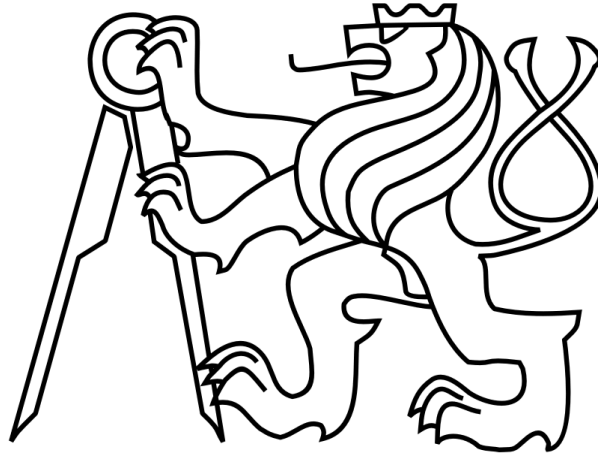


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Úprava a oživení robotu BCN3D Moveo

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Havlan** Jméno: **Tomáš** Osobní číslo: **419941**
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:

Úprava a oživení robotu BCN3D Moveo

Název diplomové práce anglicky:

BCN3D Robot: Modification and Commissioning

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Návrh a realizace 6. osy pro model robotu BCN3D MOVEO včetně úpravy mechanické konstrukce robotu a oživení robotu pomocí standardních PLC používaných v průmyslové automatizaci; Osnova práce: Rešerše v oblasti pohonů malých robotů a nástrojů pro jejich řízení, Konstrukční návrh úprav stávající konstrukce robotu a návrh pohonů, Konstrukční návrh 6. osy robotu včetně návrhu pohonu, Realizace mechanických úprav a pohonu 6. osy s využitím technologie 3D tisku, Návrh řízení robotu pomocí běžného PLC, Tvorba uživatelského rozhraní pro ovládání robotu, Testování; Rozsah grafické části: 3D modely upravených a nově navržených komponent, výkres sestavy a výrobní výkresy vybraných částí; Rozsah textové části: 60-80 stran;

Seznam doporučené literatury:

TALÁCKO, Jaroslav. Automatizace výrobních zařízení. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02160-2.; BCN3D Moveo User manual [online]. Dostupné z: <https://www.bcn3dtechnologies.com/en/bcn3d-moveo-the-future-of-learning>; Beckhoff information system [online]. Dostupné z: <https://infosys.beckhoff.com>;

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

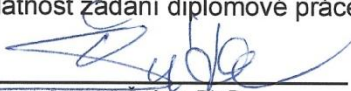
Ing. Jiří Švéda, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS


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


Datum zadání diplomové práce: **12.04.2018**

Termín odevzdání diplomové práce: **13.07.2018**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2018**


Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce



Ing. Petr Kolář, 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.

30.4.2018
Datum převzetí zadání


Podpis studenta



Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou 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 do 13. 7. 2018

.....

podpis



Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své diplomové práce Ing. Jiřímu Švédovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky a vstřícnost při konzultacích a vypracování diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Ing. Štěpánu Chládkovi, Ph.D. za jeho čas, pomoc a vstřícnost při ožívání robotu.

V neposlední řadě bych chtěl také poděkovat své rodině a blízkým za podporu po celou dobu studia.



Anotace

Autor:	Bc. Tomáš Havlan
Název:	Úprava a oživení robotu BCN3D MOVEO
Rozsah práce:	93 str., 73 obr., 14 tab.
Akademický rok:	2017/2018
Škola:	České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Klíčová slova:	3D tisk, open-source, průmyslový robot, PLC
Anotace:	Diplomová práce se zabývá úpravou a oživením robotu BCN3D MOVEO. Součástí práce je návrh úprav stávající konstrukce robotu, konstrukční návrh 6. osy a optimalizace pohonů. Upravený robot byl realizován a zprovozněn na standardní průmyslové platformě. Pro ovládání robotu bylo následně vytvořeno uživatelské rozhraní. Následovalo testování robotu včetně měření dosahované přesnosti.



Annotation

Author:	Bc. Tomáš Havlan
Title:	BCN3D Robot: Modification and Commissioning
Extent:	93 p., 73 fig., 14 tab.
Academic year:	2017/2018
University:	Czech technical university in Prague Faculty of mechanical engineering
Department:	Department of production machines and equipment
Supervisor:	Ing. Jiří Švéda, Ph.D.
Keywords:	3D printing, open-source, industrial robot, PLC
Annotation:	This diploma thesis deals with modification and commissioning of the BCN3D MOVEO robot. Part of the thesis is the design of the modification of the existing robot construction, the design of the 6th axis, and the optimization of the drives. The modified robot was realized and put into operation on a standard industrial platform. A user interface was created to control the robot. Robot testing followed, including measuring accuracy.



Obsah

Prohlášení	3
Poděkování	4
Anotace.....	5
Annotation.....	6
Obsah.....	7
Přehled použitých veličin a jednotek.....	9
1 Úvod.....	10
2 Cíl diplomové práce	12
3 Průmyslové roboty	13
3.1 Kinematická struktura průmyslových robotů	13
3.2 Přehled malých průmyslových robotů	14
3.3 Pohony malých průmyslových robotů	22
3.3.1 Krokové motory	24
3.4 Řízení průmyslových robotů	28
3.4.1 Souřadnicové systémy	29
3.4.2 Řízení pohybu průmyslových robotů.....	30
3.4.3 Programování průmyslových robotů.....	33
4 Stavba a testování výchozího robotu	36
4.1 Projekt BCN3D MOVEO	36
4.2 Stavba a testování	37
4.3 Zhodnocení výchozího stavu robotu	39
5 Konstrukční úpravy robotu	41
5.1 Optimalizace pohonů	41
5.1.1 Příklad výpočtu výsledného úhlového zrychlení 1. osy	42
5.1.2 Výsledky optimalizace pohonů	43
5.2 Návrh úpravy konstrukce 1. osy.....	43
5.2.1 Původní konstrukce 1. osy	44
5.2.2 Konstrukční varianty řešení pohonu 1. osy	45



5.2.3	Výsledná konstrukce 1. osy	47
5.2.4	Kontrola řemenového převodu	51
5.3	Návrh úpravy konstrukce 4. osy.....	53
5.3.1	Původní konstrukce 4. osy	53
5.3.2	Výsledná konstrukce 4. osy	54
5.4	Návrh konstrukce 6. osy.....	56
5.5	Návrh brzd.....	57
5.5.1	Příklad výpočtu potřebného brzdného momentu na 3. ose	58
5.5.2	Výsledky návrhu brzd.....	58
5.6	Úprava a návrh dalších komponent robotu	59
5.7	Kompletní CAD model robotu	61
6	Výroba a kompletace robotu.....	62
7	Řízení robotu	70
7.1	Hardware Beckhoff pro řízení robotu	70
7.2	Program řízení robotu	71
7.3	Ovládání robotu	72
8	Testování	75
8.1	Měření přímosti	76
8.1.1	Měření přímosti osy X.....	77
8.1.2	Měření přímosti osy Y.....	78
8.1.3	Měření přímosti osy Z.....	80
8.2	Měření opakovatelnosti	81
8.3	Výsledky měření přesnosti	82
9	Závěr	84
	Seznam obrázků.....	86
	Seznam tabulek	89
	Seznam literatury	90
	Seznam příloh	93



Přehled použitých veličin a jednotek

b	[mm]	Šířka řemenu
c_0	[-]	Celkový provozní faktor převodu
c_1	[-]	Zubový koeficient
c_2	[-]	Koeficient zátěže
c_3	[-]	Koeficient zrychlení
G	[N]	Tíhová síla
g	[m/s ²]	Tíhové zrychlení
i	[-]	Převodový poměr
I	[A]	Elektrický proud
I_0	[kgm ²]	Moment setrvačnosti
L_w	[mm]	Roztečná délka řemenu
M_K	[Nm]	Krouticí moment
n_k	[ot/min]	Referenční otáčky
P	[kW]	Výkon motoru
P_R	[kW]	Porovnávací výkon
U	[V]	Elektrické napětí
z_e	[-]	Zubový faktor
z_g	[-]	Počet zubů hnané řemenice
z_k	[-]	Počet zubů hnací řemenice
β	[°]	Úhel opásání hnacího kola
ε	[rad/s ²]	Úhlové zrychlení

1 Úvod

Průmyslové roboty, dále také PR, jsou v posledních několika letech jedno z nejvíce rozvíjejících se odvětví v průmyslu. Pojem průmyslový robot je často chápán rozdílně, a proto byla stanovena Mezinárodní organizací pro standardizaci definice průmyslového robota v normě ISO 8373 ve znění: „Průmyslový robot je automaticky řízený, opětovně programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách, který může být buď upevněn na místě, nebo mobilní k užití v průmyslových automatických aplikacích“. [1]

První informace o zavedení PR do výroby jsou z roku 1961, kdy byl zprovozněn první prototypový PR firmy Unimation na výrobní lince General Motors v New Jersey (obr. 1). Robot s názvem Unimate 1900 nahradil pracovníky obsluhující stroje pro lití pod tlakem, kdy vyjímal žhavé a těžké odlitky z forem. Vážil přes 1,8t a jeho maximální nosné zatížení bylo 227kg. Byl zkonstruován se sférickou kinematickou strukturou a byl osazen hydraulickými pohony, které vyhověly požadavkům na výkon a také na řízení.



Obr. 1 – Robot Unimate 1900 [2]

V současné době počet prodaných PR po celém světě každým rokem roste přibližně o 13 % a podle statistik a průběžných výsledků mezinárodní federace robotiky IFR (International Federation of Robotics) by za rok 2020 mělo být prodáno 521 000 kusů PR, což by byl dvojnásobek počtu PR prodaných v roce 2015. Největší podíl



z celkového počtu PR ve světě je v automobilovém průmyslu, ale velký nárůst v posledních dvou letech byl zaznamenán také v oblasti výroby elektroniky.

Vzhledem k tak intenzivnímu růstu počtu robotů v průmyslové automatizaci je nutné připravit dostatečný počet odborných pracovníků zajišťujících provoz a údržbu těchto robotů, ale také jejich vývoj a zdokonalování. Pro efektivní vzdělávání je nutné vytvořit také dostatečné učební pomůcky, modely robotů, na kterých by mohl probíhat trénink a testování jejich řízení a programování. Jedním z takových modelů je i výukový robot BCN3D MOVEO [25], který je vytvořen dostupnou technologií 3D tisku z plastu a umožňuje tak vytvoření levného a účinného nástroje pro výuku. Cílem této diplomové práce je zdokonalení konstrukce tohoto robotu do podoby standardních průmyslových 6osých robotů a implementace řízení pomocí standardních průmyslových systémů.



2 Cíl diplomové práce

Hlavním cílem diplomové práce je návrh a realizace 6. osy pro robot BCN3D MOVEO a úpravy mechanické konstrukce robotu pro zvýšení jeho přesnosti a tuhosti. Součástí je také oživení robotu pomocí standardních řídicích systémů používaných v průmyslové automatizaci.

Pro splnění hlavního cíle byly definovány následující dílčí cíle práce:

- Stavba výchozího robotu BCN3D MOVEO a jeho testování, identifikace slabých míst
- Optimalizace mechanické konstrukce robotu a pohonů
- Návrh 6. osy robotu
- Návrh řízení na standardním průmyslové platformě
- Realizace a testování upraveného robotu



3 Průmyslové roboty

Kapitola je zaměřena na průmyslové roboty obecně, jejich rozdělení, využití, konstrukce, používané pohony, způsob řízení apod. Dále je zpracován výběr průmyslových robotů podobných robotu, který je řešen v rámci diplomové práce, a to především na základě podobnosti konstrukce a velikosti robotu, tedy jeho dosahu.

3.1 Kinematická struktura průmyslových robotů

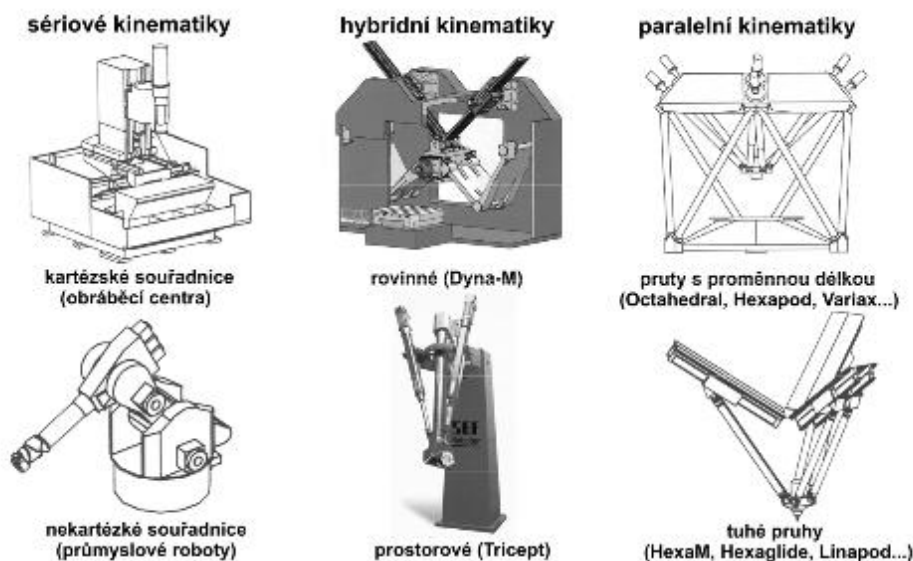
Průmyslové roboty lze rozdělit podle kinematické struktury na roboty se sériovou, hybridní nebo paralelní kinematikou. Každá ze zmíněných kinematik má své výhody i nevýhody a je využívána v rozdílných aplikacích. V práci se zaměřuji na roboty se sériovou kinematikou.

Sériová kinematika je charakteristická pro mechanismy s otevřenou kinematickou smyčkou. Výsledný pohyb je dán pohybem všech předešlých a do série řazených kinematických dvojic. V průmyslu je většina robotů právě s touto kinematikou. Tyto roboty jsou využívány především pro svařování, lakování, manipulaci na montážních linkách, paletizaci apod.

Paralelní kinematika je charakteristická pro mechanismy s uzavřenou kinematickou smyčkou. Jednotlivé pohony jsou řazeny paralelně a výsledný pohyb vzniká spojením pohybů jednotlivých pohonů. Roboty s paralelní kinematikou, jinak také delta roboty, jsou využívány především pro rychlou manipulaci s lehčími předměty, případně v balicích linkách apod.

Roboty s **hybridní kinematikou** jsou pak kombinací sériové a paralelní kinematiky. Používají se ve speciálních případech. Názorným příkladem hybridní kinematiky robotu je koncept Tricept, jehož základ tvoří tři pruty s proměnnou délkou (paralelní kinematika), která je doplněna kloubovou hlavou (sériová kinematika). Tato konstrukce disponuje velkou dynamikou při zachování vysoké tuhosti a je využívána v některých aplikacích k obrábění.

Přehled sériové, paralelní a hybridní kinematiky lze vidět na obr. 2.



Obr. 2 – Přehled sériové, paralelní a hybridní kinematiky [3]

Porovnání vlastností sériové a paralelní kinematiky viz tab. 1.

Vlastnosti	Sériová kinematika	Paralelní kinematika
Tuhost	Nízká (ohyb, krut)	Vysoká (jen tah/tlak, vzpěr)
Hmotnost pohybujících se součástí	Vysoká (první člen je namáhán vždy členy následujícími)	Nízká (pohybují se jen ramena a platforma)
Řízení	Jednoduché (každá osa se řídí jednotlivě)	Složitě (mechanismus musí být regulován jako celek)
Kalibrace	Jednoduchá	Komplikovaná

Tab. 1 – Porovnání sériové a paralelní kinematiky [4]

3.2 Přehled malých průmyslových robotů

V současné době se na trhu vyskytuje velké množství firem nabízejících průmyslové roboty od malých, s nosností několika kilogramů, až po roboty velké, jejichž nosnosti se pohybují v řádech tun. Také dosah nabízených PR má velký rozptyl od několika desítek centimetrů po několik metrů.

Kapitola je zaměřena na malé roboty se sériovou kinematikou, jejichž parametry jsou podobné parametrům robotu BCN3D MOVEO. Dosah těchto robotů se pohybuje okolo 500mm a nosnost je max. 5kg. U každého ze zmíněných robotů jsou pak vypsány parametry daného robotu pro porovnání.

I. FANUC - LR Mate 200iD/4S

Robot LR Mate 200iD/4S (obr. 3) od japonské firmy FANUC je nejmenší z PR, které firma nabízí. S robotem ABB – IRB120 patří mezi nejpřesnější roboty v této kategorii. Parametry robotu jsou shrnuty v tab. 2.



Obr. 3 – FANUC LR Mate 200iD/4S [5]

FANUC - LR Mate 200iD/4S		
Max. nosnost	4	kg
Dosah	550	mm
Stupně volnosti	6	°
Opakovatelnost	±0,01	mm
Váha	20	kg

Tab. 2 – Parametry robotu FANUC LR Mate 200iD/4S [5]

II. ABB – IRB120

Robot IRB120 (obr. 4) od švédsko-švýcarské firmy ABB je nejmenší z PR, které firma nabízí. Díky oboustranně uloženým kloubům a robustní konstrukci patří, s robotem LR Mate 200iD/4S, mezi nejpreciznější roboty této velikosti. Parametry robotu jsou shrnuty v tab. 3.



Obr. 4 – ABB IRB120 [6]

ABB – IRB120		
Max. nosnost	4	kg
Dosah	580	mm
Stupně volnosti	6	°
Opakovatelnost	±0,01	mm
Váha	25	kg

Tab. 3 – Parametry robotu ABB IRB120 [6]

III. KUKA – KR3 AGILUS

Robot KR3 AGILUS (obr. 5) od německé firmy KUKA je nejmenší z PR, které firma KUKA nabízí. Konstrukce je shodná s roboty z předchozích kapitol, proto i parametry jsou podobné viz tab. 4.



Obr. 5 – KUKA KR3 AGILUS [7]

KUKA – KR3 AGILUS		
Max. nosnost	3	kg
Dosah	541	mm
Stupně volnosti	6	°
Opakovatelnost	±0,02	mm
Váha	26	kg

Tab. 4 – Parametry robotu KUKA KR3 AGILUS [7]

IV. UNIVERSAL ROBOTS – UR3

Lehký robot UR3 (obr. 6) je nejmenším robotem z řady robotů od dánské firmy Universal Robots. Řadí se do skupiny kolaborativních robotů, což umožňuje práci robota v bezprostřední blízkosti člověka. Letmo uložené klouby a konstrukce umožňují pohyb všech kloubů v rozsahu 360° a nekonečné otáčení na koncovém kloubu. Konstrukce a váha robotu je důvodem nejhorší opakovatelnosti z vybraných robotů. Parametry robotu jsou shrnuty v tab. 5.



Obr. 6 – UNIVERSAL ROBOTS UR3 [8]

UNIVERSAL ROBOTS – UR3		
Max. nosnost	3	kg
Dosah	500	mm
Stupně volnosti	6	°
Opakovatelnost	±0,1	mm
Váha	11	kg

Tab. 5 – Parametry robotu UNIVERSAL ROBOTS UR3 [8]

V. STÄUBLI – TX40

Robot TX40 (obr. 7) od mezinárodní firmy STÄUBLI je nejmenší z PR, které firma nabízí. Přestože má robot letmo uložené klouby, robustnost konstrukce umožňuje dosahovat podobných parametrů (tab. 6) jako roboty s oboustranně uloženými klouby.



Obr. 7 – STÄUBLI TX40 [9]

STAUBLI - TX40		
Max. nosnost	2,3	kg
Dosah	515	mm
Stupně volnosti	6	°
Opakovatelnost	±0,02	mm
Váha	27	kg

Tab. 6 – Parametry robotu STÄUBLI TX40 [9]

VI. YASKAWA – SIA5F

Robot SIA5F (obr. 8) od japonské firmy Yaskawa je nejmenší z řady robotů MOTOMAN SIA, které firma nabízí. Oproti ostatním zmíněným robotům je robot 7osý, což umožňuje větší pohybové možnosti robotu.



Obr. 8 – YASKAWA SIA5F [10]

YASKAWA – SIA5F		
Max. nosnost	5	kg
Dosah	559	mm
Stupně volnosti	7	°
Opakovatelnost	±0,06	mm
Váha	30	kg

Tab. 7 – Parametry robotu YASKAWA SIA5F [10]

VII. HIWIN – RA605

Robot RA605 (obr. 9) od tchajwanské firmy Hiwin, zabývající se převážně lineární technikou, je parametry na hraně malých a středních robotů, nicméně byl do výběru zahrnut. Parametry robotu jsou shrnuty v tab. 8.



Obr. 9 – HIWIN RA605 [11]

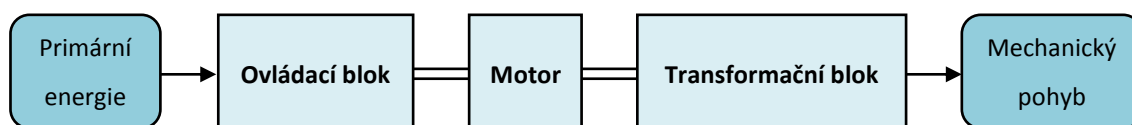
HIWIN – RA605		
Max. nosnost	5	kg
Dosah	710	mm
Stupně volnosti	6	°
Opakovatelnost	±0,02	mm
Váha	40	kg

Tab. 8 – Parametry robotu HIWIN RA605 [11]

Z konstrukčního hlediska si lze všimnout u robotů firmy Universal Robots a Yaskawa rozdílné konstrukce uložení jednotlivých kloubů oproti ostatním vybraným robotům. Zatímco většina využívá oboustranně uložené klouby, které zaručí robotu dostatečnou tuhost a opakovatelnost při velké dynamice pohybů, vetknuté klouby pak umožňují pohyb v celém rozsahu 360°.

3.3 Pohony malých průmyslových robotů

Funkcí pohonu průmyslového robotu je přeměna vstupní – primární energie na mechanický pohyb. Pohon je tvořen motorem, který přeměnu zajišťuje, dále pak ovládacím a transformačním blokem, který zajišťuje spojení mezi motorem a pohyblivou částí robotu (obr. 10). Nejrozšířenější spojení je realizováno mechanickými převody, u speciálních aplikací můžou být použity magnetické, elektrické či hydraulické převody. Mechanické převody jsou nejčastěji v podobě ozubených kol a ozubených řemenů. Ve spojení s elektrickými motory jsou v současné době velmi často používané harmonické a cykloidní převodovky.



Obr. 10 – Základní struktura pohonu průmyslových robotů [12]

Na pohony průmyslových robotů v souvislosti s jejich využitím ve výrobním procesu jsou kladeny velké požadavky a to především [13]:

- a) **Plynulý bezrázový rozběh a brzdění** je požadován pro bezpečné udržení přenášeného objektu v efektoru, kdy při plynulém pohybu je potřeba menší úchopné síly než při pohybu s rázy. Dále také eliminace kmitání efektoru kolem požadované polohy z důvodu nízké tuhosti robotu.
- b) **Vysoká přesnost polohování** je kromě kinematické struktury a tuhosti závislá také na regulaci pohonu, kdy rozlišujeme dva typy řízení:
 - 1) Řízení pohybu bez zpětné vazby – regulace nemá informaci o aktuální poloze. Jedná se o otevřenou regulační smyčku (např. krokové motory).

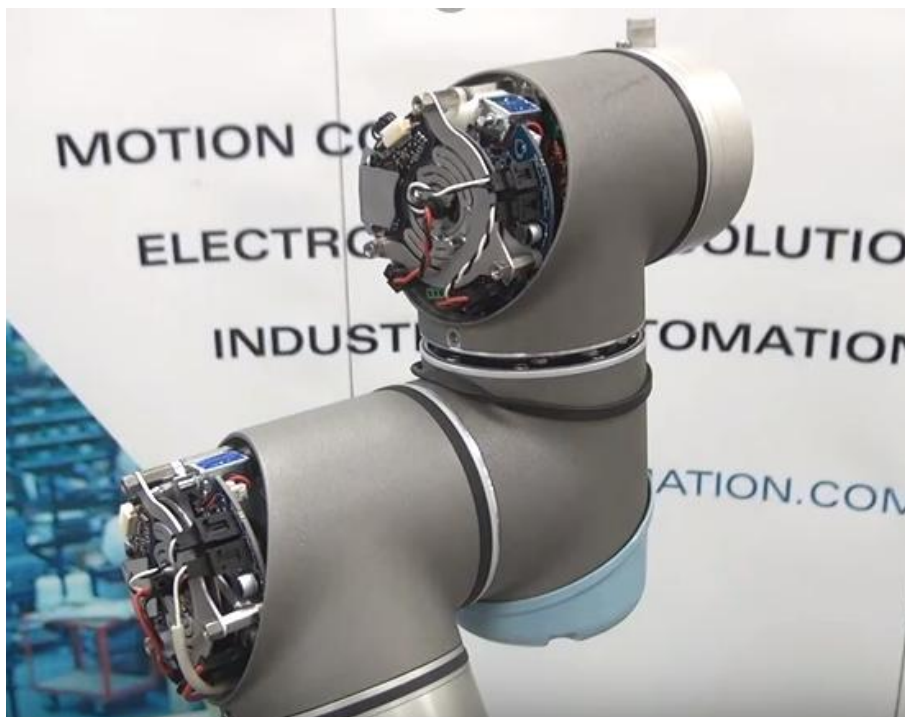
- 2) Řízení pohybu se zpětnou vazbou – regulace má informaci o aktuální poloze z odměřování a jedná se tak o uzavřenou regulační smyčku.
- c) **Polohová tuhost** pohonu je nezbytná pro správnou funkci robotu. Rozumí se tím schopnost pohonu udržet požadovanou polohu i při změně vnějšího zatížení.
- d) **Minimální hmotnost** pohonu, především u robotů se sériovou kinematikou, kdy jsou pohony umísťovány do pohyblivých částí konstrukce robotu a je tak ovlivňována kromě hmotnosti celého robotu také jeho dynamika.
- e) **Minimální rozměry** pohonu souvisí s požadavkem na minimální hmotnost pohonu. Dále pak s celkovými rozměry robotu úměrnými manipulačním vlastnostem robotu, kdy může nastat problém s překrýváním pracovního prostoru robotu částmi jeho konstrukce.
- f) **Vhodné prostorové uspořádání** pohonu ovlivňuje celkové uspořádání konstrukce robotu a tím i jeho rozměry.

S ohledem na tyto požadavky je většina současných malých průmyslových robotů poháněna elektromotory. Ve většině případů se jedná o servomotory doplněné o mechanické převody v podobě ozubených kol, ozubených řemenů, případně harmonických či cykloidních převodovek a odměřování. Na obr. 11 je možné vidět konstrukční řešení pohonu 5. a 6. osy na robotu KR5 od firmy KUKA.



