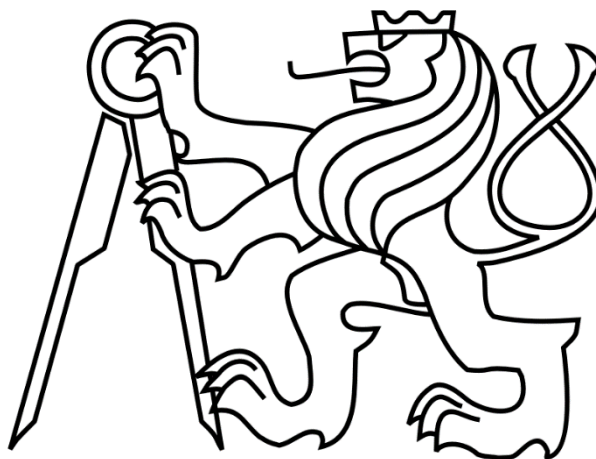


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

**Návrh modulární konstrukce kloubů nízkonákladového robota
s nosností 5 kg**

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Kahoun** Jméno: **Vít** Osobní číslo: **457522**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh modulární konstrukce kloubů nízkonákladového robota s nosností 5 kg

Název diplomové práce anglicky:

Design of a modular joint construction of a low-cost robot with a load capacity of 5 kg

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Pro výukové potřeby lze využívat low-cost řešení průmyslových robotů. Cílem práce je navrhnout modulární (unifikované) provedení rotačních kloubů pro řešení nízkonákladového robota s nosností 5 kg. Cíl práce: Úplný konstrukční návrh a výpočtové posouzení kloubů dvou velikostí pro 6DOF robota. Osnova práce: Rešerše současných řešení průmyslových a kolaborativních robotů s důrazem na konstrukci jejich rotačních os. Návrhové výpočty (dimenzování) pro řešení vlastní konstrukce kloubů ve 2 velikostech pro jednu zadanou velikost robota (rozsah pracovního prostoru). Porovnání torzní tuhosti a velikosti mrtvého chodu jednotlivých konstrukčních řešení kloubů. Zpracování konstrukčního návrhu vybrané varianty řešení kloubů. Zjednodušený výpočet poddajnosti robota (uvažuje pouze poddajnost kloubů) na koncové přírubě v nejhůrší kinematické poloze. Sestava celého robota s použitím navržených kloubů. Výrobní dokumentace konstrukce obou kloubů. Rozsah grafické části: Sestava robota. Sestavy obou kloubů. Výrobní výkresy. Rozsah textové části: 60-80 stran.

Seznam doporučené literatury:

Škařupa, J., Mostýn, V. Teorie průmyslových robotů. 2000, VIENALA
KOLÍBAL, Z. et al. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: VUTIUM, 2016. 788 p. ISBN: 978-80-214-4828-5
Dokumentace komponent a robotů dostupná na internetu.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Datum zadání diplomové práce: **29.04.2021** Termín odevzdání diplomové práce: **25.07.2021**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2021**

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 13.07.2021

.....

podpis

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé diplomové práce panu doc. Ing. Petru Kolářovi, Ph.D. za množství cenných a inspirativních rad, podnětů, doporučení, připomínek a za ochotu a vstřícnost při konzultacích. Dále bych také rád poděkoval konzultantům panu Ing. Tomášovi Havlanovi a panu Ing. Michalovi Rytířovi za dodané podklady pro moji diplomovou práci a přínosné rady při konzultacích.

A v neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině a přátelům za trpělivost a podporu po celou dobu studia.

Anotace

Autor:	Bc. Vít Kahoun
Název DP:	Návrh modulární konstrukce kloubů nízkonákladového robota s nosností 5 kg.
Rozsah práce:	87 str., 61 obr., 27 tab.
Školní rok vyhotovení:	2021
Škola:	České vysoké učení technické v Praze Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 - Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí práce:	doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D., Ing. Tomáš Havlan, Ing. Michal Rytíř, U12135
Zadavatel:	ČVUT – FS
Využití:	Interní výroba v rámci Testbedu CIIRC
Klíčová slova:	průmyslový robot, kolaborativní robot, modulární, low-cost
Anotace:	Diplomová práce se zabývá návrhem mechanické stavby low-cost modulárních rotačních kloubů ve dvou velikostech. Tyto klouby se následně využijí při stavbě šestiosého low-cost robota (tedy větší kloub na první, druhé a třetí ose a menší kloub na čtvrté, páté a šesté ose) s maximálním zatížením 5 kg na koncové přírubě, který je určený pro výukové a vzdělávací účely.

Annotation

Author:	Bc. Vít Kahoun
Title:	Design of a modular joint construction of low-cost robot with a load capacity of 5 kg.
Extent:	87 p., 61 fig., 27 tab.
Academic year:	2021
Univerzity:	Czech technical university in Prague Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135 – Department of production machines and equipment
Supervisor:	doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
Consultant:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D., Ing. Tomáš Havlan, Ing. Michal Rytíř, U12135
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Internal production within Testbed CIIRC
Key words:	industrial robot, collaborative robot, modular, low-cost
Annotation:	The diploma thesis deals with the design of a mechanical structure of low-cost modular rotary joints in two sizes. These joints are then used in the construction of a six-axis low-cost robot (ie a larger joint on the first, second and third axis and a smaller joint on the fourth, fifth and sixth axis) with a maximum load of 5 kg on the end flange, which is designed for teaching and training.



Obsah

Přehled použitých veličin a jednotek	8
1 Úvod	9
2 Cíl práce.....	10
3 Konstrukční řešení průmyslových a kolaborativních robotů.....	11
3.1 Úvod do konstrukčního konceptu kloubu robota	11
3.2 Současná konstrukční řešení průmyslových a kolaborativních robotů	13
3.3 Mechanická struktura modulárních rotačních kloubů.....	20
3.4 Hlavní komponenty modulárních rotačních kloubů.....	25
4 Návrhové výpočty modulárních rotačních kloubů	38
4.1 Návrhové výpočty kroutících momentů.....	38
5 Varianty konstrukčního řešení.....	44
5.1 Návrh 1. varianty.....	45
5.2 Návrh 2. varianty.....	47
5.3 Návrh 3. varianty.....	48
5.4 Návrh 4. varianty.....	50
5.5 Návrh 5. varianty.....	52
5.6 Návrh 6. varianty.....	54
5.7 Shrnutí všech variant řešení	55
6 Vlastní řešení	57
6.1 Konstrukce modulárních rotačních kloubů robota	57
6.2 Sestava šestiosého robota s použitím navržených kloubů.....	70
6.3 Technické parametry robota.....	74
7 Závěr.....	79
Seznam obrázků	81
Seznam tabulek	83
Seznam literatury	84
Seznam příloh	87



Přehled použitých veličin a jednotek

d	[mm]	kolmá vzdálenost od osy těžiště
g	[m/s ²]	tíhové zrychlení
i	[-]	převodový poměr
I_o	[kgm ²]	moment setrvačnosti
m	[kg]	hmotnost
M_b	[Nm]	brzdny moment
M_k	[Nm]	kroucí moment
x_T	[mm]	vzdálenost těžiště od osy
α	[rad/s ²]	úhlové zrychlení

1 Úvod

V současné době se čím dál více využívá průmyslových a kolaborativních robotů ve všech odvětvích průmyslu za účelem zvýšení produktivity práce, konkurenceschopnosti, efektivity práce a snížení nákladů. Současně s tímto nárůstem robotizace a automatizace budou ve všech profesích vyžadovat nové pracovníky s novými znalostmi a dovednostmi, kteří budou schopni robotická zařízení jak řídit, tak i programovat. Proto je snaha klást důraz na zavedení a zpřístupnění výuky v tomto směru, již třeba i na úrovni základního a středního školství, aby absolventi byly vybaveni znalostmi a dovednostmi, které jim umožní snazší uplatnění na trhu práce. Ovšem využívat klasické průmyslové roboty k výukovým a vzdělávacím účelům je nepraktické a ve většině případů nemožné. Za tímto účelem se začal ve světě rozvíjet trend výroby levných, konstrukčně jednoduchých a snadno dostupných robotů. Tyto roboty se vyznačují modularitou své konstrukce. Často jde o totožné rotační klouby použité na více osách s alternativně vloženými rameny. Jedním z prvních, kdo přišel s takovouto myšlenkou byl Dán Esben Østergaard, spoluzakladatel společnosti Universal Robots. V roce 2008 představil světu kolaborativního robota UR5 (obr.1).



Obr. 1 – Kolaborativní robot UR5 [32]

Tento typ robota je vhodný jak pro jednoduché manipulační operace, tak i pro výukové účely díky své jednoduchosti konstrukce a snadnému řízení. Na základě toho vznikla myšlenka, kterou se tato diplomová práce zabývá, vytvoření robota, s modulárně řešenými rotačními klouby, který bude cenově dostupnější než tyto komerční roboty.



2 Cíl práce

Pro výukové potřeby lze využívat low-cost řešení průmyslových robotů, např. na bázi open-source dokumentace. Tyto roboty mají obvykle dedikovanou konstrukci kloubů. Cílem práce je navrhnout modulární (unifikované) provedení rotačních kloubů pro řešení nízkonákladového robota s nosností 5 kg. Vznikne úplný konstrukční návrh a výpočtové posouzení tuhosti kloubu. Řešení bude určeno pro interní výrobu v rámci Testbedu CIIRC.

Hlavní body řešení:

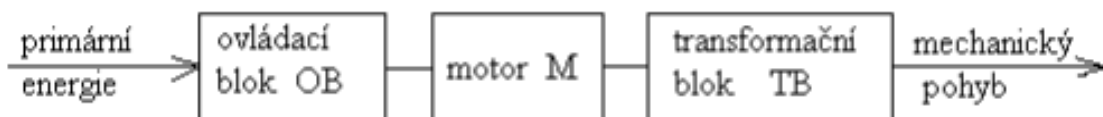
1. Rešerše současných řešení průmyslových a kolaborativních robotů s důrazem na konstrukci jejich rotačních os.
2. Návrhové výpočty (dimenzování) pro řešení vlastní konstrukce kloubů ve dvou velikostech pro jednu zadanou velikost robota (rozsah pracovního prostoru). Porovnání torzní tuhosti a velikosti mrtvého chodu jednotlivých konstrukčních řešení kloubů.
3. Zpracování konstrukčního návrhu vybrané varianty řešení kloubů.
4. Zjednodušený výpočet poddajnosti robota (uvažuje se pouze poddajnost kloubů robota) na koncové přírubě v nejhorší kinematické poloze.
5. Sestava celého robota s použitím navržených kloubů.
6. Výrobní dokumentace konstrukce obou kloubů.

3 Konstrukční řešení průmyslových a kolaborativních robotů

Kapitola začíná obecným úvodem zaměřeným na pohon průmyslových robotů a modulárního provedení rotačního kloubu. Dále se věnuje přehledu současného konstrukčního řešení kolaborativních a průmyslových robotů. Na tuto část navazuje rozbor mechanické struktury modulárních rotačních kloubů, která je popsána na několika příkladech nynějších řešení. V závěru kapitoly je věnována pozornost hlavním komponentám pohonu využívaným při konstrukci modulárních rotačních kloubů.

3.1 Úvod do konstrukčního konceptu kloubu robota

Funkcí pohonu robota je přeměna vstupní – primární energie na mechanický pohyb. Pohon je tvořen motorem, který realizuje tuto přeměnu blokem pro ovládání energie do motoru a spojovacím blokem, který zprostředkovává vazbu mezi výstupem motoru a pohyblivou částí pohybové jednotky. Pohyb z výstupu motoru se na výstup pohybové jednotky přenáší buď přímo, nebo přes transformační blok. Blokové schéma pohonu viz obr. 2 [1].



Obr. 2 – Blokové schéma pohonu [2]

Pro přenos pohybu (rotační, translační) z motoru na výstupní mechanický pohyb se v transformačním bloku konstrukčních řešení průmyslových robotů využívají mechanické, magnetické a elektrické převody. Nejrozšířenějším typem převodu je převod mechanický, který se realizuje především pomocí ozubených kol, hřebenů, vaček, šablon, pák, řetězů apod. Z ozubených převodů se využívají převážně harmonické převodovky, planetové převodovky a cykloidní převodovky [1].



Na pohony průmyslových robotů jsou kladeny především tyto požadavky [2]:

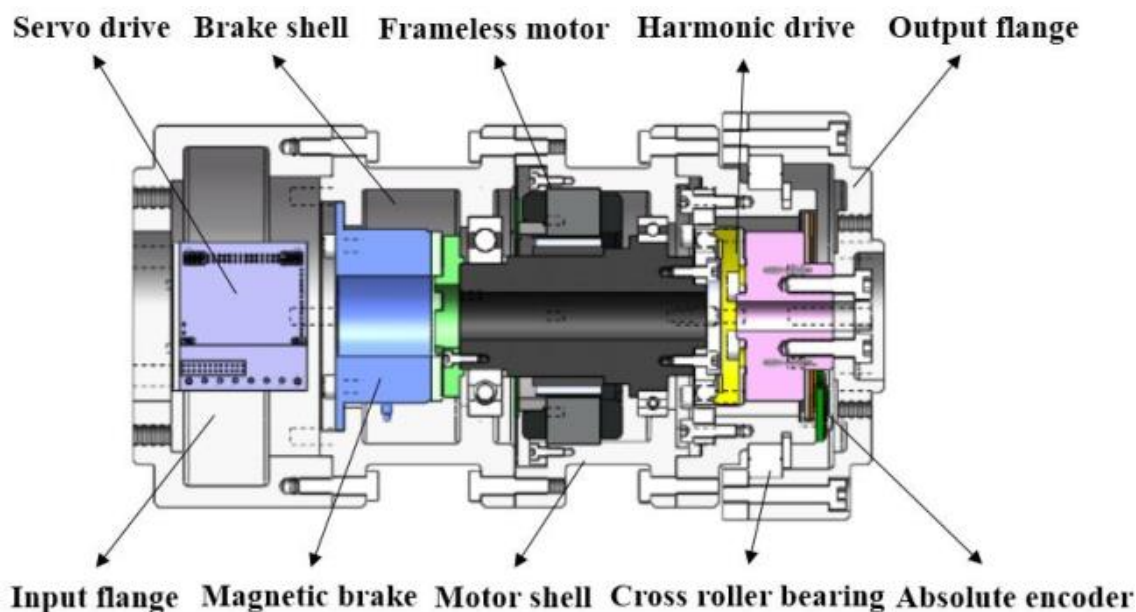
- a) Plynulý rozběh a brzdění
- b) Vysoká přesnost polohování
- c) Dostatečná polohová tuhost
- d) Minimální hmotnost
- e) Minimální rozměry
- f) Vhodné prostorové uspořádání

Všechny tyto výše uvedené požadavky mají za cíl dosáhnout u robotů klidný, plynulý a bezrázový průběh pohybu manipulační a pracovní technologické činnosti společně se zajištěním vysoké přesnosti polohování a opakovatelnosti. Vzhledem k relativně velkým setrvačným hmotám a rychlosti pohybu je důležité věnovat pozornost minimalizaci hmotnosti a rozměrů pohonů [1].

V rámci konstrukce průmyslového robota může být pohon jednotlivých pohybových os uspořádán [1]:

- a) Odděleně – každá pohybová osa je opatřena pohonem se samostatným motorem. Toto uspořádání je typické pro konstrukce průmyslových robotů.
- b) Společně – jednotlivé pohybové osy mají pohon odvozen od společného motoru, což má za následek příznivější rozložení hmot. Společné řešení pohonu se používá především u manipulátorů.

Jeden z možných současných standartních konstrukčních konceptů modulárního provedení rotačního kloubu robota lze vidět na obrázku (obr. 3). Tento modul se skládá z prstencového motoru, harmonické převodovky, elektromagnetické brzdy, přímého absolutního odměřování a řízení pohonu. Každá tato část má vlastní uložení s přírubami na obou stranách, kterými jsou jednotlivé části smontovány do jednoho modulu. Motor je nalisován na dutém hřídeli uloženém na dvou kuličkových ložiscích. Na výstupní část hřídele z motoru (před motorem) navazuje harmonická převodovka, na níž je umístěno odměřování a také výstupní příruba. Elektromagnetická brzda pro zajištění polohy se nachází na vstupní části hřídele do motoru (za motorem). Za brzdou se pak nalézá řídicí část pohonu.



Obr. 3 – Konstrukční provedení modulárního rotačního kloubu robota [30]

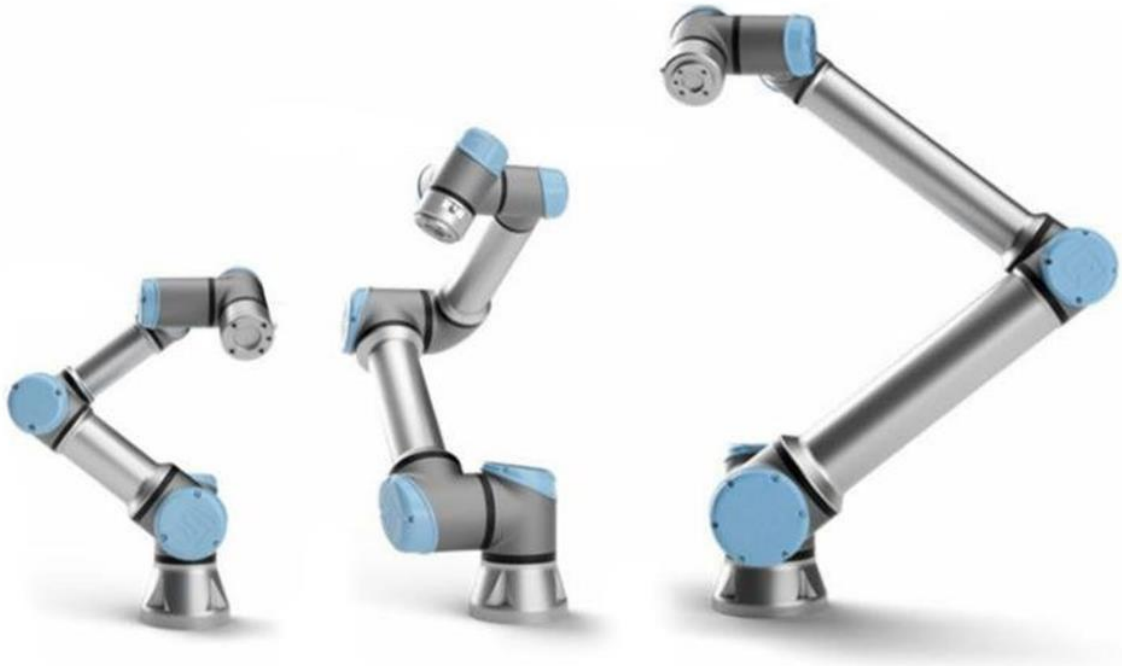
3.2 Současná konstrukční řešení průmyslových a kolaborativních robotů

V nynější době se na trhu objevuje nespočetné množství průmyslových a kolaborativních robotů. Ovšem jejich konstrukční struktura je u většiny téměř shodná, roboty se liší pouze svými technickými parametry a designem.

V celkové nabídce robotů převládá taková varianta konstrukce, že klouby jsou provedené jako otočné jednotky jednostranně uložené s alternativně vloženými rameny (např. Universal Robots, AUBO), nebo varianta, která má tyto otočné jednotky oboustranně uložené (např. FANUC), což zvyšuje tuhost a zlepšuje dosažitelnou opakovatelnost robota. Dále je možné na konstrukce pohlížet jako na konstrukce se sjednocenou konstrukcí kloubů (např. Universal Robots, AUBO), které se vyznačují vysokou modularitou, nebo konstrukce s originální konstrukcí v každém kloubu (např. FANUC, STÄUBLI). Někteří ze zástupců robotů se svými parametry jsou uvedeny v následujícím textu. Vzhledem k tomu, že výrobci robotů zveřejňují různé technické parametry, tak se tabulky s parametry jednotlivých robotů liší.

3.2.1 Universal Robots

Řada kolaborativních robotů e-Series má tři členy viz obr. 4 – UR3e, UR5e a UR10e. Konstrukční princip je u všech třech robotů stejný, tedy modulárně řešené rotační klouby. Liší se rozdílnými výkony použitých kloubů a délkou vložených ramen. Od toho se odvíjí jejich rozdílné maximální možné zatížení na koncové přírubě a velikost pracovního prostoru. Technické parametry jsou uvedeny v tab. 1.



Obr. 4 – Universal Robots (zleva UR3e, UR5e a UR10e) [3]

Tab. 1 – Technické parametry kolaborativních robotů Universal Robots

Parametr [jednotka]	UR3e	UR5e	UR10e
zatížení [kg]	3	5	10
dosah [mm]	500	850	1 300
stupně volnosti [-]	6	6	6
opakovatelnost [mm]	±0,03	±0,03	±0,03
max. rychlost 1. osy [°/s]	±180	±180	±120
max. rychlost 2. osy [°/s]	±180	±180	±120
max. rychlost 3. osy [°/s]	±180	±180	±180
max. rychlost 4. osy [°/s]	±360	±180	±180
max. rychlost 5. osy [°/s]	±360	±180	±180
max. rychlost 6. osy [°/s]	±360	±180	±180
max. rychlost TCP [m/s]	1	1	1

3.2.2 AUBO

Tyto kolaborativní roboty (obr. 5) jsou konstrukčně řešené, až na detaily a design, stejně jako předchozí od společnosti Universal Robots. Ovšem při pohledu na technické parametry (tab. 2) lze vidět u robotů s nosností 5 kg a 10 kg nárůst dosažitelné hodnoty opakovatelnosti, což značí použití méně preciznějších komponent v pohonu.



Obr. 5 – AUBO roboty (zleva AUBO-i3, AUBO-i5 a AUBO-i10) [4]

Tab. 2 – Technické parametry kolaborativních robotů AUBO

Parametr [jednotka]	AUBO-i3	AUBO-i5	AUBO-i10
zatížení [kg]	3	5	10
dosah [mm]	625	924	1 350
stupně volnosti [-]	6	6	6
opakovatelnost [mm]	±0,03	±0,05	±0,05
max. rychlost 1. osy [°/s]	±180	±150	±180
max. rychlost 2. osy [°/s]	±180	±150	±180
max. rychlost 3. osy [°/s]	±180	±150	±180
max. rychlost 4. osy [°/s]	±180	±180	±180
max. rychlost 5. osy [°/s]	±180	±180	±180
max. rychlost 6. osy [°/s]	±180	±180	±180

3.2.3 Hanwha HCR

Opět se jedná o principiálně stejný typ konstrukce jako u dvou předešlých výrobců, tedy modulární rotační klouby jednostranně uložené s alternativně vloženými rameny. U těchto robotů (obr. 6) jsou ramena již tvarově složitější, ale jedná se zde jen o zajímavější design oproti konkurenci. Na zlepšení technických parametrů robotů nemají žádný vliv. Z pohledu dosažitelné opakovatelnosti (viz tab. 3) jsou na tom nejhůře ze všech zde uvedených robotů.



Obr. 6 – Kolaborativní roboty Hanwha HCR [5]

Tab. 3 – Technické parametry kolaborativních robotů Hanwha HCR

Parametr [jednotka]	HCR-3	HCR-5	HCR-12
zatížení [kg]	3	5	12
dosah [mm]	630	915	1 300
stupně volnosti [-]	6	6	6
opakovatelnost [mm]	±0,05	±0,05	±0,1
max. rychlost TCP [m/s]	1	1	1

3.2.4 FANUC řada CRX

Kolaborativní robot CRX – 10iA od firmy FANUC, viz obr. 7, svojí konstrukcí odpovídá již zmíněným robotům. Je zde uveden hlavně z důvodu, že firma FANUC jako jediná zveřejňuje hodnoty zrychlení na 4, 5 a 6 ose, které jsou uvedeny v tab. 4.



Obr. 7 – Kolaborativní robot FANUC CRX – 10iA [6]

Tab. 4 – Technické parametry kolaborativního robota FANUC CRX – 10iA

Parametr [jednotka]	CRX-10iA
zatížení [kg]	10
dosah [mm]	1 249
stupně volnosti [-]	6
opakovatelnost [mm]	±0,04
max. rychlost 1. osy [°/s]	±120
max. rychlost 2. osy [°/s]	±120
max. rychlost 3. osy [°/s]	±180
max. rychlost 4. osy [°/s]	±180
max. rychlost 5. osy [°/s]	±180
max. rychlost 6. osy [°/s]	±180
zrychlení 4. osy [rad/s ²]	27,2
zrychlení 5. osy [rad/s ²]	28,9
zrychlení 6. osy [rad/s ²]	36,7
max. rychlost TCP [m/s]	1

3.2.5 STÄUBLI TX2touch

Jedná se o kolaborativního robota, jehož konstrukce vychází z osvědčeného průmyslového robota TX2. Oproti výše uvedeným robotům tento nedisponuje tak vysokou modularitou, jak lze vidět na obrázku (obr. 8). Důvodem je, že u tohoto robota se klade daleko větší důraz na bezpečnostní funkce. Technické parametry kolaborativního robota TX2touch-60 a jeho, na úkor maximálního zatížení, prodloužené verze TX2touch-60L jsou uvedeny v tab. 5.



Obr. 8 – Kolaborativní robot STÄUBLI TX2touch-60 [7]

Tab. 5 – Technické parametry kolaborativního robota TX2touch-60/60L

Parametr [jednotka]	TX2touch-60	TX2touch-60L
zatížení [kg]	9	5
dosah [mm]	670	920
stupně volnosti [-]	6	6
opakovatelnost [mm]	±0,02	±0,03

3.2.6 FANUC řada CR

Konstrukční varianta těchto kolaborativních robotů (obr. 9) s oboustranně uloženými rotačními klouby navyšuje tuhost celého robotů, a to se odráží v maximální dosažitelné opakovatelnosti, jak je vidět v tabulce s parametry viz tab. 6. Ale při porovnání rozsahu pohybu jednotlivých os s konstrukčními řešeními robotů, které mají jednostranně uložené rotační klouby, je toto řešení více omezené.



Obr. 9 – Kolaborativní roboty FANUC CR-4iA (vlevo) a CR-7iA (vpravo) [6]

Tab. 6 – Technické parametry kolaborativních robotů FANUC

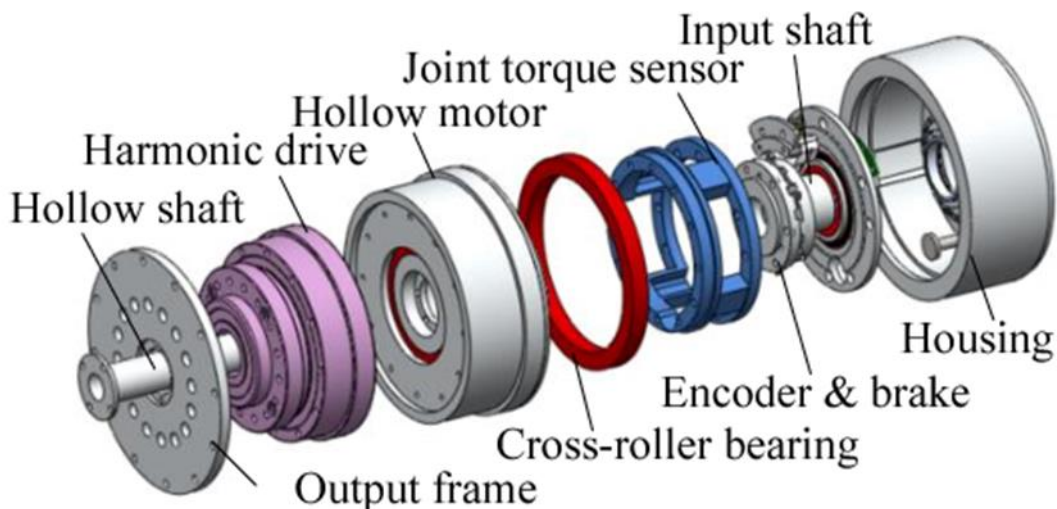
Parametr [jednotka]	CR-4iA	CR-7iA	CR-7iA/L
zatížení [kg]	4	7	7
dosah [mm]	550	717	911
stupně volnosti [-]	6	6	6
opakovatelnost [mm]	±0,01	±0,01	±0,01
zrychlení 4. osy [rad/s ²]	44,3	35,3	35,3
zrychlení 5. osy [rad/s ²]	44,3	35,3	35,3
zrychlení 6. osy [rad/s ²]	73,1	62,7	62,7
max. rychlost TCP [m/s]	1	1	1

3.3 Mechanická struktura modulárních rotačních kloubů

Modulární rotační kloub robotů je sestava typicky složená z motoru (nejčastěji pak z prstencového motoru), převodovky (ve většině případů se jedná o harmonickou převodovku), brzdy, odměřování a ložiska (v tomto případě se používá nejvíce křížové válečkové ložisko). Na výstupu z modulu se nachází výstupní příruba pro montáž dalšího modulu nebo ramene.

Na rozpadu jednoho z příkladů modulu rotačního kloubu na obrázku (obr. 10) lze vidět, proč všechny výše uvedené roboty patří do skupiny kolaborativních robotů. Do sestavy je poměrně jednoduché zakomponovat snímač momentu, který dokáže měřit přesný točivý moment přenášený do spoje v důsledku kolizí a tím je zajištěna bezpečnost spolupráce robota s člověkem.

