

**UNIVERZITA PARDUBICE**  
Fakulta elektrotechniky a informatiky

**DELTA ROBOT**

Dominik Štursa

Diplomová práce

2018

Univerzita Pardubice  
Fakulta elektrotechniky a informatiky  
Akademický rok: 2017/2018

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Dominik Štursa**  
Osobní číslo: **I16202**  
Studijní program: **N2612 Elektrotechnika a informatika**  
Studijní obor: **Řízení procesů**  
Název tématu: **Delta Robot**  
Zadávající katedra: **Katedra řízení procesů**

### Z á s a d y p r o v y p r a c o v á n í :

Cílem diplomové práce je návrh a realizace robotického manipulátoru - "Delta" robota. Konstrukce robota bude navržena realizována na základě vlastního konstrukčního řešení, s podporou moderních technologií - 3D tisku, pro realizaci navržených konstrukčních dílů. Součástí práce bude popis současného stavu konstrukčních řešení robotických manipulátorů se zaměřením na "Delta" roboty, jejich řídicích algoritmů a základní matematický popis určený pro analýzu jejich pohybu. Robotický manipulátor bude umožňovat řízení pohybu, na základě standardního komunikačního protokolu s nadřazeným řídicím systémem. Součástí práce bude kompletní výrobní dokumentace zařízení, včetně zdrojových kódů realizovaného software a přehledně zpracovaného uživatelského návodu.

Rozsah grafických prací:

Rozsah pracovní zprávy:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

- MATOUŠEK, D.**, Práce s mikrokontroléry ATMEL AVR-3.díl, edice uP a praxe, 2. vydání, BEN - technická literatura, 2006, ISBN 80-7300-209-4.  
**ZÁHLAVA, V.**, Návrh a konstrukce DPS, BEN-technická literatura, 2010, ISBN 978-80-7300-266-4.  
**MAIXNER, L. a kol.**, Mechatronika, Brno, Computer Press, 2006, ISBN 80-251-1299-3.  
**EVERETT, H., R.** Sensors for Mobile Robots, Theory and Applications. 1.vyd. A.K.Peters, Ltd. ISBN 1-568811-048-2.

Vedoucí diplomové práce:

**Ing. Libor Havlíček, Ph.D.**

Katedra řízení procesů

Datum zadání diplomové práce:

**31. října 2017**

Termín odevzdání diplomové práce:

**18. května 2018**



Ing. Zdeněk Němec, Ph.D.  
děkan



L.S.



Ing. Daniel Honc, Ph.D.  
vedoucí katedry

V Pardubicích dne 8. listopadu 2017

## **Prohlášení**

Prohlašuji:

Tuto práci jsem vypracoval samostatně. Veškeré literární prameny a informace, které jsem v práci využil, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

Byl jsem seznámen s tím, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména se skutečností, že Univerzita Pardubice má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle § 60 odst. 1 autorského zákona, a s tím, že pokud dojde k užití této práce mnou nebo bude poskytnuta licence o užití jinému subjektu, je Univerzita Pardubice oprávněna ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které na vytvoření díla vynaložila, a to podle okolností až do jejich skutečné výše.

Souhlasím s prezenčním zpřístupněním své práce v Univerzitní knihovně.

V Pardubicích dne 08.05.2018

*Podpis*  
Dominik Štursa

## **ANOTACE**

*Diplomová práce se zabývá řešením problému plánování trajektorie delta robota v jeho operačním prostoru, převodem mezi operačním a strojovým prostorem robota, tvorbou konstrukčních komponent a návrhem a realizací delta robota. V práci jsou rozebrány základní teoretické principy robotiky a delta robotů, pro lepší pochopení problematiky při návrhu a realizaci delta robota. Nedílnou součástí práce je i rešerše používaných delta robotů. V práci jsou odvozeny matematické podklady pro řešení problému výpočtu dopředné a inverzní kinematiky delta robota. Dále se práce zabývá postupem při návrhu dílčích konstrukčních komponent, zhotovovaných s využitím technologie 3D tisku.*

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

*Delta robot, kinematika delta robota, konstrukční řešení, 3D tisk, robotika, manipulátory.*

## **TITLE**

*DELTA ROBOT*

## **ANNOTATION**

*This diploma thesis is oriented to planning the trajectory of delta robot in his operation space and to conversion between coordinates of operation and machine space of delta robot. The work is also oriented to creating of the self 3D printed parts for needs to assembling of the delta robot. In work are discussed basic theoretical principles of robotics and delta robots for better understanding of design and construction problems of robots. Next point of thesis is collecting of information about already existing implementations of delta robots. The next thing is about derivation of forward and inverse kinematics solution.*

## **KEYWORDS**

*Delta robot, Kinematics of delta robot, Construction solution, 3D print, Robotics, Manipulators.*

## OBSAH

Seznam zkratk.....	9
Seznam značek (symbolů proměnných a funkcí) .....	10
Seznam obrázků.....	11
Seznam tabulek.....	14
ÚVOD .....	15
1 ROBOTIKA .....	16
1.1 ROBOT .....	16
1.2 PRŮMYSLOVÉ ROBOTY .....	17
2 ROBOTICKÉ MANIPULÁTORY.....	18
2.1 Mechanický systém robota.....	18
2.1.1 Parametry robotů.....	19
2.1.2 Základní typy robotů.....	20
2.2 Hnací aparát robota .....	22
2.2.1 Části pohonů .....	23
2.2.2 Přehled používaných motorů.....	24
2.2.3 Převodovky.....	26
2.2.4 Matematický model stejnosměrného motoru .....	27
2.3 SYSTÉMY VNÍMANÍ ROBOTA.....	28
2.3.1 Přehled používaných proprioceptivních snímačů .....	29
2.4 ŘÍDICÍ SYSTÉM ROBOTA.....	30
2.4.1 Plánování pohybu .....	31
3 DELTA ROBOT.....	32
3.1 TYPY DELTA ROBOTŮ.....	32
3.1.1 Delta robot s lineárními pohony .....	33
3.1.2 Delta robot s rotačními pohony .....	33
3.2 PŘEHLED POUŽÍVANÝCH DELTA ROBOTŮ .....	35
3.2.1 Dvousé delta roboty s rotačním pohonem.....	35
3.2.2 Třiosý delta robot s rotačním pohonem .....	36
3.2.3 Čtyřosý delta robot s rotačním pohonem .....	37
3.2.4 Šestiosý delta robot s rotačním pohonem.....	39
3.2.5 Třiosý delta robot s lineárním pohonem .....	40
3.3 KINEMATICKÝ MODEL DELTA ROBOTA .....	41

3.3.1	Dopředná kinematika delta robota.....	42
3.3.2	Inverzní kinematika delta robota .....	47
4	NÁVRH A REALIZACE DELTA ROBOTA .....	51
4.1	STANOVENÍ VLASTNOSTÍ ROBOTA.....	51
4.1.1	Požadavky pro manipulaci .....	51
4.1.2	Požadavky na komunikaci.....	52
4.1.3	Požadavky na základní vlastnosti robota .....	52
4.1.4	Požadavky na konstrukční řešení.....	53
4.1.5	Požadavky na elektronickou část.....	54
4.1.6	Požadavky na celkovou cenu realizace .....	54
4.2	ELEKTRONICKÉ KOMPONENTY .....	54
4.2.1	Zdroje napájení .....	55
4.2.2	Řídicí jednotka.....	56
4.2.3	Motory .....	58
4.2.4	Snímače polohy .....	59
4.2.5	Pneumatické uchopení .....	60
4.2.6	Ovladače výkonových částí.....	61
4.2.7	Cena elektronické části .....	63
4.3	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ .....	63
4.3.1	Stanovení velikostí paží a předloktí.....	64
4.3.2	Manipulované předměty.....	66
4.3.3	Hliníkové komponenty.....	67
4.3.4	Model paže .....	69
4.3.5	Model předloktí .....	70
4.3.6	Model zápěstí a koncového efektoru .....	71
4.3.7	Kloubová spojení .....	72
4.3.8	Modely nosných a upevňovacích částí.....	72
4.3.9	Propojení elektronických částí.....	74
5	ŘÍDICÍ SYSTÉM DELTA ROBOTA .....	75
5.1	REGULACE POHONŮ .....	75
5.1.1	Charakteristiky motoru.....	76
5.1.2	Návrh regulátoru.....	77
5.2	ŘÍDICÍ PROGRAM.....	78
5.2.1	Zpracování snímání polohy .....	79

5.2.2	Ovládání motorů .....	80
5.2.3	Typy pohybů a jejich obsluha.....	80
5.2.4	Komunikace s externím systémem .....	83
5.2.5	Struktura řídicího programu .....	85
6	ZHODNOCENÍ .....	87
7	ZÁVĚR .....	90
	LITERATURA .....	91
	PŘÍLOHY .....	95



## Seznam zkratek

3D	trojdimenzionální (trojrozměrný)
ADC	analogově digitální převodník
DC	stejnoseměrný
DOF	stupeň volnosti
MCU	mikropočítač
PD	proporcionálně derivační (regulátor)
PID	proporcionálně integračně derivační (regulátor)
PWM	pulzně šířková modulace
RO	regulační obvod
UART	univerzální asynchronní sběrnice
USART	univerzální synchronní nebo asynchronní sériové rozhraní
USB	univerzální sériová sběrnice

## Seznam značek (symbolů proměnných a funkcí)

$b$	součinitel tření, $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
$F_v$	obrazový přenos pro rychlost otáčení motoru
$F_\nu$	obrazový přenos pro úhel natočení motoru
$I$	elektrický proud, A
$J_A$	moment setrvačnosti, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
$K$	elektromotorická konstanta, $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$
$K_P$	zesílení soustavy
$L$	indukčnost cívky, H
$M_d$	dynamický moment, $\text{N}\cdot\text{m}$
$M_z$	moment zátěže, $\text{N}\cdot\text{m}$
$M_m$	moment motoru, $\text{N}\cdot\text{m}$
$R$	elektrický odpor, $\Omega$
$s$	Laplaceův operátor
$t$	čas, s
$T_1$	časová konstanta soustavy, s
$T_2$	časová konstanta soustavy, s
$U$	napětí zdroje, V
$U_M$	napětí na rotoru, V
$U_L$	indukované napětí, V
$U_R$	napětí na rezistoru, V
$x$	neznámá souřadnice osy $x$
$y$	neznámá souřadnice osy $y$
$z$	neznámá souřadnice osy $z$
$\varphi$	úhel natočení, rad
$\omega$	úhlová rychlost, $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$

## Seznam obrázků

Obr. 2.1 – Uspořádání kartézského robota (Cvejn, 2015; Tyson, 2013) .....	20
Obr. 2.2 – Uspořádání cylindrického robota (Cvejn, 2015; Tyson, 2013) .....	20
Obr. 2.3 – Uspořádání sférického robota (Cvejn, 2015; Tyson, 2013).....	21
Obr. 2.4 – Uspořádání antropomorfního robota (Cvejn, 2015) .....	21
Obr. 2.5 – Znázornění struktury tripodu a hexapodu (Kohout, 2008) .....	22
Obr. 2.6 – Řez DC motorem s permanentními magnety (Malěj, 2016) .....	24
Obr. 2.7 – Bezkartáčový DC motor (Maxon, 2013) .....	25
Obr. 2.8 – Krokování s polovičním krokem (Siddharth, 2013).....	26
Obr. 2.9 – Náhradní schéma DC motoru (Štursa, 2014).....	27
Obr. 2.10 – Princip absolutního snímače polohy (Tamagawa, 2018).....	29
Obr. 2.11 – Princip relativního snímače polohy (Lynch, 2010) .....	30
Obr. 3.1 – Model delta robota s lineárním pohonem (Spadaro, 2016) .....	33
Obr. 3.2 – Model delta robota s rotačními pohony (Clavel, 2014).....	34
Obr. 3.3 – Dvouosý delta robot s rotačním pohonem (Codian robotics, 2018).....	35
Obr. 3.4 – Vybrané tříosé delta roboty (Fanuc, 2018a; Fanuc, 2018b) .....	36
Obr. 3.5 – Konfigurace čtyřosých delta robotů (Fanuc, 2018d; Sipro, 2018c) .....	37
Obr. 3.6 – Konfigurace čtyřosého delta robota (Wittenstein, 2018).....	38
Obr. 3.7 – První typ realizace šestiosého delta robota (Fanuc, 2018e).....	39
Obr. 3.8 – Druhý typ realizace šestiosého delta robota (Panasonic, 2018) .....	40
Obr. 3.9 – Vybrané tříosý delta roboty s lineárním pohonem (Printspace, 2016) .....	41
Obr. 3.10 – Geometrický model delta robota (Clavel, 2014) .....	42
Obr. 3.11 – Souřadnice středu pohonů .....	43
Obr. 3.12 – Souřadnice koncového bodu první paže .....	43
Obr. 3.13 – Souřadnice posunutého koncového bodu paže .....	44
Obr. 3.14 – Znázornění posunu koncových bodů ramen (Williams, 2016).....	44
Obr. 3.15 – Princip získání výsledných souřadnic (Clavel, 2014) .....	45
Obr. 3.16 – Umístění počátku souřadnicového systému (Clavel, 2014) .....	47
Obr. 3.17 – Průmět delta robota do roviny xy .....	48
Obr. 3.18 – Řez nákresu delta robota při nulové souřadnici x.....	48
Obr. 3.19 – Korekce souřadného systému (Clavel, 2014) .....	50
Obr. 4.1 – Použité napájecí zdroje (TME, 2018a; TME, 2018b) .....	55
Obr. 4.2 – Blokové schéma ATmega2560 (Atmel, 2018) .....	56

Obr. 4.3 – Schéma zapojení napájecí části vývojové desky (Arduino, 2018) .....	57
Obr. 4.4 – Schéma převodní části vývojové desky (Arduino, 2018).....	57
Obr. 4.5 – Použitý pohon (Pololu, 2018a) .....	58
Obr. 4.6 – Snímek osciloskopu výstupního signálu enkodéru (Pololu, 2018a).....	59
Obr. 4.7 – Použitá vakuová pumpa (TME, 2018c).....	60
Obr. 4.8 – Použitý dvoucestný ventil (Pelican, 2018) .....	60
Obr. 4.9 – Náskres minimálního zapojení řadiče motoru (Pololu, 2018b) .....	62
Obr. 4.10 – Náskres vstupů a výstupů řadiče pro vývěvu a ventil (Pololu, 2018c) .....	62
Obr. 4.11 – Cesta pohybu koncové efektoru v prostoru .....	64
Obr. 4.12 – Průběhy některých sledovaných veličin .....	65
Obr. 4.13 – První forma pro tvorbu manipulovaných předmětů .....	66
Obr. 4.14 – Druhá forma pro tvorbu manipulovaných předmětů .....	66
Obr. 4.15 – Barevné spektrum zhotovených manipulovaných předmětů.....	67
Obr. 4.16 – Znázornění povrchových hliníkové části.....	67
Obr. 4.17 – Nosná konstrukce robota .....	68
Obr. 4.18 – Náskres nosné konstrukce s povrchovými díly .....	68
Obr. 4.19 – První verze modelu paže.....	69
Obr. 4.20 – Adaptér hřídele a jeho rozměry (Pololu, 2018d) .....	70
Obr. 4.21 – Druhá verze modelu paže .....	70
Obr. 4.22 – Model předloktí .....	70
Obr. 4.23 – Model zápěstí.....	71
Obr. 4.24 – Model koncového efektoru .....	71
Obr. 4.25 – Model kloubových spojení .....	72
Obr. 4.26 – Model spojovací části nosné konstrukce .....	72
Obr. 4.27 – Model držáku motoru se zobrazeným motorem .....	73
Obr. 4.28 – Modely vybraných upínacích prvků .....	73
Obr. 4.29 – Propojovací schéma jednotlivých modulů.....	74
Obr. 5.1 – Průběh signálu vstupní veličiny.....	76
Obr. 5.2 – Odvozená charakteristika rychlosti otáčení.....	76
Obr. 5.3 – Naměřená charakteristika úhlu natočení.....	76
Obr. 5.4 – Porovnání přechodových charakteristik úhlu natočení.....	77
Obr. 5.5 – Porovnání regulačních pochodů dvou regulátorů .....	78
Obr. 5.6 – Vývojový diagram funkce snímání polohy .....	79
Obr. 5.7 – Zdrojový kód kontroly chybového stavu a výpočtu akčního zásahu.....	81

Obr. 5.8 – Vektor kroků a odpovídající rychlostní profil .....	82
Obr. 5.9 – Zdrojový kód pro výpočet inverzní kinematiky .....	83
Obr. 5.10 – První část řídicího programu .....	85
Obr. 5.11 – Druhá část řídicího programu .....	86
Obr. 6.1 – Fotografie realizace delta robota .....	87
Obr. 6.2 – Regulační pochody jednotlivých pohonů .....	88

## Seznam tabulek

Tab. 2.1 – Základní kinematické dvojice (Kauler, 2016) .....	19
Tab. 3.1 – Porovnání tříosých delta robotů .....	36
Tab. 3.2 – Porovnání čtyřosých delta robotů .....	38
Tab. 3.3 – Porovnání šestiosých delta robotů .....	40
Tab. 3.4 – Porovnání 3D tiskáren využívajících principu delta robota .....	40
Tab. 4.1 – Vlastnosti použitých napájecích zdrojů .....	55
Tab. 4.2 – Vlastnosti použitých pohonů (Pololu, 2018a) .....	58
Tab. 4.3 – Zajišťovaná funkce kabelů pohonů (Pololu, 2018a).....	59
Tab. 4.4 – Vlastnosti použitých řadičů motorů pro pohony (Pololu, 2018b) .....	61
Tab. 4.5 – Popis vstupů a výstupů řadičů motorů pro pohony (Pololu, 2018b) .....	61
Tab. 4.6 – Soupis ceny elektronických částí.....	63
Tab. 4.7 – Důležité rozměry použité konfigurace .....	65
Tab. 5.1 – Optimální hodnoty konstant regulátoru .....	78
Tab. 5.2 – Nastavení registrů pro generování PWM .....	80
Tab. 5.3 – Popis komunikačního protokolu .....	84
Tab. 6.1 – Hodnoty nastavení konstant regulátoru v MCU .....	88
Tab. 6.2 – Porovnání požadovaných a dosažených parametrů .....	89
Tab. 6.3 – Položky nákladů na realizaci .....	89

# ÚVOD

Nynější průmysl si žádá propracovanější řešení pro manipulaci s objekty, pro strojové obrábění nebo pro využití moderní technologie 3D tisku. Díky tomuto trendu je snaha nahradit klasické strojové struktury novějšími, které jsou schopny rychleji reagovat na změny požadované pozice manipulačního systému a dokáží k objektu přistupovat z nejrůznějších pozic.

V rámci těchto zvyšujících se potřeb se používají například kinematically redundantní systémy, jež svou strukturou dokáží přistupovat k manipulovanému objektu z různých stran a s různým natočením. Dále se používají paralelní systémy, které dokáží objekty manipulovat rychleji, s větším zrychlením nebo případně s většími silovými účinky.

