



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV AUTOMATIZACE A INFORMATIKY**

INSTITUTE OF AUTOMATION AND COMPUTER SCIENCE

**NÁVRH MALÉHO NÍZKOROZPOČTOVÉHO  
ROBOTU AI.SCARA**

DESIGN OF A SMALL LOW-COST ROBOT AI.SCARA

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Tomáš Janoušek**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.**

**BRNO 2024**



# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav automatizace a informatiky  
Student: **Tomáš Janoušek**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Aplikovaná informatika a řízení  
Vedoucí práce: **prof. Ing. Radomil Matoušek, Ph.D.**  
Akademický rok: 2023/24

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

## Návrh malého nízkorozpočtového robotu AI.SCARA

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V ohledu robotických manipulátorů existuje z pohledu kinematiky mnoho konceptů. Jedním z úspěšných je koncept tzv. SCARA robota, což je v podstatě planární mechanismus se z-tovou osou na které je umístěn efektor. Tyto roboty se vyznačují specifickým manipulačním prostorem, dobrou tuhostí a rychlostí, poměrně typickou konstrukcí. Aplikačně jsou často využity například v potravinářském průmyslu. Smyslem navržené nadstandardní bakalářské práce, je komplexní návrh scara robota, včetně kontroleru. Maximální důraz bude kladen na příznivou pořizovací cenu při zachování tuhostních charakteristik umožňujících přesnost polohování 0,5mm a opakovatelnost 0,25mm v ohledu ČSN ISO 8373. Konstrukčně se předpokládá kombinace 3D tisku a duralových obrobků, v základu ocelová platforma, krokové motory s enkodéry, napájení 24V i více.

### Cíle bakalářské práce:

- Rešerše systémů SCARA robotů dostupných na trhu.
- Konstrukční návrh malého robotu SCARA pro radius efektoru od základny 400mm. Tři stupně volnosti v planární rotaci a z-posun osy efektoru min 150mm. Min zatížení 1kg. Konstrukční řešení pro pneumatiku a elektroniku efektoru. Koncové a bezpečnostní prvky.
- Mechanická a elektrická realizace navrženého robotu SCARA včetně skříně kontroleru (řešení nebude zahrnovat programování API, pouze testovací algoritmy pro ověření výkonnostních a metrologických charakteristik zařízení).
- Embosované značení s afiliací k ÚAI.
- Ekonomický kusovník řešení. Stručná technická, konstrukční a elektro dokumentace.

### Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk, KOLÍBAL, Zdeněk, ed., 2016. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně. ISBN 978-80-214-4828-5.

Precizní planetové převodovky, 2012. Strojárstvo: mesačník o strojárstve. Žilina: MEDIA/ST, 16(9), 33. ISSN 1335-2938.

Cykloidní převodovky, 2013. Strojárstvo: mesačník o strojárstve. Žilina: MEDIA/ST, 17(5), 47.  
ISSN 1335-2938.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

---

Ing. Pavel Heriban, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

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

## **ABSTRAKT**

Cílem této bakalářské práce je navrhnout a sestavit nízkorozpočtový robot založený na průmyslovém konceptu SCARA, který splňuje požadavky z hlediska tuhosti a opakovatelnosti pro využití v širokém spektru manipulačních úloh primárně realizovaných v univerzitním prostředí. Součástí práce je nejen vlastní mechanická konstrukce, ale i návrh a realizace elektrického zapojení, řídicího systému, a v neposlední řadě také návrh uživatelsky přívětivého grafického rozhraní člověk-stroj pro základní ovládání, diagnostiku a kalibraci robotické struktury. V teoretické části práce je pojednáno o existujících robotických strukturách, systémech SCARA dostupných na trhu a koncových efektorech pro manipulační operace.

## **ABSTRACT**

The aim of this bachelor thesis is to design and build a low-cost robot based on the industrial concept SCARA, which meets the requirements in terms of rigidity and repeatability for application in a wide range of manipulation tasks primarily implemented in a university environment. The thesis includes not only the unique mechanical design, but also design and implementation of the electrical circuitry, control system, and design of a user-friendly human-machine graphical interface for basic control, diagnosis and calibration of the robotic structure. The theoretical part of the thesis focuses on a research of existing robotic structures, SCARA systems available on the market and end-effectors use manipulation operations.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

SCARA, průmyslový robot, systémová integrace, řízení pohybu, kinematika, uživatelské rozhraní

## **KEYWORDS**

SCARA, industrial robot, system integration, motion control, kinematics, user interface





ÚSTAV AUTOMATIZACE  
A INFORMATIKY



2024

## **Bibliografická citace**

JANOŠEK, Tomáš. Návrh malého nízkorozpočtového robotu AI.SCARA. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157894>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky. Vedoucí práce Radomil Matoušek.





## **Poděkování**

Rád bych poděkoval prof. Ing. Radomilu Matouškovi, Ph.D za vedení, podporu a rady při vypracování bakalářské práce. Dále bych rád poděkoval mé rodině a přítelkyni za podporu a motivaci jak při tvorbě této práce, tak při celém studiu.



## Čestné prohlášení

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, vypracoval jsem ji samostatně pod vedením vedoucího práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury.

Jako autor uvedené práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následku porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestně právních důsledků.

V Brně dne 24. 5. 2024

.....

Tomáš Janoušek



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD.....</b>	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>PRŮMYSLOVÉ ROBOTY.....</b>	<b>17</b>
2.1	Kinematická stavba průmyslových robotů .....	17
2.1.1	Kartézský robot.....	19
2.1.2	Cylindrický robot.....	19
2.1.3	Sférický robot .....	20
2.1.4	SCARA robot .....	21
2.1.5	Angulární robot.....	21
2.1.6	Delta robot .....	22
<b>3</b>	<b>ROBOT SCARA .....</b>	<b>23</b>
3.1	Historie vzniku SCARA robotu.....	23
3.2	Konstrukce.....	24
3.3	Průmyslové SCARA roboty .....	25
3.3.1	EPSON T3-B401S .....	25
3.3.2	FANUC SR-3iA .....	26
3.3.3	ABB IRB 910SC .....	27
3.3.4	Stäubli TS2-40.....	28
3.3.5	EPSON GX8B-452S.....	29
3.3.6	Technické specifikace zmíněných SCARA robotů .....	30
3.4	Neprůmyslová řešení SCARA robotů .....	31
3.4.1	IGUS drylin® SCARA robot 4 DOF.....	31
3.4.2	FUM SCARA .....	32
3.4.3	HowToMechatronics SCARA robot .....	33
3.5	Koncové efekторы .....	34
3.5.1	Mechanické úchopné prvky.....	35
3.5.2	Magnetické úchopné prvky .....	36
3.5.3	Podtlakové úchopné prvky .....	36
3.5.4	Bezkontaktní úchopné prvky .....	38
<b>4</b>	<b>NÁVRH ROBOTU AI.SCARA – MECHANICKÁ ČÁST .....</b>	<b>41</b>
4.1	Autodesk Fusion 360.....	41
4.2	Proces návrhu mechanické konstrukce.....	42
4.3	Konečný návrh mechanické konstrukce .....	44
4.3.1	Báze robotu.....	44
4.3.2	První rameno robotu .....	45
4.3.3	Druhé rameno robotu.....	47
4.3.4	Mechanický návrh kontroléru.....	50

<b>5</b>	<b>NÁVRH ROBOTU AI.SCARA – ELEKTROTECHNICKÁ ČÁST.....</b>	<b>53</b>
5.1	Pohony .....	53
5.1.1	Servomotory a krokové motory .....	53
5.1.2	Pohony os SCARA robotu .....	55
5.2	Koncové prvky pro nalezení referenčních poloh .....	58
5.3	Elektrotechnický návrh kontroléru.....	60
5.3.1	Napájení .....	60
5.3.2	Ovladače krokových motorů.....	61
5.3.3	Periferie.....	61
5.3.4	Mikrokontroléry .....	62
5.4	Schémata zapojení.....	63
<b>6</b>	<b>NÁVRH ROBOTU AI.SCARA – SOFTWARE.....</b>	<b>65</b>
6.1	Řídicí systém robotu .....	65
6.1.1	Jazyk Arduino .....	65
6.1.2	Struktura řídicího programu.....	65
6.1.3	Funkce.....	66
6.2	Grafické uživatelské rozhraní .....	77
6.2.1	Vývojové prostředí pro GUI – Processing.....	77
6.2.2	Vzhled uživatelského rozhraní.....	77
6.2.3	Navázání komunikace se SCARA kontrolérem.....	78
6.2.4	Příklad tvorby programu .....	79
<b>7</b>	<b>ZÁKLADNÍ TESTY ROBOTU AI.SCARA.....</b>	<b>83</b>
7.1	Testy opakovatelnosti .....	83
7.2	Testy tuhosti.....	84
7.3	Komplexní testy .....	86
<b>8</b>	<b>ZÁVĚR.....</b>	<b>87</b>
	<b>SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY .....</b>	<b>91</b>
	<b>SEZNAM ZKRATEK.....</b>	<b>97</b>
	<b>SEZNAM PŘÍLOH.....</b>	<b>99</b>

# 1 Úvod

Průmyslové roboty jsou nepostradatelnou součástí nejrůznějších technologických procesů. S rostoucím požadavkem na pokročilost a flexibilitu robotických systémů roste také poptávka po vhodných edukačních a laboratorních nástrojích. Jednou z konstrukcí, která je mimo jiné často využívána v laboratorním prostředí, je průmyslový koncept SCARA, který vyniká zejména v dynamických montážních a manipulačních operacích typu pick-and-place.

Klíčovou částí této bakalářské práce je praktický návrh a realizace nízkorozpočtového robotu AI.SCARA, jehož konstrukce bude splňovat požadavky z hlediska tuhosti a opakovatelnosti pro využití v širokém spektru manipulačních úloh primárně realizovaných v univerzitním prostředí. Součástí práce je kromě mechanické konstrukce také návrh a realizace elektrického zapojení a řídicího systému robotu.

Ve druhé kapitole práce jsou přehledně popsány běžně dostupné konstrukce průmyslových robotů. Třetí kapitola poskytuje obsáhlou rešerši existujících systémů SCARA dostupných na trhu. Kromě průmyslových robotů SCARA jsou v této kapitole uvedeny také univerzitní a neprůmyslová řešení pro použití například v laboratoři. V závěru třetí kapitoly je pozornost věnována problematice manipulačních koncových efektorů.

Kapitoly 4, 5 a 6 poskytují komplexní popis návrhu a realizace jednotlivých celků robotu AI.SCARA. Čtvrtá kapitola pojednává o jeho mechanické konstrukci, která se skládá ze tří klíčových částí – stacionární báze, prvního ramene a druhého ramene. Pátá kapitola popisuje elektrotechnický návrh robotu. V úvodu této kapitoly je objasněn teoretický základ krokových motorů a servopohonů, následně jsou uvedeny konkrétní pohony os robotu AI.SCARA. Součástí této kapitoly je také popis řídicích jednotek krokových motorů, koncových prvků pro snímání referenční polohy, mikrokontrolérů a napájecích prvků robotu.

Šestá kapitola je rozdělena na dvě hlavní části. V první části je proveden popis struktury řídicího systému. Součástí tohoto popisu jsou mimo jiné také teoretické základy kinematických výpočtů. Dále je objasněno řízení a synchronizace os robotu. Druhá část kapitoly pojednává o návrhu grafického uživatelského rozhraní, díky kterému lze snadno uskutečnit základní diagnostiku, ovládání a programování pohybu robotu. V sedmé kapitole je robot AI.SCARA podroben základním zkouškám vlastností a v závěru je navržené řešení zhodnoceno.





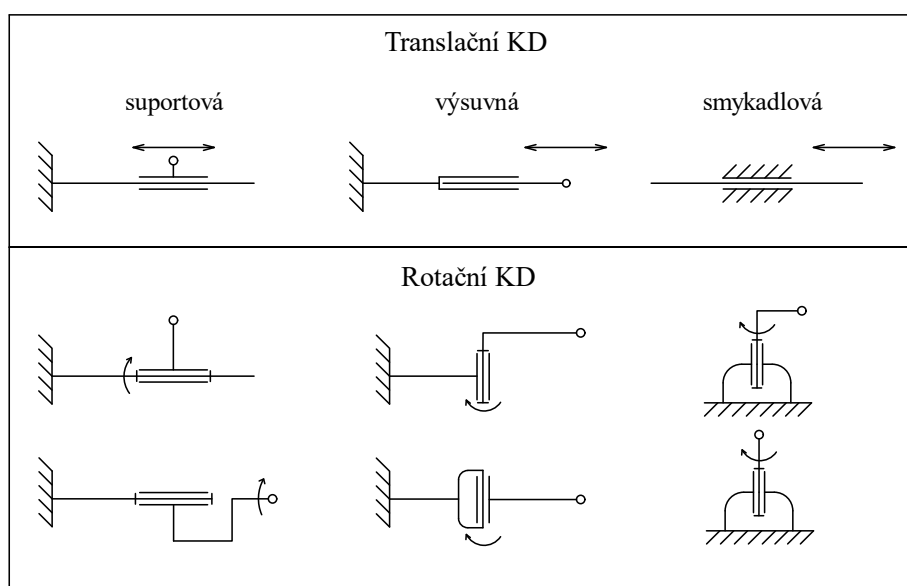
## 2 Průmyslové roboty

Pro termín průmyslový robot existuje mnoho uznávaných definic. Jednu z těchto definic poskytuje také norma ISO 8373 [1], podle které je průmyslový robot „*automaticky řízený, reprogramovatelný víceúčelový manipulátor programovatelný ve třech nebo více osách, který může být buď pevně umístěný nebo mobilní pro použití v průmyslových aplikacích s použitím automatů*“.

Průmyslové roboty je možné rozdělovat dle velkého množství různých parametrů. Mezi nejčastější aspekty dělení patří *morfologie* (kinematická stavba) robotu, počet stupňů volnosti, tvar a velikost pracovního prostoru robotu, velikost robotu, největší hmotnost břemene, se kterou průmyslový robot dokáže spolehlivě manipulovat a mnoho dalších [2]. Tyto parametry spolu velmi často úzce souvisí a neexistuje jednotné a univerzální dělení. Mnoho důležitých vlastností robotů se odvíjí právě od jejich mechanické konstrukce a kinematické struktury.

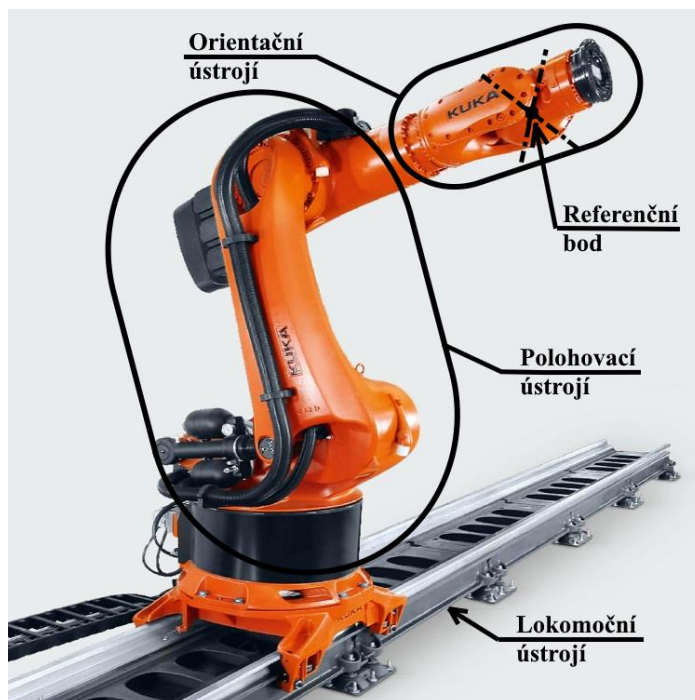
### 2.1 Kinematická stavba průmyslových robotů

Kolibal *et al.* [3] uvádí, že průmyslové roboty i roboty obecně lze dělit na základě jejich kinematické stavby. Kinematický řetězec (KŘ) se skládá z několika binárních členů (ramen), vzájemně spojených kinematickými vazbami – tzv. kinematickými dvojicemi (KD). V oblasti průmyslových robotů se až na výjimky využívají výhradně kinematické dvojice translační (značeny písmenem T) a rotační (značeny písmenem R). Obě tyto kinematické vazby mají pouze jeden stupeň volnosti a jejich schématické znázornění je patrné z obr. 1. Kinematické dvojice s více stupni volnosti se využívají velmi zřídka z důvodu komplikovaného připojení pohonů a odměřování k těmto dvojicím.



Obr. 1: Příklady schématického značení kinematické dvojice translační a rotační, vytvořeno na základě informací dostupných z [3].

Kinematický řetězec průmyslového robotu lze z pohledu konstrukčního rozdělit na polohovací ústrojí, orientační ústrojí, koncový efektor a v případě, že je robot upevněn např. na pojezdové dráze i lokomoční (pojezdové) ústrojí, viz obr. 2 [3]. Polohovací ústrojí zajišťuje primárně polohování referenčního bodu v prostoru a má ze všech částí kinematického řetězce nejzásadnější vliv na mechanickou stavbu robotu. Na referenční bod plynule navazuje orientační ústrojí, jímž dochází k prostorové orientaci koncového efektoru. Orientační ústrojí se až na výjimky skládá z rotačních kinematických dvojic a často bývá realizováno složitými mechanickými převody.



Obr. 2: Rozdělení sériového kinematického řetězce robotu Kuka KR210 [3, 4].

Jestliže jsou ramena průmyslového robotu propojena kinematickými dvojicemi postupně za sebou, pak se jedná o roboty se *sériovou kinematikou* [3]. U těchto robotů je počet stupňů volnosti roven počtu kinematických dvojic v řetězci, jenž obvykle začíná u báze průmyslového robotu a je zakončen jeho koncovým efektem.

Binární členy mohou být spojeny také paralelně – pak se jedná o roboty s *paralelní kinematikou* [3]. U těchto robotů je poloha a orientace koncového efektoru v prostoru určena současným pohybem všech paralelně spojených ramen. Vhodným příkladem paralelní kinematické struktury je tzv. Stewartova plošina, viz. obr. 3. Tato platforma je v praxi nejčastěji uložena na šesti proměnlivých podpěrách, teoreticky však lze realizovat pouze na třech [3].

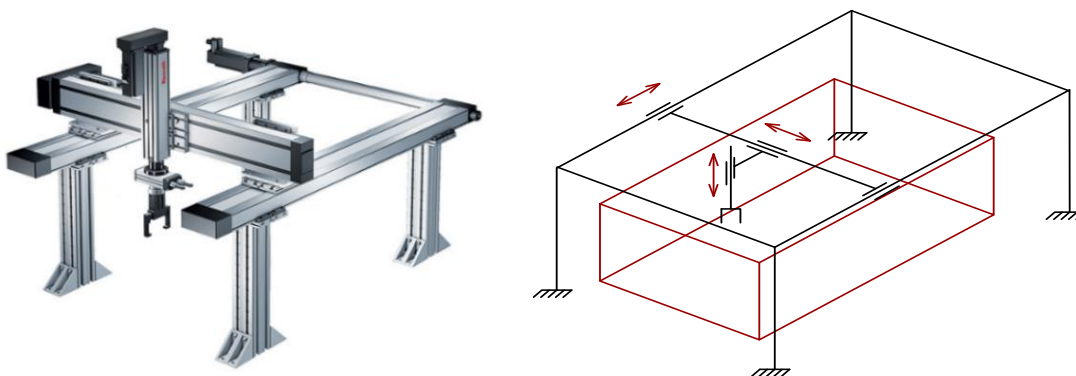
Mezi hlavní výhody paralelních konstrukcí se řadí vysoká tuhost, rychlost pohybů, přesnost a schopnost manipulace s těžkými břemeny. Tyto výhody zmiňují *Siciliano* a *Khatib* v [5]. Kladné vlastnosti paralelních struktur jsou však částečně kompenzovány náchylností na vznik singulárních poloh, malým pracovním prostorem a komplikovaným řízením pohybů.



Obr. 3: Jedna z možných konstrukcí Stewartovy platformy [6].

### 2.1.1 Kartézský robot

Kartézský robot, jak již název napovídá, využívá ke svému pohybu kartézskou kinematickou strukturu, viz obr. 4 vpravo. Jeho polohovací ústrojí se skládá ze tří vzájemně kolmých translačních kinematických dvojic (spojení TTT). Každá z těchto translačních vazeb zajišťuje lineární pohyb podél jedné z os kartézského souřadného systému. Díky tomu má pracovní prostor tvar kvádra [3]. Mezi hlavní výhody tohoto uspořádání patří jednoduché kinematické výpočty a vysoká přesnost polohování. S kartézskou strukturou se lze mimo jiné setkat například u 3D tiskáren, mostových jeřábů, obráběcích strojů apod. Kartézský robot je možné vidět na obrázku 4 vlevo.

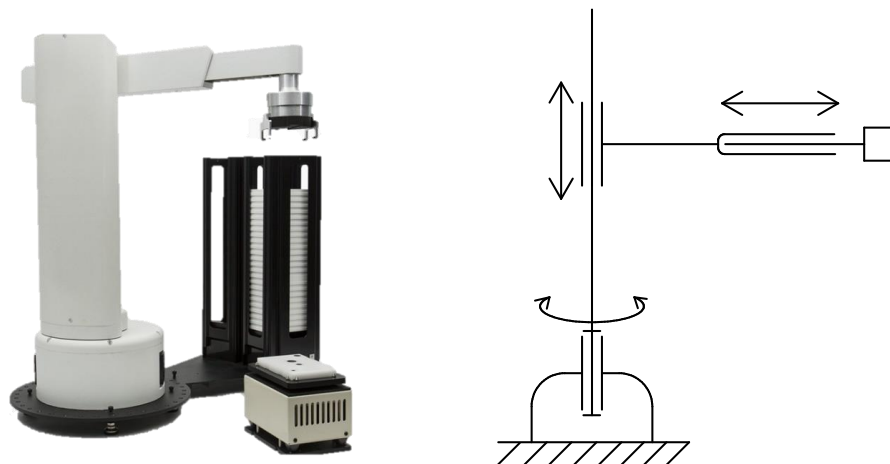


Obr. 4: Vlevo kartézský robot [7], vpravo schéma polohovacího ústrojí kartézského robotu.

### 2.1.2 Cylindrický robot

Polohovací ústrojí cylindrického robotu se skládá z vazeb spojených v řetězci RTT [3], viz obr. 5 vpravo. Rotační kinematická dvojice na začátku řetězce určuje natočení celého robotu. První z translačních vazeb řídí vertikální posuv, a tudíž i výšku ve které se nachází koncový efektor. Translační osa na konci řetězce ovládá horizontální vzdálenost koncového efektoru od otočného sloupu. Z uvedeného kinematického řetězce lze odvodit, že pracovní prostor cylindrické struktury má tvar části válce.

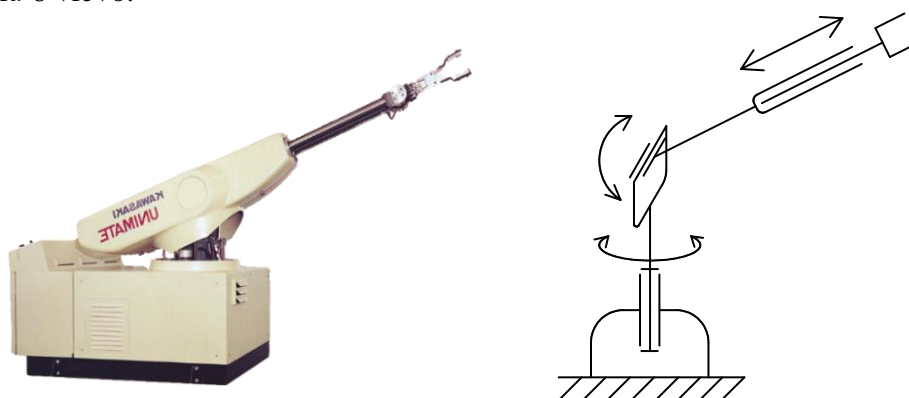
Výskyt tohoto typu robotu je méně častý, ale i přesto hraje v některých aplikacích důležitou roli. Dle [8] vyniká zejména v jednoduchých činnostech – například v obsluze obráběcích strojů, paletizaci, bodovém svařování apod. Příklad cylindrického robotu lze vidět na obrázku 5 vlevo.



Obr. 5: Vlevo cylindrický robot [9], vpravo schéma polohovacího ústrojí cylindrického robotu.

### 2.1.3 Sférický robot

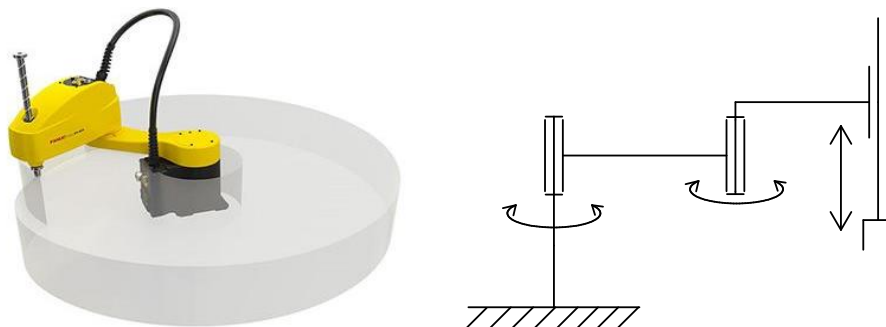
Sférický (někdy také nazývaný polární) robot má polohovací ústrojí složeno z jedné translační a dvou rotačních kinematických dvojic, které jsou uspořádané v řetězci RRT (rotace-rotace-translace), viz obrázek 6 vpravo [3]. První rotační vazba určuje natočení ramene robotu kolem vertikální osy a druhá jeho výškovou elevaci. Translační pohyb na konci řetězce řídí vzdálenost koncového efektoru od základny [12]. Pracovní prostor tohoto typu robotu je tvořen částí koule (sféry) a své uplatnění nachází nejčastěji v méně náročných lakovacích a svařovacích aplikacích, obsluze obráběcích strojů apod. Podobně jako u cylindrického robotu se jedná o starší a v současné době méně častou konstrukci robotu, která je nahrazována více flexibilní angulární (kloubovou) konstrukcí [10]. Příkladem této struktury může být průmyslový robot Unimate, který je zobrazen na obrázku 6 vlevo.



Obr. 6: Vlevo sférický robot Unimate [11], vpravo schéma polohovacího ústrojí sférického robotu.

### 2.1.4 SCARA robot

Průmyslový robot SCARA využívá sériovou kinematickou strukturu ve spojení RRT [3], viz obr. 7 vpravo. Jedná se o kinematické spojení odvozené od sférického robotu. Na rozdíl od sférického robotu s pracovním prostorem části sféry má robot SCARA, viz obr. 7, pracovní prostor cylindrického tvaru, přestože mají obě konstrukce robotů zdánlivě stejně uspořádaný kinematický řetězec (RRT). Tyto roboty vynikají zejména svou rychlostí a opakovatelností [13].

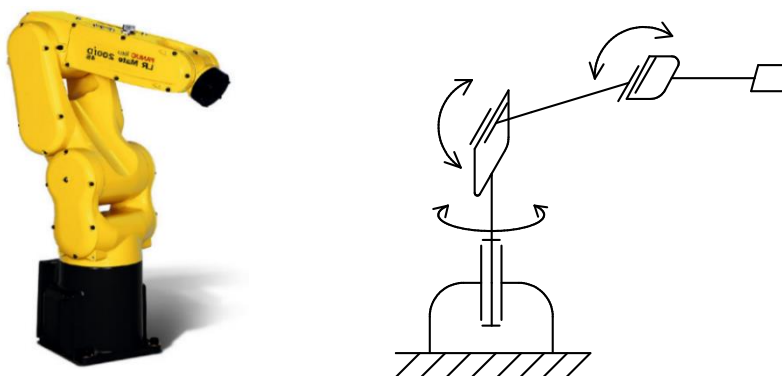


Obr. 7: Vlevo SCARA robot FANUC [13], vpravo schéma polohovacího ústrojí SCARA robotu.

### 2.1.5 Angulární robot

Tyto roboty jsou charakteristické polohovacím ústrojím, které je složeno ze tří rotačních kinematických dvojic (spojení RRR, viz obr. 8 vpravo) [3]. Tento typ robotu se často také nazývá *kloubový* nebo *šestiosý*. Název „šestiosý“ vychází ze skutečnosti, že kinematický řetězec tohoto typu robotu je nejčastěji kromě tří polohovacích rotačních vazeb složen také z dalších tří rotačních KD, které tvoří orientační ústrojí koncového efektoru [3].

Díky všestrannosti použití a prostorové flexibilitě nachází uplatnění v aplikacích, jež vyžadují složité prostorové pohyby [10]. Mezi časté aplikace šestiosých robotů uvádí *Bernier* v [14] obloukové svařování, montážní operace, obsluhu obráběcích strojů apod. Angulární roboty jsou v současnosti nejčastěji nasazovaný typ průmyslového robotu. Příkladem může být průmyslový robot FANUC LR Mate 200iD, viz obrázek 8 vlevo.

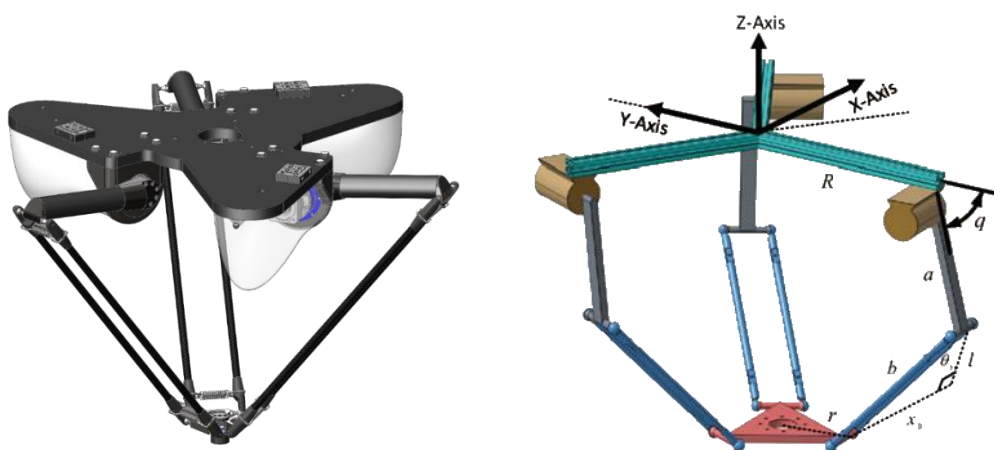


Obr. 8: Vlevo angulární robot FANUC [15], vpravo schéma polohovacího ústrojí angulárního robotu.

### 2.1.6 Delta robot

Delta náleží na rozdíl od doposud zmíněných robotů se sériovým KŘ mezi zástupce paralelních struktur [3]. Na pevné bázi robotu jsou zavěšena nejčastěji tři ramena, která jsou na svých opačných koncích připojena ke společné pohyblivé platformě ve tvaru rovnostranného trojúhelníku, viz obrázek 9 vpravo. Součástí ramen jsou mechanismy nazývané paralelogramy, které při pohybu udržují vodorovnou orientaci koncového efektoru [16].