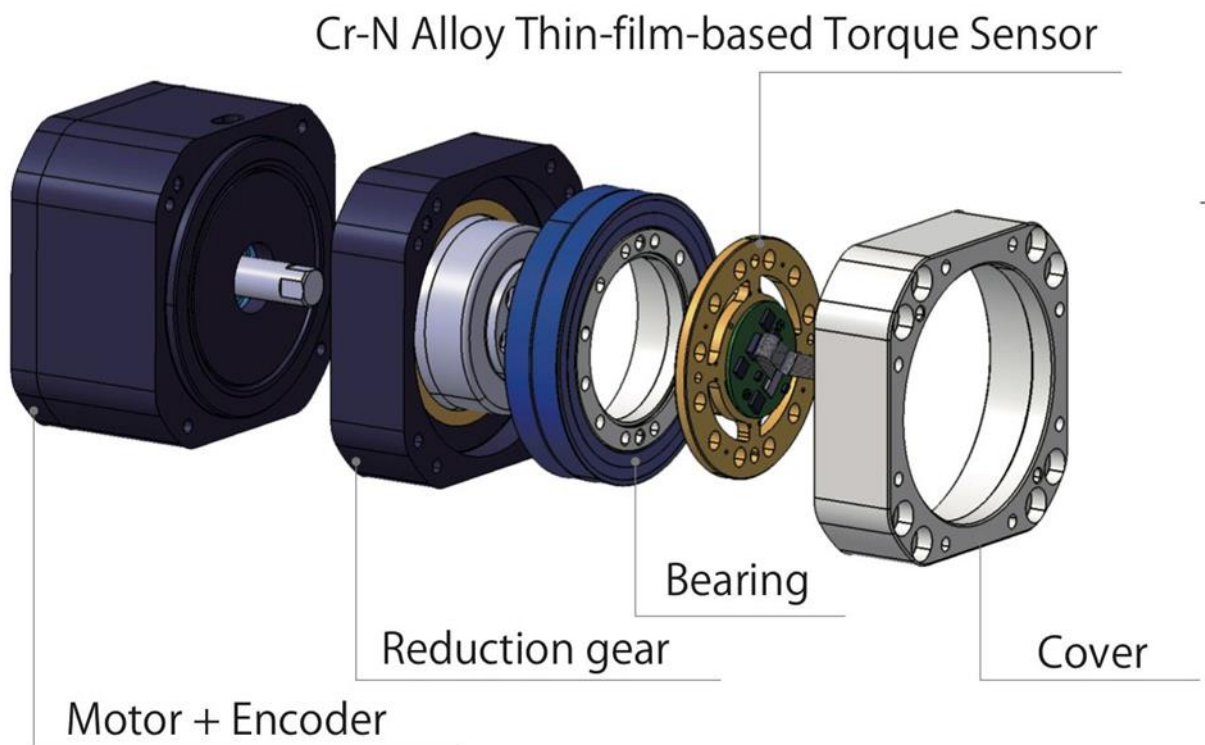
Díky oddělení snímače momentu od harmonické převodovky a jeho prstencové konstrukci došlo ke zvýšení tuhosti celého modulu a k minimalizaci vlivu vibrací z převodovky na přesné měření momentu [8].



Obr. 10 – Rozpad modulu rotačního kloubu [8]

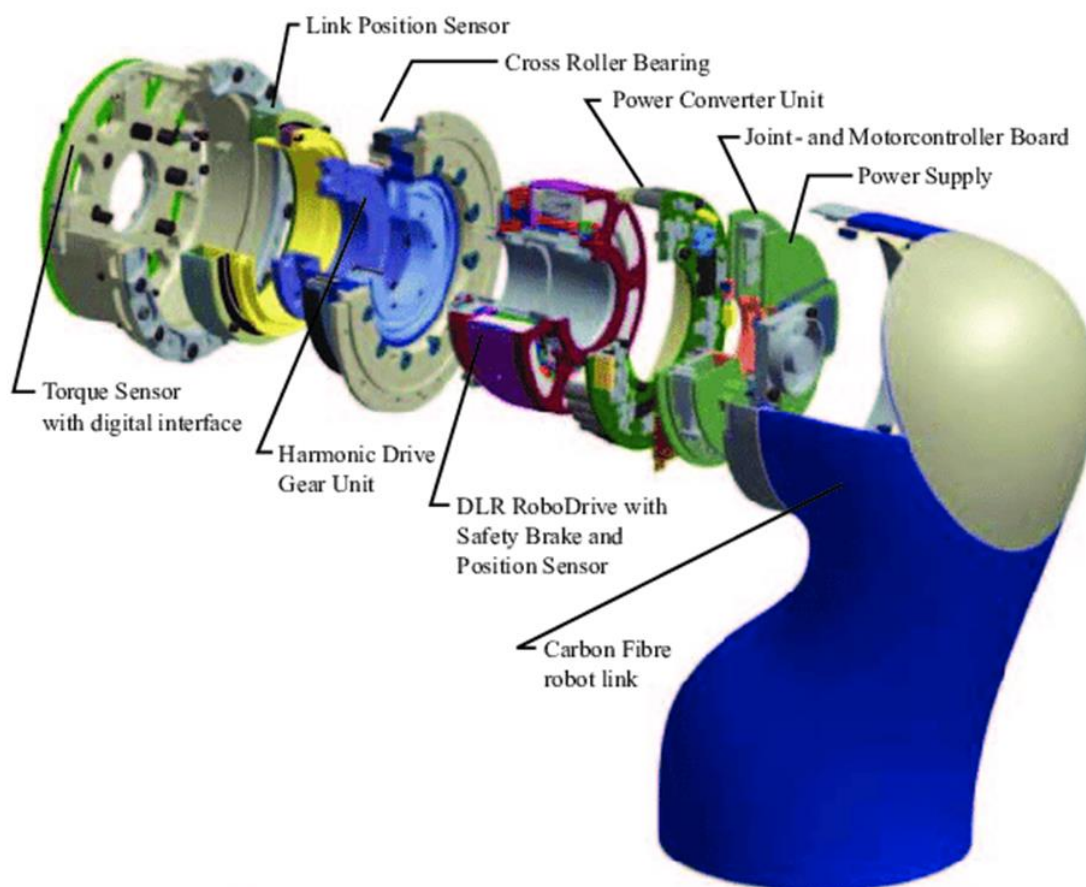
Další varianta provedení modulárního rotačního kloubu je na obrázku (obr. 11). Tento modul je řešen jednodušeji než předchozí. Skládá se z motoru s integrovaným odměřováním, na výstup motoru navazuje převodovka, dále pak ložisko. Na vnitřním kroužku ložiska, který se vyrábí s dírami pro montáž, je přišroubován snímač momentu pro kontrolu sil při možných kolizích.

Tento modul je využíván společností Toyota motor corporation při stavbě humanoidních robotů [9].



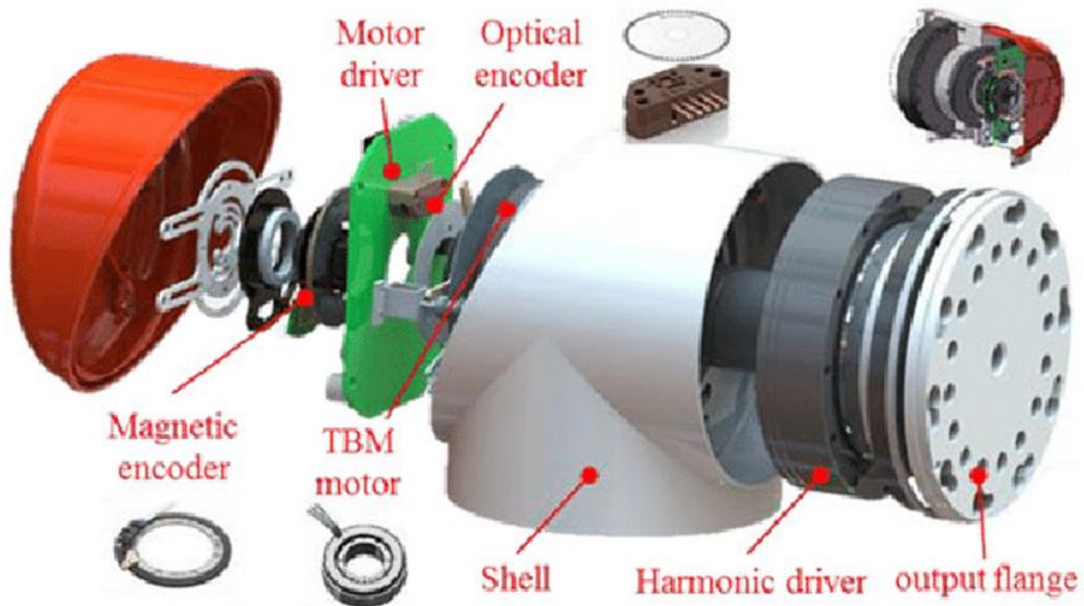
Obr. 11 – Rozpad modulárního rotačního kloubu pro T-HR3 [9]

Na obrázku níže (obr. 12) se nachází pohled na detailní rozpad mechanické stavby rotačního kloubu robota LWR od společnosti KUKA. Kloubová jednotka obsahuje jeden blok od firmy TQ RoboDrive, který zahrnuje prstencový motor (DLR) TQ RoboDrive, bezpečnostní brzdu a odměřování polohy. Na výstupu motoru je harmonická převodovka a křížové válečkové ložisko. Dále je tento modul doplněný na výstupu o další odměřování pro zajištění přesnějšího polohování a snímač točivého momentu kvůli bezpečnosti kolaborativní činnosti. Celá tato sestava je uložena v rameni robota tvořeného uhlíkovým vláknem.



Obr. 12 – Rozpad mechanické stavby rotačního kloubu robota LWR [10]

Modulární rotační kloub robota JITRI5, který lze vidět na následujícím obrázku (obr. 13) je sestaven podobně jako výše uvedený kloub robota LWR. Tvoří jej TBM (torque brushless motor), harmonická převodovka, brzda, optický snímač s vysokým rozlišením pro komutaci motoru a magnetický snímač pro řízení polohy.



Obr. 13 – Rozpad modulárního rotačního kloubu robota JITRI5 [11]

Na závěr této podkapitoly je zde ukázka, jakou řadu modulárních rotačních kloubů nabízí např. společnost TechSoft Robots. Jedná se o řadu RJSII (obr. 15). Tyto moduly se sestávají z prstencového motoru, harmonické převodovky, třecí brzdy a duálního odměřování pro přesnou kontrolu polohy. Rozpad této struktury lze vidět na obr. 14.



Obr. 14 – Rozpad mechanické stavby modulu rotačního kloubu RJSII [12]



Obr. 15 – Modulární rotační klouby RJSII spol. TechSoft Robots [12]



3.4 Hlavní komponenty modulárních rotačních kloubů

3.4.1 Motor

Tato kapitola se zaměřuje na pohon s elektrickým motorem. Zásadou moderních typů mechanických převodů, které s pokrokovými typy elektromotorů umožnily nástup výhodných kloubových kinematických struktur [1].

Postupným rozšířením nových stejnosměrných a v poslední době i střídavých motorů v kombinaci s harmonickými a cykloidními převodovkami se pohon s elektrickým motorem stal nejpoužívanějším v konstrukci malých a středních průmyslových a kolaborativních robotů [1].

Pohon s elektrickým motorem má několik značných výhod oproti ostatním typům pohonů. Jeho činnost je závislá na snadno dostupném zdroji energie, jednoduchosti vedení zdroje k motoru, jednoduchost spojení s řídicími prvky, poměrně snadné údržbě a čistotě provozu [1].

Za nevýhody se považují podstatné požadavky na kvalitu výroby všech komponent složitých systémů a nebezpečí úrazu elektrickým proudem, což bývá zapříčiněno nedodržením bezpečnostních předpisů [1].

V elektrických pohonech průmyslových a kolaborativních robotů se využívají převážně jen tyto základní typy elektromotorů. Jde o motory s rotačním výstupem:

- Rotační motory se spojitým pohybem
- Rotační krokové motory
- Otočné elektromagnety

Elektrické motory se uplatňují ve dvou variantách:

- Střídavé
- Stejnosměrné

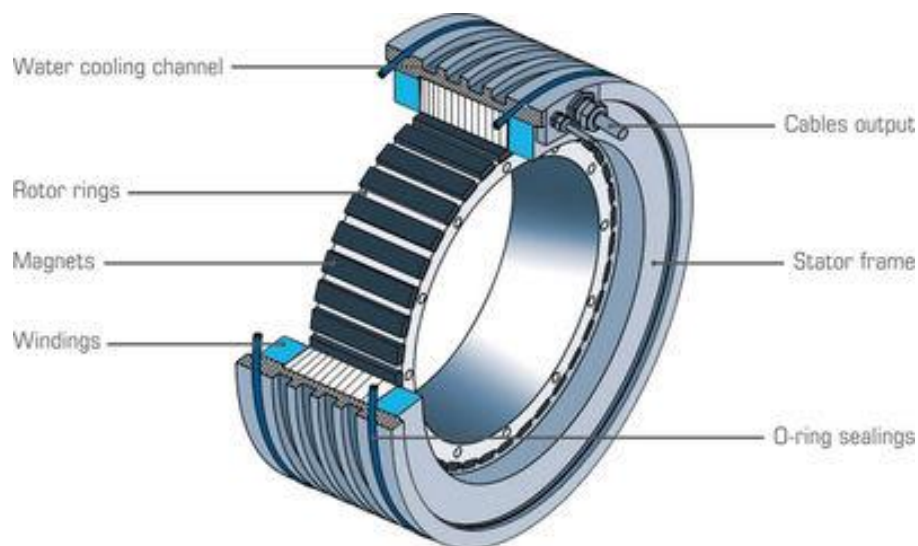
Z důvodu zaměření této práce bude v následující části věnována pozornost zejména prstencovým motorům, BLDC motorům a krokovým motorům.

Prstencové motory

Prstencové motory jsou servomotory, které disponují velkým kroutícím momentem v klidové poloze či nízkých otáčkách. Vyrábí se jako bezrámové vestavné a umisťují se přímo do konstrukce stroje, čímž se výrazně snižuje potřebný zástavbový prostor oproti použití jiného typu motoru [13].

Tyto motory jsou konstruovány pro malé rychlosti a velké momenty. Nejčastěji se vyrábí jako synchronní motory s permanentními magnety, ale mohou být i stejnosměrné a krokové [13].

Základní díly konstrukce prstencových motorů (obr. 16) jsou stator a rotor ve tvaru prstenců, které jsou určeny pro přímé uložení do stroje. Statorové vinutí je upevněno na vnějším prstenci a po vnějším obvodě rotorového prstence jsou připevněny permanentní magnety. Proti korozi jsou magnety chráněny vrstvou slitiny niklu nebo epoxidem. Motory pracují na principu bezkartáčových motorů včetně řídicí výkonové elektroniky. Statorové vinutí má velký počet pólů, motory dosahují velkých kroutících momentů a velké torzní tuhosti při polohové regulaci. Vykazují dobré dynamické vlastnosti a mají nízkou hmotnost [13].



Obr. 16 – Prstencový motor – popis konstrukce [15]

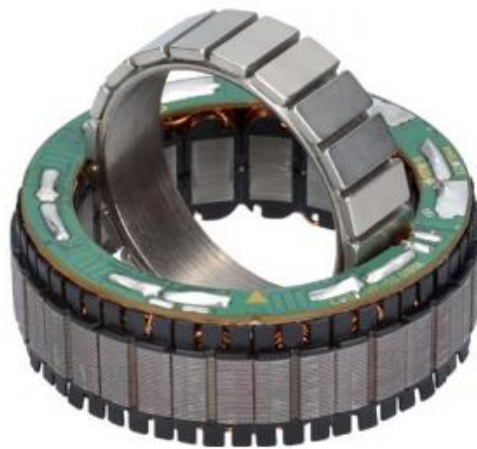
Při polohování je minimální krok omezen pouze inkrementem (nejmenší hodnotou rozlišení) odměrování. Dále je přesnost polohování závislá na řídicím regulačním systému [13].

Hlavními výhodami prstencových motorů je:

- Vysoký výkon při malých zástavbových prostorech
- Bezvúlové spojení se strojem
- Vysoké úhlové zrychlení
- Přesné polohování
- Velká tuhost při polohování
- Odpadnutí potřeby převodů
- Malá hmotnost a setrvačné síly

Nevýhodami pak jsou vyšší pořizovací cena oproti jiným typům motorů a nutnost chlazení motoru při vysokých momentech.

Příklad používaných prstencových motorů v modulárních rotačních kloubech lze vidět na obr. 17 a jeho základní parametry v tab. 7. Jedná se o bezrámové servomotory od společnosti TQ-RoboDrive. Tyto motory jsou standartně dodávány s Hallovými a teplotními senzory.



Obr. 17 – bezrámový prstencový motor ILM-E70x10 [14]

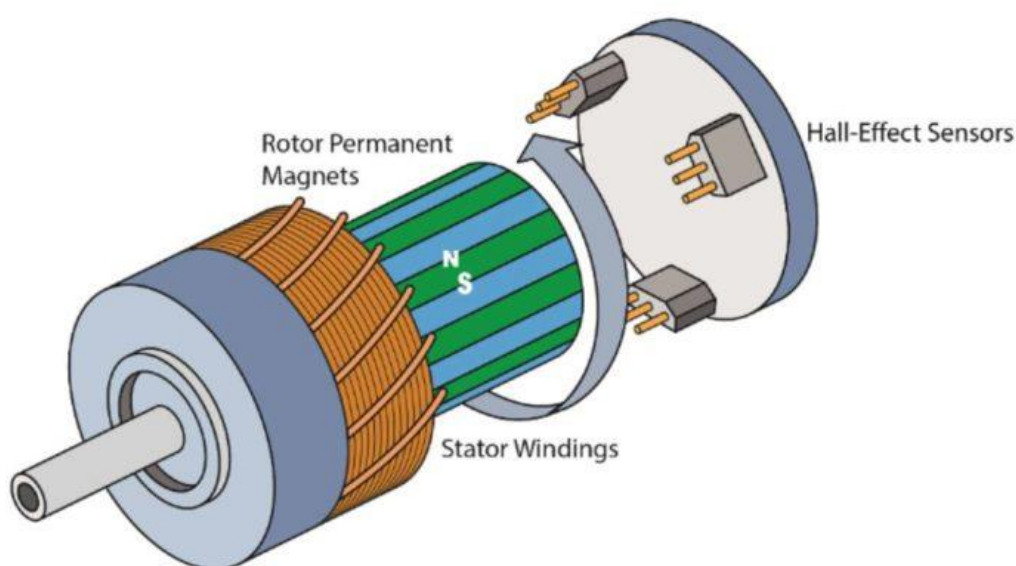
Tab. 7 – Základní parametry ILM-E70x10

Parametr [jednotka]	hodnota
výkon [W]	219
jmenovitý moment [Nm]	0,56
max. moment [Nm]	1,83
otáčky [1/min]	3 708
hmotnost [kg]	0,162
vnější průměr [mm]	69
délka [mm]	22,7

Bezkartáčové stejnosměrné (BLDC) motory

BLDC motory patří mezi synchronní elektromotory. Skládají se z permanentních magnetů na rotoru a statorového vinutí. Komutace těchto motorů není řešena pomocí kartáčů, ale místo toho jsou komutovány elektronicky. Díky tomu dosahují vyšší spolehlivosti než obyčejné DC motory. Typicky jsou v sensorovém módu použity tři Hallovy sondy pro snímání polohy rotoru a komutace je založena na těchto impulzech [16].

Schéma konstrukce BLDC motoru viz obr. 18.



Obr. 18 – Schéma konstrukce BLDC motoru [17]

Výhodami těchto motorů oproti kartáčovým DC motorům a indukčním motorům jsou: vyšší výstupní výkon, vyšší účinnost, vyšší spolehlivost, nižší nároky na údržbu, vyšší životnost, nižší hmotnost a vyšší dynamika [16].

Nevýhodami jsou, v porovnání s prstencovým a krokovým motorem, vyšší hmotnost a větší zástavbové rozměry.

Zástupce BLDC motorů (obr. 19) je se svými základními parametry v tab. 8 pro srovnání se zde uvedenými motory.



Obr. 19 – BLDC motor DB59C024035R [18]

Tab. 8 – Základní parametry BLDC motoru DB59C024035R

Parametr [jednotka]	hodnota
výkon [W]	220
jmenovitý moment [Nm]	0,6
max. moment [Nm]	1,8
otáčky [1/min]	3 500
hmotnost [kg]	0,95
vnější průměr [mm]	57
délka [mm]	93,6

Krokové motory

Krokový motor je indukční synchronní točivý stroj. Magnetické pole, které točí rotorem, se generuje postupným zapínáním napájení jednotlivých cívek – elektromagnetů – příslušných pólových dvojic statoru. Pólové nastavce statoru a rotoru jsou vzájemně posunuté, čímž se při vyvolání magnetického pole ve statoru rotor pootočí o tento rozdíl úhlu mezi příslušnými nastavci. Proto se rotor pohybuje po krocích a jejich velikost je dána konstrukcí motoru a způsobem generování řídicích impulzů. U krokového motoru lze dosáhnout velice přesného polohování [19].



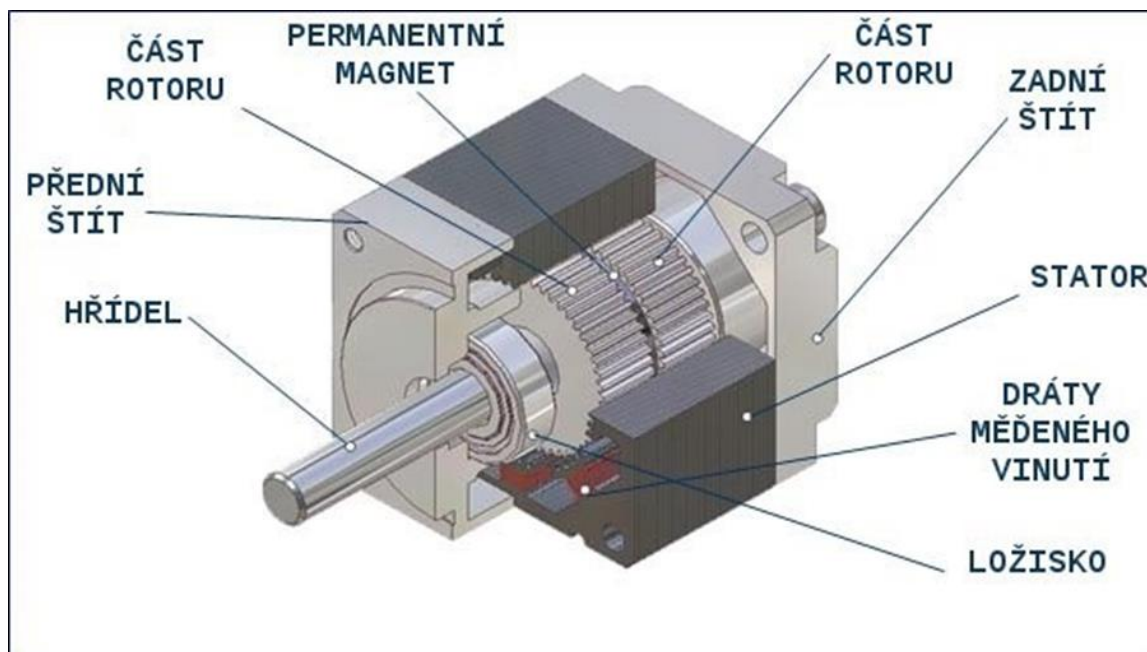
Krokové motory rozlišujeme [19]:

- 1) Podle způsobu vinutí na:
 - **Unipolární** – proud může téci cívkou pouze jedním směrem
 - **Bipolární** – proud může téci cívkou oběma směry
- 2) Podle počtu vinutí na:
 - **Dvoufázové** – standartní, nejpoužívanější
 - **Vícefázové** – speciální pohony, nižší vibrace, jemnější krok, složitá konstrukce, vyšší cena

Podle stavby rotoru dělíme krokové motory na [19]:

- a) **Reluktanční** – při této konstrukci rotoru motory využívají schopnosti magnetického obvodu natáčet se vždy do mechanické konfigurace s co nejmenším magnetickým odporem. Příhodně tvarovaný magnetický obvod se zuby z magneticky vodivého materiálu se vždy natočí těmito zuby pod póly statoru s cívkami, za účelem zvýšení magnetického toku a snížení magnetického odporu celé konstrukce. Pohyb rotoru je potom realizován pouštěním proudu do cívek.
- b) **Motor s permanentními magnety** – díky využívání magnetického pole permanentních magnetů se potom v magnetickém poli objevuje daleko větší magnetický tok a motor je mnohem svižnější. Protože severní a jižní póly vytvářejí různě směřované toky po celém motoru, tak vhodným elektrickým proudem se motor může točit v různém směru.
- c) **Hybridní** – tento motor (obr. 20) je kombinace dvou typů motorů. Jde o kombinaci reluktančního motoru a motoru s permanentními magnety. Vinutí má tento hybridní motor ve statoru, permanentní magnet mezi částmi rotoru a mezi rotorem a statorem je vzduchová mezera. U tohoto motoru jsou pak kuličková ložiska jedinou třecí plochou při otáčení motoru.

U krokových motorů je možnost dosáhnout kvalitního řízení a polohování bez použití přidaného odměřování. Řízení rychlosti se pak realizuje pomocí kmitočtu řídicích pulzů. Má velice výhodnou momentovou charakteristiku při nízkých otáčkách, je zde tedy možnost jej použít jako přímý pohon bez převodovky [19].



Obr. 20 – Konstrukce hybridního krokového motoru [19]

Jeho největší nevýhodou je možnost ztráty kroku, pokud je překročena maximální možná hodnota zátěžného kroučícího momentu motoru. Tuto skutečnost je nutné zahrnout při výběru motoru pro danou aplikaci [19].

V porovnání se dvěma výše uvedenými typy motorů je tento z pohledu ceny nejvýhodnější. Ovšem s hmotností je na tom podstatně hůře než prstencový motor s podobným jmenovitým momentem. Co se týče řízení při požadavku na hladký chod, tak krokový motor je na tom ze všech tří uvedených nejhůře.

Na obrázku níže (obr. 21) je typický hybridní krokový motor velikosti NEMA 23 s jeho základními parametry v tab. 9.



Obr. 21 – Hybridní bipolární krokový motor NEMA 23 ST5918X3008 [18]

Tab. 9 – Základní parametr krokového motoru ST5918X3008

Parametr [jednotka]	hodnota
výkon [W]	38,33
jmenovitý moment [Nm]	0,48
max. moment [Nm]	53,74
otáčky [1/min]	750
hmotnost [kg]	0,49
vnější rozměr [mm]	56,5x56,5
délka [mm]	41

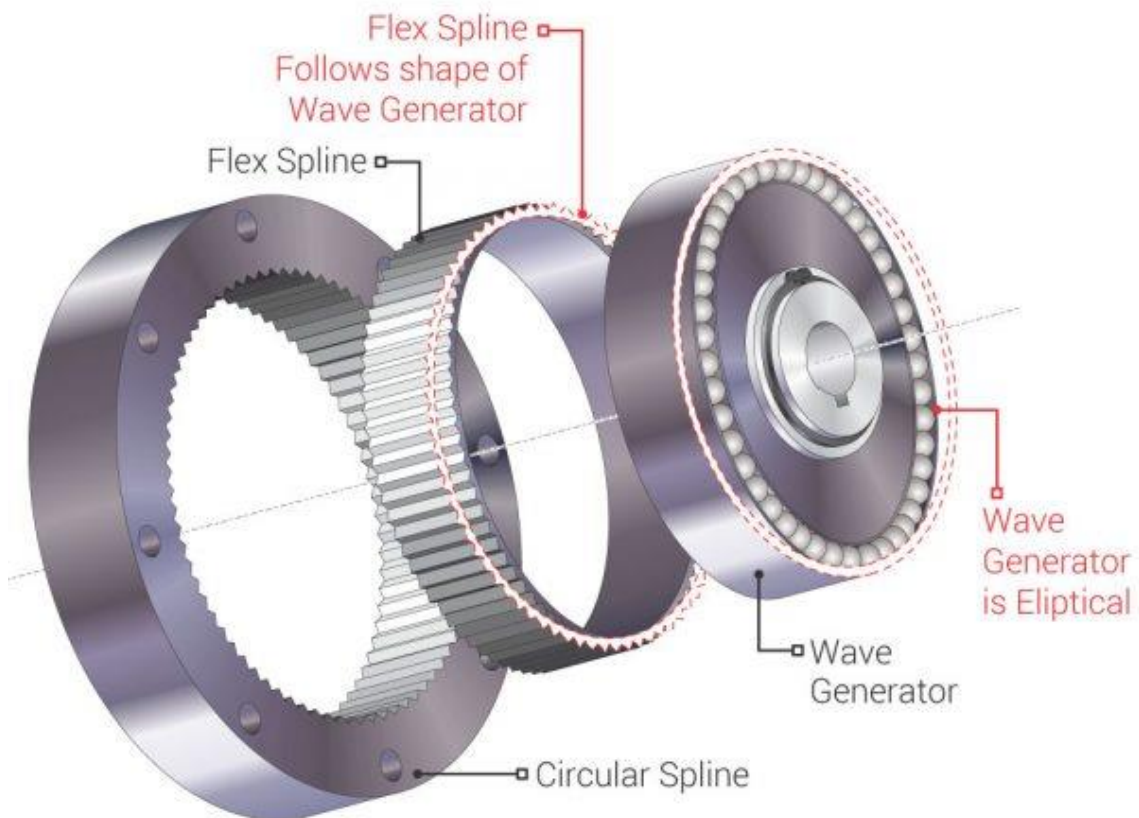
3.4.2 Převodovka

Harmonická převodovka

Tato převodovka se skládá ze tří základních komponent (obr. 22). Jde o generátor vln, což je eliptický ocelový disk, jenž tvoří srdce převodovky, která má středový náboj a speciální tenké, elipticky deformovatelné kuličkové ložisko. Generátor vln může být připojen k hřídeli motoru. Další komponentou je flexspline – deformovatelná válcová objímka s ozubením uspořádaným kolem jeho vnějšího obvodu. Třetí komponenta, circular spline, obklopuje jak generátor vln, tak flexspline jako tuhý válcový vnější prsteneček s ozubením na jeho vnitřním obvodu. Důležitý je u této převodovky počet zubů.