Teoretická část obsahuje nejprve základní uvedení do problematiky robotiky a robotů, dále se specializuje na průmyslové roboty a manipulátory, a postupně přechází až k problematice samotných delta robotů a jimi používaných konstrukčních řešení. Teoretická část dále obsahuje vhled do používaných pohonů a jejich principů, do principů měření potřebných veličin a k principům používaných snímačů. Dále následují základní principy zpětnovazebního řízení a různé přístupy k řízení manipulátorů. Závěrem teoretické části je odvození důležitých matematických vztahů pro výpočty inverzní a dopředné kinematiky delta robota.

Praktická část se zabývá popisem vlastního konstrukčního řešení a postupu při tvorbě konstrukce a vlastních součástí, později vytvořených za použití 3D tiskárny. Dále jsou popisována schémata zapojení a rozebírány jednotlivé komponenty, ze kterých je složena elektronická část robota. Následně je popsán proces získání obrazů přenosu a parametrů regulátoru. V závěru praktické části je popisován program pro mikrokontrolér, popis možné komunikace s nadřazeným systémem a popis zprostředkování pohybu po stanovené trajektorii.

# 1 ROBOTIKA

Robotika je vědní obor zabývající se studiem, tvorbou, výrobou a různými aplikacemi s využitím robotů a jim podobných zařízení. Slovo robotika je odvozeno od slova robot, které bylo poprvé použito v dílu Karla Čapka, kde slovo robot označuje inteligentní stroj, který samostatně vykonává namáhavou práci – „robotu“. I přes možná chápání oboru robotiky nebo samotného pojmu robot však doposud neexistuje ani pro jeden z těchto pojmů exaktní a ustálená definice. Dle některých zdrojů lze robota chápat jako stroj, který je schopen modifikovat prostor, ve kterém je umístěn, a to nezávisle na svém okolí. Obdobně lze potom chápat robotiku jako vědu inteligentních propojení mezi vnímáním a činností. (Cvejn, 2015)

Z pohledu do historie lze zjistit, že o strojích, které by usnadňovaly člověku život, jsou vedeny záznamy už daleko před prvním zmíněním slova robot. Již v dobách průmyslové revoluce se totiž myšlenky většiny lidstva, vyčerpaného z tvrdé práce, upíraly k možné úlevě v podobě strojů nebo bytostí, které by za člověka pracovaly nebo automaticky vykonávaly danou činnost.

Z dnešního pohledu je robot nedílnou součástí života člověka. Většina výrobků, které jsou dnes používány, byla vytvořena s využitím automatizovaných výrobních linek, jejichž součástí je nepřehledné množství specializovaných robotů.

Robot v dnešní době může zastávat velké množství manuálních prací, jako je například práce montéra, který přesně umístí a upevňuje konkrétní komponenty v daném prostoru, nebo práce kontrolora, který díky určitému vnímání okolního cíleného prostoru dokáže identifikovat řadu vad výrobku a dané výrobky později označit nebo přímo vyřadit z výroby.

Roboty mají díky jejich pokročilému vývoji, technickým možnostem a možnému nahrazení člověka v nebezpečných nebo silově náročných úlohách, velký potenciál použití právě v průmyslových aplikacích.

## 1.1 ROBOT

Jak bylo naznačeno v předchozí části, tak si lze robota představit jako určité zařízení, které je schopné nezávisle na okolí modifikovat prostor. Aby bylo možné docílit takové vlastnosti, tak musí robot znát svůj stav a také stav svého okolí, a potom možnosti jeho akcí, které jsou podmíněny určitými definovanými pravidly.

Z hlediska složitosti je robot komplexním systémem, ve kterém se protínají různé vědní obory a který se skládá z mnoha subsystémů.



Jedním ze subsystémů může být mechanický systém (konstrukční řešení robota), který standardně obsahuje mechanické komponenty jako kola, nohy, ramena, paže a mnoho dalších. Navazujícím subsystém na mechanický systém je hnací aparát, který pohání mechanické komponenty a zajištěním pohybu pak určuje nové pozice jednotlivých mechanických částí v prostoru. Pro možnosti přesného řízení umístění jednotlivých mechanických komponent je potřeba zjistit přesné informace o stavech robota nebo o jeho okolí, což lze označit jako subsystém vnímání. Jako další subsystémem by mohl být označen řídicí systém, který zajišťuje inteligentní propojení mezi jednotlivými subsystémy. (Cvejn, 2015)

Dle zpracovanosti řešení jednotlivých subsystémů se později odvíjí celkové možnosti uplatnění robota v reálných podmínkách. V závislosti na různých výsledných vlastnostech, kterými jsou například přesnost nebo rychlost vykonání daného úkonu, mohou být roboty členěny do odvětví, ve kterých se používají. Extrémně přesné roboty jsou například potřeba obecně v lékařství nebo biomedicině, kde i desetiny milimetru mohou způsobit fatální následky. Jedním z nejvíce využívaných odvětví je průmysl, jehož specifika budou zmíněna v následujícím pododdílu.

## 1.2 PRŮMYSLOVÉ ROBOTY

Robotika prvotně našla své uplatnění právě v průmyslu, v podobě automatizovaných výrobních linek, systémů dopravníků, manipulátorů, obráběcích strojů, ale také mobilních robotů, které se dokážou nezávisle pohybovat v prostoru a řešit tak například dispoziční uspořádání materiálu ve skladu.

Průmyslové roboty lze tedy volně klasifikovat do různých kategorií. Kategorie mohou být odvozovány podle různých vlastností nebo aspektů chování či vnímání. Roboty mohou být v základu děleny na mobilní, které se mohou samovolně pohybovat v prostoru a na statické, které mají pevné uložení v daném prostoru – mají pevnou základnu. Dalším možným kritériem pro kategorizaci je řazení podle počtu stupňů volnosti. Standardně jsou uvažovány roboty se dvěma nebo třemi stupni volnosti, které se často používají na úlohy obrábění materiálu, ale také roboty například s šesti stupni volnosti, které jsou vhodnější pro specifické manipulační úlohy. Novým trendem jsou dokonce i roboty s deseti a více stupni volnosti, které mají snahu se přibližovat reálným pohybovým soustavám zvířat nebo samotných lidí.

Na členění robotů může být nahlíženo z mnoha různých úhlů. V rámci této práce však bude zdůrazněn pohled na statické roboty, sloužící k polohování koncové části a zajištění pohybu po určité definované trajektorii, které lze souhrnně označit jako manipulátory.

## 2 ROBOTICKÉ MANIPULÁTORY

Robotické manipulátory jsou hojně využívány v průmyslových aplikacích. Často jsou voleny kinematically redundantní manipulátory, které zajišťují vyšší flexibilitu a menší vliv omezení. Důležitou součástí robotických manipulátorů je jejich mechanický systém, který určuje možnosti při různých průmyslových aplikacích.

### 2.1 Mechanický systém robota

Mechanická struktura manipulátorů se skládá z posloupnosti pevných těles, které jsou spojeny klouby. Manipulátory mají tři základní části. První částí je paže, která zajišťuje umístění zápěstí do požadované polohy. Druhou částí je zápěstí, které zajišťuje správnou orientaci koncového efektoru v prostoru. Poslední částí je koncový efektor, což je nástroj, kterým je vykonávána požadovaná činnost. (Cvejn, 2015)




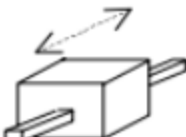

Základními strukturami jsou otevřený a uzavřený kinematický řetězec. V otevřeném kinematickém řetězci existuje pouze jedna cesta od prvního členu až k poslednímu členu kinematického řetězce. V uzavřeném kinematickém řetězci posloupnost členů vytváří smyčku.

Jednou z hlavních součástí robota jsou klouby, které zajišťují mobilitu jednotlivých částí robota. Klouby mohou být posuvné a rotační. Počet kloubů ovlivňuje počet stupňů volnosti neboli počet nezávislých souřadnic, které popisují polohu kinematického řetězce. Z daného vyplývá, že pro dosažení libovolné polohy v prostoru, který je popsán třemi souřadnicemi, musí řetězec mít minimálně tři stupně volnosti. U otevřených kinematických řetězců každý jeden kloub poskytuje dané struktuře jeden stupeň volnosti.

V odborné literatuře se pro označení počtu stupňů volnosti používá zkratka DOF, která je vytvořena z úvodních písmen anglického výrazu „degrees of freedom“.

Jednotlivé části kinematického řetězce musí být vzájemně propojeny, dochází zde k určitému styku a určité stykové vazbě, která je nazývána jako kinematická dvojice. Kinematická dvojice vymezuje možnosti vzájemného pohybu dvou mechanických členů. Existují různá provedení kinematických dvojic zajišťujících pohyb v podobě rotace nebo translace. Na kinematickou dvojici a kloub je pohlíženo jako na ekvivalentní výrazy, které popisují shodnou funkci. Kinematická dvojice však popisuje spojení s jakýmkoliv počtem stupňů volnosti, zatímco kloub v uvažované koncepci popisuje spojení s jedním stupněm volnosti. Kloub je tedy určitou podmnožinou kinematické dvojice. Přehled některých standardních kinematických dvojic je popsán v tab. 2.1.

Tab. 2.1 – Základní kinematické dvojice (Kauler, 2016)

Název kinematické dvojice	Schéma	Počet stupňů volnosti (DOF)
Rovinná		3 DOF (2 translační a 1 rotační)
Sférická		3 DOF (rotační)
Rotační		1 DOF (rotační)
Translační		1 DOF (translační)
Nepohyblivý spoj		0 DOF

### 2.1.1 Parametry robotů

Mezi elementární parametry robota patří jeho pracovní prostor. Pracovní prostor je souvislá množina bodů v prostoru, do kterého může být umístěn koncový efektor. Pracovní prostor je ovlivněn strukturou manipulátoru a omezením rozsahů polohy kinematických dvojic. Na pracovní prostor lze nahlížet jako na dosažitelný, což je množina bodů, kterých může koncový efektor dosáhnout s alespoň jednou orientací efektoru. Dále rozlišujeme prostor „obratnosti“, kterým je množina dosažitelných bodů s libovolnou orientací efektoru.

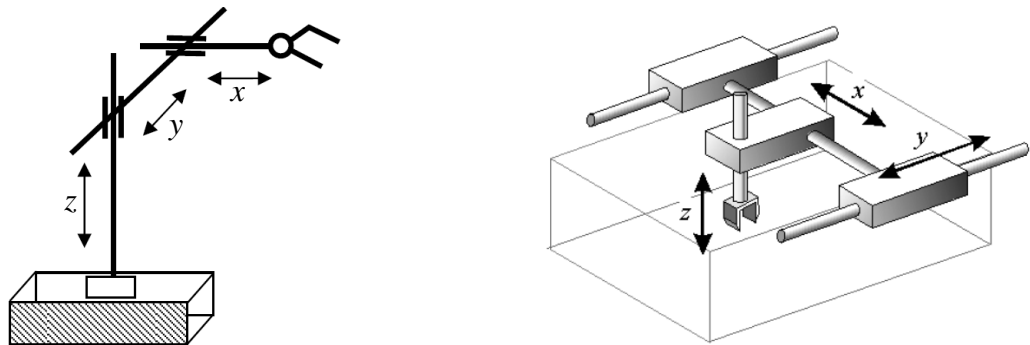
Jednou z dalších vlastností je přesnost robota, kde je rozlišována absolutní přesnost a tzv. opakovaná přesnost, která popisuje přesnost při návratu do stejné pozice. (Cvejn, 2015) V závislosti na geometrickém uspořádání kinematického řetězce a na technologiích senzorické části může přesnost být nekonstantní v rámci jednotlivých částí operačního prostoru robota.

Dalším důležitým parametrem je konstrukční provedení kinematických dvojic, které značně ovlivňuje tuhost a nosnost robota. Větší tuhost je většinou zajištěna paralelními systémy. Nosnost robota se výrazně odvíjí od konstrukčního řešení robota a od použitých materiálů pro výrobu robota, ale také od použitých pohonů, které celý mechanický systém uvádějí do pohybu.

Roboty mohou mít určité specifické uspořádání kinematického řetězce a v závislosti na daném uspořádání je ovlivněna geometrie pracovního prostoru robota. Dle různé geometrie pracovního prostoru a konstrukčního uspořádání mohou být specifikovány různé typy robotů.

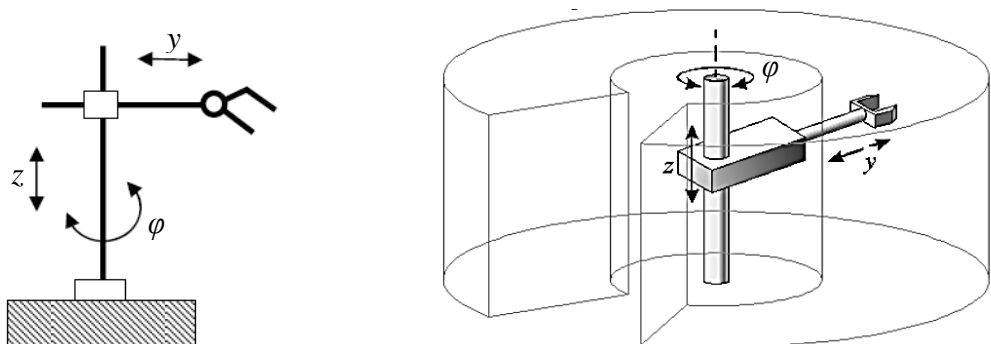
### 2.1.2 Základní typy robotů

Jedním z robotů, jenž je pojmenován podle geometrie pracovního prostoru, je kartézský robot, který je tvořen ze tří translačních kloubů, kde jednotlivé osy robota jsou vzájemně ortogonální, čímž je tvořen kartézský souřadný systém. Jeho přesnost v rámci pracovního prostoru je konstantní. Při tzv. portálové konfiguraci vykazuje vysokou tuhost a schopnost manipulace s těžkými předměty. Kartézský robot nemění orientaci manipulovaného objektu. Příklady geometrických uspořádání kartézských robotů jsou znázorněny na obr. 2.1.



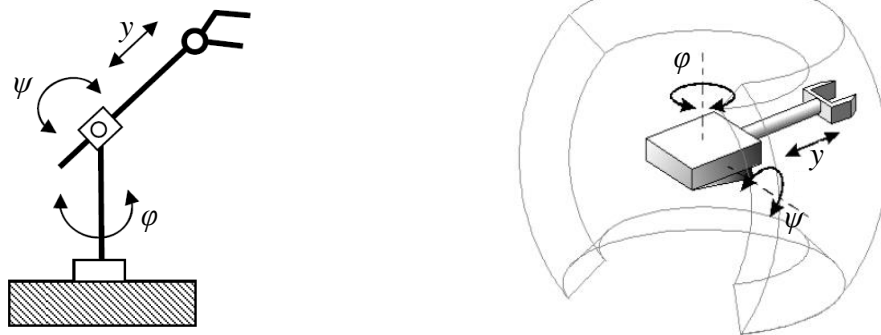
Obr. 2.1 – Uspořádání kartézského robota (Cvejn, 2015; Tyson, 2013)

Dalším základním typem robota, dle geometrie pracovního prostoru, je cylindrický robot, jehož první kloub, který spojuje robota s podstavou, je rotační a zbylé dva jsou posuvné. Jelikož dochází k rotaci kolem jedné osy, tak se průběžně mění orientace manipulovaného objektu. Při linearitě snímačů polohy se s vysunutím ramene úměrně snižuje přesnost robota. Vytváří určitý válcový souřadný systém, který lze jednoduše převést na kartézský systém. Příklady geometrického uspořádání cylindrického robota jsou znázorněny na obr. 2.2.



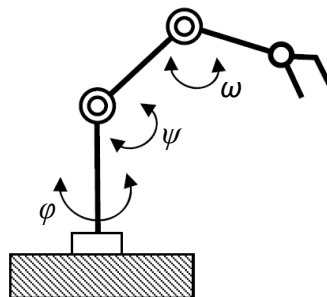
Obr. 2.2 – Uspořádání cylindrického robota (Cvejn, 2015; Tyson, 2013)

Při nahrazení dalšího translačního kloubu za kloub rotační, bude pozměněna geometrická struktura pracovního prostoru cylindrického robota, která bude vykazovat tvar části koule. Robot s takovým pracovním prostorem je nazýván jako sférický robot. Hlavní výhoda sférického robota oproti robotu cylindrickému spočívá v možnosti umístění koncového efektoru do prostoru pod robota samotného a nad jeho podstavu. Obdobně jako u cylindrického robota není přesnost sférického robota konstantní v celém jeho pracovním prostoru, ale snižuje se úměrně s vysunutím ramene. Ukázka základního geometrického uspořádání a pracovního prostoru sférického robota je zobrazena na obr. 2.3.



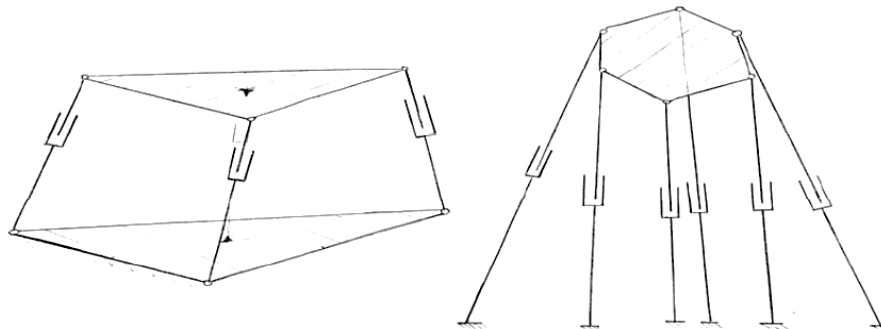
Obr. 2.3 – Uspořádání sférického robota (Cvejn, 2015; Tyson, 2013)

Mezi hojně využívané roboty v průmyslu patří antropomorfní robot, který je tvořen ze tří rotačních kloubů, přičemž osa otáčení prvního kloubu je ortogonální ke zbývajícím dvou osám rotace kloubů, které jsou spolu rovnoběžné. Daná konfigurace dosahuje značně vyšší obratnosti a vykazuje vyšší rozsah pracovního prostoru vzhledem ke své velikosti. Přesnost antropomorfního robota opět není konstantní v rámci celého operačního prostoru. Redundantní antropomorfní roboty jsou nejčastější konfigurací využívanou pro manipulační účely. Geometrické uspořádání antropomorfního robota je zachyceno na obr. 2.4.



Obr. 2.4 – Uspořádání antropomorfního robota (Cvejn, 2015)

Kromě specifických typů manipulátorů sériových struktur existují také různé typy manipulátorů se strukturou paralelní, které tedy vytvářejí uzavřený kinematický řetězec. Mezi takové manipulátory například patří delta robot a tripod, které jsou složeny ze tří paralelních řetězců anebo hexapod, tvořen ze šesti paralelních řetězců. Tripod a hexapod jsou manipulátory se vzpěrnou strukturou. Znázornění tripodu a hexapodu je zachyceno na obr. 2.5.