Hmotné pohony jsou uloženy na nepohyblivé bázi mimo pohyblivý mechanismus robotu, což v kombinaci s odlehčenými rameny vede k velmi vysoké dynamice koncového efektoru [3]. Dle [16] se jedná se o nejrychlejší typ průmyslového robotu. Vyniká zejména ve velmi svižných manipulačních operacích objektů s nízkou hmotností. Na obrázku 9 vlevo lze vidět delta robot od firmy Codian.

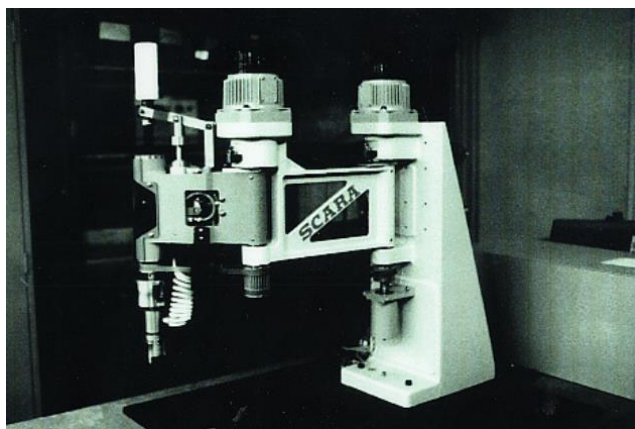


Obr. 9: Vlevo delta robot D4-650 firmy Codian [17], vpravo zjednodušené schéma delta robotu [16].

## 3 Robot SCARA

### 3.1 Historie vzniku SCARA robotu

Polohovací ústrojí SCARA robotu je realizováno kinematickým spojením RRT (rotace-rotace-translace), viz obrázek 7 vpravo [3]. Jedná se o odvozené kinematické uspořádání, které vynalezl ve spolupráci se svými kolegy prof. Hiroshi Makino z japonské univerzity Jamanaši [18]. První prototyp SCARA byl vytvořen v roce 1978, viz obrázek 10, a od roku 1981 byly dostupné první komerční průmyslové roboty této konstrukce.



Obr. 10: První prototyp SCARA robotu [18].

Název SCARA je akronym z anglického slovního spojení „*Selective Compliance Assembly Robot Arm*“. Toto spojení je možné přeložit jako „*montážní robotické rameno se selektivní poddajností*“. V počátcích návrhu SCARA robotu se prof. Makino inspiroval tradiční japonskou skládací zástěnou zvanou „*Byōbu*“, viz obrázek 11, která je charakteristická vysokou poddajností při horizontálním pohybu, a současně velmi nízkou poddajností (vysokou tuhostí) ve vertikálním směru [18]. Takové chování konstrukce se nazývá „*selektivní poddajnost*“ a je jednou z důležitých vlastností SCARA robotu.

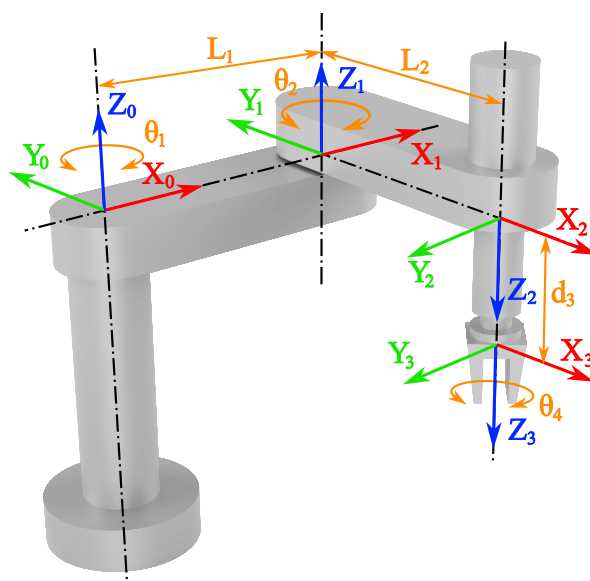


Obr. 11: Japonská skládací zástěna „*Byōbu*“ [18, 19].

*Makino* v [18] uvádí, že kombinace mírné horizontální poddajnosti a vertikální tuhosti umožňuje SCARA robotu provádět velmi přesné montážní operace, pro které byl primárně navržen. Vodorovná poddajnost struktury dovoluje do určité míry kompenzovat nesouosost např. při vkládání přesného čepu do díry. Vertikální tuhost naopak zabraňuje, aby současně došlo k natočení čepu, které by vedlo ke vzpříčení tělesa v díře a následné kolizi.

### 3.2 Konstrukce

Kinematický řetězec má v obvyklém provedení konstrukce robotu celkem čtyři stupně volnosti. První tři stupně volnosti realizují polohovací ústrojí RRT [3]. Dvě rotační KD na začátku řetězce umožňují natočení kolem vzájemně rovnoběžných vertikálních os, čímž je zajištěno polohování v rámci horizontální roviny X-Y [13]. Navazující svislá translace řídí polohu efektoru v ose Z. Kombinace těchto tří pohybů zajišťuje dosažení požadované polohy koncového efektoru uvnitř cylindrického pracovního prostoru SCARA robotu.



Obr. 12: Kinematické schéma SCARA robotu se čtyřmi stupni volnosti.

Při různorodých manipulačních a montážních operacích je však obvykle nezbytné, aby bylo možné řídit kromě polohy také natočení objektu [18]. Na konec kinematického řetězce je pro tyto potřeby zařazena další KD rotační, která poskytuje zmíněný čtvrtý stupeň volnosti. Výsledný kinematický řetězec je ve spojení RRTR, viz obrázek 12.

Díky skutečnosti, že jsou osy všech tří rotačních KD vzájemně rovnoběžné, lze hmotné pohony uložit blíže k bázi a rotaci dané osy realizovat např. s využitím synchronních řemenů nebo řetězů [3]. Posun hmotnosti směrem k bázi vede ke snížení zatížení jednotlivých ramen a jejich momentů setrvačnosti. To umožňuje SCARA robotu vykonávat velmi dynamické pohyby.



### 3.3 Průmyslové SCARA roboty

V současné době se vývojem SCARA robotů zabývá velké množství menších i světoznámých společností. Tyto společnosti mají obvykle celou produktovou řadu těchto robotů, která je odstupňovaná dle určitých parametrů. Nejčastější je dělení na základě nosnosti nebo maximálního dosahu robotu. Často se lze také setkat s tím, že je jeden model robotu vyráběn ve více provedeních, viz [20] – například varianta s certifikací pro použití ve farmaceutickém průmyslu, potravinářském průmyslu apod.

Vzhledem k velkému počtu různých konfigurací není prakticky možné v této práci vzájemně porovnat všechny SCARA roboty od různých výrobců. Od každé firmy je proto zvolen vždy jeden zástupce (v případě firmy Epson jsou zástupci dva), který se nejvíce blíží parametrem maximálního horizontálního dosahu od základny hodnotě 400 mm. Důvodem pro zvolení této hodnoty je skutečnost, že většina výrobců má v nabídce roboty SCARA s tímto dosahem.

#### 3.3.1 EPSON T3-B401S

Firma Epson je jedním z celosvětově největších výrobců SCARA robotů. Celkem nabízí více než 300 různých konstrukčních konfigurací tohoto typu průmyslového robotu, čímž pokrývá potřeby většiny manipulačních a montážních operací [21]. Z nabídky byl nejprve vybrán SCARA robot T3-B401S, viz obrázek 13, jenž pochází z řady T-B. Tato řada robotů je charakteristická velmi příznivou pořizovací cenou a kompaktní konstrukcí, která má v sobě mimo jiné přímo integrovaný kontrolér robotu [22].



Obr. 13: Epson T3-B401S [22].

SCARA robot T3-B401S má dosah 400 mm a maximální nosnost 3 kg [22]. Díky integrovanému kontroléru je zprovoznění robotu velmi jednoduché a rychlé. Na druhém ramenu je dostupný I/O (*Input/Output*) panel, na který je od základny robotu přivedeno 6 datových vstupů, 4 datové výstupy a 3 pneumatické rychlospojky. Ačkoliv se jedná o robot z nízkonákladové řady T-B, firma Epson k němu poskytuje stejné softwarové nástroje jako ke svým nejpokročilejším robotům. Podrobné technické parametry robotu jsou uvedeny v tabulce 1.

### 3.3.2 FANUC SR-3iA

FANUC je celosvětová společnost s hlavním sídlem v japonské prefektuře<sup>1</sup> Jamanaši [23], kde se shodou okolností nachází také univerzita, na které vznikl první prototyp SCARA robotu. Firma nabízí velmi široký sortiment produktů, který zahrnuje kromě řady robotů SCARA také delta a šestiosé roboty pro mnoho průmyslových aplikací [24].

Z řady robotů SCARA byl vybrán průmyslový robot SR-3iA, viz obrázek 14, jehož horizontální dosah činí 400 mm a maximální nosnost jsou 3 kg [25]. Konstrukce robotu disponuje na druhém ramenu celkem osmi konfigurovatelnými I/O linkami spolu se dvěma integrovanými pneumatickými ventily. Řízení robotu je realizováno kontrolérem R-30iB Compact Plus, který disponuje pokročilými funkcemi – kupříkladu strojovým viděním s možností sledování dopravníkového pásu. Další parametry robotu jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 14: FANUC SR-3iA [25].

<sup>1</sup> Prefektura – územní jednotka administrativní správy.

### 3.3.3 ABB IRB 910SC

ABB je známou nadnárodní korporací s hlavním sídlem ve švýcarském Curychu. Mezi oblastmi, ve kterých ABB působí patří automatizace, energetika a robotika [26]. Společnost nabízí komplexní portfolio průmyslových robotů, které zahrnuje také produkty SCARA. Kromě stacionárních robotů se ABB v oblasti robotiky zabývá (mimo jiné) také vývojem autonomních mobilních robotů.

Robot IRB 910SC, viz obr. 15, pochází z první generace robotů SCARA od firmy ABB [27]. Je dostupný ve třech konfiguracích, které se liší maximální dosažitelnou vzdáleností od základny – dosahy jednotlivých variant jsou 450 mm, 550 mm a 650 mm. Maximální nosnost je ve všech provedeních 6 kilogramů. Na horním ramenu se obdobně jako u již zmíněných SCARA robotů nachází I/O panel s mnoha konektory. Uživatel může využít čtyři nezávislé pneumatické linky a také 10 napájecích a datových vodičů pro připojení periferních zařízení. Technické parametry robotu jsou uvedeny v tabulce 1.



Obr. 15: ABB IRB 910SC (provedení s dosahem 450 mm) [27].

Robot je řízen kontrolérem IRC5 Compact, který má v sobě mimo jiné integrovanou pokročilou technologii *SafeMove 2* zajišťující maximální bezpečnost pracovníků [28]. Technologie *SafeMove 2* v kombinaci s vhodnými senzory umožňuje průmyslovým robotům od firmy ABB pracovat do jisté míry kolaborativně tím, že nahrazuje fyzické zábrany virtuálními bariérami a neustále monitoruje, zda se v pracovním prostoru robotu nenachází obsluha. V případě detekce porušení bariéry upraví řídicí systém parametry pohybu robotu tak, aby nemohlo dojít ke kolizi.

### 3.3.4 Stäubli TS2-40

Švýcarská firma Stäubli disponuje dlouholetou průmyslovou praxí v oblastech textilního průmyslu, eklektických i tekutinových konektorů a robotiky [29]. Vývojem robotů typu SCARA se firma začala zabývat v roce 2002 po akvizici robotických aktivit od společnosti Bosch-Rexroth.

SCARA roboty Stäubli vynikají zejména velmi vysokou odolností své konstrukce, rychlostí a přesností [20]. Již ve standardním provedení jsou roboty zcela zapouzdřeny a disponují stupněm krytí IP34. Další značnou výhodou je, že jsou všechny vodiče a pneumatické linky vedeny robotem interně. Stäubli nabízí ve své produktové řadě mimo jiné také roboty splňující přísná kritéria pro použití v čistých prostorách farmaceutických podniků a variantu pro použití ve vlhkém nebo hygienickém prostředí.



Obr. 16: Stäubli TS2-40 (ve standardním provedení) [20].

Robot TS2-40, viz obrázek 16, má horizontální dosah 460 mm a maximální nosnost 8,4 kg [20]. Pod krytem na horním ramenu je dostupných 10 konfigurovatelných I/O linek, 3 pneumatické koncovky a jeden průmyslový konektor DIN M12 pro připojení kamery, senzorů apod. Robot lze dále rozšířit o volitelné příslušenství – například automatický výměník nástrojů. Řízení je zajištěno energeticky úsporným kontrolérem CS9, který na všech osách robotu umožňuje rekuperaci energie při každé deceleraci pohybu [30]. Díky modulární architektuře kontroléru a velkému množství rozšiřujících modulů je možné jej nakonfigurovat přesně pro potřeby dané aplikace.

### 3.3.5 EPSON GX8B-452S

Jak již bylo výše uvedeno, firma Epson nabízí velmi široké spektrum robotů SCARA. Součástí tohoto spektra jsou zmíněné nízkonákladové roboty ze série T-B. Aby nedošlo ke vzniku představy, že SCARA roboty Epson jsou určeny pouze pro nenáročné aplikace, bude zde představen další zástupce.

Robot GX8B-452S, viz obrázek 17, byl vybrán z výkonnostní série GX, která byla oznámena v roce 2022 [31]. Jedná se o robot určený pro velmi náročné aplikace, a kromě standardní varianty je dostupný také v provedeních pro citlivá prostředí (varianta pro čisté prostory, ESD<sup>1</sup> provedení a další). Roboty GX jsou na rozdíl od ostatních dostupných řad vybaveny také výkonnějšími pohony a technologií GYROPLUS pro redukci vibrací. Tato kombinace umožňuje robotům řady GX dosahovat vysokých rychlostí a krátkých cyklů.



Obr. 17: Epson GX8B-452S [31].

Robot GX8B-452S má maximální horizontální dosah 450 mm a jeho nosnost je 8 kg [31]. Podobně jako u zmíněného robotu TS2-40 je kabeláž u řady GX vedena uvnitř konstrukce robotu. I/O panel na druhém ramenu se skládá ze čtyř pneumatických linek a tří datových a napájecích konektorů (DE-9, DA-15 a RJ45) pro připojení periferií. Řízení robotu je realizováno kontrolérem RC700E, který v sobě zahrnuje technologii *SafeSense* zvyšující bezpečí pracovníků [32]. Ke kontroléru je navíc bezplatně dodáván vývojový software Epson RC+.

---

<sup>1</sup> Electrostatic discharge (ESD) provedení robotu brání vzniku elektrostatických výbojů. Jejich nasazení je vhodné zejména při manipulaci s deskami plošných spojů, elektronickými součástkami apod.

### 3.3.6 Technické specifikace zmíněných SCARA robotů

V tabulce 1 jsou uvedeny parametry zmíněných SCARA robotů. Jednotlivé osy robotu jsou v tabulce označeny  $J_1$  až  $J_4$ , kde  $J_1$  je osa na začátku kinematického řetězce a  $J_4$  je osa nacházející se na konci KŘ.

Z hlediska opakovatelnosti, nosnosti, doby cyklu a odolnosti vůči nepříznivému prostředí jsou vhodnou volbou roboty Stäubli TS2-40 a Epson GX8B-452S. Oproti ostatním zmíněným robotům mají větší rozsah pohybu v první ose – v případě TS2-40 celých  $360^\circ$ . To je umožněno zejména absencí externí kabeláže, která je obvykle u robotů SCARA vedena ze zadní části báze na horní rameno.

Tab. 1: Technické parametry průmyslových SCARA robotů [20, 22, 25, 27, 31].

Parametr	Epson T3-B401S	FANUC SR-3iA	ABB IRB 910SC	Stäubli TS2-40	Epson GX8-B452S
Dosah v rovině X-Y	400 mm	400 mm	450 mm	460 mm	450 mm
Dosah v ose Z	150 mm	200 mm	180 mm	200 mm	200 mm
Maximální nosnost	3 kg	3 kg	6 kg	8,4 kg	8 kg
Opakovatelnost X-Y	$\pm 0,02$ mm	$\pm 0,01$ mm	$\pm 0,015$ mm	$\pm 0,01$ mm	$\pm 0,015$ mm
Opakovatelnost Z	$\pm 0,02$ mm	$\pm 0,01$ mm	$\pm 0,01$ mm	$\pm 0,004$ mm	$\pm 0,01$ mm
Opakovatelnost $J_4$	$\pm 0,02^\circ$	$\pm 0,004^\circ$	$\pm 0,005^\circ$	$\pm 0,002^\circ$	$\pm 0,005^\circ$
Max. rychlost $J_1$	3700 mm/s <sup>1</sup>	720 °/s	415 °/s	550 °/s	7450 mm/s <sup>1</sup>
Max. rychlost $J_2$		780 °/s	659 °/s	720 °/s	
Max. rychlost $J_3$	1000 mm/s	1800 mm/s	1000 mm/s	2500 mm/s	2350 mm/s
Max. rychlost $J_4$	2600 °/s	3000 °/s	2400 °/s	2500 °/s	2800 °/s
Rozsah osy $J_1$	$264^\circ$	$284^\circ$	$280^\circ$	$360^\circ$	$304^\circ$
Rozsah osy $J_2$	$282^\circ$	$290^\circ$	$300^\circ$	$283^\circ$	$295^\circ$
Rozsah osy $J_3$	150 mm	200 mm	180 mm	200 mm	200 mm
Rozsah osy $J_4$	$720^\circ$	$1440^\circ$	$800^\circ$	$1000^\circ$	$720^\circ$
Doba cyklu <sup>2</sup>	0,52 s	0,33 s	0,37 s	0,25 s	0,28 s
Maximální přítláčná síla $J_3$	83 N	150 N	250 N	– <sup>3</sup>	150 N
Hmotnost robotu	14 kg	19 kg	24,5 kg	38 kg	33 kg
Maximální moment setrvačnosti osy $J_4$	$0,01 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$0,06 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$0,1 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$	$0,16 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$
stupeň krytí IP <sup>4</sup>	– <sup>3</sup>	IP20	IP20	IP34	IP20
Dutý hřídel osy $J_3$	ano	ano	ano	ano	ano
Kontrolér	integrováný	R-30iB C Plus	IRC5 Compact	CS9	RC700E

<sup>1</sup> V technickém listu je uvedena pouze maximální rychlost koncového bodu robotu v rovině X-Y.

<sup>2</sup> Doba cyklu odpovídá celkové době trvání referenčního obloukového pohybu s výrobcem stanovenou zátěží, který je složen ze tří částí – 25 mm dlouhého vertikálního posuvu na začátku a konci cyklu spolu s 300 mm dlouhým horizontálním pohybem uprostřed.

<sup>3</sup> V technickém listu není tento údaj uveden.

<sup>4</sup> Stupeň krytí základního provedení robotu.

Naopak zdánlivě nejhůře se jeví dle technických parametrů robot T3-B401S od firmy Epson. Je však nutné zmínit, že se jedná o robot ze zcela jiné cenové kategorie, který představuje kompletní řešení včetně zabudovaného kontroléru. Jeho parametry jsou navíc pro většinu manipulačních operací stále více než dostačující. Tento robot je vhodný zejména do malých a středních podniků, které zvažují automatizaci svých výrobních procesů.

### 3.4 Neprůmyslová řešení SCARA robotů

Kromě průmyslových SCARA robotů se lze setkat také s neprůmyslovými řešeními pro použití například v laboratoři, dílně nebo ve vzdělávání. Návrhem těchto robotů se mimo komerčních společností zabývají také výzkumné skupiny na některých technických vysokých školách – příklady lze najít v [33] a [34]. Obvyklým cílem univerzitních prototypů je hledat nová řešení, která by ještě zvýšila dostupnost nebo technickou úroveň SCARA robotů.

V současné době se lze setkat také s velkým počtem zájemců o robotiku, kteří ve volném čase vytváří své vlastní roboty. Obvykle je jejich konstrukce založena na technologii 3D tisku, která je nyní dostupnější než kdy dříve. Tvůrci pak na internetu často sdílí své pokroky a výsledky. Bohužel jen velmi zřídka lze k těmto amatérským robotům dohledat technické informace.

#### 3.4.1 IGUS drylin® SCARA robot 4 DOF

Společnost Igus se zabývá výrobou a vývojem sofistikovaných polymerů pro pohybové aplikace [35]. Z těchto materiálů poté firma vyrábí různé produkty – od kluzných ložisek až po celé roboty. Příkladem může být robot drylin® SCARA robot 4DOF, viz obr. 18.



Obr. 18: Igus drylin® SCARA robot 4DOF [36].

Robot drylin® SCARA 4DOF má horizontální dosah 560 mm a maximální nosnost 2 kg [36]. Konstrukce robotu je z velké části tvořena zmíněnými pohybovými polymery s pokročilými tribologickými vlastnostmi, které robotu zajišťují dlouhou mechanickou životnost. Výrobce uvedené opakovatelnost robotu je  $\pm 0,5$  mm.

Je vhodný zejména pro nenáročné aplikace typu pick-and-place nebo edukační účely [36]. K robotu není v základu dodáván kontrolér. Ten je třeba k robotu dokoupit. Programování pohybu je realizováno pomocí bezplatného a velmi intuitivního softwaru *Igus® Robot Control*. Technické parametry robotu jsou uvedeny v tabulce 2.

Tab. 2: Technické parametry robotu Igus drylin® SCARA 4DOF [36].

Parametr	Igus drylin® SCARA
Dosah v rovině X-Y	560 mm
Dosah v ose Z	500 mm
Maximální nosnost	2 kg
Opakovatelnost X-Y	$\pm 0,5$ mm
Opakovatelnost Z	$\pm 0,5$ mm
Max. rychlost koncového bodu	1,0 m/s
Hmotnost robotu	20,3 kg
stupeň krytí IP	IP45
Kontrolér	RL-IRC-SJ

### 3.4.2 FUM SCARA

Jedná se o prototyp SCARA robotu, viz obr. 19, který vznikl na technické univerzitě v Íránu [33]. Hlavním cílem studentů, kteří se podíleli na jeho vývoji, bylo vytvořit edukační robot průmyslové úrovně při zachování nízké ceny konstrukce. Řídicí systém robotu byl navržen tak, aby byl otevřený a flexibilní, protože má robot dále sloužit jako nástroj pro další výzkum v oblasti pokročilých řídicích algoritmů. Z tab. 3 níže lze vidět, že se robot technickými parametry skutečně blíží průmyslovému.



Obr. 19: FUM SCARA robot [33].

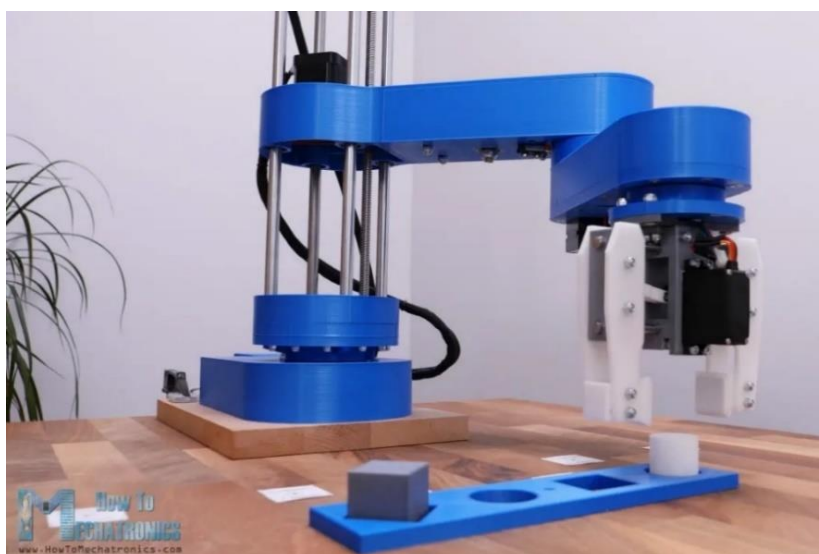


Tab. 3: Technické parametry robotu FUM SCARA [33].

Parametr	FUM SCARA
Dosah v rovině X-Y	700 mm
Dosah v ose Z	190 mm
Maximální nosnost	6 kg
Opakovatelnost X-Y	$\pm 0,013$ mm
Opakovatelnost Z	$\pm 0,023$ mm
Opakovatelnost J4	$\pm 0,016^\circ$
Max. rychlost v rovině X-Y (J1+J2)	8500 mm/s
Max. rychlost J3	1100 mm/s
Max. rychlost J4	1100 °/s
Rozsah osy J1	220°
Rozsah osy J2	260°
Rozsah osy J3	190 mm
Rozsah osy J4	není omezeno

### 3.4.3 HowToMechatronics SCARA robot

Dejan Nedelkovski je tvůrce populárně-naučných technických videí na internetové platformě *YouTube*, na které je známý hlavně pod přezdívkou *HowToMechatronics* [37]. Ve své tvorbě se zaměřuje primárně na naučná videa z oblasti elektrotechniky a robotiky.



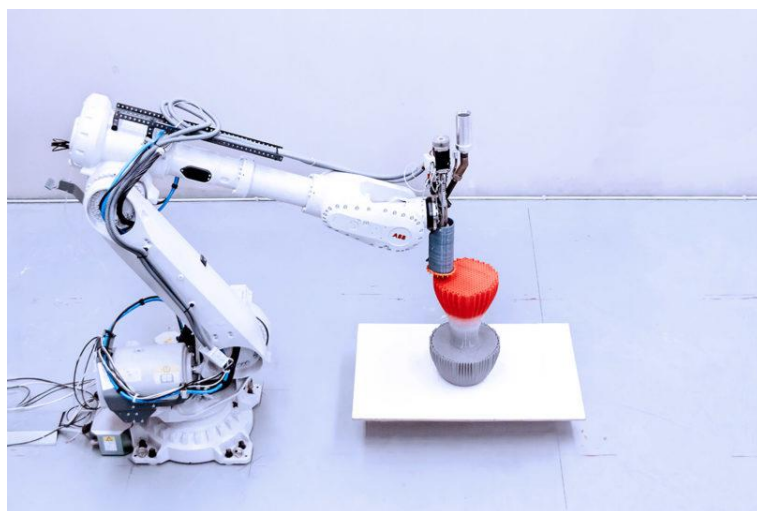
Obr. 20: SCARA robot tvůrce HowToMechatronics [37].

V roce 2020 bylo na platformě *YouTube* tímto tvůrcem zveřejněno video, ve kterém popisuje postup tvorby malého edukačního SCARA robotu s horizontálním dosahem 360 mm [37], viz obr. 20. Převažující výrobní technologií je 3D tisk, který je v současné době velmi rozšířený. Pohon jednotlivých os robotu je realizován cenově dostupnými krokovými motory NEMA17 v kombinaci se synchronními řemenovými převody.

V uvedeném videu je mimo jiné také zjednodušeně popsána kinematika SCARA robotu a tvorba řídicího programu [37]. Jako řídicí mikrokontrolér bylo zvoleno Arduino UNO, které je mezi tvůrci velmi oblíbené. Praktické využití robotu je omezeno nízkou tuhostí konstrukce a také skutečností, že k robotu nejsou dostupné téměř žádné technické parametry.

### 3.5 Koncové efekty

Kinematický řetězec průmyslových robotů je zakončen koncovým efektem (výstupní hlavici). Z hlediska konstrukce je rozdělit na technologické, manipulační (také nazývané jako chapadla nebo též grippery), kombinované a speciální [3]. Typ použitého efektoru vždy závisí na charakteru práce, kterou má robot vykonávat. Technologické efekty mohou být například hlavice pro obloukové a bodové svařování nebo hlavice určené pro aplikaci nátěrových hmot. Do této kategorie lze dále zařadit efekty s obráběcím nástrojem, laserem nebo tryskou pro 3D tisk [38], viz obrázek 21.



Obr. 21: Průmyslový robot ABB vybavený efektem pro 3D tisk polymerů [39].

Kombinované koncové efekty obvykle plní zároveň funkci technologické a manipulační výstupní hlavice [3]. Speciální koncové efekty jsou určeny pro konkrétní účely dané aplikace a nelze je přímo zařadit do žádné ze zmíněných kategorií. Speciální efekty jsou často také vybaveny odpovídajícími senzory.

SCARA roboty vynikají zejména v manipulačních operacích typu pick-and-place (česky „uchop a polož“), proto jsou nejčastěji vybaveny manipulačními úchopnými prvky (chapadly) [13]. Nejedná se však o pravidlo – u SCARA robotů se lze také setkat s technologickými efekty, viz obr. 22. Manipulační výstupní hlavice lze podle charakteru styku s objektem rozdělit na mechanické, magnetické a podtlakové [3].



Obr. 22: SCARA robot vybavený efektořem pro montáž šroubů [40].

### 3.5.1 Mechanické úchopné prvky

Mechanické úchopné prvky mohou být dále děleny na aktivní nebo pasivní [3]. Pasivní mechanický efektor nemůže sám o sobě ovládat úchop předmětu – k uchopení (popř. uvolnění) předmětu je třeba vnějšího silového působení. Přestože jsou obvykle jednodušší a levnější než aktivní mechanická chapadla, nejsou v průmyslu natolik rozšířeny [41]. Aktivní chapadla jsou tvořena dvěma nebo více pohyblivými čelistmi, jejichž pohyb je ovládán pomocí motoru (elektrického, pneumatického...) [3]. Podle toho, zda je pohyb čelistí rotační nebo posuvný, se aktivní chapadla dále dělí na angulární a paralelní [42], viz obrázek 23.

Paralelní chapadla jsou vzhledem ke svému univerzálnímu použití vhodnou volbou pro většinu manipulačních operací [43]. Společnou vlastností těchto chapadel je, že jejich čelisti zůstávají během pohybu vždy kolmé vůči tělu efektoru. Angulární chapadla kladou díky otočnému pohybu čelistí menší nároky na volný prostor v okolí uchopovaného předmětu než paralelní chapadla.



Obr. 23: Příklad dvoučelist'ových pneumatických chapadel firmy SMC (vlevo paralelní [44], vpravo angulární [45]).

V průmyslu se lze nejčastěji setkat s mechanickými chapadly pneumatickými, které umožňují poměrně snadné nastavení síly a rychlosti uchopení objektu [42]. Hydraulické mechanické efekty nachází využití zejména při manipulaci s velmi hmotnými objekty, kde je nezbytná vysoká úchopná síla v řádech kN. Manipulační mechanické efekty s elektrickým pohonem jsou zase vhodné v případě aplikací, které vyžadují přesné řízení síly nebo rychlosti úchopu.

### 3.5.2 Magnetické úchopné prvky

Pasivní magnetické výstupní hlavice jsou tvořeny permanentními magnety a uplatnění nacházejí při manipulaci s menšími feromagnetickými objekty [3]. Jejich hlavní výhodou je jednoduchá konstrukce, která však musí být doplněna o přídatný mechanismus, jenž zajišťuje oddělení objektů držených magnetickými silami. Problematické je také nasazení těchto pasivních efektorů v prostředí s vysokou teplotou, protože permanentní magnety ztrácejí od určité teploty své magnetické vlastnosti [43].

