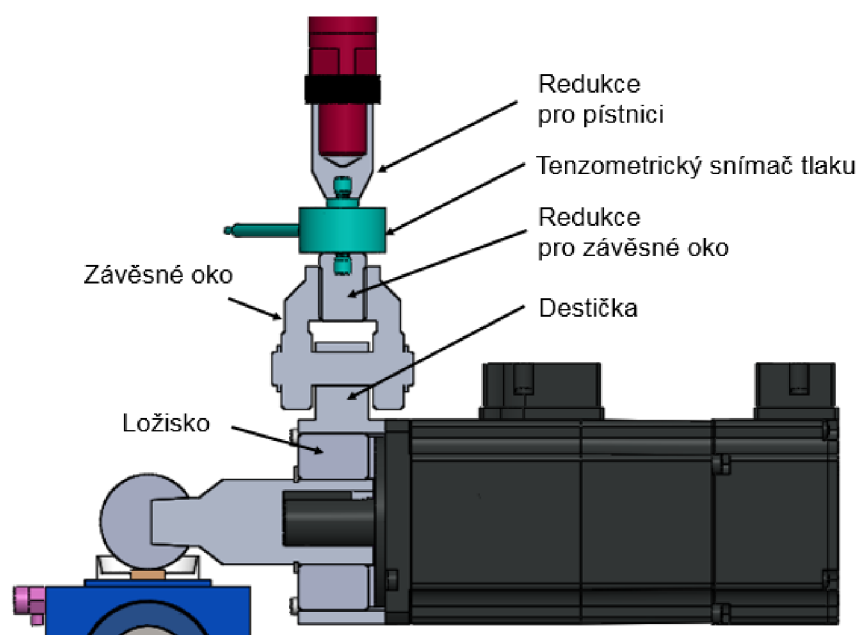
Součástí motoru je driver LECSA1 100 V až 120 V, který je od stejné společnosti.



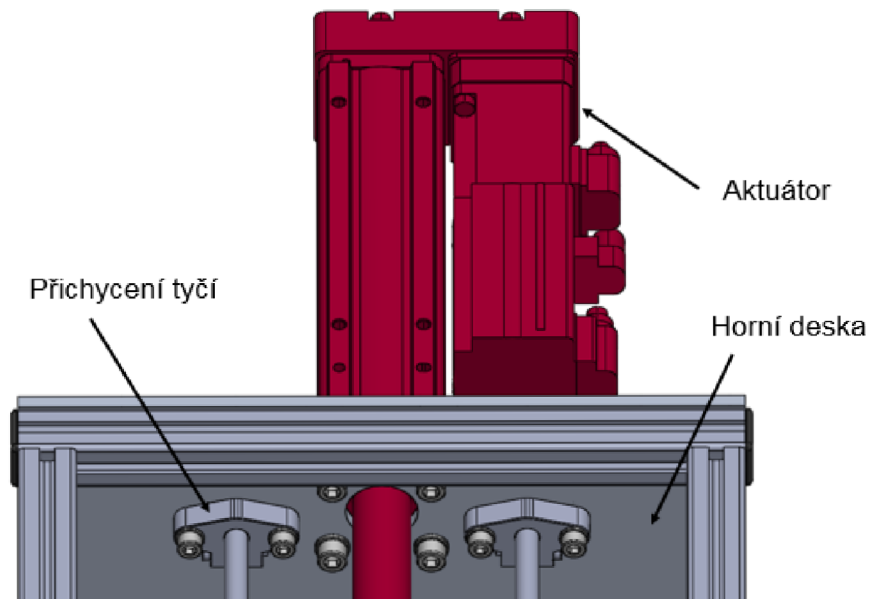
Obr. 4–1 Elektrický pohon – zatížení hlavice.

## 4.2 Konstrukce zatížení

Pístnice pohonu má vnější závit, na kterém je našroubována redukce s vnitřním závitem pro senzor na měření tlaku. Tento senzor je z druhé strany našroubovaný opět do redukce pro závěsné oko. Na závěsu je upevněna destička s konstrukcí pro rotaci hlavice. Radiální zatížení odebrává dvouřadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem 3205 ATN9/C3. Schéma konstrukce zatížení je zobrazeno na obr. 4–2. a obr. 4.3.

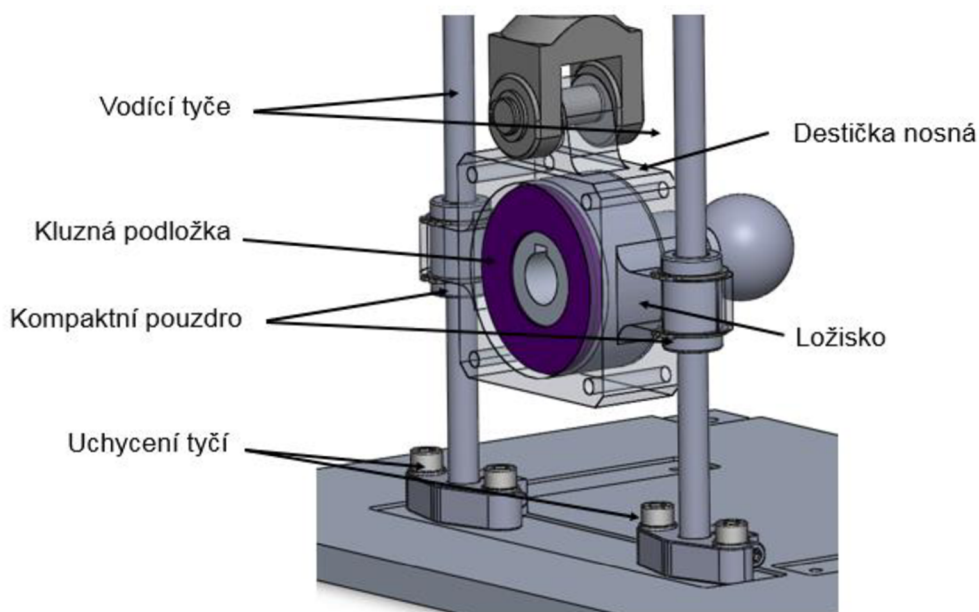


Obr. 4–2 Schéma konstrukce připojení pohonu.



Obr. 4–3 Připojení pohonu ke konstrukci.

Tyče jsou přichyceny v pouzdech po obou koncích, zobrazených na obr. 4–3. Destička, kterou pohybuje pohon, je vedena pomocí dvou vodících tyčí o průměru 8 mm. Na obou těchto tyčích jsou kompaktní pouzdra UB-08AWW od firmy HIWIN s.r.o., která jsou přichycena v destičce pomocí pojistných kroužků, viz obr. 4–4. Ověření statické únosnosti pouzdra je provedeno v kapitole 4.7.2.



Obr. 4–4 Vedení pohonu.

### 4.3 Rotace hlavice

Rotace hlavice se pohybuje v rozmezí od  $0^\circ$  do  $60^\circ$ . Maximální rychlost je  $5,67 \text{ rad/s}$ . Výsledné hodnoty jsou z podkapitoly 3.3, kde jsou rozebrány okrajové podmínky rotace hlavice.

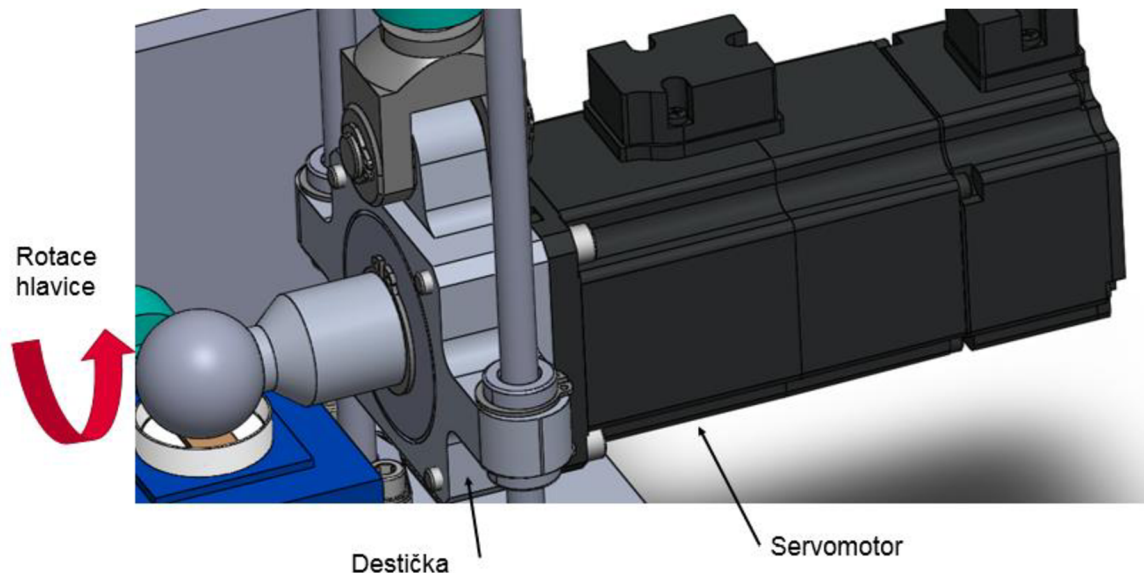
#### 4.3.1 Servomotor

Servomotor koná rotační pohyb hlavice. Protože musí být schopen dosahovat dynamických změn při úhlových rychlostech až  $5,67 \text{ rad/s}$ , byl zvolen synchronní. Okrajové podmínky jsou převzaty z podkapitoly 3.3, síla třecí  $32,42 \text{ N}$  a krouticí moment  $0,45 \text{ Nm}$ .

Na základě zvolených požadavků byl zvolen motor od firmy HIWIN s.r.o. – Servomotor FRLS 100 W, varianta s perem na hřídeli. Parametry motoru jsou převzaty z přílohy 10.

- jmenovitý výkon  $200 \text{ W}$ ,
- maximální otáčky  $4500 \text{ ot/min}$ ,
- jmenovité otáčky  $3000 \text{ ot/min}$ ,
- maximální moment  $1,92 \text{ Nm}$ ,
- jmenovitý moment  $0,64 \text{ Nm}$ .

Z motoru vychází hřídel o průměru  $14 \text{ mm}$  a délce  $30 \text{ mm}$ , na níž je vloženo pero těsné DIN 6885 A  $5 \times 5 \times 25$ . Motor je připevněn k nosné destičce pomocí šroubů, viz obr. 4–5.

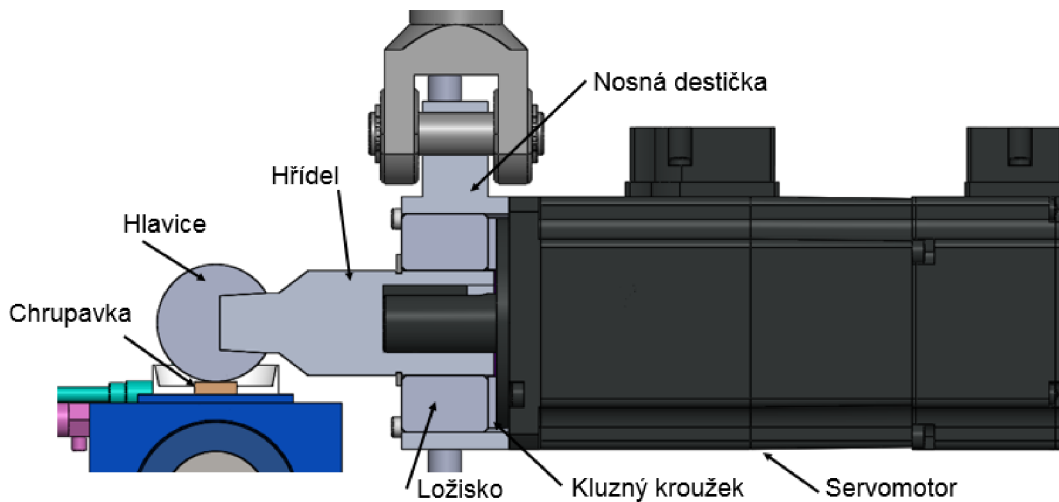


Obr. 4–5 Připevnění servomotoru.

K regulaci otáček je přidán frekvenční měnič HIWIN D2T – 0123, který je speciálně určený pro motory HIWIN a má spoustu možností využití díky konfiguračnímu softwaru Lightning.

### 4.3.2 Konstrukce rotace hlavice

Hřídel motoru je pomocí těsného pera připojena na větší hřídel, která zároveň zahrnuje náboj a čep. Na této hřídeli je nasazena hlavice. Čep na hřídeli má standardizované rozměry od firmy Zimmer s.r.o., jež se zabývá se výrobou endoprotéz, viz příloha 16. Hřídel je uložena v kuličkovém ložisku, které je nalisováno v hliníkové nosné destičce a odebírá radiální zatížení. Mezi motorem a ložiskem je kluzný kroužek z teflonu, který vymezuje ložisko a eliminuje odírání, viz obr. 4–6.



Obr. 4–6 Model konstrukce rotace hlavice.

## 4.4 Anterio-posteriální pohyb

Pro anterio-posteriální pohyb byla z konceptů zvolena varianta b) se vzduchovým ložiskem. Okrajové podmínky vychází z podkapitoly 3.1.

### 4.4.1 Lineární pohon

Pohon musí dosáhnout rychlosti 53 mm/s a zrychlení 2500 mm/s<sup>2</sup>. Musí být schopen velkých dynamických změn.

Zvolený motor LEYH25RS2A-50B F-SA1 od společnosti SMC s.r.o., dle přílohy 2:

- výkon 100 W,
- zdvih 50 mm,
- varianta s brzdou,
- standardní kabel délky 2 m,
- síla 122 N,
- rychlost od 18 do 500 mm/s,
- zrychlení 3000 mm/s<sup>2</sup>.



Pohon obsahuje přírubu pro větší plochu upevňovací plochu motoru. Řízení motoru zajišťuje driver LESCA1 (100 V až 120 V).

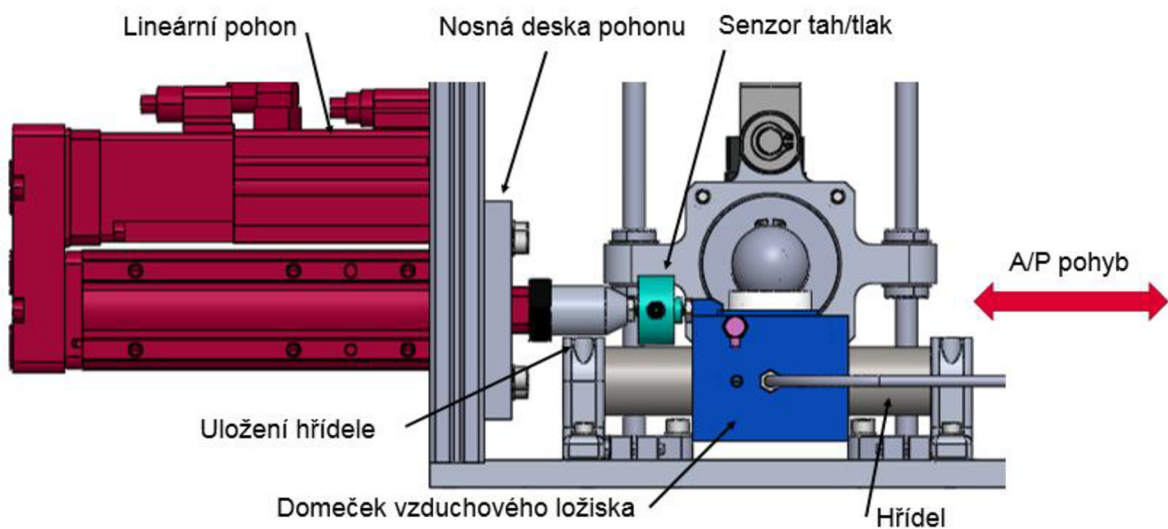
#### 4.4.2 Konstrukce anterio-posteriálního pohybu

Na pístnici motoru je našroubována redukce, ve které je zašroubován senzor pro měření tahu/ tlaku. Na senzor je napojen domeček vzduchového ložiska, ve kterém je vyvrtaný závit, viz obr. 4–7.