Obr. 2.5 – Znázornění struktury tripodu a hexapodu (Kohout, 2008)

Jak bylo již zmíněno, mezi výhody paralelních struktur patří vyšší tuhost a možná vyšší přesnost polohování. Přesnost v rámci částí pracovního prostoru je však nekonstantní. Jelikož u daných systémů může docházet ke kolizím různých částí, samotný pracovní prostor robota je silně specifický a přepočty do strojového prostoru robota jsou výpočtově náročné, tak je kladen důraz na rychlost zpracování matematických operací v řídicím systému a na samotný řídicí systém.

## 2.2 Hnací aparát robota

Jedním z důležitých subsystémů je hnací aparát, který zajišťuje pohyb jednotlivých komponent robota. Hnací aparát je složen z jednotlivých pohonů. V závislosti na počtu stupňů volnosti robota je potřeba některé klouby opatřit pohonem, kde standardně jeden pohon zajišťuje možný pohyb s jedním stupněm volnosti.

Manipulátory tedy disponují dvěma typy kinematických dvojic. Jedním typem jsou kinematické dvojice, resp. klouby, které jsou poháněné a mají díky pohonu přesně definované možnosti pohybu dvou spojených částí. Druhým typem jsou kinematické dvojice bez pohonu, které ve struktuře navazují na části, které jsou poháněné. S druhým typem kinematických dvojic se nejčastěji setkáme u paralelních struktur, kde se jedná o středové prvky v kinematické struktuře.

Pohony jsou složeny z různých částí, kterými jsou přívod energie, výkonový zesilovač, motor a převodovka. Jednotlivé složky pohonu jsou různě významné a některé složky se v pohonu vyskytovat nemusí, ale většina řízených pohonů je z nich složena.

### 2.2.1 Části pohonů

Jednotlivé pohony mohou být realizovány s využitím různých veličin a principů. Nejčastěji jsou uvažovány pohony elektrické, pneumatické a hydraulické.

První částí pohonu robota je přívod energie, který je povětšinou zajišťován rozvodnou elektrickou sítí nebo zdroji stejnosměrného napětí, vzduchovými zásobníky nebo tlakovými čerpadly pro hydraulická média.

Další částí pohonu jsou výkonové zesilovače, které dokáží transformovat informaci z řídicího signálu na veličinu pohánějící motor, která ovlivňuje výstupní veličiny motoru jako je hnací moment nebo rychlost otáčení. U elektrických pohonů se jako výkonové zesilovače používají různá zapojení s výkonovými tranzistory nebo přímo integrovanými čipy, které v sobě výkonové tranzistory obsahují spolu s potřebnou logikou pro možnosti řízení pohonu. V případě hydraulických a pneumatických pohonů jsou používány výkonová čerpadla a zásobníky schopné uchovávat tlakovou energii. (Cvejn, 2015)

Nejdůležitější částí pohonu je motor, který zajišťuje vykonávání potřebné mechanické práce. Elektrické motory využívají účinků elektrické energie a transformují ji na mechanickou práci. Dále jsou využívány hydraulické motory, jež energii hydraulického média stlačeného v zásobníku převádějí na mechanickou práci. Obdobně i pneumatické motory využívají energii stlačeného média, kterým je v tomto případě vzduch, kterou transformují na mechanickou práci v podobě rotace turbíny nebo posunu pístu. V robotice jsou nejčastěji používány elektrické motory a hydraulické motory, které nacházejí uplatnění v aplikacích, kde jsou kladeny vysoké nároky na nosnost robotického systému. Pneumatické motory jsou často používány pro realizace uchopovacích prvků.

Motory pro účely robotiky by měly splňovat některá důležitá kritéria vzhledem k použitému kinematickému řetězci a také pro potřeby dané aplikace. Obecně by motory měly mít nízkou hmotnost a zajišťovat vysoký poměr výkonu ku hmotnosti, schopnost vysokých zrychlení, ideální rozsah rychlostí, ale také vysokou přesnost nastavení poloh.

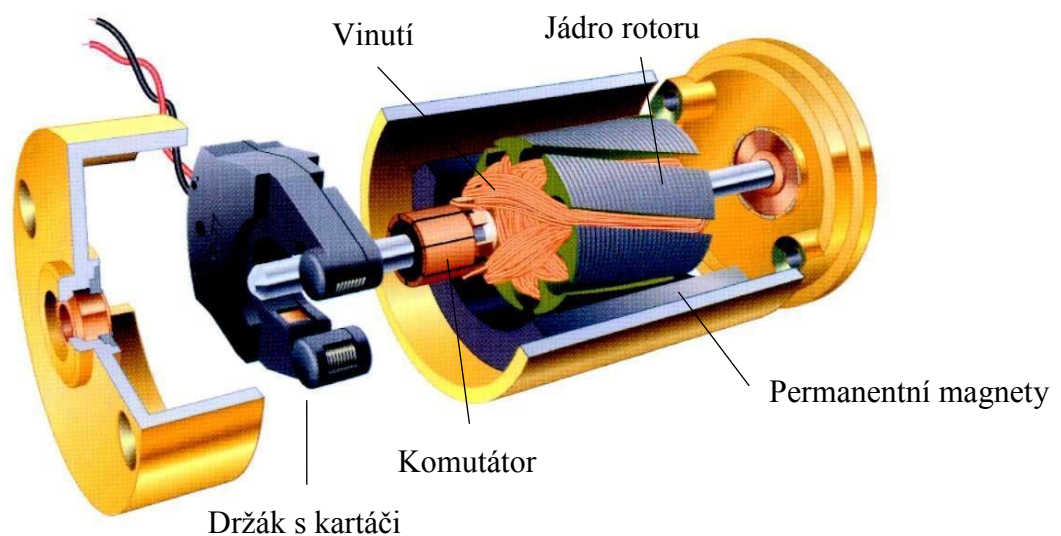
Poslední součástí pohonu je převodovka. Převodovka zajišťuje převod vysokých otáček s nízkým momentem na hřídeli motoru na nižší otáčky s vyšším momentem na hnací hřídeli vycházející z převodovky. Jelikož se jedná o mechanické prvky, tak v rámci jednotlivých převodů dochází k určité pružnosti převodových částí a v systému vznikají vůle. Výsledné mechanické vlastnosti pohonu jsou užitím převodovky zhoršeny, jelikož dochází ke ztrátám výkonu vlivem vzniklého tření v jednotlivých převodech. Výhodou převodovek je značné potlačení nelinearity motorů. Potlačení nelinearity je vhodné pro potřeby řízení. (Cvejn, 2015)

### 2.2.2 Přehled používaných motorů

Mezi hojně používané elektrické motory patří stejnosměrný motor s permanentními magnety, který obsahuje tři základní části:

- rotor s vinutím nejčastěji v podobě měděného drátu,
- stator vytvořený z feromagnetických látek vytvářející stálé magnetické pole,
- komutátor, který zajišťuje přepínání fáze vinutí rotoru k napájení dle jeho polohy.

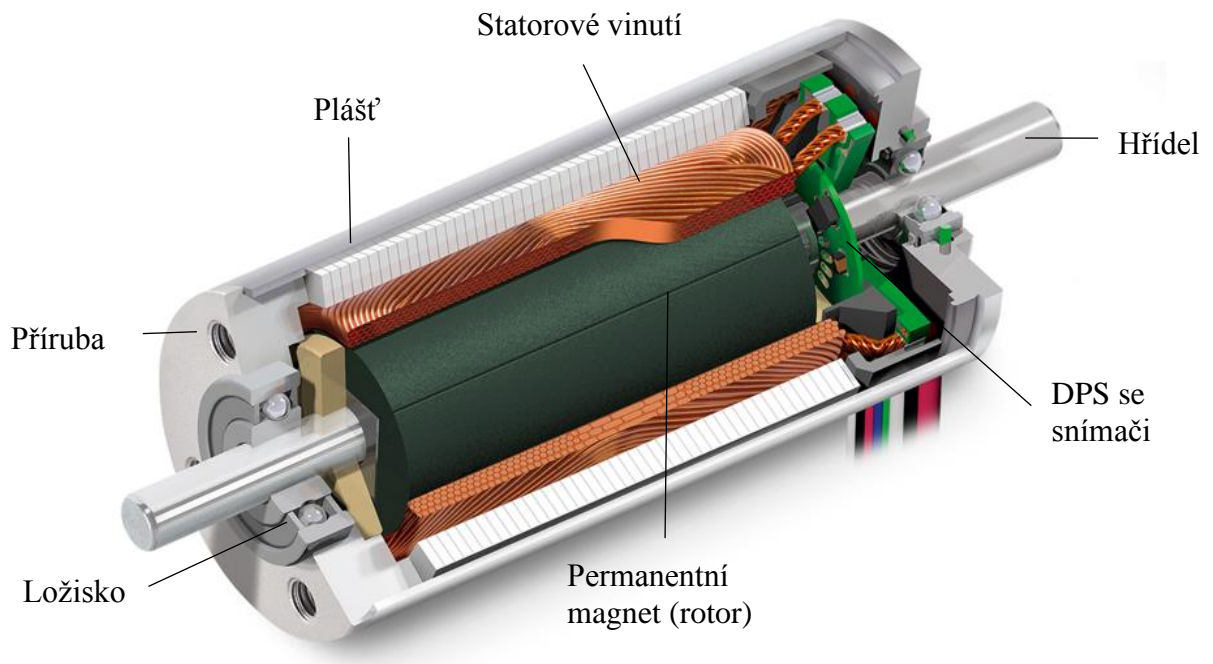
V cívkách rotoru se vytváří magnetické pole, které interaguje s homogenním magnetickým polem permanentních magnetů statoru, kde danou interakcí dochází k rotačnímu pohybu rotoru. Při rotaci rotoru postupně dochází k ustálení celkového magnetického pole, kde se póly permanentního magnetu a póly vybuděného magnetického pole rotoru vyskytnou v opačné polaritě a začnou se přitahovat. Komutátor poté zajistí připojení napájení opačné fáze k rotoru, což vybudí opět pole, které vlivem odpudivých sil způsobí rotaci rotoru. Řez stejnosměrným motorem s permanentními magnety je znázorněn na obr 2.6.



Obr. 2.6 – Řez DC motorem s permanentními magnety (Malěř, 2016)



Dalšími používanými elektrickými motory jsou bezkartáčové stejnosměrné motory, které mají rotor tvořen z permanentního magnetu, stator obsahující vinutí, které je přímo připojené k napájení, a snímač polohy rotoru. Přepólování napájení je v tomto případě realizováno elektronicky s využitím informace ze snímače polohy rotoru. Nedochází zde ke kontaktní komutaci, díky čemuž lze motor vytvořit s lepším poměrem výkonu ku hmotnosti. Řez bezkartáčového motoru je zobrazen na obr. 2.7.

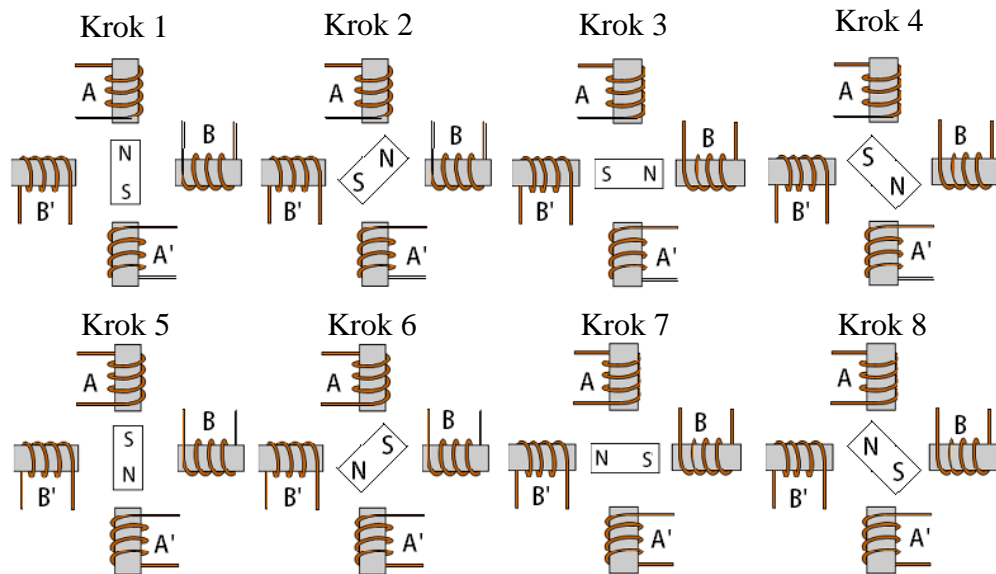


Obr. 2.7 – Bezkartáčový DC motor (Maxon, 2013)

Jedním z dalších používaných elektrických motorů je krokový motor. U krokového motoru se stator skládá z několika dvojic cívek, rotor potom ze sad trvalých magnetů. Krokový motor je synchronní stroj, jehož rotor zachovává rychlost točivého magnetického pole statoru. Magnetické pole statoru vzniká postupným zapínáním jednotlivých cívek statoru. V závislosti na principu krokových motorů lze různě realizovat jejich řízení, spouštěním jednotlivých cívek ve specifických pořadích, která jsou označována jako krokovací sekvence.

První možnou krokovací sekvencí je jednofázová řídicí sekvence, ve které je vždy aktivní pouze jedna fáze (jedna cívka) a zbylé jsou neaktivní. Při každém dalším kroku je cívka, která byla v předchozím kroku spuštěna, deaktivována a následně je spuštěna cívka následující v pořadí.

Další možností je dvoufázová krokovací sekvence, kde jsou vždy aktivní dvě sousední cívky a zbylé jsou neaktivní. Kombinací zmíněných krokovacích sekvencí vzniká sekvence řízení s polovičním krokem, která zajišťuje dvojnásobný počet kroků a tím i větší citlivost a přesnost polohování. Nevýhodou sekvence řízení s polovičním krokem je nekonstantní statický moment motoru. (Siddharth, 2013) Znázornění krokování s polovičním krokem je znázorněno na obr. 2.8.



Obr. 2.8 – Krokování s polovičním krokem (Siddharth, 2013)

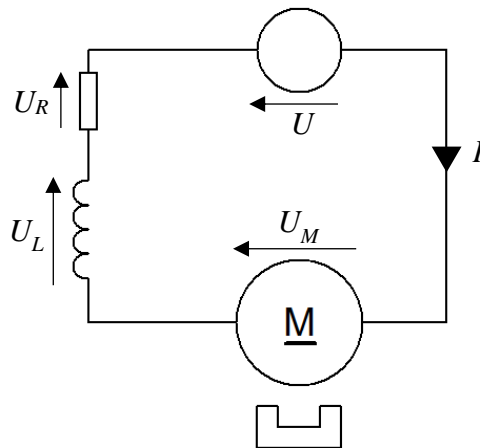
### 2.2.3 Převodovky

Poslední důležitou částí pohonu jsou převodovky. Ozubené převodovky jsou častým řešením pro převádění rychlosti otáčení hřídele a působícího momentu. Jejich výhodou je možnost vysokých převodových poměrů při zachování malých rozměrů. Jako ozubené převodovky se často používají planetové nebo harmonické převodovky. Dalším možným převodovým systémem jsou vodicí šrouby, které převádějí rotační pohyb motoru na pohyb lineární, nebo ozubené řemeny, jejichž hlavní nevýhodou je vysoká pružnost. (Cvejn, 2015) V neposlední řadě jsou pro převádění používány kombinace různě velkých ozubených kol a řetězu, který je na ozubených kolech umístěn.

Vzhledem k technologickému pokroku jsou v současnosti vyráběny motory schopné přímého připojení na hnací hřídel, což odstraňuje možné problémy s vůlemi v převodech, ale přináší vyšší nároky na řízení motoru vzhledem k nelinearitám jeho dynamiky.

## 2.2.4 Matematický model stejnosměrného motoru

Z hlediska matematického modelu jsou stejnosměrný bezkartáčový motor a stejnosměrný motor s permanentními magnety ekvivalentní. (Cvejn, 2015) Pro model stejnosměrného motoru bude použito náhradní schéma stejnosměrného motoru s permanentními magnety, které je znázorněno na obr. 2.9.



Obr. 2.9 – Náhradní schéma DC motoru (Štursa, 2014)

Pro odvození vztahů elektromechanických vlastností se vychází ze soustavy rovnic, kde první rovnice popisuje soustavu konající rotační pohyb

$$M_d + M_z = M_m, \quad (2.1)$$

kde  $M_d$  – dynamický moment, N·m,

$M_z$  – moment zátěže, N·m,

$M_m$  – moment motoru, N·m.

Druhá rovnice popisuje napěťové vztahy elektrického obvodu

$$U_M + U_L + U_R = U, \quad (2.2)$$

kde  $U_M$  – napětí na rotoru, V,

$U_L$  – indukované napětí, V,

$U_R$  – napětí na rezistoru, V,

$U$  – napětí zdroje, V,

Do dané soustavy rovnic lze dále doplnit vztahy, které odpovídají jednotlivým momentům a napětím a vznikne nová soustava rovnic

$$J_A \cdot \frac{d\omega}{dt} + b \cdot \omega = K \cdot I, \quad (2.3)$$

$$K \cdot \omega + L \cdot \frac{dI}{dt} + R \cdot I = U, \quad (2.4)$$

kde  $J_A$  – moment setrvačnosti,  $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ ,  
 $\omega$  – úhlová rychlost,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  
 $t$  – čas, s,  
 $b$  – součinitel tření,  $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  
 $K$  – elektromotorická konstanta,  $\text{N}\cdot\text{m}\cdot\text{A}^{-1}$ ,  
 $I$  – elektrický proud, A,  
 $L$  – indukčnost cívky, H,  
 $R$  – elektrický odpor,  $\Omega$ ,  
 $U$  – napětí zdroje, V.

Předchozí soustava rovnic 2.3 a 2.4 odpovídá zjednodušenému matematickému modelu motoru s úhlovou rychlostí. Pro potřeby sledování úhlu natočení lze soustavu rovnic upravit nahrazením úhlové rychlosti za úhel natočení následujícím vztahem

$$\omega = \frac{d\varphi}{dt}, \quad (2.5)$$

kde  $\omega$  – úhlová rychlost,  $\text{rad}\cdot\text{s}^{-1}$ ,  
 $\varphi$  – úhel natočení, rad,  
 $t$  – čas, s.

## 2.3 SYSTÉMY VNÍMANÍ ROBOTA

Pro správnou funkci robota je potřeba zajistit, aby byl robot schopen určit, kde se jeho jednotlivé součásti nacházejí v rámci jeho pracovního prostoru. Robot může takové informace získávat díky systému vnímání. Vzhledem k potřebám různých aplikací může být potřeba, kromě sledování vnitřních stavů robota, navíc sledovat i stav okolí robota. Z hlediska místa pozorování mohou tedy být sledovány informace o vnitřních stavech robota, které jsou získávány proprioceptivními snímači, nebo informace o stavu okolí robota, což je zajištěno exteroceptivními snímači.