Aktivní magnetické efekty využívají k manipulaci s feromagnetickými předměty elektromagnety [3], viz obrázek 24. Výhodou je, že k uvolnění obvykle není třeba další mechanismus. V některých případech může však nastat, že samotné vypnutí elektromagnetu není dostatečné, protože dojde k částečnému zmagnetování uchopených objektů. Tento jev se nazývá remanentní magnetismus a jeho odstranění je možné krátkodobou změnou polarity proudu protékajícího cívkou elektromagnetu.



Obr. 24: Elektromagnetická výstupní hlavice firmy SCHUNK [46].

### 3.5.3 Podtlakové úchopné prvky

Stejně jako předchozí typy výstupních hlavice je lze rozdělit na pasivní a aktivní. Pasivní podtlakové efekty jsou průmyslovou obdobou běžně dostupných deformačních přísavek [3]. K vytvoření podtlaku dochází při uchopení změnou objemu vzduchu mezi přísavkou a objektem. Úchopná síla je závislá na tvaru, tuhosti a ploše přísavky, která je v kontaktu s předmětem. Pasivní přísavky mají nízkou hmotnost, jsou konstrukčně velmi

jednoduché a cenově dostupné díky absenci aktivních prvků [47]. Tyto výhody jsou však kompenzovány komplikovaným řízením úchopu a uvolnění předmětu. Lze je bezpečně použít pouze pro manipulaci s hladkými materiály, jenž zajišťují vysokou těsnost styku – například tabule plechu, skleněné objekty, hladké obklady apod. [3] Příklad pasivní podtlakové přísavky je na obrázku 25.



Obr. 25: Pasivní podtlaková přísavka [47].

Aktivní podtlaková výstupní hlavice vyžaduje k zajištění své funkce vakuovou vývěvu nebo ejektor [3], viz obrázek 26. Vývěvou lze vytvářet vysoké podtlaky a je pomocí ní obvykle obsluhováno více výstupních hlavice. Ejektor je založen na Venturiho principu a k vytvoření podtlaku využívá stlačený vzduch [42]. Na rozdíl od vývěvy nevyžaduje ejektor zdroj elektrické energie.



Obr. 26: Vlevo – vakuová vývěva firmy Rocker [48],  
vpravo – pneumatické ejektory firmy SMC [49].

Ejektory jsou v porovnání s vakuovými vývěvami cenově výrazně dostupnější, jednodušší a kompaktnější, proto výrobci úchopných prvků v některých případech integrují ejektor přímo do konstrukce úchopné hlavice [3], viz obrázek 27. Nevýhodou ejektorů je poměrně vysoká spotřeba stlačeného vzduchu. Ovládání úchopu a uvolnění objektů je u aktivních pneumatických chapadel jednodušší než v případě pasivních přísavek [47].

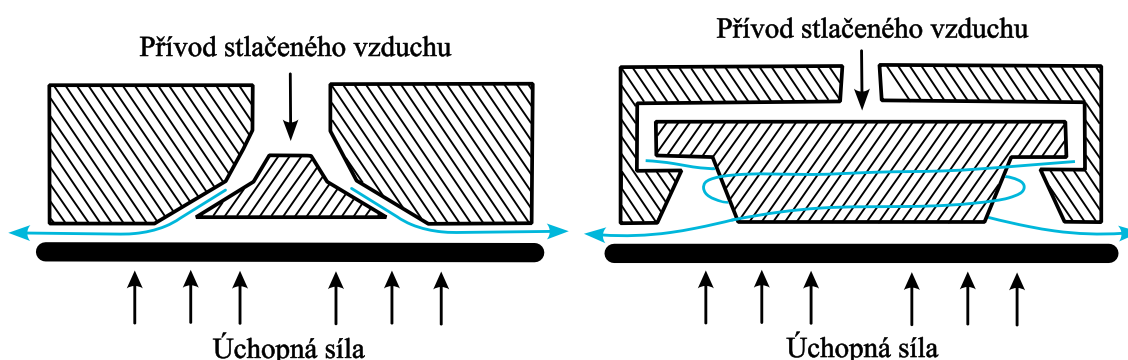


Obr. 27: Přísavka s integrovaným ejektorem firmy SMC [50].

### 3.5.4 Bezkontaktní úchopné prvky

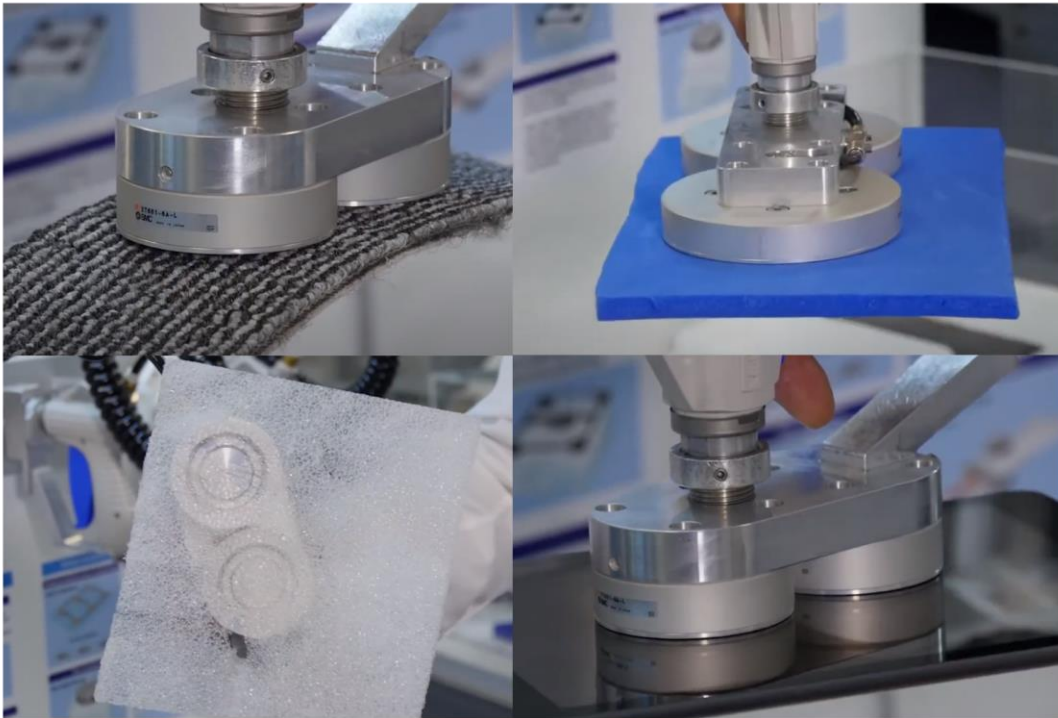
Jedná se o speciální výstupní hlavice, které umožňují manipulovat s objekty, aniž by došlo ke styku s úchopným prvkem. Úchopná síla bezkontaktního chapadla vzniká na základě rozdílu tlaku vzduchu okolního prostředí a tlaku v oblasti mezi efektoem a manipulovaným objektem [51]. Mezi výstupní hlavicí a uchopeným předmětem je poté udržována konstantní vzduchová mezera, díky které nedojde k jejich mechanickému kontaktu.

Do této kategorie lze zařadit vířivé (cyklónové) bezkontaktní efektoery a efektoery založené na Bernoulliho principu [53], viz obr. 28. Nejedná se o jediné konstrukce bezkontaktního efektoeru, ale s těmito se lze setkat nejčastěji. Příklad další možné konstrukce bezkontaktního chapadla je dostupný v [52]. U vířivého efektoeru dochází ke vzniku vzduchové cyklóny [51]. V centru víru se poté vytváří podtlak, který zajišťuje uchopení předmětu. Chapadlo založené na Bernoulliho principu funguje obdobným způsobem jako již zmíněné vířivé, stlačený vzduch je však vyfukován několika tryskami radiálním směrem a nedochází k tvorbě vzduchového víru.



Obr. 28: Schémata bezkontaktních koncových efektoerů, vytvořeno na základě informací v [53] (vlevo typ založený na Bernoulliho principu, vpravo cyklónový typ).

Bezkontaktní koncové efektory jsou zejména vhodné pro práci s tenkými (papír, folie, textil, desky plošných spojů apod.) [51] a velmi křehkými předměty (solární články, křemíkové destičky) [53]. Kromě již zmíněného umožňují také manipulaci s porézními materiály. Důležitou vlastností těchto chapadel je, že nedochází ke znečištění uchopeného objektu, což je nezbytné v například u zmíněných solárních článků, kde by kontaminace povrchu mohla způsobit značné komplikace [52]. Na obrázku 29 jsou zobrazeny možné aplikace bezkontaktních efektorů.



Obr. 29: Příklady aplikací bezkontaktních efektorů firmy SMC [54].





## 4 Návrh robotu AI.SCARA – mechanická část

Cílem praktické části této práce bylo navrhnout a sestavit ekonomicky dostupný robot typu SCARA, který bude disponovat přijatelnou tuhostí a opakovatelností pohybů. Aby bylo možné těchto parametrů dosáhnout, bylo nejprve třeba navrhnout vhodnou mechanickou konstrukci. Pro dodržení stanoveného rozpočtu byla zvolena konstrukce z hliníkových obrobků a 3D tištěných dílů. Všechny kovové komponenty byly navíc navrženy tak, aby bylo možné je obrobit na konvenčních obráběcích strojích bez numerického řízení. Výsledný návrh mechanické konstrukce je možné vidět na obr. 30.



Obr. 30: Konečný návrh SCARA robotu a řídicího kontroléru.

### 4.1 Autodesk Fusion 360

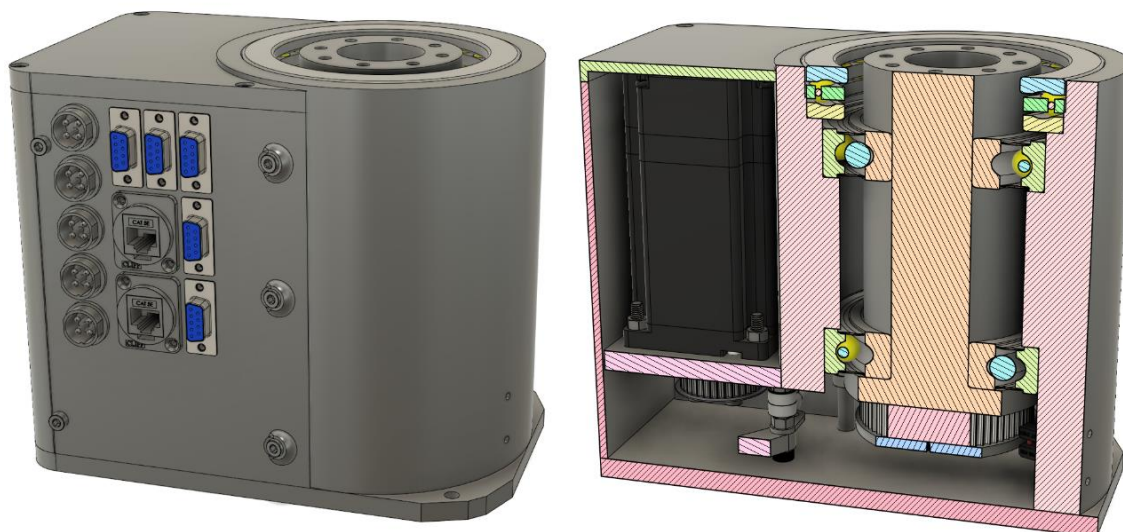
Pro tvorbu mechanického návrhu byl zvolen program *Fusion 360* od společnosti Autodesk. Jedná se o pokročilý software, který v sobě zahrnuje kromě velkého množství nástrojů pro CAD (*computer-aided design*) také funkce pro CAM (*computer-aided manufacturing*), CAE (*computer-aided engineering*) a tvorbu elektronických desek plošných spojů [55]. Mezi všemi těmito nástroji lze v rámci softwaru plynule přecházet. Díky tomu je možné hned po návrhu podrobit daný díl mechanické analýze a následně v CAM modulu vytvořit kód pro numericky řízený obráběcí stroj.

*Fusion 360* je cloudový software [55]. Veškerá data – kupříkladu navržené díly, výsledky analýz, galerie vykreslených obrázků apod. jsou uloženy na cloudovém úložišti. Kromě toho lze také některé náročné operace (zmiňované mechanické výpočty, rendering (vykreslování) dílů a sestav apod.) přenechat cloudovým výpočetním serverům firmy Autodesk, což znatelně zvyšuje produktivitu, jelikož uživatel může v čase, kdy probíhá cloudové zpracování požadavku bez omezení pokračovat v práci.

## 4.2 Proces návrhu mechanické konstrukce

Proces návrhu robotu probíhal v několika iteracích. Během tohoto procesu bylo vytvořeno mnoho návrhů, z nichž některé byly vyřazeny okamžitě u báze, jiné byly shledány jako nevyhovující až v pozdějších fázích návrhu. Příklad jedné z mnoha konstrukcí báze, která byla vyřazena, je možné vidět na obrázku 31.

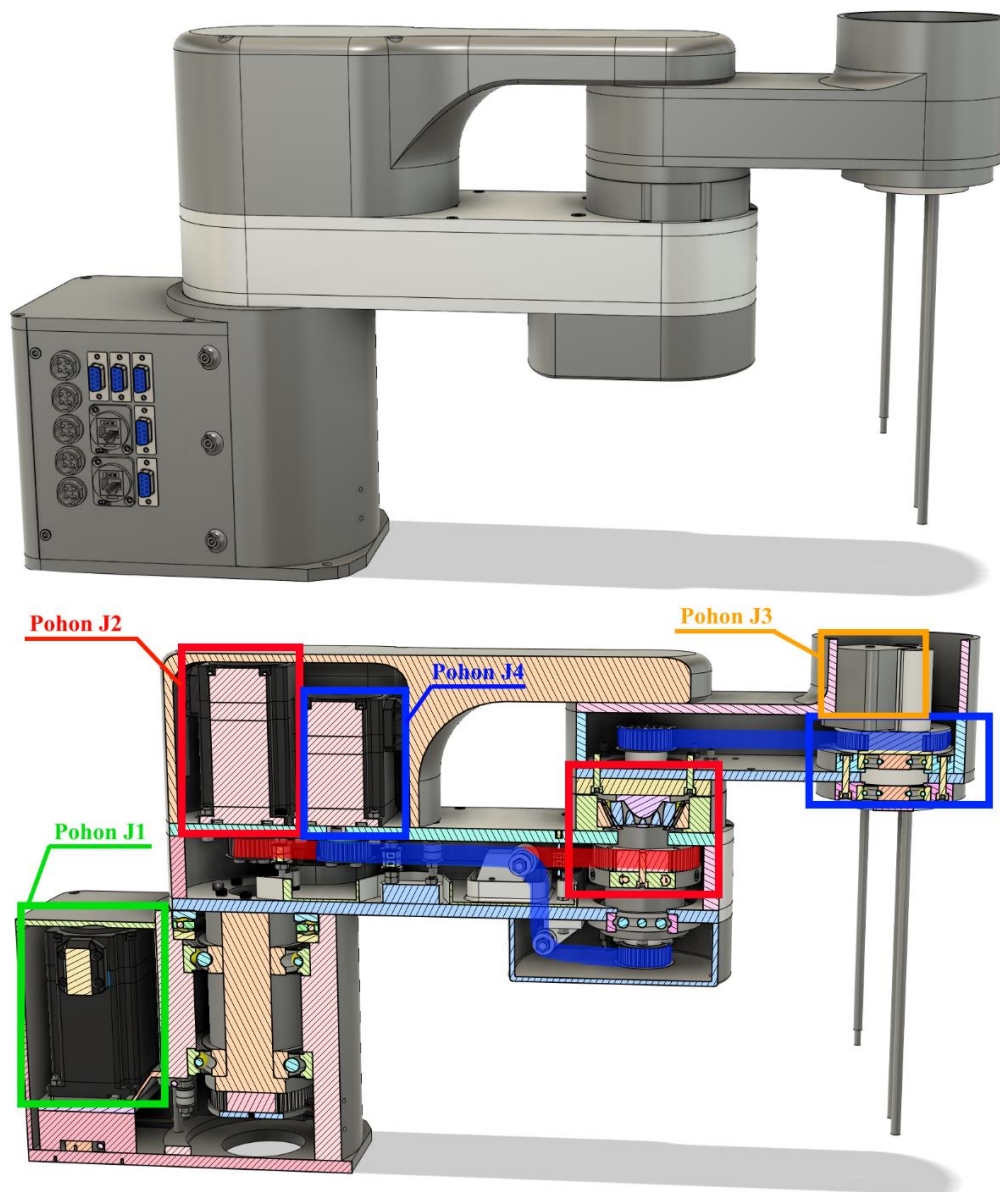
Záměrem návrhu báze na obrázku 31 bylo snížit náklady použitím synchronního řemenového převodu místo převodovky pro dosažení požadovaného kroutícího momentu na hřídeli osy  $J_1$  [56]. To se však projevilo jako nevhodné. Ozubené řemeny jsou při působení zátěže lehce poddajné. Moment setrvačnosti celého robotického ramene v kombinaci s pružností ozubeného řemene by mohl vést k nežádoucím překmitům. Pro zachování přesnosti polohování by bylo třeba navíc řemen udržovat pod neustálým napětím pomocí napínacího mechanismu. Nevhodnost této báze byla odhalena až v pozdějších fázích návrhu, proto ji bude možné spatřit i na obrázku 32.



Obr. 31: Původní návrh báze robotu.

Návrh robotu dále pokračoval tvorbou prvního a druhého ramene. Zde byla snaha přiblížit hmotné pohony co nejbližší ke stacionární bázi robotu a kroutící moment přenášet k rotačním kinematickým dvojícím opět pomocí synchronních řemenových převodů. V tomto případě lze ozubené řemeny již považovat za vhodný konstrukční prvek, jelikož zátěže os  $J_2$  a  $J_4$  jsou podstatně menší než v případě osy  $J_1$ .

Původní návrh uvažoval, že budou pohony os  $J_2$  a  $J_4$  uloženy přímo nad bází, viz obr. 32 dole. To by vedlo k významnému snížení momentu setrvačnosti celé konstrukce, avšak za cenu značně komplikovaného přenosu točivého momentu k ose  $J_4$ , který je na obrázku 32 znázorněn modře. Přestože jsou komplikované řemenové převody v průmyslové robotice často využívány [57], byl nakonec tento návrh také vyřazen, jelikož značně zvyšoval mechanickou komplexnost konstrukce.



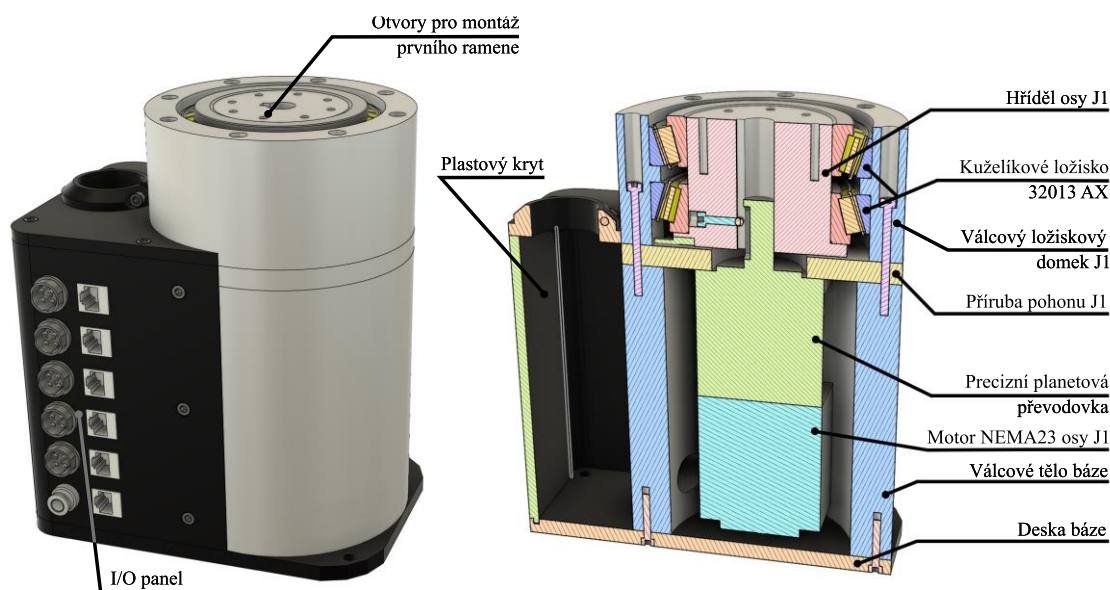
Obr. 32: Původní návrh SCARA robotu včetně znázorněných pozic pohonů.

Ačkoliv se může výše předložený návrh mechanické konstrukce robotu jevit jako nevydařený, z hlediska vývoje byl zcela klíčový. Díky cenným poznatkům získaným při jeho tvorbě mohla být navržena finální iterace konstrukce, která již neobsahovala zmíněné nedostatky. Popis finálního návrhu, na základě kterého byl robot posléze zrealizován, bude proveden v následující kapitole.

## 4.3 Konečný návrh mechanické konstrukce

### 4.3.1 Báze robotu

Na obrázku 33 lze vidět finální návrh báze robotu, včetně označení hlavních součástí. Deska báze poskytuje tuhý základ, který nese hmotnost celého robotu. Byla zhotovena z běžně dostupné konstrukční oceli a její montáž k upínacímu povrchu je uskutečněna čtyřmi otvory o průměru 6 mm, jejichž rozteč je 100 mm x 150 mm. Na základní desku je pomocí osmi šroubů M4x25 upevněno válcové tělo báze. Polotovarem této součásti byla trubka z hliníkové slitiny o vnějším průměru 130 mm a šířce stěny 15 mm.



Obr. 33: Konečný návrh báze SCARA robotu.

Ve vnitřním prostoru těla báze je uložen krokový motor NEMA23 s precizní planetovou převodovkou. Pohon je k bázi připevněn prostřednictvím hliníkové příruby. Výstupní hřídel precizní planetové převodovky je uložen v přesně vystruženém otvoru uvnitř hřídele osy  $J_1$ .

Hřídel osy  $J_1$  má na horní ploše osm otvorů se závitem M4, které slouží k připojení prvního ramene robotu, viz obrázek 33 vlevo. Zatěžující síly a momenty působící na tento hřídel zachycuje dvojice kuželíkových ložisek typu 32013 AX. Použití těchto ložisek je vhodné zejména proto, že umožňují současně přenášet jak radiální, tak i axiální zatížení [56]. Vnější kroužky kuželíkových ložisek jsou nalisovány hydraulickým lisem do přesně vysoustruženého otvoru v ložiskovém domku.

Součástí báze je také 3D tištěný kryt s I/O panelem, který poskytuje prostor pro rozvod kabeláže. Na panelu je dostupných šest konektorů RJ45, pět čtyřpólových konektorů GX16 a jedna pneumatická spojka pro připojení zdroje stlačeného vzduchu. Kompletní seznam použitých dílů a spojovacího materiálu je v tabulkách 4 a 5.

Tab. 4: Seznam součástí použitých na bázi SCARA robotu.

Název součásti	Materiál	Počet (ks)
Deska báze	Konstrukční ocel S235JR	1
Válcové tělo báze	EN AW 6060	1
Příruba pohonu J1	EN AW 6082	1
Válcový ložiskový domek	EN AW 6082	1
Hřídel osy J1	EN AW 6082	1
Horní část plastového krytu báze	PETG <sup>1</sup>	1
Přední část krytu báze s I/O panelem	PETG	1
Zadní část plastového krytu báze	PETG	1
Držák koncového spínače J1	PETG	1
Koncový doraz J1	PETG	1
Kuželíkové ložisko 32013 AX	– <sup>2</sup>	2
Precizní planetová převodovka	–	1
Krokový motor NEMA23 osy J1	–	1
Optický koncový spínač TCST2103	–	1
Konektor čtyřpólový GX16	–	5
Konektor ABB RJ45	–	6
Pneumatická spojka 6 mm panelová	–	1
Trubka ohebná 32 mm – 0,6 m	–	1

Tab. 5: Seznam spojovacího materiálu použitého na bázi SCARA robotu.

Spojovací materiál <sup>3</sup>	Počet (ks)		
Šroub M5 x 20	4	Šroub M4 x 12	6
Šroub M4 x 50	8	Šroub M4 x 10	2
Šroub M4 x 25	8	Šroub M3 x 15	2
Šroub M4 x 20	5	Matice M5 – pojistná	4
Šroub M4 x 15	7	Matice M4	7
		Matice M3	2

### 4.3.2 První rameno robotu

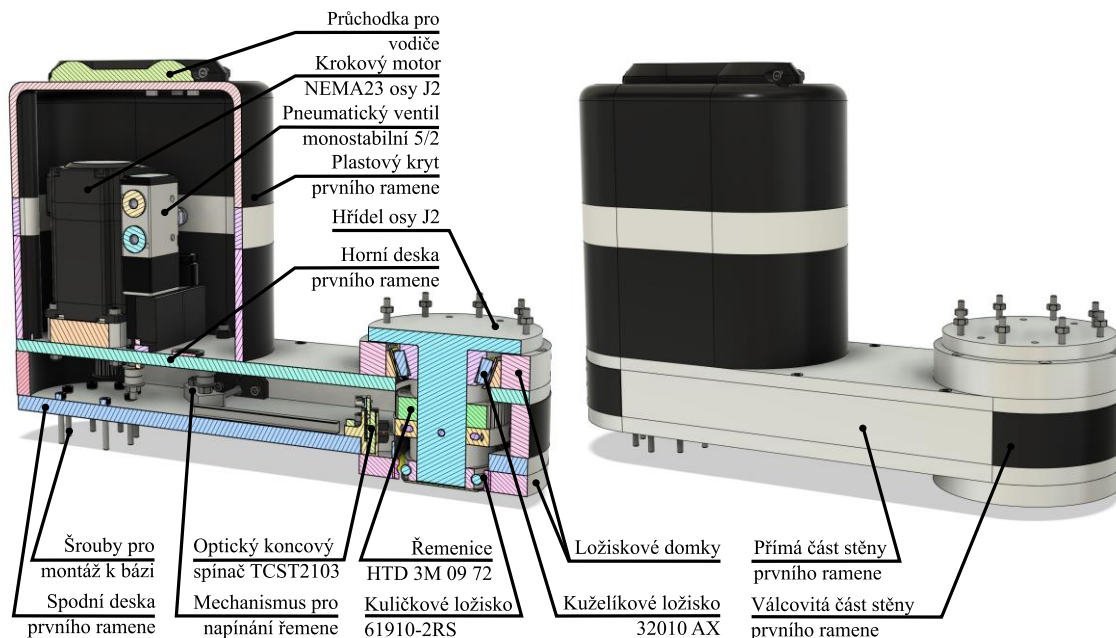
Na hřídel osy J<sub>1</sub>, jenž je uložen v bázi robotu navazuje první rameno. Finální návrh tohoto ramene včetně popisu částí lze vidět na obrázku 34. Základ této sestavy tvoří spodní a horní deska ramene mezi kterými je stěna složená z několika segmentů. Na rozdíl od původního návrhu, viz kapitola 4.2, je na horní desce ramene nyní uložen pouze jeden pohon, ze kterého je kroutící moment přenášen jednoduchým řemenovým převodem k hřídeli osy J<sub>2</sub>. Řemen je udržován pod stálým napětím pomocí napínacího mechanismu. Kompletní seznam součástí a spojovacího materiálu je uveden v tabulkách 6 a 7.

<sup>1</sup> PETG je běžně používaný materiál v technologii 3D tisku. Jedná se o materiál chemicky příbuzný široce rozšířenému polymeru PET.

<sup>2</sup> Materiál součástí není znám, nebo je součást tvořena kombinací různých materiálů.

<sup>3</sup> Všechny šrouby zmíněné v této a následujících tabulkách jsou uvažovány s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem, není-li uvedeno jinak. Všechny uvedené matice jsou šestihranné, není-li uvedeno jinak.

Pohon a veškerá elektronika prvního ramene je opět chráněna 3D tištěným krytem. Pod tímto krytem se mimo jiné nachází také pneumatický ventil 5/2, kterým může být později ovládáno například pneumatické chapadlo. Aby bylo možné po inicializaci nalézt referenční hodnotu natočení jednotlivých os, jsou všechny osy robotu vybaveny koncovými spínači. V případě osy  $J_2$  se jedná o optický koncový spínač TCST2103.



Obr. 34: Konečný návrh prvního ramene SCARA robotu.

Hřídel osy  $J_2$  je uložen ve dvou ložiscích. Horním ložiskem je kuželkové ložisko 32010 AX. Ve spodní části se nachází ložisko 61910-2RS, které patří do kategorie kuličkových ložisek s hlubokou drážkou [58]. Tato ložiska umožňují díky hlubokému profilu drážky přenášet taktéž axiální zatížení. Díky skutečnosti, že jsou obě použité ložiska schopna přenášet axiální zatížení, je možné realizovat jejich předpětí. Předpětím ložisek je možné vymezit vůle a také snížit naklopení hřídele v ložiscích [56].

Tab. 6: Seznam spojovacího materiálu použitého na prvním ramenu SCARA robotu.

Spojovací materiál	Počet (ks)	Spojovací materiál	Počet (ks)
Šroub M5 x 30	3	Šroub M4 x 20	4
Šroub M5 x 18	1	Šroub M4 x 18	28
Šroub M4 x 80	3	Šroub M4 x 15	30
Šroub M4 x 35	4	Šroub M4 x 12	2
Šroub M4 x 30	8	Matice M5	3
Šroub M4 x 25	4	Matice M5 – pojistná	4
Šroub M4 x 22	3	Matice M4	9
		Matice M4 – pojistná	5

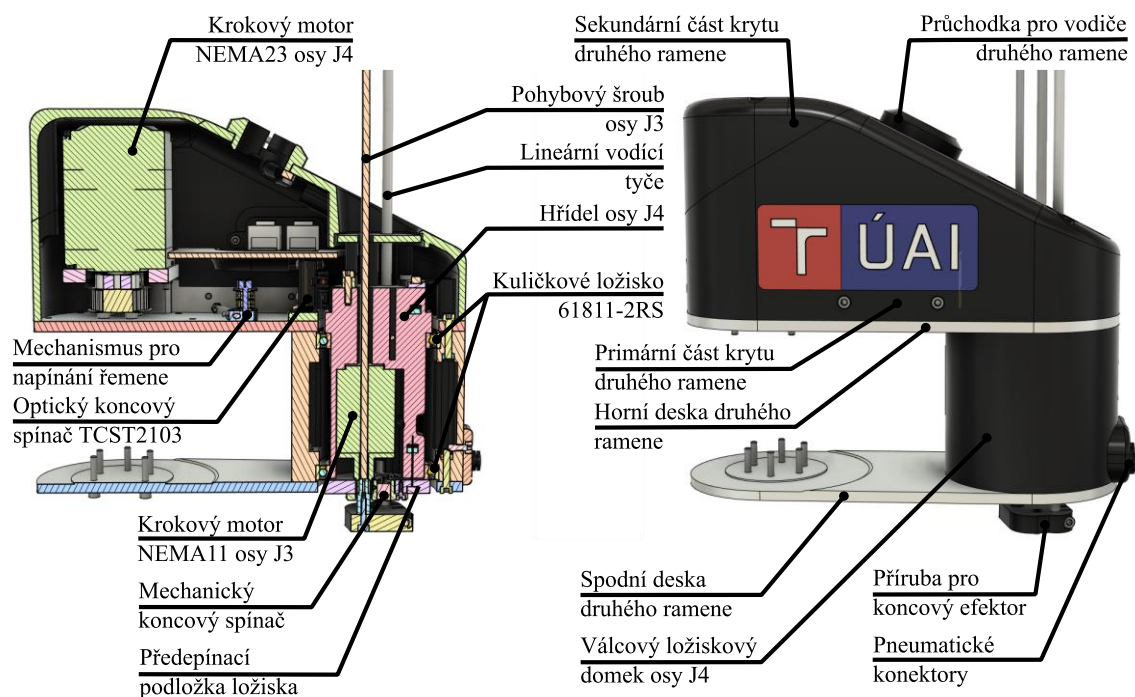
Tab. 7: Seznam součástí použitých na prvním ramenu SCARA robotu.