Obr. 11 – Pohon 5. a 6. osy robotu KR5 od firmy KUKA [14]

U některých konstrukcích malých průmyslových robotů je možné vidět kompaktní pohonné jednotky, které jsou umístovány přímo do jednotlivých kloubů a které obsahují elektromotor s převodovkou, brzdu a odměřování bez dalších vložených převodů. Podobně řešený kloub (obr. 12) lze vidět na robotech firmy Universal Robots.



Obr. 12 – Pohonná jednotka firmy Universal Robots [15]

Kromě používaných servomotorů mohou být na některých malých průmyslových robotech osazeny také krokové motory, které jsou používané u robotů nízké cenové kategorie. Krokovými motory je také osazen robot BCN3D MOVEO řešený v rámci této diplomové práce a z toho důvodu je následující kapitola zaměřena na krokové motory, přestože jejich využití u průmyslových robotů v praxi je minimální.

3.3.1 Krokové motory

Základní princip krokového motoru je jednoduchý. Proud procházející cívkou statoru vytvoří magnetické pole, které přitáhne opačný pól magnetu rotoru. Vhodným zapojováním cívek dosáhneme vytvoření rotujícího magnetického pole, které otáčí rotorem.

Podle požadovaného kroučícího momentu, přesnosti nastavení polohy a přípustného odběru volíme některou z variant řízení viz níže. Kvůli přechodovým



magnetickým jevům je omezena rychlost otáčení motoru a to na několik stovek kroků za sekundu (závisí na typu motoru a zatížení). Při překročení této maximální rychlosti nebo při příliš velké zátěži motory začínají ztrácet kroky [16].

Podle počtu vinutí můžeme krokové motory rozdělit na [18]:

- 1) Dvoufázové – Standardní provedení, používá se nejvíce.
- 2) Vícefázové – Speciální pohony, které mají proti dvoufázovým krokovým motorům nižší vibrace, jemnější krok, ale také složitější konstrukci a jsou dražší.

Podle konstrukce můžeme krokové motory rozdělit na [17, 18]:

- 1) Krokové motory s variabilní reluktancí (VR) – Stator se skládá z vrstvených izolovaných ocelových plechů, které jsou tvarovány podle počtu pólů (na obr. 13 lze vidět stator složený z šesti pólů A, A'; B, B'; C, C'). Měděný drát je navinut kolem každého pólu. Stator je umístěn v plášti, který drží plechy pohromadě. Rotor je vyroben z měkkého železa a je vybaven řadou zubů. Hřídel motoru je připojena k rotoru a sedí v ložiskách na obou koncích. Připojením proudu k vinutí statoru bude aktivováno magnetické pole v jednom páru pólů. Nejbližší rotorové zuby jsou přitahovány k pólu statoru. Je-li proud k prvnímu páru pólů přerušen a magnetizuje se další pár pólů, otočí se rotor o jeden krok. Aby se otočil chod motoru, posílá se sekvence pulsů k rotorovým párům v opačném směru. VR motor může dosáhnout vysoké rychlosti, ale s relativně nízkým točivým momentem. Tento typ se dnes používá velmi málo.



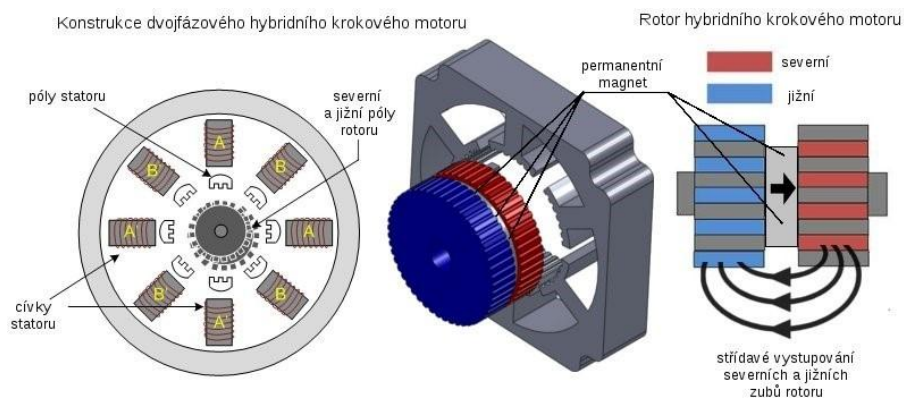
Obr. 13 – Princip krokového motoru s variabilní reluktancí [17]

- 2) Krokové motory s permanentními magnety – Krokový motor s permanentními magnety má, na rozdíl od předešlého krokového motoru, rotor bez zubů, ale s integrovaným trvalým magnetem (obr. 14), vytvářející magnetické pole, díky němuž se v magnetickém poli objevuje mnohem větší magnetický tok a motor je více „živější“. Severní a jižní póly pak vytvářejí různě směřované toky po celém motoru a vhodným elektrickým proudem se pak motor roztáčí v různém směru.



Obr. 14 – Princip krokového motoru s permanentním magnetem [17]

- 3) Krokové motory hybridní – Hybridní krokový motor (obr. 15) je kombinací dvou zmíněných krokových motorů. Jsou složeny z pěti hlavních částí. Obvykle mají osmi statorové póly, které jsou opatřeny zuby. Kolem každého pólu jsou dvě vinutí, takže pól může v závislosti na směru proudu být buď severní nebo jižní. Rotor se skládá ze dvou laminátových polovin podobných ozubenému kolu. Uvnitř je permanentní magnet z neodymu. Obě poloviny jsou otočeny tak, aby zuby na jedné straně odpovídaly vybrání na straně druhé. Jedna polovina je tedy severní a druhá jižní pól. Běžně má motor 50 zubů, což u dvoufázového motoru se dvěma póly vytvoří na jednu otočku motoru 200 kroků, tzn. jeden krok odpovídá $1,8^\circ$. Motory se vyrábějí v několika standardních rozměrech s tzv. NEMA přírubou a jsou většinou čtvercové a v různých délkách. Tímto typem krokových motorů je osazen robot BCN3D MOVEO řešený v rámci této diplomové práce.



Obr. 15 – Konstrukce hybridního krokového motoru [18]

Řízení krokového motoru je možné realizovat dvě způsoby a to [16]:

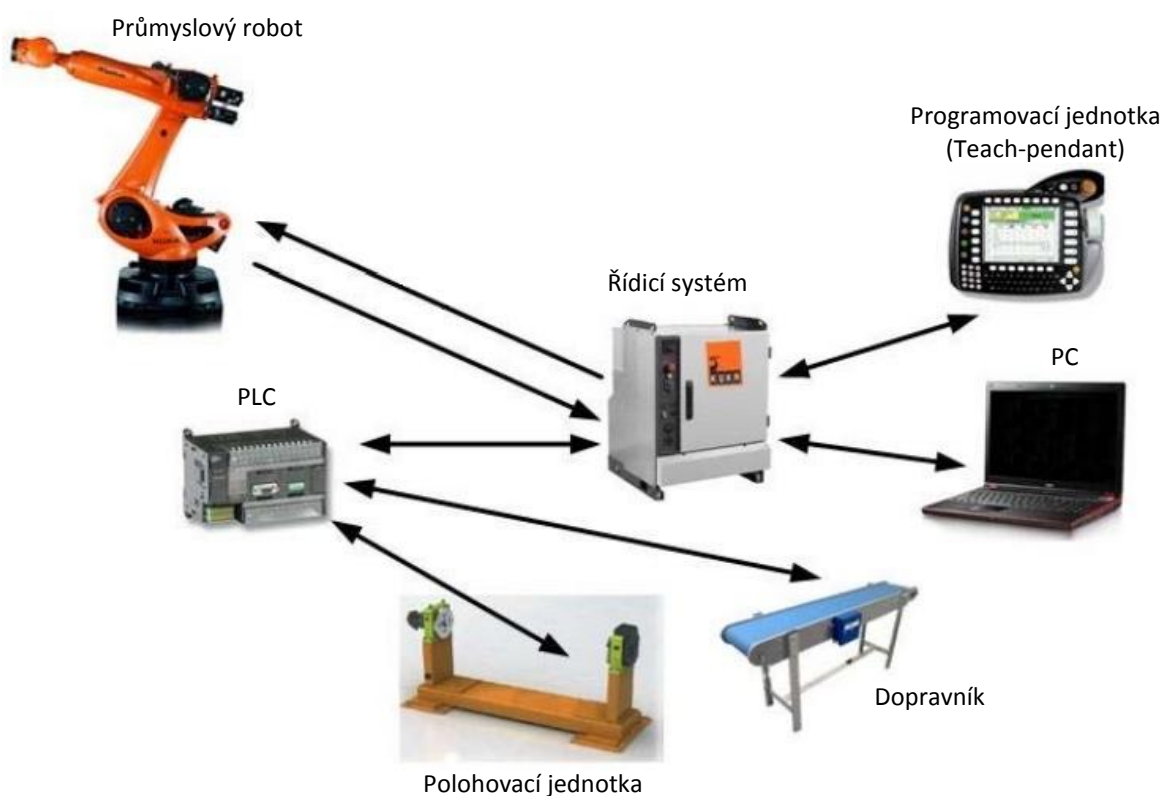
- 1) Unipolární řízení - Při unipolárním řízení prochází v jednom okamžiku právě jednou cívkou. Motor s tímto buzením má nejmenší odběr, ale také poskytuje nejmenší krouticí moment. Výhodou tohoto řešení je jednoduché zapojení řídicí elektroniky - v podstatě stačí jeden tranzistor na každou cívku.
- 2) Bipolární řízení - Při bipolárním řízení prochází proud vždy dvěma protilehlými cívkami. Ty jsou zapojené tak, že mají navzájem opačně orientované magnetické pole. Motor v tomto režimu poskytuje větší krouticí moment, ovšem za cenu vyšší spotřeby.

Při použití krokových motorů je možné využít tzv. **mikrokrokování (microstepping)**, kdy se proudy ve vinutích mění po malých krocích (v jednom vinutí proud vzrůstá, v druhém zrcadlově klesá), a tím se jeden krok rozdělí na mnoho menších, takzvaných mikrokroků. Čím je mikrokroků více, tím se průběh proudu, protékajícího jednotlivými fázovými vinutími, více přibližuje ideálnímu sinusovému průběhu. Při mikrokrokování se vždy využívají všechna vinutí naráz, i když nikoli s plným výkonem. Na trhu jsou dostupné řídicí integrované obvody, které dovolují rozdělit jeden celý krok motoru až na 256 mikrokroků. Stručně řečeno, i když mikrokrokování zvyšuje počet kroků na otáčku, v žádném případě nezvyší přesnost polohování. Jeho skutečným přínosem je snížení mechanických a magnetostrikčních hluků, hladší běh motoru a výrazné snížení rezonancí. To vše dohromady zmenšuje pravděpodobnost výpadku kroku a tím ztráty synchronizace systému, který pracuje v

otevřené smyčce. Hladší chod motoru se projeví také menším opotřebením celé mechanické přenosové soustavy [19].

3.4 Řízení průmyslových robotů

Řízení průmyslových robotů je realizováno prostřednictvím řídicích systémů s využitím zpětné vazby od snímačů. Řídicí systém zprostředkovává polohování robotu do požadovaných pozic na základě informací z programovací jednotky (Teach-pendantu), případně pak z nahraného programu vytvořeného mimo reálné prostředí robotu na PC. Pomocí řídicího systému lze také propojit robot s dalšími roboty, případně zařízeními, které spolu s robotem tvoří robotizované pracoviště a lze tak koordinovat jejich vzájemný pohyb [21]. Struktura řízení robotu je na obr. 16.

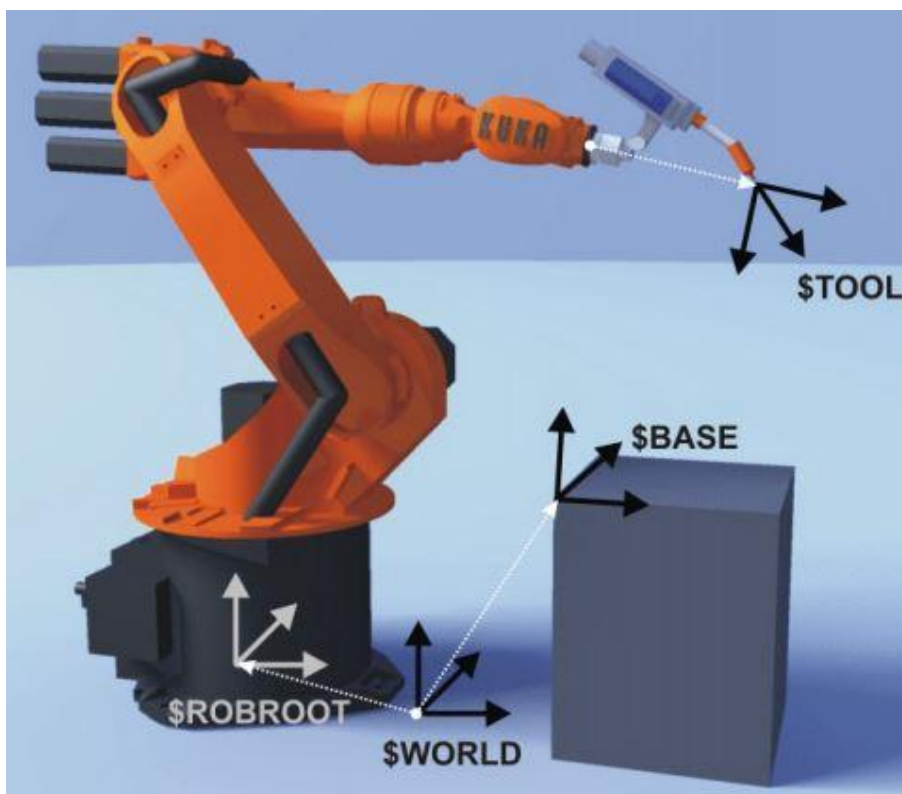


Obr. 16 – Struktura řízení průmyslových robotů [21]

V následujících kapitolách jsou popsány možnosti řízení průmyslových robotů a jejich programování.

3.4.1 Souřadnicové systémy

Pro řízení pohybu průmyslových robotů je definováno několik souřadnicových systémů (obr. 17) nezbytných pro řízení pohybu průmyslových robotů. Ty slouží k přesnému popisu polohy robotu v pracovišti, k přesnému popisu pohybu nástroje v pracovním prostoru robotu a také vůči robotu samotnému.



Obr. 17 – Souřadnicové systémy robotu podle firmy KUKA [22]

WORLD

Souřadnicový systém WORLD je pevně definovaný kartézský souřadnicový systém. Je základním souřadnicovým systémem pro souřadnicové systémy ROBROOT a BASE a ve výchozím nastavení je umístěn v patě robotu [22].

ROBROOT

Souřadnicový systém ROBROOT je kartézský souřadnicový systém a nachází se vždy v patě robotu. Pomocí tohoto souřadnicového systému je možné popsat pozici robotu vůči WORLD souřadnicovému systému [22].

BASE

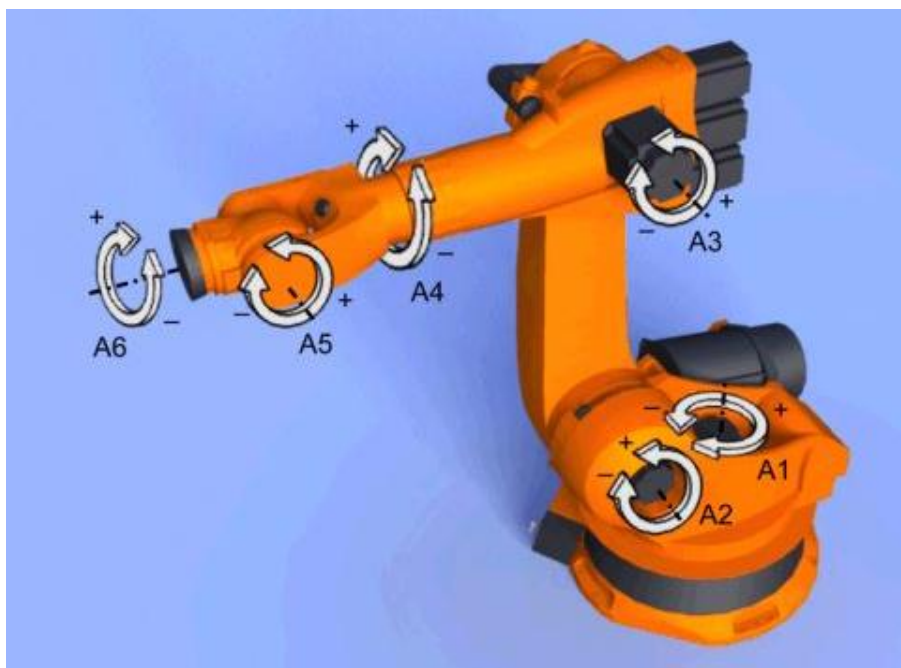
Souřadnicový systém BASE je kartézský souřadnicový systém vztažený k souřadnicovému systému WOLRD. Definuje polohu obrobku nebo daného pracovního prostoru. Probíhá v něm programování robotu a je definován operátorem [22].

TOOL

Souřadnicový systém TOOL je kartézský souřadnicový systém umístěný ve středním bodu nástroje (TCP – Tool Center Point). Je definován operátorem a vztažený k souřadnicovému systému BASE. Ve výchozím stavu je počátek souřadnicového systému TOOL umístěn ve středu příruby (v tomto případě se mluví o souřadnicovém systému FLANGE) [22].

3.4.2 Řízení pohybu průmyslových robotů

Řízení pohybu průmyslového robotu lze realizovat dvěma způsoby. Jednou z možností je řízení natočení jednotlivých os v kladném či záporném směru (obr. 18), kdy dochází k ovládní jednotlivých pohonů os robotu. Tento způsob řízení pohybu robotu je nepraktický a pro přesné ovládní koncového efektoru v prostoru téměř nepoužitelný. Používá se zejména při testování v ručním režimu nebo nastavení výchozích poloh.

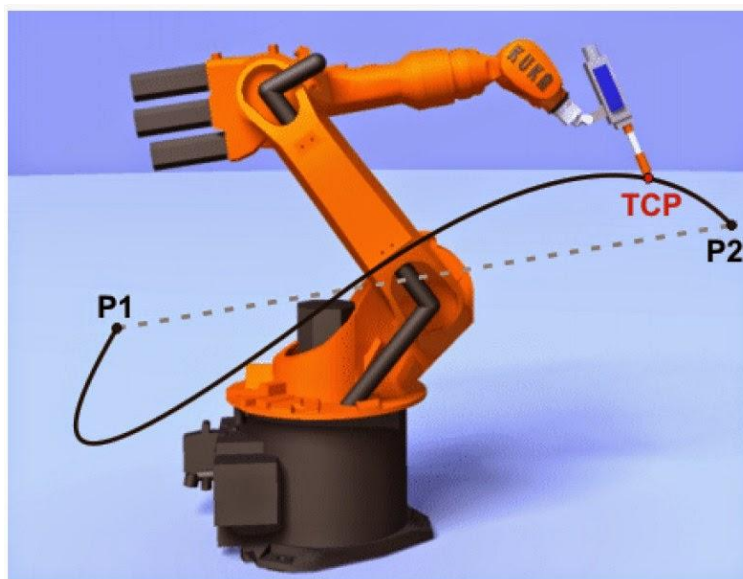


Obr. 18 – Pohyb jednotlivých os robotu [22]

Druhou možností řízení pohybu robotu je řízení v kartézských souřadnicích, kdy řídicí systém musí počítat inverzní kinematiku robotu, tedy na základě požadovaných souřadnic efektoru (poloha X, Y, Z a natočení A, B, C) dopočte natočení jednotlivých kloubů robotu, jejichž kombinací je realizován požadovaný pohyb. Součástí výpočtu je také návrh profilu rychlosti, aby nebyla překročena maximální rychlost a zrychlení žádného kloubu. Podle způsobu řízení rozlišujeme tři typy pohybů [21, 22]:

A. Pohyb z bodu do bodu - PTP (Point to Point)

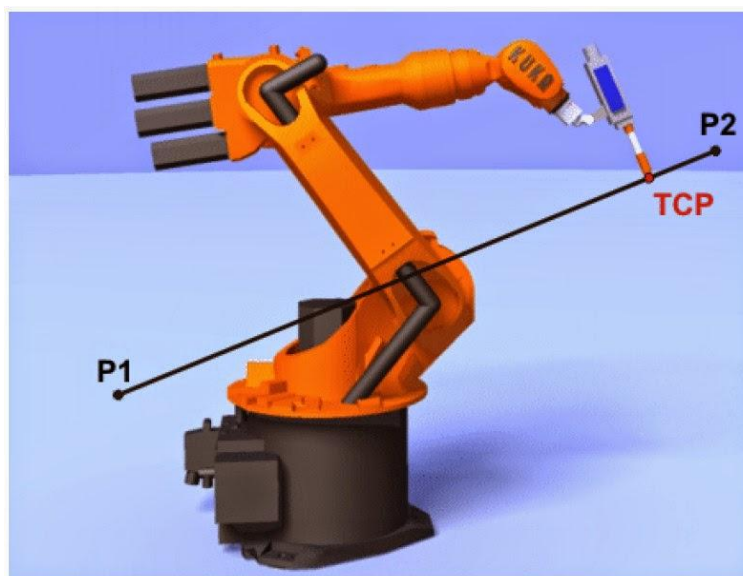
Robot se pohybuje z počátečního bodu, který je obvykle koncový bod předešlého pohybu, nejrychlejší cestou do bodu naprogramovaného (obr. 19). Dráhu robotu lze však obtížně předvídat, protože nejkratší cesta obvykle nemusí být tou nejrychlejší (nemusí být přímka) a díky rotačním osám robotu mohou být zakřivené dráhy prováděny rychleji než dráhy přímé. Pohyb začíná i končí ve všech osách současně.



Obr. 19 – Pohyb z bodu do bodu – PTP (Point to Point) [22]

B. Lineární interpolace – LIN

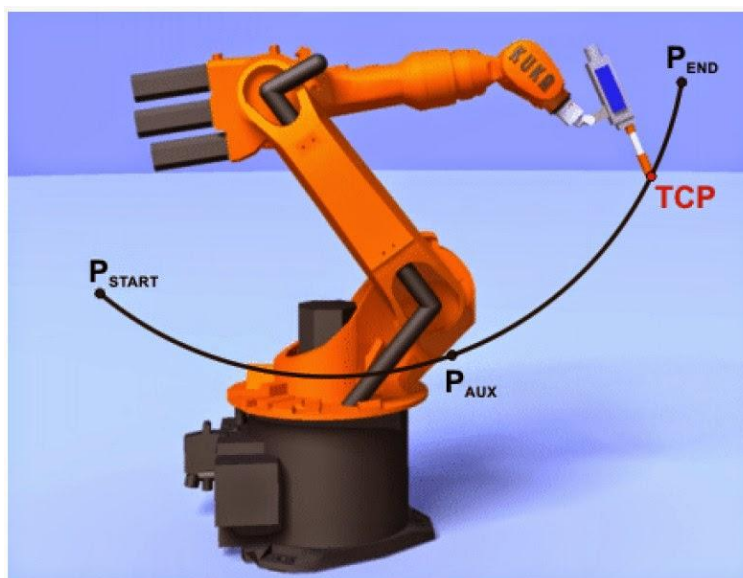
Robot se pohybuje z počátečního bodu do koncového bodu po nejkratší dráze, tedy po přímce (obr. 20). Lineární pohyb koncového efektoru je realizován řízeným natočením jednotlivých os robotu. Využívá se pro přesné navedení koncového efektoru do požadované polohy např. při montáži nebo při vyhýbání robotu překážkám v pracovním prostoru.



Obr. 20 – Lineární interpolace [22]

C. Kruhová interpolace – CIRC

Robot se pohybuje stejným způsobem jako u lineární interpolace s tím rozdílem, že dráha je kruhová (obr. 21). Dráha je kromě počátečního a koncového bodu vymezena ještě bodem pomocným, pomocí kterého řídicí systém vypočítá střed kruhu, poloměr a získá tak požadovanou dráhu koncového efektoru po kružnici.



Obr. 21 – Kruhová interpolace [22]

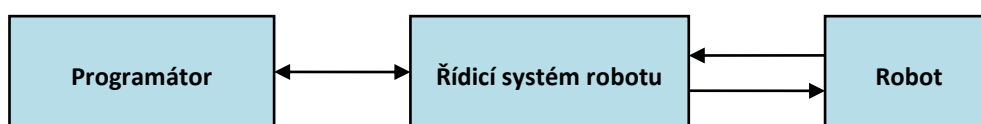
3.4.3 Programování průmyslových robotů

Průmyslové roboty vykonávají svoji činnost na základě připraveného programu, který je vytvořen programátorem, případně operátorem. Programování robotů můžeme rozdělit na základě způsobu tvorby programu na:

- On-line programování (programování konkrétního robotu v jeho blízkosti)
- Off-line programování (programování mimo robot na PC)

On-line programování

On-line programování je realizováno přímým naváděním robota operátorem přes požadované manipulační body na pracovišti. Robot je ručně řízený z programovacího panelu (teach-pendantu), naváděním do jednotlivých bodů, které jsou uloženy do paměti řídicího systému. V druhé části jsou programovány logické části řízení efektoru a periférií zařízení, kdy jsou definovány např. také rychlosti pohybů jednotlivých drah robotu. Výhodou on-line programování je práce v reálném prostředí robotu, nevznikají problémy s přesností a také je možné ihned otestovat funkčnost programu. Nevýhodou je pak poměrně dlouhá doba programování při složitějších manipulačních pohybech a cyklech, při kterých je ve většině případů robot nevyužit. Postup on-line programování je znázorněn na obr. 22.