Vzduchové ložisko je nasazeno na hřídeli, která je pevně uložena v domečcích. Do ložiska je přiváděn vzduch pomocí hadiček, přes jednostranný škrticí ventil, který je umístěn na straně domečku. Celé ložisko je upevněno v domečku, který sice firma dodává, ale pro snížení nákladů byl navržen vlastní stejně jako hřídel. Na domečku je pak vyfrézované upevnění pro miskou s chrupavkou. Materiál domečku je hliník.

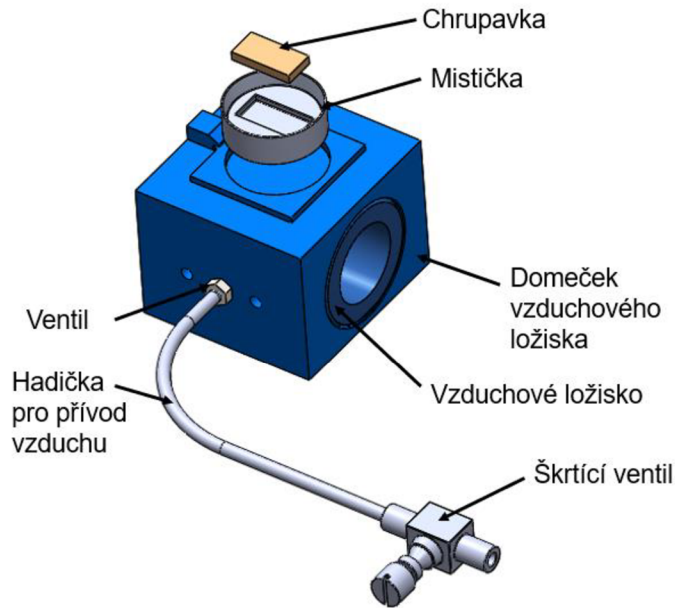
Zvolené ložisko má velikost 25 mm. Jeho další vlastnosti jsou:

- maximální radiální zatížení 226,3 N,
- radiální tuhost 34 N,
- tlak od 0,414 do 0,552 MPa.



Obr. 4–7 Model konstrukce A/P pohybu.

Chrupavka je uložena v mističce, která je připevněna na domečku ložiska. Domeček má vyfrézovanou díru, do níž se mistička nasadí a vlivem přitlačné síly drží na místě. V horizontálním pohybu zabraňuje pohybu právě toto vyfrézování. Domeček je vyroben z hliníku a hřídel z nerezové oceli s tolerancí g6, případně může být zvolen materiál jako keramika, eloxovaný hliník nebo poniklovaná ocel, viz obr. 4.8. Bližší specifikace ložiska jsou rozebrány v podkapitole 3.2.2.



Obr. 4–8 Sestavení domečku.

#### 4.5 Aplikované senzory

V konstrukci jsou použity tři senzory. Jedná se o jeden akcelerometr a dva tenzometrické snímače, který jsou upevněny pomocí redukcí na pístnicích lineárních pohonů. Umístění senzorů je zobrazeno na obr. 4–9.

U lineárního, horizontálního pohonu měří tah, který se převádí na třecí sílu. Zde byl zvolen senzor od společnosti BURSTER s.r.o. 8431-5100, který měří sílu do 100 N.

Vertikální pohon má připojen senzor pro měření vykonávaného zatížení, senzor je stejný jako v horizontálním směru, pouze s rozdílem rozsahu síly BURSTER 8431-5500, pro sílu do 500 N.

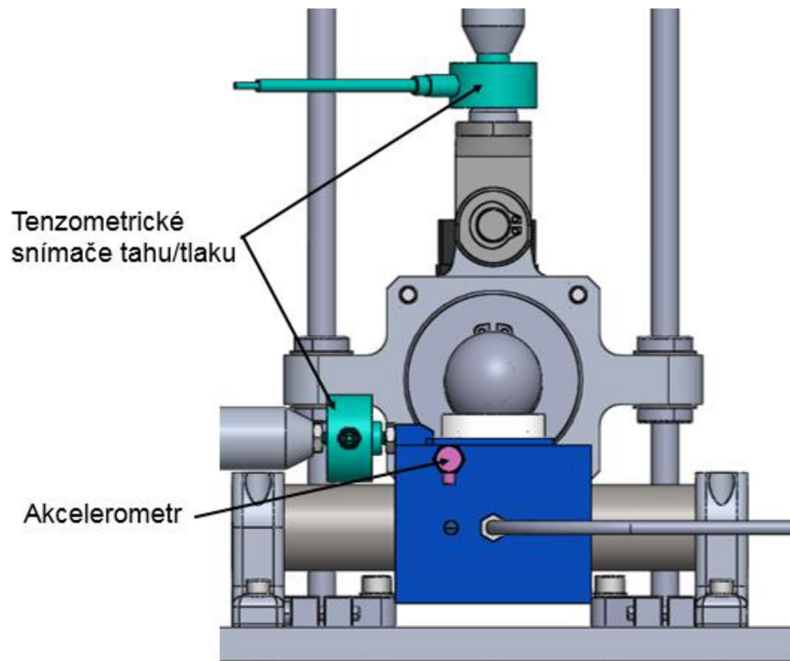
Nejistota uvedených senzorů je 0,15 % síly.

$$U = \frac{F_t}{100} \cdot 0,15\% \quad (4.1)$$

$$U = \frac{32,42}{100} \cdot 0,15\% = \pm 0,0004 \text{ N}$$

Nepřesnost senzoru je  $\pm 0,0004 \text{ N}$  a je závislá na teplotě, na což není brán ohled, protože teplota experimentu je stanovena na  $37 \pm 2 \text{ }^\circ\text{C}$ . Odchylka je zanedbatelná.

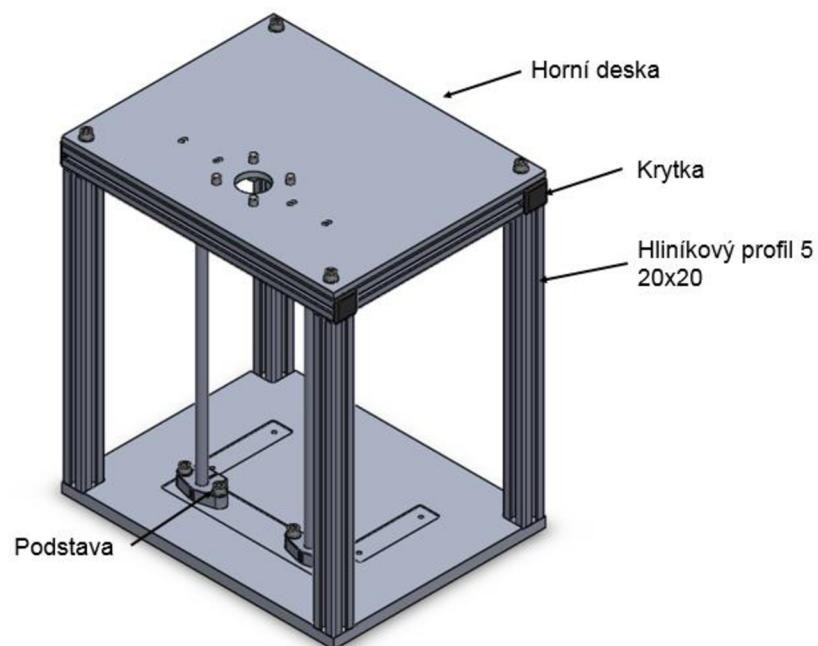
Dále je na domečku ložiska nalepen akcelerometr pro měření zrychlení. A/124/E. Při uvažovaném zrychlení  $2,5 \text{ m}^2/\text{s}$ . Maximální zrychlení je  $49,033 \text{ m/s}^2$ . Chybovost senzoru je  $0,1 \text{ mV}/(\text{m/s}^2)$ .



Obr. 4–9 Rozložení senzorů.

#### 4.6 Konstrukce rámu simulátoru

Kostra je tvořena hliníkovými profily profilové řady 5 o velikosti 20 x 20 mm od firmy Alváris Profil Systems s.r.o. Všechny připojované prvky ke konstrukci jsou připojeny drážkovými maticemi pomocí drážky v profilu. Konce profilů jsou zaslepeny krytkami. Samotná deska má vyvrtané díry a vyfrézované části pro uchycení celé sestavy, viz obr. 4–10.



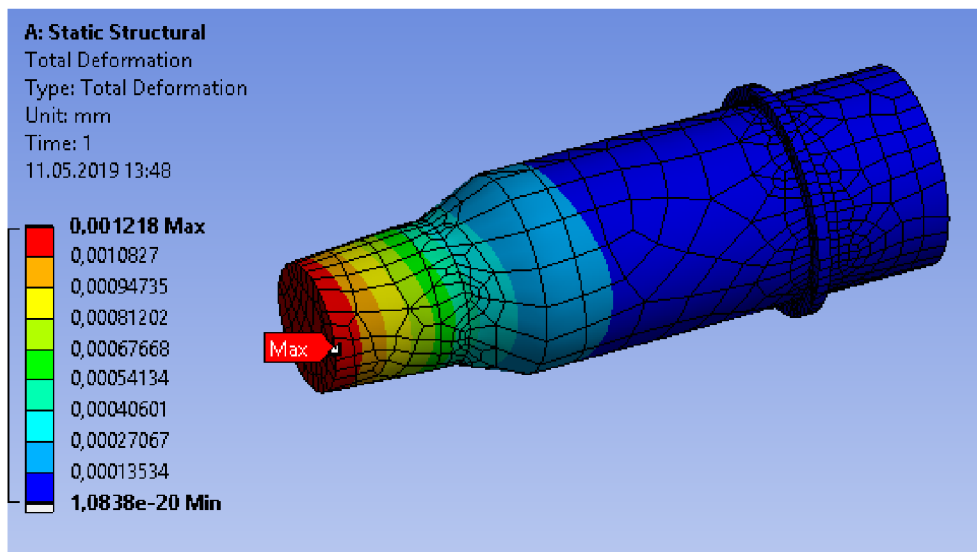
Obr. 4–10 Rám simulátoru.

## 4.7 Návrh výpočtů

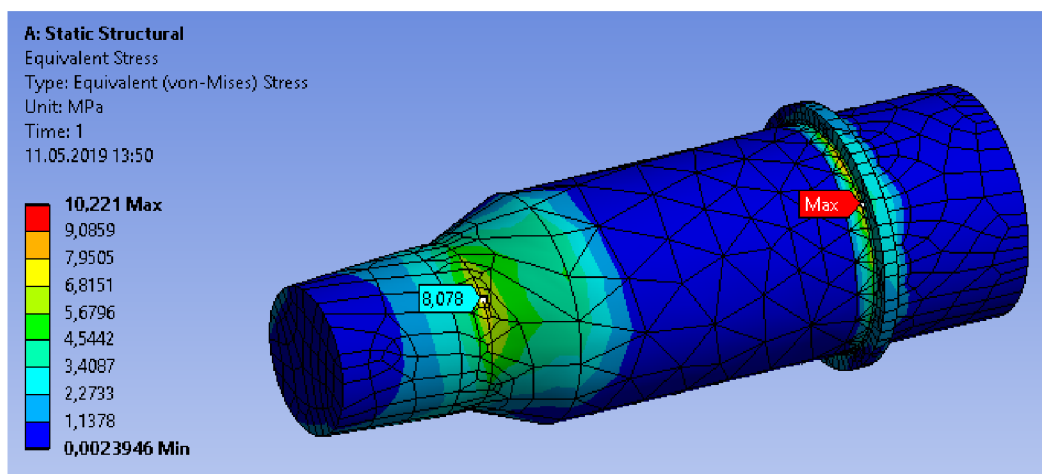
V následující kapitole je ověřena hřídel na deformaci a napětí v programu Ansys. Kompaktní pouzdra jsou ověřena na statickou únosnost.

### 4.7.1 Výpočet hřídele

Jeden z prvků v konstrukci, na který je potřeba vypočítat deformaci a napětí, je hřídel, na niž působí maximální síla 200 N. Pro hřídel byl zvolen typ sítě Hex Dominant Method. Její velikost byla nastavena na 5 mm, se zjmeněním na 1 mm v kritických částech.



Obr. 4–11 Znáznornění deformace.

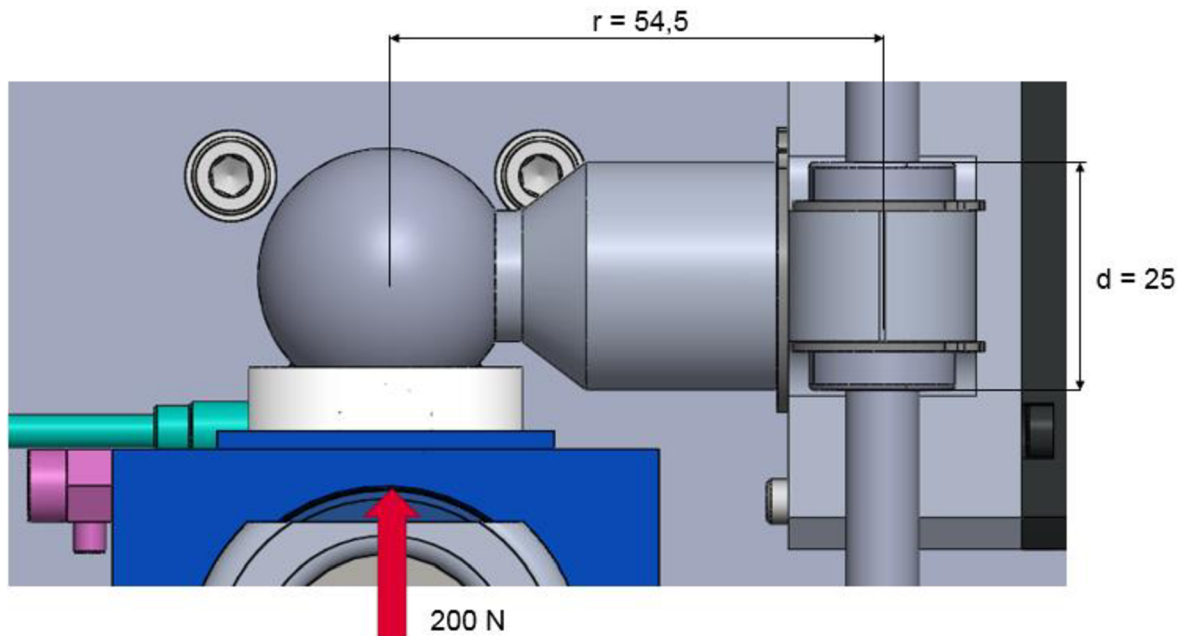


Obr. 4–12 Znáznornění napětí.