Vnější ozubení flexspline má méně zubů než vnitřní ozubení circular spline. Rozdíl počtu zubů bývá dva. Díky tomuto rozdílnému počtu zubů komponenty po sobě šplhají [20].

Hlavní vlastnosti a výhody harmonické převodovky ve srovnání s jinými konvenčními typy převodovek jsou primárně dány kombinací její jednoduché konstrukce a jedinečného principu pružné deformace. Převodovky jsou bez vůlí a udržují vysokou torzní tuhost v celém rozsahu točivého momentu. Disponují vysokým převodovým poměrem a oproti jiným převodovkám mají menší zástavbové rozměry a nižší hmotnost. Ovšem tyto veškeré výhody se následně odráží na pořizovací ceně harmonické převodovky [20].



Obr. 22 – Harmonická převodovka [21]

Cykloidní převodovka

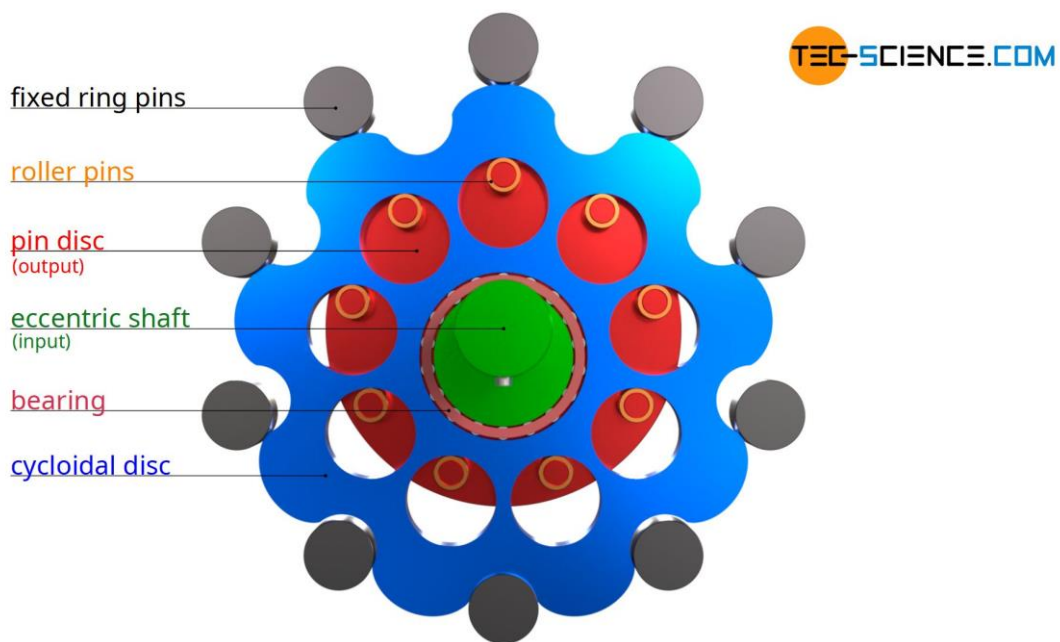
Cykloidní převodovky využívají dvoustupňové konstrukce a skládají se ze čtyř prvků: vstupní hřídele, dvou až tří excentrických hřídelí, dvou vačkových kotoučů a výstupní hřídele. V prvním stupni se otáčí vstupní hřídel, na který je připojen motor a přenáší točivý pohyb na čelní ozubená kola. Otáčky se snižují v závislosti

na převodovém poměru vstupní hřídele a čelních ozubených kol. Čelní kola jsou uložena na excentrických hřídelích, které jsou vůči sobě otočeny o 180 stupňů. Tyto excentrické hřídele pohání přes ložiska oba vačkové kotouče. Pro funkčnost jsou excentrické hřídele na obou stranách uloženy v ložiscích [22].

Druhý stupeň převodu je realizován tak, že na vnitřní straně tělesa je vytvořen vačkový profil, který odpovídá vačkovým kotoučům. Pomocí čepů, jež jsou umístěny mezi vačkovými kotouči a vačkovým profilem v tělese, se otáčivý pohyb valivě přenáší na výstupní hřídel. Při otočení excentrických hřídelí o jednu otáčku se vačkové kotouče mimostředově otočí o jedno dělení, přičemž se všechny křivky vačkového kotouče dotýkají čepů a odvalují se po nich [22].

Tyto převodovky zvládnou díky své konstrukci přenášet vysoký točivý moment s maximální přesností a klidným chodem. Umožňují převodové poměry 30:1 až 300:1 bez předřazených přídatných stupňů [22].

Schématické znázornění konstrukce cykloidní převodovky lze vidět na obr. 23.



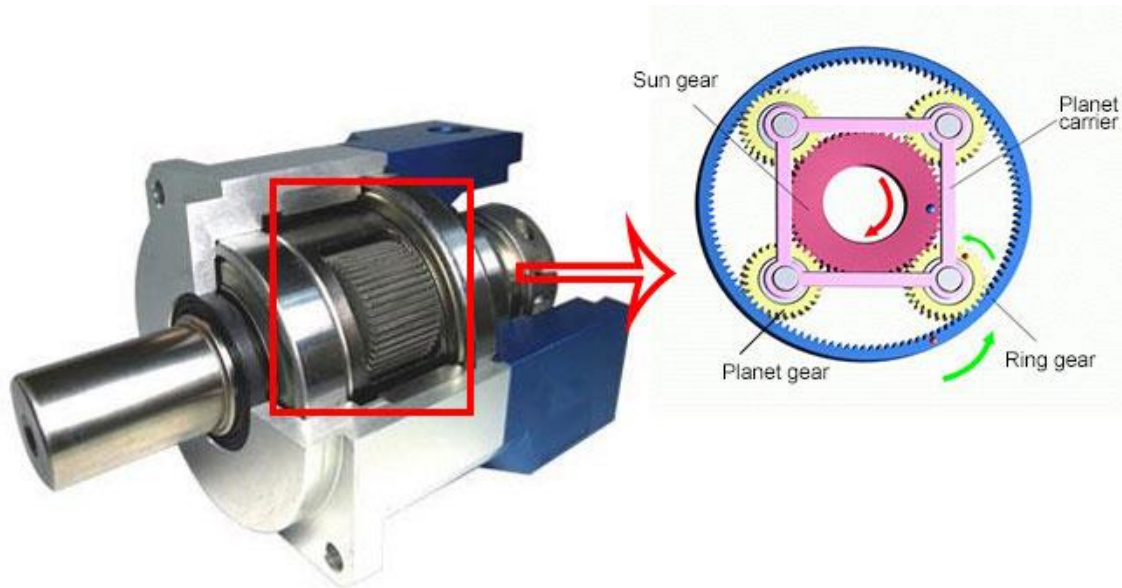
Obr. 23 – Schéma konstrukce cykloidní převodovky [23]

Planetová převodovka

Skládá se ze tří konstrukčních prvků: centrálního kola, tří a více satelitů a korunového kola. Vstupní hřídel přenáší točivý pohyb na satelity, které se následně

odvalují po korunovém kole. Planetová kola jsou namontována na unašечи, který pak přenáší točivý pohyb na výstupní hřídel z převodovky. Planetové převodovky mohou mít dva nebo i tři stupně a umožňují převody od 3:1 až po 100:1. Ještě je zde možnost předřazení dalšího stupně a zvýšení převodového poměru, ale tím se zvýší vůle celé převodovky [22].

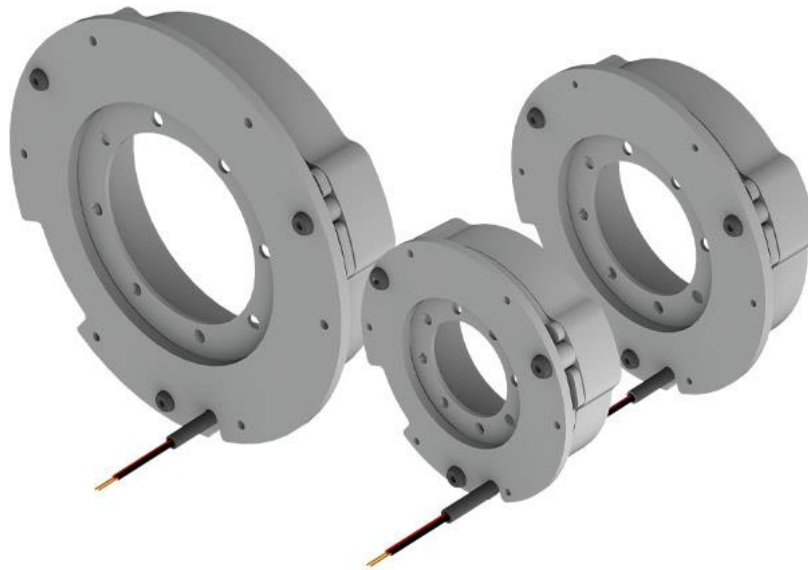
Na obr. 24 se nachází jednoduchá koncepce planetové převodovky.



Obr. 24 – Planetová převodovka se schématickým naznačením funkce [24]

3.4.3 Bezpečnostní brzda

Funkce zastavení pohonu průmyslových a kolaborativních robotů je rozdělena do tří kategorií. Kategorie zastavení, označena jako 0, je nekontrolované zastavení s okamžitým odpojením síly od pohonu, při kterém je zpomalení vyvoláno pouze třením či kolizí. Dalším typem zastavení, kategorie 1, je řízené zastavení, které zahrnuje zpomalení pomocí výkonu dostupného pro pohon a postupným odebráním výkonu až do jeho úplného zastavení a následného odpojení energie. Poslední kategorie zastavení, značena jako 2, je totéž co kategorie 1, pouze bez následného odpojení od energie. Většina konvenčních robotů provede nouzové zastavení zablokováním svých pozic přidržovací brzdou po eliminaci většiny kinetické energie při využití zastavení kategorie 1. Nejčastěji se používá pružinová elektromagnetická brzda viz obr. 25 [25].



Obr. 25 – TQ-RoboDrive bezpečnostní brzda [26]

Tato pružinová elektromagnetická bezpečnostní brzda umožňuje konstrukci kompaktních lehkých modulárních kloubů robota. Díky její konstrukci, kterou lze namontovat na dutý hřídel je zde zajištěný průchod jejím středem pro veškeré kabely, signály a média [26].

Další elektricky ovládanou pružinovou bezpečnostní brzdou lze vidět na následujícím obrázku (obr.26). Brzda je využívána především u kompaktních sad s krokovými nebo BLDC motory. Nevýhodami jsou oproti výše uvedené vyšší hmotnost při stejném brzděném momentu a nemožnost průchozího středu takovéto sestavy pohonu.



Obr. 26 – Bezpečnostní brzda BWA-0,35-5 [18]

3.4.4 Odměrování

Základní rozdělení odměrování je na přímé a nepřímé. Při použití přímého odměrování lze zajistit vyšší přesnost polohování a nezávislost na torzních tuhostech v pohonu.

Dále se odměrování polohy dělí na optické, interferometrické, laserové a magnetické snímače. Optická a magnetická odměrování lze dále dělit na absolutní a inkrementální. Výběr typu odměrování závisí na technologii, prostředí, kde bude použito a na požadavcích, které od něj jsou očekávány.

Při použití inkrementálního odměrování dostává řídicí systém informaci v podobě impulzů, které jsou počítány od pevně stanovené referenční polohy. To tedy znamená, že stroj musí po zapnutí najet do referenčního bodu, aby se inicializoval souřadný systém. Teprve potom je stroj možné použít k výkonu práce. U absolutního odměrování toto najíždění na referenční polohu odpadá, protože díky tomuto odměrování systém ihned po zapnutí ví o své poloze vzhledem k určenému souřadnicovému systému stroje [27].

Na obrázku níže (obr. 27) je řada absolutních magnetických rotačních snímačů polohy AksIM-2 od společnosti RLS, který disponuje minimálními zástavbovými rozměry, a proto je často využíván při stavbě modulárních rotačních kloubů robota.



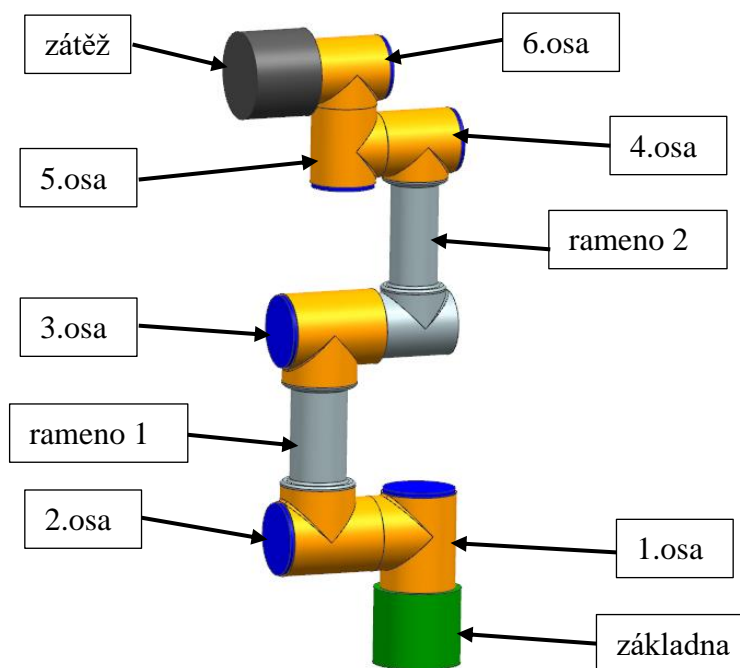
Obr. 27 – Absolutní magnetický rotační snímač AskIM-2 RLS [28]

4 Návrhové výpočty modulárních rotačních kloubů

V této kapitole jsou řešeny návrhové výpočty a následně konstrukce zadaného robota. Tento robot má být sestaven z modulárních nízkonákladových rotačních kloubů dvou různých velikostí. S větším výstupním momentem pro první, druhou a třetí osu a s menším výstupním momentem pro čtvrtou, pátou a šestou osu. Robot má zadanou nosnost 5 kg na koncové přírubě.

4.1 Návrhové výpočty krouticích momentů

Protože výrobci průmyslových a kolaborativních robotů neudávají v technických parametrech momenty setrvačnosti pro všechny osy robota, tak v prvním kroku bylo nutné vytvořit pomocí CAD softwaru zjednodušenou konstrukci modulárního šestiosého robota dle provedené rešerše viz obr. 28. Díky tomuto modelu bylo následně možné zjistit dané momenty setrvačnosti vzhledem k jednotlivým osám, na jejichž základě, spolu s orientačně zvolenými úhlovými zrychleními, se dopočítaly prvotní potřebné krouticí momenty na výstupu jednotlivých kloubů. Tyto momenty sloužily jako odrazový můstek pro počáteční návrh jednotlivých variant pohonu.



Obr. 28 – Zjednodušená konstrukce modulárního šestiosého robota

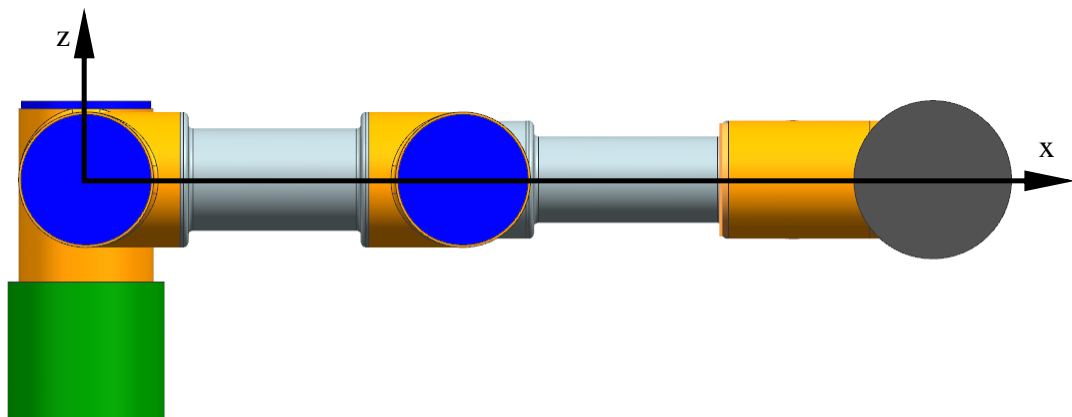
Tento zjednodušený model vychází z výše uvedeného kolaborativního robota od firmy Universal Robots UR5e se sníženou hodnotou maximálního dosahu na cca 540 mm. U modelu bylo důležité zajistit správné rozložení hmot na jednotlivé klouby. K tomu bylo využito parametrů modulů kloubů z obr. 15 a domluvy, že celková hmotnost sestavy robota, i s maximální zátěží na koncové přírubě by se měla pohybovat okolo 20 kg.

Výpočtový model robota z obr. 28 se tedy skládá ze tří totožných sestav mechanické stavby kloubů, o hmotnosti každého z kloubů 2,8 [kg], pro první, druhou a třetí osu (označeny modrou barvou), které jsou uloženy ve skořepině (označeny oranžovou barvou) a tří menších sestav mechanické stavby kloubů, vážících každý 1,74 [kg], pro čtvrtou, pátou a šestou osu robota (označeny modrou barvou) opět uloženy ve skořepině (oranžová barva). Na výstupu šesté osy je maximální přípustná zátěž 5 kg (označena tmavě šedou barvou). Dále sestavu tvoří dvě ramena (světle šedá barva) a jednoduchá základna robota (zelená barva), která je zde jen pro lepší orientaci v obrázku. K výpočtu momentů setrvačnosti není potřeba.

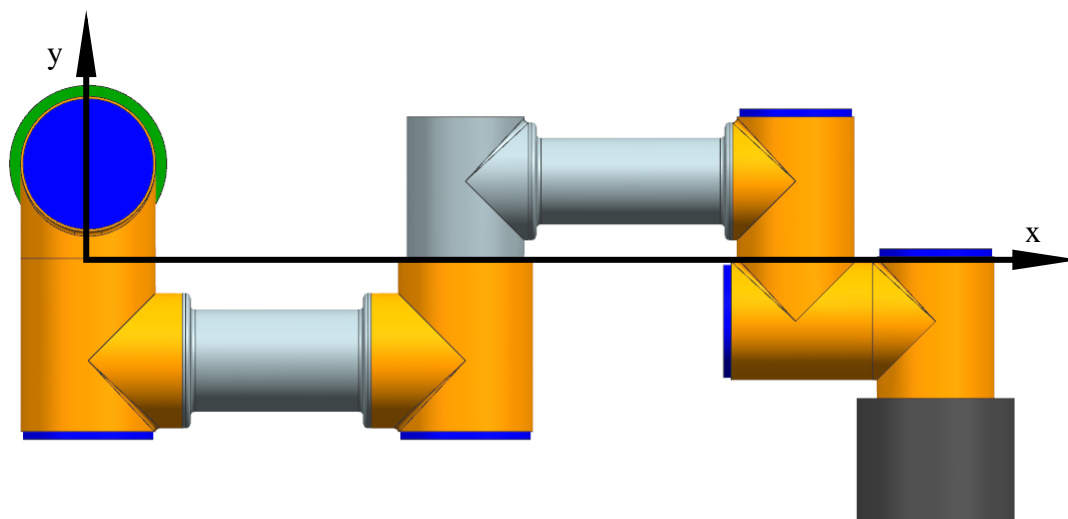
K výpočtu momentů setrvačnosti vzhledem k jednotlivým osám byl použit CAD software NX SIEMENS a pro kontrolu správnosti i Steinerova věta (1).

$$I_{oi} = I_0 + md^2 \quad (1)$$

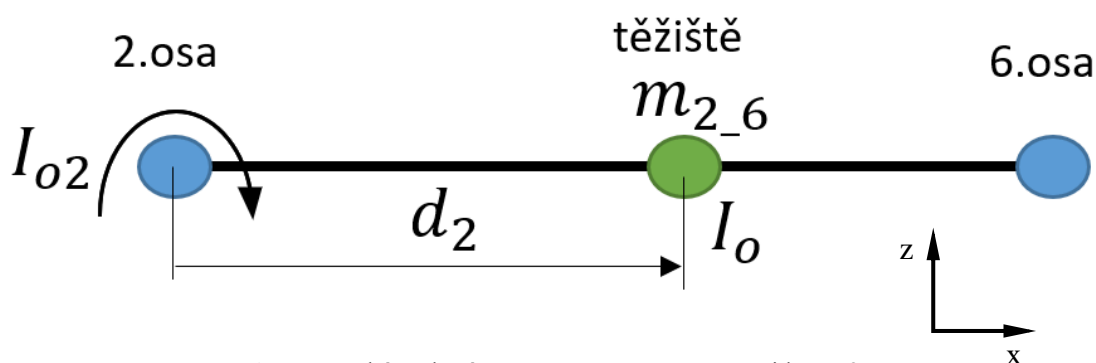
Vždy byla volena poloha robota taková, která je nejnepříznivější kinematickou polohou pro danou osu. Celý postup výpočtu je ukázán na příkladu pro osu 2. Na obrázcích (obr. 29 a 30) lze vidět polohu robota pro výpočet a na dalším obrázku (obr. 31) schématické znázornění této polohy potřebné pro výpočet.



Obr. 29 – Poloha robota při výpočtu momentu setrvačnosti k ose 2 (bokorys)



Obr. 30 – Poloha robota při výpočtu momentu setrvačnosti k ose 2 (půdorys)



Obr. 31 - Schéma k výpočtu momentu setrvačnosti k ose 2

Schéma z obrázku výše (obr. 31) označuje I_o moment setrvačnosti, procházející těžištěm této části robota (od 2. osy až po 6. osu), I_{o2} představuje hledaný moment setrvačnosti vzhledem ke 2. ose, d_2 je kolmá vzdálenost od osy procházející těžištěm a m_{2_6} hmotnost části robota, včetně maximálního zatížení na koncové přírubě, která tvoří moment setrvačnosti na 2. ose.

Příklad výpočtu momentu setrvačnosti vzhledem ke 2. ose:

- Parametry pro výpočet:

$$I_o = 0,709999 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2] \quad (\text{hodnota z NX SIEMENS})$$

$$m_{2_6} = 17,03 \text{ [kg]} \quad (\text{hodnota z NX SIEMENS})$$

$$d_2 = 0,3633 \text{ [m]} \quad (\text{hodnota z NX SIEMENS})$$



- Dosazení do rovnice (1):

$$I_{o2} = I_o + md_2^2 \quad (2)$$

$$I_{o2} = 0,709999 + 17,03 \cdot 0,3633^2$$

$$I_{o2} = 2,95774 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$$

Hodnota momentu setrvačnosti vzhledem ke 2. ose, která byla vypočítána NX SIEMENS $I_{o2(NX)} = 2,95797 \text{ [kg} \cdot \text{m}^2\text{]}$, se liší od vypočítané hodnoty o 0,01 [%], což bylo zaviněno zaokrouhlením.

Takovýto postup výpočtu a následného porovnání hodnot byl proveden pro všechny osy a výsledky momentů setrvačnosti k jednotlivým osám jsou uvedeny v tabulkách (tab. 10 a tab. 11).

Pro porovnání vlivu maximální zátěže na koncové přírubě na momenty setrvačnosti byly vytvořeny tři výpočtové modely s různou maximální zátěží na koncové přírubě. Varianta1 pro zátěž 5 [kg], varianta2 pro zátěž 4,5 [kg] a varianta3 pro zátěž 4 [kg].

Tyto tři varianty byly vytvořeny i za účelem možného následného snížení požadavku na maximální zatížení na koncové přírubě. Pokud by se jednalo o markantní rozdíl mezi jednotlivými variantami, dalo by se následně ušetřit jak na hmotnosti použitého pohonu, tak na celkové ceně kloubu. Ovšem prioritou bylo udržet hodnotu maximálního zatížení na 5 [kg].

Tab. 10 – Moment setrvačnosti k ose rotace (Steinerova věta)

moment setrvačnosti k ose rotace (STEINEROVA VĚTA)			
	varianta1	varianta2	varianta3
Io1 [kg·m ²]	3,053	2,910	2,773
Io2 [kg·m ²]	2,958	2,819	2,685
Io3 [kg·m ²]	0,788	0,745	0,703
Io4 [kg·m ²]	0,064	0,059	0,054
Io5 [kg·m ²]	0,047	0,043	0,038
Io6 [kg·m ²]	0,006	0,005	0,004

Tab. 11 – Moment setrvačnosti k ose rotace (NX SIEMENS)

moment setrvačnosti k ose rotace (NX)			
	varianta1	varianta2	varianta3
Io1 [kg•m ²]	3,267	3,112	2,961
Io2 [kg•m ²]	2,958	2,819	2,685
Io3 [kg•m ²]	0,789	0,745	0,703
Io4 [kg•m ²]	0,064	0,059	0,054
Io5 [kg•m ²]	0,047	0,043	0,038
Io6 [kg•m ²]	0,006	0,005	0,004

Jak lze z tabulek (tab. 10 a tab. 11) vypozorovat, tak se hodnoty liší minimálně. Pouze hodnoty momentu setrvačnosti vzhledem k 1. ose jsou rozdílné o 7 [%], což mohla způsobit zřejmě nedokonalost CAD modelu. Z tohoto důvodu byla pro následný výpočet požadovaného kroutícího momentu vzata vyšší hodnota.

Po vypočítání momentů setrvačnosti k jednotlivým osám se pomocí rovnice (3), která vychází z Newtonovy pohybové rovnice pro rotační pohyb, vypočítal požadovaný kroutící moment na výstupu z jednotlivých kloubů. Opět zde bude výpočet názorně ukázán jen na jednom příkladu, a to na výpočtu požadovaného kroutícího momentu pro 2. osu.

$$M_{ki} = I_{oi} \cdot \alpha_i \quad (3)$$

Do rovnice (3) se za moment setrvačnosti I_{oi} dosazují hodnoty z tabulky (tab. 11) a za α_i hodnoty z tabulky (tab. 12).

Tab. 12 – Úhlové zrychlení

úhlové zrychlení		
	dle DP	opt.
α_1 [rad/s ²]	30,1	4,5
α_2 [rad/s ²]	50,4	5
α_3 [rad/s ²]	62,3	18,5
α_4 [rad/s ²]	95	35
α_5 [rad/s ²]	77,3	47
α_6 [rad/s ²]	860,1	350

Hodnoty úhlového zrychlení byly nejdříve vzaty z diplomové práce (DP) [29], kde odpovídaly vypočítaným hodnotám úhlového zrychlení robota BCN3D MOVEO po úpravě. Výsledné kroutící momenty s tímto zrychlením dle DP jsou uvedeny v tabulce (tab. 13).



Příklad výpočtu požadovaného kroutícího momentu na výstupu pohonu s úhlovým zrychlením dle DP:

- Vstupní parametry pro výpočet:

$$I_{o2} = 2,95797 [kg \cdot m^2] \quad (\text{hodnota z tab.11})$$

$$\alpha_2 = 50,4 [rad/s^2] \quad (\text{hodnota z tab. 12})$$

- Dosazení do rovnice (3):

$$M_{k2} = I_{o2} \cdot \alpha_2 \quad (4)$$

$$M_{k2} = 2,95797 \cdot 50,4$$

$$M_{k2} = 149,08 [N \cdot m]$$

Tímto postupem byly vypočítány požadované kroutící momenty pro všechny osy robota viz tabulka (tab. 13).

Tab. 13 – Požadovaný kroutící moment pohonu dle α z DP

výpočet požadovaného kroutícího momentu pohonu dle DP			
	varianta1	varianta2	varianta3
Mk1 [N·m]	98,34	93,66	89,13
Mk2 [N·m]	149,08	142,08	135,31
Mk3 [N·m]	49,12	46,41	43,79
Mk4 [N·m]	6,05	5,59	5,15
Mk5 [N·m]	3,66	3,30	2,96
Mk6 [N·m]	5,41	4,43	3,57

Z tabulky (tab. 13) je patrné, že takovéto hodnoty jsou příliš vysoké a z pohledu vize budoucí konstrukce kloubů nevhodné. Důvod, proč kroutící momenty nabyly takových hodnot, je neúměrnost úhlových zrychlení vůči zde použitému modelu robota. Robot BCN3D MOVEO je podstatně lehčí, díky své konstrukci z plastových dílů, a jeho maximální zatížení na koncové přírubě činí 0,5 [kg]. Proto následovala optimalizace úhlových zrychlení za účelem snížení požadovaného kroutícího momentu na jednotlivých osách a také jejich sjednocení pro první, druhou a třetí osu a pro čtvrtou, pátou a šestou osu, protože požadavkem je vytvořit dva klouby právě pro tyto dvě skupiny os. Optimalizované hodnoty úhlového zrychlení lze vidět v tabulce (tab. 12), s kterými



následně proběhl totožný výpočet jako s hodnotami dle DP pomocí rovnice (3). Výsledky těchto výpočtů se nachází v tabulce níže (tab. 14).

Tab. 14 - Požadovaný kroutící moment pohonu po optimalizaci α

požadovaný kroutící moment pohonu po optimalizaci úhlového zrychlení			
	varianta1	varianta2	varianta3
Mk1 [N•m]	14,70	14,00	13,32
Mk2 [N•m]	14,79	14,10	13,42
Mk3 [N•m]	14,59	13,78	13,00
Mk4 [N•m]	2,23	2,06	1,90
Mk5 [N•m]	2,22	2,01	1,80
Mk6 [N•m]	2,20	1,80	1,45

Při porovnání výsledných hodnot kroutícího momentu pro jednotlivé varianty bylo usouzeno, že rozdíl není až tak velký, aby se vyplatilo snižovat maximální zatížení na koncové přírubě. Proto se zůstalo u varianty1, což odpovídá zatížení 5 [kg], jak je definováno v základním požadavku.