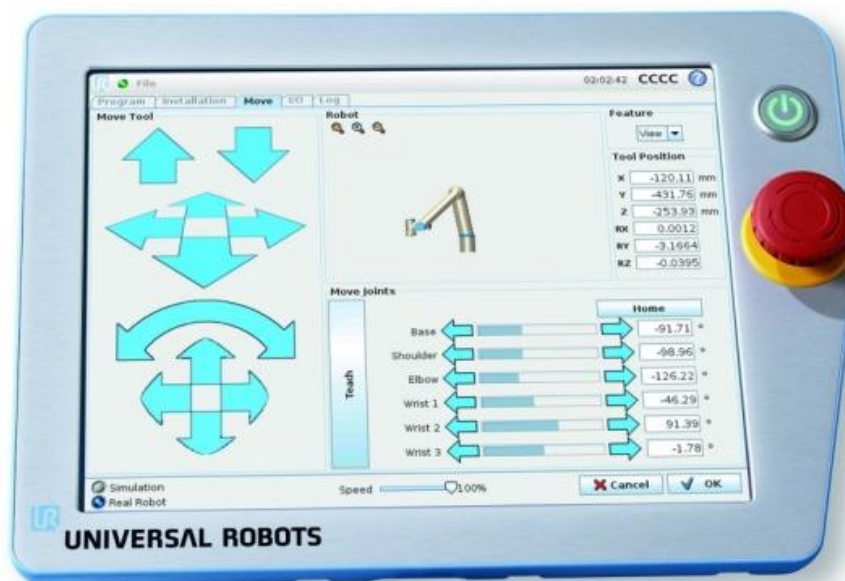


Obr. 22 – Postup on-line programování robotu [23]

Podle způsobu polohování robotu v prostoru je možné on-line programování realizovat dvěma způsoby a to:

Teach – in

Robot je operátorem postupně naváděn do jednotlivých pracovních pozic v prostoru, které jsou následně uloženy do paměti robotu. Navádění probíhá pomocí ovládacího panelu robotu, tzv. teach-pendantu (obr. 23). Po spuštění automatického režimu pak robot postupně prochází všemi naprogramovanými pozicemi, kdy však nemusí být známy přesné trajektorie (PTP), což může být v některých případech nežádoucí. Výhodou je snadné programování.



Obr. 23 – Ovládací panel od firmy Universal Robots [8]

Play-back

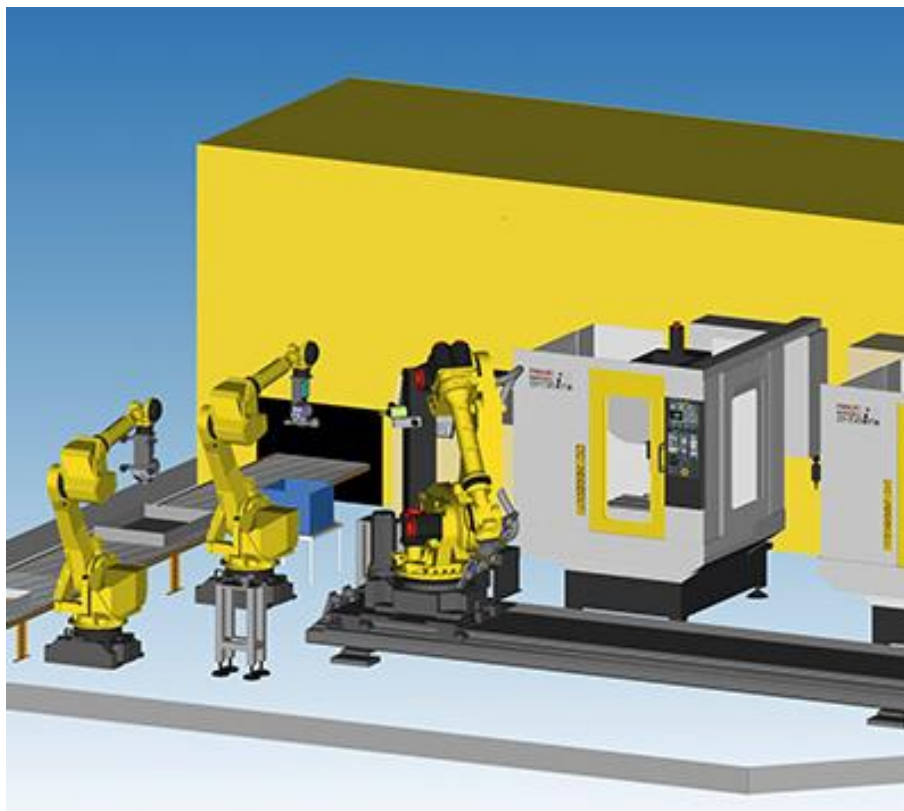
U robotů používaných pro operace, při kterých nejsou kladeny velké požadavky na přesnost polohování (např. lakovací robot) je možné využít programování způsobem Play-back. Operátor manuálně vede robota po požadované dráze, kdy současně dochází k zaznamenávání trajektorie pohybu do řídicího systému s taktem obvykle v rozmezí 10-20ms. Po spuštění automatického režimu se robot pohybuje po zaznamenané trajektorii. Programování tímto způsobem je rychlé, avšak méně přesné [21].

Off-line programování

Off-line programování je založeno na softwaru, který umožňuje 3D virtuální simulaci celého robotizovaného pracoviště včetně robotů, výrobních strojů, manipulovaných objektů a celého okolí. Programování je založeno na kinematickém, případně i dynamickém simulačním modelu daného robotu, kdy v softwaru programátor zapisuje body, definuje dráhy a jiné činnosti robotu s ohledem na konkrétní aplikaci. Na základě simulace je možné celý proces optimalizovat, upravovat dráhy robotu a sledovat vše v reálném čase, a tak dosáhnout ideálního pracovního procesu. Takto optimalizovaný program je poté přeložen do jazyka robotu a

importován do reálného systému. Hlavní výhodou off-line programování je možnost vytvářet program mimo reálné prostředí ještě před realizací projektu, což má za následek výraznou finanční a časovou úsporu. Nevýhodou je nutná další investice do softwaru, ve kterém je možné tento způsob programování realizovat [23, 24].

Na obr. 24 je vidět virtuální model pracoviště v softwaru ROBOGUIDE firmy FANUC, která stejně jako velká část firem vyrábějící průmyslové roboty nabízí svým zákazníkům software určený pro off-line programování robotů.



Obr. 24 – Ukázka virtuálního modelu robotického pracoviště [5]



4 Stavba a testování výchozího robotu

Součástí kapitoly je seznámení se samotným projektem robotu BCN3D MOVEO. Dále je v kapitole provedeno zhodnocení výchozí konstrukce robotu BCN3D MOVEO a jeho řízení na základě stavby podle dostupných podkladů na internetu a testování. Následuje shrnutí stavu robotu s návrhy na změnu konstrukce včetně pohonů a řízení.

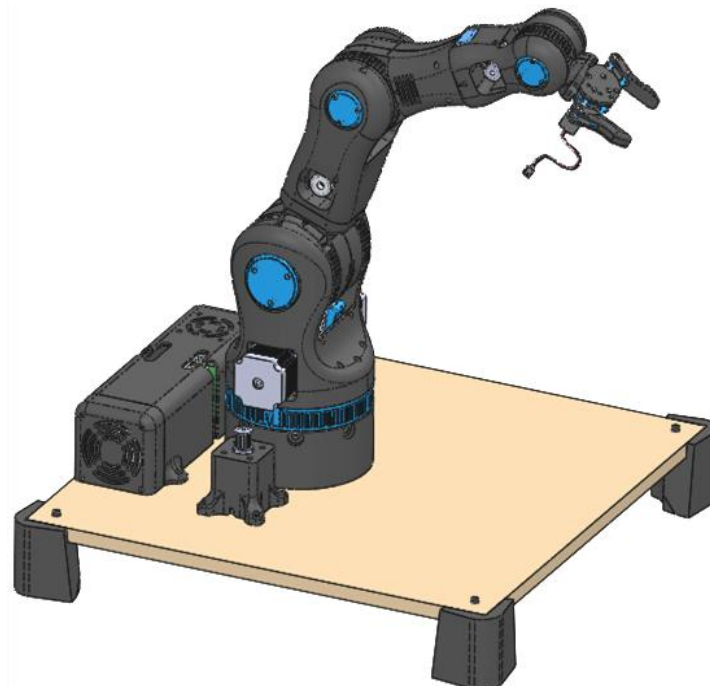
4.1 Projekt BCN3D MOVEO

Projekt robotického ramene BCN3D MOVEO [25] byl vytvořen inženýry španělské společnosti BCN3D Technologies ve spolupráci se vzdělávacím institutem katalánské vlády s předem jasným cílem, a to přinášet digitální výrobní technologii všem. Představa byla vytvořit robotické rameno, které by bylo k dispozici nejen studentům španělských univerzit k výuce robotiky, mechanického designu, automatizace a průmyslového programování a které by zároveň mělo nízké výrobní náklady.

Výsledkem byl detailně zpracovaný projekt 5osého robotického ramene s označením BCN3D MOVEO, jehož veškeré nosné díly jsou konstruovány tak, aby byly jednoduše vytisknutelné na 3D tiskárně. To umožňuje vyrobit jednoduše a levně potřebné a tvarově komplikované díly. Kromě tisknutých dílů jsou dále ke stavbě mechanické části potřeba jen běžně dostupné komponenty v podobě šroubů a kuličkových ložisek. Pohony jednotlivých os jsou vyřešeny krokovými motory různých velikostí, které jsou některé doplněny o převod ozubeným řemenem. Řízení robotu je na platformě Arduino Mega 2560 s upraveným firmwarem Marlin, který se primárně využívá k ovládání 3D tiskáren.

Celý projekt je veden jako open-source, což znamená, že veškeré data potřebná ke stavbě robotu BCN3D MOVEO jsou veřejně dostupná na stránkách firmy BCN3D Technologies, která stojí za vznikem projektu. To umožňuje postavení robotu všem, kdo by o něj měli zájem, což bylo hlavním cílem projektu. CAD modely a další dokumentace potřebné ke stavbě a výrobě robotu jsou k dispozici na GitHub uložišti firmy BCN3D Technologies [26], kde je kromě stažení dat možné sledovat například jednotlivé aktualizace projektu, případně sdílet mezi uživatele své úpravy či nová technická řešení na daném projektu a tak podpořit open-source projekt. Na obr. 25 lze

vidět CAD model sestavy robotu BCN3D MOVEO ve výchozím stavu v programu SolidWorks, ve kterém je celý model vytvořen a zveřejněn.



Obr. 25 – CAD model robotu BCN3D MOVEO v původním stavu

4.2 Stavba a testování

Robot BCN3D MOVEO byl vyroben a postaven podle dostupných podkladů s minimálními úpravami (obr. 26). Všechny hlavní mechanické díly byly vyrobeny technologií 3D tisku FDM (fused deposition modeling), kdy dochází k tavení plastové struny a nanášení jednotlivých vrstev na sebe. Díly byly vytisknuty z materiálu PLA, který je doporučen autory projektu a který je vhodný pro tisk velkých objektů z důvodu minimálního smrštění při chladnutí. Následně byl robot zkompletován po mechanické stránce bez větších komplikací podle manuálu, který je také součástí projektu [26].

Následovalo osazení mechanické konstrukce robotu doporučenými krokovými motory, které spolu s ozubenými řemeny, s výjimkou 4. osy, realizují pohyb jednotlivých os. Poté bylo provedeno zapojení elektroniky robotu, které je velmi podobné jako u hobby 3D tiskáren. Krokové motory jsou řízeny drivery TB6560 určené pro jednoduché řízení krokových motorů, které však neumožňují dostatečné nastavení regulace. Celkové řízení robotu bylo realizováno deskou Arduino MEGA 2560 a přídatnou deskou RAMPS 1.4, umožňující snadnější zapojení krokových motorů. Do

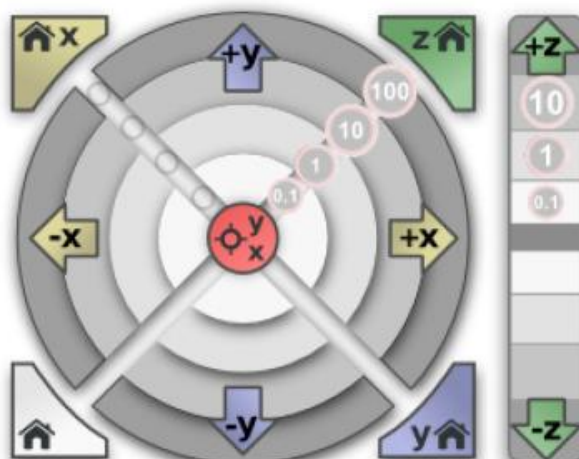
desky Arduino byl nahrán připravený firmware, který je opět k dispozici od autorů projektu [25]. Následovalo testování řízení robotu včetně testování mechanické části.



Obr. 26 – Realizovaný robot BCN3D MOVEO v původním provedení

Doporučeným programem pro ovládání robotu je program Pronterface (případně Repetier-Host), což jsou programy primárně určené k ovládání 3D tiskáren (ruční ovládání programu Pronterface na obr. 27). Umožňují v ručním režimu natáčení jednotlivých os robotu s tím, že první tři osy robotu jsou v programu reprezentovány jako běžné osy 3D tiskárny X, Y a Z. Osy 4. a 5. jsou vedeny jako extrudery. Řízení pohybu os je velmi komplikované, jelikož zadávané hodnoty natočení jsou v jednotkách krok/mm a skutečné pohyby robotu nijak pozičně neodpovídají zadávaným hodnotám. Kromě ručního řízení robotu program umožňuje také pohyb na základě nahraného Gcode, vytvořeného ručně např. v poznámkovém bloku. Tento způsob řízení pohybu robotu je také velmi neefektivní ze stejného důvodu, jako u ručního řízení. U řízení

robotu dále chybí výpočet inverzní kinematiky, který je pro řízení robotů zásadní (je možné řízení pohybu pouze jednotlivých kloubů, tzn. dopředná kinematika). Kinematiku musí v tomto případě řešit uživatel již při vytváření Gcode. Navíc je potřeba při každém volání pohybu 4. a 5. osou definovat hodnotu kroku/mm, která není na rozdíl od prvních třech os robotu pevně definována ve firmware a která je rozdílná u 4. a 5. osy. Přesné polohování robotu v prostoru je tedy velmi obtížné, spíše nereálné.



Obr. 27 – Ruční ovládání robotu v programu Pronterface [25]

4.3 Zhodnocení výchozího stavu robotu

Konstrukce robotu ve výchozím stavu včetně jeho řízení je navržena s ohledem na nízkou cenu, snadnou montáž a dostupnost dílů potřebných ke stavbě. Z tohoto důvodu jsou některé konstrukční uzly značně zjednodušeny, což ubírá robotu na funkčnosti a je také zdrojem některých konstrukčních problémů. Také řízení robotu realizováno pomocí programu na řízení 3D tiskárny neodpovídá řízení průmyslových robotů a je velmi obtížné jakkoliv robota řídit.

Na základě zkušeností ze stavby robotu a testování, při kterém se projevíly některé konstrukční problémy, a způsob řízení se ukázal jako nevyhovující pro ovládání robotu, bylo rozhodnuto o následujících změnách, z nichž většina bude v následujících kapitolách řešena:

- **Změna materiálu tištěných nosných dílů konstrukce robotu** – Kvůli nízké teplotě skelného přechodu, jejíž hodnota je u použitého PLA kolem 60°C, není vhodné použití materiálu u tištěných dílů, které přicházejí do styku se zahřívajícími se díly (v našem případě motory). To se projevilo jako



jeden z problémů při testování. Všechny tisknuté díly budou tedy z materiálu PETG, který je kromě vyšší teploty skleného přechodu také pevnější a je výrobcí filamentu doporučován pro tisk mechanicky namáhaných dílů.

- **Optimalizace pohonů jednotlivých os** - Některé z os nedisponují dostatečným úhlovým zrychlením a tudíž dynamika celého robotu je nevyhovující.
- **Úprava konstrukce 1. osy** - Konstrukce 1. osy nevyhovuje požadavkům polohování robotu a pohon osy je velmi poddimenzován.
- **Úprava konstrukce 4. osy** - Nevyhovující je především uložení 4. osy, které neumožňuje plynulý chod a způsobuje nepřesnosti polohování. Dále pak poddimenzovaný pohon.
- **Konstrukce 6. osy** - Rozšíření robotu o 6. osu z důvodu zvýšení možností polohování robotu a konstrukčnímu přiblížení v praxi používaným průmyslovým robotům.
- **Zajištění stabilní polohy robotu při neaktivních pohonech** - Po vypnutí napájení krokových motorů dochází k nežádoucímu pohybu robotu vlivem gravitační síly a hrozí nebezpečí poškození robotu.
- **Řízení robotu** – Nevyhovující řízení robotu pomocí programu na ovládání 3D tiskárny, které neumožňuje přesné polohování robotu v kartézském souřadném systému (chybí inverzní kinematika).



5 Konstrukční úpravy robotu

V následující kapitole jsou popsány jednotlivé návrhy mechanických úprav robotu BCN3D MOVEO.

5.1 Optimalizace pohonů

Při testování bylo zjištěno, že některé z os nedisponují dostatečným úhlovým zrychlením a dynamika robotu je nevyhovující. To bylo důvodem optimalizace pohonů os robotu. Pohony byly optimalizovány na základě teoretického maximálního úhlového zrychlení v kritických kinematických konfiguracích robotu. Výpočet byl založen na známé hodnotě krouticího momentu použitého krokového motoru, resp. krokových motorů, a na momentu setrvačnosti pohybujících se částí dané osy robotu získaného z CAD modelu robotu po přiřazení hustot odpovídajících použitým materiálům. Ten byl použit vždy maximální možné hodnoty pro danou osu. Pro simulaci zatížení robotu bylo přidáno do CAD modelu těleso o teoretické hmotnosti 250g, umístěné v efektoru na konci ramene robotu.

Optimalizace byla provedena ve dvou krocích, kdy v první části byly vypočteny hodnoty maximálních úhlových zrychlení os výchozí konstrukce robotu s původními pohony. Výpočtem se ověřilo, že pohony na 1., 2. a 4. ose robotu jsou poddimenzovány, protože hodnoty úhlového zrychlení jsou oproti zbylým osám výrazně nižší, což se projevilo také při testování výchozího robotu. Hodnoty úhlových zrychlení byly také porovnány s hodnotami robotu FANUC - LR Mate 200iD/4S (str. 15) [5], u kterého se podařilo hodnoty dohledat a které se u 4. a 5. osy robotu pohybují okolo 44rad/s. Na základě toho byly v další části optimalizace navrženy nové pohony u zmíněných os s ohledem na možnosti konstrukce a požadovaném úhlovém zrychlení. Při následném přepočtu maximálních úhlových zrychlení bylo počítáno s tím, že momenty setrvačnosti pohybujících se částí daných os se nebudou výrazně lišit po realizaci pozdějších úprav konstrukce.

Po návrhu všech konstrukčních úprav robotu, včetně implementace nových pohonů, které jsou popsány v následujících kapitolách, byly výsledné hodnoty maximálních úhlových zrychlení os robotu opět přepočteny s již finálními momenty setrvačnosti.

Výpočet úhlových zrychlení byl zpracován v programu Excel, který je přiložen jako příloha č. 3. Postup výpočtu úhlového zrychlení u 1. osy robotu realizovaný v programu Excel je znázorněn v následující podkapitole. Stejný postup výpočtu byl aplikován i u ostatních os robotu.

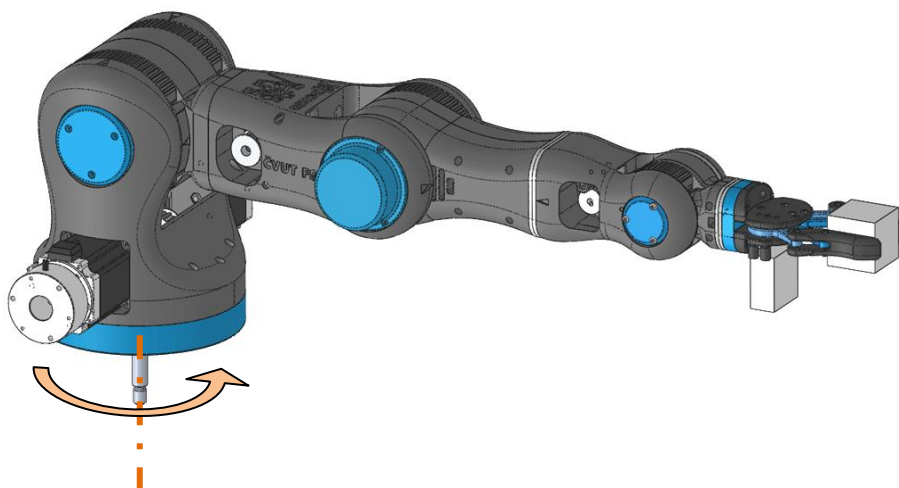
5.1.1 Příklad výpočtu výsledného úhlového zrychlení 1. osy

Výpočet vychází z Newtonovy pohybové rovnice pro rotační pohyb (1).

$$M_K = I_O \cdot \varepsilon \quad (1)$$

Hodnota momentu setrvačnosti I_{O1} 1. osy robotu byla získána z CAD modelu a to v kritické kinematické konfiguraci robotu (obr. 28), kdy je pro danou osu hodnota I_{O1} největší. Hodnota momentu setrvačnosti je:

$$I_{O1} = 0,38779 \text{ [kg.m}^2\text{]}$$



Obr. 28 – Poloha robotu použitá pro výpočet

Pohon nové 1. osy robotu je realizován dvěma krokovými motory disponujícími krouticím momentem M_{k0} a ozubeným řemenem s převodem i viz kapitola 5.2. Výsledný krouticí moment M_{kcelk} na ose je:

$$M_{Kcekl} = 2 \cdot M_{k0} \cdot i = 2 \cdot 1,26 \cdot \frac{72}{14} = 12,96 \text{ [N.m]} \quad (2)$$

Pro výpočet úhlového zrychlení 1. osy byl výsledný krouticí moment M_{kcelk} snížen o 10%, čímž jsou zohledněno možné ztráty v mechanické části pohonu. Úhlové zrychlení 1. osy robotu ε_1 s již upravenou konstrukcí je:

$$\varepsilon_1 = \frac{0,9 \cdot M_{Kcekl}}{I_{O1}} = \frac{0,9 \cdot 12,96}{0,38779} = 30,1 \text{ [rad/s}^2\text{]} \quad (3)$$

5.1.2 Výsledky optimalizace pohonů

Při optimalizaci pohonů byly zvoleny nové pohony pro 1., 2. a 4. osu robotu BNC3D MOVEO, které na základě výpočtů a testování nedisponovaly dostatečným úhlovým zrychlením. Přehled zvolených nových pohonů viz příloha č. 3. Hodnoty úhlových zrychlení jednotlivých os před a po optimalizaci jsou vidět v tab. 9. Lze si všimnout, že hodnoty u 3. a 5. osy se také změnily, přestože byl ponechán původní pohon. Důvodem jsou navržené konstrukční úpravy, které byly provedeny a které mají za následek zvětšení momentu setrvačnosti k daným osám, nicméně hodnoty úhlového zrychlení těchto os jsou stále dostačující. Úhlové zrychlení 6. osy je výrazně větší oproti ostatní osám. Přestože byl krokový motor s pohledu úhlového zrychlení předimenzován, byl použit z konstrukčních důvodů popsanych v kapitole 5.4 Návrh konstrukce 6. osy.

Úhlové zrychlení jednotlivých os				
	nové		původní	
1. osa	30,1	rad/s ²	13,0	rad/s ²
2. osa	50,4	rad/s ²	29,3	rad/s ²
3. osa	62,3	rad/s ²	67,6	rad/s ²
4. osa	95,0	rad/s ²	32,6	rad/s ²
5. osa	77,3	rad/s ²	79,5	rad/s ²
6. osa	860,1	rad/s ²	-	rad/s ²

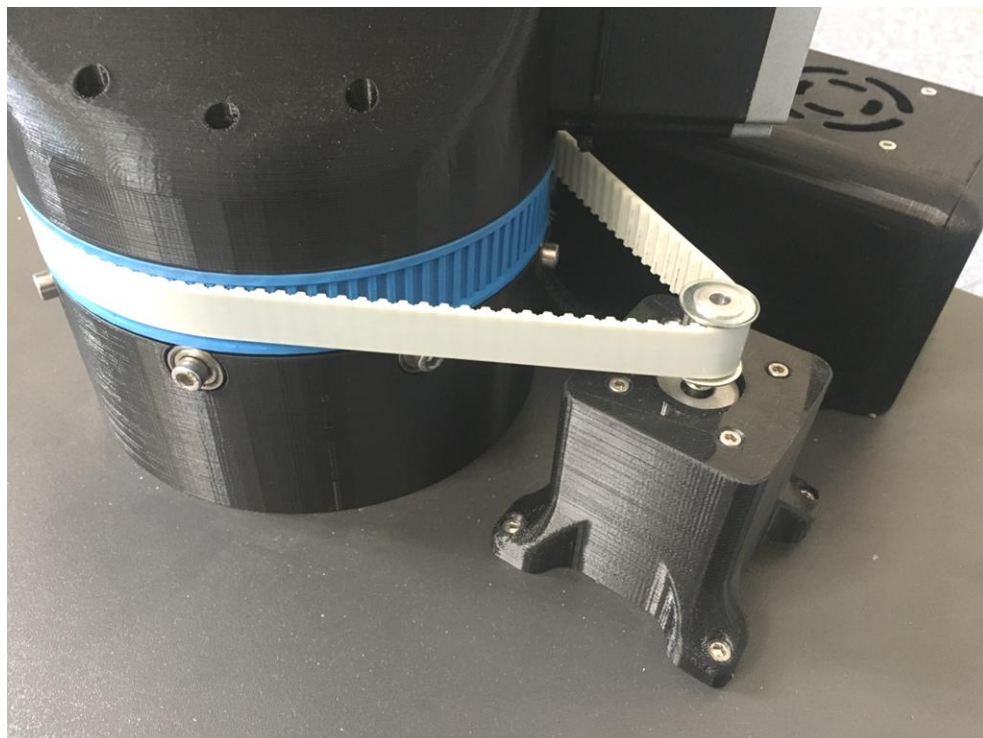
Tab. 9 – Úhlové zrychlení os robotu před a po optimalizaci

5.2 Návrh úpravy konstrukce 1. osy

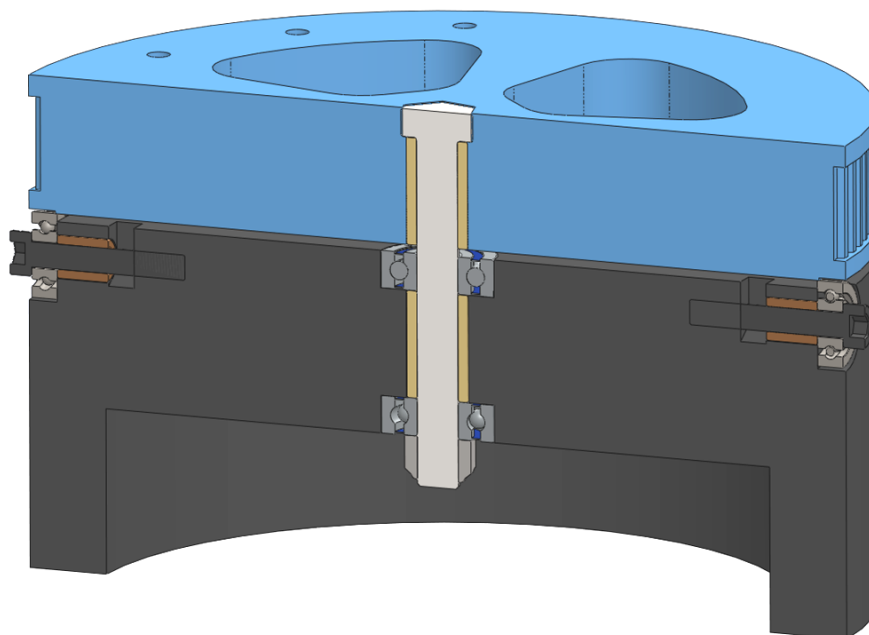
Kromě poddimenzovaného pohonu bylo při testování a stavbě výchozího robotu zjištěno, že konstrukce 1. osy je značně zjednodušená a podřízena stavbě z běžně dostupných komponent v železářství bez potřeby přesně obráběných dílů, což ubírá na funkčnosti celého robotu. Tímto omezením nebyl nový návrh limitován, což umožnilo komplexnější návrh konstrukce. Snahou návrhu nové 1. osy bylo kromě vyřešení výše zmíněných konstrukčních nedostatků také implementování celého pohonu do základu robotu a přiblížení se tak vzhledu v praxi používaným průmyslovým robotům.