Na základě tohoto výpočtu vyšlo, že maximální deformace je pouze 0,0012 mm, viz obr. 4–11 a maximální napětí dosahuje nejvíce 10,22 MPa, viz obr. 4–12. Obě hodnoty jsou malé, proto lze s jistotou říct, že hřídel je předimenzovaná kvůli konstrukci.

#### 4.7.2 Zatížení kompaktních pouzder

Statická únosnost pouzder je 265 N a dynamická únosnost 420 N. Na obr. 4–13 jsou vykresleny vzdálenosti.



Obr. 4–13 Působení síly a vzdálenosti.

- vzdálenost hlavice a pouzder je 0,0545 m,
- působící síla 200 N,
- délka pouzdra 0,025 m.

Vznikající ohybový moment v destičce z hřídele:

$$M_0 = r \cdot F \quad (4.2)$$

$$M_0 = 0,0545 \cdot 200 = 10,9 \text{ Nm}$$

$$F_s = \frac{M_0}{\frac{d}{2}} \quad (4.3)$$

$$F_s = \frac{10,9}{\frac{25}{2}} = 218 \text{ N}$$

Maximální síla  $F_s$  působící na hranu kompaktního pouzdra je 218 N, tudíž vyhovuje předem stanovené únosnosti.

---

## 4.8 Testovací sérum

Standardizované sérum je tvořeno z hovězího séra zředěného deionizovanou vodou, aby měla hmotnostní koncentraci proteinu 20 g/l. Sérum se filtruje přes 2  $\mu\text{m}$  filtr. Skladuje se v mrazáku až do jeho testování, aby se zamezilo mikrobiální kontaminaci, případně se přidává antimikrobiální číslo.

## 5 DISKUSE

Celé zařízení bylo vymodelováno s použitím konkrétních prvků s ohledem na kinematiku kloubu:

- A/P pohyb od 0 do 5,2 mm,
- rotace hlavice od 0° do 60°,
- zatížení hlavice je 0 až 200 N.
- uvažovaný součinitel tření do 0,1621.

Součinitel tření je výrazně vyšší než součinitel vycházející z rešerše, což je způsobeno měřením za zhoršených podmínek – bez maziva. Tato varianta je uvažována jako výchozí hodnota, protože simulátor je tvořen pro měření součinitele tření i za neideálních podmínek.

Zadané parametry jsou splněny volbou konstrukce a konkrétních motorů.

**Anterio-posteriální pohyb** byl zprostředkován elektrickým šroubovým pohonem, který dovoluje dynamické změny. Pohon pohybuje vzduchovým ložiskem ležícím na hřídeli, ta lze vyrobít z různých předepsaných materiálů – eloxovaný hliník, korozivzdorná ocel, poniklovaná ocel nebo keramika. Do ložiska je potřeba přivádět vzduch o hodnotě tlaku 0,41 MPa, za tímto účelem byla přidána hadička, ventil a škrťací ventil. Je třeba uvažovat s kompresorem nebo jiným zařízením pro dodávání vzduchu. Ložisko zajišťuje přesné výsledky bez tření díky jeho vzduchové mezeře mezi ním a hřídelí, tím byla zajištěna základní podmínka A/P pohybu. Možným problémem je, že hadička bude vyvozovat odpor, který zkreslí výsledky měření. Pohon je schopen dosáhnout rychlosti od 18 do 500 mm/s a zrychlení až 3000 mm/s<sup>2</sup>, tím je splněna další důležitá podmínka stanovené kinematiky pohybu.

**Rotace hlavice** byla zajištěna servomotorem, který je schopen dynamických změn. Jeho hřídel je připojena k hřídeli s hlavici a vykonává rotaci. Hřídel je uložena ve dvou ložiskách, ta zamezují působení nežádoucího momentu a sil, které by zkreslovaly měření. Servomotor je schopen dosáhnout rychlostí 5,67 rad/s a odolávat krouticímu momentu 0,14 Nm.

Pro **zatížení** byl zvolen elektrický šroubový pohon. Vedení motoru zajišťují vyrovnávací tyče, na kterých jsou uložena kompaktní pouzdra pro rovnoměrný pohyb. Délka zdvihu byla zvolena 100 mm a pohon je schopen působit silou 238 N. Díky tomu motor splňuje stanovené podmínky zatěžování.

**Měření součinitele tření** bylo zvoleno s ohledem na konstrukci, cenu a přesnost měření. Při uvažování součinitele tření 0,1621 a maximální normálové síly 200 N je výsledná třecí síla 32,42 N. Tenzometrické snímače na pohonech měří s přesností  $\pm 0,0004$  N. Snímač zatížení je připevněn ve vertikálním směru za pístnici a měří tlak, kterým působí motor na konstrukci. Snímač tahu/tlaku měří na horizontálním pohonu odpor, který je způsoben třením na chrupavce. Nejvyšší dosahované zrychlení chrupavky je 2,5 m/s<sup>2</sup> a maximální změřitelné zrychlení senzorem je 49,033 m/s<sup>2</sup>. Tento senzor je předimenzován. Důvod jeho volby byla velikost, jednoduchá manipulace a chybovost jen 0,1 mV/(m/s<sup>2</sup>).

---

## 5.1 Návrhy pokračování řešení

Další možnou úpravou práce by bylo zavedení samotné endoprotézy do konstrukce a následné posílení pohonů a senzorů. Dále je možnost zavést do kinematiky pohybu poslední nesestavovaný pohyb – rotace chrupavky od  $-5,7^\circ$  do  $1,9^\circ$ . Dalším zásadním posunem budoucí práce může být sestavení konkrétního simulátoru, který by sloužil pro výzkum.

Pro měření je možné dále zabezpečit teplotu měření, která se dá zajistit kontrolovanou komorou, případně vytvořením vhodného inkubátoru.



## 6 ZÁVĚR

Cílem práce bylo zkonstruovat simulátor kolene, který bude schopen dosáhnout kinematických podmínek dle normy ISO 14243-3 a zároveň zaznamenávat průběh součinitele tření mezi povrchem chrupavky a CoCr hlavice.

K výsledku bylo třeba dosáhnout dílčích cílů. Na základě rešeršní studie byla nejprve analyzována kinematika kloubu a stanoveny byly okrajové podmínky pro simulátor (translační pohyb od 0 do 5,2 mm, rotace od 0° do 60° a síla od 0 do 200 N). Dalším úkolem bylo vytvoření konceptu, který bude splňovat podmínky a následný výběr konkrétních senzorů a pohonů s ohledem na cenu a velikost konstrukce. Z konceptů byl vybrán pro vertikální pohyb elektrický pohon, pro horizontální posuv vzduchové ložisko a pro měření senzor na pístnici u lineárního pohonu. Výsledkem práce je 3D model spolu s vybranými komponenty, které splňují okrajové podmínky. Hlavní inspirace simulátoru vychází ze simulátoru bioreaktor, který je také přizpůsoben konfiguraci pin-on-plate. Výsledné renderované obrázky konstrukce a jejích dílčích sestav jsou v příloze 17.

---

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. ULTRAVYSOKOMOLEKULÁRNÍ POLYETHYLEN PRO KLOUBNÍ NÁHRADY SE ZVÝŠENOU ŽIVOTNOSTÍ. *Chem. Listy* [online]. Praha: Ústav makromolekulární chemie AV ČR, 2013, 6. 9. 2013, 2013(107), 783–790 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2013\\_10\\_783-790.pdf](http://www.chemicke-listy.cz/docs/full/2013_10_783-790.pdf)
2. Ortopedie: Endoprotéza kolenního kloubu. *SurGal Clinic* [online]. Brno: Institut biomechaniky a analýz, Lékařská fakulta, Masarykova univerzita, nevedeno [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.surgalclicin.cz/index.php?pg=ortopedie--endoproteza-kolene>
3. ČIHÁK, Radomír. *Anatomie. 2., upr. a dopl. vyd.* Praha: Grada, 2001. ISBN 80-7169-970-5.
4. MEYLER, DO, Zinovy . Knee Anatomy. ARTHRITIS-health [online]. nevedeno: VERITAS-health, 2018 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.arthritis-health.com/types/joint-anatomy/knee-anatomy>
5. FUNICIELLO, DO, Marco. What Is a Bursa? In: *ARTHRITIS-health* [online]. nevedeno: VERITAS-health, 2018, 12. 4. 2019 [cit. 2020-06-13]. Dostupné z: <https://www.arthritis-health.com/types/bursitis/what-bursa>
6. Mechanické charakteristiky kostních spojů. *WikiSkripta* [online]. Praha: 1. lékařská fakulta Univerzity Karlovy, 2016, 19. 6. 2016 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Mechanické\\_charakteristiky\\_kostních\\_spojů](https://www.wikiskripta.eu/w/Mechanické_charakteristiky_kostních_spojů)
7. HANZLOVÁ, Jitka a Jan HEMZA. *Základy anatomie pohybového ústrojí* [online]. 2., dopl. vyd. Brno: Masarykova univerzita, 2009 [cit. 2019-05-10]. ISBN 978-80-210-4937-6.
8. MATĚJKA, Eduard. Biomechanika: Kolenní kloub. In: *Biomechanika: Kolenní kloub* [online]. Praha [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://adoc.tips/biomechanika-kolenni-kloub.html>
9. Bayflex. Bayflex – volně prodejný lék pro léčbu osteoartrózy [online]. Dostupné z: <https://bayflex.cz/klouby.html>
10. DYLEVSKÝ, Ivan a Petr JEŽEK. Kineziologie dolní končetiny: Kolenní kloub. *Základy kineziologie* [online]. Kbely: voš.palestra [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://vos.palestra.cz/skripta/kineziologie/7a4a1.htm>

11. ELUC: Pojivá tkáň. *ELUC* [online]. Olomouc: ELUC [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/171>
12. Artro centrum: Artróza nás nezastaví. Artro centrum: Artróza nás nezastaví [online]. Praha: Artro centrum, 2012 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.drmark.cz/rozhovory>
13. Onemocnění pohybového aparátu. Vitalion [online]. Praha: Vitalion.cz, 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://nemoci.vitalion.cz/onemocneni-pohyboveho-aparatu/>
14. FORAN, Jared RH, ed. Unicompartmental Knee Replacement. *OrthInfo* [online]. Rosemont: American Academy of Orthopaedic Surgeons, 2019, April 2016 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://orthoinfo.aaos.org/en/treatment/unicompartmental-knee-replacement/>
15. Artróza. In: *Vitalion* [online]. Praha: Vitalion.cz, 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://nemoci.vitalion.cz/artroza/>
16. KLÍKOVÁ, Lucie. Artróza kolenního kloubu. In: *Symptomy* [online]. Brno: Synetrix, 2017, neuvedeno [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.symptomy.cz/nemoc/artroza-kolenniho-kloubu>
17. Kinesiology of the Musculoskeletal System Foundations for Rehabi. *Kinesiology of Walking* [online]. Clinical Gate, 2015, 18. 3. 2015 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://clinicalgate.com/kinesiology-of-walking/>
18. Umělý kolenní kloub. *Umělý kolenní kloub* [online]. Praha: ORTHOMEDICA.CZ, 2019 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://www.orthomedica.cz/operace/koleno/umely-kolenni-kloub/>
19. ISO 14243-3. *Implants for surgery — Wear of total knee-joint prostheses: Part 3: Loading and displacement parameters for wear-testing machines with displacement control and corresponding environmental conditions for test*. Second edition. Geneva: ISO copyright office, 2014.
20. Informační systém muni. Kinetická navigace v kolenní endoprotetice [online]. [cit. 13. 6. 2020]. Dostupné z: [https://is.muni.cz/th/m65km/Kinematicka\\_navigace\\_v\\_kolenni\\_endoprotetice.pdf](https://is.muni.cz/th/m65km/Kinematicka_navigace_v_kolenni_endoprotetice.pdf)
21. ŘEHÁK, K. Vývoj endoprotéz. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2008. 57 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Zdeněk Florian, CSc.

- 
22. Biomateriály ve stomatologii – WikiSkripta. 301 Moved Permanently [online]. Dostupné z: [https://www.wikiskripta.eu/w/Biomateri%C3%A1ly\\_ve\\_stomatologii](https://www.wikiskripta.eu/w/Biomateri%C3%A1ly_ve_stomatologii)
23. Knee Replacement Surgery - MU Health Care. University of Missouri Health Care [online]. [cit. 13. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.muhealth.org/conditions-treatments/orthopaedics/knee-pain/knee-replacement-surgery>
24. KOZÁKOVÁ, Denisa. Materiály kostních náhrad. Hradec Králové, 2010. Bakalářská práce. UNIVERZITA KARLOVA V PRAZE FARMACEUTICKÁ FAKULTA V HRADCI KRÁLOVÉ.
25. ANDERSON, Michael C., Nicholas A. T. BROWN, Kent N. BACHUS a Bruce A. MACWILLIAMS. A cadaver knee simulator to evaluate the biomechanics of rectus femoris transfer. *Elsevier* [online]. 2009, **30**(1), 87–92 [cit. 2019-05-10]. DOI: 10.1016/j.gaitpost.2009.03.007. ISSN 09666362. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0966636209001039>
26. WIMMER, Markus A., Sibylle GRAD, Thomas KAUP, Markus HÄNNI, Erich SCHNEIDER, Sylwester GOGOLEWSKI a Mauro ALINI. Tribology Approach to the Engineering and Study of Articular Cartilage. *Tissue Engineering* [online]. 2004, 10 (9–10), 1436-1445 [cit. 2019-05-13]. DOI: 10.1089/ten.2004.10.1436. ISSN 1076-3279. Dostupné z: <https://www.liebertpub.com/doi/10.1089/ten.2004.10.1436>
27. AMTI: VIVO™ SIX D. O. F. JOINT SIMULATOR. *AMTI: VIVO™ SIX D. O. F. JOINT SIMULATOR* [online]. Watertown: Advanced Mechanical Technology [cit. 2019-05-17]. Dostupné z: <https://www.amti.biz/vivo.aspx>
28. MOORE, Axel C. New insights into joint lubrication. Tribology and lubrication technology [online]. 2016, 26-32 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <http://digitaleditions.walworthprintgroup.com/publication/index.php?m=&l=1&i=298826&p=28&ver=html5>
29. ČÍPEK, Pavel. *Tvorba mazacího filmu v kontaktu synoviálního kloubu v závislosti na smykové rychlosti: Projekt dizertační práce* [online]. Brno, 2017 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [http://ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/1365/9MOP\\_Cipek\\_V4.pdf/](http://ustavkonstruovani.cz/FileDownload/getFile/1365/9MOP_Cipek_V4.pdf/). Dizertační práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování.
30. UMT Tribolab (Bruker) - WUR. WUR [online]. Dostupné z: <https://www.wur.nl/en/product/UMT-Tribolab-Bruker.htm>
-