Název součásti	Materiál	Počet (ks)
Spodní deska prvního ramene	EN AW 6063	1
Horní deska prvního ramene	EN AW 6063	1
Příruba pohonu J2	EN AW 6063	1
Hřídel osy J2	EN AW 6082	1
Spodní ložiskový domek	EN AW 6082	1
Horní ložiskový domek	EN AW 6082	1
Přímá část stěny prvního ramene	EN AW 6060	2
Držák napínací kladky J2	EN AW 6060	1
Příruba řemenice HTD 3M 09 72	EN AW 6082	1
Koncový doraz J2	PETG	1
Držák koncového spínače J2	PETG	1
Držák napínacího mechanismu J2	PETG	1
Držák pneumatického ventilu	PETG	1
Válcovitá část stěny prvního ramene	PETG	2
Horní část krytu prvního ramene	PETG	1
Prostřední část krytu prvního ramene	PETG	1
Spodní část krytu prvního ramene	PETG	1
Podložka ložiska 638/5-2Z	PETG	6
Průchodka pro vodiče	PETG	1
Příruba GoBilda Sonic Hub 8mm	–	2
Pneumatický ventil monostabilní 5/2	–	1
Řemen HTD 3M 09 645	–	1
Řemenice HTD 3M 09 18	–	1
Řemenice HTD 3M 09 72	–	1
Optický koncový spínač TCST2103	–	1
Kuličkové ložisko 61910-2RS	–	1
Kuželíkové ložisko 32010 AX	–	1
Kuličkové ložisko 638/5-2Z	–	6
Krokový motor NEMA23 osy J2	–	1

### 4.3.3 Druhé rameno robotu

Na hřídel osy  $J_2$  je pomocí dvou čelních přírub upevněno druhé rameno SCARA robotu. To je podobně jako první rameno tvořeno dvěma základními kovovými deskami, na které jsou poté upevněny další komponenty. Druhé rameno, viz obrázek 35, je nejvíce komplexním celkem mechanické konstrukce, jelikož současně vykonává dva nezávislé pohyby – translační pohyb polohovacího ústrojí (osa  $J_3$ ) a rotační pohyb orientačního ústrojí (osa  $J_4$ ). Většina komponent druhého ramene byla pro úsporu hmotnosti vytvořena technologií 3D tisku, jelikož takto vyrobené díly mají nižší hmotnost než ekvivalentní díly ze slitiny hliníku.

Pohon lineárního posuvu ( $J_3$ ) je integrován do hřídele osy  $J_4$ . Tento tvarově rozmanitý hřídel je uložen ve dvou kuličkových ložiscích 61811-2RS a následně předepnut pomocí podložky. Do hřídele  $J_4$  jsou nalisována čtyři kuličková ložiska LM6UU, která zajišťují plynulý pohyb vodičích tyčí, ke kterým je na dolních koncích upevněna příruba pro koncový efektor. Tyto tyče samy o sobě nejsou schopné vykonávat řízený pohyb. Pro tento účel je k přírubě efektoru upevněn konec pohybového šroubu, jehož lineární pohyb je odvozen od rotace krokového motoru osy  $J_3$ .



Obr. 35: Konečný návrh druhého ramene SCARA robotu.

Kryt druhého ramene je rozdělen do dvou částí – primární část zakrývá většinu komponent a kabeláže ramene, sekundární část naopak kryje pouze pohon čtvrté osy a umožňuje k němu snadnější přístup. Z hlediska konektivity jsou na druhém ramenu dva konektory RJ45 pro připojení případných periférií a dvě pneumatické spojky pro připojení stlačeného vzduchu ke koncovému efektoru. Kompletní seznam použitých komponent je uveden v tabulkách 8 a 9.

Tab. 8: Seznam spojovacího materiálu použitého na druhém ramenu SCARA robotu.

Spojovací materiál	Počet (ks)
Šroub M5 x 18	1
Šroub M4 x 35	4
Šroub M4 x 30	4
Šroub M4 x 25	6
Šroub M4 x 22	20
Šroub M4 x 20	26
Šroub M4 x 15	7

Šroub M4 x 14	3
Šroub M4 x 10	6
Šroub M3 x 30	1
Šroub M3 x 14	2
Šroub M3 x 8	5
Matice M4	35
Matice M4 – pojistná	1
Matice M3	4

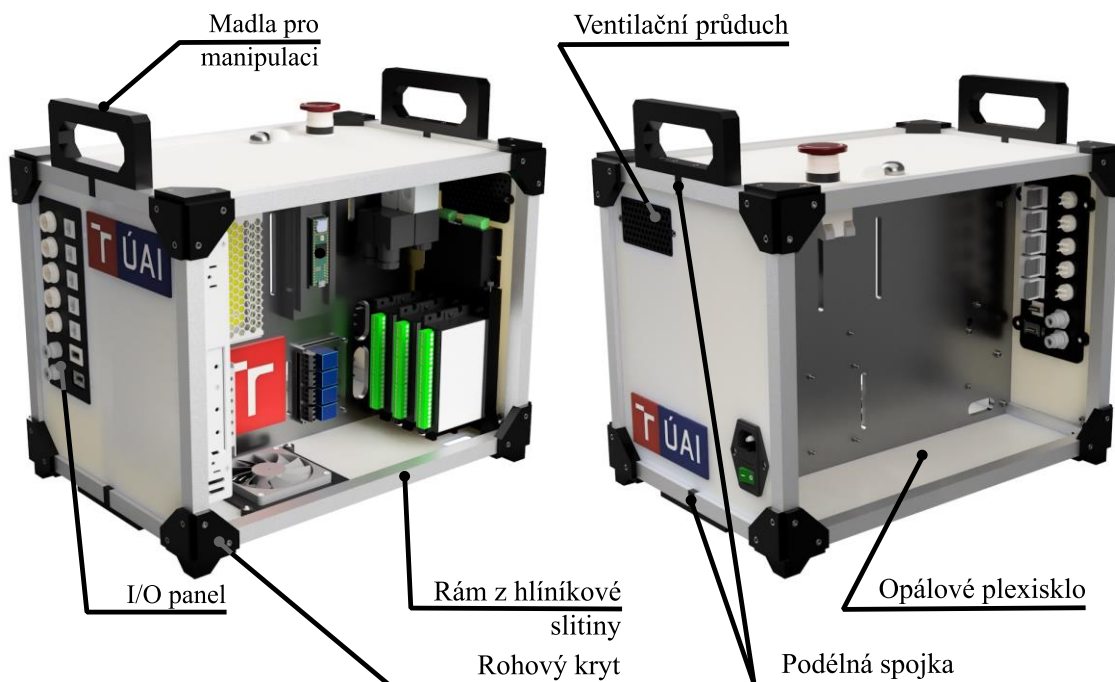


Tab. 9: Seznam součástí použitých na druhém ramenu SCARA robotu.

Název součásti	Materiál	Počet (ks)
Spodní deska druhého ramene	EN AW 6063	1
Horní deska druhého ramene	EN AW 6063	1
Příruba pohonu J4	EN AW 6082	1
Distanční stěna pohonu J4	EN AW 6082	2
Výztuž horní desky druhého ramene	EN AW 6082	2
Držák napínací kladky J4	EN AW 6060	1
Primární část krytu druhého ramene	PETG	1
Sekundární část krytu druhého ramene	PETG	1
Válcový ložiskový domek osy J4	PETG	1
Hřídel osy J4	PETG	1
Podložka ložiska	PETG	1
Koncový doraz J4	PETG	1
Držák koncového spínače J3	PETG	1
Držák koncového spínače J4	PETG	1
Podložka ložiska 638/5-2Z	PETG	2
Logo ÚAI – bílá část (nápis)	PETG	1
Logo ÚAI – červená část	PLA	1
Logo ÚAI – modrá část	PLA	1
Distanční sloupek pod pohon J3	PETG	1
Držák pneumatických rychlospojek	PETG	1
Držák konektorů RJ45	PETG	1
Kryt konektorů RJ45	PETG	1
Průchodka pro vodiče druhého ramene	PETG	1
Kryt ozubeného řemene	PETG	1
Kryt hřídele J4	PETG	1
Kryt horního konce vodících tyčí	PETG	1
Příruba koncového efektoru	PETG	1
Příruba GoBilda Sonic Hub 8mm	–	1
Řemen HTD 3M 09 447	–	1
Řemenice HTD 3M 09 36	–	1
Optický koncový spínač TCST2103	–	1
Mechanický koncový mikrospínač	–	1
Kuličkové ložisko 61811-2RS	–	2
Kuličkové ložisko 638/5-2Z	–	2
Kuličkové ložisko lineární LM6UU	–	4
Krokový motor NEMA11 osy J3	–	1
Krokový motor NEMA23 osy J4	–	1
Pohybový šroub osy J3	–	1
Lineární vodící tyč	–	2
Konektor ABB RJ45	–	2
Pneumatická spojka 6 mm – rohová	–	2
Trubka ohebná 32 mm – 0,6 m	–	1

#### 4.3.4 Mechanický návrh kontroléru

Rám kontroléru je tvořen několika hliníkovými tyčemi dutého čtvercového průřezu, které jsou v rozích pevně spojeny 3D tištěnými spojkami. Stěny kontroléru jsou realizovány deskami z 4 mm širokého plexiskla opálové barvy (s výjimkou přední stěny, která je průhledná). Pro snadnou manipulaci s kontrolérem jsou na horní části rámu dvě tištěná madla.



Obr. 36: Kontrolér SCARA robotu včetně popisu mechanických komponent (vlevo – přední komora, vpravo – zadní komora).

Vnitřní prostor kontroléru je rozdělen do dvou oddělených částí – přední a zadní komory, viz obrázek 36. Jelikož je obsah přední komory viditelný, byla navržena tak, aby působila čistým a organizovaným dojmem bez přítomnosti rušivé kabeláže. Propojení jednotlivých komponent je uskutečněno v prostoru zadní komory. Seznam komponent je uveden v tabulkách 10 a 11.

Tab. 10: Seznam spojovacího materiálu použitého na kontroléru SCARA robotu.

Spojovací materiál	Počet (ks)
Šroub M4 x 20	4
Šroub M4 x 16	4
Šroub M4 x 15	8
Šroub M4 x 12	1
Šroub M4 x 8	8

Šroub M4 x 6	2
Šroub M3 x 14	3
Šroub M3 x 12	46
Šroub M3 x 8	54
Matice M4	19
Matice M3	100

Tab. 11: Seznam součástí použitých na kontroléru SCARA robotu.

Název součásti	Materiál	Počet (ks)
Čtvercová tyč 15x15x1,5 mm – 350 mm	EN AW 6060	4
Čtvercová tyč 15x15x1,5 mm – 250 mm	EN AW 6060	4
Čtvercová tyč 15x15x1,5 mm – 110 mm	EN AW 6060	8
Opálové plexisklo 350x230x4 mm	PMMA <sup>1</sup>	2
Opálové plexisklo 250x230x4 mm	PMMA	2
Opálové plexisklo 350x250x4 mm	PMMA	1
Opálové plexisklo 362x267x6 mm	PMMA	1
Transparentní plexisklo 350x250x4 mm	PMMA	1
Spojka rohová	PETG	8
Spojka podélná	PETG	4
Kryt rohový	PETG	20
Rohový kryt s nohami	PETG	4
Manipulační madla	PETG	2
Kryt podélný	PETG	2
Držák ventilátoru	PETG	1
Ventilační průduch	PETG	2
I/O panel	PETG	1
Držák ovladačů pohonů	PETG	1
Držák zdroje LRS-350-36	PETG	1
Držák zdroje S-25-5	PETG	1
Držák reléové desky	PETG	1
Držák pneumatických ventilů	PETG	1
Logo VUT velké – bílá část	PETG	1
Logo ÚAI – bílá část (nápis)	PETG	2
Logo VUT velké – červená část	PLA	1
Logo ÚAI – červená část	PLA	2
Logo ÚAI – modrá část	PLA	2
Logo společnosti Nidec	PLA	1
Napájecí IEC konektor	–	1
Tlačítko nouzového zastavení	–	1
Reléová deska	–	1
Ovladač CL57T-V41	–	1
Ovladač DM320T	–	1
Miniaturní kompresor	–	2
Pneumatický ventil monostabilní 2/2	–	2
Napájecí zdroj LRS-350-36	–	1
Napájecí zdroj LRS-100-12	–	1
Napájecí zdroj RS-25-5	–	1
Mikrokontrolér PJRC Teensy 4.1	–	1

<sup>1</sup> PMMA – polymethylmethakrylát, polymer pod obchodním názvem známý též jako plexisklo.

Tab. 11: Pokračování – seznam součástí použitých na kontroléru SCARA robotu.

Mikrokontrolér Arduino Nano V3.0	–	1
Rozbočovací deska pro Teensy 4.1	–	1
Rozbočovací deska pro Arduino Nano	–	1
Tlačítko PBS-33B	–	2
Konektor čtyřpólový GX16	–	5
Konektor ABB RJ45	–	5
Pneumatická spojka 6 mm panelová	–	2
Ventilátor 80x80x10 mm	–	1
USB konektor	–	2

## 5 Návrh robotu AI.SCARA – elektrotechnická část

### 5.1 Pohony

Krokové a servo motory jsou často skloňovány v oblasti automatizace, robotiky apod. Jejich princip funkce a vlastnosti jsou však zcela odlišné. Společnou vlastností těchto pohonů, kterou se liší od ostatních konstrukcí elektromotorů, je schopnost přesného řízení jejich pohybů [5].

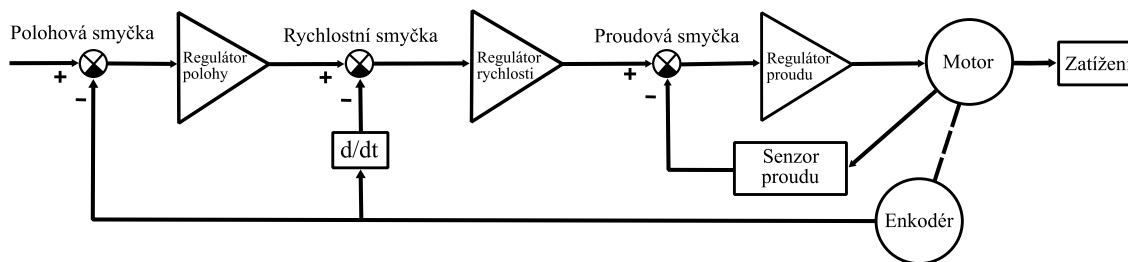
#### 5.1.1 Servomotory a krokové motory

**Servomotory** jsou motory, které umožňují přesné nastavení a následné udržení žádané hodnoty polohy, rychlosti, nebo točivého momentu [5]. Základem servopohonu je motor (střídavý asynchronní a synchronní, stejnosměrný apod.), který je však doplněn o zpětnovazební člen (nejčastěji rotační enkodér). Informace ze zpětné vazby jsou předávány řídicímu obvodu – tzv. servozesilovači, který na jejich základě provádí regulaci [59]. Tento způsob řízení se často také nazývá anglickým termínem *closed-loop control* (řízení v uzavřené smyčce). Příklad servomotoru a příslušné řídicí jednotky lze vidět na obrázku 37.



Obr. 37: Vlevo – synchronní střídavý servomotor, vpravo – řídicí jednotka servomotoru [60].

Řídicí jednotka servomotoru je sofistikovaný elektronický obvod, obvykle tvořený třemi PID regulátory v kaskádovém uspořádání [59]. Nejnižší je v kaskádové struktuře smyčka proudová, která řídí točivý moment servomotoru. Nadřazenou smyčkou je smyčka rychlostní a nejvýše se nachází smyčka polohová, viz obr. 38. Pro optimální vlastnosti řízeného pohonu je třeba vhodně nastavit parametry všech regulačních smyček.

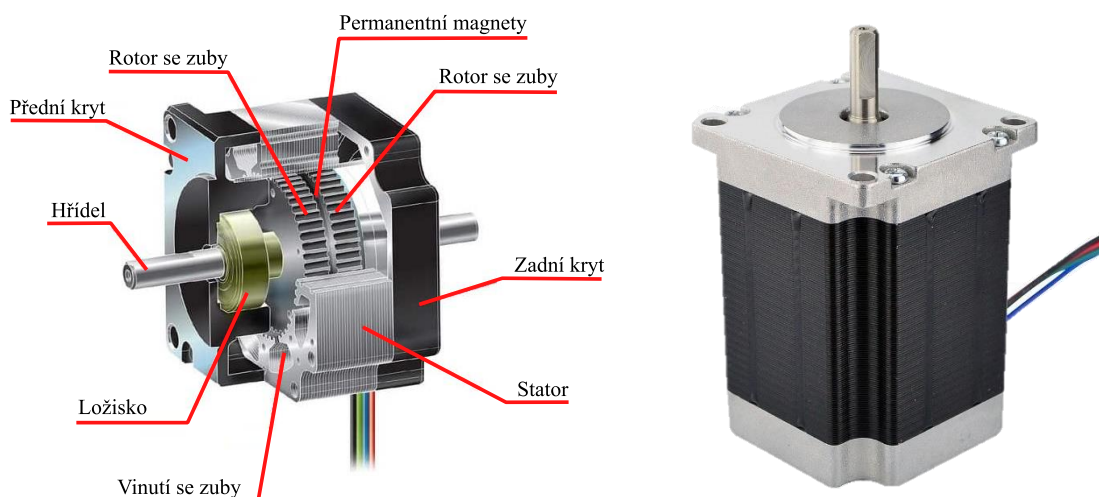


Obr. 38: Zjednodušené schéma regulačního obvodu řídicí jednotky servopohonu, vytvořeno na základě informací dostupných z [59].

Mezi hlavní výhody servomotorů patří schopnost generovat vysoký točivý moment i při vysokých otáčkách, vysoká účinnost, přesnost a přetížitelnost [61]. Pokročilá řídicí jednotka navíc umožňuje přesné nastavení nejen polohy, ale i rychlosti, nebo točivého momentu [60]. Díky tomu jsou servopohony vhodné kupříkladu pro montážní aplikace, kde je třeba ovládat sílu dotažení šroubů, sílu úchopu předmětu apod.

**Krokové motory**, viz obrázek 39, jsou stejnosměrné motory, jejichž pohyb je složen z velkého množství stejně velkých diskretních pootočení – tzv. kroků [62]. Tohoto nespojitého pohybu je docíleno speciální konstrukcí krokového motoru a řídicí elektronikou, která na základě požadovaného potočení rotoru generuje sérii proudových impulzů pro jednotlivé fáze motoru. Důležitou vlastností krokového motoru je skutečnost, že ke svému chodu nevyžaduje zpětnou vazbu o poloze. V případě přetížení krokového motoru řízeného v otevřené smyčce dojde ke ztrátě informace o poloze rotoru.

Některé pokročilejší krokové ovladače umožňují navíc řízení v uzavřené smyčce. Ke krokovému motoru je však nutné doplnit patřičný enkodér. Motor poté vykazuje lepší dynamické vlastnosti a v případě ztráty kroku lze provést korekci polohy [61].



Obr. 39: Vlevo – řez krokového motoru [63], vpravo – příklad běžně dostupného krokového motoru [60].

Krokové motory jsou charakteristické vysokým točivým momentem při nízkých otáčkách [61]. Jejich dosažitelný točivý moment však na rozdíl od servomotorů s rostoucími otáčkami výrazně klesá. Krokový motor umožňuje pouze řízení polohy, nikoliv však řízení rychlosti, nebo točivého momentu podobně jako tomu je u servomotoru. Nespojitý charakter pohybu krokového motoru navíc vede ke vzniku nežádoucích vibrací (zejména při nízkých rychlostech otáčení) [60]. Některé nevýhody krokového motoru lze částečně omezit doplněním enkodéru, přesto však nedokáže překonat přesnost a dynamické vlastnosti servomotoru. Mezi časté aplikace krokových motorů patří 3D tiskárny, nízkonákladové CNC stroje, edukační roboty apod.

Hlavní doposud neuvedenou výhodou krokových motorů je jejich velmi nízká pořizovací cena ve srovnání se stejně výkonnými servopohony [60]. Cenový rozdíl mezi těmito motory (a řídicími jednotkami) je natolik výrazný, že by dodržení stanoveného rozpočtu této práce při zvolení servopohonů bylo prakticky nemožné. Pro pohon robotu byly proto zvoleny krokové motory s enkodéry (s výjimkou lineární osy  $J_3$ ), jejichž pořizovací cena je jen lehce vyšší v porovnání s krokovými motory řízenými v otevřené smyčce.

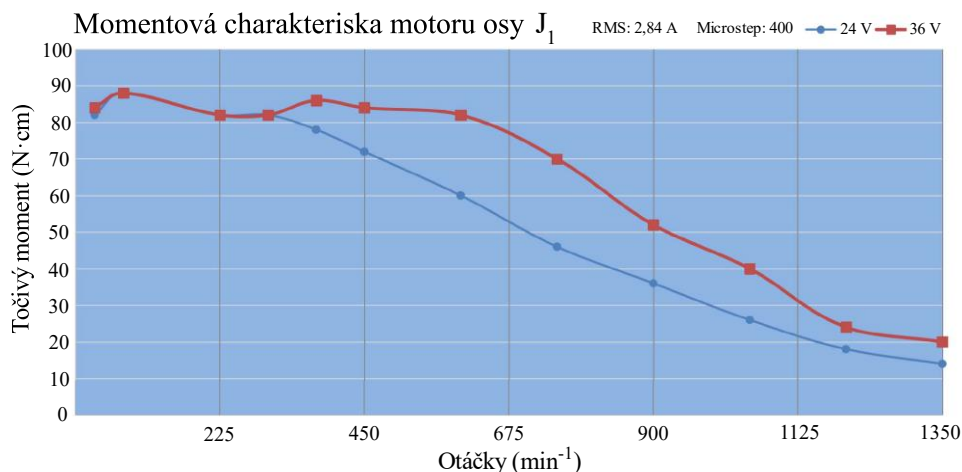
### 5.1.2 Pohony os SCARA robotu

Pro pohon osy  $J_1$  byl zvolen krokový motor NEMA23<sup>1</sup> výrobce *StepperOnline*. Kódové označení tohoto konkrétního pohonu je *23HS22-2804D-YGS50-AR4* [60]. V ceně motoru je současně zahrnut také příslušný enkodér a planetová převodovka s převodovým poměrem 50:1, viz obrázek 40 vlevo. Převodovka, která byla k motoru dodána, nakonec nebyla využita, protože při provozu vykazovala vysoké vůle v ozubení. Díky vstřícné podpoře od společnosti *Nidec Graessner* byla pro potřeby této bakalářské práce poskytnuta násobně přesnější precizní planetová převodovka VRL-070C, kterou lze vidět na obr. 40 vpravo. Pro momentovou charakteristiku krokového motoru osy  $J_1$  viz obr. 41.

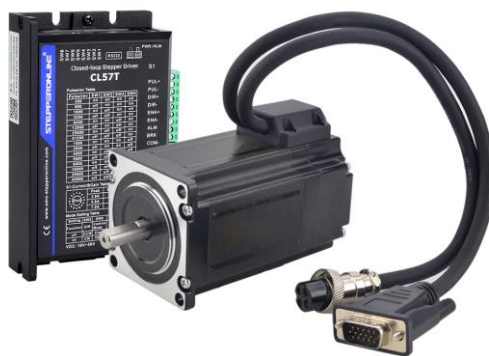
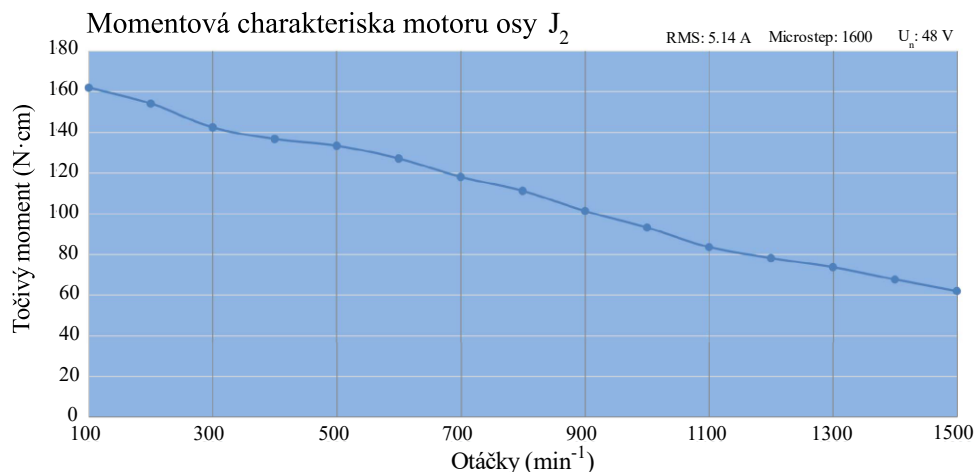


Obr. 40: Vlevo – pohon *23HS22-2804D-YGS50-AR4* [60], vpravo – precizní planetová převodovka VRL-070C [64].

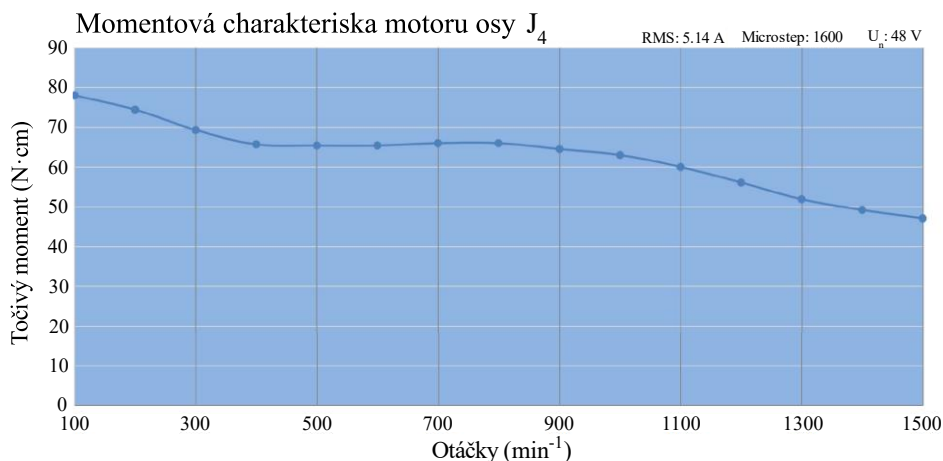
<sup>1</sup> Označení NEMA popisuje fyzické rozměry krokového motoru v palcích. Motor NEMA23 má kupříkladu rozměr montážní příruby  $58,4 \times 58,4$  mm (2,3" x 2,3").

Obr. 41: Momentová charakteristika osy  $J_1$  [60].

Pro pohon os  $J_2$  a  $J_4$  byly zvoleny pohony s označením *1-CL57T-S20-V41* (osa  $J_2$ , viz obr. 42) a *1-CL57T-S12-V41* ( $J_4$ ) od firmy *StepperOnline* [60]. Součástí dodávky těchto pohonů jsou opět také patřičné enkodéry. Pohony os  $J_2$  a  $J_4$  jsou vzájemně odlišné pouze délkou těla motoru, od které se odvíjí maximální točivý moment, jenž je motor schopen generovat – viz momentové charakteristiky na obrázcích 43 a 44. Konečného točivého momentu os  $J_2$  a  $J_4$  je dosaženo pomocí synchronních řemenových převodů. Pro další parametry pohonů os  $J_1$ ,  $J_2$  a  $J_4$  viz tabulka 12.

Obr. 42: Krokový motor *1-CL57T-S20-V41* [60].Obr. 43: Momentová charakteristika osy  $J_2$  [60].



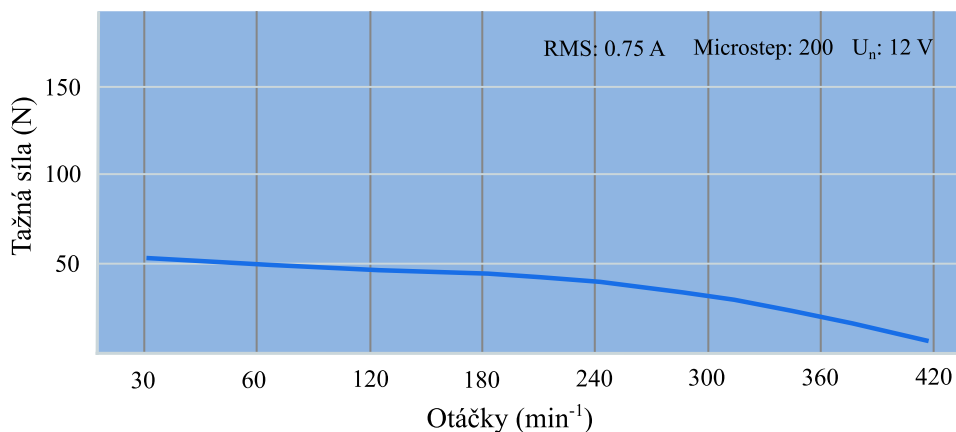
Obr. 44: Momentová charakteristika osy J<sub>4</sub> [60].

Tab. 12: Technické parametry pohonů rotačních os SCARA robotu [60].

Parametr	J1	J2	J4
Velikost motoru	NEMA23	NEMA23	NEMA23
Typ motoru	Bipolární	Bipolární	Bipolární
Přídržný moment	1 Nm	2 Nm	1,2 Nm
Proud fáze	2,8 A	5,0 A	5,0 A
Základní velikost kroku	1,8°	1,8°	1,8°
Délka těla motoru	55 mm	81 mm	101 mm
Typ enkodéru	Inkrementální	Inkrementální	Inkrementální
Rozlišení enkodéru	4000 CPR	4000 CPR	4000 CPR
Ovladač	CL57T	CL57T	CL57T
Typ převodu	Planetový	Řemenový	Řemenový
Převodový poměr	25:1	4:1	1,66:1

Lineární pohyb osy J<sub>3</sub> je zajištěn krokovým motorem NEMA11, jehož kódové označení je *11N18S0754GD-250RS*, viz obr. 45 [60]. Motor disponuje dutým rotorem s lichoběžníkovým profilem, který umožňuje transformovat rotační pohyb na translační. Pohybový šroub má délku 250 mm. Délka šroubu mechanicky omezuje maximální vertikální dosah SCARA robotu. V případě požadavku na větší rozsah lineární osy stačí pouze vyměnit pohybový šroub a vodící tyče. Krokový motor je schopen na šroub vyvinout při nízkých rychlostech sílu nejvýše 50 N, viz charakteristika na obr. 46. Další parametry pohonu jsou uvedeny v tabulce 13.