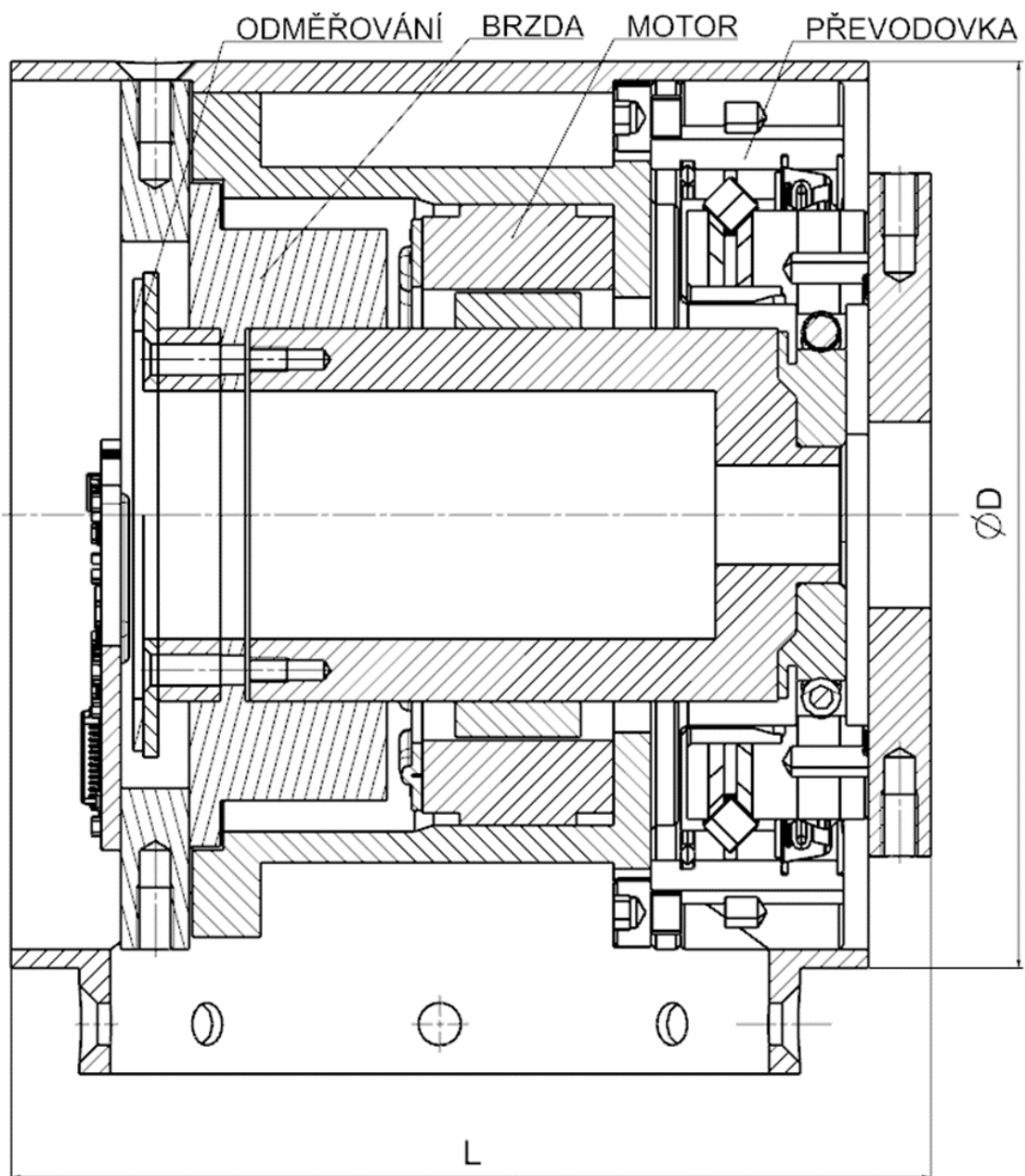
Na základě těchto požadovaných kroutících momentů viz tabulka (tab. 14) sloupec varianta1 se započalo s vyhledáváním vhodných kombinací motorů a převodovek a s prvotními konstrukčními návrhy a rozměrovými studii kloubů.

5 Varianty konstrukčního řešení

V předchozí kapitole (viz tab. 14) bylo vypočítáno, že minimální požadovaný kroutící moment na výstupu z kloubu je pro větší kloub, tedy pro osu první, druhou a třetí, $M_{k1,3} = 14,79 [N \cdot m]$ a pro menší kloub, který bude použitý pro osu čtvrtou, pátou a šestou, $M_{k4,6} = 2,23 [N \cdot m]$. Při hledání vhodných kombinací motorů s převodovkami byly tyto momenty vždy o několik procent navýšeny kvůli předpokladu, že výsledná sestava kloubu jak menšího, tak většího bude mít vyšší hmotnost, než která byla uvažována při tvorbě zjednodušeného modelu v CAD softwaru. Za tímto postupem byla snaha předejít situaci, kdy původně navržený pohon, po dokončení celkové konstrukce a následných kontrolních výpočtech, nebude vyhovovat svým výkonem a celá konstrukce by se musela navrhovat znovu.

Všechny navržené varianty jsou uvedeny v následujících podkapitolách. Jedná se ve všech případech o návrh menšího z kloubů, protože bylo zamýšleno, že větší kloub bude principiálně totožný. Při těchto návrzích byla věnována pozornost zejména výběru motoru, převodovky, vhodné brzdy a odměřování a následné, teoreticky možné uložení této sestavy do skořepiny, za účelem zjištění rozměrů sestavy, hmotnosti a ceny těchto základních komponent.

5.1 Návrh 1. varianty



Obr. 32 – Návrh kloubu varianta 1.



Na obrázku (obr. 32) se nachází návrh mechanické stavby kloubu v typickém provedení, které je nejčastěji využíváno v průmyslu. Pohon zde tvoří prstencový motor, harmonická převodovka, bezpečnostní brzda a odměřování. Motor disponuje jmenovitým momentem $0,185 [N \cdot m]$. Jde o motor ILM-E50x08 z řady TQ-RoboDrive. Jeho přednostmi jsou malé zástavbové rozměry, možnost uložení přímo v konstrukci do pouzdra a na dutý hřídel a snadné řízení. Použila se harmonická převodovka o převodovém poměru 50. U této převodovky se udává přesnost $1,5 [arc \text{ min}]$, tudíž je zaručená vysoká torzní tuhost a minimální mrtvý chod. Převodovka má již ve své konstrukci integrované křížové válečkové ložisko, takže není nutné přidávat do konstrukce kloubu další Odměřování je nepřímé za použití absolutního magnetického snímače od RLS. Toto odměřování má rozlišení $17 [bit]$ a přesnost $\pm 0,1 [deg]$. Brzda byla použita opět z řady TQ-RoboDrive. Jedná se o pružinovou elektromagnetickou brzdou s nominálním brzdícím momentem $0,6 [N \cdot m]$.

Výhodami této varianty kloubu jsou vysoká torzní tuhost, minimální vůle, minimální mrtvý chod, přesné odměřování. Lze tedy očekávat, že při použití těchto komponent se bude dosahovat velice přesného polohování. Další výhodou zde vytváří možnost průchozího středu skrz dutý hřídel, kudy se následně povedou veškeré kabely, signály a media. Je třeba ještě zmínit jako výhody rozměry a hmotnost (viz tab. 15) tohoto kloubu, které mezi zde uvedenými variantami nemají konkurenci.

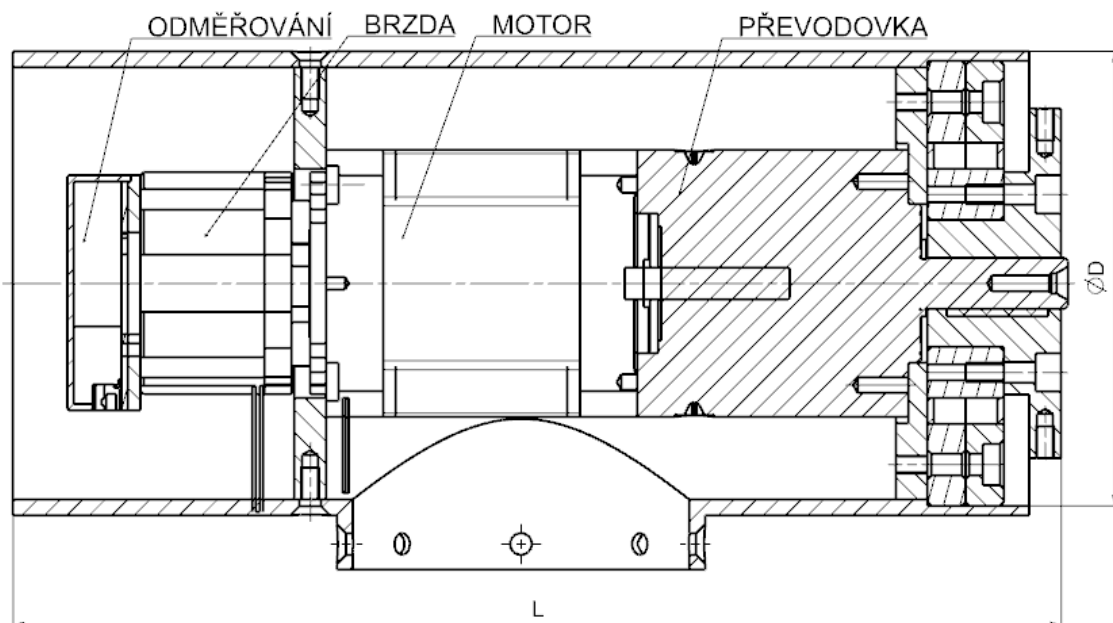
Mezi největší nevýhodu této varianty patří cena, a to je také důvod, proč tato varianta, i přes své nespočetné výhody oproti ostatním, nebyla zvolena jako nejlepší varianta pro finální řešení této diplomové práce.

V tabulce níže (tab. 15) jsou uvedeny základní parametry pro tuto variantu kloubu.

Tab. 15 - Parametry navrženého kloubu varianta 1.

návrh kloubu 1. varianta	
parametr [jednotka]	hodnota
jmenovitý moment [Nm]	7,4
hmotnost [kg]	0,96
délka L [mm]	74
$\varnothing D$ [mm]	73
cena hlavních komponent [Kč]	32 602

5.2 Návrh 2. varianty



Obr. 33 – Návrh kloubu varianta 2.

Navržený koncept kloubu na obrázku výše (obr. 33) je od základu sestavován z co nejlevnějších komponent. Sestavu pohonu tvoří bipolární krokový motor NEMA 17 s točivým momentem $0,5 [N \cdot m]$ při $450 [ot/min]$. Před motorem se nachází planetová převodovka GP42-S1 s převodem 7,07. Maximální vůle této převodovky je dle katalogu $46 [arc\ min]$, což je cca 30krát více než u harmonické převodovky použité v předešlé variantě. Ovšem tato planetová převodovka je o cca 20 000 Kč levnější než ona harmonická převodovka. Jako bezpečnostní brzda se zde použila elektromagnetická pružinová brzda s brzdícím momentem $0,35 [N \cdot m]$. Odměrování je zde nepřímé, tříkanálové, optické inkrementální s rozlišením 4000 CPR. Všechny tyto čtyři komponenty se zakupují jako jeden celek. V této sestavě se na základě rešerše kloubů použilo křížové válečkové ložisko, které se cenově pohybuje okolo 5 300 Kč, proto byl proveden výpočet, zda by dané zatížení přeneslo i obyčejné kuličkové ložisko. Z tohoto výpočtu vyplynulo, že je zde možná záměna za kuličkové ložisko 61904 s cenou cca 400 Kč.

Jednoznačnou výhodou tohoto řešení je celková pořizovací cena a při porovnání všech variant by se za výhodu dala považovat i relativně nízká hmotnost.

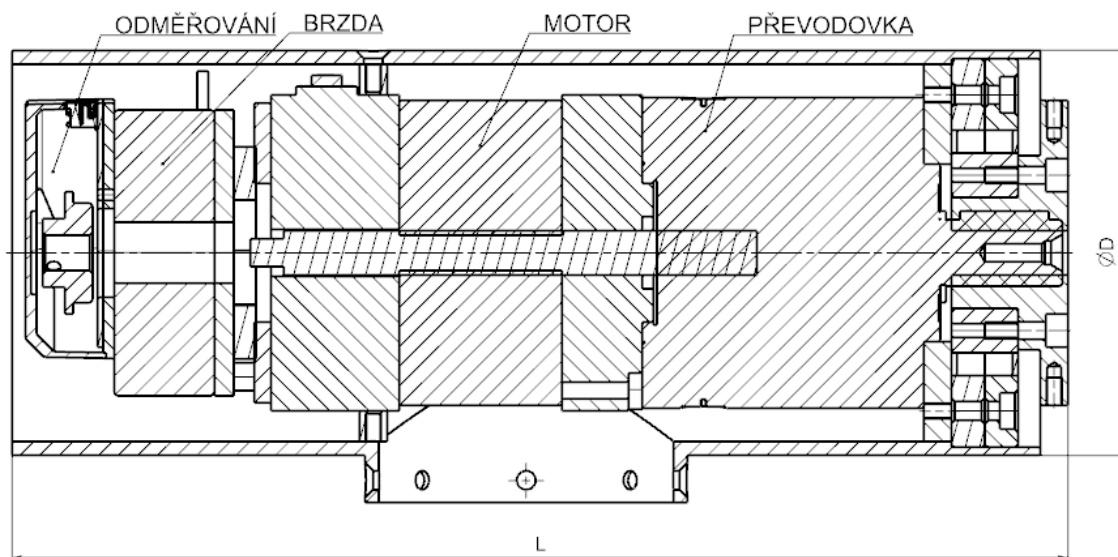
Nevýhod je zde celá řada. Nejzávažnější se ukázalo, že u takovéto varianty kloubu není možné provést kabely, signály a média středem skrz dutou hřídel, a právě tato vlastnost, je u modulárních rotačních kloubů žádoucí. Další nevýhodou, která z tohoto řešení vyplývá je velikost vůle v převodovce. Tato vůle bude způsobovat malou torzní tuhost a značný mrtvý chod. V kombinaci s tím, že je zde použité nepřímé odměřování, je zaručena nízká přesnost polohování. Mezi nevýhody se řadí i řízení polohování pohonu ve srovnání s prstencovým motorem.

Následující tabulka (tab. 16) zobrazuje základní parametry navrženého konceptu rotačního kloubu z obrázku (obr. 33).

Tab. 16 - Parametry navrženého kloubu varianta 2.

návrh kloubu 2. varianta	
parametr [jednotka]	hodnota
jmenovitý moment [Nm]	2,83
hmotnost [kg]	1,65
délka L [mm]	165
$\varnothing D$ [mm]	73
cena hlavních komponent [Kč]	11 470

5.3 Návrh 3. varianty



Obr. 34 – Návrh kloubu varianta 3.

Třetí navrženou variantou viz obr. 34 je kloub s pohonem složeným podobně jako u druhé varianty. Skládá se tedy z BLDC motoru s jmenovitým momentem $0,37 [N \cdot m]$



a planetové převodovky GP56-S1 s převodem 7,71. Vůle této převodovky, dle údajů z katalogu, je 35 [*arc min*], což už je méně než u předchozí varianty, ale stále tato vůle bude vytvářet velkou chybu při polohování. Je zde opět použita elektromagnetická pružinová brzda s brzdícím momentem 1,5 [*N · m*]. Dále pak odměřování v podobě nepřímého inkrementálního magnetického s rozlišením 16 384 CPR. Ložisko se použilo křížové válečkové, ale opět je možnost nahradit ho za menší, lehčí a levnější kuličkové ložisko.

Výhoda této varianty pohonu oproti krokovému motoru by byla v jeho řízení. Další výhodou je, že motor, převodovka, brzda a odměřování se dodává jako jeden celek, který by se následně uložil do skořepiny. Z pohledu ceny komponent je tato varianta velice příznivá pro nízkonákladové řešení.

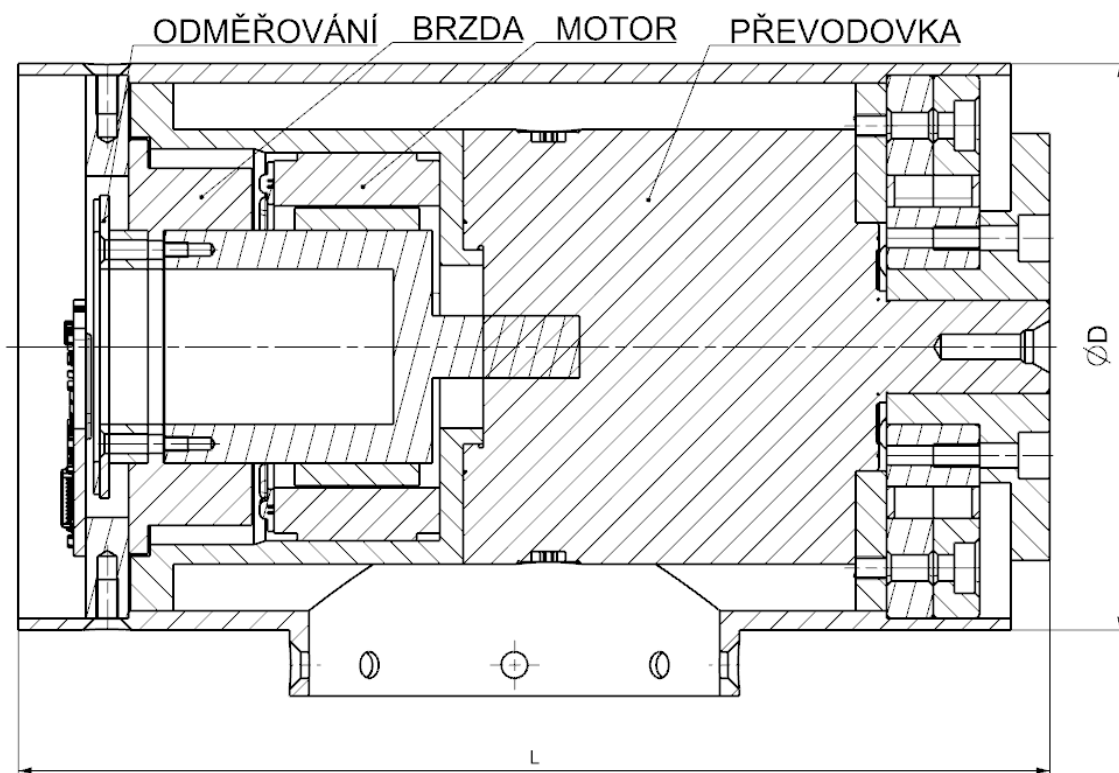
Nevýhody tohoto typu pohonu jsou opět jako u druhé varianty nemožnost průchozího středu pro vedení kabelů, signálů a medií. Pak je to vůle v převodovce, s čímž souvisí malá torzní tuhost a velký mrtvý chod. Následkem je nepřesné polohování. Zde použité komponenty jsou těžké a rozměrné, což zapříčiní výslednou velkou celkovou hmotnost a velké rozměry kloubu, čímž pak roste moment setrvačnosti kloubu a zvyšují se nároky na výstupní moment z kloubu.

Parametry návrhu kloubu 3. varianty jsou uvedeny v tabulce (tab. 17).

Tab. 17 – Parametry navrženého kloubu 3. varianta

návrh kloubu 3. varianta	
parametr [jednotka]	hodnota
jmenovitý moment [Nm]	2,57
hmotnost [kg]	2,4
délka L [mm]	190
øD [mm]	73
cena hlavních komponent [Kč]	13 500

5.4 Návrh 4. varianty



Obr. 35 – Návrh kloubu varianta 4.

Tato varianta (obr. 35) vznikla za účelem spojit výhodné řešení sestavy od TQ-RoboDrive (prstencový motor, brzda a odměřování) spolu s levnou planetovou převodovkou. Ovšem levné planetové převodovky z varianty druhé a třetí nelze zakoupit a použít samostatně, tak se musela použít jiná planetová převodovka, která se může použít samostatně. Pořizovací cena této převodovky se pohybuje okolo 9 000 Kč, to je ale stále méně než polovina ceny za harmonickou převodovku. Jako motor se zde tedy použil prstencový motor ILM-E50x14 s jmenovitým momentem $0,35 [N \cdot m]$, planetová převodovka PD040 s převodem 16, jejíž vůle v ozubení se uvádí dle katalogu 10 až 20 [*arc min*]. Brzda a odměřování jsou zde shodné jako u první varianty. Jedná se tedy o brzdu pružinovou elektromagnetickou a odměřování nepřímé absolutní magnetické s parametry viz 1. varianta řešení. Na výstupu je opět křížové válečkové ložisko, které lze zaměnit za vhodné kuličkové ložisko a cena celého kloubu se pak sníží o 5 000 Kč.

Výhodou tohoto řešení je snadné řízení, kompaktní sestava motoru s brzdou a odměřováním. Nižší hmotnost a zástavbové rozměry oproti BLDC motoru. V porovnání



s druhou a třetí variantou lze za výhodu považovat i nižší vůli v ozubení převodovky, tím se zvyšuje torzní tuhost a zmenšuje velikost mrtvého chodu.

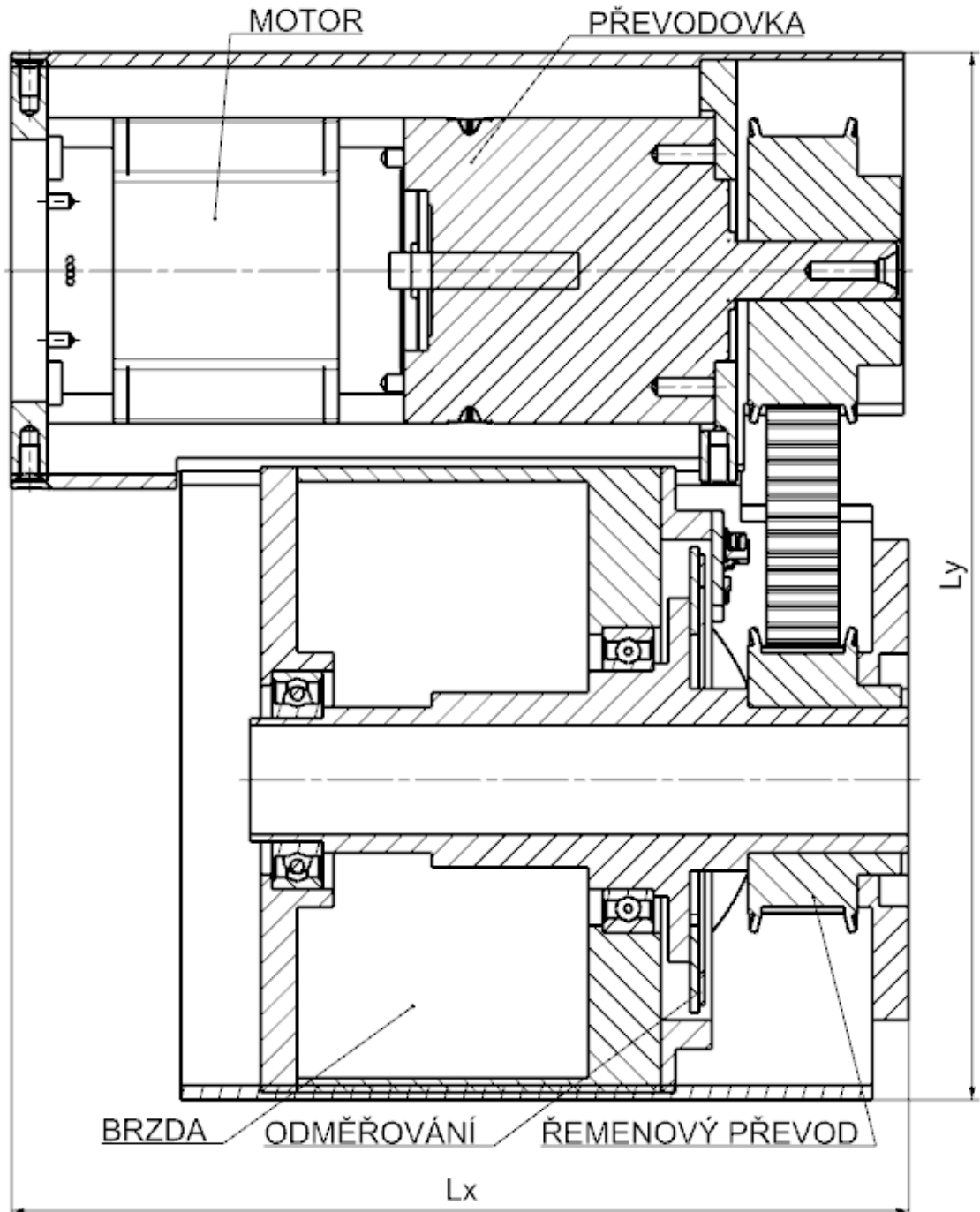
Stále nevyřešený problém s neprůchozím středem zde tvoří hlavní nevýhodu tohoto řešení. I když se vyrábí planetové převodovky s dutým hřídelem, tyto jsou příliš rozměrné a těžké, proto není vhodné je v tomto řešení využít. S použitím těchto výše uvedených komponent narostla cena celkové sestavy, která již přesahuje myšlenku nízkonákladového provedení.

Parametry tohoto návrhu z obrázku (obr. 35) jsou k nalezení v tabulce (tab. 18).

Tab. 18 – Parametry navrženého kloubu 4. varianta

návrh kloubu 4. varianta	
parametr [jednotka]	hodnota
jmenovitý moment [Nm]	4,48
hmotnost [kg]	1,9
délka L [mm]	155
øD [mm]	73
cena hlavních komponent [Kč]	25 000

5.5 Návrh 5. varianty



Obr. 36 – Návrh kloubu varianta 5.

Pro odstranění nevýhody, nemožnost průchozího středu, která byla společná u druhé, třetí a čtvrté varianty řešení byla navržena tato pátá varianta (obr. 36). Jedná se o velice netypické řešení modulárního rotačního kloubu robota. Veškeré doposud v této práci uvedené klouby byly koaxiálního provedení, což má značné výhody z pohledu



zástavbových rozměrů, rozložení hmot a bez nutnosti dalších převodů. U této varianty byl tedy zvolen nekoaxiální způsob řešení s vloženým řemenovým převodem, díky čemuž je zde možnost vložit dutý hřídel, kterým bude možné vést všechny kabely, signály a media. Pohon se skládá z krokového motoru NEMA 17 a planetové převodovky, které jsou totožné jako u 2. varianty. Řemenový převod o velikosti 1 tvoří dvě ozubené řemenice HTD – 3M, které mají díky svému profilu zubu přesnější chod. Na výstupní duté hřídeli je namontováno přímé absolutní magnetické odměřování s rozlišením 20 [bit]. Bezpečnostní elektromagnetická brzda, která je v prostoru na dutém hřídeli mezi ložisky má brzdný moment 7 [N · m]. Protože zde byla snaha o zmenšení zástavbových rozměrů, tak byla volena brzda na výstupním hřídeli, ale při výpočtech bylo zjištěno, že pro čtvrtou osu je nutné mít minimální brzdný moment cca 6 [N · m]. Z toho důvodu je brzda takto nepřijatelně rozměrná a pro první, druhou a třetí osu by takovéto řešení prakticky nebylo možné. Úpravou nejen tohoto problému se zabývá následující varianta řešení.

Jednoznačnými výhodami tohoto řešení jsou již zmíněný dutý hřídel a přímé odměřování, které kompenzuje vůle v převodovce a s tím spojené problémy (toto bude podrobněji rozebráno v další kapitole). Výhodou jsou také použité levné komponenty pohonu.

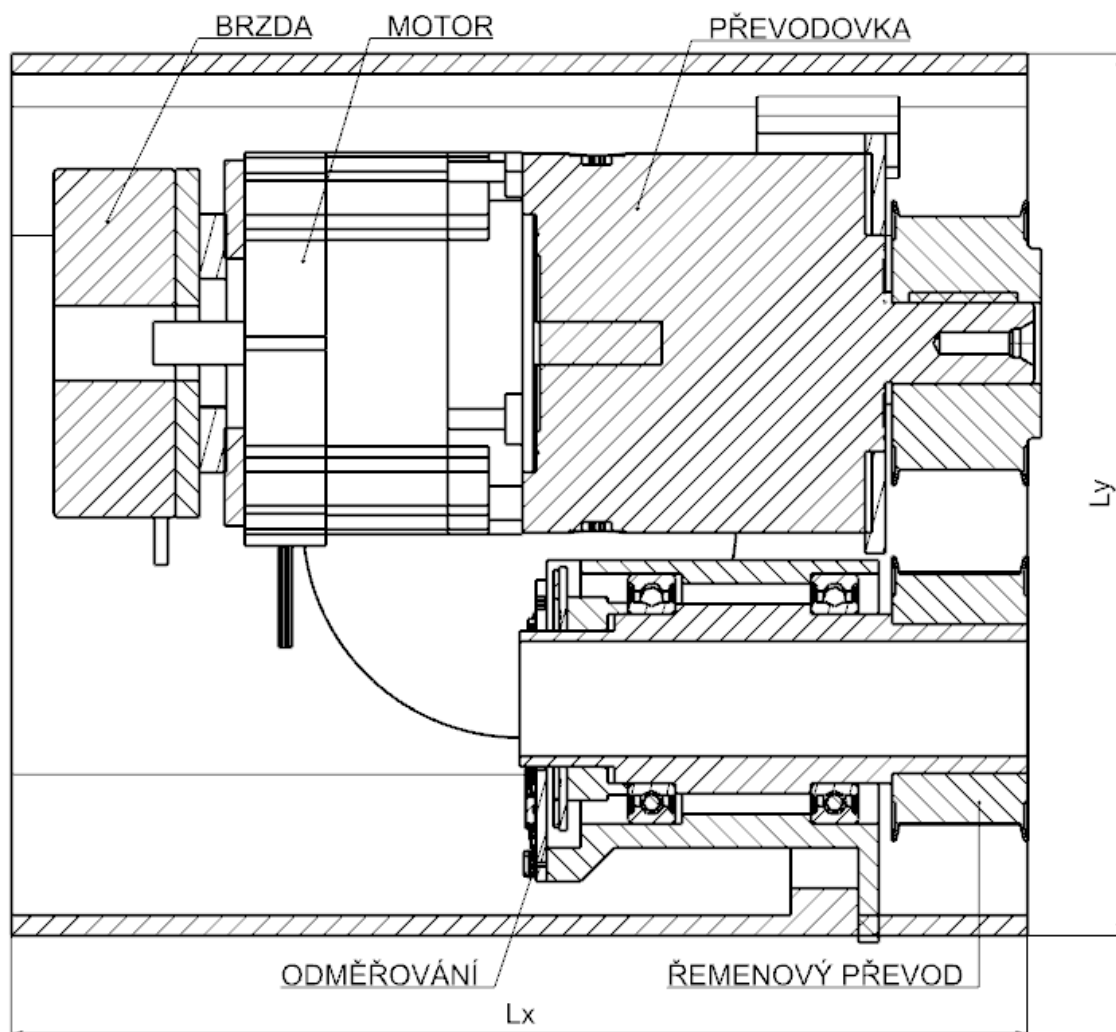
Nevýhod je zde opět mnoho: horší řízení krokových motorů, vložený převod a nutnost napínání řemene, vysoké nároky na brzdný moment, špatné rozložení hmot a s rostoucími rozměry rostoucí hmotnost kloubu. Při použití tohoto typu kloubu ve stavbě celého robota již vznikají kolize a omezení pohybu.