- 
31. UMT TriboLab Overview | Mechanical Testing Platform – UMT TriboLab Mechanical Testing Platform | Tribology | Bruker. High-performance scientific instruments and solutions for molecular and materials research, as well as for industrial and applied analysis. | Bruker [online]. Copyright Bruker 2020 [cit. 14. 6. 2020]. Dostupné z: <https://www.bruker.com/products/surface-and-dimensional-analysis/tribometers-and-mechanical-testers/umt-tribolab/overview.html>
32. NÁVRAT, Tomáš. *DEFORMAČNĚ – NAPĚŤOVÁ ANALÝZA KYČELNÍHO KLOUBU S APLIKOVANOU POVRCHOVOU NÁHRADOU* [online]. Brno, 2004, 31 s. [cit. 2019-05-13]. Dostupné z: <http://www.vutium.vutbr.cz/tituly/pdf/ukazka/80-214-2861-9.pdf>. Disertační práce. Vysoké učení technické, Fakulta strojního inženýrství, Ústav mechaniky těles, mechatroniky a biomechaniky.
33. TITANIUM ALLOYS GRADE 5 – GRADE 23. RGP Balls | sfere di precisione, sfere portanti, rulli e rullini cilindrici, cuscinetti a sfera [online]. Dostupné z: <https://www.rgpballs.com/en/titanium-alloys-grade-5-grade-23/?fbclid=IwAR2fApTPHOiAZ6XtOhtIRf5gjj6aETOJckymJUfq7hevHm7mC8eySvmNmro>
34. STELLITE® 20 ALLOY BALLS. RGP Balls | sfere di precisione, sfere portanti, rulli e rullini cilindrici, cuscinetti a sfera [online]. Dostupné z: <https://www.rgpballs.com/en/stellite-20-alloy-balls/>
35. New Way Air Bearings: AIR BUSHING. In: *New Way Air Bearings: AIR BUSHING* [online]. Aston: NEWWAY, 2012 [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: [https://www.newwayairbearings.com/wp-content/uploads/2017/07/new\\_way\\_air\\_bushing\\_ID\\_025mm\\_specsheet\\_S302502\\_web.pdf](https://www.newwayairbearings.com/wp-content/uploads/2017/07/new_way_air_bushing_ID_025mm_specsheet_S302502_web.pdf)
36. Přesný snímač tahové a tlakové síly. *Přesný snímač tahové a tlakové síly* [online]. Brno: MEATEST [cit. 2019-05-10]. Dostupné z: <https://www.meatest.com/cs/produkty-8431-32-presny-snimac-tahove-a-tlakove-sily-detail->

**SEZNAM POUŽITÝCH FYZIKÁLNÍCH SYMBOLŮ A ZKRATEK**

$E$	modul pružnosti v tahu
$\mu$	Poissonovo číslo
$F_{emax}$	maximální síla endoprotézy
$F_{hmax}$	maximální síla hlavice
$F_h$	síla hlavice
$F_e$	síla endoprotézy
$k$	koeficient
$t$	čas
$F_t$	třecí síla
$N$	normálová síla
$f$	koeficient tření
$M_k$	krouticí moment
$r$	poloměr hlavice
$U$	účinnost
$M_o$	ohybový moment
$F_s$	síla kompaktního pouzdra
LVDT	linear variable differential transformer
Atd	a tak dále
CoCr	kobalt chrome
ISO	International Organization for Standardization
A/P	anterio-posteriální posuv

---

## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1. Nacenění víceosého snímače od firmy HBM.....	11
Příloha 2. Katalog elektrických pohonů.....	12
Příloha 3. Katalog matice na pístnici .....	17
Příloha 4. Katalog závěs na pístnici.....	18
Příloha 5. Katalog driverů pro oba lineární pohony .....	19
Příloha 6. Sestavení a specifikace vzduchového ložiska .....	20
Příloha 7. Hliníkové profily a příslušenství.....	21
Příloha 8. Pneumatický stavitelný škrťící ventil jednostranný na hadičku 4 mm.....	22
Příloha 9. Katalog pouzder HIWIN .....	22
Příloha 10. Katalog – HIWIN – Servomotor FRLS 100 W .....	23
Příloha 11. Frekvenční měnič – HIWIN D2T – 0123 a příslušenství.....	25
Příloha 12. Akcelerometr A/124/E .....	27
Příloha 13. Tenzometrické senzory tahu/tlaku BUSTER 8431-5500 a 8431-5100.....	29
Příloha 14. Výkres sestavy – 1-A03/00	
Příloha 15. Kusovník sestavy – 4-A03/00	
Příloha 16. Výkres hřídele s nábojem – 4-A03/01	
Příloha 17. Renderované obrázky	

# PŘÍLOHY

## Příloha 1. Nacenní víceosého snímače od firmy HBM

pol.	<b>kód produktu</b> <i>popis</i>	množství	jednotková cena	sleva	cena po slevě	položka celkem
001	<b>K-MCS10-005-3C-FXFYZ-000000</b> Víceosý tenzometrický snímač pro měření sil ve třech osách s třídou přesnosti 0.2. Tenzometrický plný most pro každý kanál, jmenovité rozsahy F <sub>x</sub> =1kN, F <sub>y</sub> =1kN, F <sub>z</sub> =5kN, výstupní odpor 300...800Ohmů. Zavedení sil pomocí kruhových přírub s pozičním pinem, výstup konektorem Lemo typ OT pro každý kanál, materiál těla - slitina titanu, plášť - hliníková slitina, krytí IP67, vestavěná elektronická identifikace snímače - TEDS Běžný dodací termín: 6-8 týdnů, záruční doba 2 roky	1 ks	83 241,00 Kč	0%	83 241,00 Kč	83 241,00 Kč
002	<b>1-KAB146-6</b> Šestižilový propojovací kabel s přímým konektorem Lemo OT 6pin pro multikomponentní snímače MCS10, bezhalogenové TPE provedení, průměr kabelu 4.8mm, délka 6m, volné konce. Běžný dodací termín: 3-6 týdnů, záruční doba 2 roky	3 ks	2 268,00 Kč	0%	2 268,00 Kč	6 804,00 Kč
						Součet brutto: 90 045,00 Kč
						Součet slev: 0,00 Kč
						Součet netto: 90 045,00 Kč
						Součet DPH: 18 909,45 Kč
						Zaokrouhlení: -0,45 Kč
						<b>Celkem k úhradě: 108 954,00 Kč</b>



Příloha 2. Katalog elektrických pohonů

– LEY25RS2C–100 BM–S2A1 a LEYH25RS2A-50B F-SA1

EtherNet/IP Compatible ▶ Page 99

DeviceNet Compatible ▶ Page 99

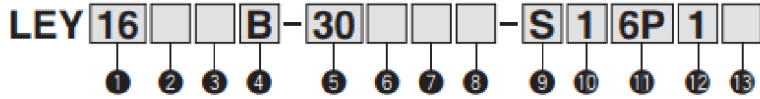
Multi-Axis Step Motor Controller Compatible ▶ Page 108

## Electric Actuator/Rod Type

Step Motor (Servo/24 VDC)    Servo Motor (24 VDC)

# Series LEY

## LEY16, 25, 32, 40



**1 Size**

16
25
32
40

**2 Motor mounting position**

—	Top mounting
R	Right side parallel
L	Left side parallel
D	In-line

**3 Motor type**

Symbol	Type	Size			Compatible controllers/driver
		LEY16	LEY25	LEY32/40	
—	Step motor (Servo/24 VDC)	●	●	●	LECP6 LECP1 LECPA
A	Servo motor (24 VDC)	●	●	—	LECA6

**Caution**  
[CE-compliant products]  
① EMC compliance was tested by combining the electric actuator LEY series and the controller LEC series.  
The EMC depends on the configuration of the customer's control panel and the relationship with other electrical equipment and wiring. Therefore conformity to the EMC directive cannot be certified for SMC components incorporated into the customer's equipment under actual operating conditions. As a result it is necessary for the customer to verify conformity to the EMC directive for the machinery and equipment as a whole.  
② For the servo motor (24 VDC) specification, EMC compliance was tested by installing a noise filter set (LEC-NFA). Refer to page 73 for the noise filter set. Refer to the LECA Operation Manual for installation.  
[UL-compliant products]  
When conformity to UL is required, the electric actuator and controller/driver should be used with a UL1310 Class 2 power supply.

**4 Lead [mm]**

Symbol	LEY16	LEY25	LEY32/40
A	10	12	16
B	5	6	8
C	2.5	3	4

**5 Stroke [mm]**

30	30
to	to
500	500

\* Refer to the applicable stroke table.

**6 Motor option**

—	Without option
C	With motor cover
B	With lock
W	With lock and motor cover

**7 Rod end thread**

—	Rod end female thread
M	Rod end male thread (1 rod end nut is included.)

Note) When "With lock" or "With lock and motor cover" is selected for the top mounting and right/left side parallel types, the motor body will stick out of the end of the body for size 16/40 with strokes 30 or less. Check for interference with workpieces before selecting a model.



\* Applicable stroke table

Model	Stroke [mm]										Manufacturable stroke range [mm]	
	30	50	100	150	200	250	300	350	400	450		500
LEY16	●	●	●	●	●	●	●	—	—	—	—	10 to 300
LEY25	●	●	●	●	●	●	●	●	—	—	—	15 to 400
LEY32/40	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	20 to 500

● Standard

\* Consult with SMC for non-standard strokes as they are produced as special orders.

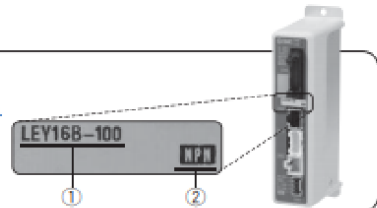
For auto switches, refer to pages 27 and 28.

**The actuator and controller/driver are sold as a package.**

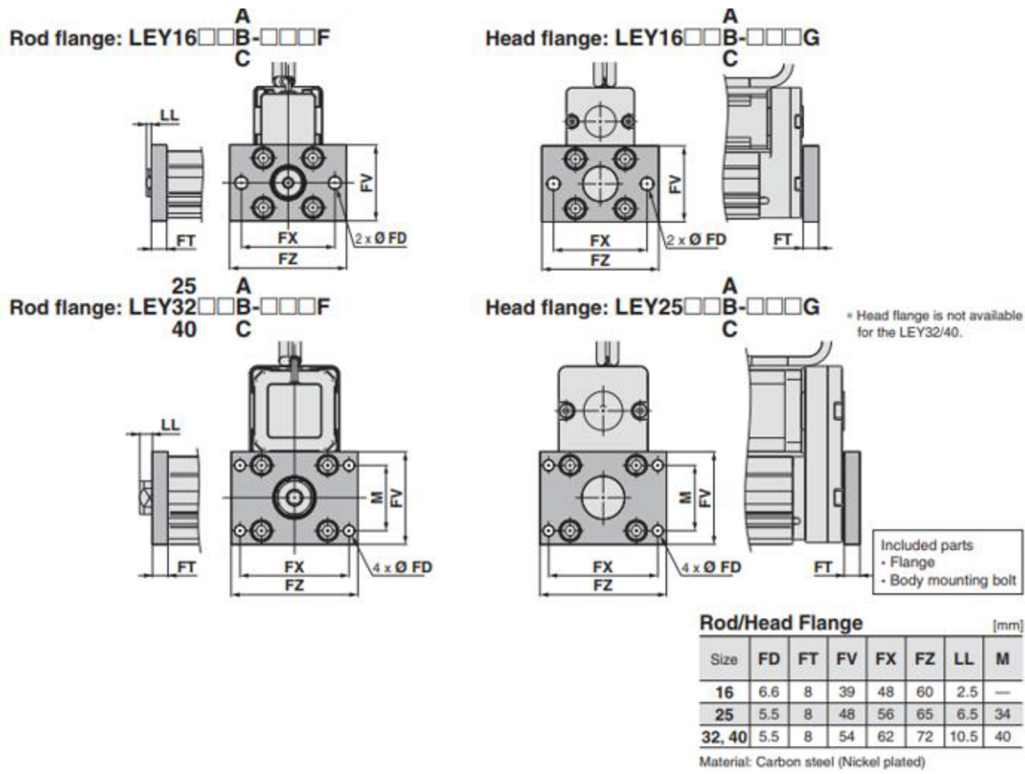
Confirm that the combination of the controller/driver and the actuator is correct.