Obr. 45: Lineární krokový motor *11N18S0754GD-250RS* [60].

Obr. 46: Silová charakteristika lineární osy J<sub>3</sub> [60].Tab. 13: Technické parametry pohonu osy J<sub>3</sub> [60].

Parametr	J3
Velikost motoru	NEMA11
Typ motoru	Bipolární
Proud fáze	0,75 A
Délka těla motoru	46 mm
Základní velikost kroku	1,8°
Ovladač	DM320T
Typ převodu	Lichoběžníkový šroub a matice
Délka šroubu	250 mm
Posuv na otáčku	2,54 mm/ot
Posuv na krok	0,0127 mm/step

## 5.2 Koncové prvky pro nalezení referenčních poloh

Koncové spínače zajišťují spínání nebo rozepínání elektronických obvodů nejčastěji v krajních (koncových) polohách určitého pohyblivého mechanismu. Existuje mnoho typů koncových spínačů. Mezi nejčastěji používané patří mechanické, optické, indukční, kapacitní a magnetické (na bázi Hallova jevu) [65].

Pro detekci koncových poloh navrženého robotu byly zvoleny optické koncové spínače TCST2103 na osách J<sub>1</sub>, J<sub>2</sub> a J<sub>4</sub> a mechanický spínač v případě osy J<sub>3</sub>. Tyto spínače musí SCARA robotu zajistit dvě důležité funkce – funkci referenční a bezpečnostní.

Všechny použité enkodéry jsou inkrementální. To vede ke skutečnosti, že po vypnutí a opětovném spuštění řídicího systému robotu dojde ke ztrátě informace o poloze jednotlivých os. Referenční hodnoty os jsou poté nalezeny pomocí inicializační sekvence, při které se robot pohybuje sníženou rychlostí a čeká na sepnutí jednotlivých spínačů. Proces hledání referenční polohy se také často nazývá anglickým pojmem „*homing*“ a hraje důležitou roli například u CNC strojů, 3D tiskáren apod [66].

Koncový spínač musí robotu kromě referenční polohy zajistit taktéž mechanickou ochranu [66]. Je třeba neustále provádět kontrolu, zda robot nepřekračuje mechanické rozsahy svých os, jelikož mohou nastat případy, kdy uživatel zadá chybný pohybový příkaz, který by vedl stroj za hranice svých možností.

**Mechanický koncový spínač** je nejjednodušší a nejčastější typ koncového spínače [65]. Jeho princip je založený na mechanickém dotyku elektrických kontaktů uvnitř spínače, viz obrázek 47. Mezi výhody patří jednoduché zapojení, možnost spínání vysokých proudů (až 16 A), nízká cena a také skutečnost, že umožňuje spínat nejen stejnosměrné, ale i střídavé napětí. Jeho nevýhodou je omezená životnost, nízká frekvence spínání a nižší přesnost v porovnání s optickým spínačem.



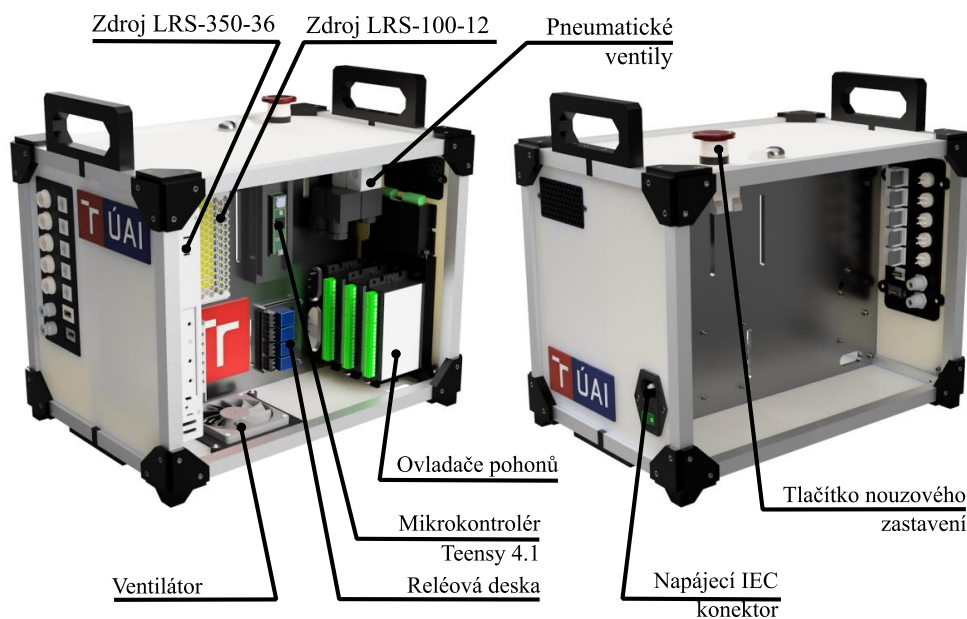
Obr. 47: Princip mechanického koncového spínače [67].

**Optický koncový spínač**, viz obr. 48, je zařízení ve tvaru „U“, které se skládá ze tří základních prvků – světelného emitoru (například LED dioda), světelného senzoru a vyhodnocovací elektroniky [65]. K sepnutí spínače dojde v okamžiku, kdy předmět přeruší světelný paprsek mezi emitorem a detektorem. Mezi výhody tohoto spínače patří vysoká přesnost a frekvence spínání, dlouhá životnost díky bezkontaktnímu principu detekce a v některých případech i nízká cena. Jeho nevýhodou je citlivost na změny okolního osvětlení. Obvykle je vhodný pouze pro spínání velmi nízkých proudů (v případě TCST2103 nejvýše 60 mA).



Obr. 48: Optický koncový spínač TCST2103 [68].

### 5.3 Elektrotechnický návrh kontroléru



Obr. 49: Kontrolér SCARA robotu včetně popisu elektronických komponent.

#### 5.3.1 Napájení

Připojení kontroléru do rozvodné sítě je realizováno pomocí standardizovaného konektoru IEC, viz obr. 50 vlevo, se kterým se lze setkat kupříkladu u napájecích zdrojů osobních počítačů. Mezi tímto konektorem a ostatními elektronickými komponenty se v elektrickém zapojení nachází tlačítko nouzového zastavení (tzv. *Emergency-stop*), které umožňuje v případě poruchy velmi rychle přerušit napájení robotu.

Pro napájení třech ovladačů CL57T je vyhrazen napájecí zdroj LRS-350-36 od společnosti MEANWELL [60]. Výstupní napětí zdroje je stejnosměrných 36 V, což je současně doporučené napájecí ovladačů CL57T. Zdroj LRS-100-12 zajišťuje napájení pneumatických ventilů, chladícího ventilátoru, ovladače DM320T a dvou miniaturních kompresorů. Napětí zdroje je 12 V a jmenovitý výkon je 102 W. Pro napájení mikrokontrolérů (Teensy 4.1 a Arduino Nano) a reléové desky byl zvolen zdroj RS-25-5, který poskytuje stabilní stejnosměrné napětí 5 V.



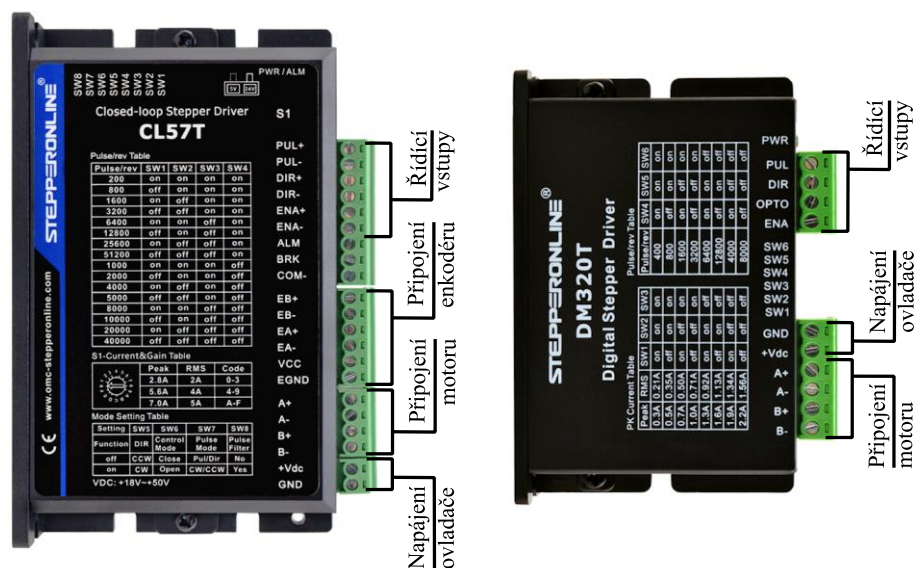
Obr. 50: Prvky napájecího ústrojí: vlevo – IEC konektor [69], uprostřed – tlačítko nouzového zastavení [69], vpravo – zdroj LRS-100-12 [60].

### 5.3.2 Ovladače krokových motorů

Jak již bylo zmíněno, řízení krokových motorů zajišťují obvody zvané ovladače. Tyto řídicí prvky mají obvykle několik vstupů a výstupů v podobě svorek, viz obr. 51, ke kterým je připojeno napájení ovladače, vinutí krokového motoru a vstupy pro řídicí signály z mikrokontroléru (případně také enkodér, brzda a další).

Za zmínku stojí zejména řídicí vstupy PUL a DIR. Na vstup PUL jsou z mikrokontroléru ve vhodné okamžiky vysílány krátké impulzy. Každý tento impulz je elektronikou ovladače okamžitě převeden na jeden krok rotoru. Vstup DIR umožňuje ovládat směr, kterým budou tyto kroky vykonány. Rychlost a zrychlení otáčivého pohybu rotoru se odvíjí od časové prodlevy mezi dvěma impulzy na svorce PUL.

Krokové ovladače standardně umožňují pouze řízení v otevřené smyčce. Příkladem open-loop ovladače může být DM320T, který byl použit pro řízení lineární osy J<sub>3</sub>. Rotační osy J<sub>1</sub>, J<sub>2</sub> a J<sub>4</sub> jsou opatřeny enkodérem. Jejich ovládání proto zajišťuje jednotka CL57T, která podporuje řízení v uzavřené smyčce.



Obr. 51: Ovladače krokových motorů včetně popisu konektorů, vlevo – CL57T [60], vpravo – DM320T [60].

### 5.3.3 Periferie

Jako periferní zařízení byly označeny komponenty, které se přímo nepodílí na chodu SCARA robotu. Do této kategorie lze zařadit pneumatické ventily, reléovou desku, miniaturní kompresory apod. Účelem dvou pneumatických 2/2 ventilů je přepínání mezi zdroji stlačeného vzduchu. V základním stavu jsou oba ventily zavřené. Po nastavení zdroje vzduchu (interního, nebo externího) v řídicím systému je příslušný ventil otevřen. V případě, že je zvolen interní zdroj stlačeného vzduchu, dojde současně k aktivaci dvou zabudovaných kompresorů. Jejich pracovní napětí je 12 V a maximální tlak, který dokážou vyvinout dosahuje pouze 1,2 bar [70]. Přesto se použití těchto kompresorů osvědčilo v nenáročných úlohách s malým pneumatickým chapadlem.

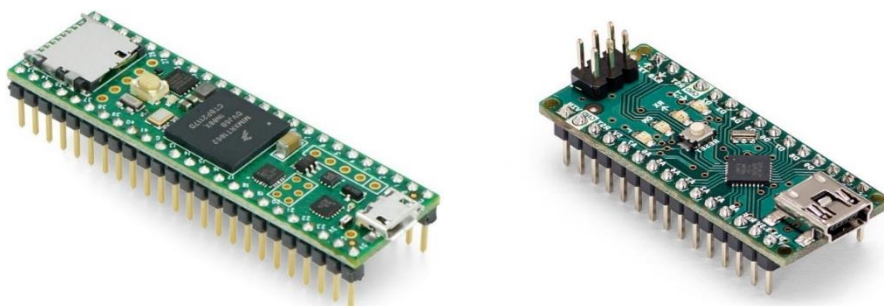
### 5.3.4 Mikrokontroléry

Z hlediska řízení robotu hrají zcela klíčovou roli mikrokontroléry. Mikrokontroléry (zkráceně MCU) jsou integrované obvody, které představují miniaturní jednodeskové počítače. Mezi základní prvky MCU patří mikroprocesor (nejčastěji 8, 16, nebo 32bitový), paměťové moduly RAM i ROM (EEPROM<sup>1</sup>) a vstupně-výstupní rozhraní pro komunikaci s periferními zařízeními (například senzory, dalšími MCU apod.) [71].

Obvykle jsou určeny pro řízení specifických činností v rámci *embedded*<sup>2</sup> systémů. Díky trendu „*smart*“ a „*IoT*“ produktů se lze s mikrokontroléry setkat téměř ve všech elektronických zařízeních. Příkladem mohou být domácí spotřebiče, řídicí jednotky automobilů, kalkulačky, tiskárny, kamery a velmi mnoho dalších.

V kontroléru SCARA robotu se nachází dva mikrokontroléry. Hlavním MCU je Teensy 4.1, viz obr. 52 vlevo, ve kterém probíhají veškeré kinematické výpočty pro pohyby robotu. Jeho jádrem je pokročilý 32bitový procesor ARM Cortex-M7 s frekvencí 600 MHz (maximální takt až 1 GHz) [72]. Teensy 4.1 nabízí 8 MB programovatelné paměti typu Flash a 1 MB paměti RAM. Uvedené parametry v kombinaci s 55 I/O linkami předurčují tento mikrokontrolér k aplikaci v rozsáhlých a komplexních projektech.

Důvodem zvolení mikrokontroléru Teensy 4.1 pro řízení pohybu robotu byla zejména jeho architektura, která je kompatibilní s uživatelsky přívětivými mikrokontroléry Arduino. Díky skutečnosti, že jsou tyto kontroléry obvykle provozovány bez operačního systému (na rozdíl od desek RaspberryPi apod.), je celý proces úpravy a nahrávání řídicího softwaru velmi jednoduchý a rychlý.



Obr. 52: Vlevo – mikrokontrolér PJRC Teensy 4.1 [72], vpravo – Arduino Nano [73].

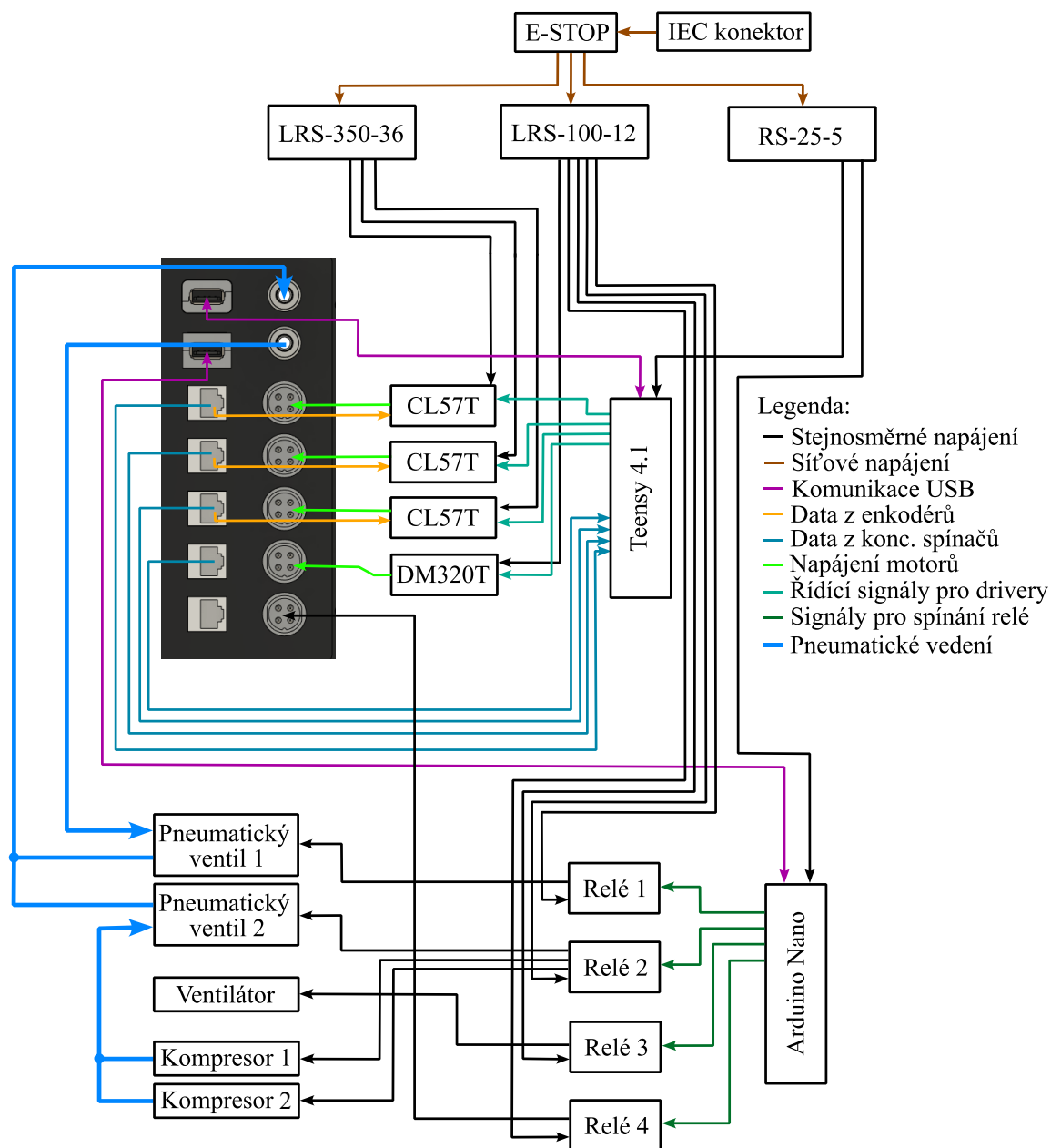
Ovládání periférií robotu zajišťuje Arduino Nano. Mezi jeho hlavní výhody patří velmi nízká pořizovací cena a kompaktní rozměry (45 x 18 mm), díky kterým je vhodný pro nejrůznější projekty [73]. Výpočty realizuje čip ATmega328p s frekvencí 16 MHz. Na desce je dostupných celkem 22 I/O linek z nichž 6 umožňuje generovat PWM výstup. Pracovní napětí MCU je 5 V a díky robustnímu napěťovému regulátoru je možné mikrokontrolér napájet v širokém rozmezí napětí (5–20 V).

<sup>1</sup> EEPROM je nevolatilní elektronická paměť. Na rozdíl od ROM je možné ji elektronicky vymazat nebo přepsat.

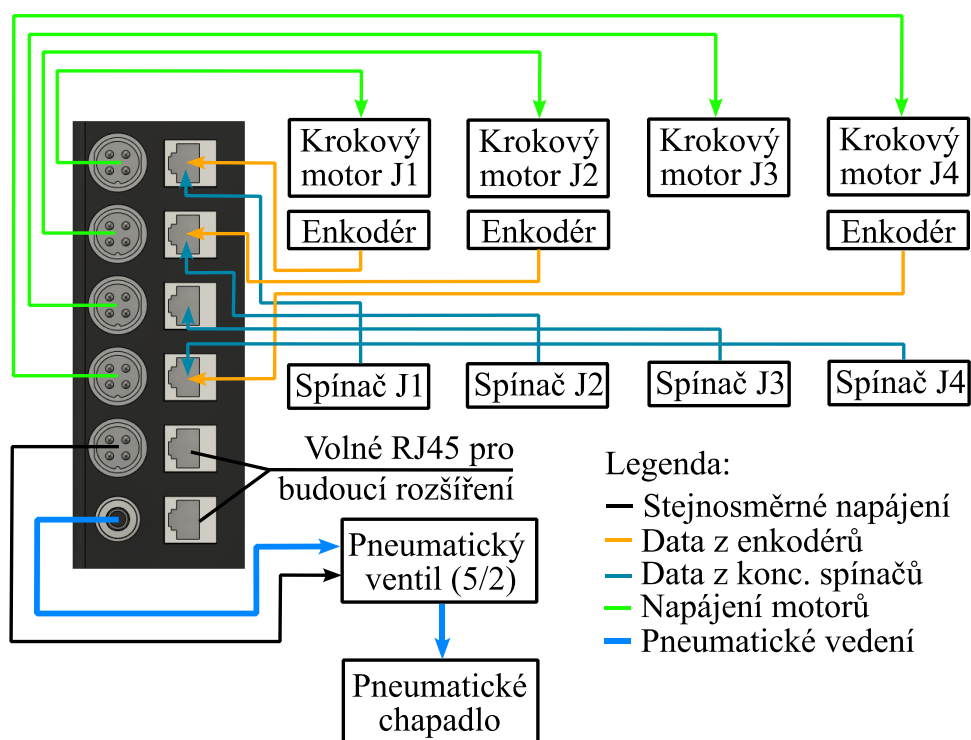
<sup>2</sup> Embedded (vestavěný) systém je tvořen kombinací hardwaru a softwaru, která je určena k plnění specifických úloh v rámci nějakého většího celku [74].

## 5.4 Schémata zapojení

Pro představu o zapojení SCARA robotu a řídicího kontroléru byly vytvořeny zjednodušené blokové diagramy, které popisují propojení jednotlivých prvků. Na obrázku 53 je zobrazeno zapojení řídicího kontroléru. Pro schéma znázorňující zapojení uvnitř robotu viz obrázek 54.



Obr. 53: Zjednodušené schéma zapojení kontroléru.



Obr. 54: Zjednodušené schéma zapojení SCARA robotu.



## 6 Návrh robotu AI.SCARA – software

Software SCARA robotu je tvořen dvěma důležitými celky – řídicím softwarem, který je spuštěn v uvnitř kontroléru a grafickým uživatelským rozhraním (GUI), které běží v rámci operačního systému osobního počítače. Mezi těmito dvěma softwarovými celky probíhá obousměrná komunikace po sběrnici USB. V rámci této kapitoly budou popsány vybrané části uživatelského rozhraní a řídicího systému robotu včetně teoretického základu.

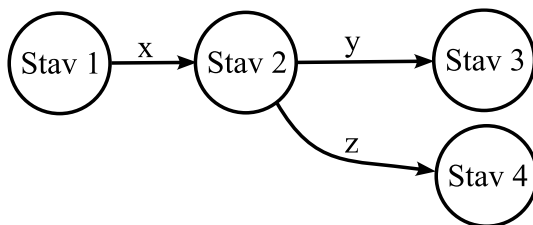
### 6.1 Řídicí systém robotu

#### 6.1.1 Jazyk Arduino

Řídicí systém robotu byl napsán v jazyce Arduino. Tento programovací jazyk je založen na široce rozšířeném C++. Vzhledem k omezeným hardwarovým zdrojům (obzvláště paměti RAM) mikrokontrolérů jsou v jazyce Arduino potlačeny některé prvky standardní knihovny C++. Arduino navíc obsahuje sadu vestavěných funkcí, které usnadňují práci s hardwarem mikrokontrolérů. Mezi výhody jazyka Arduino patří zejména jeho univerzální použití, rozsáhlá komunitní podpora, otevřenost zdrojových kódů vestavěných funkcí a v neposlední řadě jednoduchá a přímočará syntaxe jazyka C++, díky které je jazyk vhodný pro začínající i pokročilejší programátory.

#### 6.1.2 Struktura řídicího programu

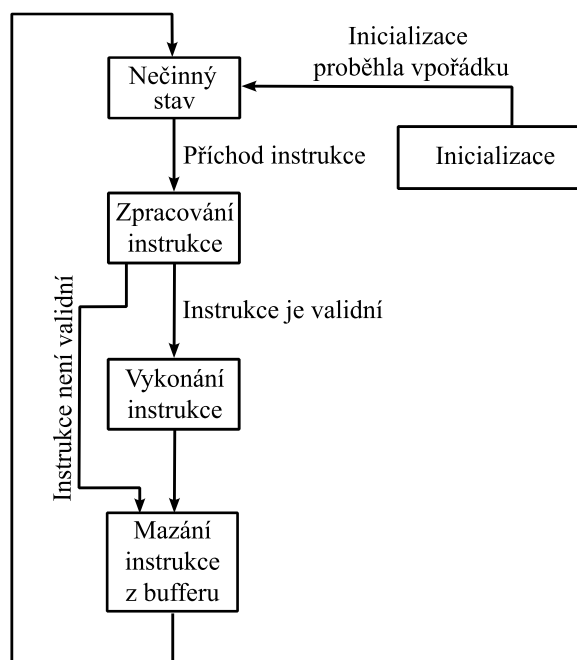
Řídicí program je strukturován do tzv. stavového (konečného) automatu [75]. Jednotlivé činnosti (například příjem instrukce, její zpracování a následné vykonání) jsou v programu rozděleny do oddělených stavů. Mezi těmito stavy nelze přecházet libovolně, ale pouze v určitém pořadí, viz obr. 55. Pro přechod mezi stavy je navíc nutno splnit podmínku přechodu. V závislosti na tom, která z podmínek byla v rámci daného stavu splněna, dojde buď přechodu do jednoho z možných navazujících stavů, nebo k setrvání v tomto stavu.



Obr. 55: Příklad stavového automatu, vytvořeno na základě [75].

Řídicí program SCARA robotu byl rozdělen do pěti hlavních bloků, viz obr. 56. Po spuštění kontroléru proběhne proces inicializace, během kterého jsou nastaveny výchozí hodnoty proměnných. V případě zdárného dokončení dojde k přechodu do nečinného stavu „idle“. V tomto stavu program setrvá až do chvíle, kdy do vyrovnávací

paměti (tzv. *bufferu*) dorazí instrukce. V následujícím stavu je instrukce přečtena a zpracována. V případě, že se jedná o systému známý typ instrukce dojde k přechodu do stavu jejího vykonání a po dokončení je instrukce z bufferu vymazána.



Obr. 56: Zjednodušené schéma stavového automatu řídicího softwaru.

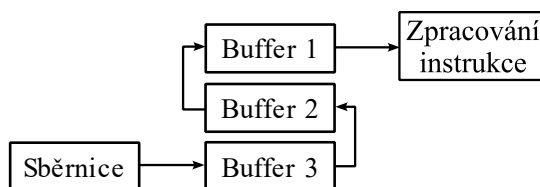
Nejrozsáhlejší částí konečného automatu je stav, ve kterém dochází k vykonávání instrukcí. Jelikož jsou jednotlivé instrukce vzájemně velmi odlišné (například pohybová instrukce robotu je zcela rozdílná od instrukce zajišťující inicializaci ovladačů motorů), je třeba k jejich řešení přistupovat individuálně.

### 6.1.3 Funkce

Mimo zmíněný stavový automat se v programu nachází mnoho nezávislých funkcí, které jsou volány při vykonávání konkrétních instrukcí. Například funkce pro analytický výpočet dopředné a inverzní kinematiky, funkce pro generování synchronizovaného pohybu os robotu apod.

**Čtení instrukce ze sběrnice** („*ProcessSerial*“) je komunikační funkce, která zajišťuje příjem instrukce. Je volána opakovaně v rámci nečinného stavu *idle*. Tělo funkce *ProcessSerial* je však vykonáno pouze při současném splnění dvou podmínek – první podmínkou je, že na sběrnici musí být dostupná data ke čtení a druhá ověřuje, zda je volné místo ve vyrovnávací paměti.

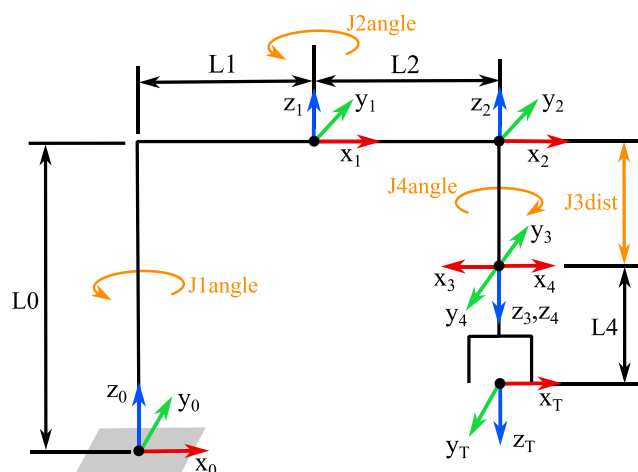
Buffer má celkem tři úrovně a instrukce se mezi nimi předávají z nejvyšší úrovně do nejnižší, viz obr. 57. Zařazení vyrovnávací paměti prokázalo pozitivní vliv na plynulost vykonávání instrukcí – po dokončení jedné instrukce není třeba číst další ze sběrnice přímo, jelikož je v již předpřipravena v paměti.



Obr. 57: Schéma vyrovnávací paměti.

**Řešič dopředné kinematiky** („*ForwardKinematicsSolver*“) je funkce, jež provádí výpočet polohy ( $x, y, z$ ) a orientace ( $\phi$ ) koncového bodu robotu. Vstupními parametry funkce jsou hodnoty natočení nebo posuvu jednotlivých os. Úloha dopředné kinematiky má jedno řešení – konkrétnímu nastavení os odpovídá právě jedna poloha a natočení koncového bodu. Z kinematického modelu SCARA robotu, viz obr. 58, byly získány Denavit-Hartenbergovy parametry, pomocí kterých byla sestavena výsledná transformační matice (1). Kinematické vztahy byly poté získány z této matice. Na obrázku 59 je možno vidět funkci zapsanou v pseudokódu.

$$T_T^0 = \begin{bmatrix} \cos(J1 + J2 - J4) & -\sin(J1 + J2 - J4) & 0 & L1 \cdot \cos(J1) + L2 \cdot \cos(J1 + J2) \\ \sin(J1 + J2 - J4) & \cos(J1 + J2 - J4) & 0 & L1 \cdot \sin(J1) + L2 \cdot \sin(J1 + J2) \\ 0 & 0 & -1 & L0 - J3dist - L4 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$



Obr. 58: Kinematický model SCARA robotu.