5.2.1 Původní konstrukce 1. osy

Původní konstrukci 1. osy robotu BCN3D MOVEO lze vidět na obr. 29 a 30. Pohon byl řešen krokovým motorem SX17-1005 velikosti NEMA17 disponující momentem 0,5 Nm, který prostřednictvím nekrytovaného převodu ozubeným řemenem realizoval pohyb 1. osy robotu. Velká řemenice byla stejně jako většina nosných dílů konstrukce vytištěna na 3D tiskárně, do níž byl vložen přes distanční pouzdro šroub M8 s šestihrannou hlavou, prostřednictvím kterého byl robot uložen v ložiscích do základu robotu. V axiálním směru byl robot uložen na ložiscích umístěných po obvodu základu robotu, které byly pomocí šroubů velikosti M5 a distančních pouzder uloženy v tištěném základu robotu. Způsob uložení ložisek a pouzder na závitové části šroubu vykazoval velké vůle bez ohledu na to, že konstrukčně je toto řešení nesprávné a také to byl jeden z důvodů problematické funkce 1. osy robotu. Motor byl umístěn do tištěného dílu, který byl upevněn na základní desce stejně jako robot. Držákem motoru bylo možné pohybovat díky oválným díram v základní desce a tak napnout ozubený řemen s tím, že toto řešení bylo jedno z dalších konstrukčních problémů konstrukce 1. osy.



Obr. 29 – Původní verze 1. osy robotu BCN3D MOVEO

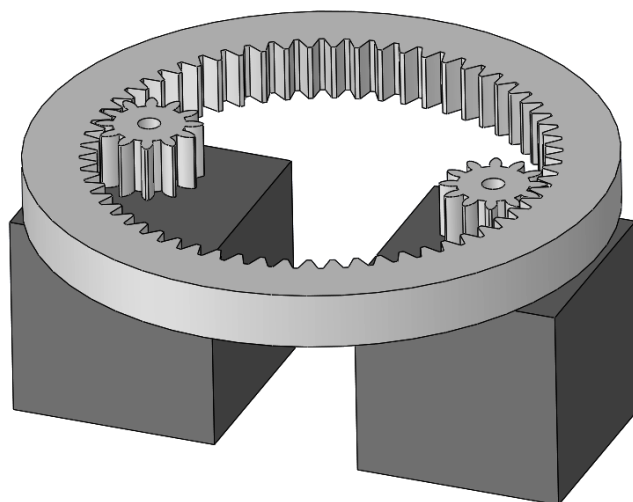


Obr. 30 – Řez původní konstrukcí 1. osy robotu BCN3D MOVEO

5.2.2 Konstrukční varianty řešení pohonu 1. osy

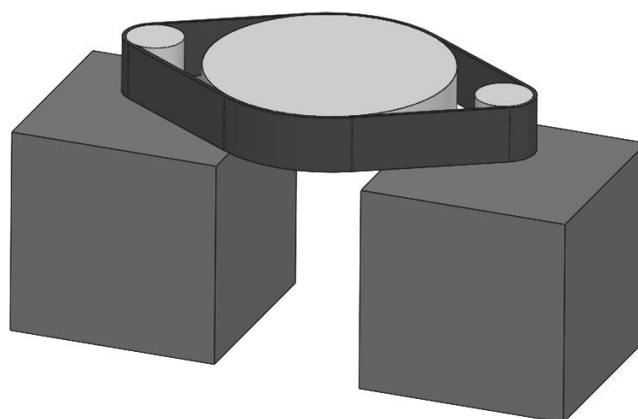
Vzhledem k velikosti potřebného krouticího momentu k dosažení požadovaného úhlového zrychlení osy a zároveň k zachování nízké zástavby základu robotu, byl zvolen pohon dvěma krokovými motory viz optimalizace. Vybrané krokové motory disponují krouticím momentem 1,26 Nm. Při návrhu byly uvažovány dvě varianty řešení pohonu, které by prostorovým uspořádáním vyhovovaly a které se lišily použitým převodem s tím, že velikost převodového poměru by byla u obou variant stejná.

První varianta využívá přímého ozubení (obr. 31), kdy motory jsou staticky uložené v základu robotu a přes pastorky s přímým evolventním ozubením se přenášel krouticí moment na kolo s vnitřním evolventním ozubením, připevněné k pohyblivé části 1. osy robotu. Vybraná kola jsou běžně k dispozici a v nabídce je má např. firma Maedler (v ČR zastoupená firmou Ameco s.r.o. [27]). Výhodou tohoto řešení je možnost přesného polohování robotu a mechanická odolnost převodu. Nevýhodou je nutnost přesného seřízení polohy pastorků a kola s vnitřním ozubením, potřeba zajištění jejich trvalé vzájemné polohy a vysoká pořizovací cena ozubených kol.



Obr. 31 – Varianta č. 1 s přímým ozubením

Druhá varianta využívá ozubeného řemenu, kdy krokové motory jsou opět staticky uloženy v základu robotu, a přenos krouticího momentu je realizován pomocí ozubeného řemene vedeného viz obr. 32. Výhodou tohoto řešení je jednoduchá seřiditelnost, montáž a cena. Nevýhodou by mohla být menší tuhost převodu oproti první variantě.

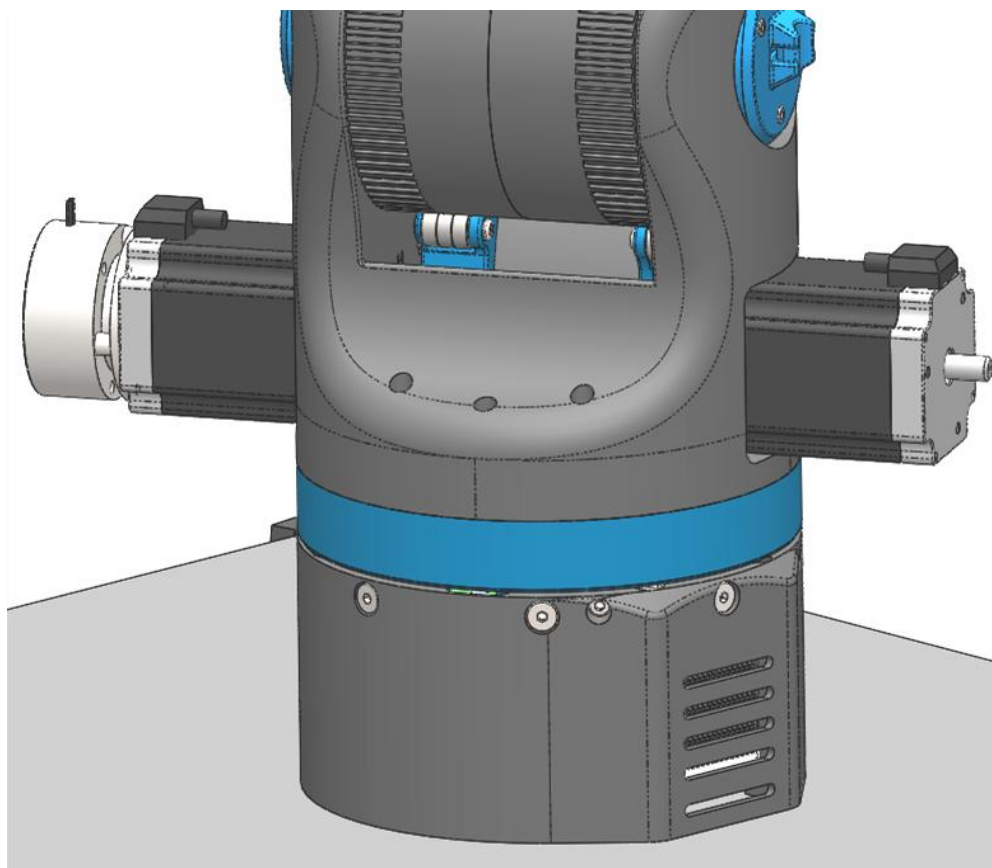


Obr. 32 – Varianta č. 2 s řemenovým převodem

Pro finální návrh 1. osy robotu byla zvolena druhá varianta pohonu s řemenovým převodem především z důvodu nižší ceny a také menších nároků na přesnost výroby oproti první variantě.

5.2.3 Výsledná konstrukce 1. osy

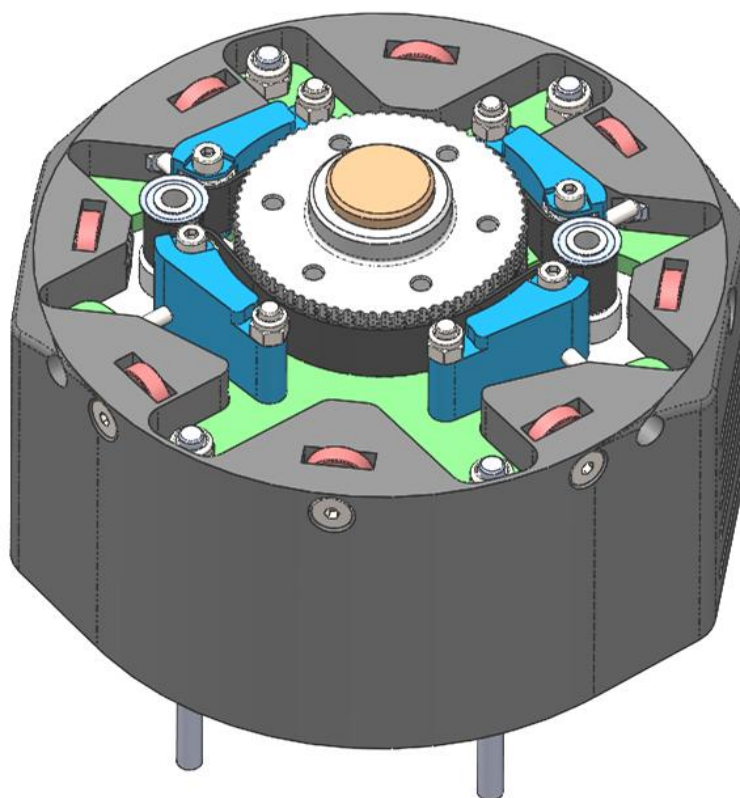
V předchozí kapitole byla zvolena druhá varianta pohonu ze zmíněných důvodů. Na základě tohoto rozhodnutí a optimalizace pohonů byl vytvořen konstrukční návrh nové 1. osy robotu. Na rozdíl od předchozí konstrukce se povedlo vše implementovat do základu robotu a docílit tak kompaktnějšího konstrukčního provedení, obdobně jako se setkáváme u komerčních průmyslových robotů (obr. 33).



Obr. 33 – Nová konstrukce 1. osy robotu

Nosným dílem konstrukce je výtisk z 3D tiskárny, navržený s ohledem na technologii výroby. Pohon nové 1. osy se skládá ze dvou stejných krokových motorů velikosti NEMA23, které disponují každý krouticím momentem 1,26 Nm, což i při snížení převodu ozubeného řemene na polovinu oproti výchozí konstrukci postačuje k vyvození přibližně 2,5násobku zrychlení 1. osy oproti původní konstrukci (obr. 29, 30) viz optimalizace. Převod je složen z jedné 72z řemenice typu HTD3M a dvou malých 14z řemenic stejného typu uložených na hřídelích motorů. Ozubený řemen je průběžný řemen typu 03M-0276-15, díky němuž je umožněno otáčení 1. osy v celém rozsahu

360°, což u původní konstrukce nebylo možné, protože byl použit metrážový ozubený řemen ukotvený k velké řemenici původního převodu. Krokové motory jsou uchyceny k duralovému výpalku (zelený díl na obr. 34, 35, 36), jehož dalším úkolem je zpevnění tištěného dílu, zachycení napínacích sil řemene a také snížení rizika deformace tištěného plastového dílu při zvýšené teplotě motorů, ke kterému došlo u původní verze robotu BCN3D MOVEO. Duralový výpalek je k nosnému vytištěnému dílu připevněn pomocí čtyřech šroubů velikosti M5, které zároveň slouží jako osy držáků napínacích kladek řemene (modré díly na obr. 34, 36). Každá napínací kladka je kromě tištěného držáku složena třemi jednořadými radiálními kuličkovými ložisky typu 634ZZ (4x13x5 mm), které jsou použity i na ostatních napínacích kladkách řemenů výchozí i nové verze robotu a které se při testování osvědčily. Důvodem použití napínacích kladek je zvětšení úhlu opásání u malých řemenic a také vymezení vůle v převodu.



Obr. 34 – Vnitřní konstrukce 1. osy robotu

První návrh uložení pohyblivé části 1. osy robotu byl navrhnut s použitím dvou kosoúhlých ložisek velikosti 12x32x10 mm, které byly uloženy ve vytisknutém hlavním nosném dílu stejně jako finální uložení a předpokládalo se, že zachytí jak radiální, tak



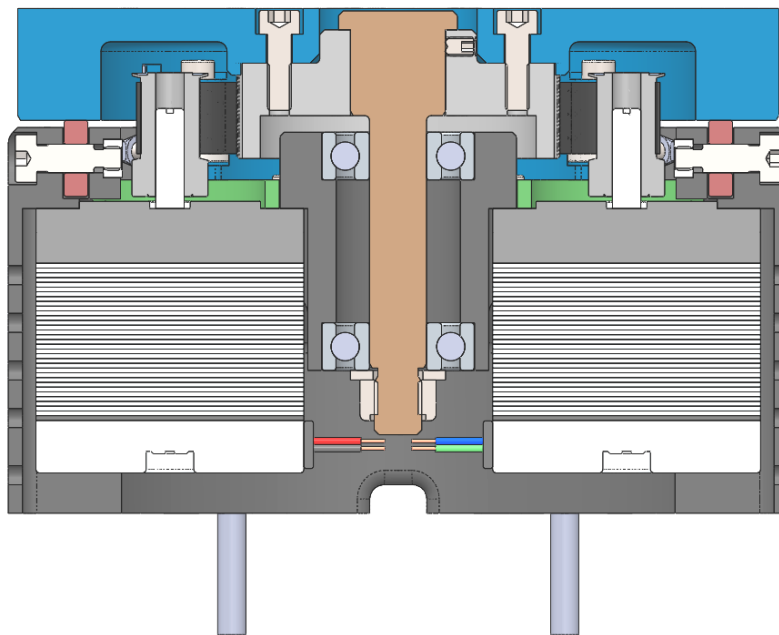
axiální zatížení. Ložiska umístěná po obvodu, o kterých bude zmínka v dalším odstavci, měla být jen záložní. Bohužel poddajnost výtisku je natolik velká, že uložení nebylo dostatečně tuhé a bylo přistoupeno k následujícímu řešení, kdy byla kosouhlá ložiska nahrazena levnějšími jednořadými radiálními kuličkovými ložisky a pro uložení využita také ložiska umístěná po obvodu.

Uložení pohyblivé části 1. osy robotu, tedy celé konstrukce robotu kromě nepohyblivého základu, je realizováno pomocí 8 ks ložisek 696A (6x16x5 mm), rozmístěných po obvodu horní části základu robotu (červené díly na obr. 34, 35, 36), které zachycují pouze axiální zatížení od pohyblivé části. Toto řešení bylo převzato z původní konstrukce robotu, které se při testování původní konstrukce osvědčilo. Změněna byla pouze pozice ložisek, která byla u nové konstrukce umístěna blíže ke středu otáčení 1. osy. Kromě vizuální změny (ložiska nejsou viditelná) bylo také zajištěno oboustranné uložení lícovaných šroubů, na kterých se nově ložiska otáčejí a zajišťují tak uložení s minimální vůlí. U původní konstrukce byla ložiska uložena na závitech standardních šroubů, které byly navíc k hlavnímu dílu upevněny letmo. Zachycení radiálního zatížení zajišťují dvě jednořadá radiální kuličková ložiska s rozměrem 12x32x10 mm, která nahradila dvě původní ložiska stejného typu s rozměry 8x22x7 mm. Vzhledem k velikosti ložisek oproti původní konstrukci, velikosti zatížení 1. osy v radiálním směru a také charakteru využití robotu nebyl proveden výpočet pro ověření životnosti ložisek. Předpokládá se, že statická únosnost ložisek je mnohonásobně vyšší než reálné zatížení. V ložiscích je umístěna duralová soustružená hřídel, která nahradila standardní šroub M8 u původní konstrukce. Na hřídeli je uložena upravená 72z duralová řemenice, která je zajištěna dvěma stavěcími šrouby velikosti M4. K řemenici je pak pomocí šesti šroubů velikosti M5 přišroubován modrý tištěný díl, ke kterému je připevněna zbývající část robotu. Kromě šroubového spojení mezi tištěným dílem a řemenicí je doplněno tvarové spojení, kdy v tištěném dílu je předtisknutý negativ řemenice, ve kterém je poté umístěna.

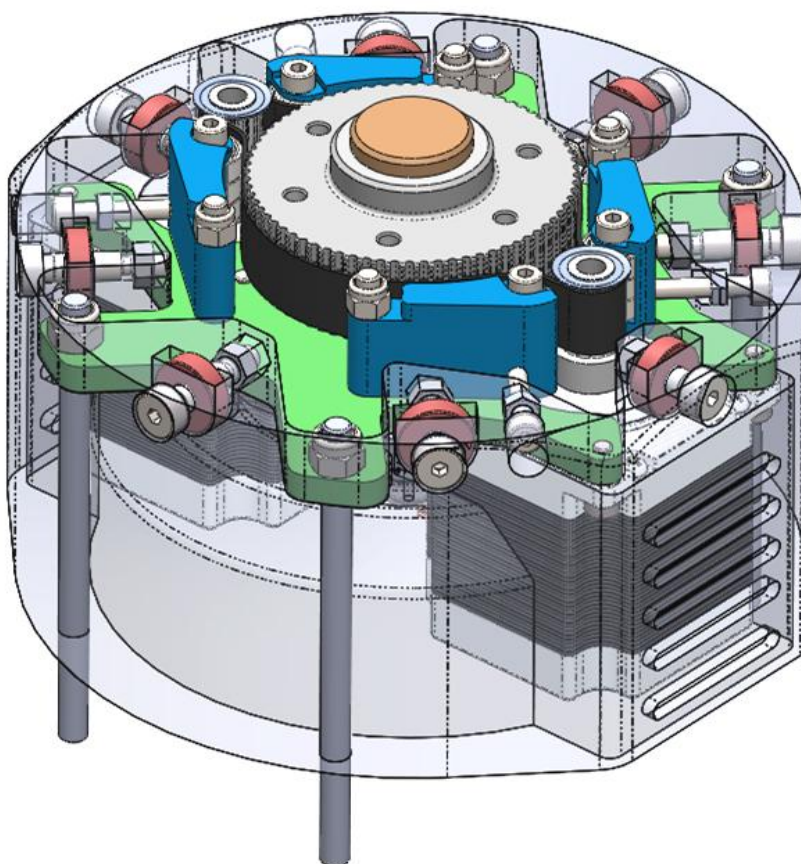
Řez celou novou konstrukcí 1. osy robotu je zobrazen na obr. 35.

Kotvení robotu k podstavci je provedeno pomocí čtyřech M6 závitových tyčí (obr. 36), které jsou vedeny skrz tištěný nosný díl konstrukce a tím dochází k dalšímu zpevnění dílu. Konec závitových tyčí je zajištěn kontramatkou v duralovém výpalku.

Ten byl použit z důvodů nízkých výrobních nákladů (oproti obráběným dílům), což splňovalo požadavek na levnou konstrukci.



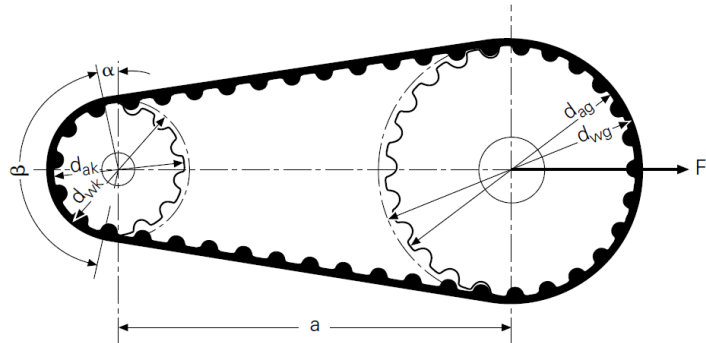
Obr. 35 – Řez konstrukcí 1. osy robotu



Obr. 36 – Provedení ukotvení robota k podstavci

5.2.4 Kontrola řemenového převodu

Návrh 1. osy robotu byl proveden s uvažováním řemenu s profilem HTD3M a šířkou 15mm. Pro kontrolu byl proveden výpočet dle katalogu firmy Continental [28].



Obr. 37 – Schéma převodu ozubeným řemenem [28]

Schematický obrázek (obr. 37) zobrazuje základní parametry převodu ozubeným převodem nutné pro kontrolní výpočet. Použitý převod má následující parametry:

Řemen: 03M-0276-15

Hnací řemenice: 14-03M-15, počet zubů $z_k = 21$

Hnaná řemenice: 72-03M-15, počet zubů $z_g = 72$

Určení provozního faktoru

Výpočet zahrnuje celkový provozní faktor c_0 , který je dán bezpečnostními koeficienty pro speciální provozní podmínky způsobené zátěží, zrychlením a únavou.

$$c_0 = c_2 + c_3 + c_4 \quad (4)$$

Určení koeficientu c_1 probíhá na základě parametru z_e . Úhel opásání β je v našem případě díky napínacím kladkám $\beta = 180^\circ$.

$$z_e = z_k \cdot \frac{\beta}{360} = 14 \cdot \frac{180}{360} = 7 \quad (5)$$

Parametr z_e je roven hodnotě 7 a dle tabulky 26 v katalogu [28] koeficient c_1 odpovídá $c_1 = 1$.

Hodnota koeficientu c_2 je odečtena z grafu uvedeného v katalogu [28].

$$c_2 = 1,7$$

Koeficient c_3 je dán převodovým poměrem, který je $i=5,143$, což odpovídá hodnotě koeficientu $c_3 = 0,4$ dle tabulky 28 v katalogu [28].



Koeficient c_4 představuje faktor únavy, který je dán dobou provozu. V případě řešeného převodu, který je doplněn předepínacími kladkami, odpovídá hodnota $c_4 = 0,2$ dle tabulky 29 v katalogu [28].

Koeficient c_5 v sobě zahrnuje délkový faktor a frekvenci kmitání řemenu. Řemen s profilem HTD 3M a roztečnou délkou řemenu $L_w = 276$ mm odpovídá koeficientu $c_5 = 1$ dle tabulky 30 v katalogu [28].

Celkový provozní faktor je spočítán jako

$$c_0 = c_2 + c_3 + c_4 = 1,7 + 0,4 + 0,2 = 2,3 \quad (6)$$

Získané jednotlivé koeficienty jsou shrnuty v následující tabulce (tab. 10).

c_1	1
c_2	1,7
c_3	0,4
c_4	0,2
c_5	1
c_0	2,3

Tab. 10 – Koeficienty $c_0 - c_5$ převodu

Kontrola šířky řemenu vychází ze vztahu $P \cdot c_0 \leq P_R \cdot c_1 \cdot c_5$. Pokud je uvedený vztah splněn, navržená šířka řemenu vyhovuje. Z tabulky 35 uvedené v katalogu [28] je odečtena hodnota $P_R = 0,034$ kW ($z_k = 14$, $n_k = 200$ ot/min). Teoretický výkon krokového motoru (2fázový krokový motor se jmenovitým napětím $U = 2,5$ V a jmenovitým proudem na fázi $I = 2,8$ A) je určen vztahem (7).

$$P = U \cdot I \cdot 2 = 2,5 \cdot 2,8 \cdot 2 = 0,014 \text{ kW} \quad (7)$$

$$P \cdot c_0 \leq P_R \cdot c_1 \cdot c_5 \quad (8)$$

$$0,014 \cdot 2,3 \leq 0,034 \cdot 1 \cdot 1$$

$$0,0322 \leq 0,034$$

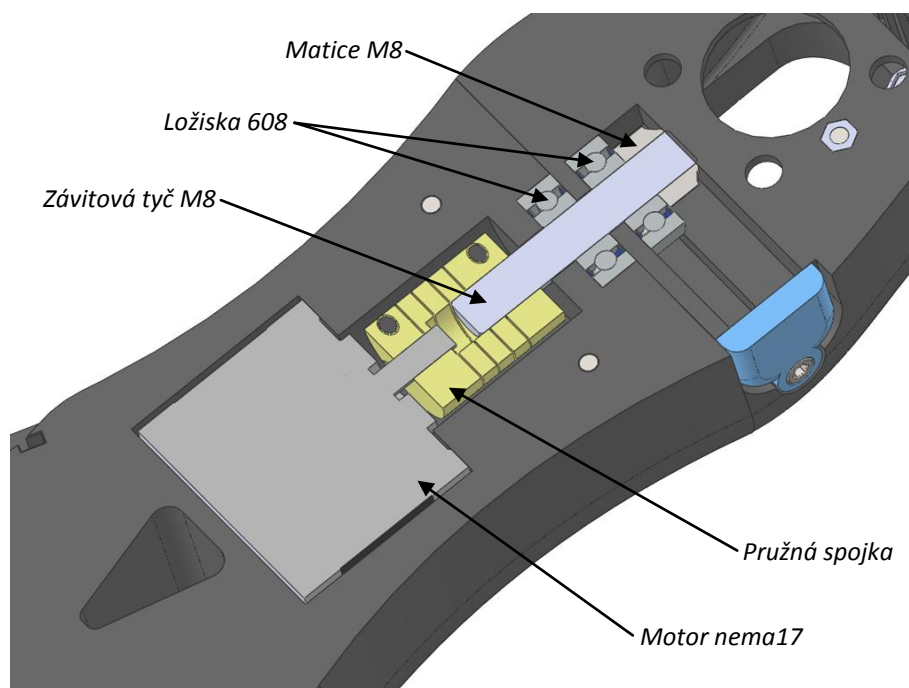
Vztah pro kontrolu šířky řemenu je splněn => **navržený řemen vyhovuje.**

5.3 Návrh úpravy konstrukce 4. osy

Při stavbě a testování 4. osy původního robotu se projevíly značné problémy s plynulostí chodu osy a nepřesností polohování. Důvodem byl výrazně poddimenzovaný pohon, ale také nevhodné uložení osy. Původní konstrukce 4. osy byla opět značně zjednodušena a podřízena stavbě z běžně dostupných komponent v železářství bez potřeby přesně obráběných dílů na úkor funkčnosti.