<Check the following before use.>

- ① Check the actuator label for model number. This matches the controller/driver.
- ② Check Parallel I/O configuration matches (NPN or PNP)

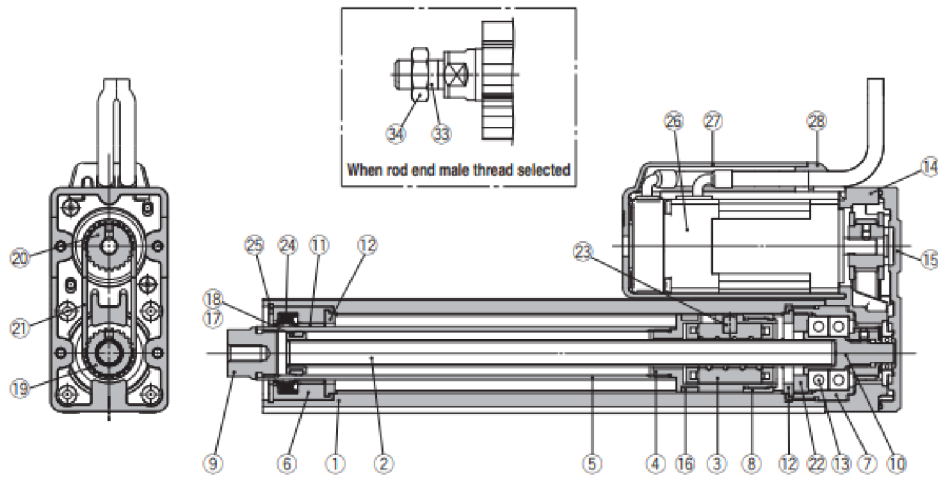


\* Refer to the operation manual for using the products. Please download it via our website, <http://www.smcworld.com>

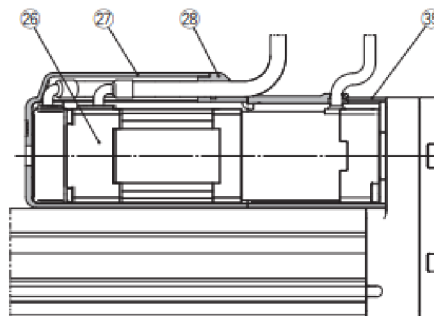


### Construction

Motor top mounting type: LEY  
 16  
 25  
 32  
 40



Motor top/parallel type  
 With lock/motor cover



## Specifications

### Step Motor (Servo/24 VDC)

Model		LEY16			LEY25			LEY32			LEY40			
Stroke [mm] <sup>Note 1)</sup>		30, 50, 100, 150 200, 250, 300			30, 50, 100, 150, 200 250, 300, 350, 400			30, 50, 100, 150, 200, 250 300, 350, 400, 450, 500			30, 50, 100, 150, 200, 250 300, 350, 400, 450, 500			
Work load [kg] <sup>Note 2)</sup>	Horizontal (LECP6, LECPI, LECPIU)	(3000 [mm/s <sup>2</sup> ])	6	17	30	20	40	60	30	45	60	50	60	80
		(2000 [mm/s <sup>2</sup> ])	10	23	35	30	55	70	40	60	80	60	70	90
	Horizontal (LECPA)	(3000 [mm/s <sup>2</sup> ])	4	11	20	12	30	30	20	40	40	30	60	60
		(2000 [mm/s <sup>2</sup> ])	6	17	30	18	50	50	30	60	60	—	—	—
	Vertical	(3000 [mm/s <sup>2</sup> ])	2	4	8	8	16	30	11	22	43	13	27	53
Pushing force [N] <sup>Note 3) 4) 5)</sup>		14 to 38	27 to 74	51 to 141	63 to 122	126 to 238	232 to 452	80 to 189	156 to 370	296 to 707	132 to 283	266 to 553	562 to 1058	
Speed [mm/s] <sup>Note 5)</sup>	LECP6/LECP1/LECP1U	15 to 500	8 to 250	4 to 125	18 to 500	9 to 250	5 to 125	24 to 500	12 to 300	6 to 150	24 to 500	12 to 350	6 to 175	
	LECPA								12 to 250	6 to 125	24 to 300	12 to 150	6 to 75	
Max. acceleration/deceleration [mm/s <sup>2</sup> ]		3000												
Pushing speed [mm/s] <sup>Note 6)</sup>		50 or less			35 or less			30 or less			30 or less			
Positioning repeatability [mm]		±0.02												
Lost motion [mm] <sup>Note 7)</sup>		0.1 or less												
Screw lead [mm]		10	5	2.5	12	6	3	16	8	4	16	8	4	
Impact/Vibration resistance [m/s <sup>2</sup> ] <sup>Note 8)</sup>		50/20												
Actuation type		Ball screw + Belt (LEY□□) / Ball screw (LEY□□)												
Guide type		Sliding bushing (Piston rod)												
Operating temperature range [°C]		5 to 40												
Operating humidity range [%RH]		90 or less (No condensation)												
Motor size		□28			□42			□56.4			□56.4			
Motor type		Step motor (Servo/24 VDC)												
Encoder		Incremental A/B phase (800 pulse/rotation)												
Rated voltage [V]		24 VDC ±10 %												
Power consumption [W] <sup>Note 9)</sup>		23			40			50			50			
Standby power consumption when operating [W] <sup>Note 10)</sup>		16			15			48			48			
Max. instantaneous power consumption [W] <sup>Note 11)</sup>		43			48			104			106			
Type <sup>Note 12)</sup>		Non-magnetizing lock												
Holding force [N]		20	39	78	78	157	294	108	216	421	127	265	519	
Power consumption [W] <sup>Note 13)</sup>		2.9			5			5			5			
Rated voltage [V]		24 VDC ±10 %												

Note 1) Please consult with SMC for non-standard strokes as they are produced as special orders.

Note 2) Horizontal: The maximum value of the work load. An external guide is necessary to support the load (Friction coefficient of guide: 0.1 or less). The actual work load and transfer speed change according to the condition of the external guide. Also, speed changes according to the work load. Check "Model Selection" on pages 5 and 6.

Vertical: Speed changes according to the work load. Check "Model Selection" on pages 5 and 6.

The values shown in ( ) are the acceleration/deceleration.

Set these values to be 3000 [mm/s<sup>2</sup>] or less.

Note 3) Pushing force accuracy is ±20 % (F.S.).

Note 4) The pushing force values for LEY16□ is 35 % to 85 %, for LEY25□ is 35 % to 65 %, for LEY32□ is 35 % to 85 % and for LEY40□ is 35 % to 65 %. The pushing force values change according to the duty ratio and pushing speed. Check "Model Selection" on page 8.

Note 5) The speed and force may change depending on the cable length, load and mounting conditions. Furthermore, if the cable length exceeds 5 m, then it will decrease by up to 10 % for each 5 m. (At 15 m: Reduced by up to 20 %)

Note 6) The allowable speed for pushing operation. When push conveying a workpiece, operate at the vertical work load or less.

Note 7) A reference value for correcting an error in reciprocal operation.

Note 8) Impact resistance: No malfunction occurred when the actuator was tested with a drop tester in both an axial direction and a perpendicular direction to the lead screw. (Test was performed with the actuator in the initial state.)

Vibration resistance: No malfunction occurred in a test ranging between 45 to 2000 Hz. Test was performed in both an axial direction and a perpendicular direction to the lead screw. (Test was performed with the actuator in the initial state.)

Note 9) The power consumption (including the controller) is for when the actuator is operating.

Note 10) The standby power consumption when operating (including the controller) is for when the actuator is stopped in the set position during the operation. Except during the pushing operation.

Note 11) The maximum instantaneous power consumption (including the controller) is for when the actuator is operating. This value can be used for the selection of the power supply.

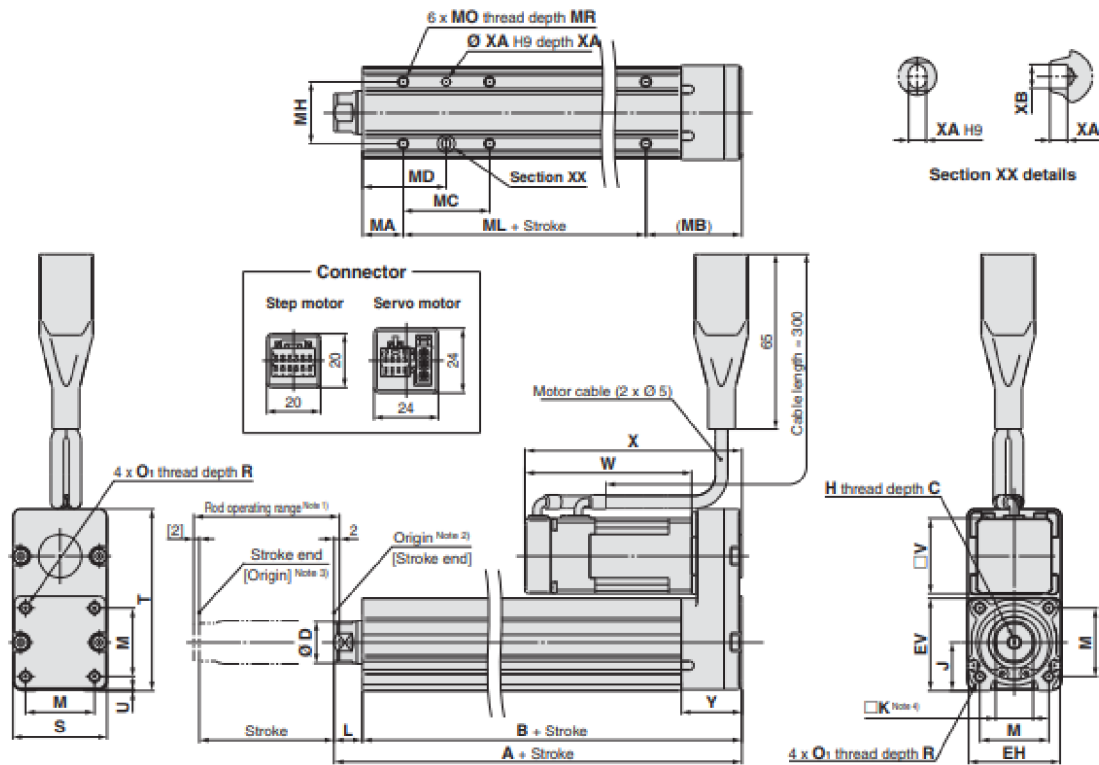
Note 12) With lock only

Note 13) For an actuator with lock, add the power consumption for the lock.

# Series LEY

Step Motor (Servo/24 VDC) Servo Motor (24 VDC)

## Dimensions: Motor Top/Parallel



Note 1) Range within which the rod can move when it returns to origin. Make sure a workpiece mounted on the rod does not interfere with the workpieces and facilities around the rod.

Note 2) Position after return to origin.

Note 3) [ ] for when the direction of return to origin has changed.

Note 4) The direction of rod end width across flats (□K) differs depending on the products.

Size	Stroke range [mm]	A	B	C	D	EH	EV	H	J	K	L	M	O <sub>1</sub>	R	S	T	U	V	Step motor		Servo motor		Y
																			W	X	W	X	
16	10 to 100	101	90.5	10	16	34	34.3	M5 x 0.8	18	14	10.5	25.5	M4 x 0.7	7	35	67.5	0.5	28	61.8	80.3	62.5	81	22.5
	101 to 300	121	110.5																				
	15 to 100	130.5	116																				
25	101 to 400	155.5	141	13	20	44	45.5	M8 x 1.25	24	17	14.5	34	M5 x 0.8	8	46	92	1	42	63.4	85.4	59.6	81.6	26.5
	20 to 100	148.5	130																				
	101 to 500	178.5	160																				
32	20 to 100	148.5	130	13	25	51	56.5	M8 x 1.25	31	22	18.5	40	M6 x 1.0	10	60	118	1	56.4	68.4	95.4	—	—	34
	101 to 500	178.5	160																				
	20 to 100	148.5	130																				
40	20 to 100	148.5	130	13	25	51	56.5	M8 x 1.25	31	22	18.5	40	M6 x 1.0	10	60	118	1	56.4	90.4	117.4	—	—	34
	101 to 500	178.5	160																				
	20 to 100	148.5	130																				

### Body Bottom Tapped

Size	Stroke range [mm]	MA	MB	MC	MD	MH	ML	MO	MR	XA	XB
16	10 to 39	15	35.5	17	23.5	23	40	M4 x 0.7	5.5	3	4
	40 to 100			32	31						
	101 to 300			62	46						
25	15 to 39	20	46	24	32	29	50	M5 x 0.8	6.5	4	5
	40 to 100			42	41						
	101 to 124			59	49.5						
	125 to 200			76	58						
	201 to 400			76	58						
32	20 to 39	25	55	22	36	30	50	M6 x 1	8.5	5	6
	40 to 100			36	43						
	101 to 124			53	51.5						
	125 to 200			70	60						
	201 to 500			70	60						

# Electric Actuator/Rod Type **Series LEY**

Step Motor (Servo/24 VDC) Servo Motor (24 VDC)



Motor mounting position: Top/Parallel



Motor mounting position: In-line

## 8 Mounting\*1

Symbol	Type	Motor mounting position	
		Top/Parallel	In-line
—	Ends tapped*2 Body bottom tapped	●	●
L	Foot	●	—
F	Rod flange*2	●*4	●
G	Head flange*2	●*5	—
D	Double clevis*3	●	—

\*1 Mounting bracket is shipped together, (but not assembled).

\*2 For horizontal cantilever mounting with the rod flange, head flange and ends tapped, use the actuator within the following stroke range.

- LEY25: 200 or less  
- LEY32/40: 100 or less

\*3 For mounting with the double clevis, use the actuator within the following stroke range.

- LEY16: 100 or less  
- LEY25: 200 or less  
- LEY32/40: 200 or less

\*4 Rod flange is not available for the LEY16/40 with stroke 30 mm and motor option "With lock", "With lock/motor cover".

\*5 Head flange is not available for the LEY32/40.

## 13 Controller/Driver mounting

—	Screw mounting
D	DIN rail mounting*1

\*1 DIN rail is not included. Order it separately.

## 9 Actuator cable type\*1

—	Without cable
S	Standard cable*2
R	Robotic cable (Flexible cable)*3

\*1 The standard cable should be used on fixed parts. For using on moving parts, select the robotic cable.

\*2 Only available for the motor type "Step motor."

\*3 Fix the motor cable protruding from the actuator to keep it unmovable. For details about fixing method, refer to Wiring/Cables in the Electric Actuators Precautions.

## 10 Actuator cable length [m]

Without cable	
—	Without cable
1	1.5
3	3
5	5
8	8*
A	10*
B	15*
C	20*

\* Produced upon receipt of order (Robotic cable only). Refer to the specifications Note 5) on page 13.

## 11 Controller/Driver type\*1

Without controller/driver		
6N	LECP6/LECA6	NPN
6P	(Step data input type)	PNP
1N	LECP1*2	NPN
1P	(Programless type)	PNP
AN	LECPA*2, *3	NPN
AP	(Pulse input type)	PNP

\*1 For details about controller/drivers and compatible motors, refer to the compatible controller/drivers below.

\*2 Only available for the motor type "Step motor."

\*3 When pulse signals are open collector, order the current limiting resistor separately.

## 12 I/O cable length [m]\*1, Communication plug

Without cable	
—	Without cable
1	1.5
3	3*2
5	5*2

\*1 When "Without controllers/driver" is selected for controller/driver types, I/O cable cannot be selected. Refer to page 73 (For LECP6/LECA6), page 86 (For LECP1) or page 93 (For LECPA) if I/O cable is required.

\*2 When "Pulse input type" is selected for controller/driver types, pulse input usable only with differential. Only 1.5 m cables usable with open collector.

## Compatible Controllers/Driver

Type	Step data input type	Step data input type	Programless type	Pulse input type
Series	LECP6	LECA6	LECP1	LECPA
Features	Value (Step data) input Standard controller		Capable of setting up operation (step data) without using a PC or teaching box	Operation by pulse signals
Compatible motor	Step motor (Servo/24 VDC)	Servo motor (24 VDC)	Step motor (Servo/24 VDC)	
Maximum number of step data	64 points		14 points	—
Power supply voltage	24 VDC			
Reference page	Page 65	Page 65	Page 80	Page 87

### Component Parts

No.	Description	Material	Note
1	Body	Aluminium alloy	Anodised
2	Ball screw (shaft)	Alloy steel	
3	Ball screw nut	Resin/Alloy steel	
4	Piston	Aluminium alloy	
5	Piston rod	Stainless steel	Hard chrome plating
6	Rod cover	Aluminium alloy	
7	Housing	Aluminium alloy	
8	Rotation stopper	POM	
9	Socket	Free cutting carbon steel	Nickel plating
10	Connected shaft	Free cutting carbon steel	Nickel plating
11	Bushing	Lead bronze cast	
12	Bumper	Urethane	
13	Bearing	—	
14	Return box	Aluminium die-cast	Coating
15	Return plate	Aluminium die-cast	Coating
16	Magnet	—	
17	Wear ring holder	Stainless steel	Stroke 101 mm or more
18	Wear ring	POM	Stroke 101 mm or more
19	Screw shaft pulley	Aluminium alloy	
20	Motor pulley	Aluminium alloy	
21	Belt	—	
22	Bearing stopper	Aluminium alloy	
23	Parallel pin	Stainless steel	
24	Seal	NBR	
25	Retaining ring	Steel for spring	Phosphate coated

No.	Description	Material	Note
26	Motor	—	
27	Motor cover	Synthetic resin	Only "With motor cover"
28	Grommet	Synthetic resin	Only "With motor cover"
29	Motor block	Aluminium alloy	Anodised
30	Motor adapter	Aluminium alloy	Anodised/LEY16, 25 only
31	Hub	Aluminium alloy	
32	Spider	NBR	
33	Socket (Male thread)	Free cutting carbon steel	Nickel plating
34	Nut	Alloy steel	
35	Motor cover with lock	Aluminium alloy	Only "With lock/motor cover"
36	Cover support	Aluminium alloy	Only "With lock/motor cover"

### Replacement Parts (Top/Parallel only)/Belt

No.	Size	Order no.
21	16	LE-D-2-1
	25	LE-D-2-2
	32, 40	LE-D-2-3

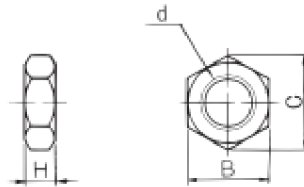
### Replacement Parts/Grease Pack

Applied portion	Order no.
Piston rod	GR-S-010 (10 g) GR-S-020 (20 g)

\* Apply grease on the piston rod periodically.  
Grease should be applied at 1 million cycles or 200 km, whichever comes first.