Parametry tohoto návrhu řešení (obr. 36) jsou uvedeny v tabulce (tab. 19).

Tab. 19 – Parametry navrženého kloubu 5. varianta

návrh kloubu 5. varianta	
parametr [jednotka]	hodnota
jmenovitý moment [Nm]	2,83
hmotnost [kg]	2,1
délka L_x [mm]	124
délka L_y [mm]	144
cena hlavních komponent [Kč]	11 125

5.6 Návrh 6. varianty



Obr. 37 – Návrh kloubu varianta 6.

Šestá varianta řešení (obr. 37) vychází z páté varianty. Brzda se přesunula na vstup motoru a tím se zajistilo, že není potřebný tak vysoký brzdný moment, jako když byla na výstupním hřídeli. Tudiž brzda je menší, lehčí a princip tohoto řešení je možné využít i pro první druhou a třetí osu. Pohon je zde opět tvořen krokovým motorem s planetovou převodovkou a řemenovým převodem o velikosti 1. Na obrázku (obr 36) lze vidět variantu, kde je použitý bipolární krokový motor NEMA 23 s jmenovitým momentem $0,6 [N \cdot m]$ při $225 [ot/min]$ a planetová převodovka GP56-S1 s převodem 7,71, jejíž vůle v ozubení se udává $35 [arc min]$. Ovšem tyto dvě komponenty tu jsou pouze z důvodu, že zde byl zvolený řemenový převod 1. Pokud by se řemenový převod zvolil vyšší, tak se mohou použít krokový motor NEMA 17 a planetová převodovka GP42-S2, čím se sníží celková hmotnost a rozměry kloubu. Dutý hřídel je uložený



na dvou stejných kuličkových ložiscích, které jsou uloženy v pouzdru. Předepnutí ložisek se v tomto stádiu návrhu ještě neřešilo. Odměrování se zde použilo od RLS přímé magnetické absolutní odměrování s rozlišením 19 [bit]. Přímé odměrování zajišťuje přesné polohování i přes nectnosti levné planetové převodovky a vloženého řemenového převodu.

Výhodami tohoto řešení jsou opět dutý hřídel pro vedení kabelů, signálů a medií, pak přímé odměrování pro přesné polohování a oproti 5. variantě jde o kompaktnější řešení. Samozřejmě sem patří i nízká pořizovací cena celého kloubu.

Nevýhodami jsou nepříznivé rozložení hmoty, nekoaxiální provedení, vyšší hmotnost a omezení pohybu některých os při sestavení celého robota s touto variantou kloubů.

Přehled parametrů navržené 6. varianty řešení lze vidět v tabulce níže (tab. 20).

Tab. 20 – Parametry navrženého kloubu 6. varianta

návrh kloubu 6. varianta	
parametr [jednotka]	hodnota
jmenovitý moment [Nm]	3,75
hmotnost [kg]	2,4
délka L _x [mm]	150
délka L _y [mm]	134
cena hlavních komponent [Kč]	10 250

5.7 Shrnutí všech variant řešení

Jako první zde bude uvedena přehledová tabulka s parametry (tab. 21) pro porovnání jednotlivých variant. Následně se porovnají se jejich torzní tuhosti a velikosti mrtvého chodu, shrnou se výhody a nevýhody jednotlivých návrhů variant řešení. Nakonec se vybere nejvhodnější varianta řešení s ohledem na počáteční požadavky.

Tab. 21 – Přehled parametrů variant řešení

shrnutí návrhů variant řešení						
parametr [jednotka]	1. var.	2. var.	3. var.	4. var.	5. var.	6. var.
jmenovitý moment [Nm]	7,4	2,83	2,57	4,48	2,83	3,75
hmotnost [kg]	0,96	1,65	2,4	1,9	2,1	2,4
dutý hřídel	ANO	NE	NE	NE	ANO	ANO
délka L (L _x - var. 5. a 6.) [mm]	74	165	190	155	124	150
øD (L _y - var. 5. a 6.) [mm]	73	73	73	73	144	134
cena hlavních komponent [Kč]	32 602	11 470	13 500	25 000	11 125	10 250



Při použití planetových převodovek v kombinaci s nepřímým odměřováním, jedná se tedy o variantu druhou, třetí a čtvrtou, není nikterak možné kompenzovat vůle v ozubení převodovky. Proto by při sestavení celého robota za použití těchto kloubů docházelo, vlivem nízké torzní tuhosti a velkého mrtvého chodu, k nepřesnosti polohování. První varianta, kde se použila harmonická převodovka, která má minimální vůli v ozubení (1,5 [arc min]), i při použití nepřímého odměřování, bude dosahovat vysoké přesnosti při polohování ale tento fakt se odráží na ceně takové převodovky. U varianty páté a šesté se použila levná planetová převodovka s vůli v ozubení 35 [arc min], ale zároveň se u těchto variant využilo přímé odměřování. Výhodou této kombinace je, že řídicí systém bude stále vědět o přesné poloze výstupní příruby, proto bude neustále kompenzovat chyby v polohování, které by vznikaly vlivem vůle v ozubení a poddajnosti řemenového převodu. Torzní tuhost u těchto dvou variant bude teoreticky nekonečná, pokud budeme brát v úvahu, že ramena robota jsou dokonale tuhá tělesa. Ovšem z praktického hlediska nekonečná být nemůže, protože je limitována konstrukcí a materiálovými vlastnostmi jak komponent převodovky, tak celého kloubu.

Mezi základní konstrukční faktory, a tedy výhody, které jsou od kloubů požadovány, patří: dutý hřídel a přímé odměřování nebo nízká hodnota vůle v převodovce. Tomuto vyhovují pouze varianty první, pátá a šestá, ostatní nemají v konstrukci dutý hřídel pro průchozí střed, ani přímé odměřování. Proto z tohoto pohledu z výběru finální varianty řešení vypadávají. Dalšími důležitými parametry pro porovnání variant je cena a hmotnost kloubu. Jak lze vidět v tabulce (tab. 21), tak co se týká hmotnosti, je nejlehčí první varianta. Ostatní, ještě uvažované, varianty jsou více jak dvakrát těžší. Naopak s cenou základních komponent pohonu je na tom první varianta téměř trojnásobně hůře než pátá a šestá varianta.

Závěrem shrnutí návrhů variant řešení musí být jedno nejvhodnější řešení kloubů, které se následně použije pro konstrukci dvou kloubů, které se použijí při stavbě robota. I přes to, že šestá varianta je jedna z nejtěžších a pro hladké řízení polohování je zde v pohonu nevhodně použitý krokový motor, tak je brána jako nejvhodnější navrženou variantou řešení právě šestá varianta. Je to především díky důrazu, zmíněném již v zadání této práce, na pořizovací cenu kloubu, a ta je u této varianty ze všech variant nejnižší. Dalším rozhodujícím faktorem byl dutý hřídel, kudy se následně povedou veškeré kabely, signály a media a také přímé odměřování, které zajistí velice přesné polohování i navzdory použití levných a neprecizních komponent v pohonu.

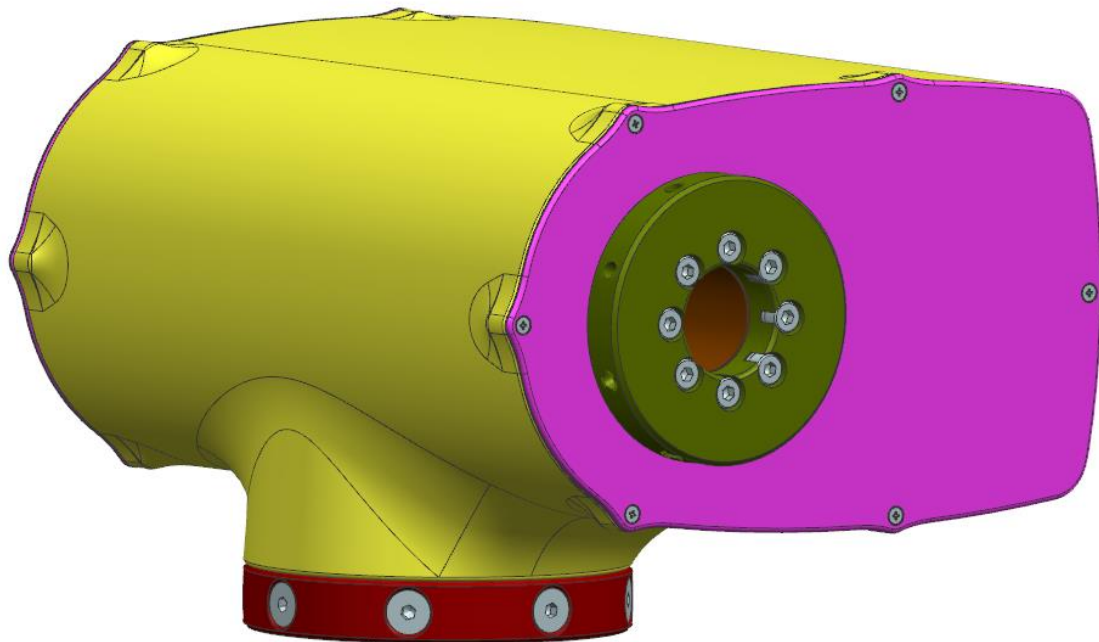
6 Vlastní řešení

V této kapitole bude podrobně popsána konstrukce modulárních rotačních kloubů ve dvou velikostech. Následovat bude představení modelu šestiosého robota s použitím těchto navržených kloubů. A nakonec budou uvedeny technické parametry tohoto robota.

6.1 Konstrukce modulárních rotačních kloubů robota

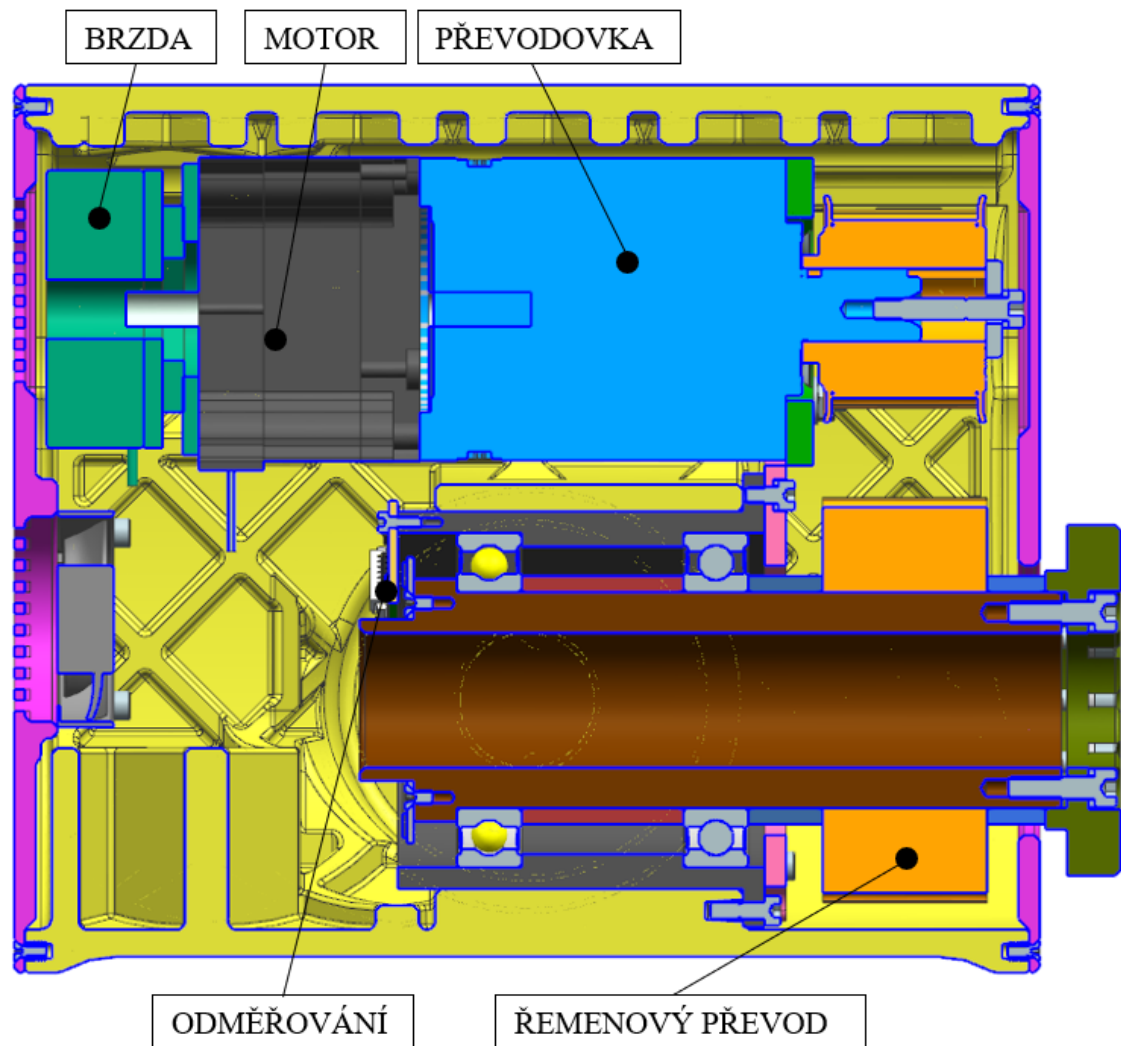
Konstrukce výsledného kloubu jak pro první, druhou a třetí osu, tak pro čtvrtou, pátou a šestou osu vychází z navržené 6. varianty uvedené v předchozí kapitole.

6.1.1 Konstrukce většího kloubu pro první, druhou a třetí osu



Obr. 38 – Modulární rotační kloub pro první, druhou a třetí osu

Na obrázku (obr. 39) lze vidět řez konstrukcí výsledného modulárního rotačního kloubu pro první, druhou a třetí osu. Pohon tohoto kloubu se skládá z bipolárního krokového motoru NEMA 23 ST5918X3008 s točivým momentem $0,49 [N \cdot m]$ při $750 [ot/min]$, planetové převodovky GP56-S2-43-SR s převodem 42,63 a řemenového převodu o velikosti 2. Je zde použita elektromagnetická pružinová brzda BWA-1,5-6,35 s brzdňým momentem $1,5 [N \cdot m]$.



Obr. 39 – Řez modelem konstrukce kloubu pro 1.,2. a 3. osu

Řemenový převod je realizován ozubenými řemenicemi a ozubeným řemenem s profilem HTD5M o šířce řemenu 25 mm. Níže jsou tyto komponenty se svým označením.

- Hnací řemenice: 24-5M-25
- Hnaná řemenice 48-5M-25
- Řemen HTD 5M-300-25 CXP CONTI SYNCHROFORCE

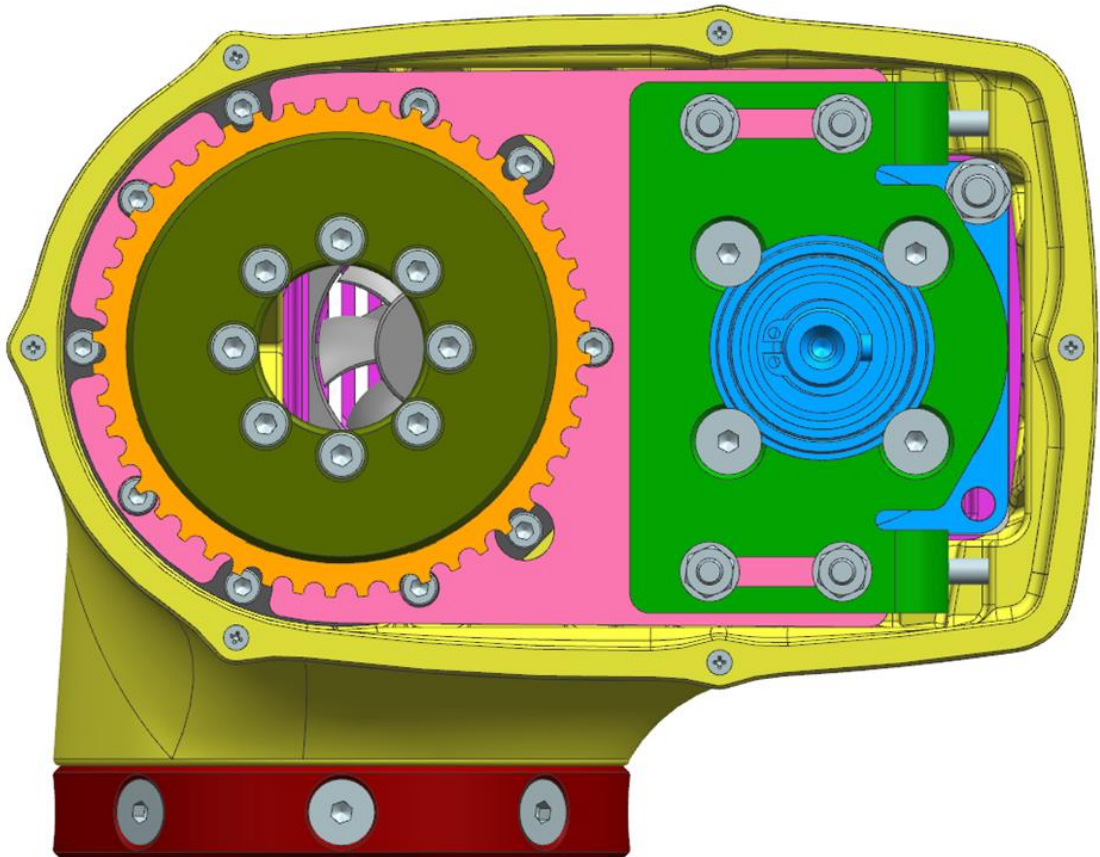
Návrh a kontrola tohoto řemenového převodu byly provedeny pomocí online konfiguratoru společnosti Continental [31]. Protokol je uveden k nahlédnutí v přílohách diplomové práce.



Hnací řemenice je uložena na výstupním hřídeli převodovky, radiálně zajištěná perem, které je součástí nakupované převodovky a axiální zajištění je pomocí pojistné desky, pružné podložky (PODLOŽKA 4 DIN 7980) a šroubu (ŠROUB M4x25 DIN 7984). Hnaná řemenice je uložena na dutém hřídeli, sevřena mezi dvěma distančními ocelovými kroužky. Na hnací řemenici jsou po stranách bočnice, které zaručují přesné vedení řemene. Po nasazení řemene na řemenice se musí řemen napnout pro jeho správnou funkčnost. Způsob napínání lze vidět na obrázcích (obr. 40 a 41). Jde o klasické napínání dvěma šrouby a následné zajištění polohy čtyřmi šrouby s maticemi. Tedy po uložení celé sestavy pohonu do skořepiny se napíná řemen dvěma šrouby (ŠROUB M4x20 DIN 912) na vypočítanou osovou vzdálenost řemenic, předepsanou na výkrese, a následně se tato poloha zajistí dotažením čtyř šroubů (ŠROUB M4x25 DIN 912) s maticemi (MATICE M4 DIN 934). Na obrázcích (obr. 39, 40 a 41) se světle zelený ocelový plech, který nese část pohonu s převodovkou a motorem, při napínání posouvá po světle růžové ocelové desce. Tato světle růžová deska je z obou stran přesně broušená pro zajištění rovnoběžnosti os řemenic, kvůli rovnoměrnému namáhání řemene a jeho správné funkčnosti.

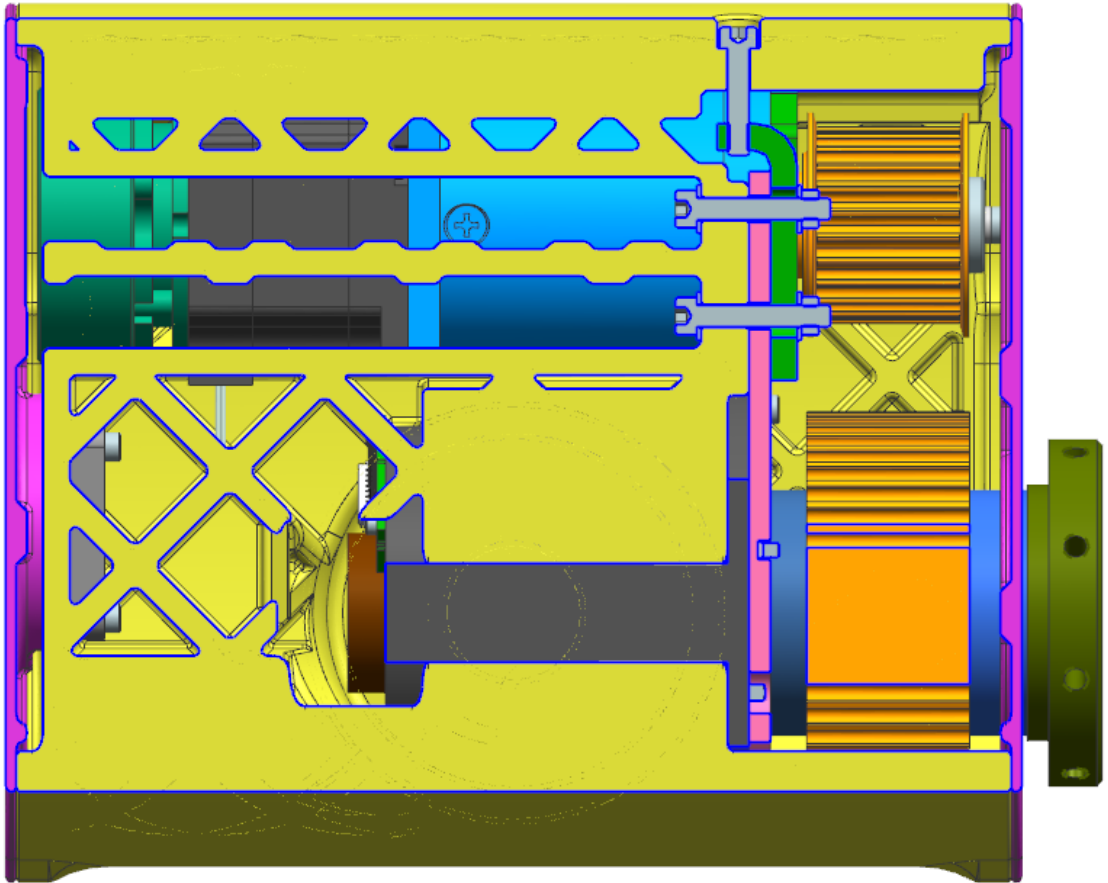
Při pohledu na dolní polovinu obrázku (obr. 39) je vidět výstupní část pohonu. Středem této části je dutý hřídel, který byl navržen tak, že jeho vnitřní průměr bude zaplněn z 60 %, když v něm budou provedeny veškeré kabely, signály a pneumatická hadice $\varnothing 6$ [mm] (pro kloub 1., 2. a 3. osy se vnitřní průměr hřídele dimenzoval dle 1. osy, kde bude maximální zaplnění hřídele). Hřídel je uložená ve dvou kuličkových ložiscích stejné velikosti, které byly v průběhu konstrukce, kvůli nutnosti zvětšování vnějšího průměru hřídele, několikrát změněny za větší, tedy vyšší hodnoty dovoleného zatížení. Výsledná použitá ložiska 61908–2RZ jsou tak pro tuto aplikaci předimenzována. Vnější kroužek ložisek je uložen v duralovém přesně obrobeném pouzdru (na obrázku tmavě šedá barva), které je zalisované do skořepiny. Předpětí v ložiscích se provádí pomocí nákrůžku mezi ložisky (v obrázcích označen tmavě červenou barvou), jehož délkový rozměr se před montáží kontroluje a jeho hodnota musí být délkový rozměr osazení pouzdra mezi ložisky $-0,05/-0,1$ mm, pro zajištění správného předpětí po smontování této části pohonu. Předpětí se tedy do ložisek vnese, když se na přední část dutého hřídele namontuje pomocí osmi šroubů (ŠROUB M4x16 DIN 912) výstupní příruba, čímž se celá tato část „stáhne“ dohromady. Na zadním konci dutého hřídele je přišroubován kroužek odměřování MRA053BC030DSE00 a na zadní část pouzdra se montuje čtecí hlava

odměřování MB053 SIZE E. Jde o odměřování magnetické absolutní s rozlišením 20 [bit]. Ostatní jeho parametry bude nutné nakonfigurovat až dle potřeb navrženého řízení robota, které není součástí této práce. Správná vzájemná montáž, a tedy následná správná funkčnost odměřování, je zajištěna integrovanou signalizační diodou na čtecí hlavě. K této diodě je jednoduchý přístup hned po sejmutí zadního víka kloubu.

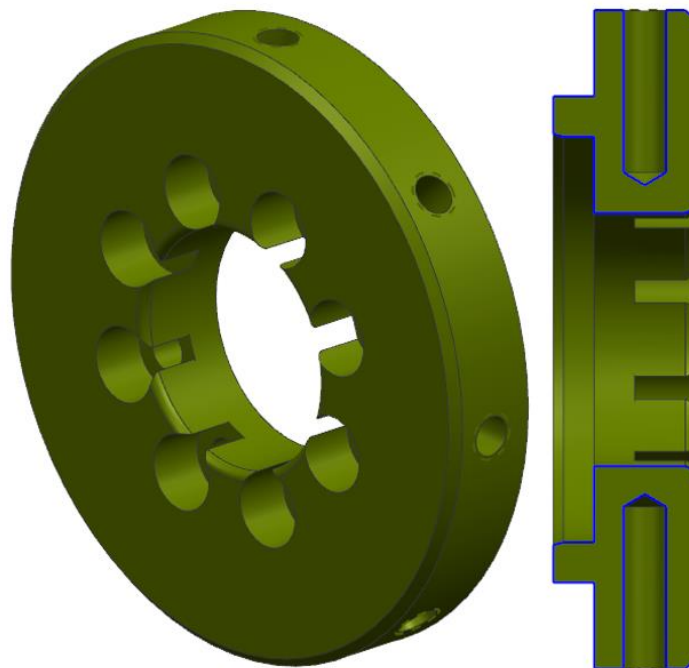


Obr. 40 – Pohled zepředu na napínání řemene

V obrázku (obr. 40) jsou odstraněny některé komponenty sestavy kloubu pro lepší pohled na systém napínání řemene.



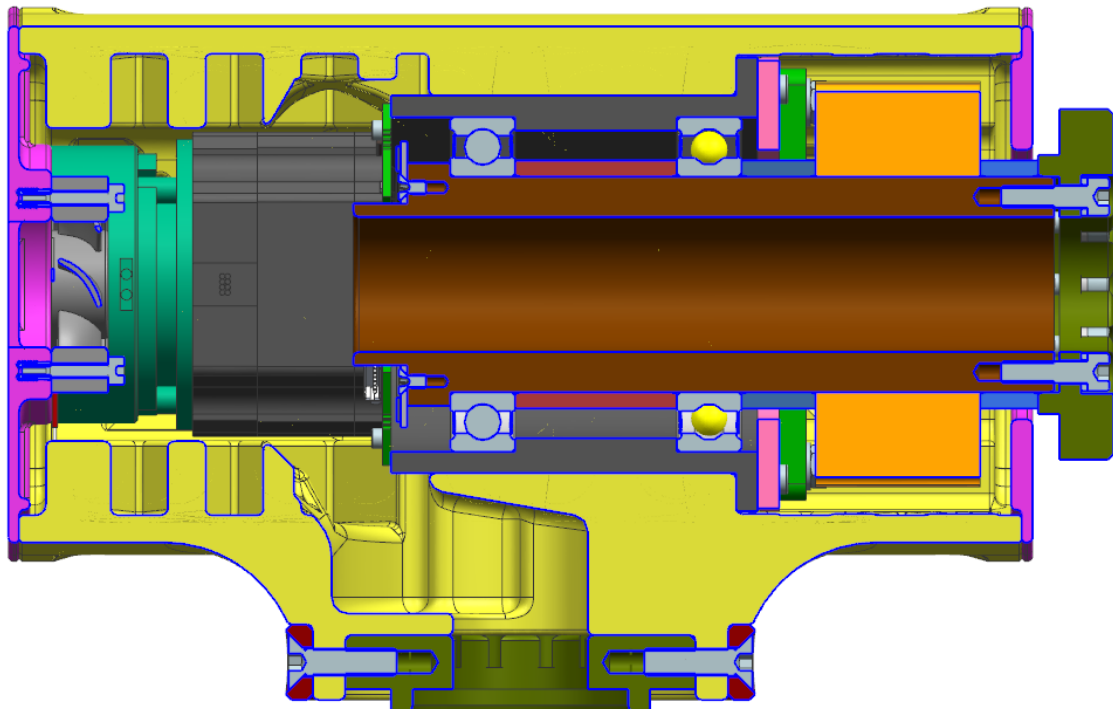
Obr. 41 – Pohled v řezu na mechanismus napínání



Obr. 42 – Výstupní příruba

Výstupní příruba (obr. 42), která slouží jak pro axiální zajištění hnané řemenice a ložisek, tak pro spojení jednoho modulárního rotačního kloubu s dalším nebo s další komponentou robota jako je rameno robota, základní příruba či koncová příruba (jen pro 6. osu). K tomuto spojení je po obvodě příruby osm závitových děr M5 s pravidelnou roztečí 45 [°].