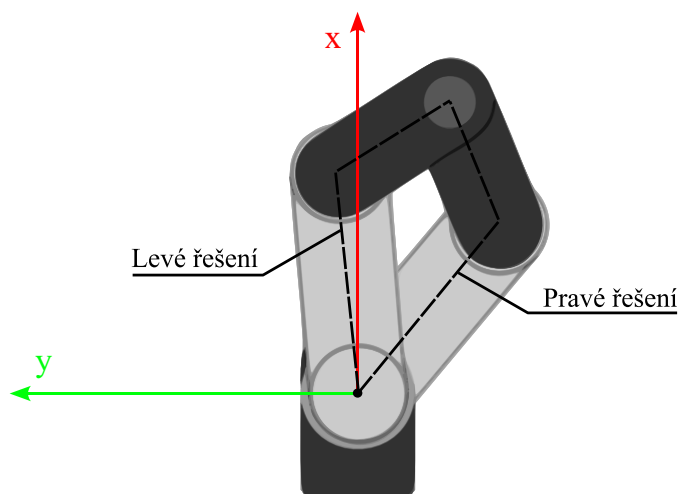
```

FUNCTION ForwardKinematicsSolver(J1angle, J2angle, J3dist, J4angle)
  x = L1*cos(J1angle) + L2*cos(J1angle + J2angle)
  y = L1*sin(J1angle) + L2*sin(J1angle + J2angle)
  z = L0 - J3dist - L4
  phi = J1angle + J2angle + J4angle
  return(x,y,z,phi)
END FUNCTION

```

Obr. 59: Zápis funkce *ForwardKinematicsSolver* v pseudokódu.

**Řešič inverzní kinematiky** („*InverseKinematicsSolver*“) pro zadaný koncový bod dopočítává jaké musí být natočení ( $J_1$ ,  $J_2$ ,  $J_4$ ) a posuv ( $J_3$ ) os robotu, aby bylo tohoto koncového bodu dosaženo. Obecně je úloha inverzní kinematiky výpočetně náročnější než dopředná kinematika a může mít i několik řešení, z nichž některá mohou být mechanicky nerealizovatelná. Jak je možné vidět na obrázku 60, úloha inverzní kinematiky má v případě robotu SCARA nejvýše dvě řešení. Celý postup analytického řešení spočívá nejprve v nalezení levého a pravého řešení osy  $J_2$ . Tyto hodnoty poté umožní získat úhly natočení os  $J_1$  a  $J_4$ , viz pseudokód na obr. 61. Na závěr je vypočtena hodnota posuvu lineární osy  $J_3$ .



Obr. 60: Příklad řešení inverzní kinematiky SCARA robotu (pohled shora).

```

FUNCTION InverseKinematicsSolver(x, y, z,  $\phi$ )
  acosArg =  $(x^2 + y^2 - L1^2 - L2^2) / (2 * L1 * L2)$ 
  IF (acosArg > 1.0 OR acosArg < -1.0)
    kinematicError = true
    return(kinematicError)
  END IF
  J2Right = -acos(acosArg)
  J2Left = acos(acosArg)

  J1Right = atan2[(L2 * sin(J2Left) * x) + (L1 + L2 * cos(J2Left)) * y,
  (L1 + L2 * cos(J2Left)) * x - L2 * sin(J2Left) * y]
  J1Left = -J1Right + 2 * atan2(y, x)

  J4Left =  $\phi - J1Left - J2Left$ 
  J4Right =  $\phi - J1Right - J2Right$ 

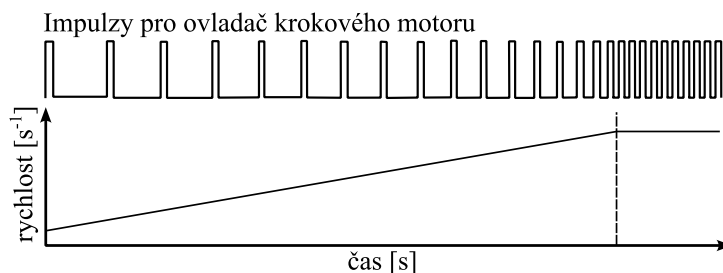
  J3dist =  $L0 - z - L4$ 

  return(J1Right, J1Left, J2Right, J2Left, J3Dist, J4Right, J4Left)
END FUNCTION

```

Obr. 61: Zápis funkce *InverseKinematicsSolver* v pseudokódu.

**Řídicí funkce krokových motorů** („*MoveAxes*“) zajišťuje mechanické dosažení žádané polohy robotu tím, že ve vhodné okamžiky generuje impulzy pro řídicí jednotky krokových motorů a současně provádí synchronizaci os. V případě zkracující se doby mezi impulzy dochází k zrychlování pohybu, viz obr. 62. Při zvětšování prodlevy naopak dochází ke zpomalování pohybu. Pokud je časová prodleva konstantní je i rychlost konstantní a akcelerace nulová. Takový popis pohybu však obecně není dostatečný, proto byly zavedeny pohybové profily, které podrobněji zobrazují průběh rychlosti (případně i polohy a zrychlení) v čase.



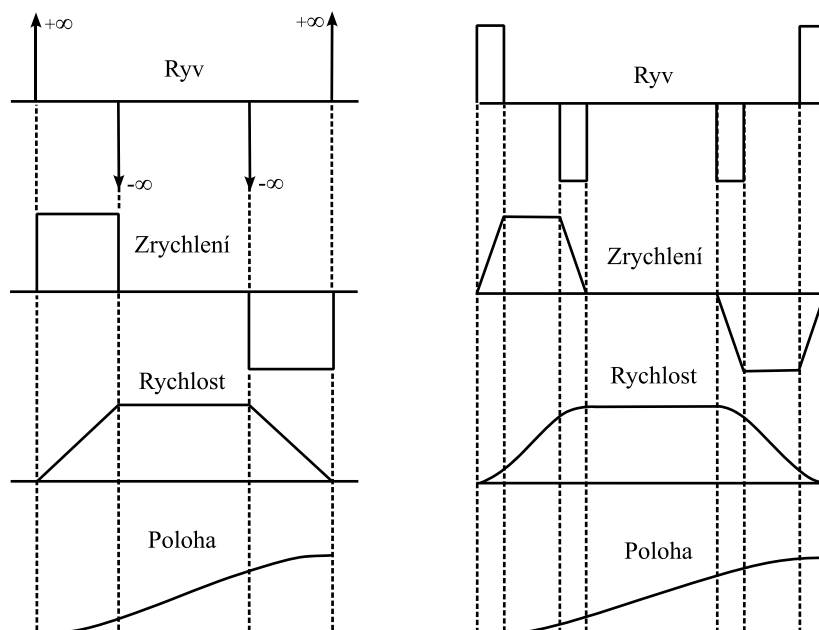
Obr. 62: Rychlost krokového motoru v souvislosti s časovou prodlevou mezi impulzy.

Nejčastěji se lze setkat s trapézovým rychlostním profilem (např. u průmyslových zařízení, CNC strojů, 3D tiskáren). Trapézový profil se skládá ze tří úseků – konstantního zrychlení na maximální rychlost, konstantní rychlosti a konstantního zpomalení [76]. Výsledný rychlostní profil složený z těchto segmentů má tvar lichoběžníku (anglicky *trapezoid*). Nevýhodou tohoto profilu jsou skokové změny zrychlení v místech zlomů průběhu rychlosti, viz obrázek 63 vlevo, které vedou k nekonečným hodnotám *ryvu*<sup>1</sup>. Důsledkem toho může být vznik nežádoucích vibrací a překmitů. Přesto nachází díky své jednoduchosti uplatnění v širokém spektru pohybových aplikací.

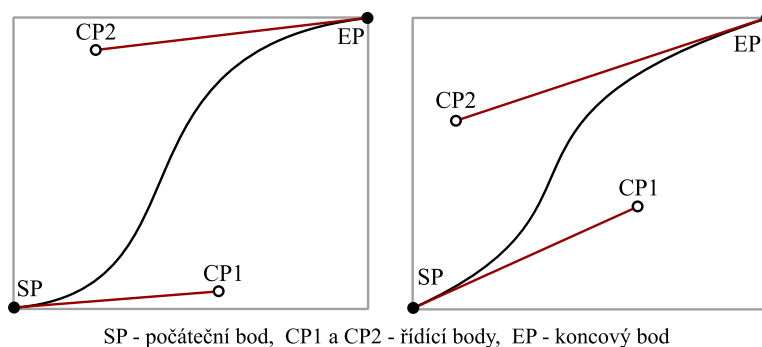
Pro omezení vzniku zmíněných vibrací a překmitů jsou využívány tzv. S-křivky. Jedná se o pohybové profily, které jsou obvykle tvořeny polynomy vyšších řádů [76], viz obrázek 63 vpravo. Jejich výhodou oproti běžnému trapézovému profilu je zejména skutečnost, že ryv nabývá konečných hodnot, což má pozitivní vliv na plynulost řízeného pohybu, redukci vibrací a potlačení překmitů. Jejich drobnou nevýhodou může být vyšší výpočetní náročnost v porovnání s trapézovým profilem. Vzhledem k převážně kladným vlastnostem S-křivek je ve funkci *MoveAxes* implementováno řízení rychlosti robotu na základě polynomiální křivky 3. řádu. Pro reprezentaci pohybového profilu byla místo tradičního polynomu zvolena kubická Bézierova křivka.

S Bézierovými křivkami se lze nejčastěji setkat v oblasti počítačové grafiky. Kubická Bézierova křivka je jednoznačně definována čtyřmi různými body v rovině (počátečním, koncovým a dvěma řídicími body) [77]. Výhodou využití těchto křivek je, že lze snadno upravovat jejich tvar změnou řídicích bodů, viz obr. 64.

<sup>1</sup> Ryv představuje třetí derivaci polohy (změnu zrychlení v čase).



Obr. 63: Vlevo trapézový profil, vpravo polynomiální S-křivka 3. řádu [76].



Obr. 64: Kubická Bézierova křivka – vliv řídicích bodů na tvar rychlostního profilu.

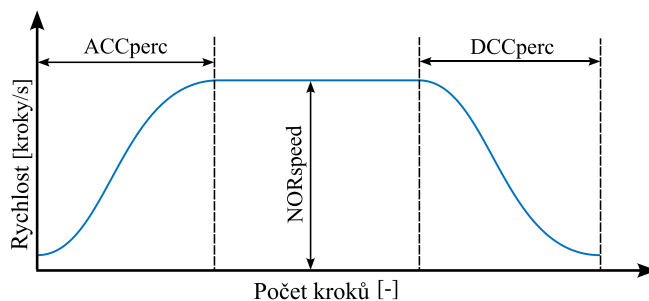
Funkce *MoveAxes* je rozsáhlá a má mnoho vstupních parametrů, viz obrázek 65. Hodnoty proměnných *Jsteps* udávají informaci počtu kroků, které je třeba na příslušných osách vykonat. Proměnné *Jdir* nesou informaci o směru těchto kroků. *ControlMode* umožňuje volbu režimu řízení pohybu robotu. V současné době jsou implementovány pouze dva (tři) režimy – automatický a rychlostní. V automatickém režimu řídicí systém sám zvolí pro daný pohyb parametry rychlosti a zrychlení, naopak v rychlostním módu je tato volba zcela přenechána uživateli. Třetím záměrně upozaděným režimem je časové řízení, které je doposud velmi experimentální. Základní myšlenkou je, že uživatel zadá celkovou dobu pohybu (parametr *TotalTime*) a na jejím základě bude vytvořen odpovídající rychlostní profil.

```
MoveAxes(J1steps, J2steps, J3steps, J4steps, J1dir, J2dir, J3dir, J4dir,
controlMode, NORspeed, ACCperc, DCCperc, TotalTime, debug)
```

Obr. 65: Vstupní parametry funkce *MoveAxes*.

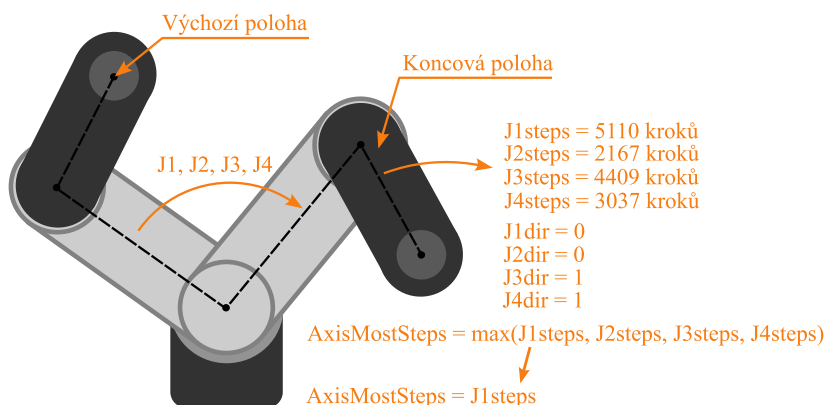
Přestože bylo provedeno mnoho pokusů o nalezení spolehlivého řešení úlohy časového řízení, žádný nebyl zcela úspěšný. Problém činí zejména krátké pohyby, pro které řídicí systém robotu v tuto chvíli nedokáže spolehlivě vytvořit pohybový profil. Ačkoliv byla pro delší pohyby ověřena funkčnost tohoto režimu, je z důvodu jeho prozatímní nestability nedoporučeno jej využívat.

V počátečních fázích návrhu řídicího programu byl pro potřeby ladění ve funkci *MoveAxes* zakomponován vstupní parametr *debug*, kterým lze aktivovat výpis podrobných informací o průběhu vykonávání pohybu. *NORspeed*, *ACCperc* a *DCCperc* jsou vstupní proměnné spjaté s výše uvedeným rychlostním (manuálním) režimem řízení pohybu robotu. *NORspeed* představuje maximální rychlost daného pohybu v krocích za sekundu. *ACCperc* a *DCCperc* určují procentuální množství kroků na kterých má být uskutečněno zrychlení a zpomalení robotu dle zvolené Bézierovy křivky. Grafické znázornění těchto parametrů je možné vidět na obrázku 66.



Obr. 66: Rychlostní S-křivka SCARA robotu.

Funkce *MoveAxes* současně realizuje i synchronizaci os. Úkolem synchronizace je zajistit, že osy  $J_1$  až  $J_4$  započnou a dokončí svůj pohyb ve stejný okamžik. Toho je v případě SCARA robotu docíleno algoritmem, jehož princip spočívá v řízeném vynechávání kroků všech os, které mají v rámci daného pohybu vykonat méně kroků, než je hodnota proměnné *AxisMostSteps* – v příkladu na obr. 67 se jedná o osy  $J_2$ ,  $J_3$  a  $J_4$ . Vlivem vynechávání kroků dochází ke změně rychlosti pohybu těchto os. Rychlost pohybu nastavená parametrem *NORspeed* je tedy v tomto příkladu dosažena pouze na ose  $J_1$ . Na osách  $J_2$ ,  $J_3$  a  $J_4$  je rychlost úměrně snížena tak, aby bylo dosaženo synchronního pohybu. V případě jiného pohybu by maximální rychlosti dosáhla např. osa  $J_2$ .



Obr. 67: Příklad konkrétního pohybu SCARA robotu.

Algoritmus nejprve nalezne osu, která musí v rámci daného pohybu vykonat nejvíce kroků a následně provede výpočet tří synchronizačních parametrů zvlášť pro každou osu – *JstepOnIter*, *JskipOnIter1*, *JskipOnIter2*. Celkem je vypočteno 12 celočíselných hodnot. Tyto parametry udávají, jak často je třeba na dané ose vykonat (příp. vynechat) krok, aby byl pohyb robotu jako celku synchronizován. Pro názornost budou nyní uvažovány pouze osy  $J_1$  a  $J_2$  (pro osy  $J_3$  a  $J_4$  je výpočet zcela identický).

```
#Osa J1 - výpočet J1_StepOnIter, J1_SkipOnIter1, J1_SkipOnIter2
J1_StepOnIter = (AxisMostSteps / J1steps) → (5110/5110) = 1
J1_UndoneSteps1 = (AxisMostSteps - (J1steps * J1_StepOnIter))
→ (5110 - (5110 * 1)) = 0
IF (J1_UndoneSteps1 > 0) → FALSE → větev ELSE
  J1_SkipOnIter1 = (AxisMostSteps / J1_UndoneSteps1)
ELSE
  J1_SkipOnIter1 = 0
END IF
IF (J1_SkipOnIter1 > 0) → FALSE → větev ELSE
  J1_UndoneSteps2 = (AxisMostSteps - (J1steps * J1_StepOnIter)
- ((J1steps * J1_StepOnIter) / J1_SkipOnIter1))
ELSE
  J1_UndoneSteps2 = 0
END IF
IF (J1_UndoneSteps2 > 0) → FALSE → větev ELSE
  J1_SkipOnIter2 = (AxisMostSteps / J1_UndoneSteps2)
ELSE
  J1_SkipOnIter2 = 0
END IF

#Osa J2 - výpočet J2_StepOnIter, J2_SkipOnIter1, J2_SkipOnIter2
J2_StepOnIter = (AxisMostSteps/J2steps) → (5110/2167) = (2.358) = 2
J2_UndoneSteps1 = (AxisMostSteps - (J2steps * J2_StepOnIter))
→ (5110 - (2167*2)) = 776
IF (J2_UndoneSteps1 > 0) → TRUE
  J2_SkipOnIter1 = (AxisMostSteps / J2_UndoneSteps1) → (5110/776) =
= (6.585) = 6
ELSE
  J2_SkipOnIter1 = 0
END IF
IF (J2_SkipOnIter1 > 0) → TRUE
  J2_UndoneSteps2 = (AxisMostSteps - (J2steps * J2_StepOnIter)
- ((J2steps * J2_StepOnIter) / J2_SkipOnIter1)) → (5110 - (2167*2))
- ((2167*2) / 6) = 776-722 = 54
ELSE
  J2_UndoneSteps2 = 0
END IF
IF (J2_UndoneSteps2 > 0) → TRUE
  J2_SkipOnIter2 = (AxisMostSteps / J2_UndoneSteps2) → (5110/54) =
= (94.62) = 94
ELSE
  J2_SkipOnIter2 = 0
END IF
```

Obr. 68: Výpočet synchronizačních parametrů (zápis v pseudokódu).



```

J1steps = 5110, J2steps = 2167,
J1_StepOnIter = 1, J1_SkipOnIter1 = 0, J1_SkipOnIter2 = 0
J2_StepOnIter = 2, J2_SkipOnIter1 = 6, J2_SkipOnIter2 = 94
#Veškeré iterační proměnné „cur“ jsou na začátku vynulovány
#Hlavní pohybová smyčka
WHILE (J1curSteps < J1steps OR J2curSteps < J2steps)
  #Generování impulzů pro ovladač osy J1
  IF (J1curSteps < J1steps)
    IF (J1_SkipOnIter2 == 0)
      J1cur_SkipOnIter2 = J1cur_SkipOnIter2 + 1
    END IF
    IF (J1cur_SkipOnIter2 != J1_SkipOnIter2)
      J1cur_SkipOnIter2 = J1cur_SkipOnIter2 + 1
      IF (J1_SkipOnIter1 == 0)
        J1cur_SkipOnIter1 = J1cur_SkipOnIter1 + 1
      END IF
      IF (J1cur_SkipOnIter1 != J1_SkipOnIter1)
        J1cur_SkipOnIter1 = J1cur_SkipOnIter1 + 1
        J1cur_StepOnIter = J1cur_StepOnIter + 1
        IF (J1cur_StepOnIter == J1_StepOnIter)
          J1curSteps = J1curSteps + 1
          J1cur_StepOnIter = 0
          doOneStep(J1) #vygeneruje 1 impulz (krok) na ose J1
        END IF
      ELSE
        J1cur_SkipOnIter1 = 0
      END IF
    ELSE
      J1cur_SkipOnIter2 = 0
    END IF
  END IF
  #Generování impulzů pro ovladač osy J2
  IF (J2curSteps < J2steps)
    IF (J2_SkipOnIter2 == 0)
      J2cur_SkipOnIter2 = J2cur_SkipOnIter2 + 1
    END IF
    IF (J2cur_SkipOnIter2 != J2_SkipOnIter2)
      J2cur_SkipOnIter2 = J2cur_SkipOnIter2 + 1
      IF (J2_SkipOnIter1 == 0)
        J2cur_SkipOnIter1 = J2cur_SkipOnIter1 + 1
      END IF
      IF (J2cur_SkipOnIter1 != J2_SkipOnIter1)
        J2cur_SkipOnIter1 = J2cur_SkipOnIter1 + 1
        J2cur_StepOnIter = J2cur_StepOnIter + 1
        IF (J2cur_StepOnIter == J2_StepOnIter)
          J2curSteps = J2curSteps + 1
          J2cur_StepOnIter = 0
          doOneStep(J2) #vygeneruje 1 impulz (krok) na ose J2
        END IF
      ELSE
        J2cur_SkipOnIter1 = 0
      END IF
    ELSE
      J2cur_SkipOnIter2 = 0
    END IF
  END IF
END WHILE

```

Obr. 69: Generování impulzů na základě synchronizačních parametrů (zápis v pseudokódu).

Na obrázku 68 byly vypočteny synchronizační parametry pro osy  $J_1$  a  $J_2$  dle příkladu na obrázku 67. Je nutno zmínit, že veškeré výpočty na obrázku 68 jsou celočíselné z důvodu diskrétního charakteru kroků a iterací – není možné vykonat krok každou 2,358 iteraci a taktéž není možné vynechat krok po každé 6,585 iteraci (tyto desetinné hodnoty jsou na obr. 68 označeny oranžovou barvou). V jazyce C++ je při celočíselném dělení zachována pouze hodnota před desetinnou čárkou a desetinné cifry jsou ztraceny (takové chování se anglicky nazývá „*truncation towards zero*“). Díky zmíněné celočíselnosti hodnot a operací jsou výpočty na obrázcích 68 a 69 velmi rychlé i na mikrokontrolérech bez FPU.

Se synchronizačními parametry algoritmus poté vstoupí do hlavní pohybové smyčky *WHILE*, viz obr. 69, ve které setrvá až do splnění ukončovací podmínky – tedy do doby, než dojde k vykonání požadovaného množství kroků na všech osách. V případě  $J_1$  platí, že  $J1stepOnIter = 1$ ,  $J1skipOnIter1 = 0$  a  $J1skipOnIter2 = 0$  – tato kombinace parametrů lze interpretovat následovně:

Celkový počet iterací hlavní pohybové smyčky odpovídá maximálnímu počtu kroků – tedy hodnotě *AxisMostSteps* ( $J1steps$ ). Jelikož jsou hodnoty proměnných  $J1skipOnIter1$  a  $J1skipOnIter2$  rovny nule, přistoupí chod programu v každé iteraci až k nejhluběji zanořené podmínce osy  $J_1$ , viz obr. 70. Protože je  $J1stepOnIter = 1$ , bude i nejhluběji zanořená podmínka vždy splněna, viz obr. 69. Z 5110 iterací hlavní pohybové smyčky bude tedy na ose  $J_1$  vykonán krok v 5110 případech. Tento závěr je korektní, protože celkový počet kroků osy  $J_1$  je v rámci daného pohybu maximální ze všech os, tudíž není třeba na této ose vynechat jediný krok.

```

IF (J1cur_StepOnIter == J1_StepOnIter)
    J1curSteps = J1curSteps + 1
    J1cur_StepOnIter = 0
    doOneStep(J1)
END IF

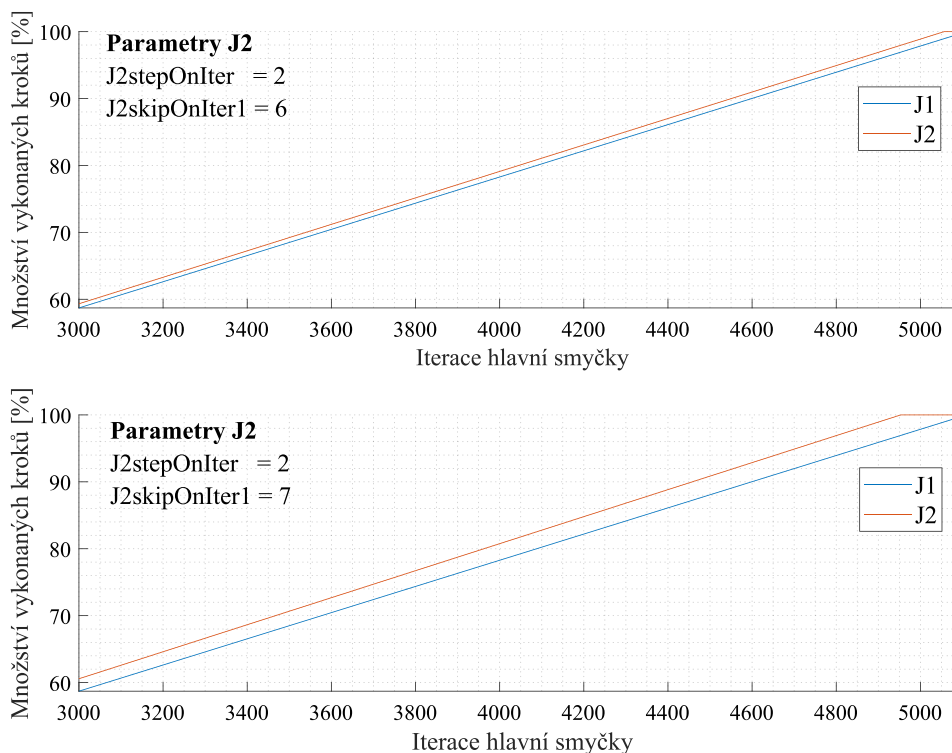
```

Obr. 70: Hlavní (nejhluběji) vnořená podmínka osy  $J_1$ .

Komplikovanější situace nastává v případě osy  $J_2$ , která by měla vykonat podstatně méně kroků, než je hodnota *AxisMostSteps*. Protože je  $J2stepOnIter = 2$ , byl by do nejhluběji vnořené podmínky osy  $J_2$  učiněn vstup každou druhou iteraci hlavní pohybové smyčky za předpokladu, že by nebyly vynechány žádné další kroky (tj.  $J2skipOnIter1 = 0$  a  $J2skipOnIter2 = 0$ ). Za tohoto předpokladu by bylo celkem na ose  $J_2$  vykonáno 2555 kroků. Jelikož se jedná o 388 kroků více než je žádaný počet, musí být parametry pro vynechávání kroků nenulové –  $J2skipOnIter1 = 6$  a  $J2skipOnIter2 = 94$ .

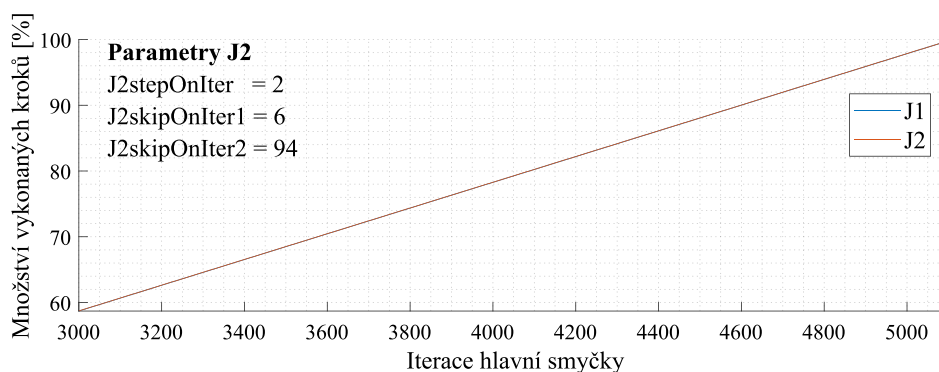
Tyto parametry vyjadřují, jak často je třeba zamezit přístupu k nejhluběji zanořené *IF* podmínce osy  $J_2$ , aby byla zachována synchronizace mezi osami. Důvodem, proč jsou parametry pro vynechávání kroků dva, a nikoliv pouze jeden souvisí s již zmíněnou diskrétností této úlohy – tj. nelze vynechat krok po každé 6,585 iteraci.

Pokud by byl parametr pro vynechávání kroků pouze jeden bylo by nutné zvolit buď nejbližší nižší, anebo nejbližší vyšší celé číslo k desetinnému číslu 6,585. Ať už by bylo vybráno číslo 6, nebo 7, v obou případech by během pohybu došlo k postupné ztrátě synchronizace mezi osami – tj. jedna osa by dokončila svůj pohyb dříve než druhá, viz obrázek 71.



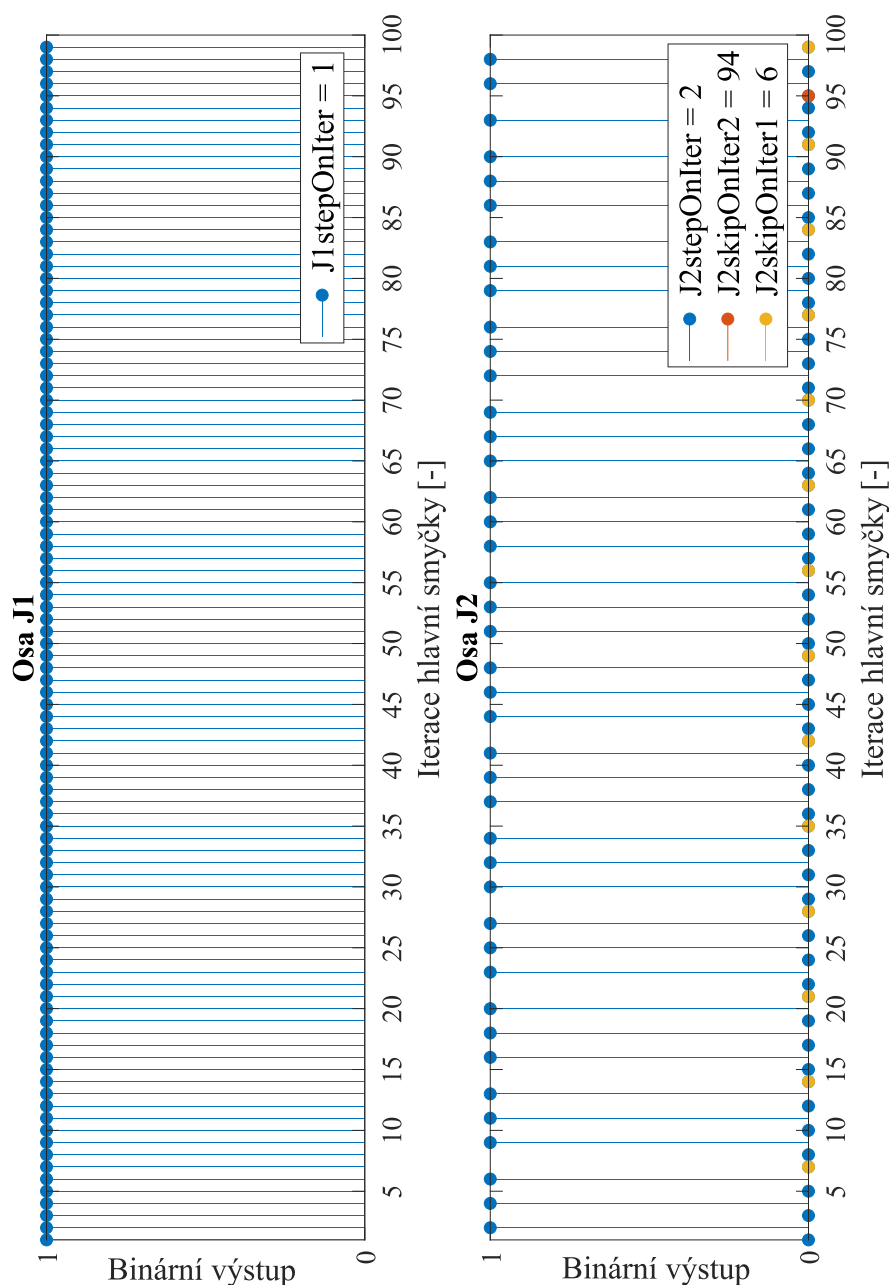
Obr. 71: Postupná ztráta synchronizace mezi osami – pouze jeden parametr *skipOnIter*.