## Příloha 3. Katalog matice na pístnici

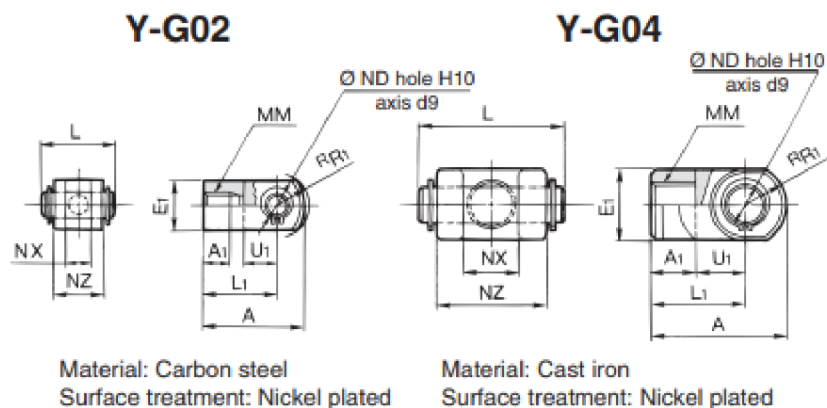
### Rod End Nut



Material: Carbon steel (Nickel plated)  
[mm]

Part no.	Applicable size	d	H	B	C
NT-02	16	M8 x 1.25	5	13	15.0
NT-04	25, 32, 40	M14 x 1.5	8	22	25.4
NT-05	63	M18 x 1.5	11	27	31.2

## Double Knuckle Joint



\* Knuckle pin and retaining ring are included. [mm]

Part no.	Applicable size	A	A <sub>1</sub>	E <sub>1</sub>	L <sub>1</sub>	MM	R <sub>1</sub>
<b>Y-G02</b>	<b>16</b>	34	8.5	□16	25	M8 x 1.25	10.3
<b>Y-G04</b>	<b>25, 32, 40</b>	42	16	∅ 22	30	M14 x 1.5	12
<b>Y-G05</b>	<b>63</b>	56	20	∅ 28	40	M18 x 1.5	16

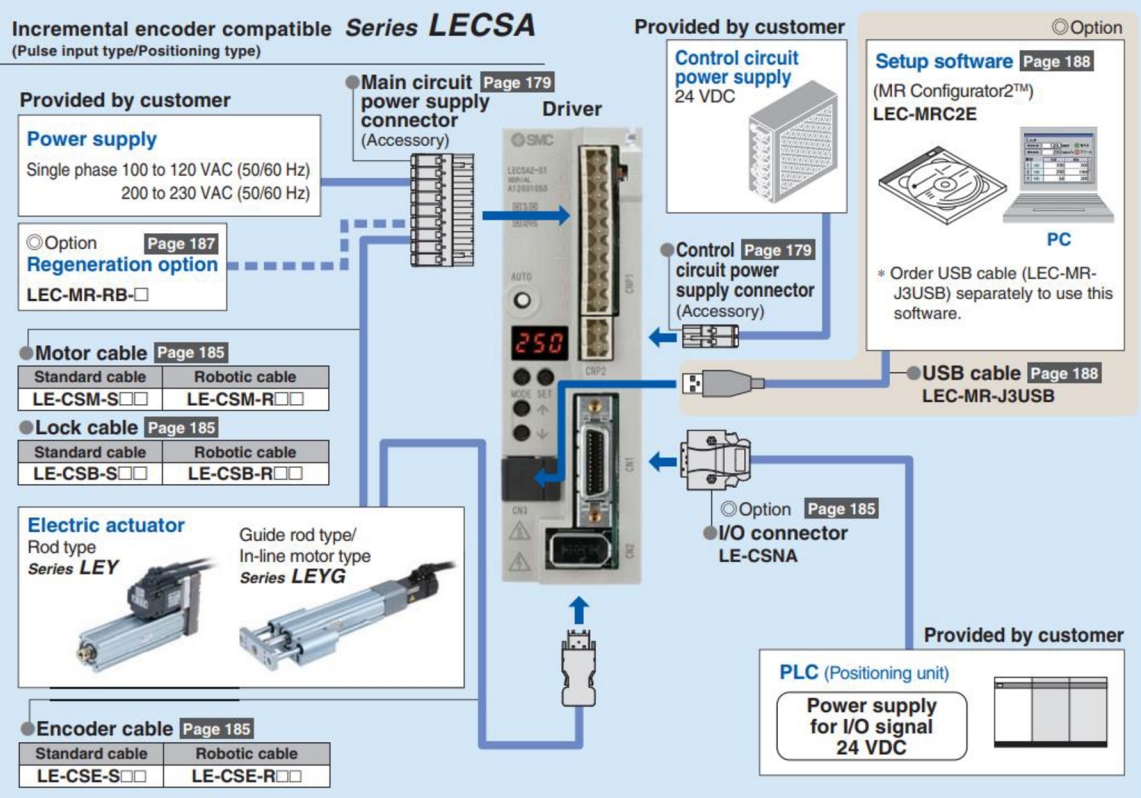
Part no.	Applicable size	U <sub>1</sub>	ND <sub>H10</sub>	NX	NZ	L	Applicable pin part no.
<b>Y-G02</b>	<b>16</b>	11.5	8 <sup>+0.058</sup> <sub>0</sub>	8 <sup>+0.4</sup> <sub>+0.2</sub>	16	21	<b>IY-G02</b>
<b>Y-G04</b>	<b>25, 32, 40</b>	14	10 <sup>+0.058</sup> <sub>0</sub>	18 <sup>+0.5</sup> <sub>+0.3</sub>	36	41.6	<b>IY-G04</b>
<b>Y-G05</b>	<b>63</b>	20	14 <sup>+0.058</sup> <sub>0</sub>	22 <sup>+0.5</sup> <sub>+0.3</sub>	44	50.6	<b>IY-G05</b>

Příloha 5. Katalog driverů pro oba lineární pohony  
 – LESCA1 (100 V až 120 V)

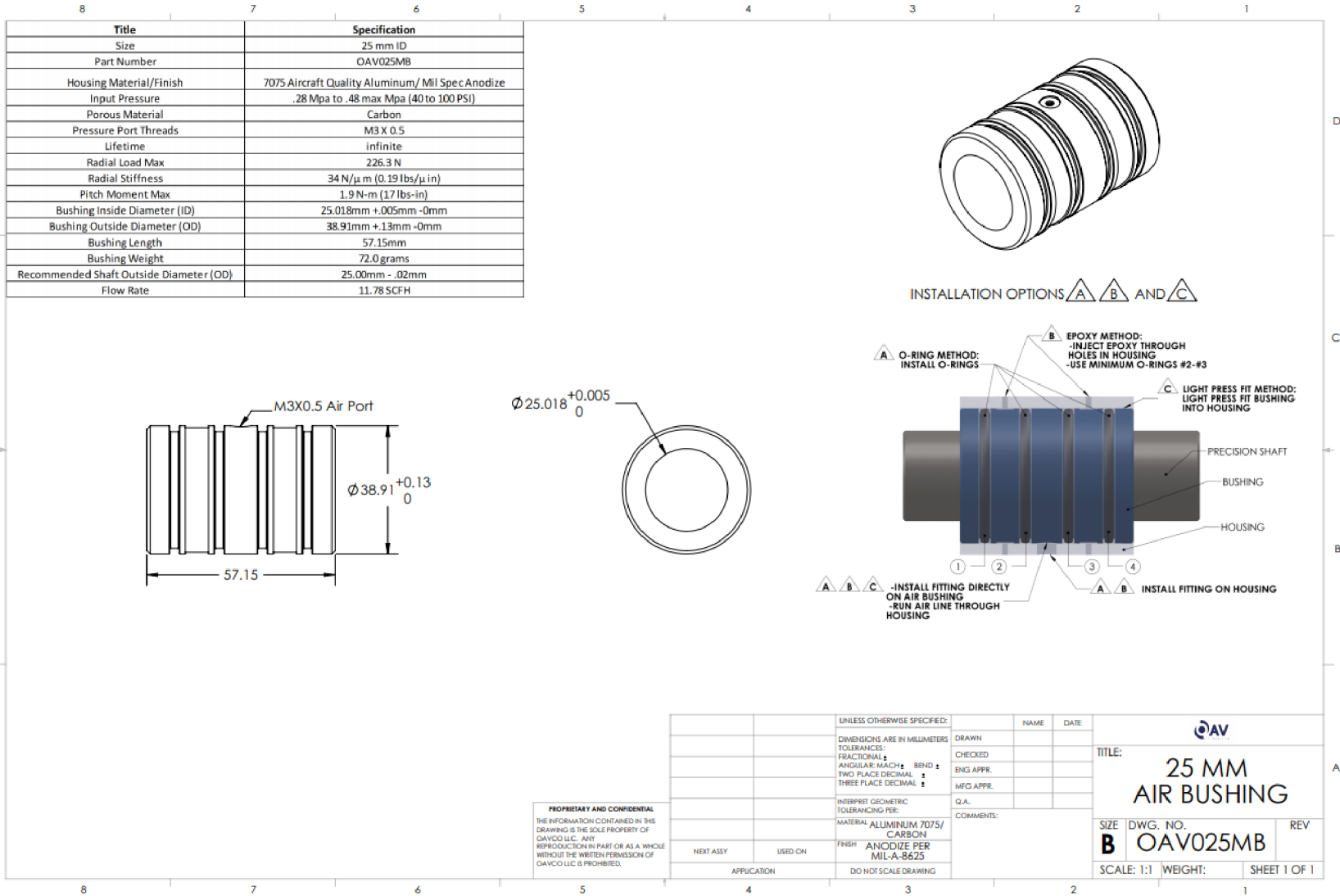
Driver **LEC**



Type	Series	Compatible motor	Power supply voltage	Parallel I/O		Number of positioning pattern points	Reference page
				Input	Output		
Pulse input type (For incremental encoder)	LECSA	AC servo motor (100/200/400 W)	100 to 120 VAC (50/60 Hz) 200 to 230 VAC (50/60 Hz)	6 inputs (Photo-coupler isolation)	4 outputs (Photo-coupler isolation)	7	Page 173
Pulse input type (For absolute encoder)	LECSB			10 inputs (Photo-coupler isolation)	6 outputs (Photo-coupler isolation)	—	
CC-Link direct input type (For absolute encoder)	LECSC			4 inputs (Photo-coupler isolation)	3 outputs (Photo-coupler isolation)	255	
SSCNET III type (For absolute encoder)	LECSS			4 inputs (Photo-coupler isolation)	3 outputs (Photo-coupler isolation)	—	







## Příloha 7. Hliníkové profily a příslušenství

### Krytka 5 20x10

OBJ. Č.: ABD5.2010

PA/černý m = 0.6g/kus

### Krytka 5 20x20

OBJ. Č.: ABD5.2020

PA/černý m = 1.2g/kus

### Krytka 5 40x10

OBJ. Č.: ABD5.4010

PA/černý m = 1g/kus

### Krytka 5 40x20

OBJ. Č.: ABD5.4020

PA/černý m = 2.2g/kus

### Krytka 5 40x40

OBJ. Č.: ABD5.4040

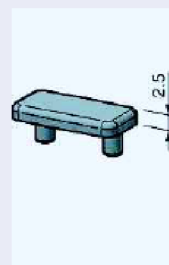
PA/černý m = 5g/kus

### Krytka 5 80x20

OBJ. Č.: ABD5.8020

PA/černý m = 4.4g/kus

Krytka pro zakrytí konců profilů, zabraňuje vniknutí nečistoty a je dekorativním zakončením profilů. Upevnění pomocí naklepení na konec profilu, bez potřeby srážet jeho hrany.



### Profil 5 20x20

OBJ. Č.: PRO5.2020

L=6000+10/-5 mm

m=0.48 kg/m

A=1.80 cm<sup>2</sup>

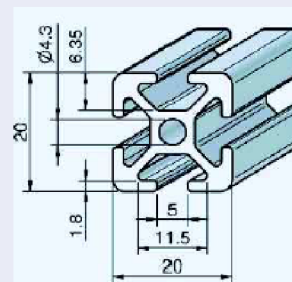
Wx=0.74 cm<sup>3</sup>

Wy=0.74 cm<sup>3</sup>

Ix=0.74 cm<sup>4</sup>

Iy=0.74 cm<sup>4</sup>

Profil pro všeobecné, kompaktní a cenově výhodné konstrukce. Možno kombinovat s řadou 8. Vhodné systémové konstrukční prvky viz příslušenství řady 5.



### Drážková matice 5 M3 St s můstkem

OBJ. Č.: NUT5.M3STS

ocel/pozinkováno m = 2g/kus

Univerzální posuvná matice. Matici lze zasunout na libovolném místě do drážky. Samofixační pomocí pružící kuličky. Můstek umožňuje vystředění matice v drážce.