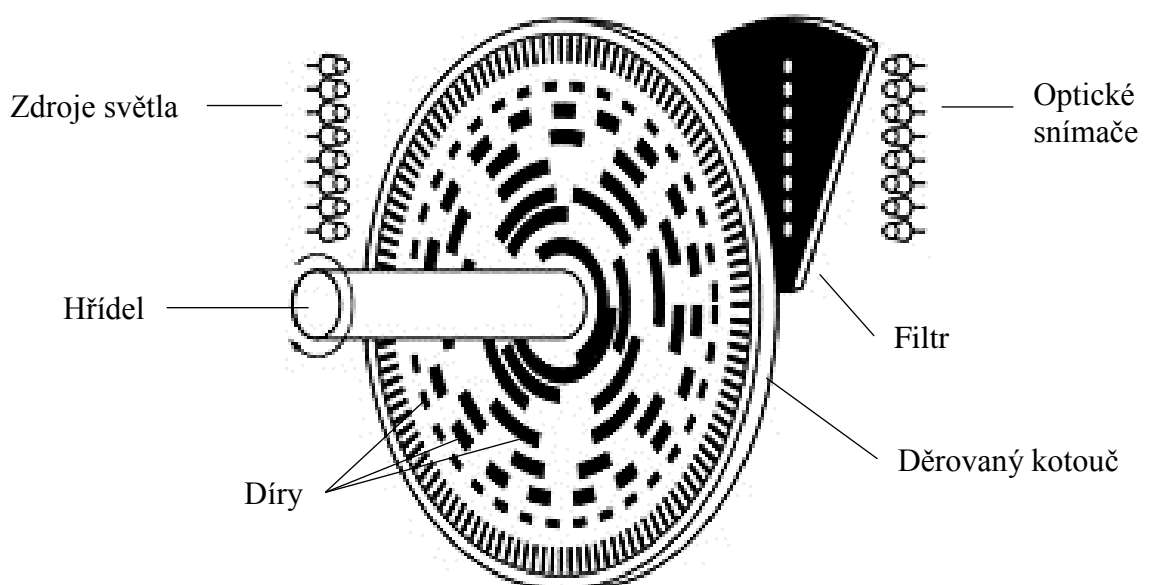
Proprioceptivní snímače mohou poskytovat informace o poloze kloubů, rychlosti otáčení či posuvu kloubu, ale také například o hnacích momentech jednotlivých pohonů. Exteroceptivní snímače poskytují informaci o stavu okolí robota prostřednictvím snímačů působící síly, senzorů dotyku, senzorům detekce překážek, resp. vzdálenosti k překážkám nebo dále senzory strojového vidění zajištěného např. kamerovými systémy. (Cvejn, 2015)

### 2.3.1 Přehled používaných proprioceptivních snímačů

Proprioceptivní snímače jsou nutnou součástí každého robota, protože s jejich pomocí jsou měřeny např. úhly natočení jednotlivých poháněných kloubů, čímž je robotu známa pozice jeho mechanické struktury a robot tak dokáže určit aktuální místo umístění koncového efektoru v jeho pracovním prostoru. Jelikož jsou pohony nejčastěji rotační a případně později pomocí převodu převedeny na translační pohyb, tak bude poukázáno na rotační snímače.

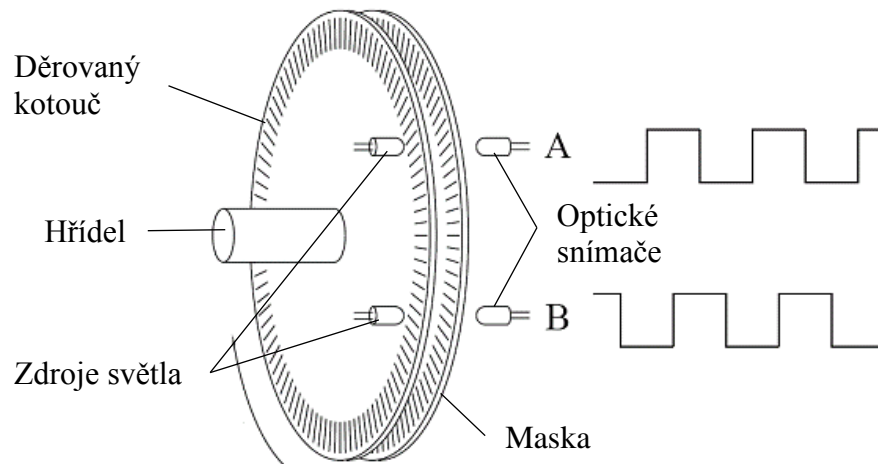
Pro snímání polohy se nejčastěji používají optické enkodéry. Enkodéry lze rozdělit do dvou skupin. První skupinou jsou absolutní snímače, které udávají absolutní polohu hřídele. Druhou skupinou jsou relativní snímače, které udávají relativní polohu natočení hřídele oproti počátečnímu stavu, resp. okamžiku, kdy bylo zahájeno pozorování.

Oba druhy optických snímačů jsou složeny ze zdroje světla, speciálního děrovaného kotouče a optických snímačů. V případě absolutního snímače obsahuje děrovaný kotouč přesnou sekvenci různě velkých děr po celém obvodu a v různých vzdálenostech od středu tak, aby odpovídala určité binární kombinaci, ze které je poté možno určit absolutní polohu natočení hřídele dle přesnosti snímače. Princip absolutního snímače je znázorněn na obr. 2.10.



Obr. 2.10 – Princip absolutního snímače polohy (Tamagawa, 2018)

Relativní snímače obsahují pouze dvě řady děrování, jejichž rozestupy jsou stejně velké po celém obvodu kotouče. Při přejetí světla nad dírou je zaznamenán pulz. Při vygenerovaném pulzu je třeba inkrementovat čítač, ve kterém je uchován celkový počet proběhlých pulzů. Dle daného počtu pulzů a rozlišení enkodéru je znám relativní úhel natočení vzhledem k původní pozici. Druhá řada děrování je fázově posunuta díky čemuž lze identifikovat směr otáčení. Při identifikaci sestupných a náběžných hran impulzů je možné čtyřikrát zvýšit přesnost snímače. Princip relativního snímače je zachycen na obr. 2.11.



Obr. 2.11 – Princip relativního snímače polohy (Lynch, 2010)

Dalšími snímači jsou tzv. resolvery, které se skládají z rotoru a statoru. Rotor je napájen sinusovým signálem a stator obsahuje dvě vinutí kolmé na sebe, ve kterých se indukuje napětí s amplitudami, které odpovídají úhlu pootočení rotoru vůči statoru. Jedná se o snímač vracející absolutní polohu v rozsahu od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ . (Cvejn, 2015)

## 2.4 ŘÍDICÍ SYSTÉM ROBOTY

Řídicí systém robota zajišťuje propojení mezi jednotlivými částmi systému vnímání a jednotlivými pohony, zpracovává potřebné informace a plánuje cestu pohybu v reakci na požadované úkony. Na základě zadávaných cílových bodů v operačním prostoru řídicí systém přepočítává potřebné hodnoty pro úhly natočení pro pohony v prostoru strojových souřadnic. Jelikož je robot komplexní celek, tak můžeme řídit jednotlivé části centralizovaně, s ohledem na ostatní části, nebo decentralizovaně, kde může docházet ke konkurenčním stavům mezi jednotlivými částmi. Roboty standardně využívají zpětnovazebného řízení.

### 2.4.1 Plánování pohybu

Základním problémem řídicího systému robota je plánování pohybu koncového efektoru, které je možno realizovat různými způsoby. Problém plánování trajektorie lze rozdělit na problém plánování ve strojovém prostoru a v operačním prostoru. Trajektorie je závislostí cesty pohybu na čase pohybu.

V případech, kdy operační prostor a strojový prostor jsou lineární, tak lze do strojového prostoru přepočítávat pouze některé specifické body a zbylé body cesty dopočítat obdobně jako byly vypočítány pro operační prostor. Výhodou robotů, které disponují touto vlastností, jsou právě snížené nároky na výpočetní výkon, jelikož nejsou pro každý bod realizovány složité převodní výpočty, ale tyto výpočty jsou realizovány pouze pro specifické body.

Často jsou zadávány pouze parametry pohybu v podobě počátečního a koncového bodu, pomocí sekvence bodů nebo pomocí zadání přesunu z aktuální pozice do koncového bodu bez znalosti průběhu rychlosti. V takových případech musí robot obsahovat robustní řídicí systém. Ideální stav pro výpočet trajektorie nastává při znalostech cesty a požadovaného rychlostního profilu, kde mohou být zadávány počáteční a koncové body, počáteční rychlost a koncová rychlost.

Pro spojitý průběh trajektorie je požadováno, aby počáteční a koncová rychlost byla nulová, což zajistí pozvolné přesunutí z počáteční polohy a hladký dojezd koncového efektoru do polohy koncové.

## 3 DELTA ROBOT

Delta robot je speciální typ robotického manipulátoru, jehož kinematický řetězec je uzavřený a jehož kinematická struktura je paralelní. Z hlediska struktury obsahují delta roboty tři shodné vodící řetězce, které jsou vůči sobě vzájemně otočené vždy o  $120^\circ$ . Díky danému vzájemnému otočení tvoří propojené vrcholy částí rovnostranný trojúhelník, jehož tvar je podobný symbolu velkého řeckého písmene delta, z něhož byl pravděpodobně odvozen název pro „delta“ robota.

Vodící řetězce propojují základnu se zápěstím. Každý vodící řetězec je spojen jedním poháněným kloubem se základnou a dále obsahuje soustavu kinematických dvojic se dvěma stupni volnosti, kde jedna tato kinematická dvojice je spojena se zápěstím. Dle způsobu realizace poháněného kloubu lze delta roboty rozdělit do dvou základních skupin.

### 3.1 TYPY DELTA ROBOTŮ

První skupinou jsou delta roboty s lineárními pohony. Pro danou skupinu robotů se používají různé typy lineárních pohonů. Jedním z takových pohonů mohou být hydraulické písty nebo lineární elektromotory, které se principiálně podobají standardním elektromotorům s tím rozdílem, že je stator rozvinut do délky. Častěji využívanými lineárními pohony však jsou mechanické pohony, které využívají standardní elektromotory obsahující převodovou část, která rotační pohyb převádí na pohyb translační. Jedná se například o spojení šroubovice, kterou je otáčeno, a matice zafixované tak, aby se neotáčela spolu se šroubovicí, která se v závislosti na směru otáčení po šroubovici posouvá odpovídajícím směrem.

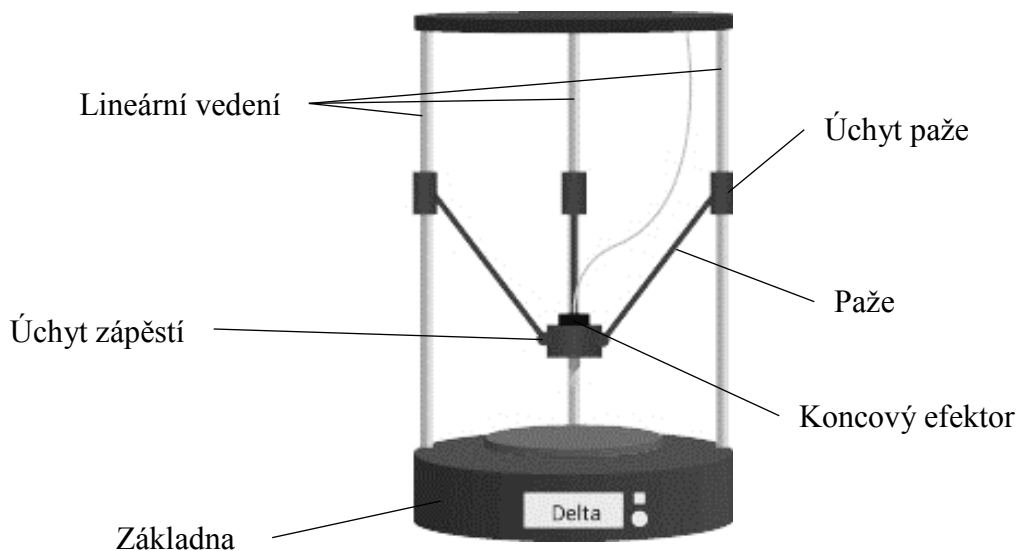
Druhou skupinou jsou delta roboty s rotačními pohony. Tato skupina tvoří převážnou většinu průmyslových realizací delta robota. Pro delta roboty jsou jako rotační pohony používány často používány servomotory, díky kterým lze jednoduše zajistit přesnou polohu úhlu natočení dané osy. Dále se používají bezkartáčové i kartáčové stejnosměrné elektromotory nebo také krokové motory, které jsou častěji používány spíše u neprůmyslových aplikací.

Obě skupiny mají různé vlastnosti a výhody oproti skupině druhé. Velkou výhodou delta robotů s lineárním pohonem je vyšší přesnost díky možnostem jemného převodu rotačního pohybu na pohyb posuvný. Jejich nevýhodou jsou větší rozměry oproti robotům s rotačními pohony pro zajištění stejného pracovního prostoru. Výhodou robotů s rotačními pohony je značně vyšší rychlost pohybu než u robotů s lineárními pohony.



### 3.1.1 Delta robot s lineárními pohony

Tyto roboty mají tzv. lineární vedení, na kterém je uchycena jedna soustava kinematických dvojic, která je po lineárním vedení posouvána. Daná soustava kinematických dvojic je vzpěrami propojena se soustavou kinematických dvojic připevněných k zápěstí robota. Model delta robota s lineárním pohonem je znázorněna na obr. 3.1.

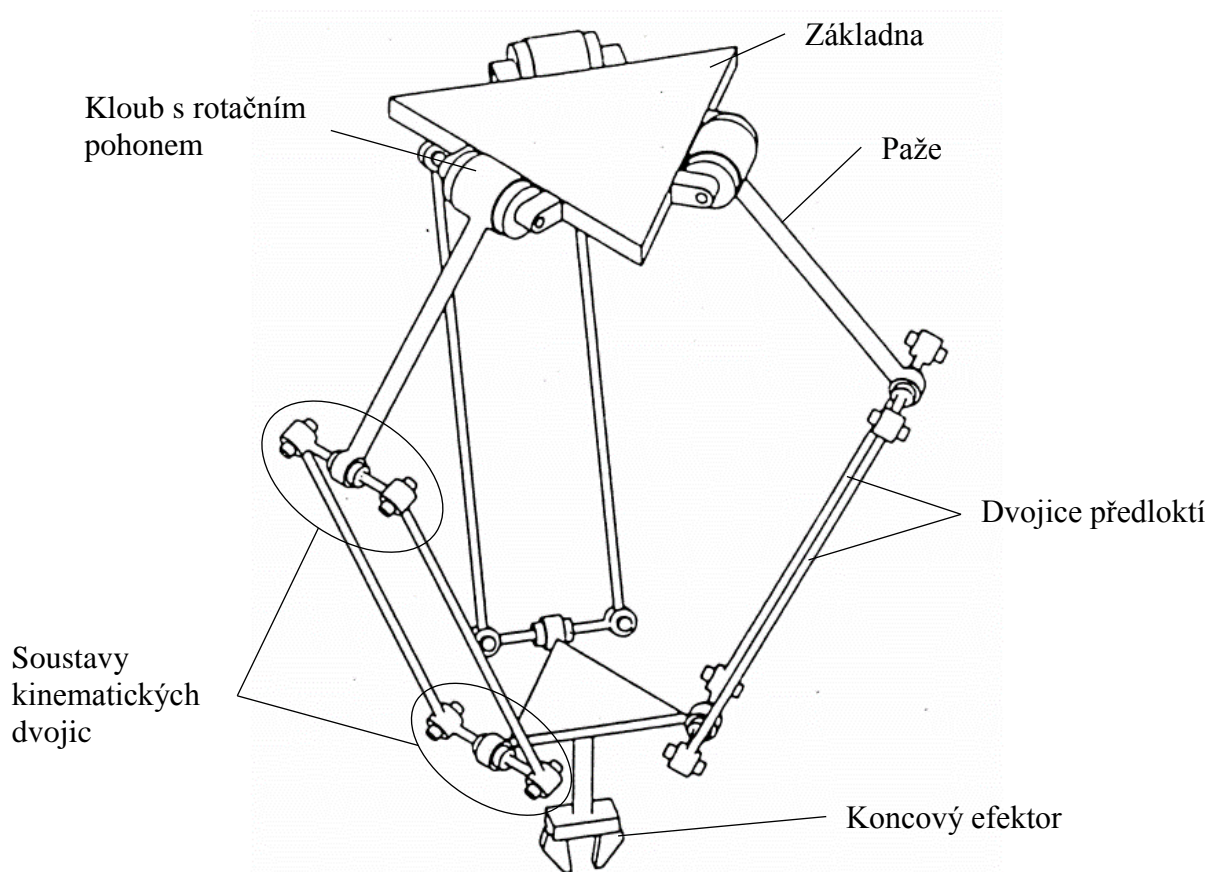


Obr. 3.1 – Model delta robota s lineárním pohonem (Spadaro, 2016)

Delta roboty s lineárními pohony se používají hlavně v aplikacích, kde je kladen důraz na přesnost polohování koncového efektoru bez potřeby jeho rychlého přesouvání. Ideálním odvětvím, ve kterém má delta robot s lineárními pohony uplatnění, je 3D tisk.

### 3.1.2 Delta robot s rotačními pohony

Tyto roboty mají jednotlivé pohony vodícího řetězce umístěny na základně robota. Od jednotlivých pohonů jsou vedeny paže, které mají na svém konci soustavu kinematických dvojic se dvěma stupni volnosti. Z dané soustavy kinematických dvojic dále pokračují jednotlivé dvojice předloktí, které jsou opět propojeny soustavou kinematických dvojic se zápěstím. U těchto robotů malé změny úhlu natočení jednotlivých pohonů generují velké změny polohy koncového efektoru. Vzhledem k tomuto faktu tyto roboty dosahují vysokých rychlostí pohybu koncového efektoru. Model delta robota s rotačním pohonem je zachycen na obr. 3.2.



Obr. 3.2 – Model delta robota s rotačními pohony (Clavel, 2014)

Tento typ delta robotů je díky rychlosti přesouvání koncového efektoru vhodný pro manipulační úlohy. Faktorem, který ovlivňuje rychlost robota, je délka jeho paží a předloktí, kde s kratšími pažemi a delšími předloktími je dosaženo vyšších změn polohy koncového efektoru při stejném úhlu natočení a tím také vyšších rychlostí. Přesnost robota se však většinou snižuje s rychlostí robota. Dalším faktorem vhodnosti robota pro specifickou manipulační úlohu je tvar jeho operačního prostoru, který je také ovlivněn délkami paží a předloktí.

Jelikož má tento robot standardně základnu nahoře a kinematický řetězec směřuje dolů, tak pro něj existují různé realizace dle způsobu a místa uchycení. V průmyslu se lze setkat s roboty, které mají stojnou konstrukční část, se kterou je robot pevně spojen, ale také s roboty, které mají připravené úchyty k namontování na již existující struktury. Dále existují roboty, které mají základnu uchycenou k podložce a jejich kinematický řetězec směřuje nahoru.