5.3.1 Původní konstrukce 4. osy

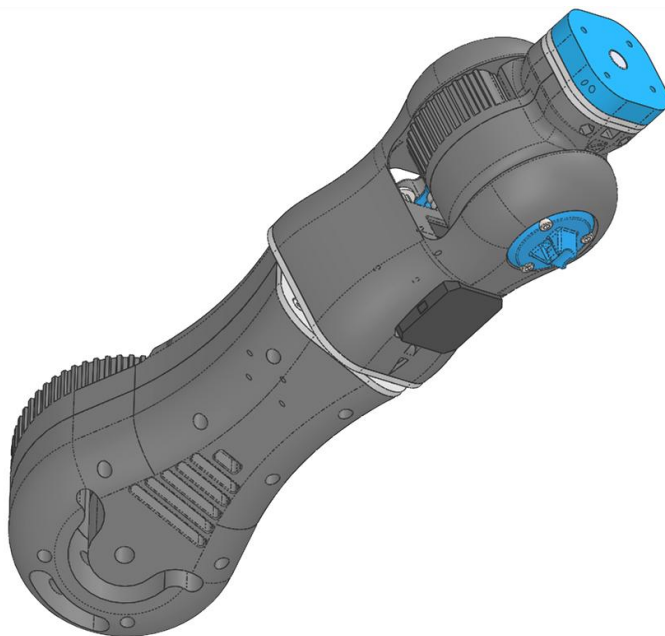
Pohyb 4. osy původní konstrukce byl realizován krokovým motorem SX17-1003 velikosti NEMA17 disponujícím krouticím momentem 0,3 Nm. Přenos momentu mezi motorem a hřídelí byl realizován pružnou spojkou. Hřídel byla vyrobena ze závitové tyče M8, uložené do dvou radiálních jednořadých kuličkových ložisek 608 (8x22x7 mm), což vykazovalo opět značné vůle. Jedno ložisko bylo nalisováno v pohybuujícím se dílu, druhé v nepohyblivém v rámci 4. osy. Přenos momentu mezi hřídelí a pohybuujícím se dílem byl realizován maticí M8 zalisované do tohoto dílu. Řez původní konstrukcí 4. osy i s popisem je na obr. 38. Důvodem problémů s plynulostí chodu osy byl pohyb tištěných povrchů po sobě, což souvisí s nevhodným uložením osy.



Obr. 38 – Řez původní konstrukcí 4. osy

5.3.2 Výsledná konstrukce 4. osy

Na základě zhodnocení původní 4. osy robotu byla navržena nová konstrukce osy s důrazem na vhodnější uložení osy (obr. 39).



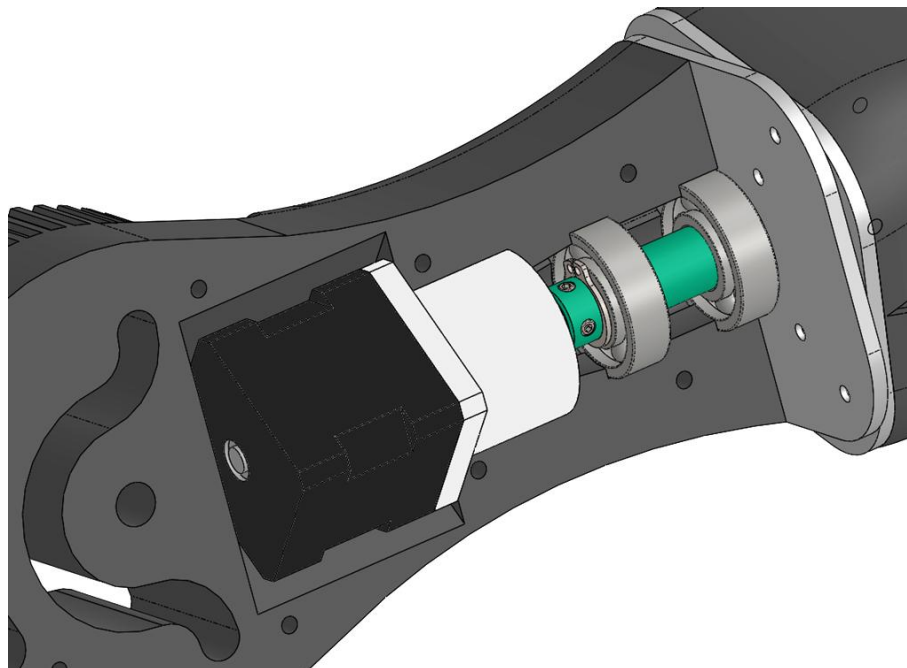
Obr. 39 – Nová konstrukce 4. osy

Na základě optimalizace byl zvolen nový krokový motor velikosti NEMA14 doplněný o planetovou převodovku s převodovým poměrem 5,18:1, který je těžší (cca o 30 %), avšak díky planetové převodovce disponuje trojnásobným krouticím momentem oproti původnímu motoru, tedy 0,9 Nm. Motor byl na rozdíl od původní konstrukce uložen blíže k ose otáčení 3. osy robotu, což snížilo moment setrvačnosti této osy. Přenos momentu z motoru je přenášen na soustruženou hřídel (zelený díl na obr. 40, 41), která je zajištěna dvěma stavěcími šrouby M3 a uložena ve dvou radiálních jednořadých kuličkových ložiskách 6001 (12x28x8 mm) přenášejících především radiální zatížení osy. S ohledem na zvolenou velikost ložisek oproti původní konstrukci, velikosti zatížení 4. osy a také charakteru využití robotu nebyl proveden výpočet pro ověření životnosti ložisek. Předpokládá se, že statická únosnost ložisek je mnohonásobně vyšší než reálné zatížení. Vzhledem k velké poddajnosti uložení ložisek byla osa doplněna o frézované teflonové podložky mezi pohybující se tisknuté díly pro plynulý pohyb s minimálním třením a zároveň k zachycení axiálního zatížení od pohyblivé části 4. osy. V opačném směru je axiální směr zajištěn pojistným kroužkem

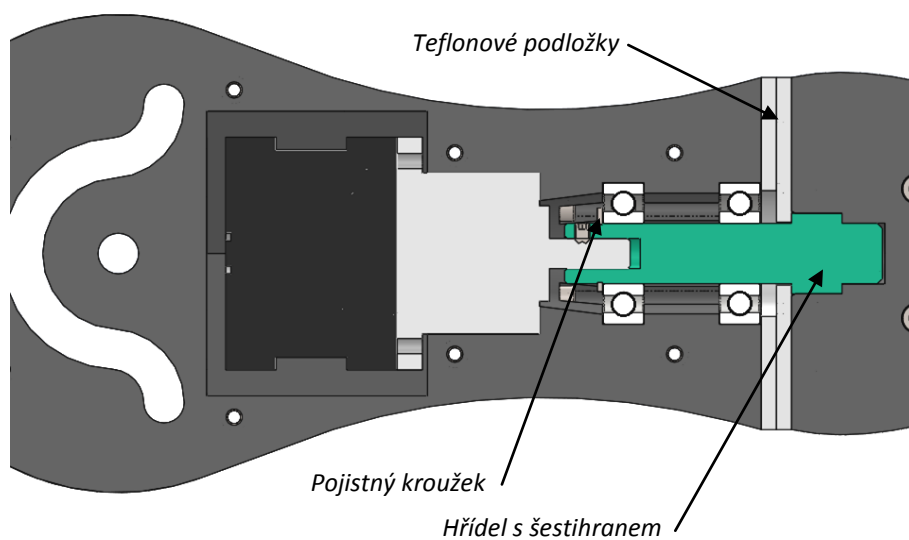
pro hřídele. Moment mezi hřídelí a pohyblivou částí je přenášen tvarovým spojením, kdy na hřídeli je šestihran, který je zalisován do pohyblivého dílu a proti případnému pohybu zajištěn teflonovou podložkou na daném dílu. Obě teflonové podložky jsou připevněny šrouby se zápusťnou hlavou.

Celý pohon 4. osy je umístěn mezi dva tisknuté díly, které po sesazení tvoří rameno robotu.

Konstrukční provedení 4. osy je zobrazeno na obr. 40 a 41.



Obr. 40 – Konstrukční provedení 4. osy

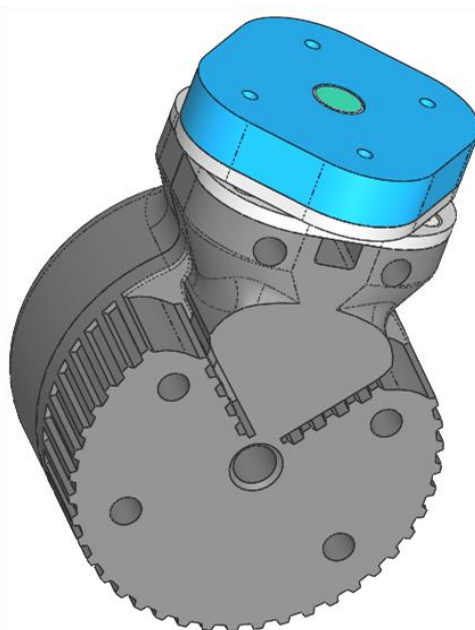


Obr. 41 – Řez konstrukcí 4. osy robotu

5.4 Návrh konstrukce 6. osy

Rozšíření robotu o 6. osu z důvodu zvýšení možnosti polohování robotu a konstrukčnímu přiblížení v praxi používaným průmyslovým robotům je jedním z cílů diplomové práce.

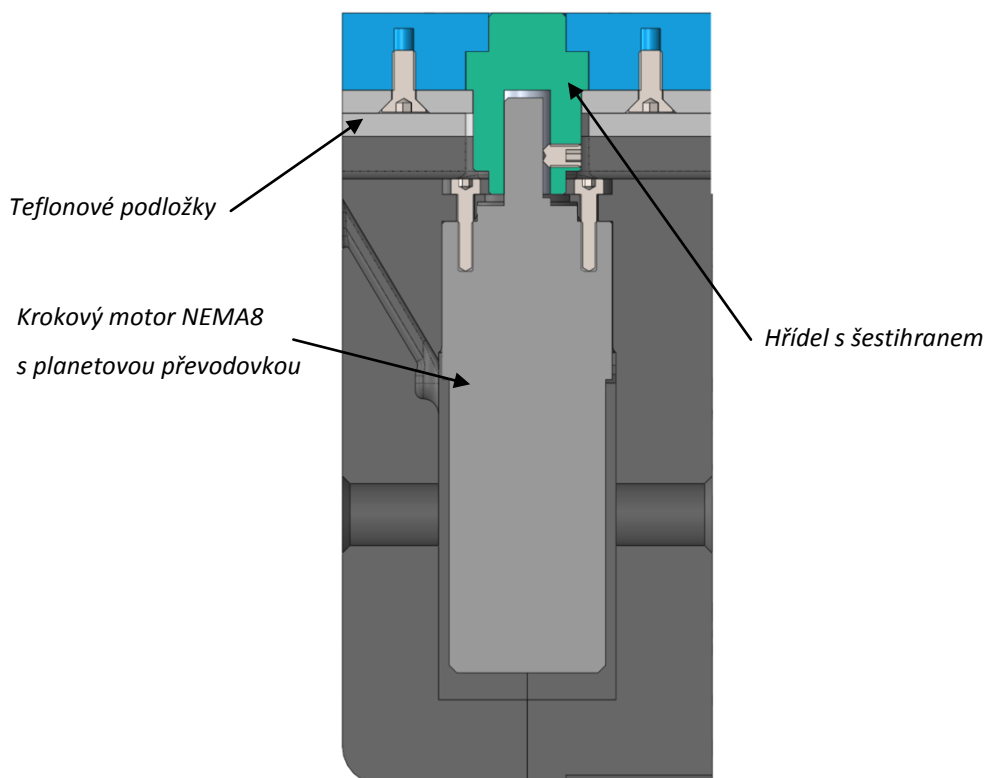
Na základě optimalizace byl zvolen k pohonu 6. osy krokový motor velikosti NEMA8 doplněný planetovou převodovkou s převodovým poměrem 4,75:1 disponující krouticím momentem 0,2 Nm, který umožňuje ose maximální úhlové zrychlení 860 rad/s^2 . I přes řádově větší úhlové zrychlení orptoi ostatním osám byl motor zvolen a to z důvodu konstrukce, kdy uložení hřídele planetové převodovky bude využito zároveň jako uložení celé 6. osy robotu. Přenos momentu mezi motorem a pohybující se přírubou je opět realizován soustruženou duralovou hřídelí s šestihranem, tudíž tvarovým spojením. Příruba je na hřídeli nalisována a stejně jako u 4. osy pojištěna proti případnému vysunutí frézovanou teflonovou podložkou. Další funkcí frézovaných podložek je opět plynulý pohyb s minimálním třením a zároveň zachycení axiálního zatížení od pohyblivé části 6. osy. Hřídel je k motoru připevněna dvěma stavěcími šrouby M3. Pohon je stejně jako u 4. osy sevřen mezi dvě tisknuté poloviny, tvořící rameno robotu (obr. 42). Jednou z polovin jsou vedeny kabely od krokového motoru. Řez konstrukcí 6. osy je zobrazen na obr. 43.



Obr. 42 – Konstrukce 6. osy

Příruba je vybavena čtyřmi montážními otvory, ve kterých jsou zalisovány M3 matice, umožňující připojení různých druhů efektoru, případně například držáku pro koutový odražeč pro měření přesnosti robotu laser trackerem viz kapitola 8 Testování.

Připojovací rozhraní příruby umožňuje také použití gripperu z původního robotu.



Obr. 43 – Řez konstrukcí 6. osy

5.5 Návrh brzd

Dalším problémem, který se projevil při testování, byla absence brzd na krokových motorech na 2. a 3. ose robotu. Po vypnutí napájení motorů došlo k silovému uvolnění pohonů s následkem nežádoucího pohybu vlivem gravitační síly a hrozilo nebezpečí poškození robotu. Z tohoto důvodu byly zmíněné osy vybaveny elektromagnetickou brzdou s dostatečným brzdícím momentem, která při výpadku napájení nebo ukončení pohybu zamezí nechtěnému uvolnění kloubu.

Výpočet potřebného brzdícího momentu na osách robotu byl proveden v programu Excel, který je přiložen jako příloha č. 3. Pro výpočty byla zvolena vodorovná poloha ramene z důvodu největšího momentu vytvořeného vlivem

gravitační síly, který je potřeba následně použitím elektromagnetickým brzd eliminovat. Postup výpočtu potřebného brzdného momentu pro 3. osu vytvořený v programu Excel je znázorněn v následující kapitole.

5.5.1 Příklad výpočtu potřebného brzdného momentu na 3. ose

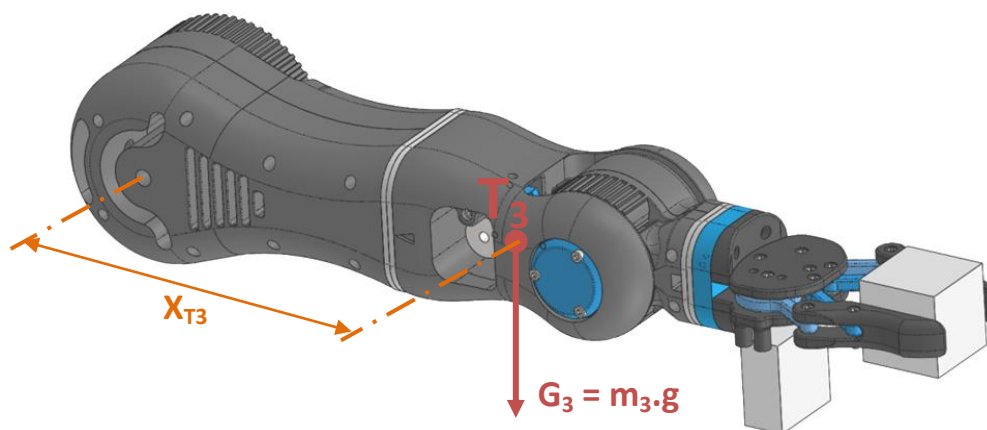
Výpočet byl založen na základě známé polohy těžiště x_{T3} ramene od osy otáčení a hmotnosti ramene m_3 (obr. 44). Hodnoty byly získány z CAD modelu, kdy:

$$x_{T3} = 0,181 \text{ [m]}$$

$$m_3 = 1,669 \text{ [kg]}$$

Moment M_{k3} vytvořený vlivem gravitační síly G_3 je pak roven:

$$M_{k3} = G_3 \cdot x_{T3} = m_3 \cdot g \cdot x_{T3} = 1,669 \cdot 9,81 \cdot 0,181 = 2,96 \text{ [N.m]} \quad (9)$$



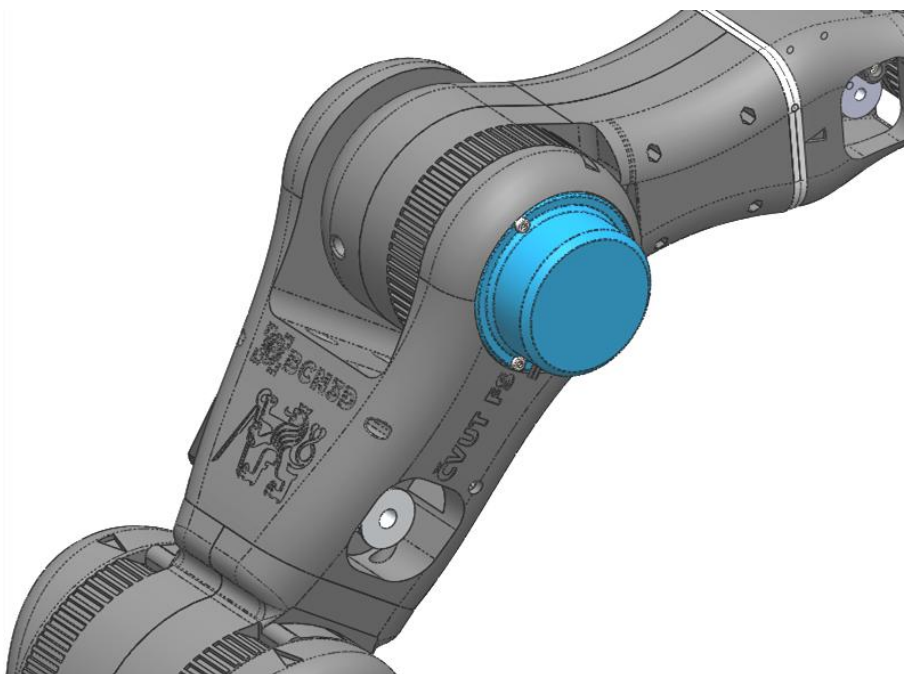
Obr. 44 – Schéma pro výpočet brzdného momentu na 3. ose robotu

Na základě výpočtu je potřeba vyvodit na 3. ose brzdny moment minimálně 2,96 Nm, který zamezí silovému uvolnění pohonů.

5.5.2 Výsledky návrhu brzd

Na základě výpočtu viz příloha č. 3 byla pro 2. osu zvolena elektromagnetická brzda pro motory velikosti NEMA23 s brzdícím momentem 2 Nm. Brzda je umístěna na jednom z krokových motorů pohánějící 2. osu. Umístění brzdy je možné vidět na obr. 33.

U 3. osy bylo potřeba vyřešit umístění brzd na osu robotu, jelikož na trhu není krokový motor s planetovou převodovkou a dvojitou hřídelí, který by umožňoval připojení elektromagnetické brzdy stejně jako u předešlého případu. Na základě výpočtů bylo potřeba použít dvě stejné elektromagnetické brzdy použité u 2. osy s brzdým momentem 2 Nm umístěné přímo na 3. osu robotu. Při následném testování bylo zjištěno, že vlivem pasivních odporů, napínacích sil ozubeného řemene a odporu samotného krokového motoru díky magnetům k zajištění osy proti samovolnému uvolnění s jistou rezervou stačí pouze jedna elektromagnetická brzda. Z toho důvodu je 3. osa vybavena pouze jednou elektromagnetickou brzdou umístěnou pod vytisknutým krytem viz obr. 45.



Obr. 45 – Umístění elektromagnetické brzdy na 3. ose robotu

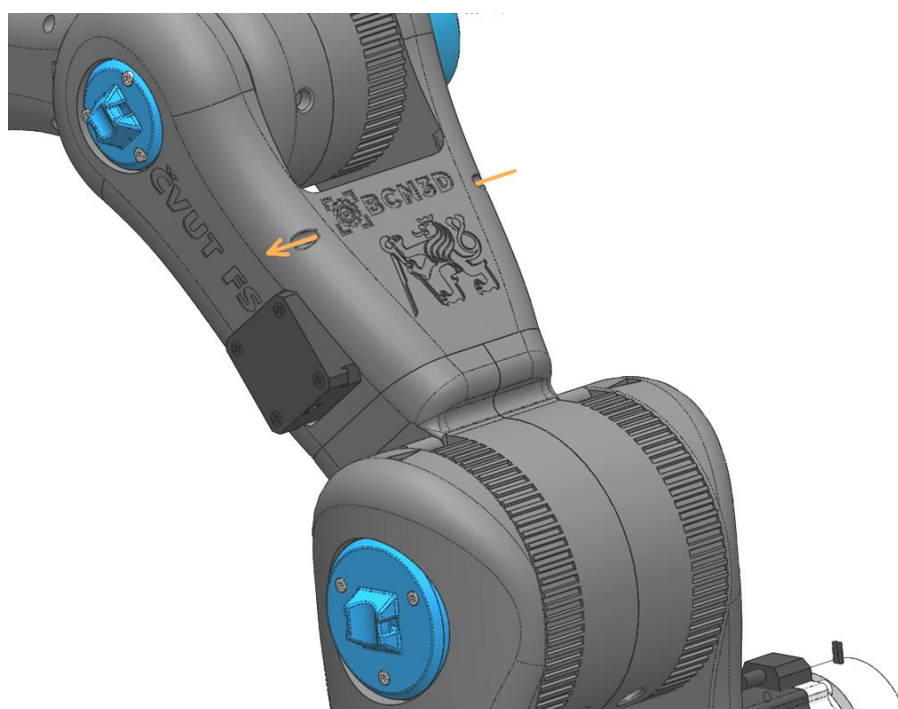
5.6 Úprava a návrh dalších komponent robotu

Kromě zmíněných konstrukčních návrhů úprav hlavních uzlů robotu byly provedeny také úpravy či návrh dalších komponent robotu, které přímo nesouvisí s upravovanými osami.

Za zmínku stojí úprava vík os robotu, jejichž funkce byla rozšířena o držák kabelů, umožňující jejich lepší organizaci a také bezpečnou manipulaci s robotem bez rizika poškození kabelů. Dále bylo doplněno logo ČVUT na jeden z tištěných hlavních

dílů konstrukce z prezentačních důvodů. U stejného dílu byl doplněn otvor pro vedení kabelů od elektromagnetické brzdy, které následně vedou spolu s ostatními kabely po straně robotu uchyceny ve víčkách stahovacími páskami. Vedení kabelu brzdy je znázorněno na obr. 46 spolu s dalšími zmíněnými úpravami.

Dále byl navrhnout držák k uchycení kabelů vedených od robotu pro snížení rizika poškození nejen kabeláže, ale také terminálů pro řízení krokových motorů případným vytržením kabelů nevhodným pohybem robotu. Vyrobený a osazený držák je možné vidět na obr. 58 v kapitole 6 Výroba a kompletace robotu.



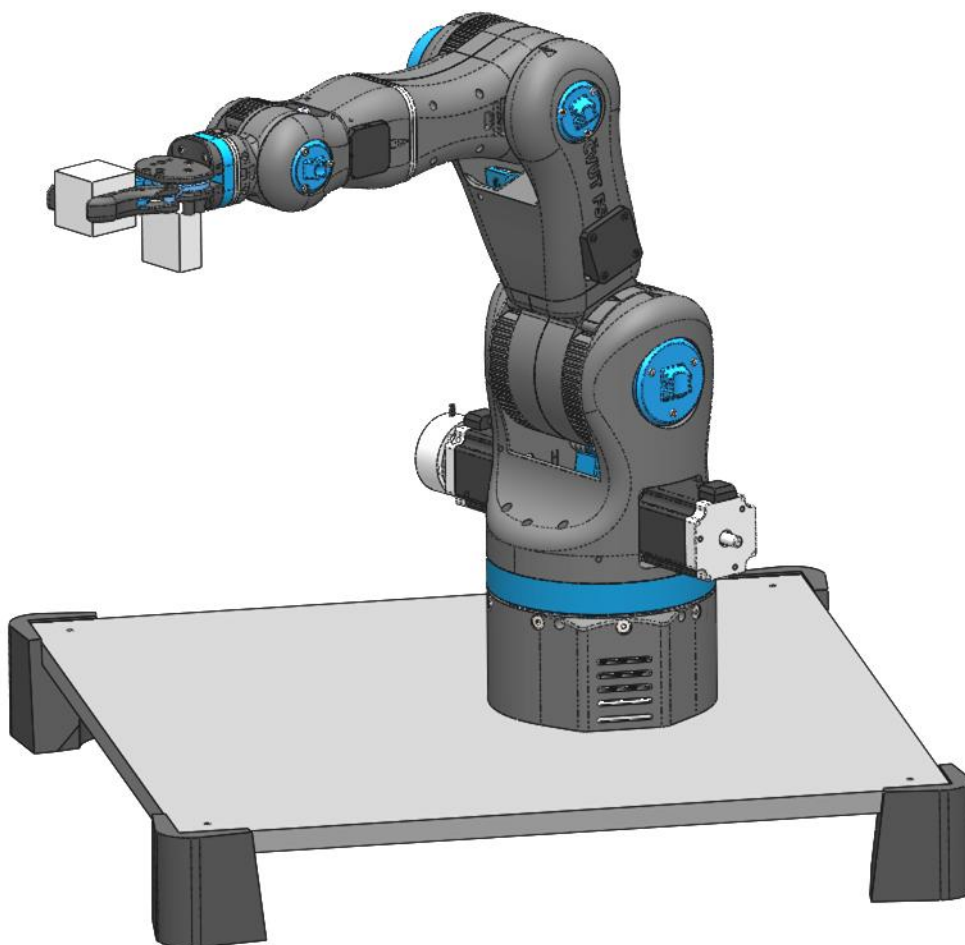
Obr. 46 – Upravená víka + logo ČVUT

Pro potřeby testování bylo nutné navrhnout adaptér držáku koutového odražeče pro následné měření přesnosti robotu popsané v kapitole 8 Testování. Adaptér je stejně jako většina dílů navrhnout s ohledem na technologii výroby daného dílu, tedy 3D tisku. Pro připevnění držáku koutového odražeče je v dílu zalisována matice M8. Adaptér je možné připojit k přírubě 6. osy robotu díky stejným připojovacím rozměrům. Namontovaný adaptér je možné vidět na obr. 64 v kapitole 8 Testování.