### Drážková matice 5 M4 St s můstkem

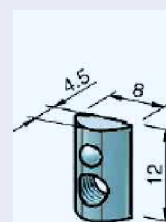
OBJ. Č.: NUT5.M4STS

ocel/pozinkováno m = 2g/kus

### Drážková matice 5 M5 St s můstkem

OBJ. Č.: NUT5.M5STS

ocel/pozinkováno m = 2g/kus

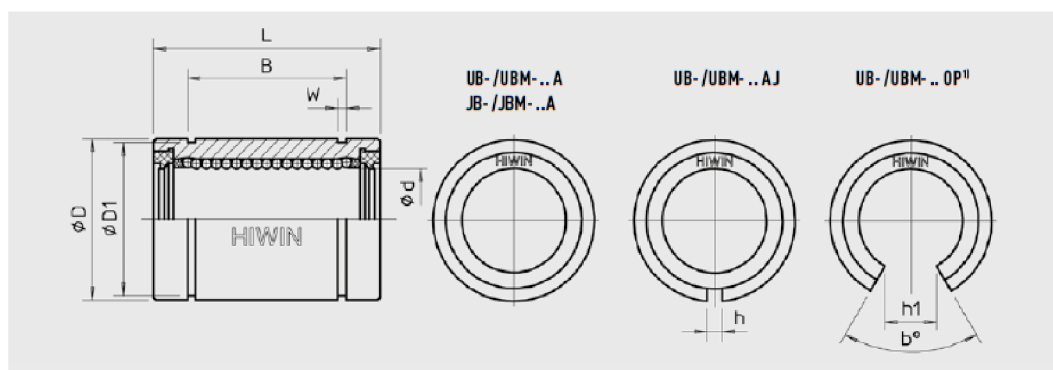


## Kuličková pouzdra a vodící tyče

### Kuličková pouzdra

#### 1.7 Rozměry a únosnosti kuličkových pouzder

##### 1.7.1 Typ JB & UB - Válcové kuličkové pouzdro



Průměr d mm	Model						Rozměry										Únosnost			
	Základní typ	Počet drah	Rozříznutý typ	Počet drah	Otvřený typ	Počet drah	d		D		L		B		W mm	D1 mm	h (rozříznutý typ) mm	h1 (otevřený typ) mm	Dynamická únosnost C(N)	Statická únosnost C <sub>0</sub> (N)
							mm	tolerance μm	mm	tolerance μm	mm	tolerance μm	mm	tolerance μm						
6	JB-06AWW	4	-	-	-	-	6	0 -6	12	0 -11	19	0 -200	13,5	0 -200	1,10	11,5	-	-	206	265
8	UB-08AWW	4	UB-08AJWW	4	-	-	8	+8 0	16	0 -8	25	0 -200	16,5	0 -200	1,10	15,2	1,0	-	280	420
10	JB-10AWW	6	-	-	-	-	10	0 -6	19	0 -13	29	0 -200	22,0	0 -200	1,3	18,0	-	-	451	970
12	UBM-12AWW	6	UBM-12AJWW	6	UBM-12OPWW	4	12	+8 -0	22	0 -9	32	0 -200	22,9	0 -200	1,30	21,0	1,5	10,0	660	1 310
16	UBM-16AWW	6	UBM-16AJWW	6	UBM-16OPWW	4	16	+9 -1	26	0 -9	36	0 -200	24,9	0 -200	1,30	24,9	1,5	13,5	800	1 480
20	UBM-20AWW	6	UBM-20AJWW	6	UBM-20OPWW	4	20	+9 -1	32	0 -11	45	0 -200	31,5	0 -200	1,60	30,3	2,0	16,8	1 050	2 280
25	UBM-25AWW	8	UBM-25AJWW	8	UBM-25OPWW	6	25	+11 -1	40	0 -11	58	0 -300	44,1	0 -300	1,85	37,5	2,0	16,9	1 370	3 470
30	UBM-30AWW	8	UBM-30AJWW	8	UBM-30OPWW	6	30	+11 -1	47	0 -11	68	0 -300	52,1	0 -300	1,85	44,5	2,0	21,2	2 100	5 920
40	UBM-40AWW	8	UBM-40AJWW	8	UBM-40OPWW	6	40	+13 -2	62	0 -13	80	0 -300	60,6	0 -300	2,15	59,0	3,0	27,8	3 820	9 250
50	UB-50AWW	6	UB-50AJWW	6	UB-50OPWW	5	50	+13 -2	75	0 -13	100	0 -300	77,6	0 -300	2,65	72,0	3,0	21,0	3 950	8 200

1) dodací termín pouzder OP na dotaz u obchodních zástupců firmy HIWIN s.r.o.

Kuličková pouzdra jsou dodávána v těchto provedeních s těsněním:

**Oboustranně utěsněná:** ozn. WW (např.: UBM-20AWW) - jsou standardně dodávána ze skladu v Brně nebo v Němecu. Krátké dodací lhůty.

**Jednostranně utěsněná:** ozn. W (např.: UBM-20AW) - jsou dodávána pouze pro větší množství a s delší dodací lhůtou.

**Bez těsnění:** bez označení (např.: UBM-20A) - jsou dodávána pouze pro větší množství a s delší dodací lhůtou.

## Drives & Servo Motors

### AC servo motors

#### 5. AC servo motors

HIWIN FR highly dynamic AC synchronous servo motors deliver high torques across the entire speed range. Because they have minimal mass inertia moment, they are also suitable for demanding dynamic drive tasks such as high-frequency reversing. The special stator/rotor structure of the FR series achieves very low torque ripple and high power density in a compact form.



#### 5.1 Characteristics

Table 5.1 General characteristics						
Size	50W	100W	200W	400W	750W	1,000W
Motor type	Permanently excited synchronous servo motor					
Magnets	Neodymium iron boron magnets					
Housing	Aluminium					
Colour	Black					
Motor protection class	IP65					
Connector protection class	IP20					IP65
Motor shaft protection class	IP40 (optional IP65)					
Insulation class	Class A					
Shaft end	Without feather key groove, with centric threaded hole					
Peak torque	3 × nominal torque					
Service life	> 20,000 h (at nominal load)					
Motor connection	Cable (300 mm) with ready-assembled connector					Connector
Encoder connection	Cable (300 mm) with ready-assembled connector					Connector
Cooling	Convective					
Thermal monitoring	Not available					
Encoder	17-bit absolute (single or multi turn)					

Table 5.2 Ambient conditions						
Size	50W	100W	200W	400W	750W	1,000W
Ambient temperature	0 °C to 40 °C					
Storage temperature	-15 °C to 70 °C					
Air humidity	Up to 80 % relative air humidity					
Max. Max. installation height	1,000 m above sea level					

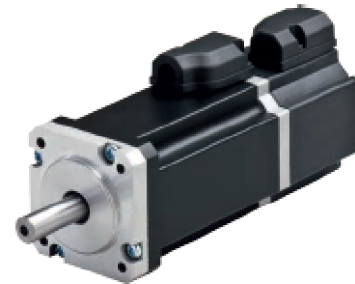
### 5.3.2 AC servo motor FRLS 100 W

Table 5.4 Technical data FRLS 100W

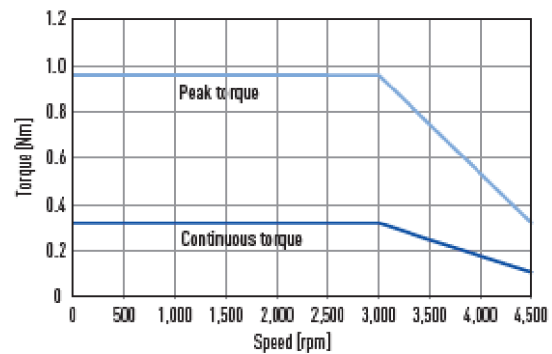
Motor data	Symbol	Unit	FRLS102__A4_
Nominal voltage	V	VAC	220
Nominal power	W	W	100
Nominal torque	$T_C$	Nm	0.32
Nominal current	$I_C$	A <sub>eff</sub>	0.9
Peak torque for 1 sec.	$T_P$	Nm	0.96
Peak current for 1 sec.	$I_P$	A <sub>eff</sub>	2.7
Nominal speed	$n_N$	rpm	3,000
Maximum speed for 1 sec.	$n_{max}$	rpm	4,500
Torque constant	$K_T$	Nm/A <sub>eff</sub>	0.356
Voltage constant	$K_e$	V <sub>eff</sub> /(1,000 rpm)	21.98
Winding resistance <sup>1)</sup>	R	Ω	8
Winding inductance <sup>1)</sup>	L	mH	8.45
Mass inertia of rotor	J	kgm <sup>2</sup> × 10 <sup>-4</sup>	0.036
Mass inertia of rotor with brake	J	kgm <sup>2</sup> × 10 <sup>-4</sup>	0.038
Motor weight	M	kg	0.63
Motor weight with brake	M	kg	0.76
Motor insulation class			A
<b>Motor brake (optional) <sup>2)</sup></b>			
Braking torque (static)	$T_b$	Nm	0.3
Power supply	V	VDC	24 ± 10 %
Power consumption	A	A	0.3
Rated input	W	W	6.0
Response time open	$t_o$	ms	30.0
Response time close	$t_c$	ms	20.0

<sup>1)</sup> Line to line

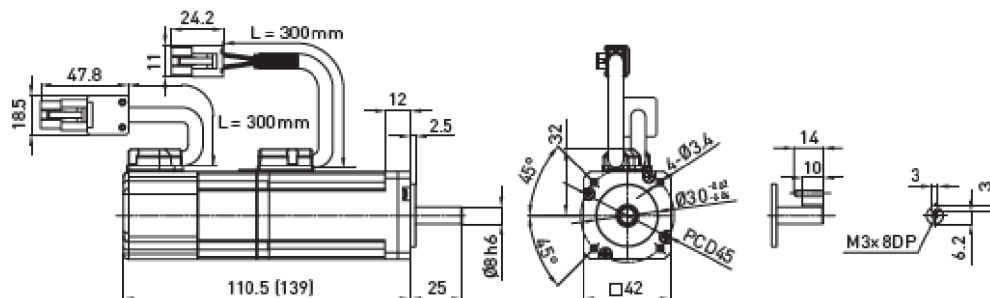
<sup>2)</sup> The motor brakes are holding brakes only, not operating brakes



Torque-speed curve FRLS 100 W:



#### Dimensions FRLS 100W:



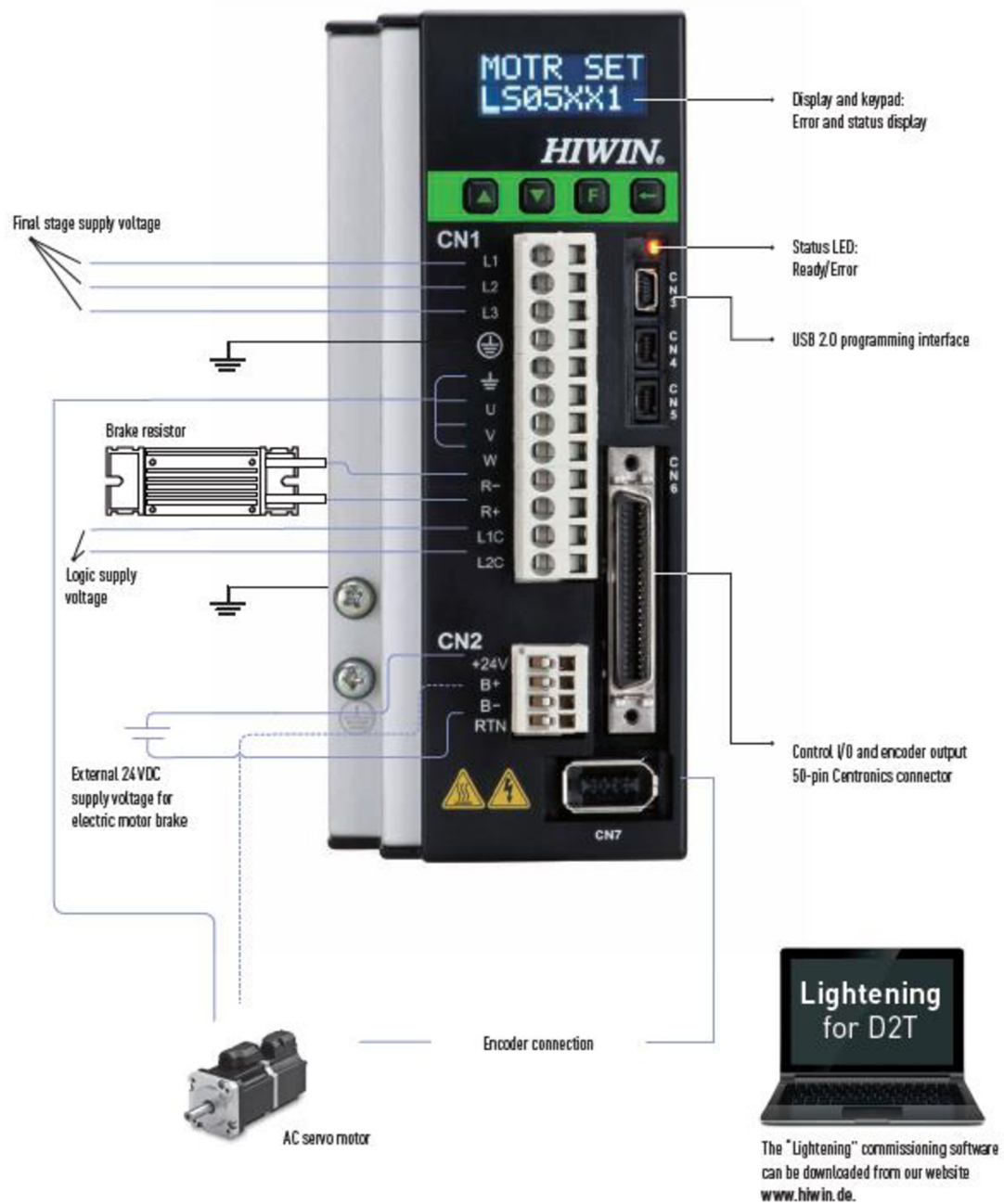
Values in brackets apply to model with motor brake

# Příloha 11. Frekvenční měnič – HIWIN D2T – 0123 a příslušenství

## 4. D2T servo drive

The vector-controlled, fully digital HIWIN D2T servo drives are specially designed to work with HIWIN servo motors. Different versions and performance classes are available for different types of application. For easy installation and commissioning there are ready-assembled motor and encoder cables and the free HIWIN commissioning software "Lightening".