## 3.2 PŘEHLED POUŽÍVANÝCH DELTA ROBOTŮ

Delta roboty mají své uplatnění v průmyslu pro realizaci manipulátorů a 3D tiskáren. Pro ostatní aplikace, kde je na zápěstí vyvíjena velká torzní síla, jako například při frézování nebo jiném obrábění kovů, delta roboty většinou nejsou vhodné. Zvyšování tuhosti robota má za následek robustnější konstrukci s vyšší hmotností, která většinou není žádána, jelikož nepřiměřeně zhoršuje ostatní vlastnosti robota.

Problém zvyšování hmotnosti paží, předloktí a zápěstí se odvíjí od faktu, že jsou tyto části na sebe postupně zavěšeny, na všechny působí gravitační síla, potřebný výkon pohonu pro zajištění stálé pozice v daném úhlu natočení se neúměrně zvyšuje a potřebný moment otáčení pohonu při posuvu efektoru proti smyslu gravitační síly roste.

Výrobci delta robotů pro účely manipulace vyrábějí roboty dle různých řad, tříděných většinou podle nosnosti, počtu stupňů volnosti nebo velikosti operačního prostoru. V průmyslových aplikacích mají delta roboty nosnost v rozmezí od 0,5 kg do 12 kg. Dále většinou dokáží obsluhovat operační prostor se třemi, čtyřmi nebo šesti stupňů volnosti. Maximální dosahy delta robotů se standardně pohybují mezi 280 mm a 1200 mm.

Delta roboty lze z hlediska průmyslového uplatnění dělit podle počtu stupňů volnosti.

### 3.2.1 Dvouosé delta roboty s rotačním pohonem

Specifickou skupinou delta robotů jsou dvouosé delta roboty. Tyto roboty dokáží pohybovat zápěstím s jednou orientací pouze v rovině kolmé na osy pohonů. Pohony jsou umístěny vedle sebe a paže robota směřují od sebe, tedy opačným směrem. Pro zajištění stálé orientace efektoru je třeba zápěstí přichytit přes mechanickou komponentu k základně robota. Ukázka dvouosého delta robota je znázorněna na obr. 3.3.



Obr. 3.3 – Dvouosý delta robot s rotačním pohonem (Codian robotics, 2018)

### 3.2.2 Tříosý delta robot s rotačním pohonem

Skupina tříosých delta robotů s rotačním pohonem má své největší uplatnění v aplikacích zaměřených na úlohu třídění, kde orientace výrobku v dané rovině není sledována. Časté použití nacházejí například v aplikacích pro potravinářský průmysl, kde výrobky přenášejí z rychlých dopravníkových pásů na určitá selekční místa, případně na další systémy dopravníků. Na obr. 3.4 jsou znázorněny některé tříosé delta roboty.



Obr. 3.4 – Vybrané tříosé delta roboty (Fanuc, 2018a; Fanuc, 2018b)

Vzhledem k hojnému počtu výrobců a vyráběných delta robotů budou některé vybrány a popsány následující tab. 3.1, ve které jsou porovnány specifické vlastnosti tříosých delta robotů různých výrobních řad vybraných výrobců.

Tab. 3.1 – Porovnání tříosých delta robotů

Výrobce	Typ	Nosnost	Dosah	Opakovaná přesnost	Rychlost	Zdroj
Fanuc	M-1iA/1HL	1 kg	420 mm	0,03 mm	neuveďeno	Fanuc, 2018a
Fanuc	M-2 iA 6H	6 kg	800 mm	0,1 mm	neuveďeno	Fanuc, 2018c
Fanuc	M-3 iA /12H	12 kg	1350 mm	0,1 mm	neuveďeno	Fanuc, 2018b
Sipro	SIAX D3 500	2 kg	500 mm	0,1 mm	120 cyklů / min.	Sipro, 2018a
Sipro	SIAX D3 700	2 kg	700 mm	0,1 mm	120 cyklů / min.	Sipro, 2018b
Asyriľ	Pocket Delta	40 g	135 mm	0,003 mm	150 cyklů / min.	Asyriľ, 2018
Omron	CR_UGD4 MINI	1 kg	130 mm	0,2 mm	200 cyklů / min.	Omron, 2018

### 3.2.3 Čtyřosý delta robot s rotačním pohonem

Čtyřosé delta roboty mají své uplatnění především v průmyslových úlohách označovaných jako „Pick & Pack“, neboli v systémech automatizovaných balících linek, kde robot uchopí produkt s různým natočením v rovině podložky z dopravníkového pásu a následně produkt přemístí nad krabici, kde jej do krabice uloží s požadovaným natočením.

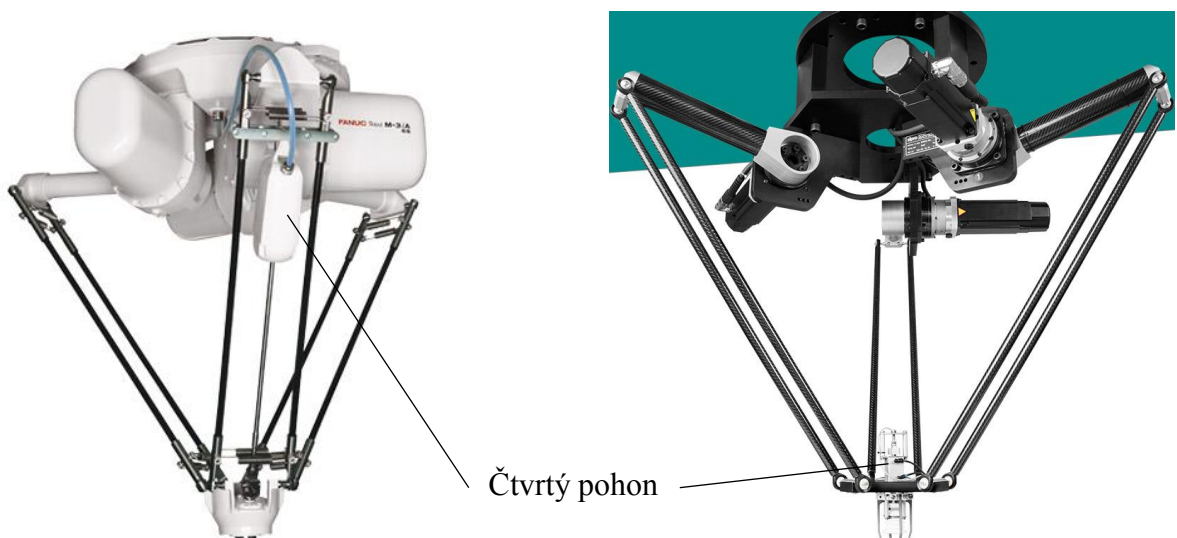
Tyto roboty mají většinou podobné parametry s parametry tříosých delta robotů, jelikož jsou standardně tyto základní mechanické konfigurace shodné s rozdílem přidání jednoho pohonu na zápěstí, k základně anebo na začátek jednoho předloktí. Všechny zmíněné konfigurace uložení čtvrtého pohonu mají mezi sebou různé výhody a nevýhody.

Výhodou umístění čtvrtého pohonu na základně robota je, že není k zápěstí přidávána další komponenta, jejíž hmotnost by způsobovala snížení rychlosti manipulace. Nevýhodou této konfigurace naopak je potřeba specifického mechanického řešení připojení pohonu ke koncovému efektoru, protože se koncový efektor pohybuje v různých vzdálenostech od základny, a tedy i od umístěného pohonu.

Při umístění čtvrtého pohonu na začátek jednoho předloktí se značně mění dynamika systému, což je velkým problémem, který je třeba řešit. Možností pro jeho řešení je použití silnějšího pohonu na daném vodícím řetězci, kde je čtvrtý pohon umístěn, nebo zachování stejné konfigurace s optimalizací plánování trajektorie v řídicím systému.

V případě připevnění čtvrtého pohonu přímo k zápěstí se zvyšuje celková hmotnost zápěstí a snižuje se možná rychlost manipulace. Výhodou je možnost jednoduché aplikace daného čtvrtého pohonu při rozšíření tříosého robota.

Zmíněné konfigurace čtyřosých delta robotů jsou zachyceny na obr. 3.5 a obr. 3.6.



Obr. 3.5 – Konfigurace čtyřosých delta robotů (Fanuc, 2018d; Sipro, 2018c)



Obr. 3.6 – Konfigurace čtyřosého delta robota (Wittenstein, 2018)

Nejčastěji se u výrobců vyskytují konfigurace s umístěným čtvrtým pohonem na základně robota nebo na zápěstí robota. Konfigurace s umístěním čtvrtého pohonu na začátku předloktí jsou spíše výjimečné. Dále byly vybrány některé čtyřosé delta roboty pro porovnání jejich vlastností, které je zachyceno v tab. 3.2.

Tab. 3.2 – Porovnání čtyřosých delta robotů

Výrobce	Typ	Nosnost	Dosah	Opakovaná přesnost	Rychlost	Zdroj
Fanuc	M-3iA/6S	8 kg	1 350 mm	0,1 mm	neuveďeno	Fanuc, 2018d
Sipro	SIAX D4 1200	4 kg	1 200 mm	0,1 mm	120 cyklů / min.	Sipro, 2018c
Aerotech	1300	1 kg	1 300 mm	0,1 mm	200 cyklů / min.	Aerotech, 2018
ABB	IRB 360-6/1600	6 kg	1 600 mm	0,1 mm	100 cyklů / min.	ABB, 2018

### 3.2.4 Šestiosý delta robot s rotačním pohonem

Další specifickou skupinou jsou šestiosé delta roboty s rotačním pohonem. Tyto roboty zajišťují jakoukoliv orientaci koncového efektoru v prostoru. Použití šestiosých delta robotů je málo časté, vzhledem k možnostem samotné struktury delta robota. Víceosé roboty jsou nejčastěji používány pro jejich možnost obrátneho nastavení jednotlivých částí, tím se mohou vyhnout případným překážkám, což bohužel není vlastností paralelních robotů, a tedy ani delta robotů samotných.

Tyto roboty jsou používány pro montážní účely, pro možnosti pájení, přesného umístování nebo osazování. Mechanismus zajišťující orientaci koncového efektoru může být realizován více způsoby.

První skupinu tvoří standardní realizace tříosého delta robota s třemi přidanými pohony umístěnými na začátcích předloktí jednotlivých vodících řetězců, které jsou přes převodní části propojeny se zápěstím, na kterém je upevněn speciální mechanismus, který zajišťuje orientaci koncového efektoru v prostoru. Tento mechanismus je znázorněn na obr. 3.7.



Obr. 3.7 – První typ realizace šestiosého delta robota (Fanuc, 2018e)

Druhou skupinu tvoří speciální realizace, kde robot obsahuje šest paží. Každá paže je spojena kinematickou dvojicí s předloktím a předloktí je kinematickou dvojicí spojeno se zápěstím. Jedná se o speciální realizaci šestiosého delta robota firmy Panasonic. Tato realizace vyžaduje vysoké nároky na řídicí systém a přepočítávací algoritmy pro výpočty polohování pohonů vzhledem k poloze koncového efektoru v pracovním prostoru robota. Tato specifická realizace firmy Panasonic je zachycena na obr. 3.8.



Obr. 3.8 – Druhý typ realizace šestiosého delta robota (Panasonic, 2018)

Dále byly vybrány dostupné šestiosé delta roboty, pro které budou porovnány jejich některé vlastnosti. Dané porovnání je v tab. 3.3.

Tab. 3.3 – Porovnání šestiosých delta robotů

Výrobce	Typ	Nosnost	Dosah	Opakovaná přesnost	Zdroj
Fanuc	M-3iA/6A	6 kg	1 350 mm	0,1 mm	Fanuc, 2018e
Panasonic	AP-3310A0010	1,5 kg	620 mm	0,02 mm	Panasonic, 2018

### 3.2.5 Tříosý delta robot s lineárním pohonem

Tato skupina robotů má své uplatnění především v aplikacích domácího 3D tisku. Jedná se o typy robotů, které nejsou často průmyslově používány. Díky aplikacím spíše v prostředí domácích aplikací 3D tisku není potřeba zajistit tak přesného a rychlého polohování, jako je tomu u průmyslových 3D tiskáren realizovaných kartézskými roboty. Přehled vlastností některých používaných 3D tiskáren je popsán v tab. 3.4.

Tab. 3.4 – Porovnání 3D tiskáren využívajících principu delta robota

Označení	Operační prostor	Přesnost	Zdroj
Rostock	200 mm × 200 mm × 400 mm	0,03 mm	Rostock, 2012
Altair 3 Pro	Ø 205 mm × 254 mm	0,1 mm	Printspace, 2016
PrintM3	Ø 200 mm × 220 mm	0,02 mm	Singapore, 2014



3D tiskárny, které využívají mechanismu tříosého delta robota s lineárními pohony, jsou na obr. 3.9.



Obr. 3.9 – Vybrané tříosé delta roboty s lineárním pohonem (Printspace, 2016)

### 3.3 KINEMATICKÝ MODEL DELTA ROBOTA

Kinematika se zabývá klasifikací různých druhů pohybu bez ohledu na příčiny jeho vzniku a vyšetřuje tedy závislosti jednotlivých kinematických veličin, kterými jsou poloha, rychlost a zrychlení částí mechanického systému.

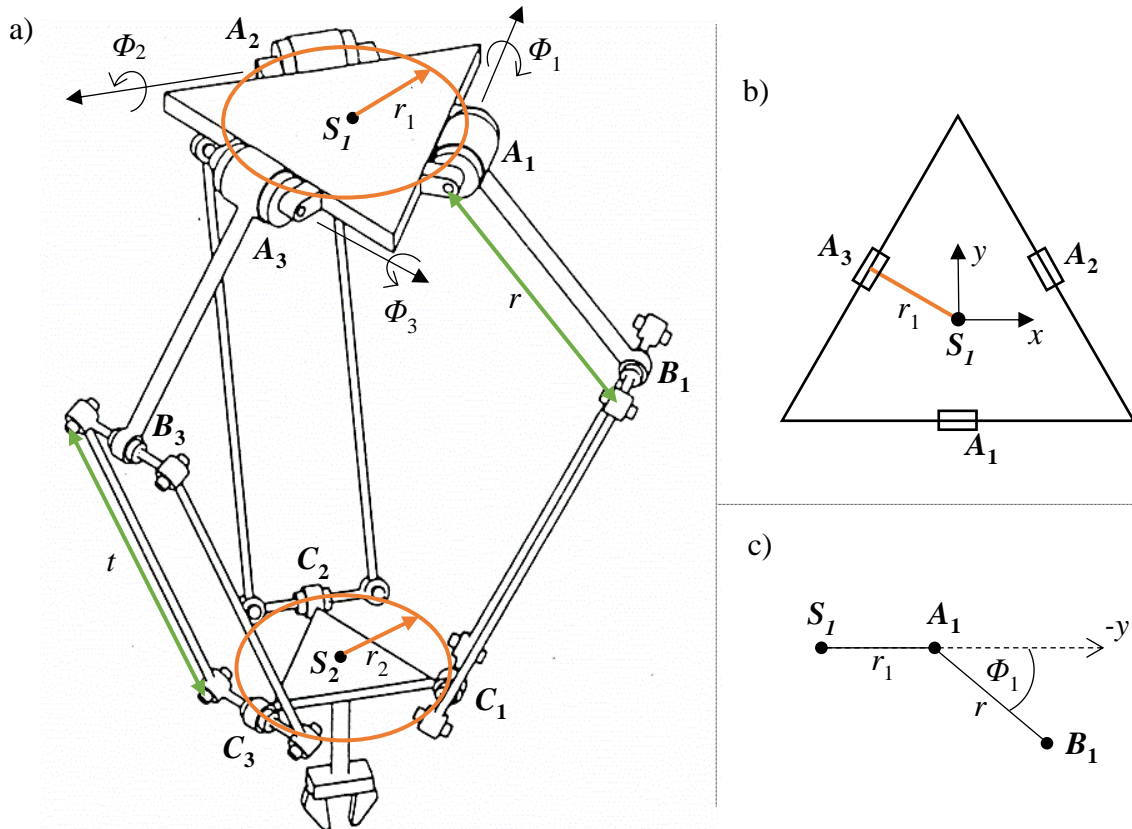
Z pohledu robotiky je důležité vyšetřit závislosti mezi polohou poháněných kloubů robota a koncového efektoru, které jsou označovány jako dopředná nebo přímá kinematika. Obdobně je třeba vyšetřit i opačnou závislost, tedy závislost mezi polohou koncového efektoru a úhlu natočení, resp. polohou poháněných kloubů. Tato závislost je označována jako inverzní kinematika.

Polohy kloubů robota jsou popsány souborem strojových souřadnic. Poloha koncového efektoru je již popsána polohou referenčního bodu v pracovním prostoru vůči stanoveným souřadným osám.

Polohu jednotlivých bodů je možné transformovat různými způsoby. Jedná se například o posuny pozice bodů v souřadném systému nebo otočení posunutého bodu o určitý úhel ve specifikované rovině. Pro dané úkony existují matice homogenní transformace a matice rotace, s jejichž využitím lze provést kompletní transformaci polohy bodu.

### 3.3.1 Dopředná kinematika delta robota

Výpočet závislosti dopředné kinematiky delta robotů je komplexním problémem, který vychází z modelu daného delta robota. Pro potřeby této práce bude provedeno odvození dopředné kinematiky pro tříosé delta roboty s rotačním pohonem. Specifikovaný delta robot je popsán následujícím geometrickým modelem znázorněným na obr. 3.10, na kterém jsou důležité body, vzdálenosti a úhly od kterých se odvíjí výpočet přímé kinematiky.

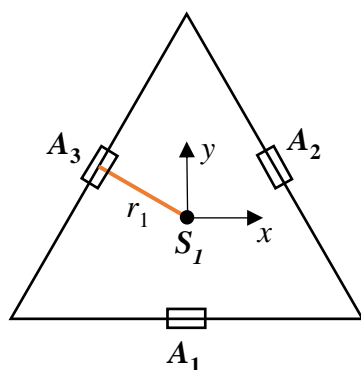


Obr. 3.10 – Geometrický model delta robota (Clavel, 2014)

Na obr. 3.10 je znázorněn bod  $S_1$ , který označuje střed základny. Dále body  $A_1$ ,  $A_2$  a  $A_3$ , které označují střed pohonu, ze kterého vycházejí jednotlivé paže. Následně body  $B_1$  a  $B_3$  označující kinematickou dvojici spojující paži s předloktím a body  $C_1$ ,  $C_2$  a  $C_3$  odpovídající uchycení předloktí k zápěstí a bod  $S_2$ , který označuje střed zápěstí nebo koncového efektoru.

Dalšími důležitými znázorněnými parametry jsou jednotlivé vzdálenosti. Na obr. 3.10 je znázorněna vzdálenost  $r_1$ , která odpovídá vzdálenosti motoru od středu základny, vzdálenost  $r_2$  odpovídající vzdálenosti středu zápěstí od kinematických dvojic pro uchycení předloktí, dále vzdálenost označená jako  $r$ , která odpovídá délce paže a vzdálenost  $t$  odpovídající délce předloktí robota. Další potřebnou vzdáleností, která však není na obr. 3.10 zachycena, je vzdálenost  $z_z$ , která odpovídá výšce základny nad podložkou.