5.7 Kompletní CAD model robotu

Po návrhu a úpravě konstrukce robotu popsané v předešlých kapitolách byla vytvořena nová sestava kompletního robotu v programu SolidWorks (obr. 47). Podsestavy 2., 3. a 5. osy byly použity z původní sestavy robotu BCN3D MOVEO s menšími úpravami, v případě 2. osy s výměnou motorů. Zbylé části robotu byly nahrazeny novými podsestavami. Po vytvoření sestavy byla provedena kontrola spojení podsestav, především jejich připojovacích rozměrů a kontrola z pohledu montáže robotu.

Kompletní CAD model nové sestavy robotu je přiložen jako příloha č. 1. Součástí příloh jsou také výkresy soustružených dílů, výkres hlavní sestavy robotu, ve které je vyobrazen rozsah pracovního prostoru robotu, a DXF soubory frézovaných dílů pro výrobu.



Obr. 47 – Kompletní CAD model robotu vytvořený v programu SolidWorks



6 Výroba a kompletace robotu

Na základě návrhů byly vyrobeny všechny díly potřebné pro stavbu robotu a následně byl robot postaven.

Všechny tištěné díly robotu (včetně těch, které se neupravovaly z původní konstrukce) byly vytisknuty na tiskárně Průša MK2S z materiálu PETG od české firmy Plasty Mladeč. Díly byly tisknuty s ohledem na pevnost, čemuž odpovídalo také nastavení tisku, tzn. výška vrstvy: 0,25mm; výplň dílů (infill): 30%; počet perimetrů: 4 (= tloušťka stěny cca 2mm), první a poslední 4 vrstvy byly vyplněny 100% výplní.

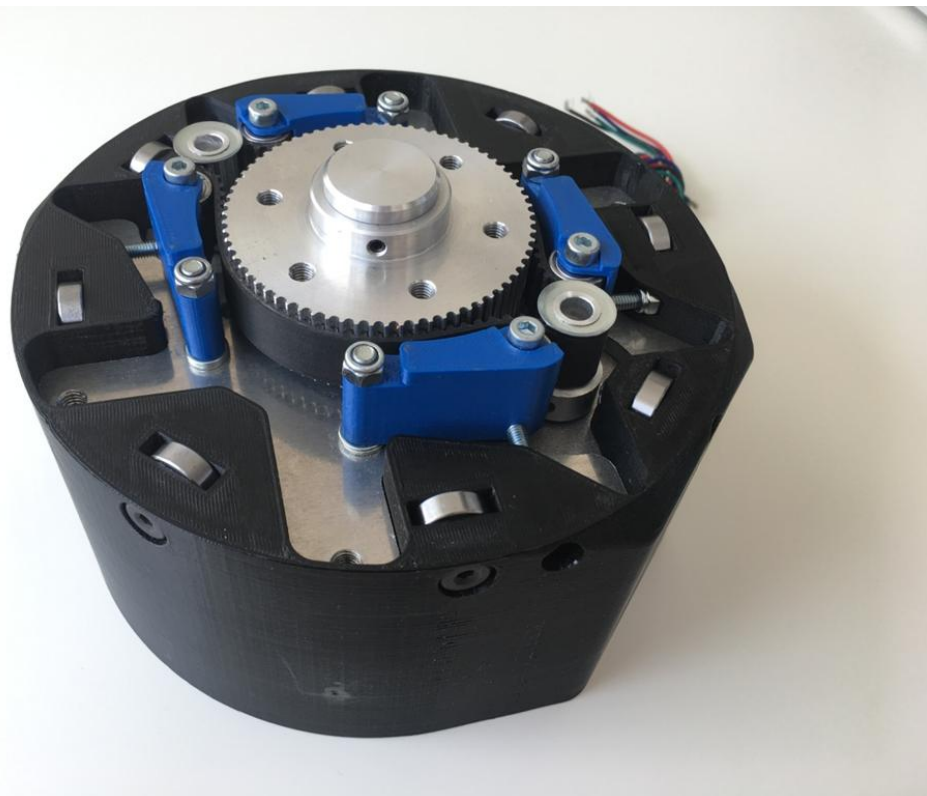
Kromě tisknutých dílů bylo potřeba vyrobit hřídele pro 1., 4. a 6. osu. Hřídele byly soustruženy ze slitiny hliníku podle výkresů viz příloha č. 2. Dále bylo potřeba navrtat a vystružit ozubené malé řemenice, včetně závitových děr pro stavěcí šrouby, které se standardně prodávají nepředvrtané. Upravit bylo potřeba také velkou řemenici na 1. ose viz výkres v příloze.

Další díly, které bylo potřeba vyrobit, byly teflonové podložky na 4. a 6. osu robotu. Byly vyrobeny z 3mm teflonové desky na CNC frézce podle DXF souboru přiloženého v příloze.

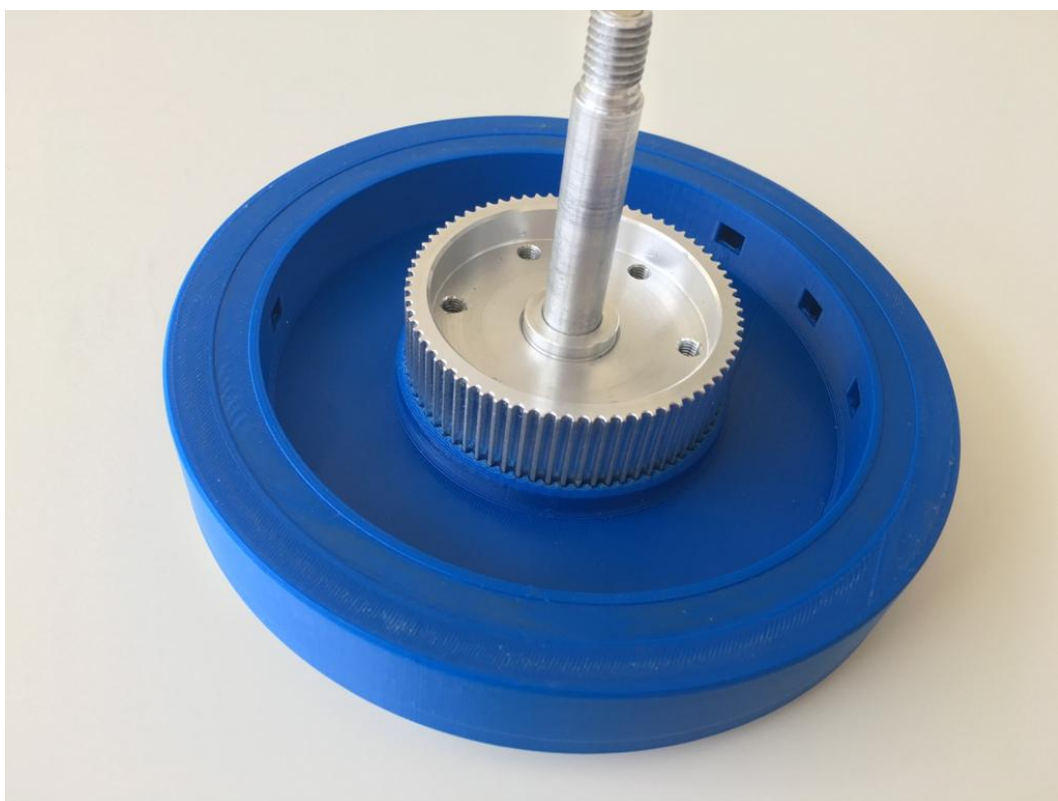
Kromě duralového dílu, který je součástí 1. osy robotu, a který byl nechán vyřezat vodním paprskem externí firmou, byly všechny díly vyrobeny autorem DP.

Po výrobě všech potřebných dílů následovalo sestavení robotu, které proběhlo bez větších problémů. Na obr. 48-51 je možné vidět jednotlivé nové podsestavy před zkompletováním robotu. Na následujících obrázcích (obr. 52-58) je pak sestavený kompletní robot. Na obrázcích lze vidět většinu zmiňovaných úprav v kapitole 5 Konstrukční úpravy robotu, konkrétně např. použité elektromagnetické brzdy, logo ČVUT, soustružené hřídele nových os, frézované teflonové podložky, organizaci kabelů připevněných pomocí vík k robotu, držák kabelů robotu (oranžový díl) apod.

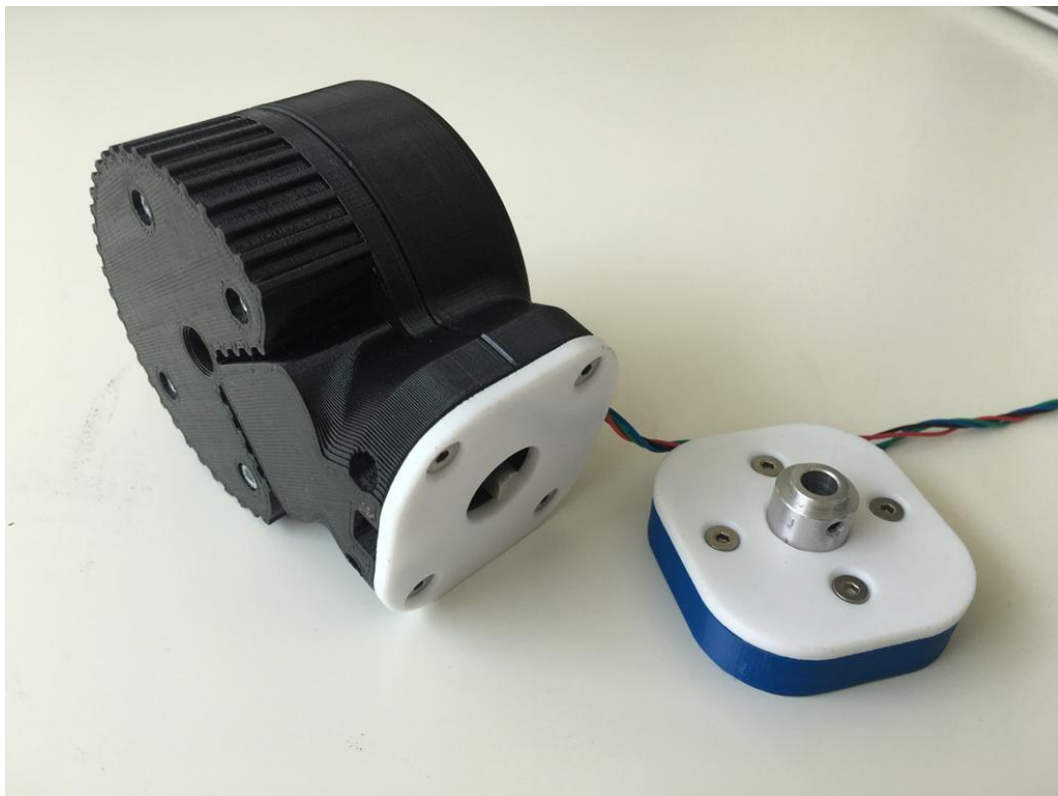
Po otestování funkčnosti robotu byly všechny kabely uloženy do polyesterových opletů z důvodu ochrany kabelů před mechanickým poškozením a hardware řízení robotu (terminály pro řízení krokových motorů) upevněny k základní desce robotu pomocí DIN lišty.



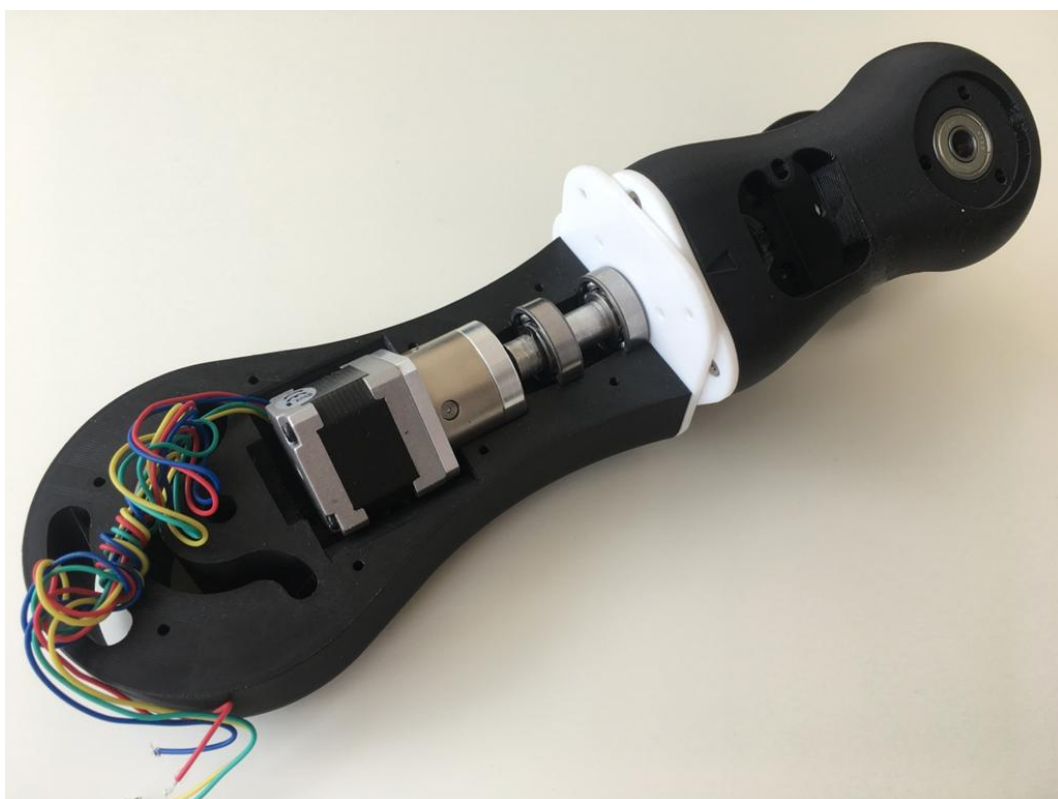
Obr. 48 – Reálná 1. osa robotu - základ



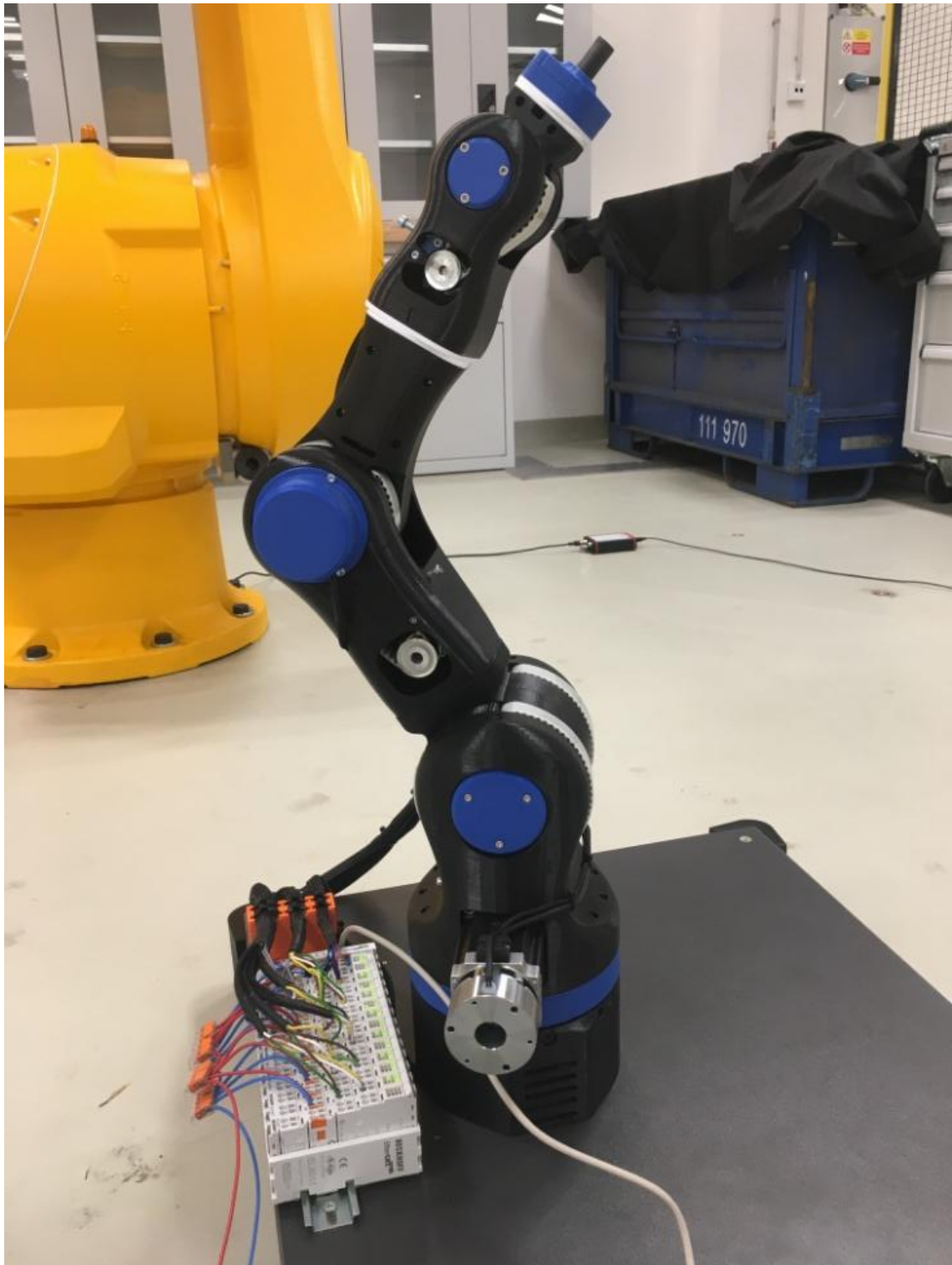
Obr. 49 – Reálná 1. osa robotu – rotační část



Obr. 50 – Reálná 6. osa robotu



Obr. 51 – Reálná 4. osa robotu



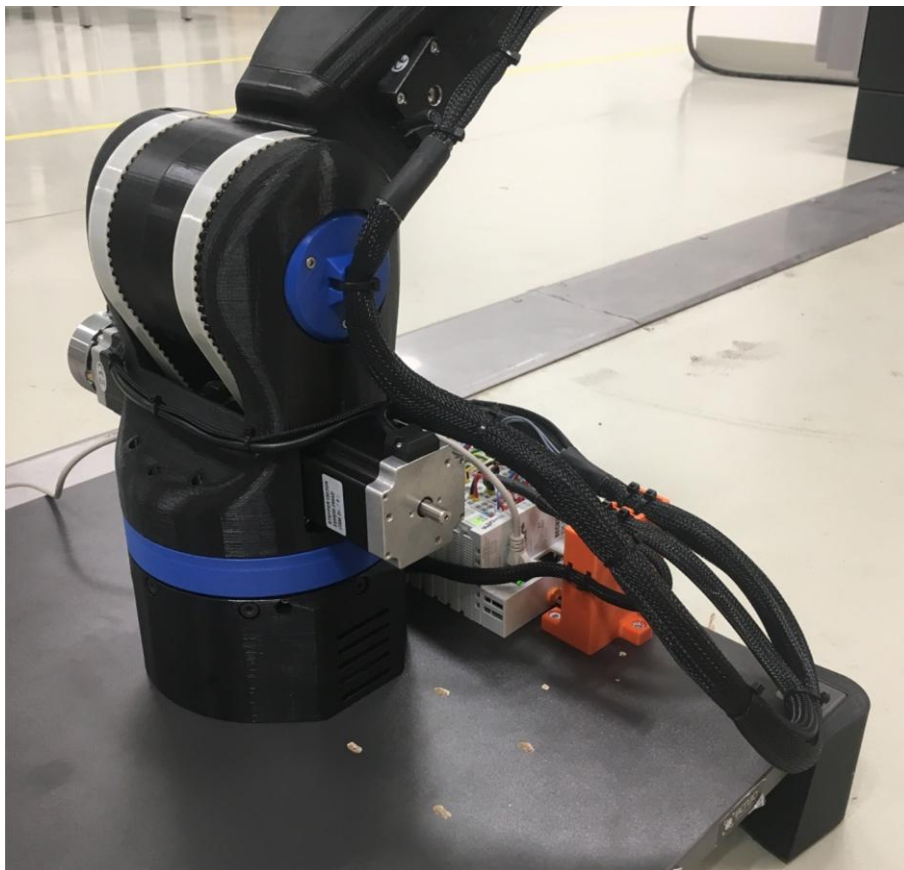
Obr. 52 – Reálný robot – poloha po referování



Obr. 53 – Reálný robot – obecná poloha



Obr. 54 – Reálný robot – detail 2. a 3. osy



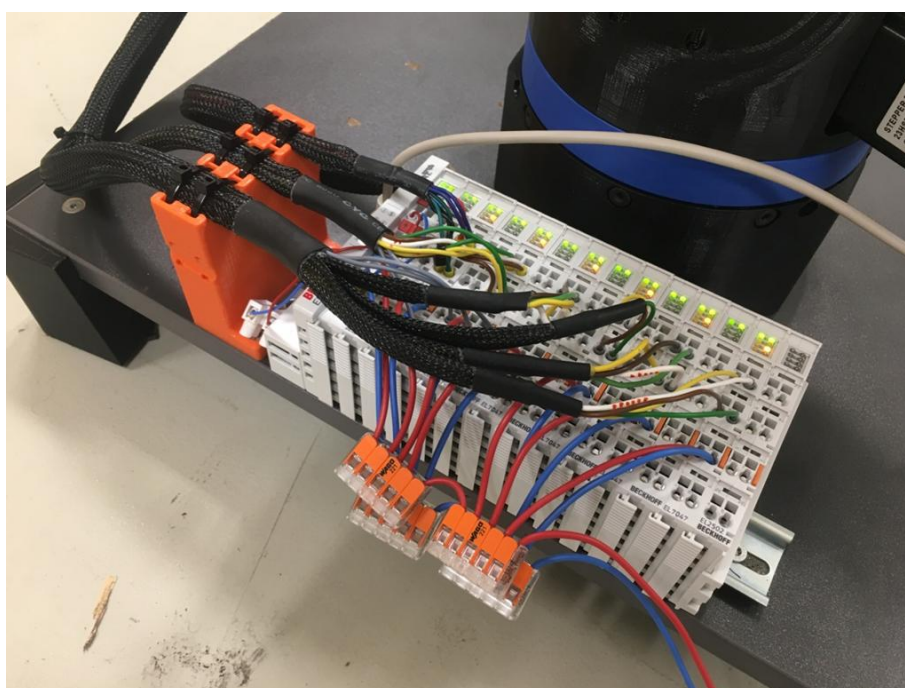
Obr. 55 – Reálný robot – detail 1. osy



Obr. 56 – Reálný robot – detail 6. osy



Obr. 57 – Reálný robot – organizace kabelů



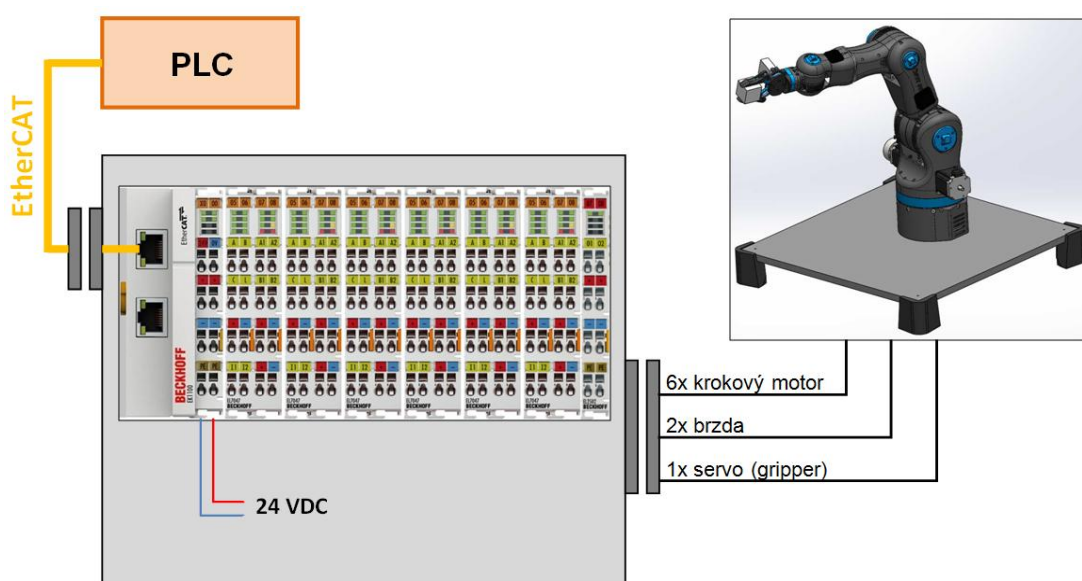
Obr. 58 – Reálný robot – zapojení hardware Beckhoff

7 Řízení robotu

Dalším cílem diplomové práce bylo oživení robotu pomocí standardních PLC používaných v průmyslové automatizaci. Pro daný projekt byl zvolen řídicí systém od společnosti Beckhoff, který běží na platformě průmyslového PC, na kterém běží softwarové PLC. Kromě řídicího run-time je součástí i operační systém Windows, což z něj dělá univerzální a komplexní systém. Vývojové prostředí i run-time běžící na průmyslových PC se nazývá TwinCAT (The Windows Control and Automation Technology), kdy nejnovější verzí je TwinCAT3, ve kterém bylo řízení robotu realizováno a které je integrováno pod Microsoft Visual Studio.