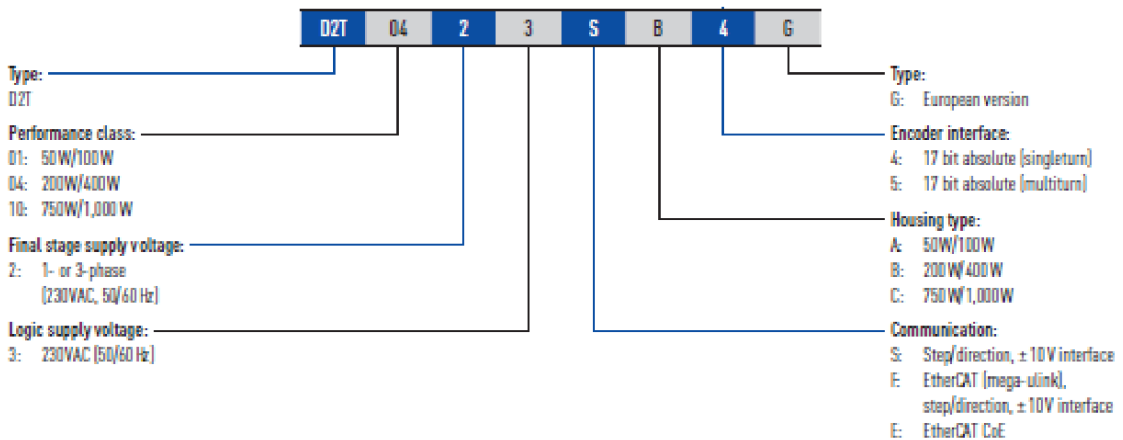
### 4.1 Interfaces D2T



# Drives & Servo Motors

## Servo drive D2T

### 4.2 Order code D2T



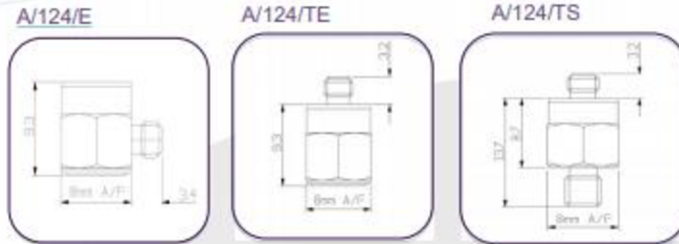
### 4.3 Technical data D2T

HIWIN D2T servo drive amplifier		D2T-0123	D2T-0423	D2T-1023		
Power supply	Final stage supply voltage and frequency		200 to 240 VAC (±10%)/50 to 60 Hz (±5%)			
	Number of phases		1 or 3			
	Power consumption of final stage		1.5A <sub>eff</sub>	4.1A <sub>eff</sub>	7.5A <sub>eff</sub>	
	Logic supply voltage and frequency		200 to 240 VAC (±10%)/50 to 60 Hz (±5%) 1-phase only			
	Power consumption of logic supply		0.5A max.			
Output current	Continuous current (effective)		0.9A	2.5A	5.1A	
	Peak current (effective)		2.7A	7.5A	15.3A	
	Maximum duration of peak current		1 second			
Type of control		IGBT PWM vector control				
Controller sampling rate		Current, speed and position controllers: 15 kHz: standard and mega-ulink 16 kHz: EtherCAT (CoE)				
Motor types supported		AC servo motors				
Status LED		Red: Error; Green: Ready				
Operating modes	Position control	Inputs/outputs		Low-speed pulse inputs [CN6 pins: 3, 4, 5, 6] High-speed pulse inputs [CN6 pins: 44, 45, 46, 47]		
		Function		Step/direction; CW/CCW; AB signals (4 × evaluation)		
		Maximum input frequency		Low-speed (optocoupler): 500 kHz High-speed (different.): 4 MHz		
		Electric gear		Ratio: pulses/counts pulses: 1 – 2,147,483,647 counts: 1 – 2,147,483,647		
	Speed/torque control	Analogue	Input resistance	10 kΩ		
			Input voltage	±10VDC		
			Resolution	12-bit		
		Digital	PWM	Via low-speed pulse inputs		
			Frequency	Min. 36.5 kHz; max. 100 kHz		
			Min. pulse duration	220 ns		
Encoder interface	Operating voltage		+5VDC ±5% at 400 mA			
	Input	Signal type	A, /A, B, /B, Z, /Z, differential signals			
		Bandwidth	After 4-fold evaluation 5 million inc/s			



**A/124/E, A/124TE, A/124/TS**  
**Miniature Piezo-Tronic IEPE Accelerometer**

1mV/g up to 200mV/g  $\pm 10\%$     2gm    Std temp 125°C (HT 185°C)

A three variant range of low mass (2gm.) accelerometers featuring:

- Konic shear sensing element
- Fully welded construction
- Miniature L8 M3.5mm thd, side or top entry coaxial connector
- Titanium case.

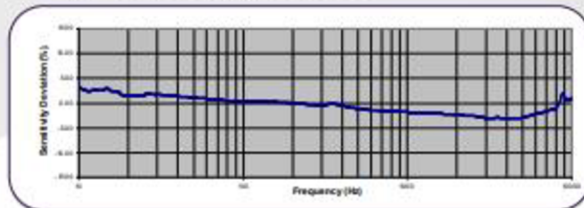
The A/124/E and A/124/TE, are adhesive mounted, whilst the top entry connector version (A/124/TS) is also available with integral mounting stud.

The A/124 range offers an inexpensive low mass option for a wide range of vibration measurement application including:

- Modal analysis
- PCB board mounted
- Aerospace Applications

Available as a high temperature 185°C IEPE Version

Typical Frequency Response



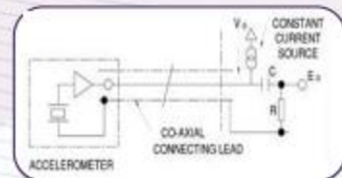
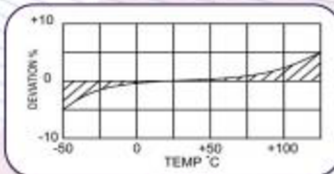
Note:

Voltage sensitivities shown are standard. We offer a wide range of sensitivities on request, and recommend that applications are evaluated to determine the requisite sensitivity.

Spectral Noise

1Hz	345 $\mu$ g/ $\sqrt$ Hz
10Hz	156 $\mu$ g/ $\sqrt$ Hz
100Hz	44 $\mu$ g/ $\sqrt$ Hz
1kHz	12.1 $\mu$ g/ $\sqrt$ Hz
10kHz	8.2 $\mu$ g/ $\sqrt$ Hz

Temperature Response



**DJB Instruments (UK) Ltd**

Finchley Avenue,  
 Mildenhall, Suffolk IP28 7BG

Tel +44 (0)1638 712 288  
 Email sales@djbinstruments.com  
 Web www.djbinstruments.com

A UK company with UK-based manufacturing, assembly and calibration in-house.

DJB Iss.1





	Metric			Imperial		
	0.1 mV/(m/s <sup>2</sup> )	1.02 mV/(m/s <sup>2</sup> )	10.2 mV/(m/s <sup>2</sup> )	1mV/g	10mV/g	100mV/g
Voltage Sensitivity mV/g ±10%						
Resonant frequency kHz	≈50			≈50		
Cross Axis error % max	5			5		
Temperature Range	-50/+185°C (HT)			-58/+365°F (HT)		
Voltage sensitivity deviation re 20°C/68°F	-5% @ 50°C +5% @ +125°C +/- 10% @ +185°C			-5% @ 58°F +5% @ +257°F +/- 10% @ +365°F		
Supply voltage V DC	15/35 standard			15/35 standard		
Supply voltage mA	2/15			2/15		
Bias voltage V DC	8/10			8/10		
Settling time to 90% final val. secs	<1			<1		
Max continuous accn. g sine	49,033m/s <sup>2</sup>			5000g		
Saturation limit g	49,033m/s <sup>2</sup>	4,903m/s <sup>2</sup>	490.3m/s <sup>2</sup>	5000g	500g	50g
Frequency Response	1Hz-10KHz ±5%			1Hz-10KHz ±5%		
L.F Frequency Cut Off (-3dB)	0.1	0.2		0.1	0.2	
Case material	Titanium Grade 2			Titanium Grade 2		
Mounting	Flat base, adhesive A/124/E, TE M4x5mm integral stud A/124TS			Flat base, adhesive A/124/E, TE M4x5mm integral stud A/124TS		
Weight	2gm			0.07oz		
Case seal	Welded			Welded		
Size	8(A/F) x 9mm			0.31(A/F) x 0.35in		
Connector	M3.5KP			M3.5KP		

# Příloha 13. Tenzometrické senzory tahu/tlaku BUSTER 8431-5500 a 8431-5100

 8431 EN -2

## Technical Data

### Model 8431

Order Code	Measurement Range	Dimensions [mm]							
		ø D	H	Thread T	C	A	F	G	B
8431-5005	0 ... 5 N	25.4	12.7	M 4 x 0.7	6.4	17.4	2.8	0.8	5.9
8431-5010	0 ... 10 N	19.0	12.7	M 4 x 0.7	6.4	17.4	1.3	0.4	5.9
8431-5020	0 ... 20 N	19.0	12.7	M 4 x 0.7	6.4	17.4	1.3	0.4	5.9
8431-5050	0 ... 50 N	19.0	12.7	M 4 x 0.7	6.4	17.4	1.3	0.4	5.9
8431-5100	0 ... 100 N	25.4	16.0	M 5 x 0.8	6.4	25.4	2.8	0.2	6.6
8431-5200	0 ... 200 N	25.4	16.0	M 5 x 0.8	6.4	25.4	2.8	0.2	6.6
8431-5500	0 ... 500 N	25.4	16.0	M 5 x 0.8	6.4	25.4	2.8	0.2	6.6
8431-6001	0 ... 1 kN	25.4	14.0	M 6 x 1.0	9.7	25.4	0.8	0.5	7.0
8431-6002	0 ... 2 kN	25.4	14.0	M 6 x 1.0	9.7	25.4	0.8	0.5	7.0
8431-6005	0 ... 5 kN	25.4	14.0	M 6 x 1.0	9.7	25.4	0.8	0.5	7.0
8431-6010	0 ... 10 kN	25.4	19.1	M 10 x 1.5	12.7	25.4	0.8	-	6.5
8431-6020	0 ... 20 kN	31.8	25.4	M 12 x 1.5	16.0	28.6	0.3	-	14.2
8431-6040	0 ... 40 kN	35.0	28.7	M 20 x 1.5	22.4	30.3	0.5	-	15.0
8431-6050	0 ... 50 kN	35.0	28.7	M 20 x 1.5	22.4	30.3	0.5	-	15.0
8431-6100	0 ... 100 kN	60.0	48.0	M 30 x 2.0	42.0	45.0	0.5	-	23.6

### Model 8432 with bidirectional overload protection

Order Code	Measurement Range	Dimensions [mm]							
		ø D	H	Thread T	C	A	F	G	B
8432-5002	0 ... 2.5 N	25.4	21.9	M 4 x 0.7	6.4	25.4	2.8	0.2	9.6
8432-5005	0 ... 5 N	25.4	21.9	M 4 x 0.7	6.4	25.4	2.8	0.2	9.6
8432-5010	0 ... 10 N	25.4	21.9	M 4 x 0.7	6.4	25.4	2.8	0.2	9.6
8432-5020	0 ... 20 N	25.4	21.9	M 4 x 0.7	6.4	25.4	2.8	0.2	9.6
8432-5050	0 ... 50 N	25.4	21.9	M 4 x 0.7	6.4	25.4	2.8	0.2	9.6
8432-5100	0 ... 100 N	25.4	21.9	M 5 x 0.8	6.4	25.4	2.8	0.2	9.6
8432-5200	0 ... 200 N	25.4	21.9	M 5 x 0.8	6.4	25.4	2.8	0.2	9.6
8432-5500	0 ... 500 N	25.4	21.9	M 5 x 0.8	6.4	25.4	2.8	0.2	9.6
8432-6001	0 ... 1 kN	31.8	23.9	M 6 x 1.0	8.0	29.4	2.4	0.4	10.8
8432-6002	0 ... 2 kN	38.1	26.7	M 6 x 1.0	9.6	31.8	0.7	0.4	14.9

### Electrical values

Bridge resistance: (full bridge):  
 measuring range  $\leq 0 \dots 5$  N semi conductor strain gauge 500  $\Omega$ , nominal  
 measuring range  $\geq 0 \dots 10$  N foil strain gauge 350  $\Omega$ , nominal  
 Reference excitation voltage:  
 measuring range  $\leq 0 \dots 50$  N 5 V DC or AC  
 measuring range  $\geq 0 \dots 100$  N 10 V DC or AC  
 Nominal sensitivity:  
 measuring range  $\leq 0 \dots 5$  N 15 mV/V ... 40 mV/V, nominal  
 measuring range  $0 \dots 10$  N 0.4 mV/V, nominal  
 measuring range  $0 \dots 20$  N 0.8 mV/V, nominal  
 measuring range  $\geq 0 \dots 50$  N 2 mV/V, nominal  
 Insulation resistance: 5000 M $\Omega$  at 50 V DC  
 Calibration resistor: 59 k $\Omega \pm 0.1$  %  
 The bridge output voltage caused by a shunt of this value is given in the calibration protocol.

### Environmental conditions

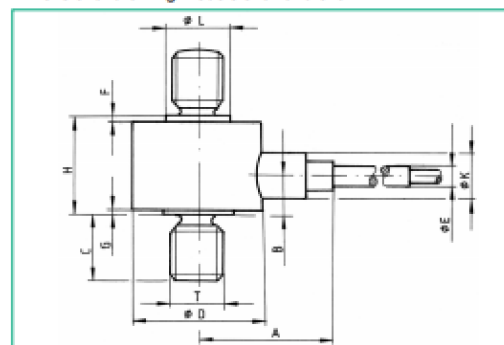
Range of operating temperature: -55  $^{\circ}\text{C}$  ... +120  $^{\circ}\text{C}$   
 Nominal temperature range: +15  $^{\circ}\text{C}$  ... +70  $^{\circ}\text{C}$   
 Influence of temperature on zero:  
 measuring range  $\leq 0 \dots 5$  N  $\leq \pm 0.05$  % F.S./K  
 measuring range  $\geq 0 \dots 10$  N  $\leq \pm 0.03$  % F.S./K  
 Influence of temperature on sensitivity:  
 measuring range  $\leq 0 \dots 5$  N  $\leq \pm 0.05$  % F.S./K  
 measuring range  $\geq 0 \dots 10$  N  $\leq \pm 0.03$  % F.S./K

### Mechanical Value

Relative non-linearity:  
 8431  $< \pm 0.15$  % F.S.  
 8432  $< \pm 0.2$  % F.S.  
 Relative hysteresis:  
 measuring range  $0 \dots 5$  N  $< 0.3$  % F.S.  
 measuring range  $\geq 0 \dots 10$  N  $< 0.2$  % F.S.  
 Kind of measurement: Tensile and compressive forces  
 calibration in tensile direction (preferential direction)  
 expect a changed characteristic, if using the sensor against the preferential direction.

Technical changes reserved. All data sheets at [www.burster.com](http://www.burster.com)

### Dimensional drawing models 8431 and 8432



The CAD drawing (3D/2D) for this sensor can be imported online directly into your CAD system.

Download via [www.burster.com](http://www.burster.com) or directly at [www.traceparts.com](http://www.traceparts.com). For further information about the burster traceparts cooperation refer to data sheet 80-CAD-EN.

### Maximum static force in operation:

model 8431 all measuring range bidirectional 150 % of nominal load  
 model 8432 all measuring range bidirectional 100 % of nominal load

### Maximum static load to overload stop:

model 8432 measuring range  $\leq 0 \dots 500$  N bidirectional 500 % of nominal load  
 measuring range  $0 \dots 1000$  N bidirectional 250 % of nominal load  
 measuring range  $0 \dots 2000$  N bidirectional 200 % of nominal load

Dimensions: refer to table and dimensional drawing

burster praezisionsmesstechnik gmbh & co kg Germany [www.burster.com](http://www.burster.com)  
 Tel.: 1-5 Gernsbach 76593 Phone +49-7224-6450 [info@burster.com](mailto:info@burster.com)

21836-008431 EN-5099-011 6/20