Příklad spojení dvou kloubů lze vidět na obrázku (obr. 43), kde druhý kloub je demonstrován pouze jeho výstupní přírubou. Na připraveném obvodu ve spodní části skořepiny je nasazen ocelový kroužek o tloušťce stěny 5 [mm] s dírami po obvodu pro zápusťné šrouby (ŠROUB M5x20 DIN 7991), které jsou zašroubovány do připravených závitových děr po obvodu duralové výstupní příruby. Tímto principem vznikne dostatečně pevný spoj mezi dvěma klouby nebo kloubem a ramenem.



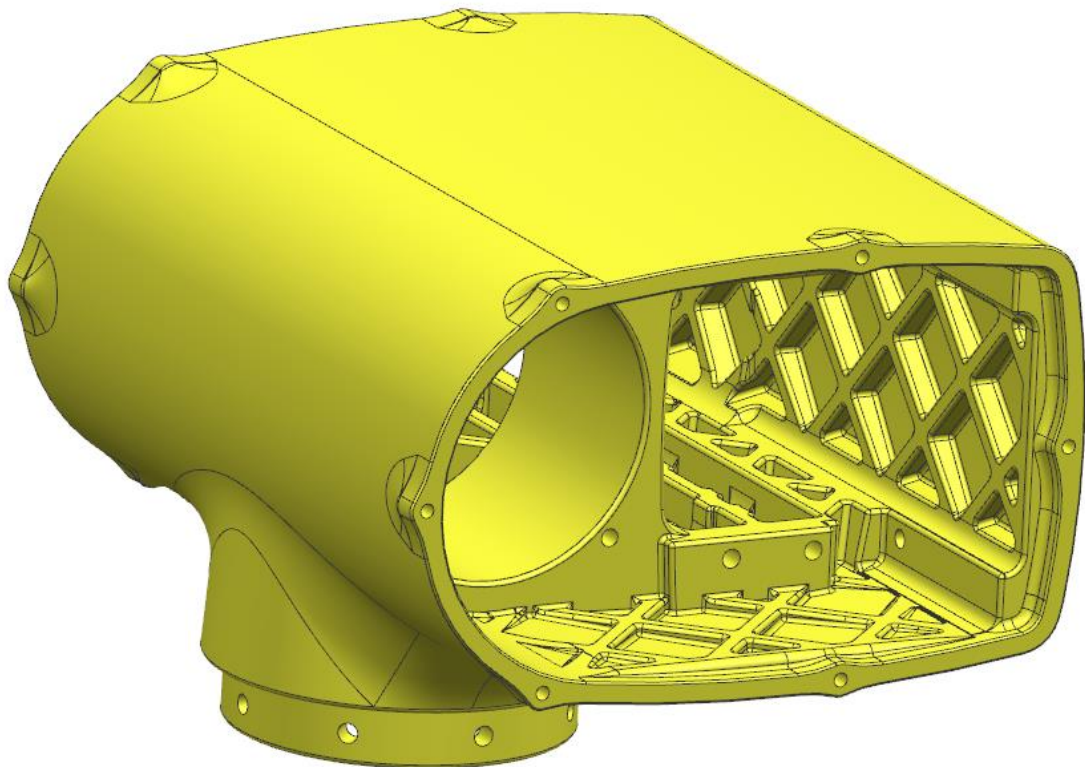
Obr. 43 – Pohled v řezu pro zobrazení spojení kloubů

Skořepina, ve které je uložen pohon a veškeré komponenty a která tvoří vlastní tvar celého kloubu, se bude vyrábět jako plastový 3D tištěný díl. Díky tomu bylo možné vytvořit velice tvarově složitou konstrukci pro potřeby uložení všech komponent sestavy pohonu a ostatních dílů. Samozřejmě konstrukce skořepiny byla provedena s ohledem na možnosti 3D tiskárny. Pro zajištění dostatečné tuhosti konstrukce zde bylo namodelováno vnitřní geodetické žebrování s tloušťkou žebra 5 [mm]. Na místo řezání

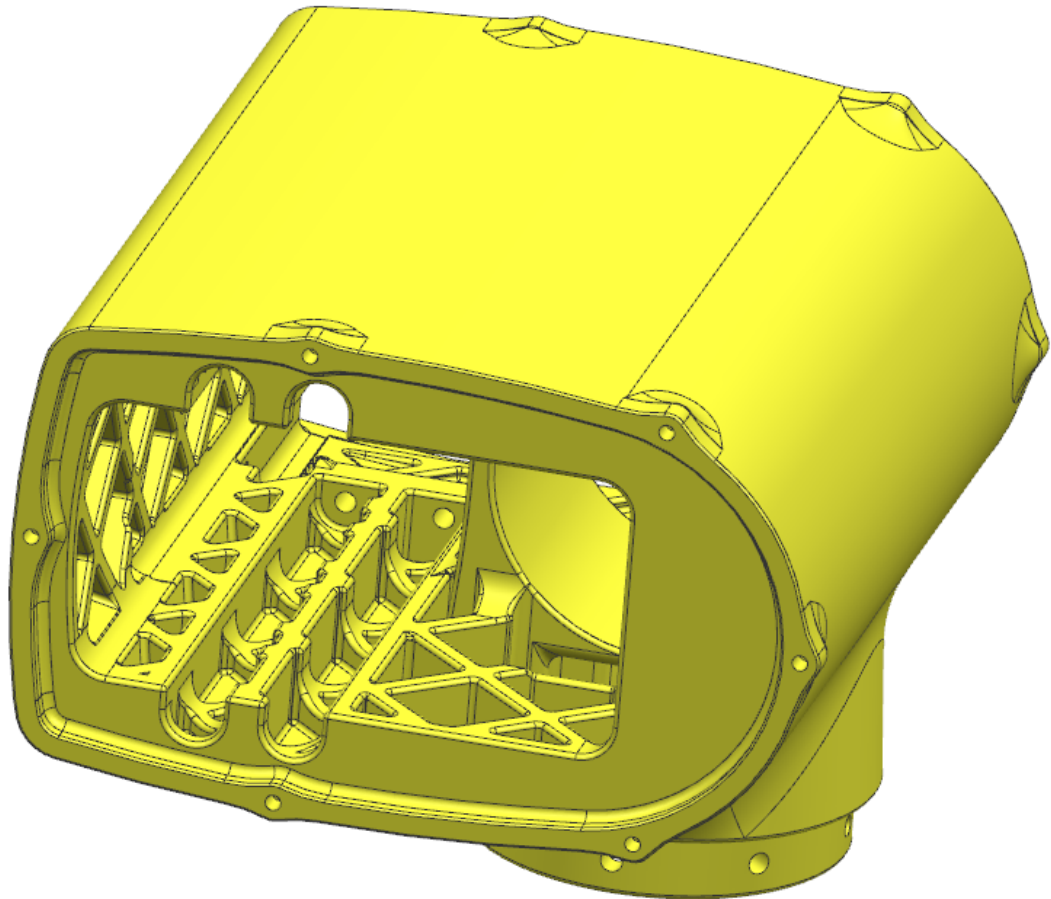
závitů přímo do plastu, které by se snadno poškodily, se do výtisku, do připravených otvorů, budou za tepla lisovat závitové vložky typu 40/DC viz obr. 44. Na následujících obrázcích (obr. 45, 46 a 47) lze vidět samotnou skořepinu. Průchod skořepinou pro vedení kabelů, signálů a medií je patrný z obrázku výše (obr. 43).



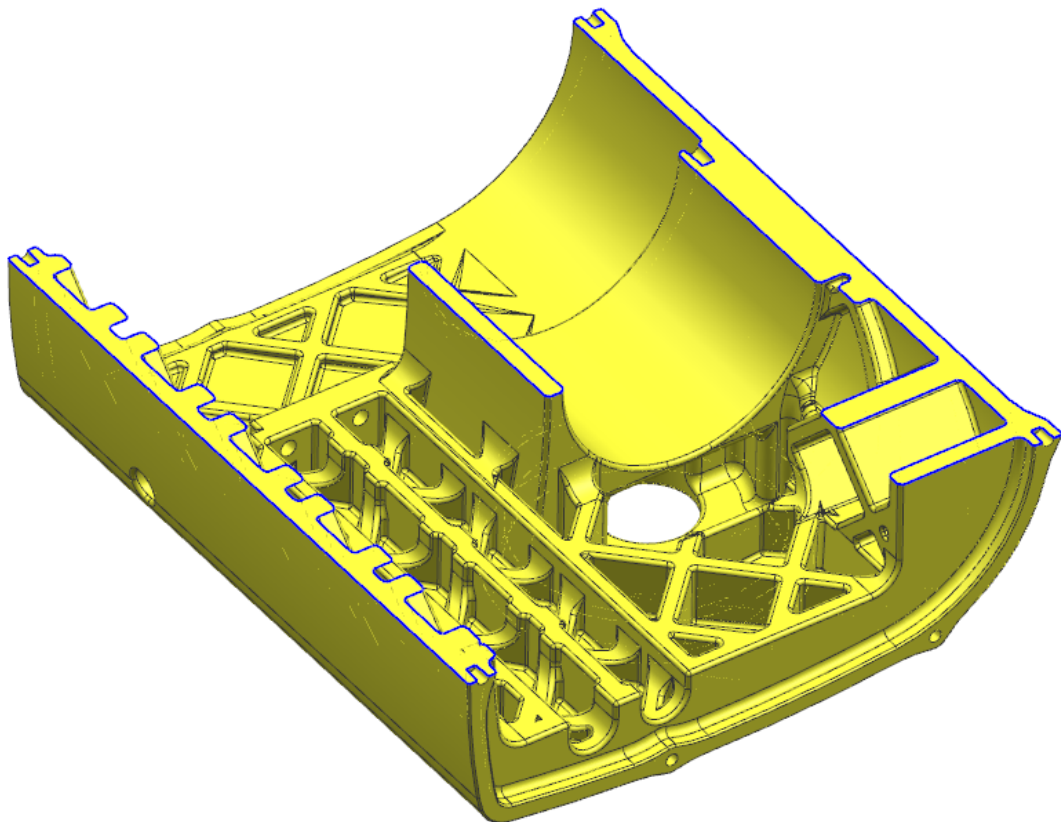
Obr. 44 – Závitová vložka typu 40/DC



Obr. 45 – Pohled na skořepinu většího kloubu zepředu

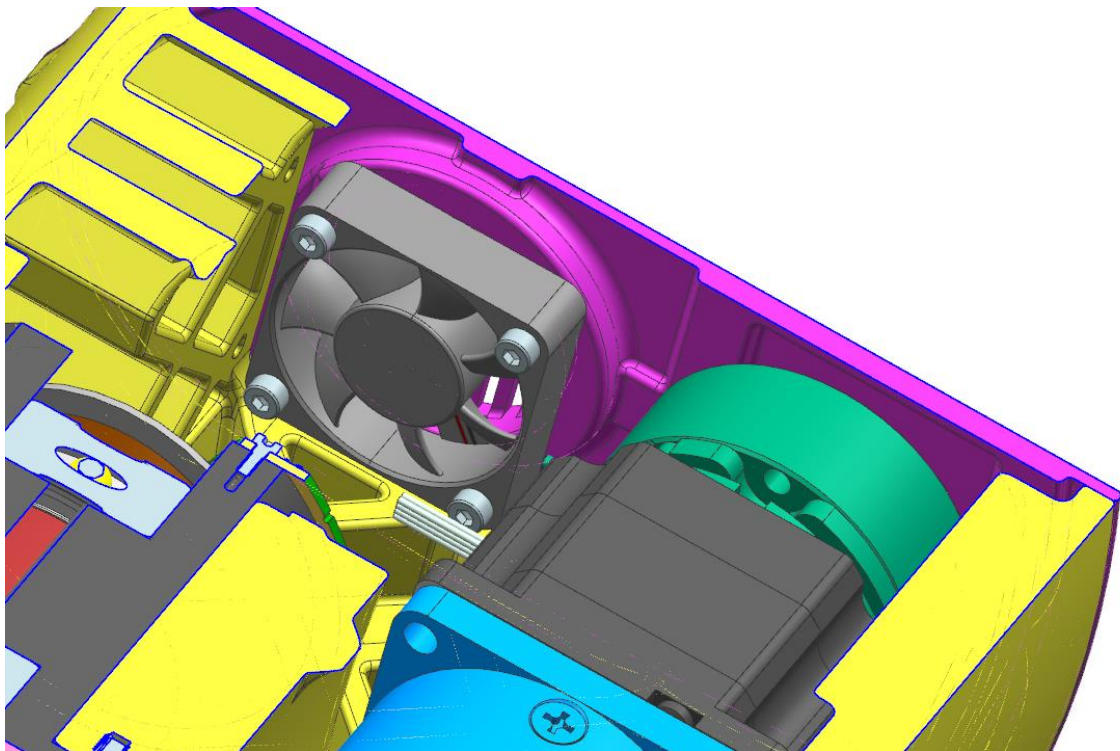


Obr. 46 – Pohled na skořepinu většího kloubu zezadu



Obr. 47 – Pohled na skořepinu většího kloubu v řezu

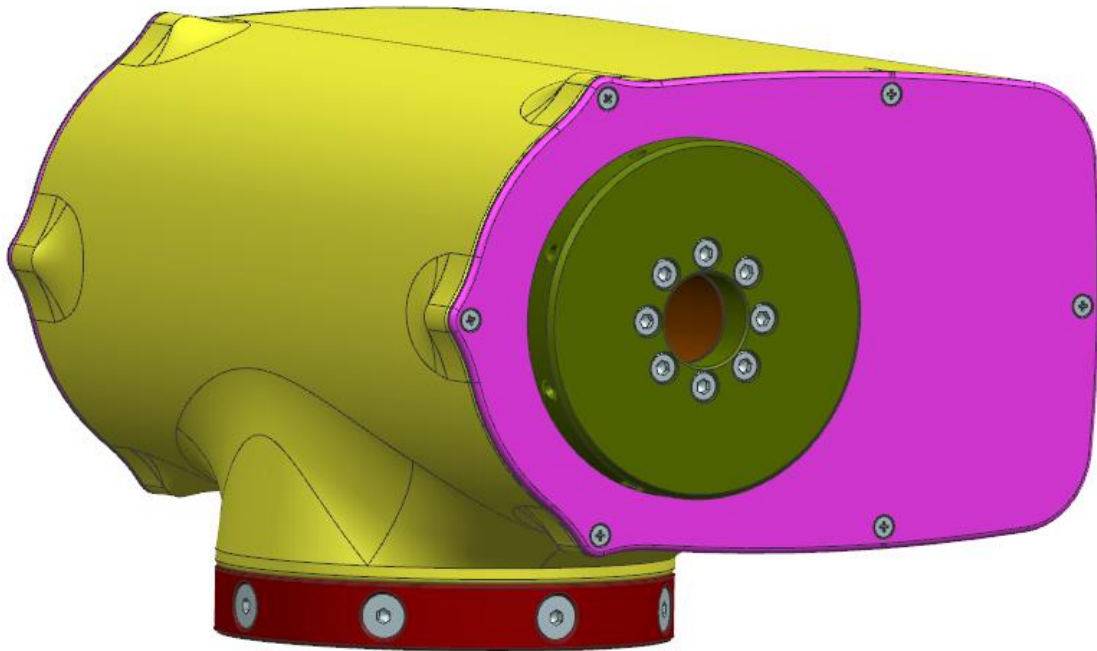
Přední a zadní víko kloubu (na obrázcích fialová barva) je také konstruováno jako plastový díl na 3D tisk. Jde čistě jen o krytování, jinak nemá žádnou funkci. V zadním víku jsou otvory pro možnost proudění vzduchu. A protože převodovka, motor a brzda jsou značným zdrojem tepla, je důležité zajistit odvětrávání vnitřního prostoru. K tomu zde slouží na zadním víku namontovaný ventilátor 40x40x10, 5V DC (obr. 48). Při montáži musí být v kloubu do budoucna zaručeno možné rozpojení konektoru přívodu energie k ventilátoru pro sejmutí zadního víka a následnou demontáž nebo servis některých komponent.



Obr. 48 – Pohled na uložení ventilátoru v kloubu

Další detaily konstrukce kloubu, které zde nebyly podrobně rozebrány, lze dohledat v příložené výrobní dokumentaci.

6.1.2 Konstrukce menšího kloubu pro čtvrtou, pátou a šestou osu



Obr. 49 - Modulární rotační kloub pro čtvrtou, pátou a šestou osu

Při pohledu na obrázky (obr. 38, 39, 49 a 50) je patrné, že větší a menší kloub jsou téměř totožné. Liší se pouze rozměry a parametry použitých komponent pohonu. V principu jsou naprosto stejné. Tudíž u tohoto kloubu již nebudou podrobně rozebrány jednotlivé uzly konstrukce. Budou zde zdůrazněny hlavně ty komponenty, které jsou odlišné od většího kloubu a obrázky konstrukce tohoto menšího kloubu.

Na obrázku (obr. 50) se nachází řez modelem konstrukce menšího modulárního rotačního kloubu pro čtvrtou, pátou a šestou osu. Pohon tohoto kloubu je složen z bipolárního krokového motoru NEMA 17 ST4118M1206 s kroučícím momentem $0,26 [N \cdot m]$ při $750 [ot/min]$, planetové převodovky GP42-S2-15-SR s převodem 15,45 a řemenového převodu o velikosti 2,857. Je zde použita elektromagnetická pružinová brzda BWA-0,35-5 s brzdovým momentem $0,35 [N \cdot m]$. Odměrování se zde použilo opět přímé absolutní magnetické kroužek odměrování MRA049BC025DSE00 a čtecí hlava odměrování MB049 SIZE E. Odměrování disponuje rozlišením $19 [bit]$.

Řemenový převod je proveden ozubenými řemenicemi a ozubeným řemenem s profilem HTD3M o šířce řemenu 15 [mm]. Níže jsou tyto komponenty se svým označením.

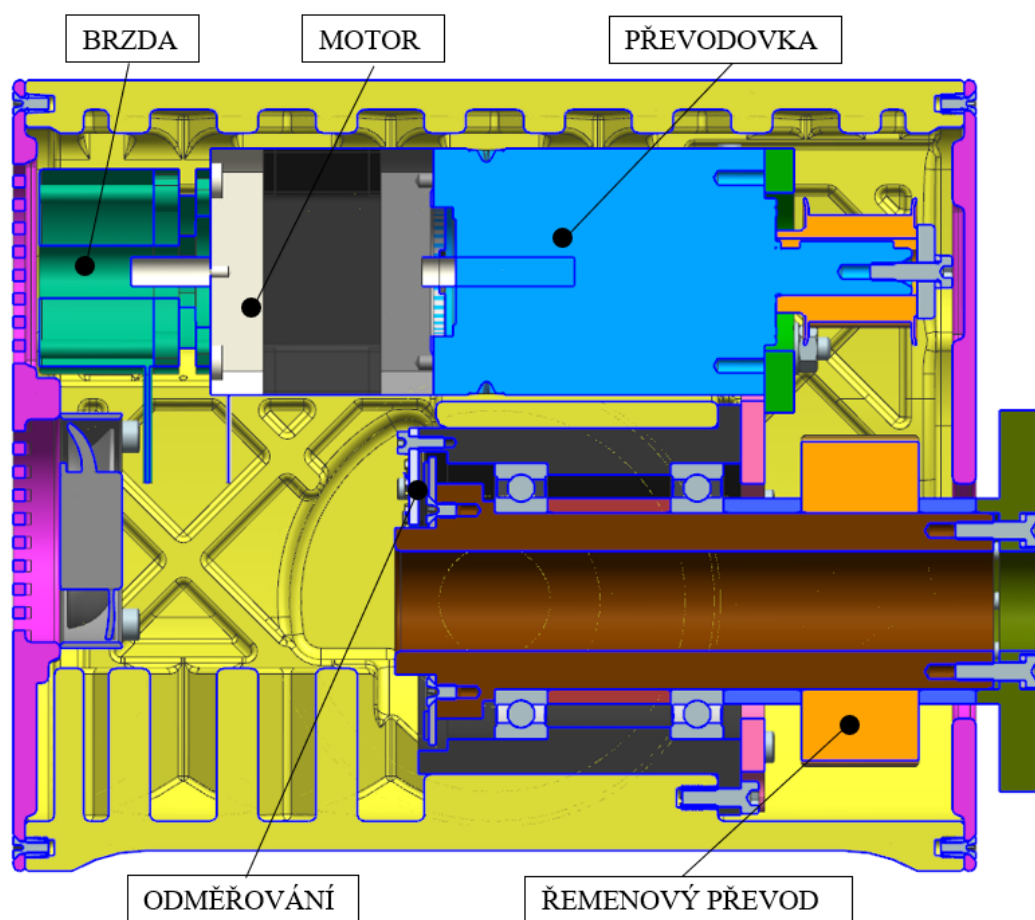
- Hnací řemenice: 21-3M-15
- Hnaná řemenice 60-3M-15
- Řemen HTD 3M-240-15 CXP CONTI SYNCHROFORCE

Návrh a kontrola tohoto řemenového převodu byl proveden pomocí online konfiguratoru společnosti Continental [31]. Protokol je uveden k nahlédnutí v přílohách diplomové práce.

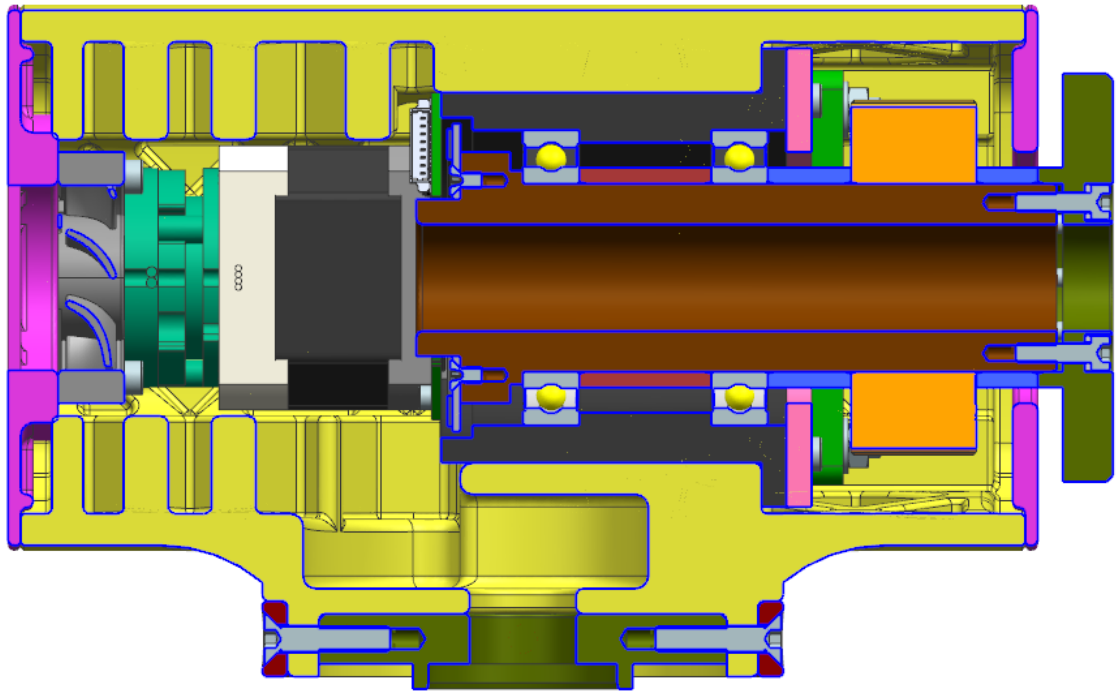
Vnitřní průměr dutého hřídele byl opět dimenzován tak, aby, konkrétně u kloubu čtvrté osy, byl zaplněn z 60 % při vedení všech kabelů, signálů a pneumatické hadice v této části robota.

Použila se zde ložiska typu 61906–2RZ, které jsou také kvůli velkému minimálnímu průměru hřídele násobně větší, než by bylo nutné, a proto jsou pro tuto aplikaci a zatížení předimenzované.

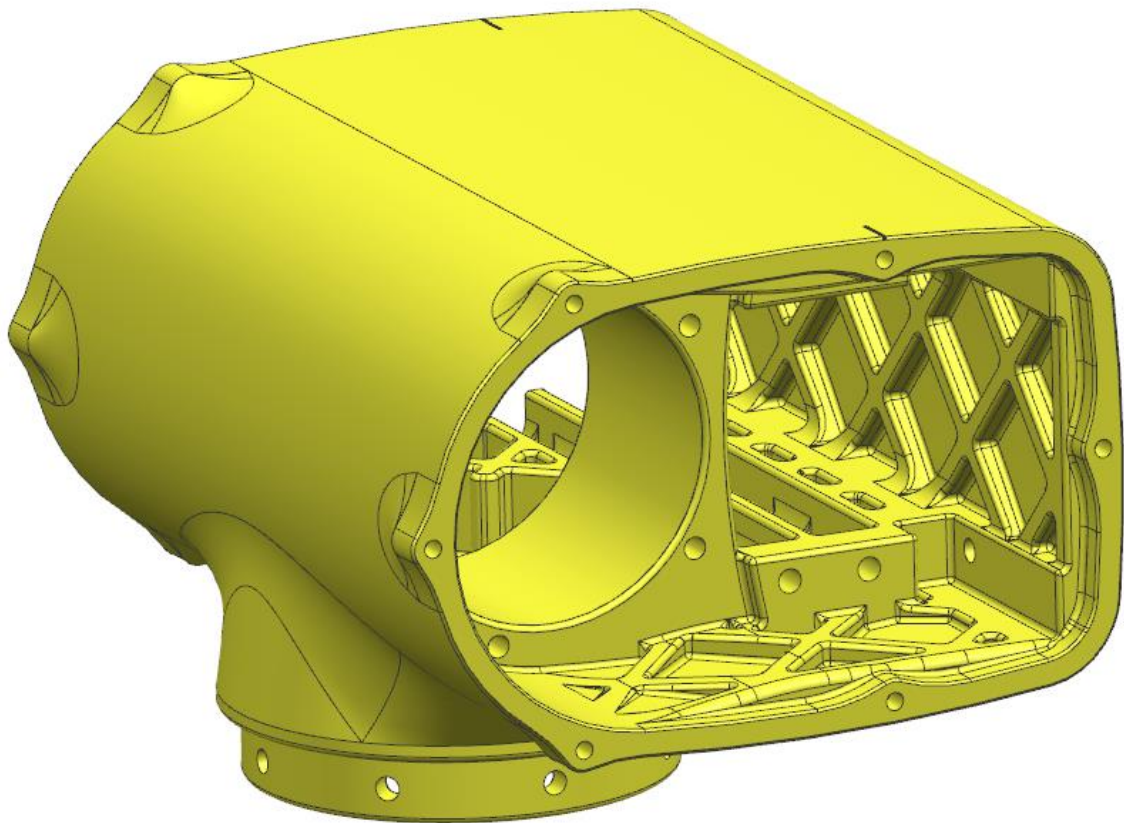
Ostatní komponenty kloubu jsou buď totožné, nebo zmenšené oproti většímu kloubu. Výkresová dokumentace k tomuto kloubu je opět přílohou této diplomové práce.