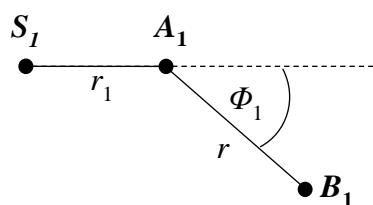
Nejprve bude určen střed souřadného systému, který bude umístěn do středu základny posunutého v ose  $z$  o zápornou vzdálenost  $z_z$ , čímž bude umístěn do odpovídajícího bodu  $S_1$  posunutého v souřadné ose  $z$  na podložku. Následně jsou vypočítány body středů pohonů ležících na kružnici o poloměru  $r_1$ , které jsou vzájemně otočené o  $120^\circ$  podél osy  $z$  a střed prvního pohonu leží na ose  $y$ . Pro středy pohonů odpovídají souřadnice popsané a znázorněné na obr. 3.11.



$$\begin{aligned} S_1 &= [0; 0; z_z] \\ A_1 &= [0; -r_1; z_z] \\ A_2 &= [r_1 \sin 120^\circ; -r_1 \cos 120^\circ; z_z] \\ A_3 &= [r_1 \sin 240^\circ; -r_1 \cos 240^\circ; z_z] \\ A_2 &= \left[ \frac{\sqrt{3}}{2} r_1; \frac{1}{2} r_1; z_z \right] \\ A_3 &= \left[ -\frac{\sqrt{3}}{2} r_1; \frac{1}{2} r_1; z_z \right] \end{aligned}$$

Obr. 3.11 – Souřadnice středu pohonů

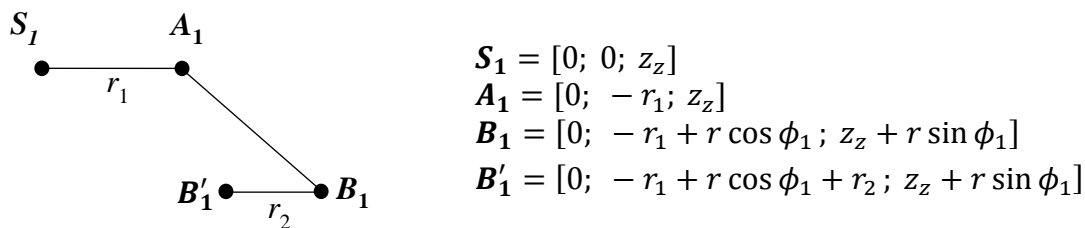
Z jednotlivých pohonů vystupují paže, které se otáčejí s jedním stupněm volnosti. Koncové body paží označené jako  $B_i$  leží na kružnici se středem v bodech  $A_i$  o poloměru  $r$ . Reálná poloha těchto bodů je pak definována jednotlivými úhly natočení pohonů  $\Phi_i$ . Poloha bodu  $B_1$  je znázorněna na obr. 3.12, kde jsou také vypočítány jeho jednotlivé souřadnice pro koncový bod dané paže. Obdobně lze postupovat při výpočtu souřadnic dalších koncových bodů jednotlivých paží, které jsou otočeny o  $120^\circ$  podle osy  $z$ .



$$\begin{aligned} S_1 &= [0; 0; z_z] \\ A_1 &= [0; -r_1; z_z] \\ B_1 &= [0; -r_1 + r \cos \phi_1; z_z + r \sin \phi_1] \end{aligned}$$

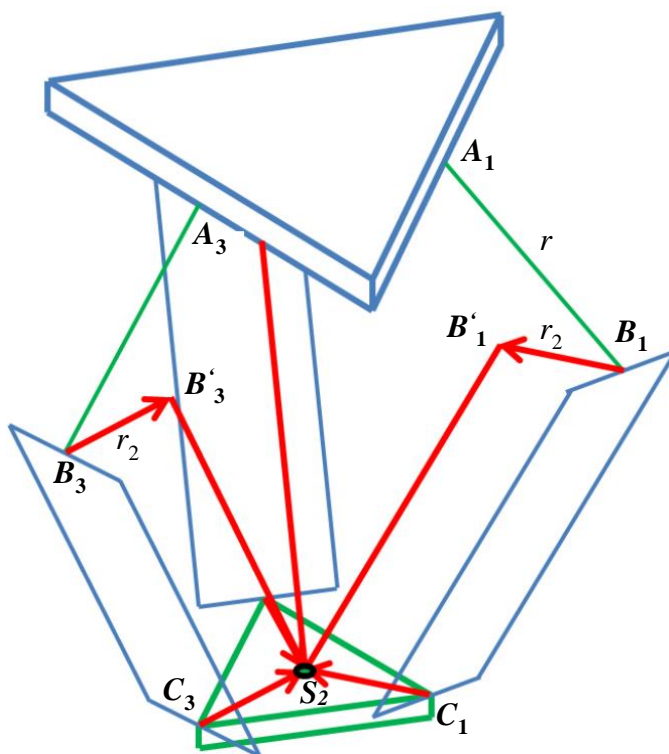
Obr. 3.12 – Souřadnice koncového bodu první paže

Při znalosti polohy bodů  $B_i$  lze dále postupovat při výpočtu dopředné kinematiky. Jelikož jsou však úchyty zápěstí posunuté od středu zápěstí samotného, tak je nejprve potřeba posunout body  $B_i$  právě o vzdálenost středu zápěstí a úchyty zápěstí. Na obr. 3.13 je znázorněn zmiňovaný posun a dále jsou zde vypočteny souřadnice odpovídajícího bodu  $B_i'$ .



Obr. 3.13 – Souřadnice posunutého koncového bodu paže

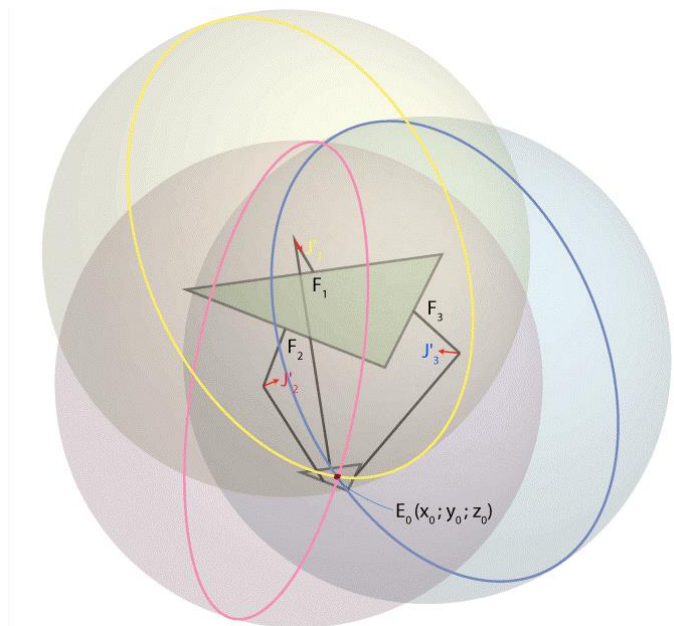
Stejný postup je aplikován na zbývající koncové body paží, které jsou posunuty vzhledem ke svému natočení kolem osy  $z$ . Daný postup posunu je znázorněn na obr. 3.14.



Obr. 3.14 – Znázornění posunu koncových bodů ramen (Williams, 2016)

Při získání těchto souřadnic již lze vypočítat polohu středu zápěstí nebo koncového efektoru. Jelikož se předloktí pohybují se dvěma stupni volnosti, tak výsledný bod odpovídající středu zápěstí vznikne průnikem plášťů tří koulí, které mají střed v pomocných bodech  $B_i'$  a jejich poloměr je roven délce předloktí.

Výpočet výsledného bodu středu zápěstí je finálním úkonem pro určení závislosti přímé kinematiky. Principiální znázornění určení výsledného bodu je znázorněno na obr. 3.15.



Obr. 3.15 – Princip získání výsledných souřadnic (Clavel, 2014)

Problém dopředné kinematiky je tedy problémem hledání průsečíku tří kulových ploch. Tento problém lze řešit soustavou rovnic o třech neznámých, kde každá rovnice soustavy odpovídá modelu znázorněnému v rovnici 3.1 s indexací jednotlivých rovnic soustavy. Dané výrazy soustav rovnic je potom třeba roznásobit a dále je vhodně upravit dle standardních pravidel. Po roznásobení a úpravě jsou získány rovnice dle indexovaného modelu v rovnici 3.2. Po získání upravených rovnic je vhodné nahradit indexované proměnné na pravé straně za společnou proměnnou, vzhledem k následným úpravám rovnic.

$$(x - x_i)^2 + (y - y_i)^2 + (z - z_i)^2 = t^2, \quad (3.1)$$

$$x^2 + y^2 + z^2 - 2xx_i - 2yy_i - 2zz_i = t^2 - x_i^2 - y_i^2 - z_i^2, \quad (3.2)$$

$$t^2 - x_i^2 - y_i^2 - z_i^2 = k_i, \quad (3.3)$$

kde  $x$  – neznámá souřadnice osy  $x$ ,

$y$  – neznámá souřadnice osy  $y$ ,

$z$  – neznámá souřadnice osy  $z$ ,

$x_i$  –  $x$  souřadnice pomocného bodu  $B_i$ ,

$y_i$  –  $y$  souřadnice pomocného bodu  $B_i$ ,

$z_i$  –  $z$  souřadnice pomocného bodu  $B_i$ ,

$t$  – je délka předloktí,

$k_i$  – substituční proměnná za pravou stranu rovnice 3.2

$i$  – index daného bodu (1, 2, 3).

Pro řešení soustavy rovnic je vhodné zvolit sčítací metodu, kde je první rovnice sčítána s druhou rovnicí opačného znaménka, díky čemuž se z rovnice odečtou kvadratické členy. Obdobně je potom získána i druhá rovnice potřebná pro další postup. Tímto postupem je získána soustava dvou rovnic

$$2x(x_2 - x_1) + 2y(y_2 - y_1) + 2z(z_2 - z_1) = k_2 - k_1, \quad (3.4)$$

$$2x(x_3 - x_1) + 2y(y_3 - y_1) + 2z(z_3 - z_1) = k_3 - k_1, \quad (3.5)$$

kde  $x_1, y_1, z_1$  jsou souřadnice bodu  $B_1'$ ,

$x_2, y_2, z_2$  jsou souřadnice bodu  $B_2'$ ,

$x_3, y_3, z_3$  jsou souřadnice bodu  $B_3'$ ,

$k_1, k_2, k_3$  jsou substituční proměnné jednotlivých stran rovnic 3.3.

Dané rovnice lze dále upravit nahrazením jednotlivých členů, kde jsou od sebe odečítány jednotlivé souřadnice dle postupu

$$x_i - x_j = a_{ij}, \quad (3.6)$$

$$k_i - k_j = d_{ij}, \quad (3.7)$$

kde  $a_{ij}$  – substituční člen,

$k_{ij}$  – substituční člen,

$i, j$  jsou indexy jednotlivých členů.

Obdobnou úpravou pro všechny položky rovnic 3.4 a 3.5 a následnou úpravou pro možné odečtení rovnic jsou získány následující tvary rovnic

$$a_{31}(2xa_{21} + 2yb_{21} + 2zc_{21}) = a_{31}d_{21}, \quad (3.8)$$

$$a_{21}(2xa_{31} + 2yb_{31} + 2zc_{31}) = a_{21}d_{31}. \quad (3.9)$$

Při řešení dané soustavy rovnic potom vznikne rovnice, která neobsahuje proměnnou  $x$ , popisuje tedy závislost proměnné  $y$  na proměnné  $z$  a lze jí popsat a následně zjednodušit vztahem

$$y = \frac{a_2 d_1 - a_1 d_2 - 2z(a_2 c_1 - a_1 c_2)}{2(a_2 b_1 - a_1 b_2)} = k_1 z + l_1, \quad (3.10)$$

kde  $k_1$  – substituční člen,

$l_1$  – substituční člen.

Obdobně je postupováno i pro vyjádření závislosti proměnné  $x$  na proměnné  $z$ . Následným krokem pro řešení dopředné kinematiky je dosazení získaných rovnic do původní rovnice 3.1, roznásobení jednotlivých členů, jejich převedení na pravou stranu rovnice a získání kvadratické rovnice ve tvaru

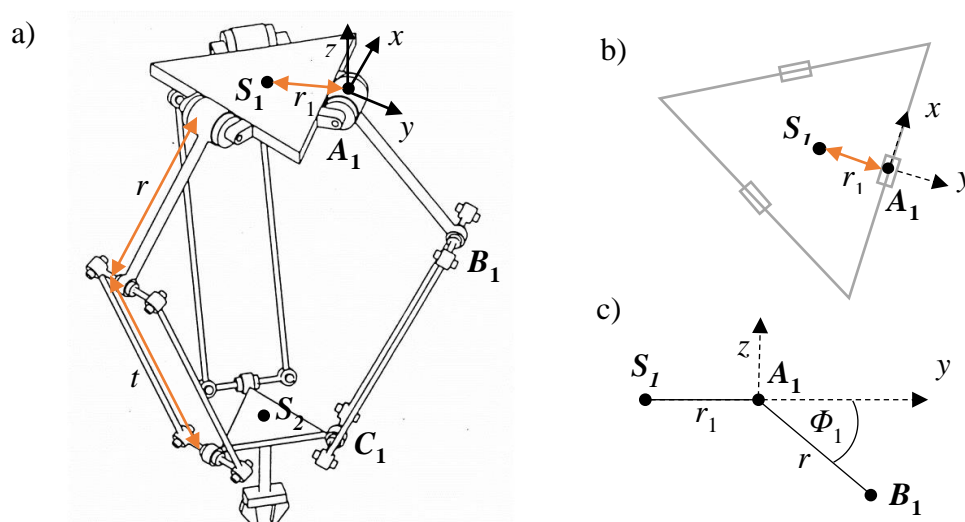
$$(k_2^2 + k_1^2 + 1)z^2 + (2k_2l_2 + 2k_1l_1 - 2k_2x_1 - 2k_1y_1 - 2z_1)z + l_2^2 + l_1^2 - 2l_2x_1 - 2l_1y_1 - k_1 = 0. \quad (3.11)$$

Řešením kvadratické rovnice mohou být získány dvě hodnoty proměnné  $z$ , kde existuje pouze jedna hodnota odpovídající reálné pozici, která je zpravidla daná omezením pozice dle pracovního prostoru. Pokud má kvadratická rovnice pouze jedno řešení, tak výsledná hodnota přímo odpovídá dané souřadnici  $z$ . Další možností je, že pro kvadratickou rovnici neexistuje řešení, a nelze tedy tuto polohu souřadnice  $z$  zajistit vzhledem k délce jednotlivých komponent.

Posledním krokem k získání všech souřadnic vzhledem k úhlu natočení jednotlivých pohonů je dosazení hodnoty proměnné  $z$  do rovnice 3.10 pro vypočítání hodnoty proměnné  $y$  a následně získání hodnoty proměnné  $x$  vypočtené obdobným vztahem jako 3.10.

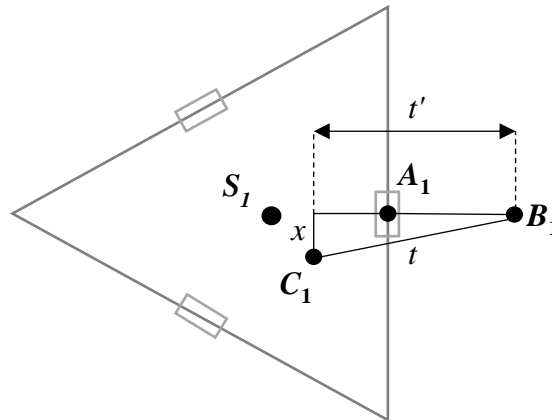
### 3.3.2 Inverzní kinematika delta robota

Pro stanovení závislosti inverzní kinematiky delta robota lze použít různé postupy, kde některé postupy mohou být nadměrně komplikované a zdlouhavé, ale některé také mohou být značně zjednodušeny vhodným stanovením počátečních podmínek. Jedním takovým postupem je vhodné definování počátku souřadného systému. Vhodným řešením je umístění počátku souřadného systému do středu pohonu a osy paže, kde osa  $x$  je umístěna v ose otáčení jednoho pohonu. Umístění středu souřadného systému pro možnosti uvažovaného řešení je na obr. 3.16.



Obr. 3.16 – Umístění počátku souřadnicového systému (Clavel, 2014)

V závislosti na umístění počátku souřadného systému je vhodné zobrazit průměty do různých rovin, z kterých lze vyvodit možné řešení problému inverzní kinematiky. Dané vztahy je vhodné určit pro jeden pohon s využitím geometrického zobrazení jednoho vodícího řetězce. Jelikož se paže pohybuje pouze jedním možným směrem a souřadnice bodu  $B_1$  se změnou úhlu natočení prvního pohonu mění pouze vzhledem k souřadné ose  $y$ , tak je vhodné vypočítat pomocnou proměnnou  $t'$  a zobrazit průmět do roviny  $xy$ , který je zachycen na obr. 3.17.



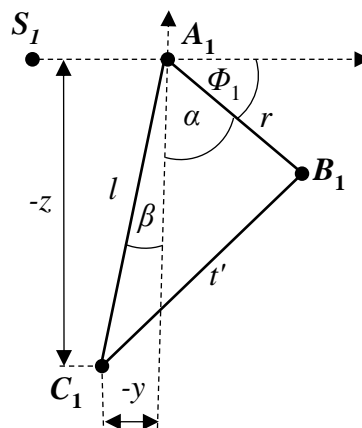
Obr. 3.17 – Průmět delta robota do roviny  $xy$

Dle obr. 3.17 lze určit vztah pro pomocnou proměnnou  $t'$ , který odpovídá výrazu

$$t' = \sqrt{t^2 - x^2}, \quad (3.12)$$

- kde  $t'$  – průmět délky předloktí do osy  $y$ ,  
 $t$  – délka předloktí,  
 $x$  – hodnota souřadnice bodu pro osu  $x$ .

Vzhledem ke znalosti délky předloktí promítnuté do osy  $y$  je možné geometrické uspořádání delta robota zobrazit v rovině  $yz$  pro hodnotu souřadnice  $x$  rovnou nule. Daný řez odpovídá zobrazení na obr. 3.18.



Obr. 3.18 – Řez nákresem delta robota při nulové souřadnici  $x$



Stěžejním krokem pro výpočet úhlu natočení pohonu je získání pomocných úhlů  $\alpha$  a  $\beta$ .  
Pro výpočet úhlu  $\beta$  lze použít vztah

$$\beta = \operatorname{arctg}\left(\frac{-y}{-z}\right) = \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{z}\right), \quad (3.13)$$

kde  $\beta$  – pomocný úhel,

$y$  – hodnota souřadnice bodu pro osu  $y$ ,

$z$  – hodnota souřadnice bodu pro osu  $z$ .