Proto byl zařazen druhý parametr, který má za úkol tuto synchronizační odchylku průběžně snižovat (plní funkci desetinných cifer ztracených při celočíselném dělení). V případě osy  $J_2$  je  $J2skipOnIter2$  roven 94 a  $J2skipOnIter1 = 6$  – tj. každou 95. a 7. iteraci hlavní smyčky vynechá program přístup k nejhluběji zanořené podmínce osy  $J_2$ , ve které jsou na základě  $J2stepOnIter$  generovány impulzy pro ovladač krokového motoru.



Obr. 72: Udržení synchronizace s využitím dvou parametrů *skipOnIter*.

Na obrázku 72 je možné vidět, že zařazením druhého parametru *JskipOnIter2* lze docílit vysoké úrovně synchronizace mezi osami robotu, které by v případě využití pouze jednoho parametru nebylo možné dosáhnout. Pro lepší představu o výše uvedeném mechanismu vynechávání kroků byl vytvořen obrázek 73, který graficky znázorňuje výstup z popsaného algoritmu – tj. posloupnost impulzů pro ovladače krokových motorů os  $J_1$  a  $J_2$ . Nula reprezentuje vynechané kroky, jednička naopak vykonané kroky.

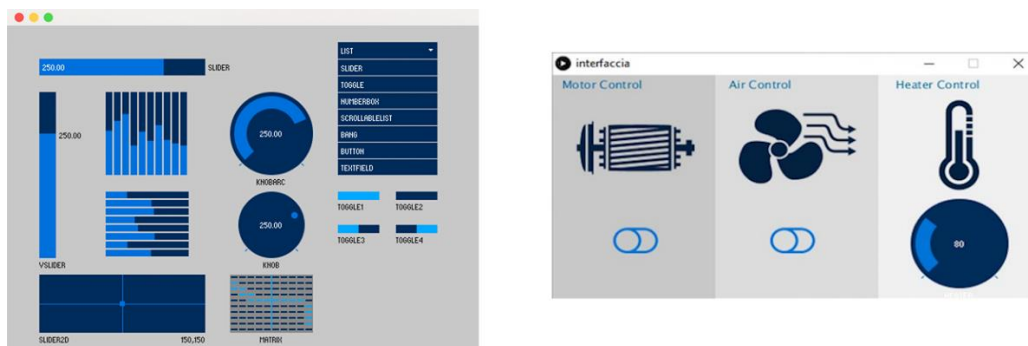


Obr. 73: Grafické znázornění generování impulzů pro ovladače os  $J_1$  a  $J_2$  (pouze prvních sto iterací).

## 6.2 Grafické uživatelské rozhraní

### 6.2.1 Vývojové prostředí pro GUI – Processing

Pro tvorbu uživatelského bylo zvoleno vývojové prostředí *Processing*. Jedná se o uživatelsky přívětivý open-source nástroj pro vývoj programů ve stejnojmenném jazyce Processing, který je založen na rozšířeném vysokoúrovňovém jazyce Java. Mezi hlavní oblasti využití prostředí Processing patří zejména vizuální projekty – kupříkladu programy pro vizualizaci dat, grafickou demonstraci algoritmů a tvorba uživatelských rozhraní, viz obr. 74.



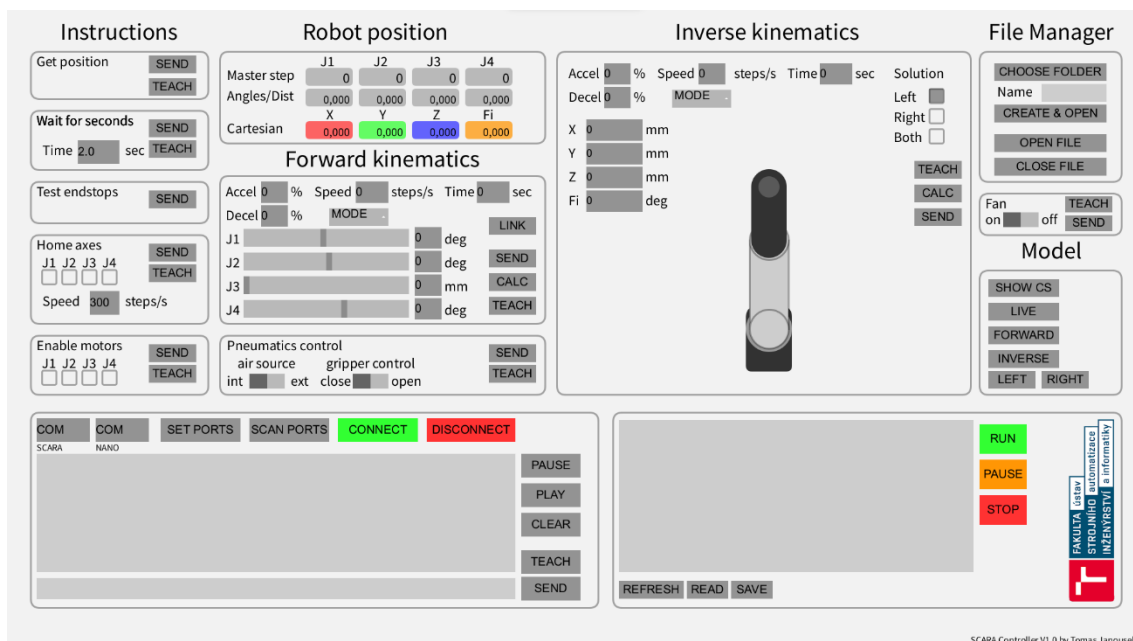
Obr. 74: Příklady uživatelských rozhraní vytvořených v prostředí Processing [78].

### 6.2.2 Vzhled uživatelského rozhraní

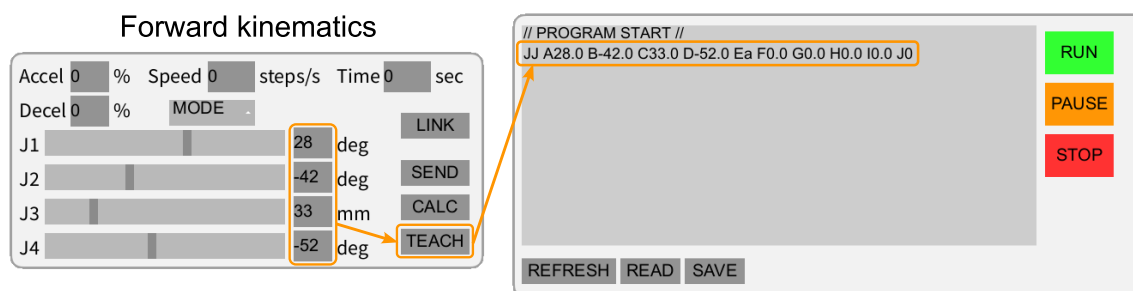
Cílem grafického uživatelského rozhraní je zjednodušit uživateli komunikaci s řídicím systémem SCARA robotu. GUI navržené v jazyce Processing je určeno pro osobní počítače s operačním systémem Windows 10 a 11. Uživatelské rozhraní je rozděleno do několika oblastí, viz obrázek 75. Kromě dominantních segmentů pro dopřednou a inverzní kinematiku je zde možné najít také instrukce pro spuštění ovladačů motorů, inicializaci počáteční polohy robotu, ovládání pneumatických ventilů a mnoho dalších.

V levém dolním rohu je situována konzole, na kterou jsou vypisována případná chybová hlášení a další informace týkající se chodu kontroléru. Pod konzolí se nachází příkazový řádek pro manuální zadávání instrukcí. Manuální zadávání je vhodné zejména při testování dodatečně naprogramovaných funkcionalit, které v rozhraní nemají své grafické zastoupení. Pro vizuální kontrolu polohy robotu je součástí rozhraní také dynamický 2D model, který může pracovat ve třech režimech. V živém (*Live*) režimu zobrazuje model polohu, ve které se robot aktuálně fyzicky nachází. Zbývající režimy (*Forward* a *Inverse*) jsou simulační a slouží k vizuální reprezentaci řešení dopředné a inverzní kinematiky.

V rámci navrženého rozhraní lze SCARA robot mimo již zmíněné také jednoduše programovat. U většiny instrukcí se nachází tlačítko „*Teach*“, kterým dojde k uložení instrukce do paměti programu. Celý program je poté zobrazen v textovém poli napravo od konzole. Pro práci se soubory programů se v GUI nachází jednoduchý správce souborů (*File Manager*). Skrze něj lze otevírat již vytvořené nebo vytvářet zcela nové programy. Na obrázku 76 je možné vidět příklad vložení instrukce do uživatelského programu.



Obr. 75: Grafické uživatelské rozhraní (GUI) obslužné aplikace robotu AI.SCARA.

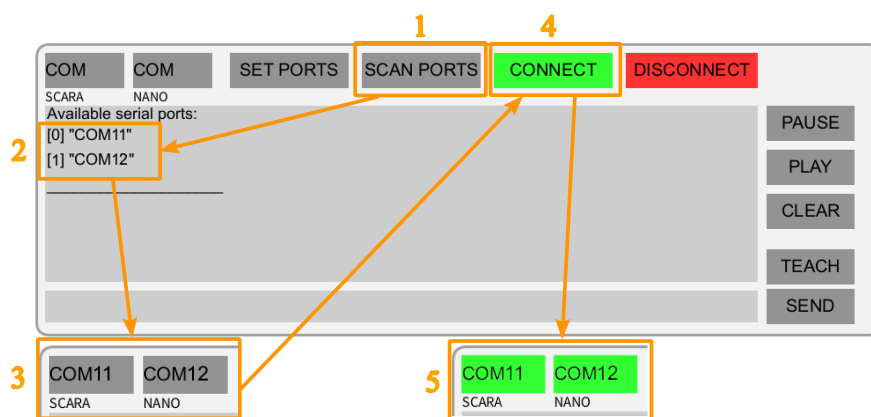


Obr. 76: Vložení instrukce pomocí tlačítka Teach.

### 6.2.3 Navázání komunikace se SCARA kontrolérem

Pro úspěšnou komunikaci mezi osobním počítačem a kontrolérem je třeba nejprve tyto celky propojit dvěma USB kabely. Jelikož mají osobní počítače obvykle mnoho USB portů, bylo by náročné manuálně zjistit na kterých portech je kontrolér připojen. Tlačítko „scan ports“ je určeno pro snadnější nalezení těchto portů.

Po stisknutí tlačítka „scan ports“ jsou na konzoli vypsány aktuálně využívané porty osobního počítače. Uživatelské rozhraní prozatím nedokáže automaticky rozpoznat, na kterých z těchto portů se nachází kontrolér, proto je třeba, aby uživatel manuálně zadal názvy portů do příslušných polí. Proces navázání spojení je možné zahájit tlačítkem „connect“. Na obrázku 77 je výše uvedený postup znázorněn graficky.

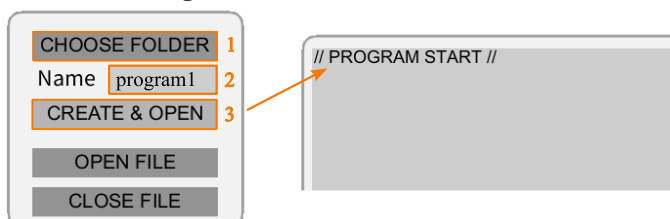


Obr. 77: Postup připojení osobního počítače ke kontroléru.

### 6.2.4 Příklad tvorby programu

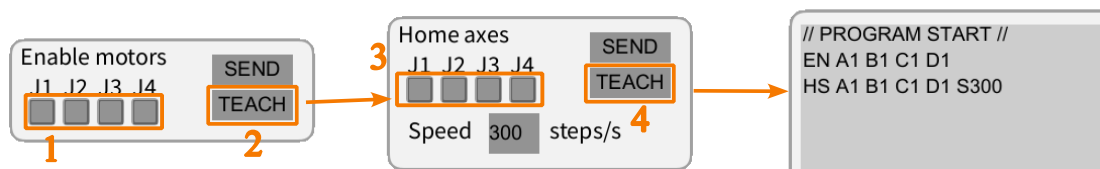
V této kapitole bude popsán kompletní postup při tvorbě programu jednoduché manipulační úlohy. V prvním kroku je třeba založit nový program. Před vytvořením programu musí být zvolen adresář, ve kterém bude program uložen, viz obr. 78. Poté je třeba zadat jméno programu a následně program vytvořit tlačítkem „create & open“. V případě úspěšného vytvoření je na první řádek programu vypsáno „// PROGRAM START //“.

#### File Manager



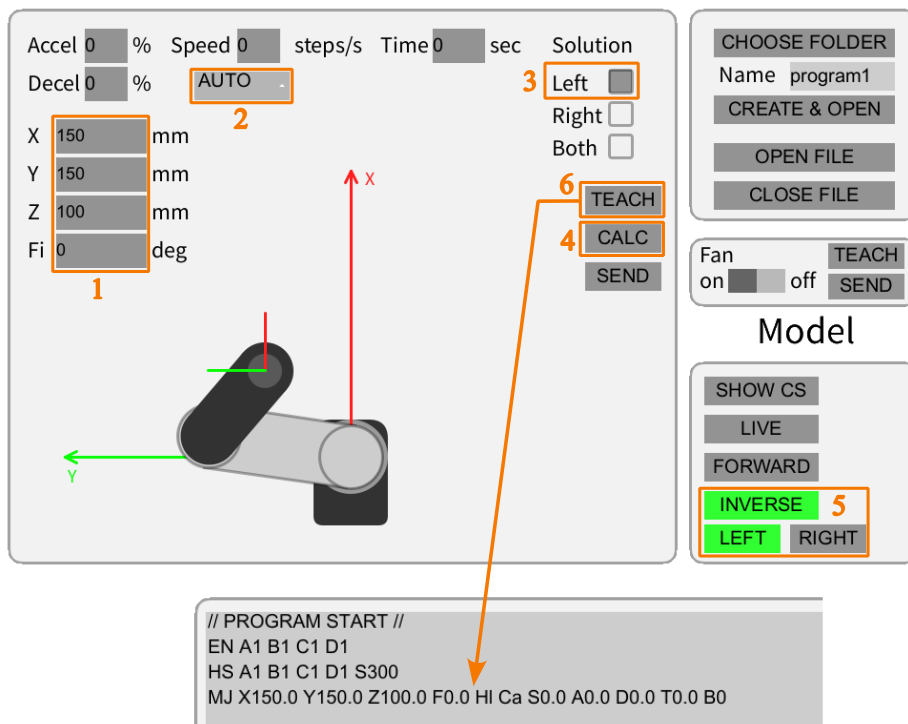
Obr. 78: Postup vytvoření nového uživatelského programu.

Následně je provedena aktivace krokových motorů a inicializace počáteční polohy robotu. Tyto úkony lze provést v GUI buď manuálně (tlačítko „send“), anebo pomocí programu („teach“). V tomto příkladu bude uvedeno programové řešení, viz obr. 79.



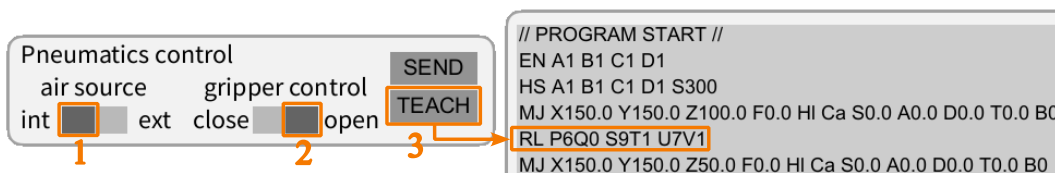
Obr. 79: Postup aktivace motorů a homing robotu.

V dalším kroku bude uložena první poloha ( $x=150$ ,  $y=150$ ,  $z=100$ ,  $\varphi=0$ ). Režim řízení pohybu je nastaven na automatický a preferované řešení inverzní kinematiky je levé. Pro představu o poloze koncového bodu a konfiguraci os robotu lze využít 2D model v režimu *Inverse*. Postup je zobrazen na obrázku 80.



Obr. 80: Postup uložení první polohy robotu.

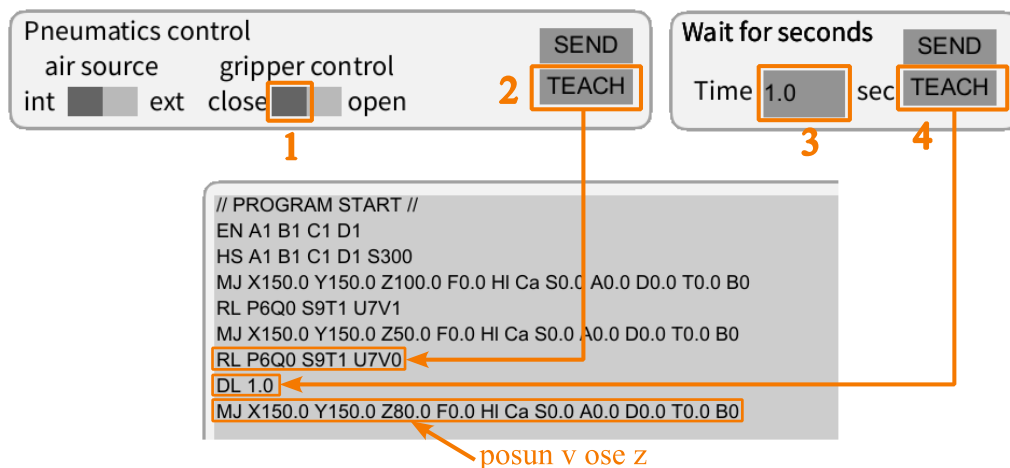
Následně je naprogramováno spuštění zabudovaných kompresorů, otevření pneumatického chapadla a najetí na uchopovaný předmět ( $x=150$ ,  $y=150$ ,  $z=50$ ,  $\varphi=0$ ). Na obrázku 82 je zobrazeno pouze zapnutí kompresorů a otevření chapadla. Instrukce pro najetí na předmět je naprogramována obdobně jako v předchozím kroku (rozdíl je pouze v poloze na ose Z).



Obr. 81: Aktivace integrovaných kompresorů a otevření chapadla.

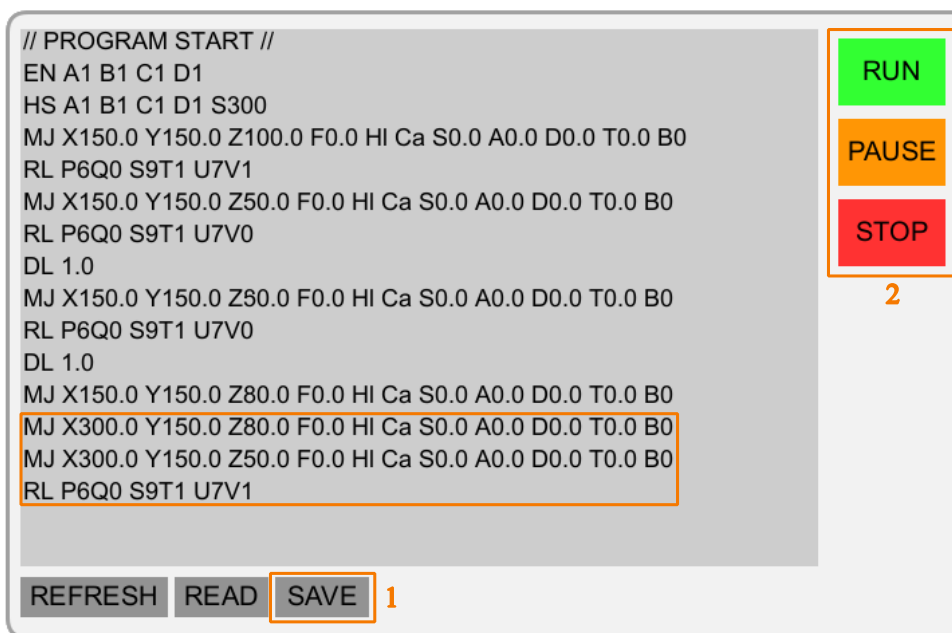
Chapadlo je po najetí na předmět uzavřeno a spolu s manipulovaným předmětem přestaveno v ose Z o 3 cm směrem nahoru pro zajištění bezpečného odstupu od podložky, viz obr. 82. Po instrukci na uzavření chapadla je zařazena malá časová prodleva zajišťující ustálení tlaku v pneumatickém vedení, a tedy i úchopné síly chapadla. V případě externího zdroje stlačeného vzduchu není tato prodleva třeba.





Obr. 82: Uchopení předmětu a posun ve svislé ose.

V závěrečném kroku je naprogramována koncová poloha robotu ( $x=300$ ,  $y=150$ ,  $z=80$ ,  $\varphi=0$ ), svislé najetí do polohy pro uvolnění uchopeného předmětu a samotné uvolnění manipulovaného předmětu. Tento krok je velmi podobný předchozím krokům. Výsledný program je třeba na závěr uložit tlačítkem „save“, viz obr. 83. Spuštění programu je uskutečněno tlačítkem „RUN“. Program lze v případě potřeby pozastavit („PAUSE“) nebo zcela zastavit („STOP“). Pro nouzové zastavení celého řídicího systému slouží výhradně fyzické tlačítko nouzového zastavení.



Obr. 83: Kompletní příklad programu SCARA robotu.



## 7 Základní testy robotu AI.SCARA

Po úspěšném sestavení a odladění byla navržená robotická struktura podrobena sérii testů, jejichž cílem bylo ověření základních „metrologických“ charakteristik robotu. Uskutečněná měření byla rozdělena do tří hlavních kategorií – testy opakovatelnosti, testy tuhosti a komplexní testy, které představují kombinaci obou předchozích. V tabulce 14 jsou uvedeny základní technické parametry navrženého robotu. Uvedené parametry nosnosti a rychlosti robotu představují v současné době nejvyšší ověřené provozní hodnoty. Skutečné maximální hodnoty jsou pravděpodobně vyšší, přičemž pro obavu z mechanického poškození i časové relace práce nebyly prozatím dále testovány.

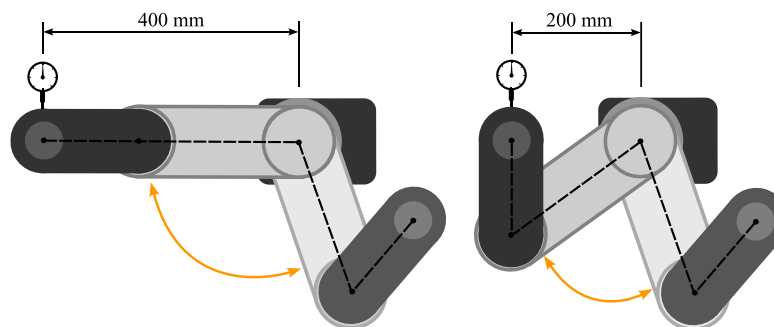
Nutno poznamenat, že výsledky měření charakteristik přesnosti a opakovatelnosti navrženého robotu SCARA jsou implikovány nejen mechanickou konstrukcí, ale i řízením pohybů robotu, tudíž by vyžadovaly poměrně precizní sadu testů, včetně statistického vyhodnocení na pokročilejší úrovni. Taková měření by mohla být předmětem další bakalářské práce.

Tab. 14: Technické parametry robotu AI.SCARA.

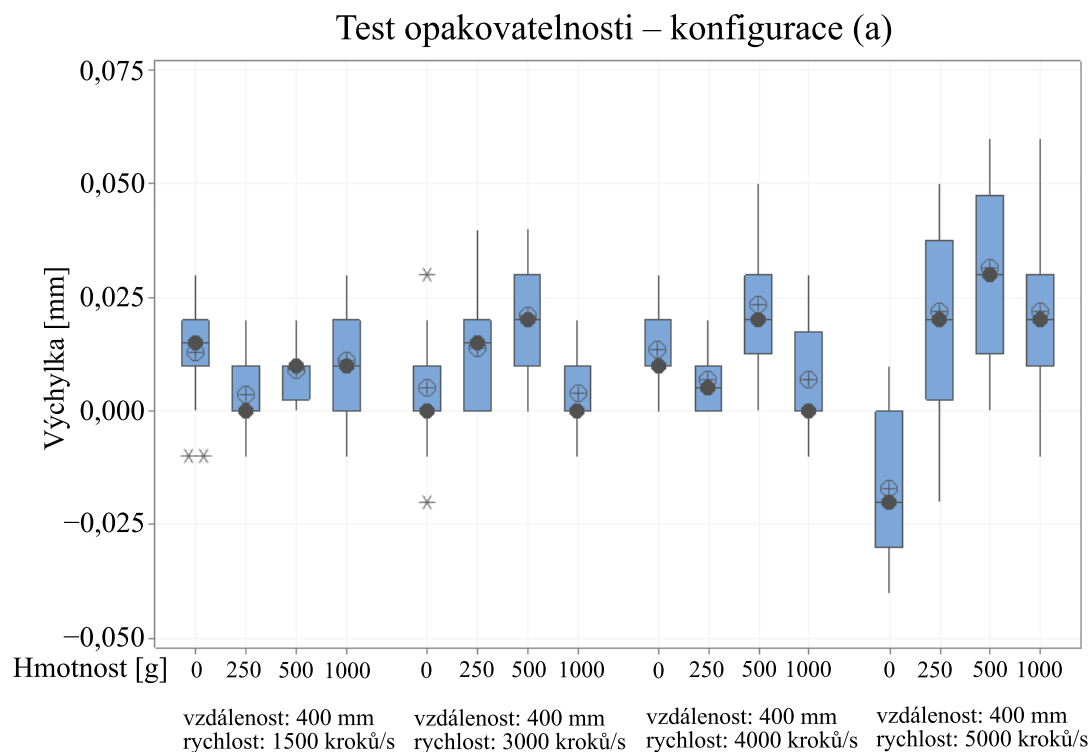
Parametr	AI SCARA
Dosah v rovině X-Y	400 mm
Dosah v ose Z	170 mm
Maximální nosnost	1 kg
Max. rychlost J1	120 °/s
Max. rychlost J2	120 °/s
Max. rychlost J3	80 mm/s
Max. rychlost J4	160 °/s

### 7.1 Testy opakovatelnosti

Testy opakovatelnosti byly provedeny v 16 kombinacích rychlosti a zatížení robotu pro dvě různé vzdálenosti koncového bodu od základny robotu (200 mm a 400 mm). Celkem bylo provedeno 32 různých měření. Rychlosti byly zvoleny v řadě 1500, 3000, 4000 a 5000 kroků/s (120 °/s), vždy v kombinaci se zátěží 0, 250, 500, nebo 1000 gramů. V rámci měření opakovatelnosti robot AI.SCARA opakovaně najížděl na definovanou pozici měřenou úchylkoměrem dle obrázku 84.



Obr. 84: Konfigurace testu opakovatelnosti, vlevo konfigurace (a), vpravo (b).



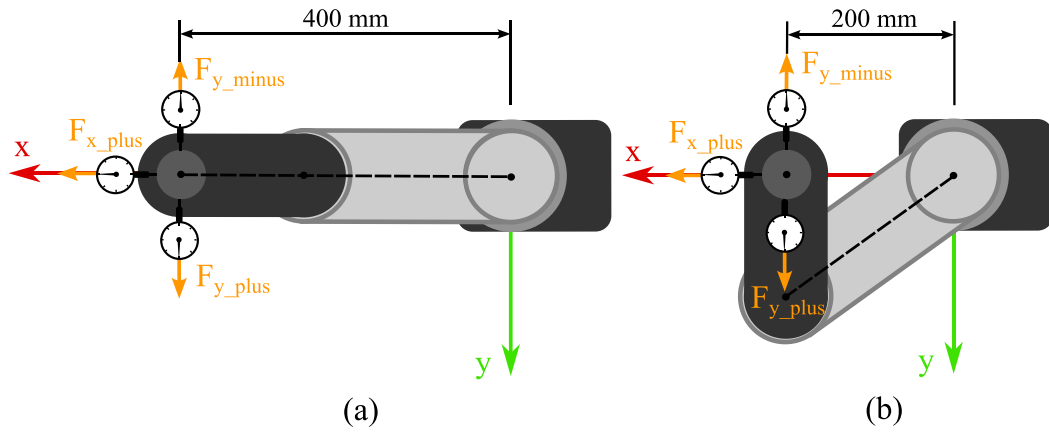
Obr. 85: Vyhodnocení testu opakovatelnosti pro konfiguraci (a).

Test opakovatelnosti prokázal v celém rozsahu měření dobrou stabilitu výsledků. Z hlediska využití konfigurace testu (a) a (b) se výsledky měření lišily nevýznamně. V ohledu rychlostí robotu lze považovat opakovatelnost dosažení žádané polohy pro 1500, 3000, 4000 kroků/s za ekvivalentní. Při maximální rychlosti lze konstatovat vyšší rozptyl hodnot. Uvedené úvahy byly provedeny na základě základních popisných statistik založených na mediánu, viz obrázek 85. V ohledu realizovaných měření lze hodnotit opakovatelnost polohy v řádu desetin milimetru.

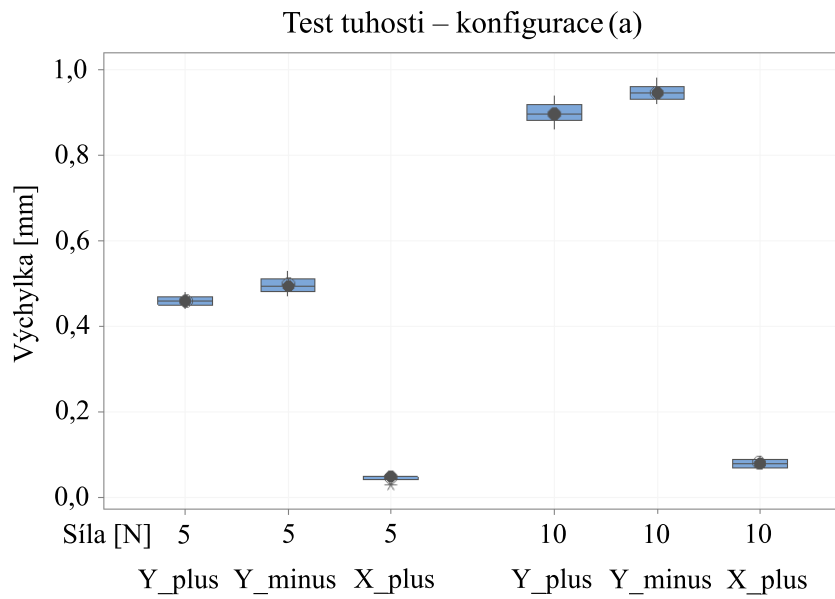
## 7.2 Testy tuhosti

Druhou skupinou testů byly testy tuhosti mechanické konstrukce, při kterých byla zjišťována velikost výchylky koncového bodu robotu v závislosti na síle působící na přírubu koncového efektoru. Jelikož jsou osy  $J_2$  a  $J_4$  poháněny řemenovými převody, lze v těchto osách předpokládat vyšší míru poddajnosti v porovnání s osami  $J_1$  a  $J_3$ . Testy tuhosti byly provedeny ve dvou různých konfiguracích (400 mm a 200 mm od základny robotu). V každé z těchto konfigurací byla síla vyvíjena pružinovým siloměrem postupně vždy v jednom ze tří směrů znázorněných na obrázku 86. Vzhledem k použité metodě vyvození působící síly se jedná o velmi orientační měření.