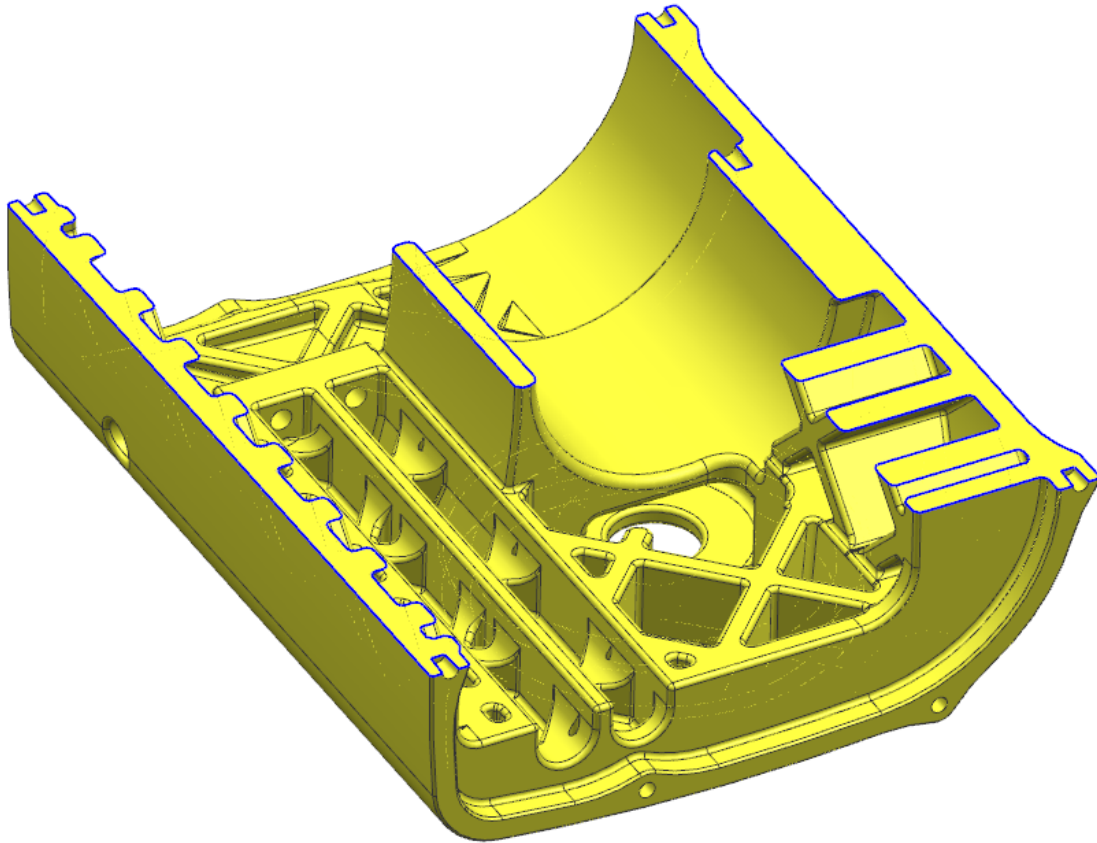
Obr. 50 - Řez modelem konstrukce kloubu pro 4., 5. a 6. osu



Obr. 51 – Pohled v řezu na průchod skořepinou pro vedení kabelů



Obr. 52 – Pohled na skořepinu menšího kloubu zepředu



Obr. 53 – Pohled na skořepinu menšího kloubu v řezu

6.1.3 Technické parametry kloubů

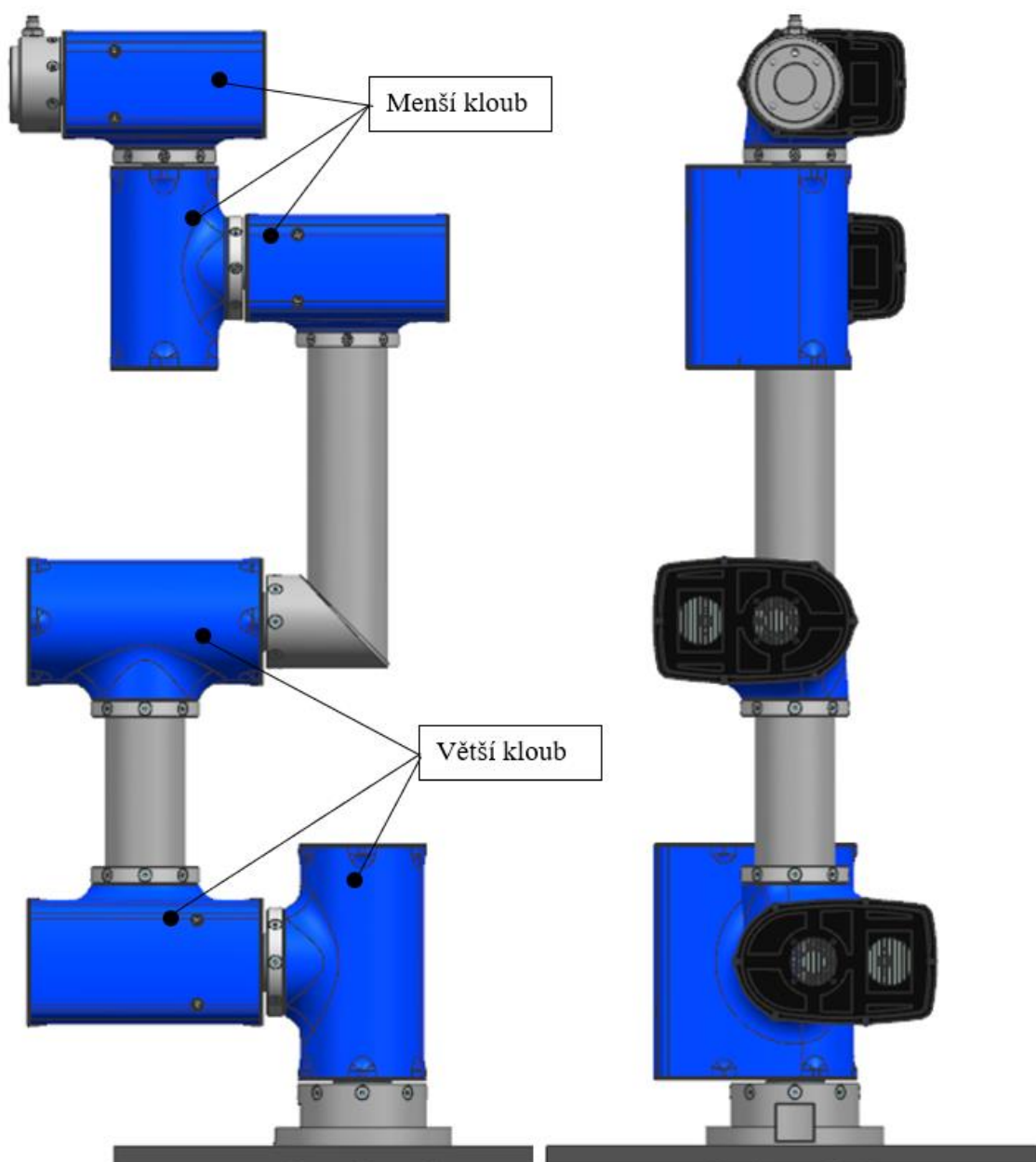
V tabulce níže (tab. 22) jsou uvedeny základní parametry dvou velikostí výše uvedených modulárních rotačních kloubů.

Tab. 22 – Přehled základních parametrů kloubů

základní parametry kloubů		
parametr [jednotka]	větší	menší
jmenovitý moment při ot. [Nm]	33,29	9,32
otáčky při jm. mom. [ot/min]	8,8	17
hmotnost [kg]	4,48	2,25
rozměry d x š [mm]	205 x 165	176 x 135
cena hlavních komponent [Kč]	12 360	10 930

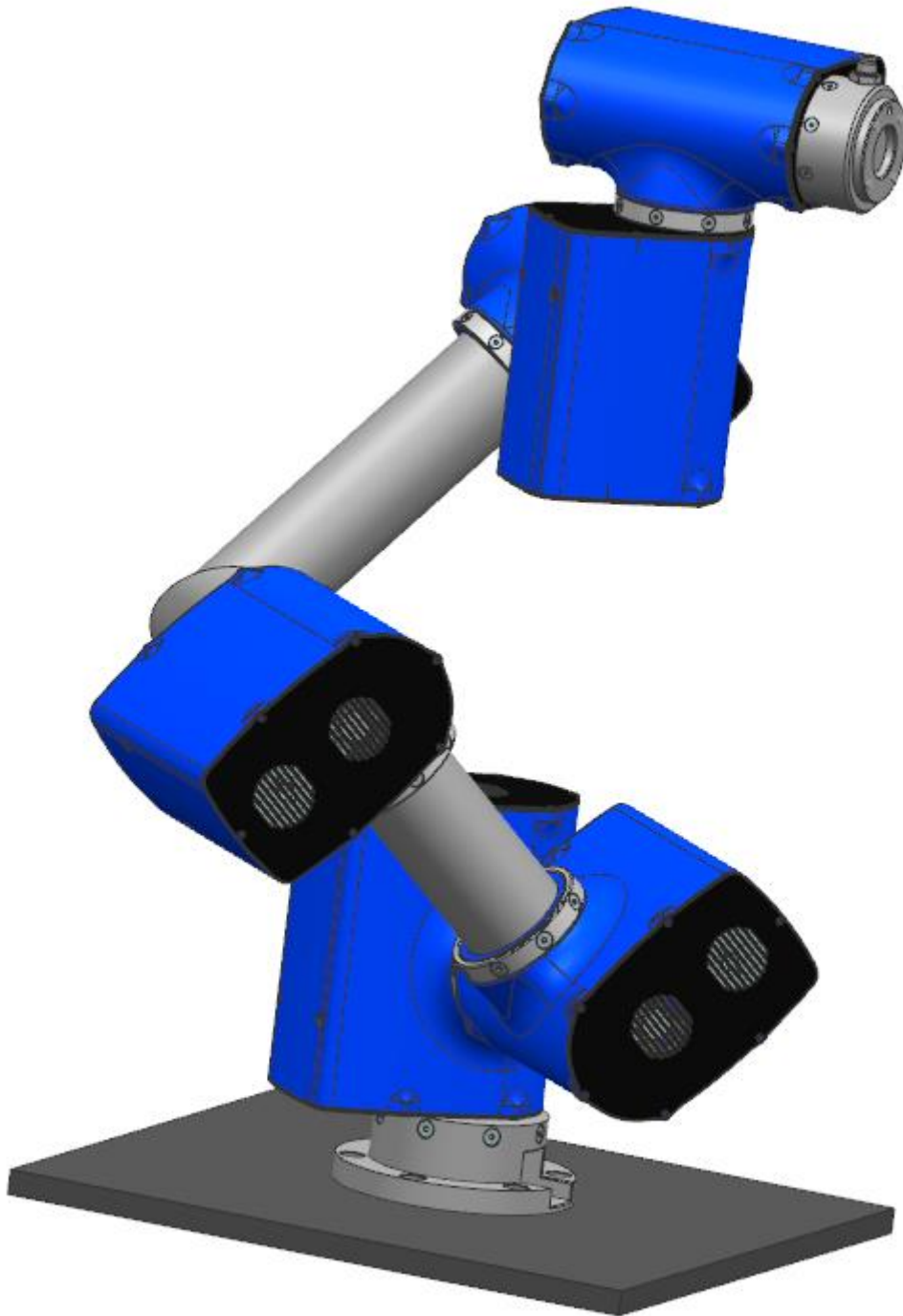
6.2 Sestava šestiosého robota s použitím navržených kloubů

Robot (obr. 54) je sestaven tak, že pro první, druhou a třetí osu se použil větší kloub a pro čtvrtou, pátou a šestou osu menší kloub. Kloub první osy je přes svoji výstupní přírubu spojen se základnou robota. Mezi klouby druhé a třetí osy je vloženo rameno tvořené duralovou trubicou o tloušťce stěny 10 [mm]. Kloub třetí a čtvrté osy spojuje úhlové rameno, které je navrženo jako svařovaný prvek z duralových silnostěnných trubek. Na výstupní přírubě kloubu šesté osy je namontována koncová příruba.

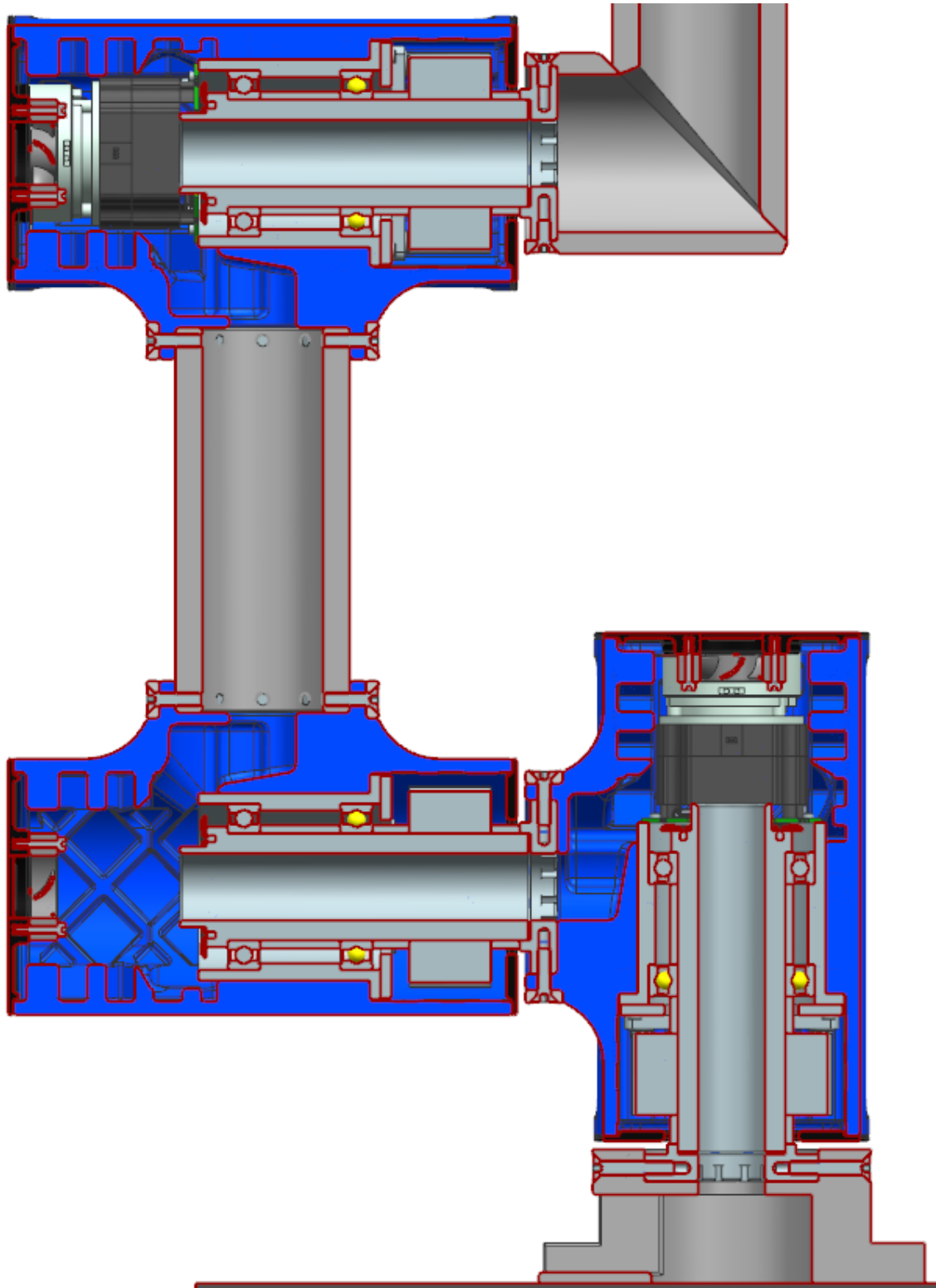


Obr. 54 – Sestava robota

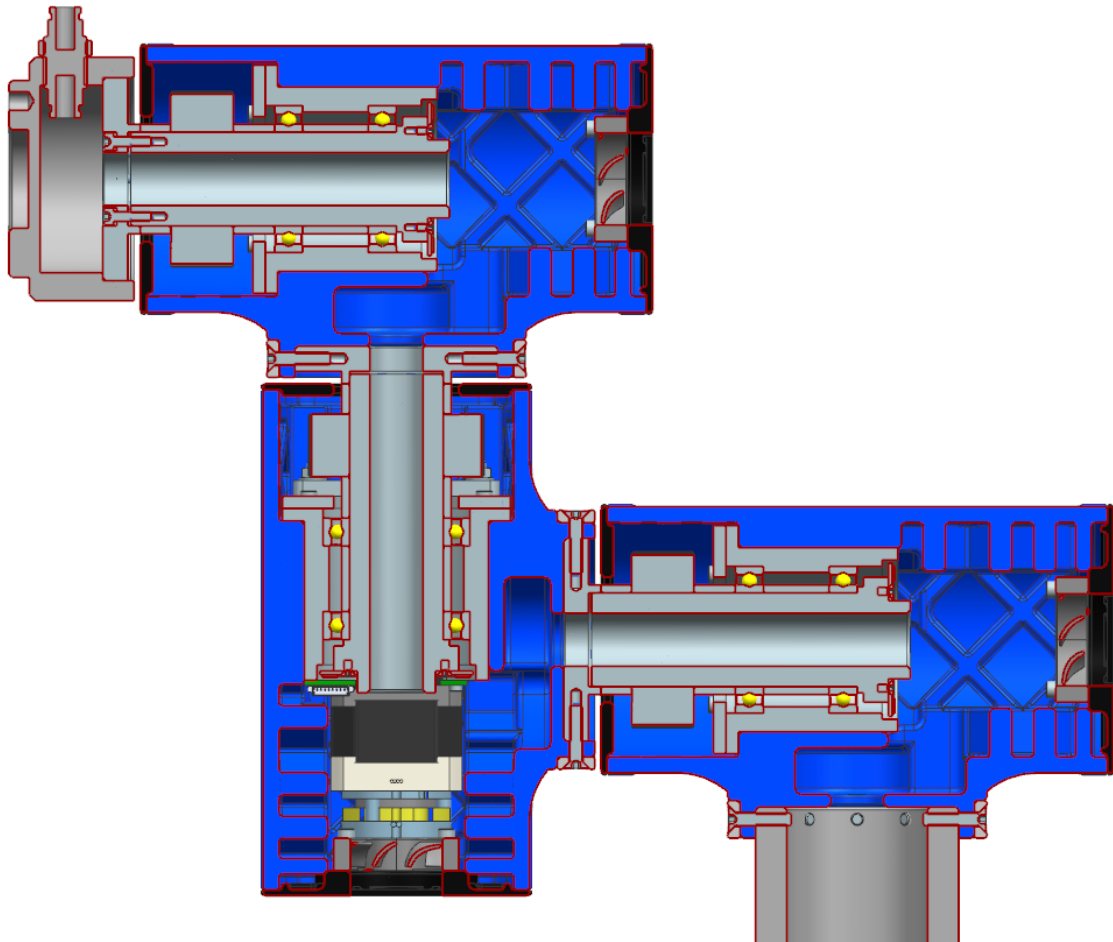
Při montáži tohoto robota se musí brát v úvahu fakt, že veškeré kabely signály a média by mělo být možné mezi jednotlivými klouby rozpojit pro snadnější kompletaci, aby se při jakékoliv demontáži jednotlivé části robota (rameno či klouby) nemusela demontovat celá sestava robota.



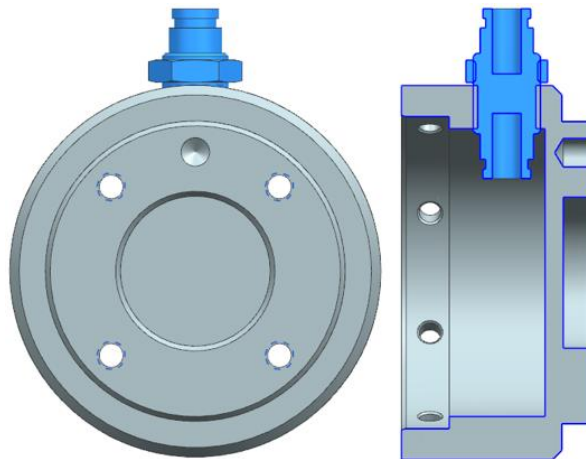
Obr. 55 – Sestava robota v obecné poloze



Obr. 56 – Sestava robota v řezu, zobrazení spojení kloubů 1., 2. a 3. osy



Obr. 57 – Sestava robota v řezu, zobrazení spojení kloubů 4., 5. a 6. osy



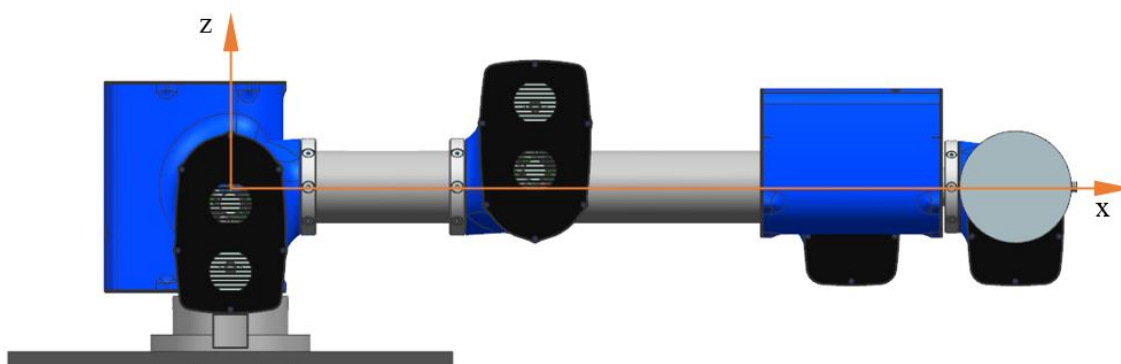
Obr. 58 – Koncová příruba robota

Na obrázku (obr. 58) se nachází koncová příruba, která se použila v sestavě robota. Tato příruba je konstruována dle koncové příruby robota společnosti Universal Robots UR5e [3]. Důvodem je, aby byly totožné přípojovací rozměry pro různé uchopovací a nástrojové hlavice, které bude následně možné od této společnosti zakoupit. Oproti koncové přírubě UR5e byla tato doplněna o nástrčnou spojku KQB2E-00 od SMC pro průměr pneumatické hadice 6 [mm].

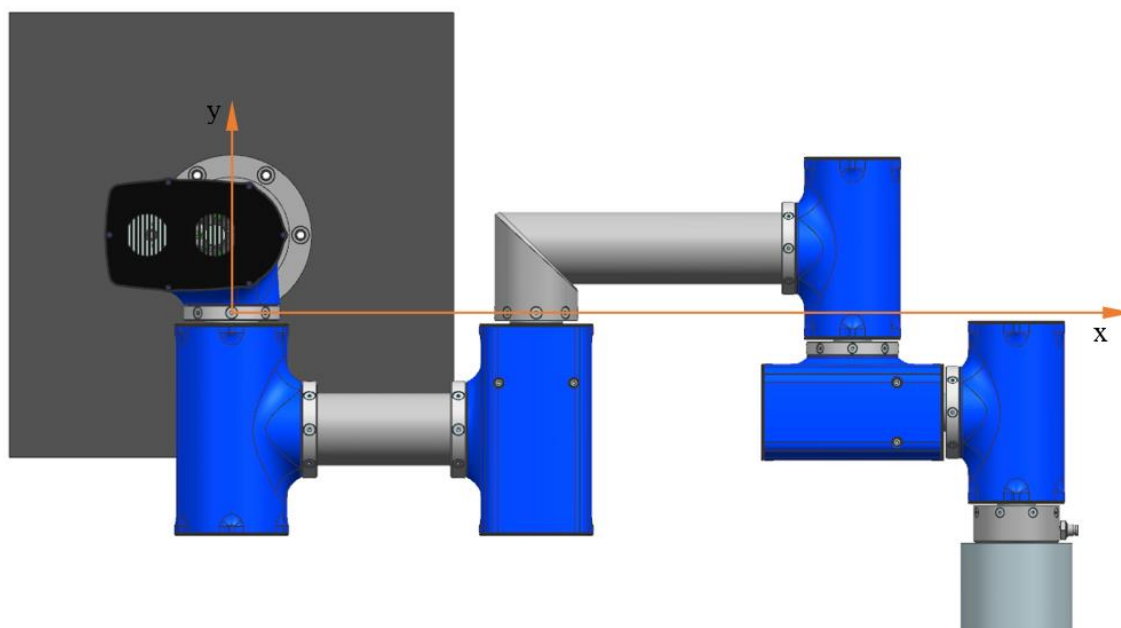
6.3 Technické parametry robota

6.3.1 Úhlové zrychlení

Po sestavení výsledného modelu konstrukce robota bylo nutné, pro výpočet skutečných maximálních úhlových zrychlení, znovu zjistit momenty setrvačnosti vztažené k jednotlivým osám robota. Na obrázcích (obr. 59 a 60) je uvedena poloha robota pro výpočet momentu setrvačnosti vzhledem ke druhé ose. Celý tento výpočet probíhal totožně jako při návrhových výpočtech v kapitole 4. V tabulkách jsou k porovnání uvedeny hodnoty z návrhového výpočtu, ze kterých se vycházelo při volbě pohonu.



Obr. 59 – Poloha pro výpočet momentu setrvačnosti k ose 2 (bokorys)



Obr. 60 – Poloha pro výpočet momentu setrvačnosti k ose 2 (půdorys)



Tab. 23 – Moment setrvačnosti vztažený k jednotlivým osám rotace (NX)

moment setrvačnosti k ose rotace (NX)		
	návrh	model
Io1 [kg·m ²]	3,267	6,790
Io2 [kg·m ²]	2,958	5,868
Io3 [kg·m ²]	0,789	1,855
Io4 [kg·m ²]	0,064	0,183
Io5 [kg·m ²]	0,047	0,141
Io6 [kg·m ²]	0,006	0,007

Tab. 24 – Výstupní krouticí moment z jednotlivých kloubů

krouticí moment na výstupu daného kloubu		
	návrh	model
Mk1 [N·m]	14,70	33,29
Mk2 [N·m]	14,79	33,29
Mk3 [N·m]	14,59	33,29
Mk4 [N·m]	2,23	9,32
Mk5 [N·m]	2,22	9,32
Mk6 [N·m]	2,20	9,32

Výsledné úhlové zrychlení (tab. 25) se počítalo dle rovnice (5), která vychází z Newtonovy pohybové rovnice pro rotační pohyb. Krouticí momenty na výstupu z kloubů byly sníženy o 10 % kvůli zohlednění možných ztrát v mechanických částech pohonu.

$$\alpha_i = \frac{(0,9M_{ki})}{I_{oi}} \quad (5)$$

Tab. 25 – Úhlové zrychlení

úhlové zrychlení		
	návrh	model
α1 [rad/s ²]	4,5	4,85
α2 [rad/s ²]	5	5,11
α3 [rad/s ²]	18,5	16,15
α4 [rad/s ²]	35	45,83
α5 [rad/s ²]	47	59,79
α6 [rad/s ²]	350	1275,16



Hodnoty momentů setrvačnosti (tab. 23) se výrazně liší od původního návrhu. Jejich nárůst je dán tím, že hmotnost kloubů je vyšší, než bylo při návrhu uvažováno, klouby mají horší rozložení hmoty proti těm, které se použily v návrhu a také narostly celkově rozměry robota.

Kroutící momenty na výstupu z kloubů (tab. 24) se zvýšily z důvodu nutnosti použití vysokých převodových poměrů kvůli zajištění dostatečné bezpečnosti při brzdění a držení polohy.

Tato výsledná maximální možná úhlová zrychlení (tab. 25) byla akceptována jako přijatelná pro robota této velikosti a typu konstrukce. Při stavbě reálného robota budou tato zrychlení upravena na základě fyzikálních možností konstrukce.

6.3.2 Pracovní prostor robota

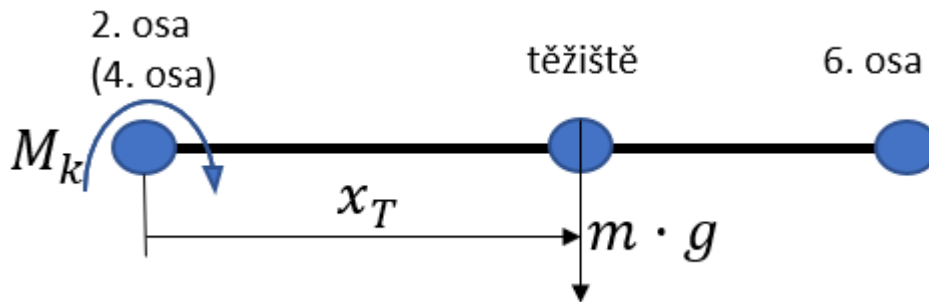
Pracovní prostor je dán maximálním dosahem robota, který je 706 [mm]. Kvůli netypické konstrukci kloubů není možný pracovní rozsah jednotlivých os ± 360 [°], jak je u těchto typů robotů běžné, ale je ve svém pohybu některých os omezen. Pracovní rozsahy jednotlivých os robota jsou uvedeny v tabulce (tab. 26).

Tab. 26 – Pracovní rozsah robota

pracovní rozsah	
osa	hodnota
1. osa	$\pm 360^\circ$
2. osa	$\pm 90^\circ$
3. osa	$\pm 135^\circ$
4. osa	$\pm 360^\circ$
5. osa	$\pm 360^\circ$
6. osa	$\pm 360^\circ$

6.3.3 Kontrola brzd

Kvůli nárůstu hmotnosti jednotlivých kloubů bylo na závěr nutné provést kontrolu brzd použitých v pohonech jednotlivých kloubů. Kontrola proběhla na osách, kde působí největší moment při nejnepříznivější kinematické poloze robota. Jde tedy o osu 2 a osu 4. Schématické zobrazení pro výpočet viz obr. 61.



Obr. 61 – Schéma pro výpočet bezpečnosti brzd

Vstupní parametry pro 2. osu:

- $m = 23,46 [kg]$ hmotnost části robota tvořící moment na ose 2
- $x_T = 0,419 [mm]$ poloha těžiště od 2. osy této části robota
- $i = 85,26 [-]$ převod v kloubu
- $M_b = 1,5 [N \cdot m]$ brzdový moment použité brzdy

Výpočet momentu, který je nutné brzdít:

$$M_k = m \cdot g \cdot x_T \quad (6)$$

$$M_k = 23,46 \cdot 9,81 \cdot 0,419$$

$$M_k = 96,43 [N \cdot m]$$

Výpočet bezpečnosti:

$$k_2 = \frac{M_b}{\frac{M_k}{i}} \quad (7)$$

$$k_2 = \frac{1,5}{\frac{96,43}{85,26}}$$

$$k_2 = 1,33$$



Vstupní parametry pro 4. osu:

- $m = 9,92 [kg]$ hmotnost části robota tvořící moment na ose 4
- $x_T = 0,116 [mm]$ poloha těžiště od 4. osy této části robota
- $i = 44,14 [-]$ převod v kloubu
- $M_b = 0,35 [N \cdot m]$ brzdny moment použité brzdy

Výpočet momentu, který je nutné brzdít:

$$M_k = m \cdot g \cdot x_T \quad (6)$$
$$M_k = 9,92 \cdot 9,81 \cdot 0,116$$
$$M_k = 11,3 [N \cdot m]$$

Výpočet bezpečnosti:

$$k_4 = \frac{M_b}{\frac{M_k}{i}} \quad (8)$$
$$k_4 = \frac{0,35}{\frac{11,3}{44,14}}$$
$$k_4 = 1,37$$

Výsledná bezpečnost pro brzdu v kloubu na druhé ose je rovna $k_2 = 1,33$ a pro brzdu v kloubu na čtvrté ose $k_4 = 1,37$. I když se běžně brzdy dimenzují na bezpečnost $k = 2$, tak vlivem pasivních odporů v pohonech jsou tyto hodnoty bezpečnosti dostačující.