Následně je třeba vypočíst úhel  $\alpha$  za pomoci použití upravené kosinové věty odpovídající vztahu

$$\begin{aligned} \alpha &= \arccos\left(\frac{t'^2 - l^2 - r^2}{-2lr}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{t^2 - x^2 - y^2 - z^2 - r^2}{-2r\sqrt{y^2 + z^2}}\right) \\ &= \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + z^2 + r^2 - t^2}{2r\sqrt{y^2 + z^2}}\right), \end{aligned} \quad (3.14)$$

kde  $\alpha$  – pomocný úhel,

$l$  – vzdálenost bodu  $C_1$  od  $A_1$  při nulové hodnotě souřadnice  $x$ ,

$r$  – délka paže.

Při znalosti pomocných úhlů lze jednoduše stanovit vztah pro výpočet úhlu natočení pohonu odpovídající následující rovnici

$$\phi_1 = 90^\circ - (\alpha - \beta) = 90^\circ - \alpha + \beta, \quad (3.15)$$

kde  $\phi_1$  – úhel natočení prvního pohonu.

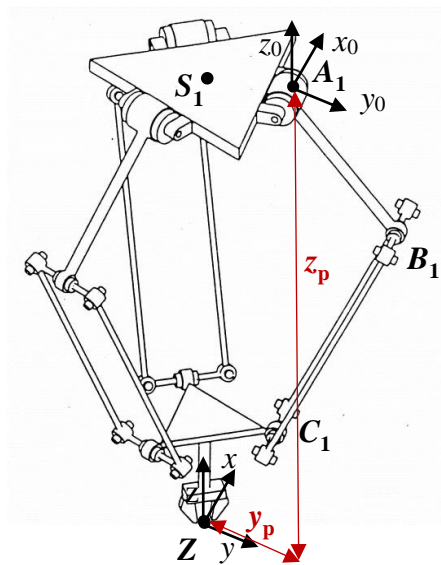
Po dosazení vztahů 3.13 a 3.14 do vztahu 3.15 je získáno řešení pro výpočet hodnoty úhlu natočení prvního pohonu definované vztahem

$$\phi_1 = \arccos\left(\frac{x^2 + y^2 + z^2 + r^2 - t^2}{2r\sqrt{y^2 + z^2}}\right) + \operatorname{arctg}\left(\frac{y}{z}\right), \quad (3.16)$$

Pro výpočet ostatních úhlů natočení jednotlivých pohonů je třeba transformovat souřadnice pomocí matice translace vůči středu zápěstí a posunu pohonu od středu základny a dále matice rotace otáčející souřadnice o  $120^\circ$  a  $240^\circ$ , a vzniklé souřadnice pak použít při dosazení do rovnice podobné rovnici 3.16, kde však budou počítány ostatní úhly natočení.

Při finálním řešení je třeba znát polohu umístěného souřadného systému robota, protože je většinou pracovní prostor definován vzhledem k jeho samotnému souřadnému systému. V takovém případě je třeba základní souřadnice pro výpočet úhlu jednotlivého pohonu posunout v souřadném systému, vzhledem k souřadnému systému pracovního prostoru robota a souřadného systému použitého pro výpočet.

Korekce tohoto smyslu se provádí přímým posunem souřadného systému, kde posun  $z_p$  a  $y_p$  odpovídají rozdílu vzdáleností posunu dané kinematické dvojice zápěstí a vzdáleností posunu pohonu od středu souřadného systému pracovního prostoru označeného jako  $Z$  jak je tomu naznačeno na obr. 3.19.



Obr. 3.19 – Korekce souřadného systému (Clavel, 2014)

Zmíněným postupem jsou vypočítány hodnoty úhlů natočení všech pohonů v závislosti na pozici v souřadném systému pracovního prostoru, čímž je získána závislost inverzní kinematiky.

## **4 NÁVRH A REALIZACE DELTA ROBOTA**

Jednou ze složitých částí při tvorbě funkčního zařízení je důkladné promyšlení jeho prvotního návrhu. Při návrhu robotického systému je třeba zohlednit různé aspekty týkající se jeho funkce, velikosti pracovního prostoru robota, jeho přesnosti, maximální možné hmotnosti zátěže, tedy nosnosti robota anebo například možnou finální cenu zhotovení robota.

Mezi prvotním návrhem a finální realizací se v samotném procesu získávají informace o možném vyladění návrhu do realizovatelné podoby, jelikož jsou často v návrhu opomenuty důležité aspekty, které jsou zjištěny až při samotném pokusu o adekvátní realizaci samotného zařízení. Proces návrhu a realizace se tedy cyklicky opakuje po celou dobu tvorby zařízení. Tento cyklus vzniká rozdílností pohledů návrhu a realizace. Návrh je většinou založen pouze na informacích z teoretického rozboru, zatímco realizace je přímo prováděna a upravována na experimentálně získaných podkladech.

### **4.1 STANOVENÍ VLASTNOSTÍ ROBOTA**

Prvotním úkolem pro vytvoření návrhu je stanovení představy o základních vlastnostech robota. Těmito vlastnostmi můžou být přímo obecně uvažované vlastnosti robotů, ale také například požadavky na konstrukční řešení v podobě použitých materiálů nebo například požadavky na elektronickou část.

Stěžejním požadavkem na delta robota je možnost samostatné manipulace s definovanými předměty. Pro danou problematiku je třeba určit, jakým způsobem bude robot uchopovat definované předměty a jako samotné tyto předměty budou realizovány.

Dalším požadavkem na robota je možnost komunikace řídicího systému robota s externím systémem po definovaném komunikačním rozhraní.

Dále je vhodné definovat obecné základní vlastnosti samotných robotů, jako jsou velikost operačního prostoru, přesnost, nosnost a rychlost robota.

#### **4.1.1 Požadavky pro manipulaci**

Nejdůležitějším požadavkem je zajištění možnosti samotné manipulace předmětů. Prvotní fází je tedy stanovení vlastností samotného manipulovaného předmětu. Pro možnosti budoucích realizací a funkcí robota při dalším vývoji bylo rozhodnuto, že manipulovanými předměty budou silikonové koule o průměru 30 mm, které mohou být realizovány v různém barevném provedení.

Pro manipulovaný předmět musí být také vyroben speciální koncový efektor, který dokáže předmět uchytit, který bude realizován vlastním řešením s podporou technologie moderního 3D tisku. Dále je třeba také určit technologii, která bude použita pro realizaci uchopení. Pro tento účel byla vybrána technologie pneumatického uchycení, která bude pomocí podtlaku přisávat manipulované předměty ke koncovému efektoru.

#### **4.1.2 Požadavky na komunikaci**

Pro potřeby řízení a plánování pohybu je třeba zajistit možnost komunikace robota s externím řídicím systémem. Jedním standardním rozhraním pro komunikaci mikropočítačů s jinými zařízeními je například tzv. UART nebo USB.

Při komunikaci mezi zařízeními je vždy třeba zajistit strukturu posílaných dat, aby obě zařízení mohla posílaná data od druhého zařízení správně dekódovat. Struktura posílaných dat je označována jako komunikační protokol.

Pro různé aplikace existují různé standardizované komunikační protokoly. V závislosti na specializaci delta robota pracujícího jako manipulátoru je však vhodné použít vlastní komunikační protokol, ve kterém budou posílány typy pohybů, definované body trajektorie a také délka trvání pohybu.

#### **4.1.3 Požadavky na základní vlastnosti robota**

Jednou z nejdůležitějších vlastností robota je stanovení velikosti jeho pracovního prostoru, které je podmíněno specializací konkrétní aplikace. Obdobně jako při stanovení požadavků pro manipulaci bylo rozhodnuto, že velikost pracovního prostoru bude předem navýšena pro usnadnění možnosti následného vývoje budoucích manipulačních úloh. Pracovní prostor bude ve tvaru válce s průměrem 300 mm a výškou 170 mm.

Stanovování minimální přesnosti je provázáno se stanovením maximální nosnosti a maximální rychlosti. Všechny zmíněné vlastnosti se odvíjejí od vlastností zvoleného pohonu a vždy je třeba dané provázání uvažovat a volit vhodný kompromis. Pro manipulační úlohu, kde je velikost manipulovaného předmětu okolo 30 mm a jeho hmotnost nepřesahuje 100 g, není třeba stanovovat zbytečně velkou přesnost, ale je vhodnější se spíše orientovat na vyšší rychlost. Vzhledem ke zmíněným podmínkám užití bude požadována minimální přesnost 0,5 mm a rychlost, standardně udávaná v počtu přejetí přes délku pracovního prostoru za minutu, alespoň 100 cyklů za minutu.

#### 4.1.4 Požadavky na konstrukční řešení

Při tvorbě konstrukčního řešení je stěžejní určit vhodné materiály, které dokáží zajistit požadavky na základní vlastnosti robota. Například nosnost se odvíjí nejen od použitých pohonů, ale také od použitých materiálů. Obdobně je tomu i pro možnosti rychlosti, kde vlivem setrvačnosti může docházet k nadměrné zátěži konstrukčních dílů, zvýšením jejich opotřebení a snížením jejich doby životnosti. Ošetření některých zmiňovaných situací lze provést vhodnou implementací v řídicím systému, ale i přes tyto možnosti mohou být některé systémy tlačeny až na největší možnou mez.

Prvním pohledem je zajištění dostatečně pevného rámu, který celý systém unese a nebude vykazovat zbytečné mechanické vůle, které by mohly při pohybu robota vytvářet vibrace a ovlivňovat tak samotný pohyb koncového efektoru. Na základě této podmínky bude rám vytvořen z hliníkových komponent, které budou pospojovány vlastními plastovými komponentami vytvořenými s podporou technologie 3D tisku.

Při otáčení pohonů vzniká torzní síla působící na úchyt pohonu, která je následně přenášena na nosný rám robota, a proto je třeba tyto komponenty zhotovit robustně. Obdobně je tomu tak i při uchycení jiných komponent, například zdrojů napětí nebo jiných elektronických součástí. V závislosti na tomto požadavku bude realizován speciální upínací systém, díky kterému bude možné k některým částem připevňovat libovolné komponenty vzhledem k redukcím zhotovených s využitím technologií 3D tisku.

Dalším důležitým ústrojím jsou paže robota, jednotlivé kinematické dvojice a předloktí robota. Na tyto komponenty jsou kladeny různé nároky, jelikož je třeba zajistit jejich pevnost při zajištění co nejnižší hmotnosti jednotlivých komponent. Technologie 3D tisku je vhodná pro realizaci takových komponent, protože umožňuje realizaci komponent s různou vnitřní strukturou, kterou lze zajistit vysokou pevnost i při malém množství materiálu.

Jednou z posledních součástí robota je jeho zápěstí. Zápěstí může být zhotoveno jako celek s koncovým efektořem. Toto řešení však z hlediska možného dalšího použití není vhodné, a proto bude realizováno univerzální zápěstí, ke kterému bude možné připojit různé koncové efektořy.

#### **4.1.5 Požadavky na elektronickou část**

Elektronická část je důležitou součástí robota, jelikož je třeba stanovit možnosti řídicího systému implementovaného v jednočipovém mikropočítači, možnosti jednotlivých elektrických pohonů a jejich řízení nebo možnosti napájení celého systému, případně jeho jednotlivých částí. Požadavky na elektronickou část mohou být pozorovány z mnoha pohledů. Jedním takovým pohledem může být například oddělení napájení logických a výkonových částí.

Často jsou však požadavky na elektronickou část spíše specifikovány v podobě maximálního příkonu v kombinaci s použitým přívodním napětím. Obdobně je tomu i zde, kde pro univerzální možnosti použití robota jsou stanoveny požadavky na napájecí střídavé napětí o hodnotě 230 V a maximálním příkonu robota do 0,5 kW.

Dalším možným pohledem je stanovení typu elektrického pohonu. Z hlediska řízení každý typ pohonu pracující díky jinému principu potřebuje jiné výkonové prvky a je řízen jinými signály. Vzhledem k tomuto požadavku bylo stanoveno, že budou použity kartáčové nebo bezkartáčové stejnosměrné motory.

#### **4.1.6 Požadavky na celkovou cenu realizace**

Jedním z nejdůležitějších aspektů je v dnešní době cena samotného provedení. Cena provedení je přímo úměrná kvalitě použitých komponent, kde například cena přesnějších snímačů polohy nebo cena výkonnějších pohonů neúnosně roste. Možnosti vlastností realizovaného delta robota jsou tedy ovlivněny i velikostí rozpočtu. Z hlediska celkového rozpočtu na vývoj a realizaci robota v základním provedení byla stanovena maximální cena realizace na 20 000 Kč. Dále bude pro možnosti reprodukovatelnosti realizace systému delta robota snaha o dosažení co nejnižší výsledné ceny.

### **4.2 ELEKTRONICKÉ KOMPONENTY**

Elektronické komponenty tvoří důležitou část robota. Díky těmto komponentám je možné robotu přiřadit možnosti pohybu. Použití elektronických komponent se odvíjí od původního návrhu a jednotlivých požadavků a vlastností robota.

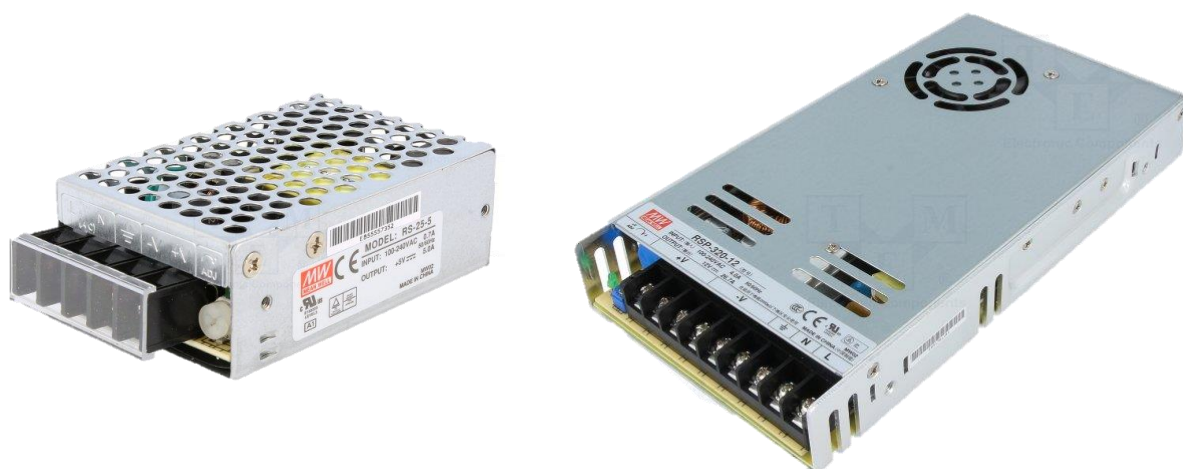
V požadavcích na elektronickou část bylo stanoveno například napájecí napětí robota a požadavky na technologii pohonů. Při návrhu elektronického systému je vhodné dále určit napájecí napětí pohonů. Možnosti použití jednotlivých komponent je vhodné prošetřit z co nejvíce požadovaných aspektů a následně vybrat komponenty, které nejlépe odpovídají daným stanoveným požadavkům.

#### 4.2.1 Zdroje napájení

Pro systém delta robota bylo vybráno různé napájecí napětí pro výkonové části a pro logické části. Pro možnosti požadavku přírodního síťového střídavého napětí byly vybírány zdroje, jejichž vstupní napětí těmto požadavkům odpovídalo. Pro napájení výkonových částí byl vybrán 320 W zdroj, který poskytuje stejnosměrné napětí o hodnotě 12 V s maximálním proudovým zatížením přibližně 26,7 A. Pro napájení logických částí byl vybrán zdroj o výkonu 25 W, který zajišťuje stejnosměrné napětí o velikosti 5 V s maximálním zatížením 5 A. Vlastnosti použitých zdrojů jsou sepsány v tab. 4.1, obrázky těchto zdrojů jsou na obr. 4.1.

Tab. 4.1 – Vlastnosti použitých napájecích zdrojů

Napájecí napětí	Typ zdroje	Výkon	Výstupní napětí	Výstupní proud	Účinnost	Zdroj
88 ÷ 264 V AC, 125 ÷ 373 V DC	spínaný	25 W	5 V DC	5 A	78.5 %	TME, 2018a
88 ÷ 264 V AC, 124 ÷ 370 V DC	spínaný	320 W	12 V DC	26,7 A	88 %	TME, 2018b

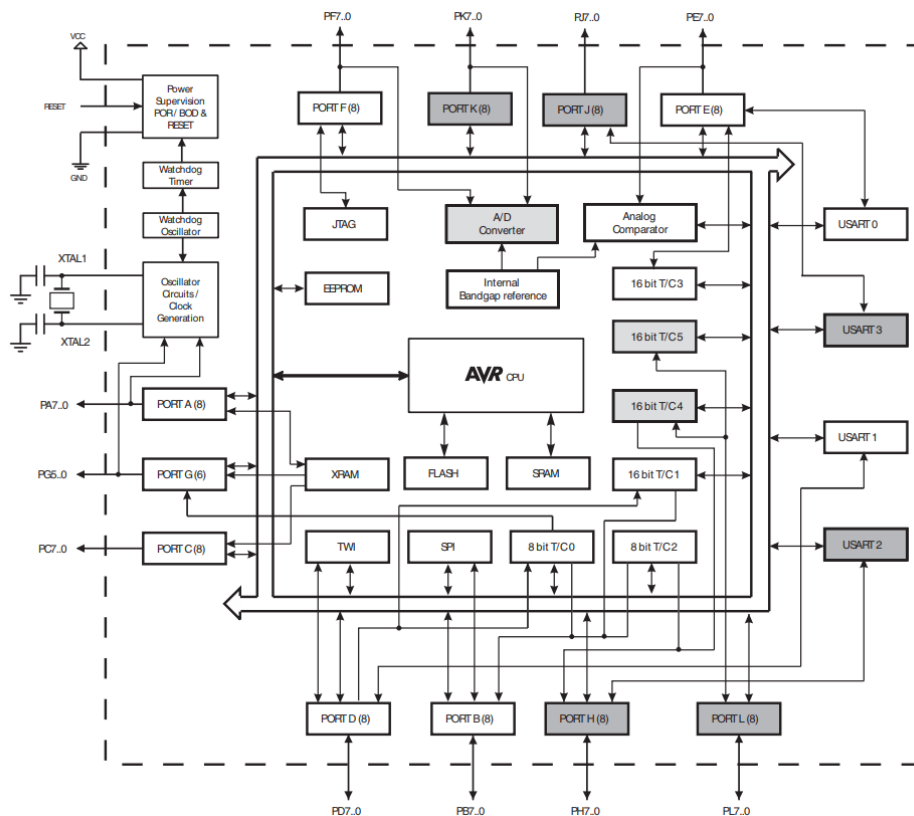


Obr. 4.1 – Použité napájecí zdroje (TME, 2018a; TME, 2018b)

## 4.2.2 Řídicí jednotka

Pro účely zajištění řízení komponent delta robota byla vybrána vývojová deska označená jako „Iduino MEGA 2560“, která je založená na jednočipovém mikropočítači ATmega2560 a obsahuje různé podpůrné subsystémy, například pro napájení nebo pro zajištění komunikace mikropočítače přes komunikační rozhraní USB. Výhodou použití vývojové desky je zajištění funkční konfigurace vbudovaných komponent a předpřipravené konektory pro připojování externích zařízení.