7.1 Hardware Beckhoff pro řízení robotu

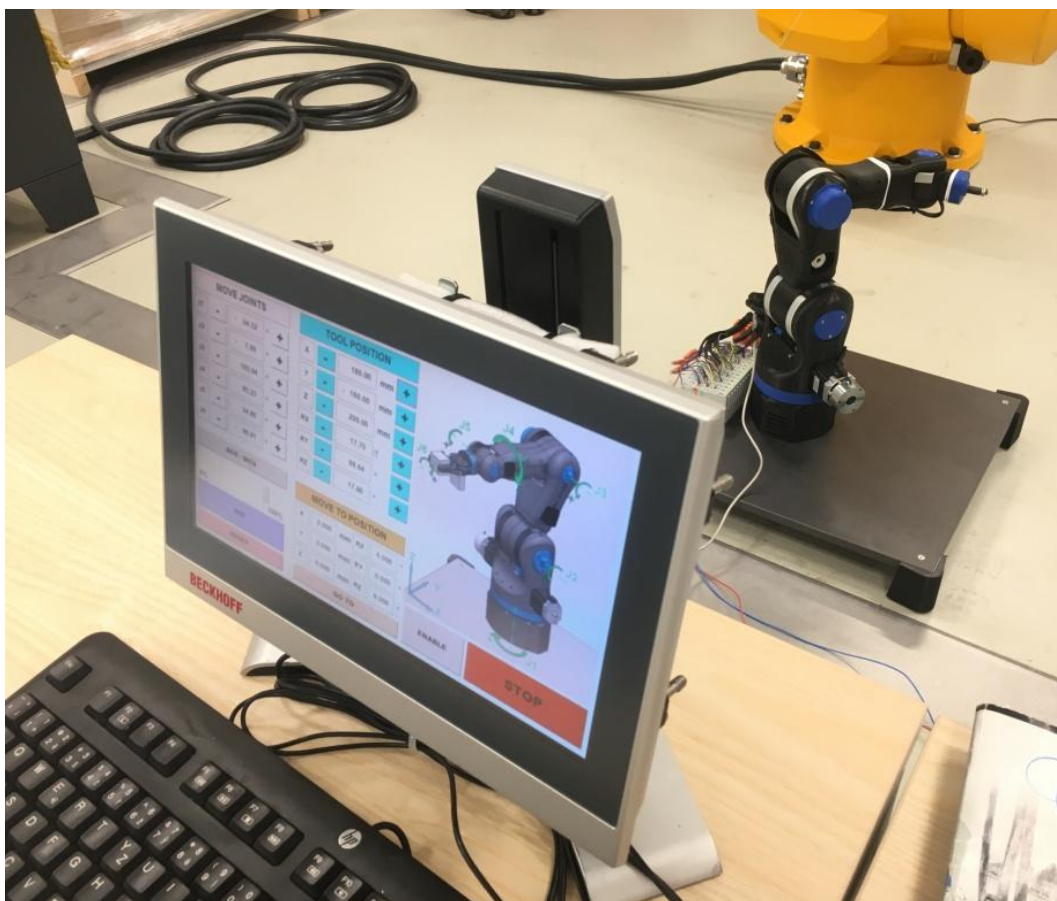
Pro oživení robotu, kromě krokových motorů, byl použit hardware firmy Beckhoff. Základ tvoří průmyslové panelové PC CP2711 s 11,6" dotykovým displejem, na kterém běží softwarové PLC, ke kterému je připojen coupler EK1100. Vzájemná komunikace probíhá na vlastní Beckhoff komunikační sběrnici EtherCAT. Ke coupleru, umožňující komunikaci mezi připojenými terminály a PC (PLC), je připojeno šest terminálů pro řízení krokových motorů EL7047 a jeden terminál EL2502 umožňující řízení PWM, pro případné řízení gripperu z původního robotu, poháněného modelářským servem.



Obr. 59 – Struktura zapojení HW robotu

Strukturu zapojení hardwaru robotu je možné vidět na obr. 59. Fyzické zapojení pak na obr. 58.

Veškeré programování a úpravy programu probíhaly na zmiňovaném panelovém PC CP2711, pomocí kterého je robot i následně řízen. Na obr. 60 je možné vidět sestavu PC a robotu při testování.



Obr. 60 – Testování robotu s HMI panelem

7.2 Program řízení robotu

Pro řízení robotu BCN3D MOVEO byl použit předpřipravený projekt UniMotion, vytvořený firmou Beckhoff. Projekt je napsán velmi univerzálně a je možné ho využít k různému typu řízení pohybů různých kinematických struktur. Kromě řízení pohybu jednotlivých os projekt umožňuje také interpolované řízení, kdy je možné řízení na základě připraveného G kódu. Tento typ řízení pro současný stav robotu nebyl využit. Dále projekt umožňuje aktivaci, resp. deaktivaci kinematické transformace, umožňující zpětné řízení mechanismu. Pro řízení robotu BCN3D MOVEO jsou použity kinematické knihovny Beckhoff TC3 TF511x L4 [29], umožňující kinematické transformace. Knihovny



jsou ve čtyřech úrovních od jednoduchých kinematických mechanismů až po složité, což je případ řešeného 6osého robotu se sériovou kinematikou, který spadá do úrovně L4.

Předpřipravený projekt UniMotion byl použit jako výchozí a byl modifikován pro řízení robotu BCN3D MOVEO. Finální podoba projektu použitého pro řízení robotu je přiložena jako příloha č. 4.

Pro řízení pohybu robotu bylo v projektu v části MOTION vytvořeno 12 os. Prvních 6 os odpovídá fyzickým osám robotu, které byly propojeny s konkrétními terminály EL7047 pro řízení krokových motorů, kterými jsou osy robotu poháněny. Bylo nutné provést konfiguraci každé osy s ohledem na použitý krokový motor, zvolené mikrokrokování a převod. Současně byla nastavena regulace jednotlivých os, která byla provedena na základě doporučení firmy Beckhoff. Zbýlých 6 os robotu jsou NCi osy, využívané při zpětném řízení robotu. Vztah mezi fyzickými a NCi osami je dán nastavenou kinematickou transformací. Kinematiku robotu bylo také potřeba nakonfigurovat, aby odpovídala reálnému robotu (délka ramen, souřadné systémy).

Součástí úprav projektu byla také tvorba nového HMI panelu pro ovládání robotu, jehož funkce je popsána v následující kapitole a který je součástí programu. Provedení ovládacího panelu bylo inspirováno panely používanými k ovládání průmyslových robotů.

7.3 Ovládání robotu

Ovládání robotu je realizováno přes dotykový displej použitého průmyslového PC, na kterém je řídicí program spuštěn. Ovládací panel obsahuje v pravé části schéma robotu, na kterém jsou znázorněny jednotlivé osy a kladný směr pohybu těchto os pro snazší obsluhu. Také je zobrazena orientace souřadného systému využívaného při zpětném řízení robotu. Pod schématem jsou umístěna tlačítka ENABLE a STOP. Tlačítko ENABLE aktivuje pohony robotu a umožní pohyb os. Tlačítko STOP slouží k deaktivaci pohonů, případně jako nouzové tlačítko pro zastavení pohybu robotu. V levé části ovládacího panelu jsou pak umístěny prvky k ovládání robotu popsané v následujícím odstavci, ve kterém je popsán také způsob ovládání robotu.

Po zapnutí robotu a otevření ovládacího panelu se uživateli zobrazí okno viz obr. 61. Po stisknutí tlačítka ENABLE dojde k aktivování pohonů a je možné robotem



pohybovat. Umožněn je pohyb pouze dopřednou kinematikou, tedy je možné ruční natáčení jednotlivých kloubů robotu J1 – J6, což je naznačeno zeleným podbarvením této části ovládacího panelu. Krokové motory nejsou doplněny přímým odměřováním, jejich řízení je založeno na načítání počtu kroků (mikrokroků) a po každém zapnutí robotu je nutné nejdříve zreferovat jednotlivé osy robotu. Před referováním je nutné pomocí ručního režimu ovládní jednotlivých kloubů napolohovat robot do vzpřímené polohy na znázorněné značky. Po dosažení této polohy je nutné stiskem tlačítka REF aktivovat referování, při kterém dojde k vynulování hodnot natočení kloubů J1-J6 a robot se automaticky napolohuje do pevně naprogramované polohy. Důvodem změny polohy je singulární poloha robotu, ve které se robot při vzpřímené poloze nachází a které nejsou ošetřeny v programu, tzn. s robotem v těchto polohách nelze hýbat v módu inverzní kinematiky. Současně s uvedenými akcemi dojde ke změně řízení na inverzní kinematiku, což se vyznačuje modrým podbarvením části panelu tool position (obr. 62). V této fázi lze pohybovat koncovým efektem robotu v kartézském souřadném systému, kdy dochází na základě požadovaných pohybů výpočet inverzní kinematiky a jednotlivé pohyby jsou většinou spojeny s pohybů všech os robotu. Stisknutím tlačítka JOINT-FRAME dojde opět ke změně řízení a robot je možné řídit ručním natočením jednotlivých kloubů, tedy dopřednou kinematikou. Podle podbarvené části panelu lze zjistit, v jakém režimu se řízení nachází. Při aktivní inverzní kinematice je také možné využití části ovládacího panelu s názvem MOVE TO POSITION, kdy uživatel ručně nastaví požadované souřadnice koncového efektoru a stiskem tlačítka GO TO dojde k pohybu robota do těchto souřadnic. Mezi tlačítka REF a JOINT-FRAME se nachází ovládací prvek, umožňující nastavení omezení rychlosti robotu tzn. overridu. Výchozí nastavení je 20%.



MOVE JOINTS			
J1	-	20.00 °	+
J2	-	- 30.00 °	+
J3	-	59.98 °	+
J4	-	10.00 °	+
J5	-	10.00 °	+
J6	-	10.00 °	+

TOOL POSITION			
X	-	41.81 mm	+
Y	-	17.30 mm	+
Z	-	439.32 mm	+
RX	-	14.30 °	+
RY	-	37.61 °	+
RZ	-	45.37 °	+

JOINT - FRAME			
0% 100%			
REF			
RESET			

MOVE TO POSITION			
X	0.000 mm	RX	0.000 °
Y	0.000 mm	RY	0.000 °
Z	0.000 mm	RZ	0.000 °

GO TO	
ENABLE	
STOP	

Obr. 61 – Ovládací panel s aktivní dopřednou kinematikou

MOVE JOINTS			
J1	-	20.00 °	+
J2	-	- 30.00 °	+
J3	-	59.98 °	+
J4	-	10.00 °	+
J5	-	10.00 °	+
J6	-	10.00 °	+

TOOL POSITION			
X	-	41.81 mm	+
Y	-	17.30 mm	+
Z	-	439.32 mm	+
RX	-	14.30 °	+
RY	-	37.61 °	+
RZ	-	45.37 °	+

JOINT - FRAME			
0% 100%			
REF			
RESET			

MOVE TO POSITION			
X	0.000 mm	RX	0.000 °
Y	0.000 mm	RY	0.000 °
Z	0.000 mm	RZ	0.000 °

GO TO	
ENABLE	
STOP	

Obr. 62 – Ovládací panel s aktivní inverzní kinematikou

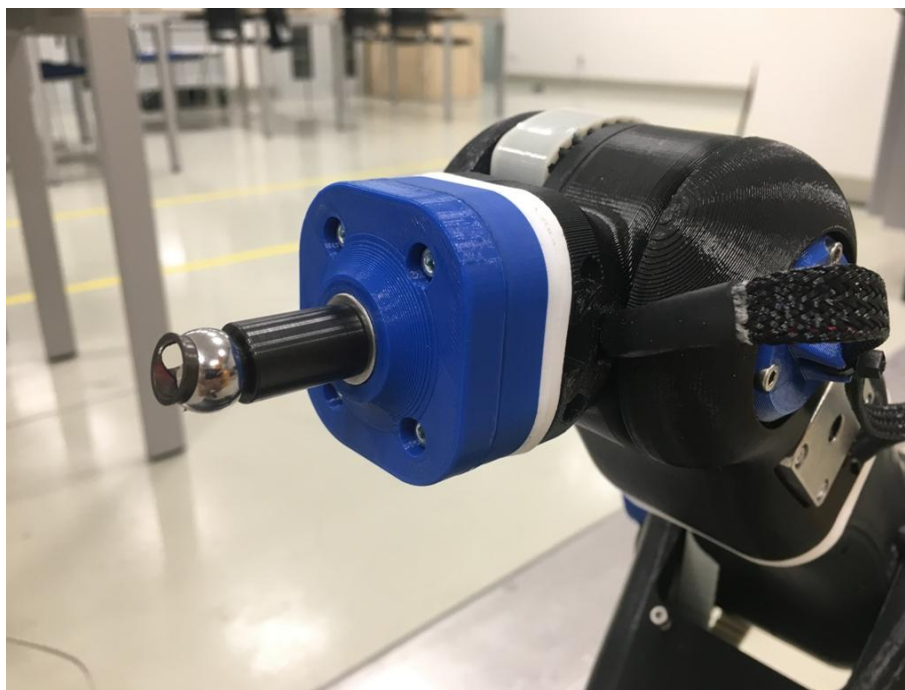
8 Testování

Po sestavení robotu a jeho oživením bylo provedeno testování navržených mechanických úprav a řízení. Při testování se neobjevily žádné větší problémy, které by ovlivňovaly funkci robotu.

Následovalo měření přesnosti za pomoci laser trackeru (obr. 63), kterým byly proměřeny přímosti os X, Y a Z při aktivní inverzní kinematice robotu a také opakovatelnost dosažení požadovaného bodu v prostoru. Umístění koutového odražeče je možné vidět na obr. 64.



Obr. 63 – Měření přesnosti laser trackerem



Obr. 64 – Koutový odražeč na robotu

8.1 Měření přímosti

Měřeno bylo laser trackerem, kdy byly jednotlivě měřeny přímosti os X, Y a Z při aktivní inverzní kinematice robotu. Pro měření byla definována výchozí poloha koutového odražeče, ze které se jednotlivé osy měřily. Měření probíhalo v kartézském souřadném systému robotu umístěném viz obr. 64.

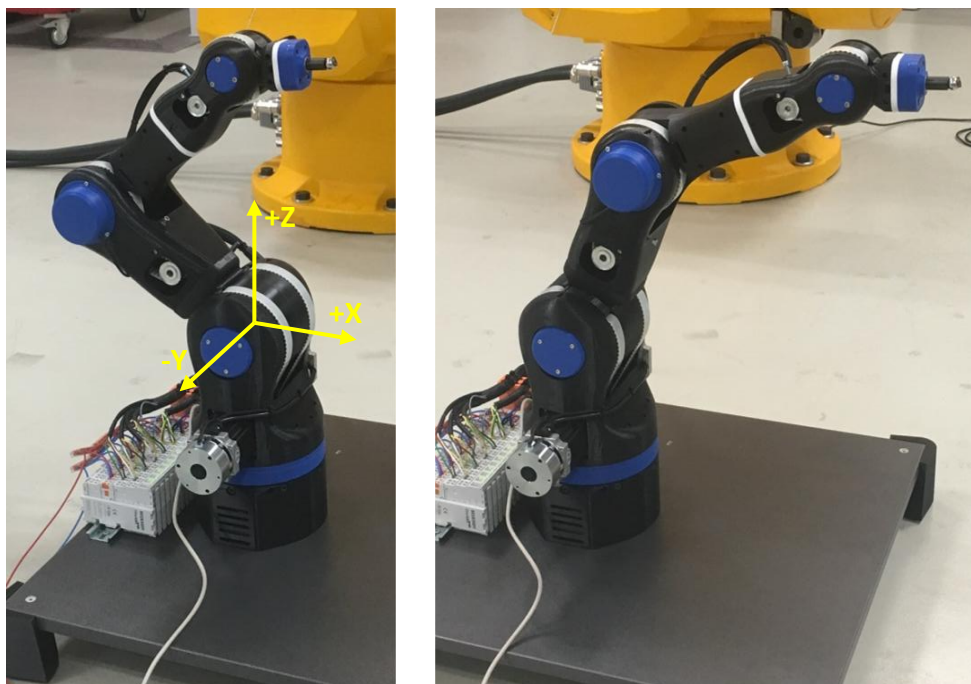
Výchozí poloha koutového odražeče pro měření přímosti s rozsahy měřených os jsou uvedeny v následující tab. 11. Naměřená data byla vyhodnocena v programu Polyworks.

Osa:	Souřadnice výchozí bodu:	Rozsah měřené osy:
X	70 mm	<70; 360>
Y	0 mm	<-200; 200>
Z	300 mm	<200; 400>

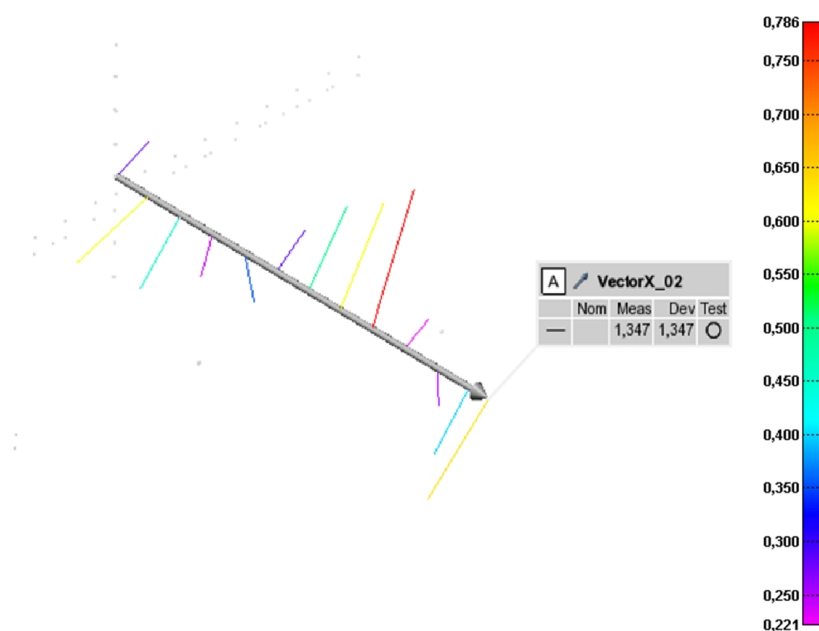
Tab. 11 – Parametry měření přímosti

8.1.1 Měření přímosti osy X

Měření osy X probíhalo v rozsahu $\langle 70; 360 \rangle$ mm s krokem 25mm (poslední dva kroky jsou 20mm). Bylo naměřeno celkem 13 bodů. Výchozí poloha robotu ($X=70; Y=0; Z=300$) je v levé části obr. 65. Koncová poloha ($X=360; Y=0; Z=300$) je v pravé části obr. 64. Vyhodnocená data jsou na obr. 66.



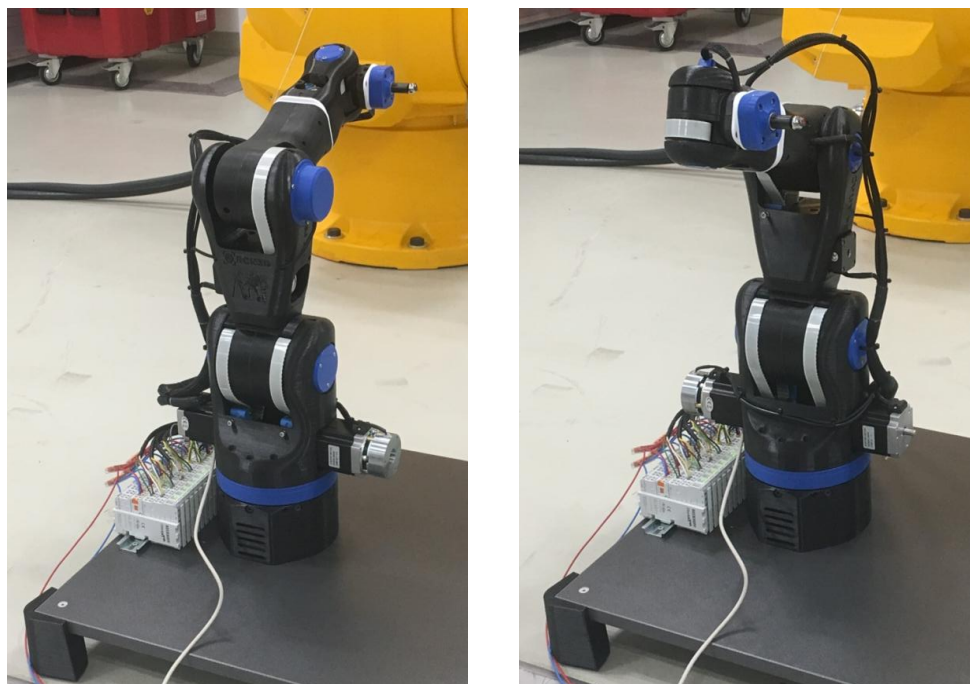
Obr. 65 – Výchozí a koncová poloha při měření osy X



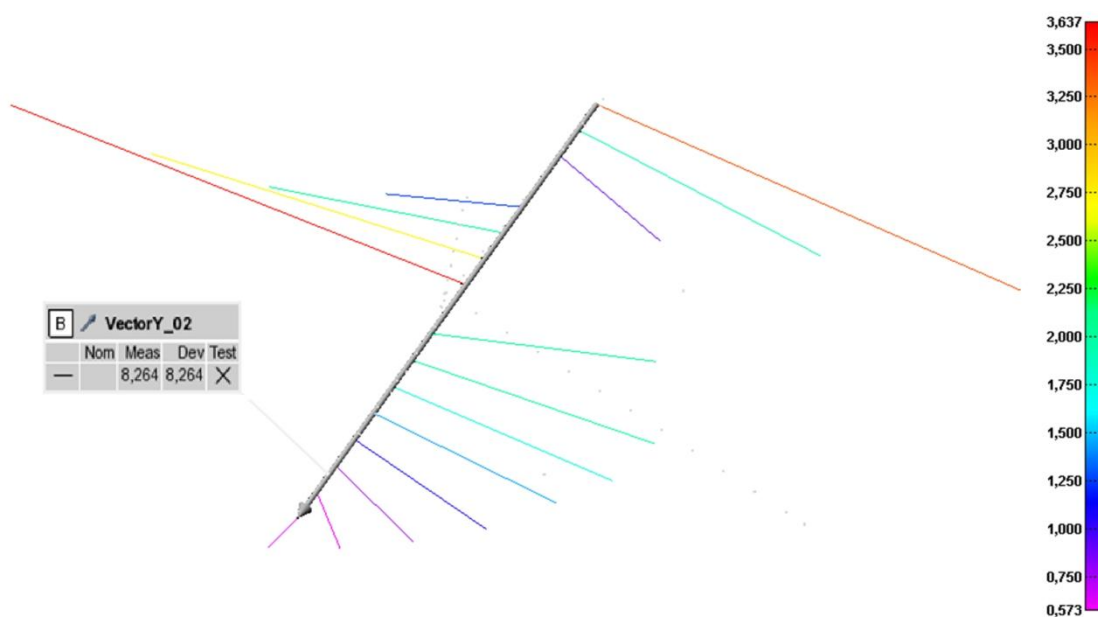
Obr. 66 – Výsledky měření přímosti osy X

8.1.2 Měření přímosti osy Y

Měření osy Y probíhalo v rozsahu $\langle -200; 200 \rangle$ mm s krokem 25mm. Bylo naměřeno celkem 17 bodů. Výchozí poloha robotu ($X=70; Y=200; Z=300$) je v levé části obr. 66. Koncová poloha ($X=70; Y=-200; Z=300$) je v pravé části obr. 67. Vyhodnocená data jsou na obr. 68.

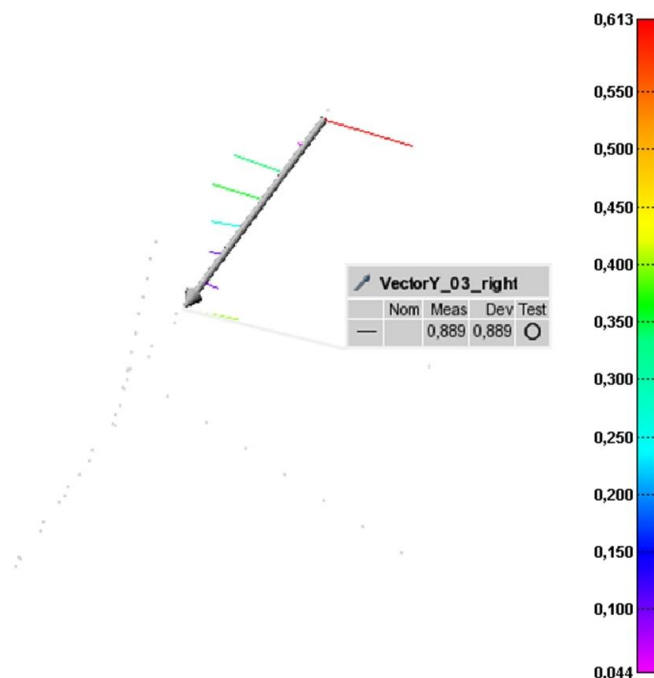


Obr. 67 – Výchozí a koncová poloha při měření osy Y

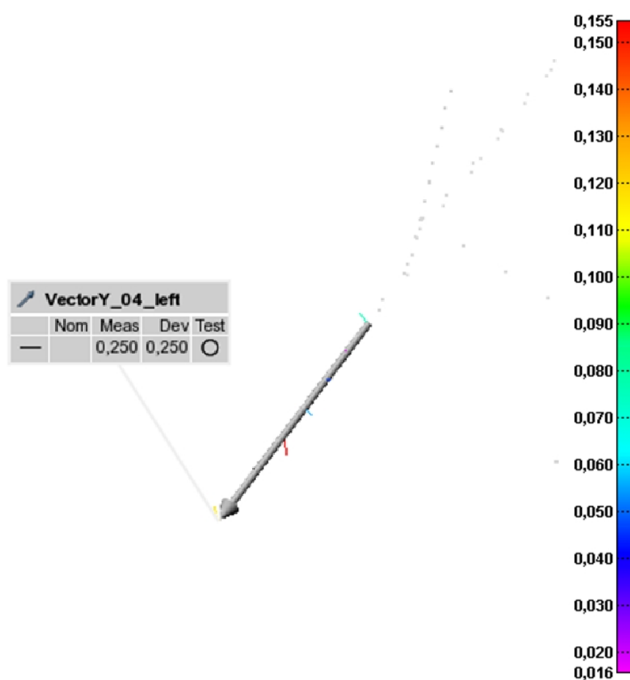


Obr. 68 – Výsledky měření přímosti osy Y

Z důvodu naměřené velké odchylky přímosti kolem nulové hodnoty osy Y bylo provedeno ještě jedno měření, kdy bylo vynecháno pět bodů kolem této polohy a naměřeny hodnoty přímosti v intervalu $\langle 200; 60 \rangle$ a $\langle -60; -200 \rangle$ s krokem 20mm, takže v každém měření bylo získáno 8 bodů. Vyhodnocená data jsou na obr. 69 a 70.