7 Závěr

Tato práce se nejprve zabývala přehledem současných řešení průmyslových a kolaborativních robotů. Z důvodu zaměření práce byly všechny uvedené příklady robotů roboty kolaborativními, protože bylo nutné poukázat na různý stupeň modularity u robotů a průmyslové roboty se nevyznačují tak vysokou modularitou jako tyto zde uvedené. V návaznosti na ukázkou modularity kolaborativních robotů je v práci přehled modulárních rotačních kloubů používaných u těchto robotů. Z ukázek modulárních rotačních kloubů lze vidět typické mechanické uspořádání pohonu kloubu, které je složeno z prstencového motoru, harmonické převodovky, bezpečnostní brzdy a odměřování. Odměřování bývají dvě. Prvním je optický snímač s vysokým rozlišením pro komutaci motoru a druhým magnetický snímač pro řízení polohy. Důležitým prvkem, který se u modulů využívá, je dutý hřídel ve středu sestavy pro vedení kabelů, signálů a medií mezi jednotlivými klouby. Z tohoto přehledu je také jasně patrné, proč jsou modulárně řešené roboty uvažovány jako roboty kolaborativní. Do modulárního kloubu lze snadno zakomponovat snímač momentu, který dokáže měřit přesný točivý moment přenášený do spoje v důsledku kolizí a tím je zajištěna bezpečnost spolupráce robota s člověkem. Dále byla v této práci věnována pozornost těmto hlavním komponentám pohonu plus dalším typům komponent, které by bylo možné při konstrukci pohonu modulárního kloubu použít.

V další části práce se řešily výpočtové a konstrukční návrhy a rozměrové studie možných variant řešení modulárních rotačních kloubů na základě poznatků z provedené rešerše a zadání práce, které udávají, že klouby budou následně použity ve stavbě robota s maximálním zatížením na koncové přírubě 5 [kg]. Navrženo bylo šest variant řešení. Tyto varianty byly mezi sebou porovnány dle hmotností, torzních tuhostí, mrtvých chodů, přesností polohování, vhodnosti konstrukčního uspořádání a největší důraz byl kladen na celkovou cenu nakupovaných komponent. Z těchto hledisek ve výsledku vyšel nejlépe navržený kloub označen jako 6. varianta. Jde o kloub s pohonem tvořeným krokovým motorem, planetovou převodovkou, vloženým řemenovým převodem a přímým odměřováním. Toto řešení je sice nekoaxiální a má horší rozložení hmot než ostatní navržené varianty, ale jeho výhodami jsou využití dutý hřídel v konstrukci pro vedení kabelů, signálů a medií mezi jednotlivými klouby, přímé odměřování, díky kterému je možné dosáhnout, i přes značné vůle v ozubení použité planetové převodovky, vysoké



torzní tuhosti, minimálního mrtvého chodu a přesného polohování a v neposlední řadě je to cena nakupovaných komponent pohonu, což byl rozhodující faktor pro výběr varianty řešení pro následný úplný konstrukční návrh modulárních rotačních kloubů ve dvou velikostech.

Po výběru nejvhodnější varianty řešení proběhla konstrukce většího a menšího kloubu. Tyto klouby byly následně použity pro konstrukci modelu modulárního šestiosého robota s maximálním zatížením na koncové přírubě 5 [kg]. Výkresová dokumentace montážních sestav a vybraných výrobních výkresů detailů jsou uvedeny k nahlédnutí v příloze diplomové práce.

Na závěr je zde uvedena tabulka (tab. 27), ve které jsou uvedeny technické parametry výsledného robota s použitými navrženými modulárními rotačními klouby.

Tab. 27 – Parametry robota

parametry robota	
parametr [jednotka]	hodnota
max. zatížení [kg]	5
max. dosah [mm]	706
stupně volnosti [-]	6
hmotnost [kg]	24,1
pracovní rozsah:	
1. osa [°]	±360
2. osa [°]	±90
3. osa [°]	±135
4. osa [°]	±360
5. osa [°]	±360
6. osa [°]	±360
max. úhlové zrychlení	
1. osa [rad/s^2]	4,85
2. osa [rad/s^2]	5,11
3. osa [rad/s^2]	16,15
4. osa [rad/s^2]	45,83
5. osa [rad/s^2]	59,79
6. osa [rad/s^2]	1275,16

Tento navržený low-cost robot bude využíván pro výukové a vzdělávací účely. Sestava robota je modulární, tudíž bude možné realizovat různé kinematické struktury. Ovšem záleží, jak kvalitně bude možné realizovat řízení zde navrženého pohonu a jestli navržené plastové prvky v konstrukci budou dostatečně tuhé. Popřípadě po výrobě prototypu bude nutné provést optimalizaci konstrukce některých dílů.



Seznam obrázků

Obr. 1 – Kolaborativní robot UR5 [32].....	9
Obr. 2 – Blokové schéma pohonu [2]	11
Obr. 3 – Konstrukční provedení modulárního rotačního kloubu robota [30]	13
Obr. 4 – Universal Robots (zleva UR3e, UR5e a UR10e) [3]	14
Obr. 5 – AUBO roboty (zleva AUBO-i3, AUBO-i5 a AUBO-i10) [4].....	15
Obr. 6 – Kolaborativní roboty Hanwha HCR [5].....	16
Obr. 7 – Kolaborativní robot FANUC CRX – 10iA [6]	17
Obr. 8 – Kolaborativní robot STÄUBLI TX2touch-60 [7].....	18
Obr. 9 – Kolaborativní roboty FANUC CR-4iA (vlevo) a CR-7iA (vpravo) [6]	19
Obr. 10 – Rozpad modulu rotačního kloubu [8]	20
Obr. 11 – Rozpad modulárního rotačního kloubu pro T-HR3 [9]	21
Obr. 12 – Rozpad mechanické stavby rotačního kloubu robota LWR [10].....	22
Obr. 13 – Rozpad modulárního rotačního kloubu robota JITRI5 [11]	23
Obr. 14 – Rozpad mechanické stavby modulu rotačního kloubu RJSII [12]	23
Obr. 15 – Modulární rotační klouby RJSII spol. TechSoft Robots [12].....	24
Obr. 16 – Prstencový motor – popis konstrukce [15]	26
Obr. 17 – bezrámový prstencový motor ILM-E70x10 [14].....	27
Obr. 18 – Schéma konstrukce BLDC motoru [17]	28
Obr. 19 – BLDC motor DB59C024035R [18].....	29
Obr. 20 – Konstrukce hybridního krokového motoru [19]	31
Obr. 21 – Hybridní bipolární krokový motor NEMA 23 ST5918X3008 [18]....	32
Obr. 22 – Harmonická převodovka [21]	33
Obr. 23 – Schéma konstrukce cykloidní převodovky [23]	34
Obr. 24 – Planetová převodovka se schématickým naznačením funkce [24].....	35
Obr. 25 – TQ-RoboDrive bezpečnostní brzda [26].....	36
Obr. 26 – Bezpečnostní brzda BWA-0,35-5 [18]	36
Obr. 27 – Absolutní magnetický rotační snímač AskIM-2 RLS [28].....	37
Obr. 28 – Zjednodušená konstrukce modulárního šestiosého robota	38
Obr. 29 – Poloha robota při výpočtu momentu setrvačnosti k ose 2 (bokorys)..	39
Obr. 30 – Poloha robota při výpočtu momentu setrvačnosti k ose 2 (půdorys)..	40
Obr. 31 - Schéma k výpočtu momentu setrvačnosti k ose 2	40
Obr. 32 – Návrh kloubu varianta 1.	45



Obr. 33 – Návrh kloubu varianta 2.	47
Obr. 34 – Návrh kloubu varianta 3.	48
Obr. 35 – Návrh kloubu varianta 4.	50
Obr. 36 – Návrh kloubu varianta 5.	52
Obr. 37 – Návrh kloubu varianta 6.	54
Obr. 38 – Modulární rotační kloub pro první, druhou a třetí osu	57
Obr. 39 – Řez modelem konstrukce kloubu pro 1., 2. a 3. osu	58
Obr. 40 – Pohled zepředu na napínání řemene	60
Obr. 41 – Pohled v řezu na mechanismus napínání	61
Obr. 42 – Výstupní příruba	61
Obr. 43 – Pohled v řezu pro zobrazení spojení kloubů	62
Obr. 44 – Závitová vložka typu 40/DC	63
Obr. 45 – Pohled na skořepinu většího kloubu zepředu	63
Obr. 46 – Pohled na skořepinu většího kloubu zezadu	64
Obr. 47 – Pohled na skořepinu většího kloubu v řezu	64
Obr. 48 – Pohled na uložení ventilátoru v kloubu	65
Obr. 49 - Modulární rotační kloub pro čtvrtou, pátou a šestou osu	66
Obr. 50 - Řez modelem konstrukce kloubu pro 4., 5. a 6. osu	67
Obr. 51 – Pohled v řezu na průchod skořepinou pro vedení kabelů	68
Obr. 52 – Pohled na skořepinu menšího kloubu zepředu	68
Obr. 53 – Pohled na skořepinu menšího kloubu v řezu	69
Obr. 54 – Sestava robota	70
Obr. 55 – Sestava robota v obecné poloze	71
Obr. 56 – Sestava robota v řezu, zobrazení spojení kloubů 1., 2. a 3. osy	72
Obr. 57 – Sestava robota v řezu, zobrazení spojení kloubů 4., 5. a 6. osy	73
Obr. 58 – Koncová příruba robota	73
Obr. 59 – Poloha pro výpočet momentu setrvačnosti k ose 2 (bokorys)	74
Obr. 60 – Poloha pro výpočet momentu setrvačnosti k ose 2 (půdorys)	74
Obr. 61 – Schéma pro výpočet bezpečnosti brzd	77



Seznam tabulek

Tab. 1 – Technické parametry kolaborativních robotů Universal Robots	14
Tab. 2 – Technické parametry kolaborativních robotů AUBO.....	15
Tab. 3 – Technické parametry kolaborativních robotů Hanwha HCR	16
Tab. 4 – Technické parametry kolaborativního robota FANUC CRX – 10iA ..	17
Tab. 5 – Technické parametry kolaborativního robota TX2touch-60/60L.....	18
Tab. 6 – Technické parametry kolaborativních robotů FANUC	19
Tab. 7 – Základní parametry ILM-E70x10.....	27
Tab. 8 – Základní parametry BLDC motoru DB59C024035R.....	29
Tab. 9 – Základní parametr krokového motoru ST5918X3008.....	32
Tab. 10 – Moment setrvačnosti k ose rotace (Steinerova věta)	41
Tab. 11 – Moment setrvačnosti k ose rotace (NX SIEMENS)	42
Tab. 12 – Úhlové zrychlení.....	42
Tab. 13 – Požadovaný kroutící moment pohonu dle α z DP	43
Tab. 14 - Požadovaný kroutící moment pohonu po optimalizaci α	44
Tab. 15 - Parametry navrženého kloubu varianta 1.	46
Tab. 16 - Parametry navrženého kloubu varianta 2.	48
Tab. 17 – Parametry navrženého kloubu 3. varianta.....	49
Tab. 18 – Parametry navrženého kloubu 4. varianta.....	51
Tab. 19 – Parametry navrženého kloubu 5. varianta.....	53
Tab. 20 – Parametry navrženého kloubu 6. varianta.....	55
Tab. 21 – Přehled parametrů variant řešení	55
Tab. 22 – Přehled základních parametrů kloubů.....	69
Tab. 23 – Moment setrvačnosti vztažený k jednotlivým osám rotace (NX).....	75
Tab. 24 – Výstupní kroutící moment z jednotlivých kloubů	75
Tab. 25 – Úhlové zrychlení.....	75
Tab. 26 – Pracovní rozsah robota.....	76
Tab. 27 – Parametry robota.....	80



Seznam literatury

- [1] RUMÍŠEK, Pavel. AUTOMATIZACE: roboty a manipulátory [online]. Učební text. VUT V Brně, 2003 [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/emm_mechanizace_a_automatizace_roboty_rumisek.pdf.
- [2] ANDRLÍK, Vladimír. Průmyslové roboty a manipulátory. V Praze, 2012. Učební text. FS ČVUT v Praze.
- [3] Universal Robots [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/>
- [4] AUBO [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.aubo.cz/>
- [5] Hanwha HCR [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.hanwharobotics.com/>
- [6] FANUC [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty>
- [7] Stäubli [online]. [cit. 2021-6-21]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/cs-cz/robotics/>
- [8] Robot Joint Module with a Reactive-type Joint Torque Sensor [online]. [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/Robot-Joint-Module-with-a-Reactive-type-Joint-Park-Min/5afd87ca51ba786378f7e6e7b9d712b7347eb3fd#paper-header>
- [9] Toyota Unveils Third Generation Humanoid Robot T-HR3 [online]. [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://global.toyota/en/detail/19666346>
- [10] Mechatronic design of the LWR III [online]. [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: https://www.dlr.de/rm/en/desktopdefault.aspx/tabid-12464/21732_read-49777/
- [11] CHEN, Saixuan, Minzhou LUO, Guanwu JIANG a Omar ABDELAZIZ. Collaborative robot zero moment control for direct teaching based on self-measured gravity and friction. International Journal of Advanced Robotic Systems [online]. 2018, 15(6) [cit. 2021-6-17]. ISSN 1729-8814. Dostupné z: doi:10.1177/1729881418808711



- [12] RJSII Joint modules [online]. [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <http://www.techsoft-robots.com/en/rjsii.php?id=69>
- [13] Prstencové motory [online]. [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/prstencove-motory>
- [14] Servo-Kits ILM-E70x10 [online]. [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://www.tq-group.com/en/products/tq-robodrive/servo-kits-brakes-and-sensors/ilm-e70x10/>
- [15] WHAT IS A TORQUE MOTOR – PRINCIPLE [online]. [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://www.etel.ch/torque-motors/principle/>
- [16] Bezkartáčové stejnosměrné (BLDC) motory [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://www.elektroprumysl.cz/energetika/bezkartacove-stejnosmerne-bldc-motory>
- [17] Choosing Between Brush and Brushless DC Motors [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://www.alliedmotion.com/choosing-between-brush-and-brushless-dc-motors/>
- [18] Nanotec [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/>
- [19] ELUC Krokový motor [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/809>
- [20] Harmonic drive [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://harmonicdrive.de/de/startseite>
- [21] Harmonic drive [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://www.engineeringclicks.com/harmonic-drive/>
- [22] Srovnání cykloidních a planetových převodovek [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/srovnani-cykloidnich-a-planetovych-prevodovek>
- [23] Cycloidal drive [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://www.tec-science.com/mechanical-power-transmission/planetary-gear/construction-of-the-cycloidal-disc/>



- [23] Planetary Speed Reducer Working Principle and Applications [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://www.ato.com/planetary-speed-reducer-working-principle-and-applications>
- [25] LEE, Won-Bum, Hui-Chang PARK, Kuk-Hyun AHN a Jae-Bok SONG. Safe robot joint brake based on an elastic latch module. Mechatronics [online]. 2018, 56, 67-72 [cit. 2021-6-21]. ISSN 09574158. Dostupné z: doi:10.1016/j.mechatronics.2018.10.007
- [26] RoboDrive Safety Brakes [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://www.tq-group.com/en/products/tq-robodrive/servo-kits-brakes-and-sensors/rd50-rsv50/>
- [27] Odměřovací systémy a jejich vliv na přesnost [online]. [cit. 2021-6-18]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/odmerovaci-systemy-a-jejich-vliv-na-presnost>
- [28] AksIM-2™ Off-Axis Rotary Absolute Magnetic Encoder Module [online]. [cit. 2021-6-17]. Dostupné z: <https://www.rls.si/eng/aksim-2-off-axis-rotary-absolute-encoder>
- [29] HAVLAN, Tomáš. Úprava a oživení robotu BCN3D Moveo. Praha, 2018. Diplomová práce. České vysoké učení technické v Praze, Ústav výrobních strojů a zařízení.
- [30] LIU, Yiming, Hui XU, Changxing GENG a Guodong CHEN. A modular manipulator for industrial applications: Design and implement. 2017 2nd International Conference on Robotics and Automation Engineering (ICRAE) [online]. IEEE, 2017, 2017, , 331-335 [cit. 2021-6-28]. ISBN 978-1-5386-1306-1. Dostupné z: doi:10.1109/ICRAE.2017.8291405
- [31] Konfigurátor řemenových převodů [online]. [cit. 2021-6-29]. Dostupné z: <http://www.conti-professional.com/>



Seznam příloh

Textové přílohy

Návrhové výpočty excel

Výkresová dokumentace

1790-001-000-000	MS-ROBOT
1790-001-000	MS-ROBOT_KUSOVNÍK
1790-001-001-000	MS-KLOUB_OSA_1_3
1790-001-001	MS-KLOUB_OSA_1_3_KUSOVNÍK
1790-001-002-000	MS-KLOUB_OSA_4_6
1790-001-002	MS-KLOUB_OSA_4_6_KUSOVNÍK
1790-001-001-002	DD-DUTY_HRIDEL
1790-001-001-003	DD-POUZDRO
1790-001-001-005	DD-DISTANCNI_KROUZEK
1790-001-002-002	DD-DUTY_HRIDEL
1790-001-002-003	DD-POUZDRO
1790-001-002-005	DD-DISTANCNI_KROUZEK

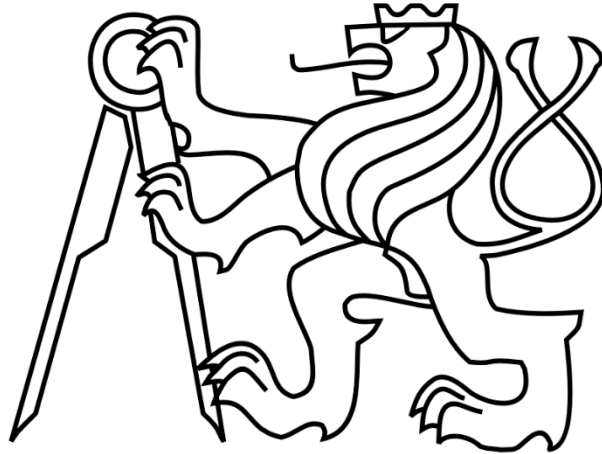
Elektronické přílohy

Příloha č. 1:	CAD model sestavy robota + pomocné CAD modely
Příloha č. 2:	Výkresová dokumentace
Příloha č. 3:	Výpočty Excel
Příloha č. 4:	Protokol návrhu řemenového převodu většího kloubu
Příloha č. 5:	Protokol návrhu řemenového převodu menšího kloubu

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Textové přílohy



Návrhový výpočet M_k :

moment setrvačnosti vztažený k ose procházející těžištěm (NX)			
	varianta1	varianta2	varianta3
Io1(T) [kg·m ²]	1,138	1,108	1,078
Io2(T) [kg·m ²]	0,710	0,694	0,677
Io3(T) [kg·m ²]	0,043	0,042	0,040
Io4(T) [kg·m ²]	0,021	0,019	0,018
Io5(T) [kg·m ²]	0,018	0,017	0,016
Io6(T) [kg·m ²]	0,006	0,005	0,004

hmotnost dané části robota (NX)			
	varianta1	varianta2	varianta3
m1_6 [kg]	20	19,52	19,06
m2_6 [kg]	17,03	16,56	16,1
m3_6 [kg]	10,84	10,37	9,91
m4_6 [kg]	8,67	8,2	7,74
m5_6 [kg]	6,83	6,35	5,89
m6 [kg]	5	4,5	4

kolmá vzdálenost osy rotace od osy procházející těžištěm (NX)			
	varianta1	varianta2	varianta3
d1 [m]	0,3094	0,3038	0,2982
d2 [m]	0,3633	0,3582	0,3531
d3 [m]	0,2621	0,2604	0,2586
d4 [m]	0,0705	0,0694	0,0682
d5 [m]	0,0654	0,0635	0,0617
d6 [m]	0	0	0

varianta1 = maximální zátěž na koncové přírubě 5kg
varianta2 = maximální zátěž na koncové přírubě 4,5kg
varianta3 = maximální zátěž na koncové přírubě 4kg

moment setrvačnosti k ose rotace			
	varianta1	varianta2	varianta3
Io1 [kg·m ²]	3,053	2,910	2,773
Io2 [kg·m ²]	2,958	2,819	2,685
Io3 [kg·m ²]	0,788	0,745	0,703
Io4 [kg·m ²]	0,064	0,059	0,054
Io5 [kg·m ²]	0,047	0,043	0,038
Io6 [kg·m ²]	0,006	0,005	0,004



moment setrvačnosti k ose rotace (NX)			
	varianta1	varianta2	varianta3
Io1 [kg•m ²]	3,267	3,112	2,961
Io2 [kg•m ²]	2,958	2,819	2,685
Io3 [kg•m ²]	0,789	0,745	0,703
Io4 [kg•m ²]	0,064	0,059	0,054
Io5 [kg•m ²]	0,047	0,043	0,038
Io6 [kg•m ²]	0,006	0,005	0,004

moment setrvačnosti k ose rotace - rozdíl Steiner a NX			
	varianta1	varianta2	varianta3
Io1 [kg•m ²]	7,02%	6,94%	6,79%
Io2 [kg•m ²]	0,01%	0,02%	0,00%
Io3 [kg•m ²]	0,05%	0,03%	0,05%
Io4 [kg•m ²]	-0,09%	-0,07%	0,01%
Io5 [kg•m ²]	-0,03%	0,29%	-0,03%
Io6 [kg•m ²]	0,00%	0,00%	0,00%

úhlové zrychlení			
	dle DP	opt.1	opt.2
α1 [rad/s ²]	30,1	10	4,5
α2 [rad/s ²]	50,4	10	5
α3 [rad/s ²]	62,3	20	18,5
α4 [rad/s ²]	95	35	35
α5 [rad/s ²]	77,3	40	47
α6 [rad/s ²]	860,1	150	350

výpočet požadovaného kroutícího momentu pohonu dle DP			
	varianta1	varianta2	varianta3
Mk1 [N•m]	98,34	93,66	89,13
Mk2 [N•m]	149,08	142,08	135,31
Mk3 [N•m]	49,12	46,41	43,79
Mk4 [N•m]	6,05	5,59	5,15
Mk5 [N•m]	3,66	3,30	2,96
Mk6 [N•m]	5,41	4,43	3,57



Návrh pohonu:

požadovaný kroučící moment pohonu po optimalizaci ² úhlového zrychlení			
	varianta1	varianta2	varianta3
Mk1 [N•m]	14,70	14,00	13,32
Mk2 [N•m]	14,79	14,10	13,42
Mk3 [N•m]	14,59	13,78	13,00
Mk4 [N•m]	2,23	2,06	1,90
Mk5 [N•m]	2,22	2,01	1,80
Mk6 [N•m]	2,20	1,80	1,45

motor (osy 1_3)			
	typ motoru	Mk [N•m]	n [ot/min]
krokový motor			
pohon1	ST6018X3008	0,916	400
pohon2	ST5909S1008	0,776	75
pohon3	ST5918X3008	0,488	750
BLDC motor			
pohon4	DB59L024035R	0,47	3500
pohon5	DB59M024035R	0,37	3500
pohon7	DB59L024035R	0,47	3500
TQ robodrive - prstencový motor			
pohon6	ILM-E70x10	0,56	3708
pohon8	ILM-E50x14	0,35	4264

převodovka (osy 1_3)			
	typ převodovky	převod i [-]	n [ot/min]
krokový m.+planetová převodovka+(řemenový převod)			
pohon1	GP56-S2-26	25,71	15,558
pohon2	GP56-S2-26	25,71	2,917
pohon3	GP56-S2-43+(Ř)	85,26	8,797
BLDC motor+planetová převodovka			
pohon4	GP56-S2-43	42,63	82,102
pohon5	GP56-S2-62	62,33	56,153
TQ robodrive - prstencový m.+harmonická převodovka			
pohon6	LHS-17	50	74,16
pohon7	LHS-17	50	70
TQ robodrive - prstencový m.+planetová převodovka			
pohon8	GP56-S2-62	62,33	68,410



motor (osy 4_6)			
	typ motoru	Mk [N•m]	n [ot/min]
krokový motor			
pohon1	ST4118M1206	0,264	750
pohon2	ST4118L3004	0,5	450
pohon3	ST5909X2508	0,6081	225
pohon4	ST6018X2008	0,166	562,5
BLDC motor			
pohon5	DB59M024035	0,37	3500
pohon6	DB59M024035R	0,37	3500
TQ robodrive - prstencový motor			
pohon7	ILM-E50x08	0,185	7221
pohon8	ILM-E50x14	0,35	4264
pohon9	ILM-E50x14	0,35	4264

převodovka (osy 4_6)			
	typ převodovky	převod i [-]	n [ot/min]
krokový m.+planetová převodovka+(řemenový převod)			
pohon1	GP42-S2-15+(Ř)	44,14	16,991
pohon2	GP42-S1-7	7,07	63,649
pohon3	GP56-S1-8	7,71	29,183
pohon4	GP56-S2-15+(Ř)	30,9	18,204
BLDC motor+planetová převodovka			
pohon5	GP56-T1-7	6,53	535,988
pohon6	GP56-S1-8	7,71	453,956
TQ robodrive - prstencový m.+harmonická převodovka			
pohon7	SHD-14-50-2SH	50	144,42
pohon8	SHD-14-50-2SH	50	85,28
TQ robodrive - prstencový m.+planetová převodovka			
pohon9	PD040	16	266,5

účinnost	0,8
----------	-----

výstupní kroučící moment pohonu									
	pohon1	pohon2	pohon3	pohon4	pohon5	pohon6	pohon7	pohon8	pohon9
Mk1_3 [N•m]	18,84	15,96	33,29	16,03	18,45	22,40	18,80	17,45	
Mk4_6 [N•m]	9,32	2,83	3,75	4,10	2,30	2,57	7,40	14,00	4,48

úhlová rychlost									
	pohon1	pohon2	pohon3	pohon4	pohon5	pohon6	pohon7	pohon8	pohon9
ω_{1_3} [rad/s]	1,63	0,31	0,92	8,60	5,88	7,77	7,33	7,16	
ω_{4_6} [rad/s]	1,78	6,67	3,06	1,91	56,13	47,54	15,12	8,93	27,91



Úhlové zrychlení navrženého modelu robota:

moment setrvačnosti vztažený k ose procházející těžištěm (NX)		
	návrh	model
Io1(T) [kg·m ²]	1,138	2,862
Io2(T) [kg·m ²]	0,710	1,749
Io3(T) [kg·m ²]	0,043	0,193
Io4(T) [kg·m ²]	0,021	0,049
Io5(T) [kg·m ²]	0,018	0,044
Io6(T) [kg·m ²]	0,006	0,007

moment setrvačnosti k ose rotace (STEINEROVA VĚTA)		
	návrh	model
Io1 [kg·m ²]	3,053	6,175
Io2 [kg·m ²]	2,958	5,868
Io3 [kg·m ²]	0,788	1,855
Io4 [kg·m ²]	0,064	0,183
Io5 [kg·m ²]	0,047	0,140
Io6 [kg·m ²]	0,006	0,007

hmotnost dané části robota (NX)		
	návrh	model
m1_6 [kg]	20	28,06
m2_6 [kg]	17,03	23,46
m3_6 [kg]	10,84	13,6
m4_6 [kg]	8,67	9,92
m5_6 [kg]	6,83	7,58
m6 [kg]	5	5,25

moment setrvačnosti k ose rotace (NX)		
	návrh	model
Io1 [kg·m ²]	3,267	6,790
Io2 [kg·m ²]	2,958	5,868
Io3 [kg·m ²]	0,789	1,855
Io4 [kg·m ²]	0,064	0,183
Io5 [kg·m ²]	0,047	0,141
Io6 [kg·m ²]	0,006	0,007

kolmá vzdálenost osy rotace od osy procházející těžištěm (NX)		
	návrh	model
d1 [m]	0,3094	0,3436
d2 [m]	0,3633	0,419
d3 [m]	0,2621	0,3496
d4 [m]	0,0705	0,1161
d5 [m]	0,0654	0,1125
d6 [m]	0	0

moment setrvačnosti k ose rotace - rozdíl Steiner a NX		
	návrh	model
Io1 [kg·m ²]	7,02%	9,96%
Io2 [kg·m ²]	0,01%	0,01%
Io3 [kg·m ²]	0,05%	0,00%
Io4 [kg·m ²]	-0,09%	0,02%
Io5 [kg·m ²]	-0,03%	0,35%
Io6 [kg·m ²]	0,00%	0,00%

kroutící moment na výstupu		
	návrh	model
Mk1 [N·m]	14,70	33,29
Mk2 [N·m]	14,79	33,29
Mk3 [N·m]	14,59	33,29
Mk4 [N·m]	2,23	9,32
Mk5 [N·m]	2,22	9,32
Mk6 [N·m]	2,20	9,32

úhlové zrychlení		
	návrh	model
α1 [rad/s ²]	4,5	4,85
α2 [rad/s ²]	5	5,11
α3 [rad/s ²]	18,5	16,15
α4 [rad/s ²]	35	45,83
α5 [rad/s ²]	47	59,79
α6 [rad/s ²]	350	1275,16