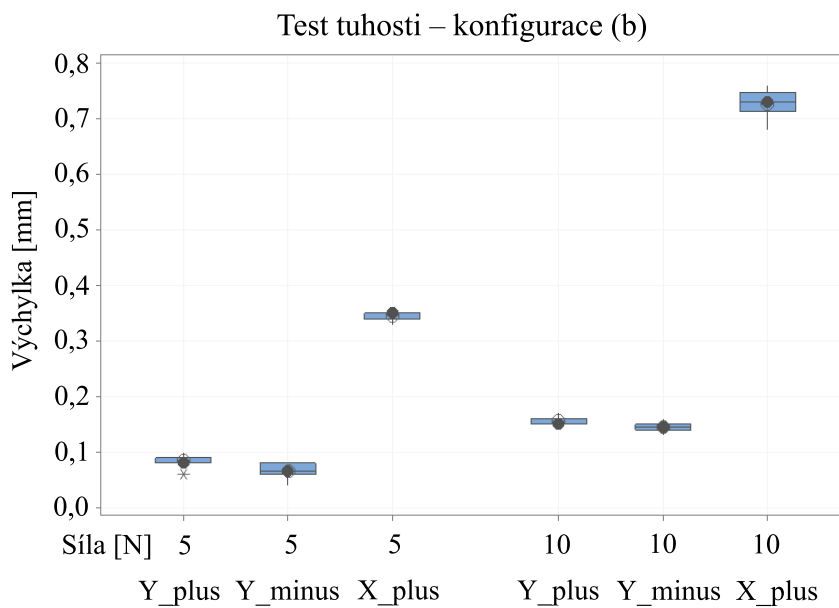
V každém směru byla vyvíjena síla 5 N a 10 N. Z grafů na obrázcích 87 a 88 je patrná závislost výchylky koncového bodu na působící síle. Taktéž je možno vidět vliv konfigurace os na tuhost robotu. Tuhost ve směru osy X (síla  $F_{x,plus}$ ) je v případě konfigurace testu (a) vysoká, naopak v případě konfigurace (b) je dle předpokladu významně nižší vlivem poddajnosti řemenových převodů.



Obr. 86: Konfigurace testu tuhosti, vlevo konfigurace (a), vpravo (b).



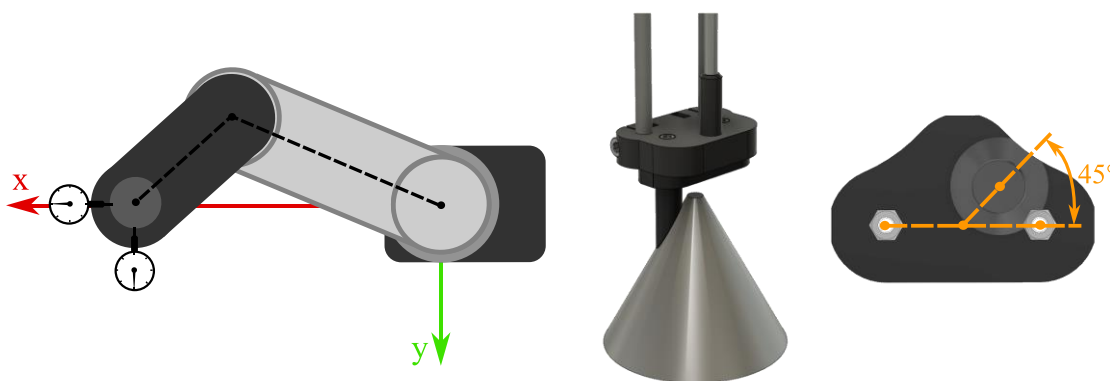
Obr. 87: Vyhodnocení testu tuhosti pro konfiguraci (a).



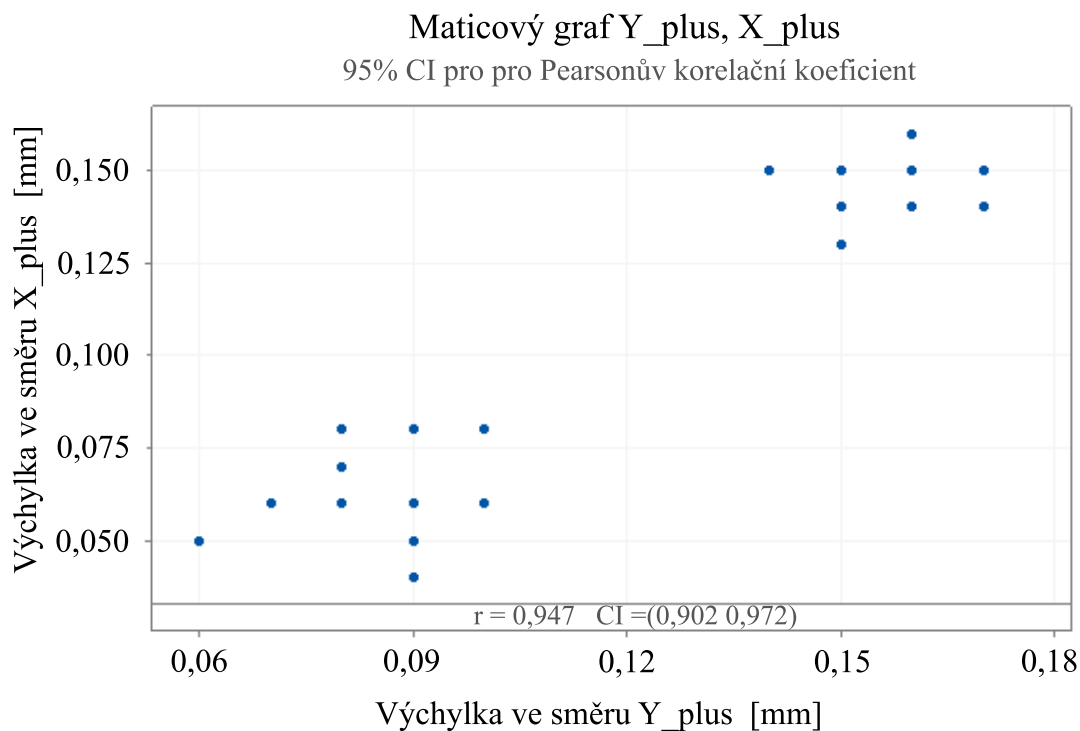
Obr. 88: Vyhodnocení testu tuhosti pro konfiguraci (b).

### 7.3 Komplexní testy

Komplexní test představuje kombinaci obou předchozích testů. V dané konfiguraci testu, viz obr. 89, byla měřena tuhost konstrukce robotu v rovině X-Y při najetí na překážku. Překážkou byl kuželový trn, na který bylo najížděno v ose Z excentrickým koncovým efektem. Natočení rotačních os bylo  $J_1 = -25^\circ$ ,  $J_2 = 70^\circ$  a  $J_4 = -45^\circ$ . Tyto hodnoty se v průběhu testu neměnily. Hloubka nájezdu na trn byla realizována v hloubce (osa Z) 5 mm a 8 mm od kontaktu s kuželem. V rámci použité konfigurace testu lze konstatovat korelaci odchylek ve směrech osy X, Y a hloubky (posunu osy Z), kde rozdíl v posunu 3 mm je patrně statisticky významný, viz obrázek 90.



Obr. 89: Konfigurace komplexního testu. Fixovaná konfigurace SCARA robotu pro test (vlevo), testovací trn a koncový efektor pro provedení test (uprostřed), pohled zdola na koncový efektor s excentrickým zkoseným čepem (vpravo).



Obr. 90: Vyhodnocení komplexního testu.

## 8 Závěr

V rámci bakalářské práce byl proveden průzkum existujících robotických struktur založených na průmyslovém konceptu SCARA. Součástí základní rešerše byly další běžné konstrukce průmyslových robotů, včetně vhodných koncových efektorů dle potřeb manipulačních operací. Teoretická část práce představuje majoritně komplexní popis realizace robotu AI.SCARA jak z pohledu konstrukce, tak programování. Součástí textu je stručný návod na práci s vytvořeným uživatelským rozhraním pro programování robotu AI.SCARA a popis tvorby demonstrační úlohy typu pick-and-place.

V praktické části práce byl úspěšně navržen a zrealizován nízkorozpočtový robot AI.SCARA, včetně všech jeho součástí. Konstrukce robotu je tvořena vhodnou kombinací 3D tištěných a kovových dílů pro zajištění požadované tuhosti a opakovatelnosti. V práci bylo pojednáno o elektrickém zapojení robotu a návrhu a implementaci jeho řídicího systému. Nedílnou součástí softwarového návrhu byl také návrh analytických řešičů dopředné a inverzní kinematiky. Pozornost byla věnována rovněž pohybovým křivkám a synchronizaci pohybu os robotu. Pro snadnou interakci s řídicím systémem bylo navrženo uživatelsky přívětivé grafické rozhraní člověk–stroj pro základní ovládání, diagnostiku a programování robotu AI.SCARA. V závěru práce byl robot podroben sérii základních testů, které potvrdily jeho výhodné vlastnosti při současném dodržení stanoveného rozpočtu 35 000 Kč. Opakovatelnost robotu byla na základě provedených testů odhadnuta v řádu desetin milimetru. Nutno opět poznamenat, že provedená měření poskytují pouze velmi základní představu o metrologických charakteristikách navrženého řešení. Výsledky měření jsou ovlivněny nejen mechanickou konstrukcí, ale i řízením pohybu robotu. Preciznější sada validačních testů, včetně pokročilejšího statického vyhodnocení, by mohla být směrlým předmětem řešení další bakalářské práce. Rovněž tvorba digitálního dvojčete by v návazné bakalářské práci přinesla novou kvalitu a komplexnost řešení.

Robot AI.SCARA disponuje horizontálním dosahem 400 mm a jeho vertikální rozsah v ose Z činí 170 mm. V tabulce 15 je uveden kompletní přehled technických parametrů navrženého robotu. Uvedené parametry rychlosti a nosnosti robotu představují v současné době nejvyšší ověřené provozní hodnoty. Skutečné maximální hodnoty prozatím nebyly testovány pro obavu z mechanického poškození robotu.

Ekonomický rozbor navrženého řešení je uveden v tabulce 16. V rozpočtu je mimo jiné uvedena také precizní planetová převodovka VRL-070C, která však byla pro potřeby této práce zajištěna prostřednictvím štedrého daru od společnosti *Nidec Graessner*.

Robot AI.SCARA byl poprvé představen veřejnosti v rámci 28. ročníku mezinárodní studentské soutěže STOČ na FAI UTB ve Zlíně, kde získal v kategorii robotických systémů první cenu. V současné době je robot AI.SCARA hostován na testovacím pracovišti v laboratoři ÚAI I4C, viz obr. 91.



Obr. 91: Testovací pracoviště AI.SCARA robotu v laboratoři ÚAI I4C.

Tab. 15: Technické parametry robotu AI.SCARA

Parametr	AI.SCARA
Dosah v rovině X-Y	400 mm
Dosah v ose Z	170 mm
Maximální nosnost	1 kg
Opakovatelnost	desetiny milimetru
Max. rychlost J1	120 °/s
Max. rychlost J2	120 °/s
Max. rychlost J3	80 mm/s
Max. rychlost J4	160 °/s
Rozsah osy J1	-116° až +125°
Rozsah osy J2	-129° až +120°
Rozsah osy J3	170 mm
Rozsah osy J4	-190° až +120°
Hmotnost robotu	17 kg
Hmotnost kontroléru	8 kg



Tab. 16: Ekonomický kusovník navrženého řešení.

<b>ALSCARA</b>	
<b>Mechanická konstrukce</b>	<b>Cena celkem s DPH</b>
Materiál konstrukce	7000 Kč
Spojovací materiál	1000 Kč
Ložiska	2000 Kč
Pneumatické prvky	500 Kč
Řemenové převody	1000 Kč
Planetová převodovka VRL-070C	5000 Kč
	<b>16500 Kč</b>

<b>Elektrotechnická konstrukce</b>	<b>Cena celkem s DPH</b>
Pohony a ovladače	9000 Kč
Konektory a vodiče	1500 Kč
Koncové spínače	500 Kč
	<b>11000 Kč</b>

<b>Kontrolér robotu</b>	
	<b>Cena celkem s DPH</b>
Rám kontroléru	2000 Kč
Konektory a vodiče	1500 Kč
Zdroje	1000 Kč
Elektronické prvky	1500 Kč
Mikrokontroléry	1500 Kč
	<b>7500 Kč</b>



## Seznam použité literatury

- [1] ČSN ISO 8373. *Roboty a robotická zařízení – Slovník*. 2nd ed.
- [2] KOLÍBAL, Zdeněk a Radek KNOFLÍČEK. *Morfologická analýza stavby průmyslových robotů*. Košice: Viena, 2000. Edice vědecké a odborné literatury. ISBN 80-88922-27-5.
- [3] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [4] Industrial robot Kuka on linear track. In: *Shgongboshi* [online]. [cit. 2024-01-25]. Dostupné z: [https://www.shgongboshi.com/photo/pl133807596-kuka\\_kr210\\_r2700\\_linear\\_6\\_axis\\_industrial\\_robot\\_for\\_welding\\_palletizing.jpg](https://www.shgongboshi.com/photo/pl133807596-kuka_kr210_r2700_linear_6_axis_industrial_robot_for_welding_palletizing.jpg)
- [5] SICILIANO, Bruno a Oussama KHATIB, ed. *Springer handbook of robotics*. 2nd edition. Berlin: Springer, [2016]. ISBN 978-3-319-32550-7.
- [6] GIANG VO, Truong. Stewart platform. In: *GrabCAD* [online]. [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://d2t1xqejof9utc.cloudfront.net/screenshots/pics/cbb5b67c5c5c384f86cce572a435af3f/large.jpg>
- [7] Cartesian robot. In: *Researchforecast* [online]. [cit. 2024-01-27]. Dostupné z: <https://researchforecast.com/wp-content/uploads/2021/02/Global-Cartesian-Robots-Market.png>
- [8] BERNIER, Catherine. Cylindrical robot. *HowToRobot* [online]. [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://howtorobot.com/expert-insight/cylindrical-robots>
- [9] Cylindrical robot. In: *Automate.org* [online]. [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://www.automate.org/userAssets/a3/productCategoryThumbs/Industrial-CYLINDRICAL.jpg>
- [10] FAIRCHILD, Mark. Industrial robot types and their different uses. *HowToRobot* [online]. [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://howtorobot.com/expert-insight/industrial-robot-types-and-their-different-uses>
- [11] Spherical robot Unimate. In: *Robotec.org* [online]. [cit. 2024-01-28]. Dostupné z: <https://robotec.org/upload/iblock/a74/3pijeklzd5uexiaqstln1w6vart2pi2s.png>
- [12] BERNIER, Catherine. Spherical robot. *HowToRobot* [online]. [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://howtorobot.com/expert-insight/spherical-robots>
- [13] SCARA robot. *FANUC.EU* [online]. [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/rs/en/robots/robot-filter-page/scara-series/selection-support>
- [14] BERNIER, Catherine. Articulated robot. *HowToRobot* [online]. [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://howtorobot.com/expert-insight/articulated-robots>
- [15] FANUC LR Mate 200iD/7H. In: *FANUC.EU* [online]. [cit. 2024-01-29]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/~/media/corporate/products/robots/lrmate/generic/400x600/int-ro-pr-lrm2007h-l-1.jpg?w=400>

- [16] KHORASANI, Amin, Soheil GHOLAMI a Hamid D. TAGHIRAD. Optimization of KNTU Delta robot for pick and place application. *2015 3rd RSI International Conference on Robotics and Mechatronics (ICROM)* [online]. IEEE, 2015, 127-132 [cit. 2024-01-30]. ISBN 978-1-4673-7234-3. Dostupné z: doi:10.1109/ICRoM.2015.7367772
- [17] Delta robot D4-650-S020. In: *Codian Robotics* [online]. [cit. 2024-01-30]. Dostupné z: <https://codian-robotics.com/wp-content/uploads/2023/05/D4-650-S020-D4-800-S020.png>
- [18] MAKINO, Hiroshi. Development of the SCARA. *Journal of Robotics and Mechatronics* [online]. 2014, 2014-02-20, 26(1), 5-8 [cit. 2024-01-31]. ISSN 1883-8049. Dostupné z: doi:10.20965/jrm.2014.p0005
- [19] Japan, Folding screen, Kano School, Edo period, late 17th century. In: *AnticStore* [online]. [cit. 2024-01-31]. Dostupné z: <https://www.anticstore.com/DocBD/commerce/antiquaire/cristina-ortega--michel-dermigny-697/objet/83594/AnticStore-Large-Ref-83594.jpg>
- [20] Stäubli TS2-40. *Stäubli* [online]. [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/global/en/robotics/products/industrial-robots/ts2-40.html>
- [21] Epson Robotics. *Epson* [online]. [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://epson.com/about-robots>
- [22] Epson T3-B401S All-in-One SCARA Robot. *Epson* [online]. [cit. 2024-02-10]. Dostupné z: <https://epson.com/For-Work/Robots/SCARA/Epson-T3-B-All-in-One-SCARA-Robot/p/RT3B-401SS>
- [23] FANUC Corporation. *FANUC* [online]. [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.com/about/index.html>
- [24] FANUC Robots. *FANUC* [online]. [cit. 2024-02-11]. Dostupné z: [www.fanuc.eu/robots](http://www.fanuc.eu/robots)
- [25] FANUC SR-3iA. *FANUC* [online]. [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/en/robots/robot-filter-page/scara-series/scara-sr-3ia>
- [26] ABB Corporation. *ABB* [online]. [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://global.abb/group/en/about>
- [27] ABB IRB 910SC. *ABB* [online]. [cit. 2024-02-12]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/roboty/scara-roboty/irb-910sc>
- [28] ABB SafeMove 2. *ABB* [online]. [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/controllers/safemove>
- [29] Stäubli Company. *Stäubli* [online]. [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/global/en/about-us.html>
- [30] Stäubli CS9 Controller. *Stäubli* [online]. [cit. 2024-02-13]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/global/en/robotics/products/robot-controllers/cs9-robot-controller.html>
- [31] GX8B SCARA Robot. *Epson* [online]. [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://epson.com/For-Work/Robots/SCARA/Epson-GX8B-SCARA-Robot---450mm/p/RGX8-B452SSTE>

- [32] RC700E Controller. *Epson* [online]. [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://epson.com/For-Work/Robots/Controllers/Epson-RC700E-Controller-with-SafeSense-Technology/p/RRC700ECONT>
- [33] SHARIATEE, Morteza, Alireza AKBARZADEH, Ali MOUSAVI a Salman ALIMARDANI. Design of an economical SCARA robot for industrial applications. *2014 Second RSI/ISM International Conference on Robotics and Mechatronics (ICRoM)* [online]. IEEE, 2014, 534-539 [cit. 2024-02-10]. ISBN 978-1-4799-6743-8. Dostupné z: doi:10.1109/ICRoM.2014.6990957
- [34] URREA, Claudio, Juan CORTÉS a José PASCAL. Design, construction and control of a SCARA manipulator with 6 degrees of freedom. *Journal of Applied Research and Technology* [online]. 2016, **14**(6), 396-404 [cit. 2024-02-27]. ISSN 16656423. Dostupné z: doi:10.1016/j.jart.2016.09.005
- [35] about company Igus. *Igus* [online]. [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.igus.eu/info/company-about-igus>
- [36] Igus 4DOF SCARA robot. *Igus* [online]. [cit. 2024-02-27]. Dostupné z: <https://www.igus.eu/product/20961?artNr=RL-SCR-0100.B>
- [37] How To Mechatronics. 2020. *How To Build Your Own Arduino Based SCARA Robot*. YouTube video. [cit. 2024-02-29]. Dostupné z: [www.youtube.com/watch?v=1QHJksTrk8s](http://www.youtube.com/watch?v=1QHJksTrk8s)
- [38] Robotic Arm 3D Printing. *All3DP* [online]. [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: <https://all3dp.com/1/robotic-arm-3d-printing-platforms-software>
- [39] Large scale robotic 3D printed furniture by Nagami. In: *DesignMilk* [online]. [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: [https://design-milk.com/images/2018/04/Robotica-TM-by-Ross-Lovegrove-%C2%A9Nagami-Design\\_00-810x540.jpg](https://design-milk.com/images/2018/04/Robotica-TM-by-Ross-Lovegrove-%C2%A9Nagami-Design_00-810x540.jpg)
- [40] Screwdriving robot Viper MBC Fanuc. In: *Fastener engineering* [online]. [cit. 2024-02-04]. Dostupné z: [https://fastenerengineering.com/wp-content/uploads/2023/04/screwdriving-robot\\_Viper-MBC\\_Fanuc-1.jpg](https://fastenerengineering.com/wp-content/uploads/2023/04/screwdriving-robot_Viper-MBC_Fanuc-1.jpg)
- [41] HUSEYNOB, Mahmud. Integrated Design of Active and Passive Gripper for Robotic Pick and Place Applications. *Advances in Robotics & Automation* [online]. 2021 [cit. 2024-02-03]. ISSN 2168-9695. Dostupné z: <https://www.hilarispublisher.com/open-access/integrated-design-of-active-and-passive-gripper-for-robotic-pick-and-place-applications-85080.html>
- [42] NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. *Efektory průmyslových robotů*. 2023-08-25T07:13:08Z. Dostupné také z: <https://dspace.tul.cz/handle/15240/172706>
- [43] KOLSTAD, Charles. Pneumatic gripper. *Tameson* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://tameson.com/pages/pneumatic-gripper>
- [44] SMC MHZ2 parallel air gripper. In: *SMC* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://content2.smcetech.com/image/large/MHZ-002-L.jpg>
- [45] SMC MHCA angular air gripper. In: *SMC* [online]. [cit. 2024-02-05]. Dostupné z: <https://content2.smcetech.com/image/large/MHC-002-L.jpg>

- [46] EGM Magnetic gripper. In: *Schunk* [online]. [cit. 2024-02-15]. Dostupné z: [https://d16vz4puxlxml1.cloudfront.net/image/076200133045-Prod/image\\_mjd7rveo7p1s53pm2c1fiucf6s/-FWEBP-B1440](https://d16vz4puxlxml1.cloudfront.net/image/076200133045-Prod/image_mjd7rveo7p1s53pm2c1fiucf6s/-FWEBP-B1440)
- [47] GE, Dingxin, Takahiro MATSUNO, Yi SUN, Chao REN, Yongchen TANG a Shugen MA. Quantitative study on the attachment and detachment of a passive suction cup. *Vacuum* [online]. 2015, **116**, 13-20 [cit. 2024-02-06]. ISSN 0042207X. Dostupné z: doi:10.1016/j.vacuum.2015.02.013
- [48] Rocker 400 - Oil Free Vacuum Pump. In: *Rocker* [online]. [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: [https://i0.wp.com/www.rocker.com.tw/wp-content/uploads/2020/06/Rocker400\\_01.jpg](https://i0.wp.com/www.rocker.com.tw/wp-content/uploads/2020/06/Rocker400_01.jpg)
- [49] SMC ejektor řady ZH\*A. In: *SMC* [online]. [cit. 2024-02-06]. Dostupné z: <https://static.smc.eu/image/large/8793E1.jpg>
- [50] Přísavka s vestavěným ejektorem ZHP. *SMC* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: <https://www.smc.eu/cs-cz/produkty-a-podpora/zhp-prisavka-s-vestavenym-ejektorem~135148~cfg>
- [51] Non-contact Gripper digital catalog. *SMC* [online]. [cit. 2024-02-09]. Dostupné z: [https://ca01.smcworld.com/catalog/VacuumPad-en/mpv/VPad-p353-371-XT661\\_en/index.html#target/page\\_no=1](https://ca01.smcworld.com/catalog/VacuumPad-en/mpv/VPad-p353-371-XT661_en/index.html#target/page_no=1)
- [52] LIU, Hanbang, Xinrong LI, Qianli MA a Wenqian FENG. Development non-contact gripper with flowrate-amplification using Coanda ejector. *Vacuum* [online]. 2021, **187** [cit. 2024-02-09]. ISSN 0042207X. Dostupné z: doi:10.1016/j.vacuum.2021.110108
- [53] FRÖHLICH, Arian, Ruben LEITHOFF, Christina VON BOESELAGER, Klaus DRÖDER a Franz DIETRICH. Investigation of particulate emissions during handling of electrodes in lithium-ion battery assembly. *Procedia CIRP* [online]. 2018, **78**, 341-346 [cit. 2024-02-09]. ISSN 22128271. Dostupné z: doi:10.1016/j.procir.2018.08.322
- [54] SMC Corporation Australia and New Zealand. 2018. *Non Contact Grippers to Protect Workpieces*. YouTube video. [cit. 2024-02-20]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=7C0acwNkAw0>
- [55] Fusion 360. AUTODESK. *Autodesk* [online]. [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: [www.autodesk.com/products/fusion-360](http://www.autodesk.com/products/fusion-360)
- [56] BUDYNAS, Richard G. a J. Keith NISBETT. *Shigleyho konstruování strojních součástí*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2023. ISBN 978-802-1454-712.
- [57] Eurobots. 2014. *KUKA Kr150 inside view of the wrist*. YouTube video. [cit. 2024-02-24]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?app=desktop&v=HXJOnWBbcwM>
- [58] Kuličkové ložisko 61910-2RS. *SKF* [online]. [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.skf.com/ph/products/rolling-bearings/ball-bearings/deep-groove-ball-bearings/productid-61910-2RS1>
- [59] Jak funguje servomotor a zpětnovazební řízení. *Raveo* [online]. [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/aktualita/jak-funguje-servomotor-a-zpetnovazebni-rizeni>

- [60] *OMC-stepperonline* [online]. [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://www.omc-stepperonline.com>
- [61] Stepper vs servo motors. *Wevolver* [online]. [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/stepper-vs-servo-motors-a-comprehensive-comparison-for-your-next-project>
- [62] Motion control in robotics. *Wevolver* [online]. [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/motion-control-in-robotics-4-types-of-motors-for-industrial-robots>
- [63] Krokový motor v řezu. In: *S6.uupload* [online]. [cit. 2024-03-08]. Dostupné z: [https://s6.uupload.ir/files/pasted\\_image\\_0\\_s552.png](https://s6.uupload.ir/files/pasted_image_0_s552.png)
- [64] Precizní planetové převodovky VRL-070. *Nidec* [online]. [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <http://www.drives.nidec-shimpo.com/en/vrl-070/>
- [65] Koncové spínače. *Drátek.cz* [online]. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://navody.dratek.cz/technikuv-blog/o-koncovem-spinaci.html>
- [66] Endstops. *Marlin Firmware* [online]. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://marlinfw.org/docs/hardware/endstops.html>
- [67] Mechanický koncový spínač. In: *Amazon Media* [online]. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://m.media-amazon.com/images/I/61SHrkR99uL.jpg>
- [68] Optický koncový spínač. In: *Botland* [online]. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://cdn2.botland.cz/98597/opticky-koncovy-spinac-endstop-reprap-3d-rampy-14.jpg>
- [69] *Drátek.cz* [online]. [cit. 2024-03-12]. Dostupné z: <https://dratek.cz>
- [70] Miniaturní kompresor. *Hadex* [online]. [cit. 2024-03-14]. Dostupné z: <https://www.hadex.cz/v122a-vzduchova-pumpa-370-3vdc-3lmin/>
- [71] Mikrokontrolér. *TechTarget* [online]. [cit. 2024-03-15]. Dostupné z: <https://www.techtarget.com/iotagenda/definition/microcontroller>
- [72] Mikrokontrolér Teensy 4.1. *Botland* [online]. [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://botland.cz/desky-kompatibilni-s-arduino-sparkfun/20186-teensy-41-arm-cortex-m7-s-konektory-kompatibilni-s-arduino-sparkfun-dev-16996-714833879473.html>
- [73] Arduino Nano. *Arduino.cc* [online]. [cit. 2024-03-29]. Dostupné z: <https://store.arduino.cc/products/arduino-nano>
- [74] Embedded systém. *IT slovník* [online]. [cit. 2024-03-16]. Dostupné z: <https://it-slovník.cz/pojem/embedded-system>
- [75] State machine. *Mozilla.org* [online]. [cit. 2024-03-19]. Dostupné z: [https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/State\\_machine](https://developer.mozilla.org/en-US/docs/Glossary/State_machine)
- [76] *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. 2008 [cit. 2024-03-27]. ISSN 1729-8814. Dostupné z: <http://journals.sagepub.com/doi/10.5772/5652>
- [77] Cubic Bézier curve. *Massachusetts Institute of Technology* [online]. [cit. 2024-04-19]. Dostupné z: <https://web.mit.edu/hyperbook/Patrikalakis-Maekawa-Cho/node12.html>
- [78] Příklad uživatelského rozhraní v prostředí Processing. In: *FabAcademy* [online]. [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: [https://archive.fabacademy.org/2016/fablaborino/students/439/img/ex\\_15/i\\_1.jpg](https://archive.fabacademy.org/2016/fablaborino/students/439/img/ex_15/i_1.jpg)





## Seznam zkratek

KŘ	Kinematický řetězec
KD	Kinematická dvojice
T	Translace
R	Rotace
RRT	příklad značení kinematického řetězce – rotace-rotace-translace
SCARA	Selective Compliance Assembly Robot Arm
J1, J2, J3, J4	Osa 1, Osa 2, Osa 3, Osa 4
ESD	Elektrostatický výboj (Electrostatic discharge)
CAD	Computer-aided design
CAM	Computer-aided manufacturing
CAE	Computer-aided engineering
CPR	Counts per Revolution
PETG	Polyetyléntereftalát – glykol
PMMA	Polymethylmethakrylát
PID	Proporcionálně integračně derivační regulátor
NEMA	National Electrical Manufacturers Association
CNC	Computer numerical control
MCU	Mikrokontrolér (Microcontroller unit)
RAM	Random-access memory
ROM	Read-only memory
EEPROM	Electrically erasable programmable read-only memory
IoT	Internet věcí (Internet of Things)
PWM	Pulzně šířková modulace (Pulse-width modulation)
USB	Univerzální sériová sběrnice (Universal Serial Bus)
FPU	Jednotka pro desetinné výpočty (Floating point unit)
GUI	Grafické uživatelské rozhraní (Graphical user interface)



## Seznam příloh

1. Grafická vizualizace robotu AI.SCARA, včetně hlavních rozměrů
2. Poster k bakalářské práci
3. Fotodokumentace robotu AI.SCARA v laboratoři I4C