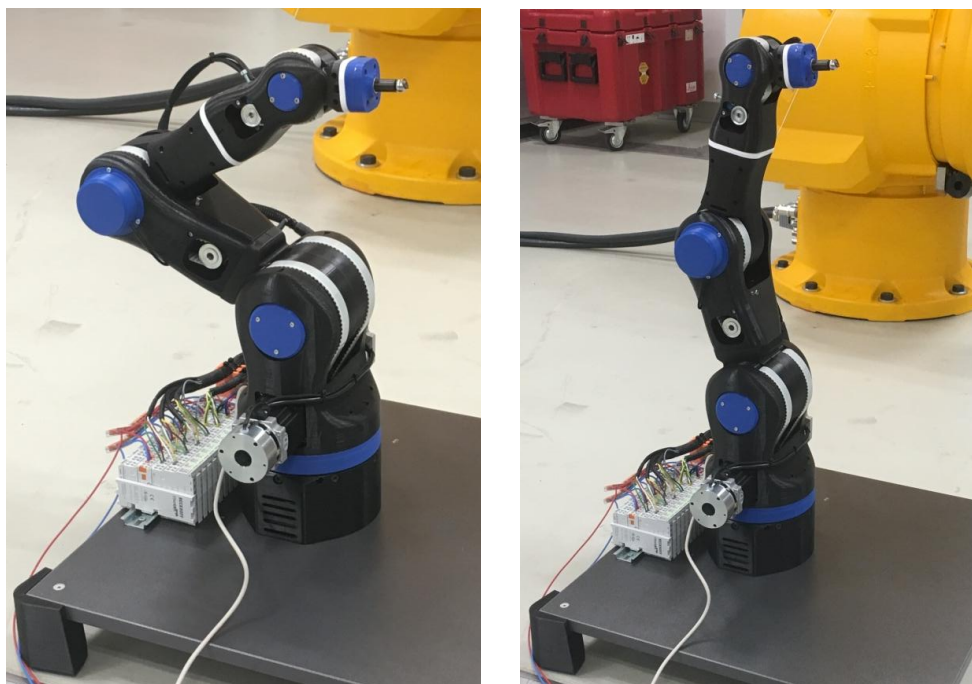
Obr. 69 – Výsledky měření přímosti osy Y = $\langle 200, 60 \rangle$



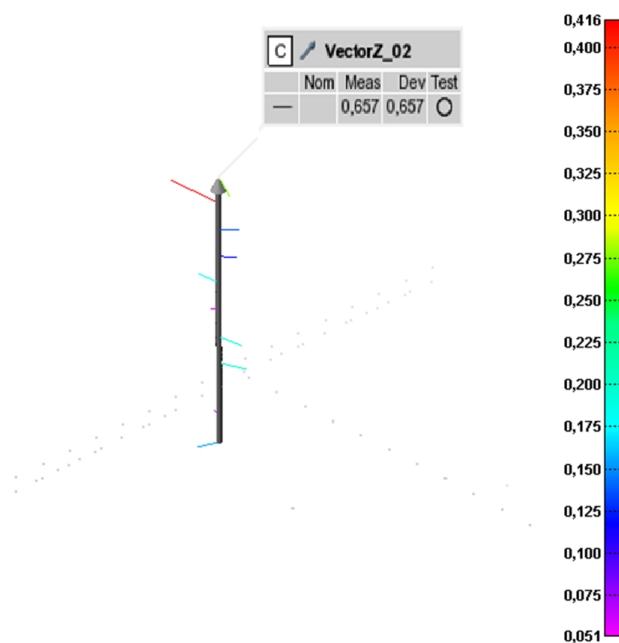
Obr. 70 – Výsledky měření přímosti osy Y = $\langle -60, -200 \rangle$

8.1.3 Měření přímosti osy Z

Měření osy Z probíhalo v rozsahu $\langle 200; 400 \rangle$ mm s krokem 20mm. Bylo naměřeno celkem 11 bodů. Výchozí poloha robotu ($X=70; Y=0; Z=200$) je v levé části obr. 71. Koncová poloha ($X=70; Y=0; Z=400$) je v pravé části obr. 70. Vyhodnocená data jsou na obr. 72.



Obr. 71 – Výchozí a koncová poloha při měření osy Z



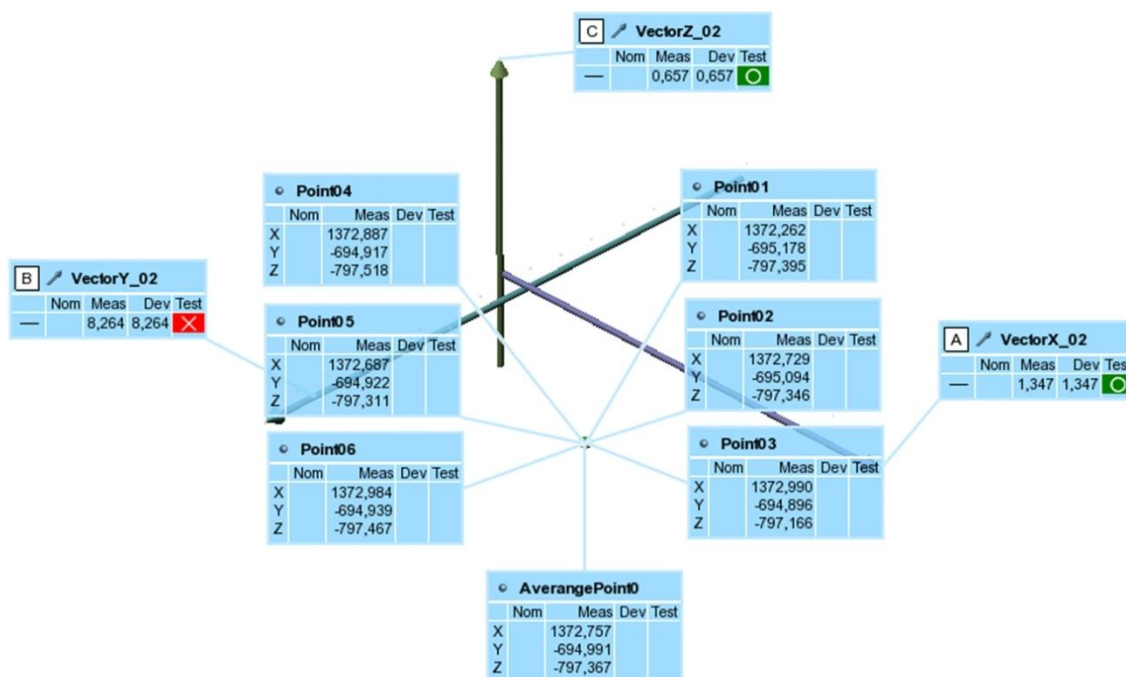
Obr. 72 – Výsledky měření přímosti osy Z

8.2 Měření opakovatelnosti

Součástí měření přesnosti robotu bylo také měření opakovatelnosti dosažení požadovaného polohy. Měření probíhalo opět pomocí laser trackeru. Byly zvoleny dva různé body v prostoru robotu, jejichž poloha byla měřena. Poloha každého bodu byla změřena 6x, kdy pokaždé bylo bodu dosaženo pohybem z jiného směru. Naměřené souřadnice bodů byly následně zprůměrovány a za použití vzorce (10) byla vypočtena vzdálenost OP každého naměřeného bodu od bodu získaného zprůměrováním. Tyto hodnoty odchylky naměřených bodů od průměrné hodnoty lze považovat za dosaženou opakovatelnost. Naměřená data byla vyhodnocena v programu PolyWorks a Excel, který je přiložen jako příloha č. 3.

$$|OP| = \sqrt{(X_i - X_p)^2 + (Y_i - Y_p)^2 + (Z_i - Z_p)^2} \quad (10)$$

Naměřená data bodu č. 1 lze vidět na obr. 73. V tab. 12 a 13 je pak možné vidět vyhodnocení naměřených dat obou měřených bodů s výsledky opakovatelnosti.



Obr. 73 – Naměřené hodnoty bodu č. 1



č. měření	Směr pohybu do bodu:	Souřadnice bodu č. 1 (měřeno v souřadném systému laser trackeru)			Vzdálenost naměřeného bodu od průměrné hodnoty [mm]
		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	
1	Z-	1372,262	-695,178	-797,395	0,53
2	Z+	1372,729	-695,094	-797,346	0,11
3	Y-	1372,990	-694,896	-797,166	0,32
4	Y+	1372,887	-694,917	-797,518	0,21
5	X-	1372,687	-694,922	-797,311	0,11
6	X+	1372,984	-694,939	-797,467	0,25
Průměrná hodnota souřadnic:		1372,757	-694,991	-797,367	

Tab. 12 – Výsledky měření opakovatelnosti bodu č. 1

č. měření	Směr pohybu do bodu:	Souřadnice bodu č. 2 (měřeno v souřadném systému laser trackeru)			Vzdálenost naměřeného bodu od průměrné hodnoty [mm]
		X [mm]	Y [mm]	Z [mm]	
1	Z-	1226,329	-858,858	-875,067	0,13
2	Z+	1226,350	-858,705	-875,295	0,24
3	Y-	1226,356	-858,749	-875,220	0,17
4	Y+	1226,220	-859,142	-874,960	0,33
5	X-	1226,129	-858,919	-874,797	0,42
6	X+	1226,395	-859,079	-875,776	0,62
Průměrná hodnota souřadnic:		1226,297	-858,909	-875,186	

Tab. 13 – Výsledky měření opakovatelnosti bodu č. 2

8.3 Výsledky měření přesnosti

Výsledky jednotlivých měření přímosti je možné vidět v předchozích podkapitolách, případně v tab. 14. Měření každé osy probíhalo dvakrát. Výsledky jsou s minimálními rozdíly naměřených hodnot, proto byly použity hodnoty jen z druhého měření.

Naměřené hodnoty přímosti osy X a Z jsou v očekávaných hodnotách a pro využití robotu dostačující. Zdrojem chyb může být tištěná konstrukce robotu, použité pohonech bez zpětné vazby, nepřesná kalibrace robotu při referování, uložení podstavce robotu na gumových nožičkách, případně nepřesně zadaným rozměrům robotu pro výpočet inverzní kinematiky, které vzhledem k technologii výroby



neodpovídají přesným rozměrům z CAD modelu, které byly pro výpočet inverzní kinematiky použity.

Velkou chybu přímosti vykazuje osa Y, kdy její hodnota je přes 8mm. Tato chyba je z velké části způsobena průjezdem přes souřadnici $Y=0$ mm, kdy na základě inverzní kinematiky dochází k otočení robotu v 1. ose a mění se tak výrazně poloha těžiště robotu vzhledem k rovině XZ. Na základě toho bylo provedeno další měření, vynechávající 5 bodů v blízkosti bodu $Y=0$, čímž nedocházelo k překlápění robotu vzhledem k rovině XZ. Naměřené nové výsledky byly srovnatelné s osami X a Z.

I přes nový návrh konstrukce 1. osy má nejpravděpodobněji právě tato osa robotu největší podíl na vzniklých chybách, které u dané osy mohly vzniknout nepřesnostmi při sestavení či výrobě, ale také poddajností plastových tištěných dílů. I menší chyba na 1. ose může být zdrojem velké chyby na konci ramene robotu. Na vzniklé chybě se také podílejí chyby popsané v 2. odstavci.

Odstranění této chyby bude předmětem dalšího vývoje robotu. Uložení 1. osy by bylo vhodné přestavět a vyrobit kovové, což nebylo pro aktuální řešení možné s ohledem na dodržení požadavku levné konstrukce.

Osa:	Hodnota přímosti [mm]:
X	1,347
Y	8,264
Y = <200; 60>	0,889
Y = <-60; -200>	0,250
Z	0,657

Tab. 14 – Výsledky měření přímosti

Výsledky měření opakovatelnosti jsou v tab. 12 a 13 v předešlé kapitole, kdy největší vzdálenost naměřeného bodu od zprůměrovaného je červeně podbarvena u každého měřeného bodu. Na základě měření je možné konstatovat, že naměřená opakovatelnost robotu je $\pm 0,62$ mm. Důvodem vyšší opakovatelnosti na rozdíl od průmyslových robotů zmíněných v kapitole 3.2 jsou pravděpodobně opět výše zmíněné zdroje chyb. S ohledem na využití robotu jsou však výsledky vyhovující.



9 Závěr

První část diplomové práce se zabývá průmyslovými roboty, které jsou v současné době jedním z klíčových prvků automatizace. Byla provedena rešerše malých průmyslových robotů se zaměřením na jejich pohony a nástroje pro řízení.

Další část práce je zaměřena na open-source projekt robotu BCN3D MOVEO, na základě něhož byl výchozí robot postaven. Ten byl následně testován a byla provedena identifikace slabých míst konstrukce a řízení robotu, která byla v další části práce řešena.

Na základě testování původní konstrukce byly navrženy úpravy mechanické konstrukce robotu pro zvýšení jeho přesnosti a tuhosti. Dále byla provedena optimalizace pohonů jednotlivých os, jejímž výsledkem byl návrh nových krokových motorů u tří z pěti pohonů původní konstrukce. Původní krokové motory nedisponovaly požadovaným krouticím momentem pro dosažení požadovaného úhlového zrychlení os robotu, na základě něhož byla optimalizace provedena. Byl vytvořen konstrukční návrh nové 1. osy robotu s přihlédnutím k možnostem výroby a dodržení požadavku levné konstrukce. Stejně tak byl realizován návrh nové konstrukce 4. osy.

Následovalo vytvoření návrhu 6. osy robotu, kterou původní robot nebyl vybaven. Tímto krokem bylo konstrukčně přiblíženo v praxi používaným průmyslovým robotům, které mají zpravidla 6 os.

Další úpravou cílenou na přiblížení se k průmyslovým robotům byl návrh nového řízení robotu. Původní robot byl vybaven nevyhovujícím řízením na platformě Arduino, postrádající výpočet inverzní kinematiky, který je pro ovládání robotů zásadní. Nový návrh řízení byl založen na standardní průmyslové platformě, konkrétně od společnosti Beckhoff, umožňující srovnatelné řízení jako u běžných průmyslových robotů včetně výpočtu inverzní kinematiky. Součástí návrhu řízení bylo také vytvoření uživatelského prostředí pro ovládání robotu.

Na základě návrhů úprav konstrukce byly autorem práce vyrobeny všechny potřebné díly pro stavbu robotu a následně byl nový robot BCN3D MOVEO postaven. Hlavní díly konstrukce byly stejně jako u původního robotu vyrobeny dostupnou technologií 3D tisku, umožňující rychlou a levnou výrobu tvarově složitých součástí.



Robot byl následně oživen na hardwaru společnosti Beckhoff a bylo realizováno navržené řízení.

Poslední částí práce bylo testování nové konstrukce a řízení robotu, včetně měření přesnosti robotu pomocí laser trackeru. Výsledky měření byly vyhovující s ohledem na plánovaný charakter využití robotu a využití technologické postupy a komponenty ke zhotovení robotu.

Všechny cíle práce byly splněny. Vytvořený nový projekt robotu BCN3D MOVEO bude dále veden jako open-source a dojde k zveřejnění celého projektu.



Seznam obrázků

Obr. 1 – Robot Unimate 1900 [2]	10
Obr. 2 – Přehled sériové, paralelní a hybridní kinematiky [3].....	14
Obr. 3 – FANUC LR Mate 200iD/4S [5]	15
Obr. 4 – ABB IRB120 [6]	16
Obr. 5 – KUKA KR3 AGILUS [7].....	17
Obr. 6 – UNIVERSAL ROBOTS UR3 [8]	18
Obr. 7 – STÄUBLI TX40 [9]	19
Obr. 8 – YASKAWA SIA5F [10].....	20
Obr. 9 – HIWIN RA605 [11].....	21
Obr. 10 – Základní struktura pohonu průmyslových robotů [12]	22
Obr. 11 – Pohon 5. a 6. osy robotu KR5 od firmy KUKA [14]	23
Obr. 12 – Pohonná jednotka firmy Universal Robots [15]	24
Obr. 13 – Princip krokového motoru s variabilní reluktancí [17]	25
Obr. 14 – Princip krokového motoru s permanentním magnetem [17]	26
Obr. 15 – Konstrukce hybridního krokového motoru [18].....	27
Obr. 16 – Struktura řízení průmyslových robotů [21]	28
Obr. 17 – Souřadnicové systémy robotu podle firmy KUKA [22]	29
Obr. 18 – Pohyb jednotlivých os robotu [22]	30
Obr. 19 – Pohyb z bodu do bodu – PTP (Point to Point) [22]	31
Obr. 20 – Lineární interpolace [22]	32
Obr. 21 – Kruhová interpolace [22]	32
Obr. 22 – Postup on-line programování robotu [23]	33
Obr. 23 – Ovládací panel od firmy Universal Robots [8]	34
Obr. 24 – Ukázka virtuálního modelu robotického pracoviště [5]	35
Obr. 25 – CAD model robotu BCN3D MOVEO v původním stavu	37
Obr. 26 – Realizovaný robot BCN3D MOVEO v původním provedení	38
Obr. 27 – Ruční ovládání robotu v programu Pronterface [25]	39
Obr. 28 – Poloha robotu použita pro výpočet.....	42
Obr. 29 – Původní verze 1. osy robotu BCN3D MOVEO	44
Obr. 30 – Řez původní konstrukcí 1. osy robotu BCN3D MOVEO	45



Obr. 31 – Varianta č. 1 s přímým ozubením	46
Obr. 32 – Varianta č. 2 s řemenovým převodem	46
Obr. 33 – Nová konstrukce 1. osy robotu.....	47
Obr. 34 – Vnitřní konstrukce 1. osy robotu	48
Obr. 35 – Řez konstrukcí 1. osy robotu	50
Obr. 36 – Provedení ukotvení robota k podstavci.....	50
Obr. 37 – Schéma převodu ozubeným řemenem [28].....	51
Obr. 38 – Řez původní konstrukcí 4. osy	53
Obr. 39 – Nová konstrukce 4. osy.....	54
Obr. 40 – Konstrukční provedení 4. osy	55
Obr. 41 – Řez konstrukcí 4. osy robotu	55
Obr. 42 – Konstrukce 6. osy.....	56
Obr. 43 – Řez konstrukcí 6. osy	57
Obr. 44 – Schéma pro výpočet brzdného momentu na 3. ose robotu	58
Obr. 45 – Umístění elektromagnetické brzdy na 3. ose robotu	59
Obr. 46 – Upravená víka + logo ČVUT	60
Obr. 47 – Kompletní CAD model robotu vytvořený v programu SolidWorks	61
Obr. 48 – Reálná 1. osa robotu - základ	63
Obr. 49 – Reálná 1. osa robotu – rotační část	63
Obr. 50 – Reálná 6. osa robotu.....	64
Obr. 51 – Reálná 4. osa robotu.....	64
Obr. 52 – Reálný robot – poloha po referování	65
Obr. 53 – Reálný robot – obecná poloha	66
Obr. 54 – Reálný robot – detail 2. a 3. osy	67
Obr. 55 – Reálný robot – detail 1. osy	68
Obr. 56 – Reálný robot – detail 6. osy	68
Obr. 57 – Reálný robot – organizace kabelů	69
Obr. 58 – Reálný robot – zapojení hardware Beckhoff	69
Obr. 59 – Struktura zapojení HW robotu	70
Obr. 60 – Testování robotu s HMI panelem	71
Obr. 61 – Ovládací panel s aktivní dopřednou kinematikou	74
Obr. 62 – Ovládací panel s aktivní inverzní kinematikou	74



Obr. 63 – Měření přesnosti laser trackerem	75
Obr. 64 – Koutový odražeč na robotu	76
Obr. 65 – Výchozí a koncová poloha při měření osy X	77
Obr. 66 – Výsledky měření přímosti osy X.....	77
Obr. 67 – Výchozí a koncová poloha při měření osy Y	78
Obr. 68 – Výsledky měření přímosti osy Y.....	78
Obr. 69 – Výsledky měření přímosti osy Y = <200, 60>.....	79
Obr. 70 – Výsledky měření přímosti osy Y = <-60, -200>	79
Obr. 71 – Výchozí a koncová poloha při měření osy Z	80
Obr. 72 – Výsledky měření přímosti osy Z.....	80
Obr. 73 – Naměřené hodnoty bodu č. 1.....	81



Seznam tabulek

Tab. 1 – Porovnání sériové a paralelní kinematiky [4]	14
Tab. 2 – Parametry robotu FANUC LR Mate 200iD/4S [5].....	15
Tab. 3 – Parametry robotu ABB IRB120 [6]	16
Tab. 4 – Parametry robotu KUKA KR3 AGILUS [7]	17
Tab. 5 – Parametry robotu UNIVERSAL ROBOTS UR3 [8].....	18
Tab. 6 – Parametry robotu STÄUBLI TX40 [9].....	19
Tab. 7 – Parametry robotu YASKAWA SIA5F [10].....	20
Tab. 8 – Parametry robotu HIWIN RA605 [11]	21
Tab. 9 – Úhlové zrychlení os robotu před a po optimalizaci	43
Tab. 10 – Koeficienty $c_0 - c_5$ převodu	52
Tab. 11 – Parametry měření přímosti	76
Tab. 12 – Výsledky měření opakovatelnosti bodu č. 1	82
Tab. 13 – Výsledky měření opakovatelnosti bodu č. 2	82
Tab. 14 – Výsledky měření přímosti	83



Seznam literatury

- [1] ČSN ISO 8373. Roboty a robotická zařízení - Slovník. 2. vyd. Praha: Český normalizační institut, 2012.
- [2] Unimate - The First Industrial Robot [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.robotics.org/joseph-engelberger/unimate.cfm>
- [3] MRÁZ, Petr. Průmyslové roboty v praxi. ČVUT (Praha), 2008. 14 s. Referát. České vysoké učení technické Praha, Fakulta strojní, Ústav konstruování a částí strojů. Dostupné z WWW: <http://docplayer.cz/6707543-Prumyslove-roboty-v-praxi.html>.
- [4] HAVLAN, Tomáš. 3D prototyping mechanismů. Praha, 2016. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta strojní. Ústav mechaniky, biomechaniky a mechatroniky. Obor mechaniky a mechatroniky.
- [5] FANUC | The Factory Automation Company - Fanuc [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://www.fanuc.eu/cz/cs>
- [6] ABB Robotika [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/cs>
- [7] Průmyslové roboty | KUKA [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-sluzby/roboticke-systemy/prumyslove-roboty>
- [8] Collaborative Industrial Robotic robot Arms | Cobots from UR [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com>
- [9] Stäubli robotics [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/en/robotics/>
- [10] YASKAWA Europe GmbH [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.yaskawa.eu.com/>
- [11] HIWIN Corporation [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.hiwin.com/articulated-robots.html>



- [12] ANDRLÍK, Vladimír a kol. Průmyslové roboty a manipulátory. Učební text FS ČVUT v Praze, 2012, 256 s. [cit. 2018-04-20].
- [13] RUMÍŠEK, Pavel. Automatizace: roboty a manipulátory [online]. Učební text FSI VUT Brno, 2003, 31 s. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/emm_mechanizace_a_automatizace_roboty_rumisek.pdf
- [14] UDAI, A.D. Inside Axis 4, 5 & 6 of KUKA KR5 Robot. In: Youtube [online]. Zveřejněno 2. 11. 2012 [vid. 2018-5-5]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=iRKDfknqtbc>
- [15] Cross Company | CrossCo: Universal Robots Model UR3 Joint Replacement Tutorial | CrossCo [online]. [cit. 2018-04-02]. Dostupné z: <https://www.crossco.com/blog/universal-robots-model-ur3-joint-replacement-tutorial>
- [16] ŘEZÁČ, Kamil. Krokové motory [Online]. 2002 [cit. 2018-5-6]. Dostupné z URL: <http://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [17] Pohonnatechnika. Krokový motor [online]. [cit. 2018-4-6]. Dostupné z: <http://www.pohonnatechnika.cz/skola/motory/krokovy-motor>
- [18] ELUC. Krokový motor [online]. [cit. 2018-4-6]. Dostupné z: <https://eluc.kr-olomoucky.cz/verejne/lekce/809>
- [19] RoboDoupě - web nejen o robotice [online]. 2016 [cit. 2018-5-6]. Dostupné z: <http://robodoupe.cz/2016/mikrokrokovani-sny-a-skutecnost/>
- [20] Teorie řízení | Michal Dušek [online]. 2016 [cit. 2018-05-06]. Dostupné z: <http://www.mdp.cz/mdp/en/operating-theory>
- [21] Automatizačná a robotická technika [online]. Učební text VITRALAB Košice, 2011, 64 s. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: http://www.sjf.tuke.sk/vitralab/files/vystupy/prirucka_sk_final.pdf
- [22] KUKA ROBOTER GMBH. KUKA Operating and Programming Instructions: For End User, KSS 8.3 END V1.1. Augsburg, 2013, 237s. [cit. 2018-04-10].



- [23] HAJDUK, M., V. BALÁŽ a N. DANESHJO. Simulácia a off-line programovanie priemyselných robotických systémov [online]. AT&P journal: priemyselná automatizácia a informatika. Bratislava: HMM, 2005, (2): 84-85. ISSN 1336-233X. Dostupné z: <https://www.atpjournal.sk/buxus/docs/atp-2005-02-84.pdf>
- [24] BLECHA, P., Z. KOLÍBAL, R. KNOFLÍČEK, A. POCHYLÝ, T. KUBELA, R. BLECHA a T. BŘEZINA. Mechatronika: Modul 10: Robotika [on-line]. Učební text VUT Brno, 157 s. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: <https://docplayer.cz/8054951-Mechatronika-modul-10-robotika.html>
- [25] BCN3D Technologies: BCN3D MOVEO - A fully Open Source 3D printed robot arm [online]. 2016 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://www.bcn3dtechnologies.com/en/bcn3d-moveo-the-future-of-learning/>
- [26] GitHub - BCN3D/BCN3D-Moveo: Open Source 3D Printed Robotic Arm for educational purposes [online]. 2016 [cit. 2018-06-28]. Dostupné z: <https://github.com/BCN3D/BCN3D-Moveo>
- [27] Ameco s.r.o. [online]. Dostupné z: <http://eshop.ameco.cz>
- [28] CONTITECH. *Conti Synchrobelt HTD: Synchronous drive belts*. 2002.
- [29] Beckhoff information system [online]. Dostupné z: <http://infosys.beckhoff.com>



Seznam příloh

Výkresová dokumentace

1742-00-00	ROBOT BCN3D MOVEO
1742-00-00-K	ROBOT BCN3D MOVEO_KUSOVNÍK
1742-01-01	HŘÍDEL_1.OSA
1742-01-02	ÚPRAVA ŘEMENICE
1742-01-03	PLECH_1.OSA
1742-04-01	HŘÍDEL_4.OSA
1742-06-01	HŘÍDEL_6.OSA

Elektronické přílohy

- Příloha č. 1: CAD model sestavy robotu + pomocné CAD modely
- Příloha č. 2: Výkresová dokumentace
- Příloha č. 3: Výpočty Excel
- Příloha č. 4: Projekt UniMotion_BCN3D MOVEO