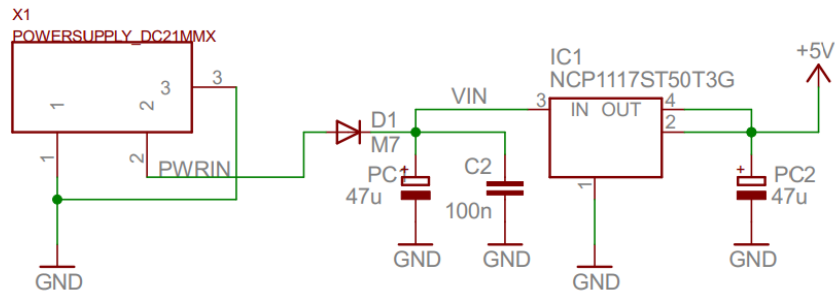
Srdcem prototypové desky je tedy jednočipový mikropočítač ATmega2560, který disponuje 86 obecnými vstupně výstupními piny, kde některé mohou poskytovat speciální funkce. Jedná se například o 12 kanálů pro pulzně šířkovou modulaci s 16 bitovým rozlišením, 4 komunikační UART/USART kanály anebo 16 kanálů pro analogově digitální převod. Důležitou funkcí pro možnosti zpracování signálu z relativních snímačů polohy v podobě rotačních enkodérů jsou vstupy externího přerušení, které lze nastavit na generování přerušení při změně logické hodnoty daného vstupu. Dále mikropočítač disponuje 256 kB flash paměti, ve které je umístěn program, 8 kB napěťově závislé operační RAM paměti a 4 kB EEPROM paměti, která slouží pro uchování stálých dat. Blokové schéma mikropočítače ATmega2560 je znázorněno na obr. 4.2.



Obr. 4.2 – Blokové schéma ATmega2560 (Atmel, 2018)

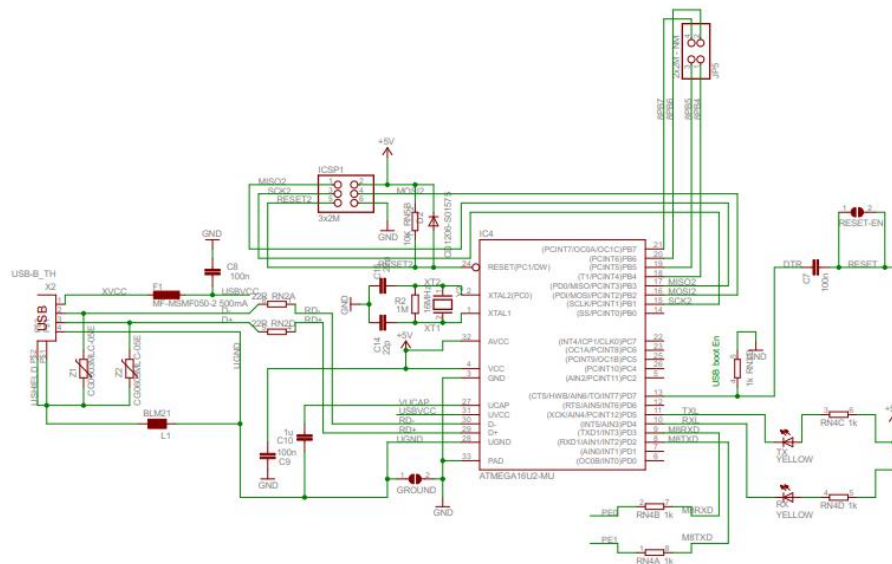


Vývojovou desku je možné napájet napětím 5 V přes USB nebo napětím mezi 6,5 V a 12 V přes souosý konektor. Souosý konektor je napojen přes ochranný obvod na vstup napěťového regulátoru, kde na jeho výstupu je zajištěno napětí o hodnotě 5 V, které je dále rozvedeno do celé vývojové desky. Schéma zapojení napájecí části je znázorněno na obr. 4.3.



Obr. 4.3 – Schéma zapojení napájecí části vývojové desky (Arduino, 2018)

Dále je na desce realizovaná komunikace pomocí USB. Pro správnou funkčnost však musí být komunikace přes USB rozhraní převedena na komunikaci, kterou podporuje mikro počítač, nejčastěji s rozhraním UART nebo USART. Tento převod je zajištěn jiným mikro počítačem, který je speciálně naprogramován pro zajištění tohoto převodu. Schéma zapojení obvodu pro převod komunikace je na obr. 4.4.



Obr. 4.4 – Schéma převodní části vývojové desky (Arduino, 2018)

### 4.2.3 Motory

Pro potřeby zajištění specifikovaných požadavků bylo třeba vybrat vhodné pohony. Jako pohony byly určeny stejnosměrné kartáčové elektrické motory od firmy Pololu. Stejnosměrné kartáčové motory firmy Pololu jsou vyráběny v různých výkonových třídách, s volitelnou možností integrovaného kvadrurního enkodéru s elektronikou a také s možností opatření různými převodovkami. Kombinace dodávaného příslušenství s motorem samotným je jednou z hlavních výhod, proč byly vybrány právě tyto motory.

Pro aplikaci motorů jako pohonů paží delta robota byly vybrány motory nejvýkonnější řady, jejichž napájecí napětí je 12 V a maximální odběr proudu je 5 A opatřené kvadrurním enkodérem s elektronikou a převodovou částí. Parametry vybraného motoru s převodovou částí jsou znázorněny v tab. 4.2, obrázek pohonu je zachycen na obr. 4.5.

Tab. 4.2 – Vlastnosti použitých pohonů (Pololu, 2018a)

Název	Hodnota
Napájecí napětí	12 V DC
Maximální proud	5 A
Proud při volnoběhu	300 mA
Převodový poměr převodovky	70:1
Maximální rychlost	150 otáček za minutu
Krouticí moment	1,37 N·m
Přesnost enkodéru	0,08° (4480 kroků na otáčku)
Průměr motoru	37 mm
Délka motoru s převodovkou	70 mm



Obr. 4.5 – Použitý pohon (Pololu, 2018a)

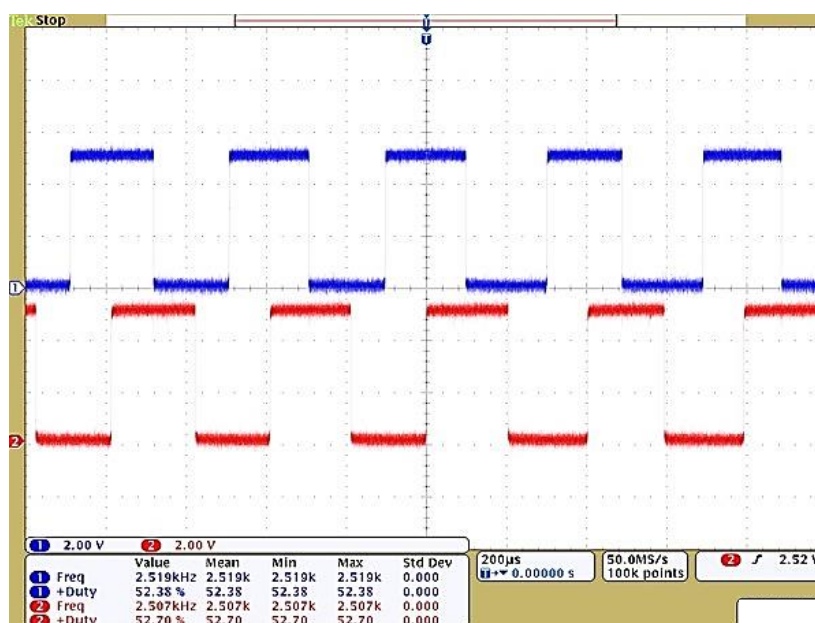
Z elektroniky motoru vystupuje šest kabelů sloužících pro různé účely s různým barevným označením. Funkce a odpovídající barva jednotlivých kabelů je popsána v tab. 4.3.

Tab. 4.3 – Zajišťovaná funkce kabelů pohonů (Pololu, 2018a)

Barva kabelu	Zajišťovaná funkce
Červená	Napájení motoru
Černá	Napájení motoru
Zelená	Napájení elektroniky enkodéru – Zemnicí část (GND)
Modrá	Napájení elektroniky enkodéru – Napěťová část (Vcc)
Žlutá	Elektronika enkodéru – výstup A
Bílá	Elektronika enkodéru – výstup B

#### 4.2.4 Snímače polohy

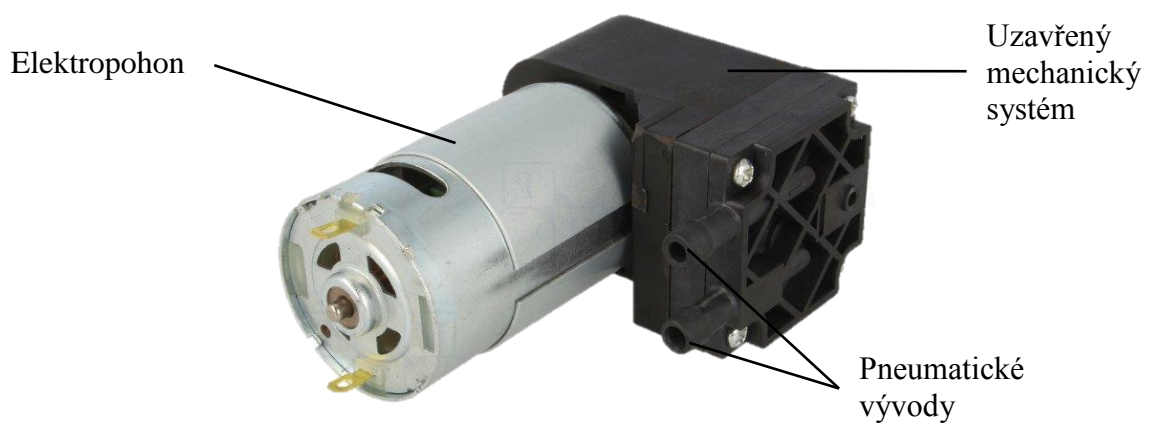
Jak již bylo zmíněno, tak vybrané pohony obsahují zabudované kvadrurní enkodéry. Jedná se o dvoukanálové enkodéry používající Hallovy sondy a magnetický rotační disk, který je připevněn přímo na hřídeli motoru, nikoliv na hřídeli převodovky, čímž je zajištěno jeho výsledné vysoké rozlišení pro otáčení na hřídeli převodovky. Rozlišení samotného kvadrurního enkodéru je 64 kroků na jednu otáčku. Jednotlivé kanály enkodéru zajišťují výstup fázově pootočený o 90°, díky čemuž lze identifikovat směr otáčení motoru. Pro zajištění celého rozlišení je třeba identifikovat oba kanály při náběžné i sestupné hraně. Snímek osciloskopu pro výstupní signál enkodéru je zachycen na obr. 4.6.



Obr. 4.6 – Snímek osciloskopu výstupního signálu enkodéru (Pololu, 2018a)

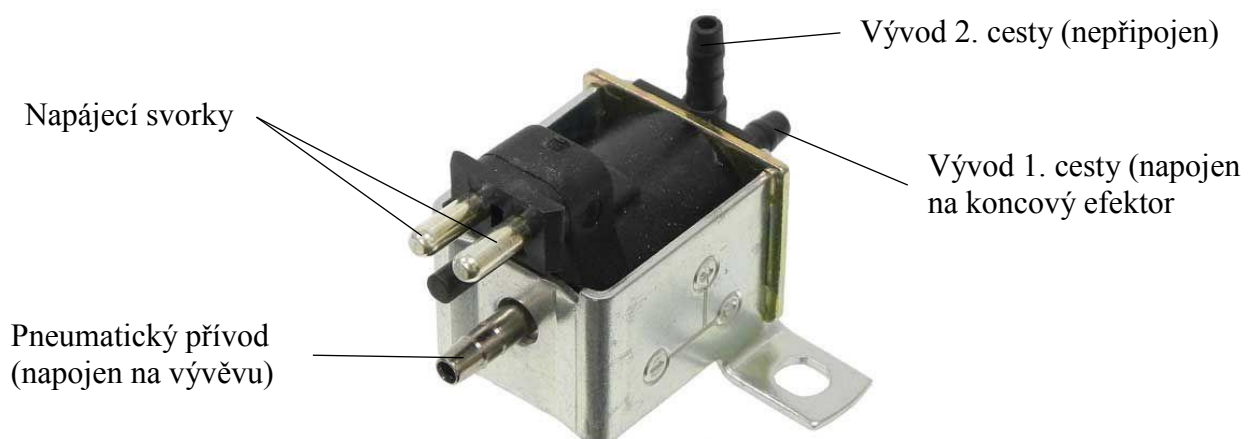
#### 4.2.5 Pneumatické uchopení

Pro potřeby zajištění přenášení manipulovaného předmětu je třeba realizovat pneumatické uchopení. Pro tyto účely byla použita vakuová pumpa. Vakuová pumpa obsahuje elektropohon, který zajišťuje otáčení turbíny v uzavřeném mechanickém systému, čímž je nasáván vzduch z jednoho pneumatického vývodu vývěvy a druhým vývodem tento vzduch uniká do okolního prostoru. Použitá vakuová pumpa potřebuje ke svému chodu stejnosměrné napětí o velikosti 12 V. Maximální protékající proud vývěvy se pohybuje okolo 0,8 A. Vývěva je zobrazena na obr. 4.7.



Obr. 4.7 – Použitá vakuová pumpa (TME, 2018c)

Pro řízení samotného uchopování, respektive pouštění manipulovaných předmětů bylo potřeba systém doplnit o pneumatický ventil, který zajistí rychlé odpojení sání vzduchu od koncového efektoru do vakuové pumpy. Pro zajištění dané funkce byl použit ventil z automobilu, který je řízen stejnosměrným napětím o velikosti 12 V. Ukázka použitého dvoucestného ventilu je zobrazena na obr. 4.8.



Obr. 4.8 – Použitý dvoucestný ventil (Pelican, 2018)

## 4.2.6 Ovladače výkonových částí

Pro řízení jednotlivých pohonů, vakuové pumpy a pneumatického ventilu je potřeba zajistit ovládání z řídicího systému, který používá logické signály. Na tyto účely se používají výkonové zesilovače, řadiče motorů s H-můstky nebo samostatné H-můstky.

Pro potřeby řízení relativně vysokého proudu pohonů byly vybrány řadiče motorů firmy Pololu s označením VHN5019, jejichž parametry jsou popsány následující tab. 4.4.

Tab. 4.4 – Vlastnosti použitých řadičů motorů pro pohony (Pololu, 2018b)

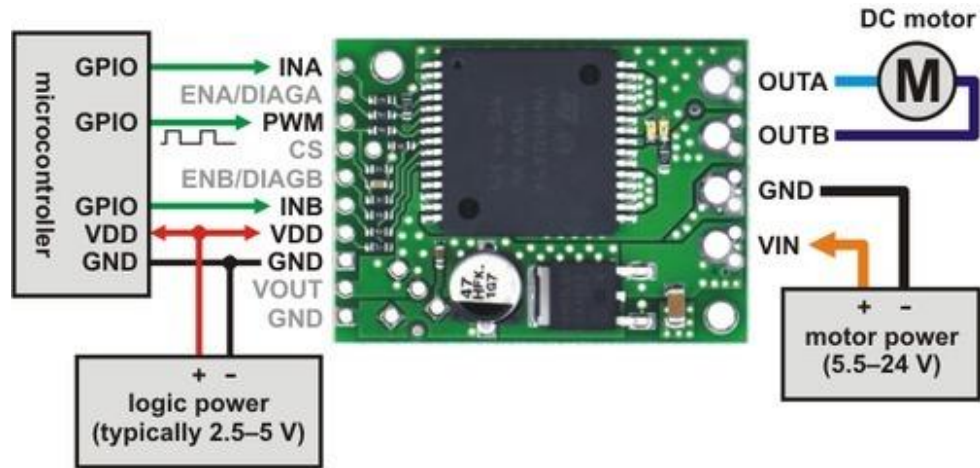
Název	Hodnota
Napájecí napětí logické části	2,5 V až 5 V
Napětí pro výkonové části	5,5 V až 24 V
Maximální stálý proud	12 A
Maximální proud ve špičce	30 A
Maximální frekvence spínání	20 kHz
Rozlišení měření proudu	140 mV/A

Tyto řadiče obsahují vlastní logické části, které lze přímo připojit k mikropočítači, resp. vývojové desce a také výkonové části přímo připojitelné ke zdroji výkonového napětí a k samotným motorům. Principiálně je řadičem spínáno přivedené výkonové napětí vzhledem k logickým stavům na vstupech a řídicímu PWM signálu. Popis jednotlivých vstupů a výstupů, jejich označení a jejich funkce, je zachycen tab. 4.5.

Tab. 4.5 – Popis vstupů a výstupů řadičů motorů pro pohony (Pololu, 2018b)

Označení	Popis funkce
INA a INB	Zajištění směru otáčení pohonu při opačných kombinacích log. 0 a 1.
ENA a ENB	Možnosti ovládání vypnutí jednotlivých kanálů výkonových částí.
PWM	Vstupní pin pro řízení výkonu pohonu.
CS	Výstupní pin pro možné měření velikosti protékaného proudu.
VDD	Slouží k připojení napájení logické části.
VOUT	Slouží k možné redistribuci výkonového napájecího napětí.
GND	Zemnicí připojení pro logické a výkonové části.
VIN	Slouží k připojení výkonového napájecího napětí.
OUTA a OUTB	Výstupy sloužící pro připojení motoru.

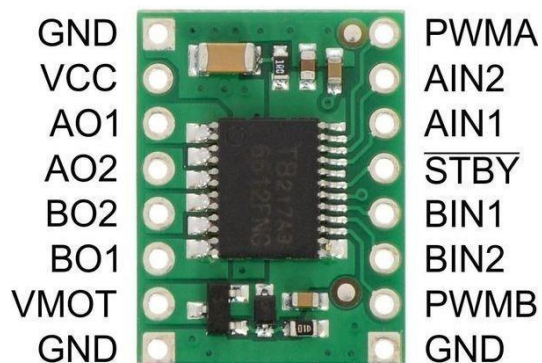
Pro zajištění funkčnosti je přinejmenším třeba připojit všechna potřebná napájecí napětí ze zdrojů napětí a vstupní signály INA, INB a PWM propojit s řídicím systémem. Ukázkový náčrt zapojení v minimální možné konfiguraci pro řízení pohonu je znázorněn na obr. 4.9.



Obr. 4.9 – Náčrt minimálního zapojení řadiče motoru (Pololu, 2018b)

Mimo pohony paží je také potřeba řídit spínání ventilu a vakuové pumpy. Jelikož tato zařízení nedosahují tak vysokého proudového odběru, tak je vhodné použít jiné komponenty než na ovládání motorů. Pro účely tohoto řízení byly vybrány řadiče nižší řady s označením TB6612FNG, které dokážou spínat napětí od 4,5 V do 13,5 V s maximálním stálým průtokem proudu o hodnotě 1 A. Tyto řadiče dokážou současně řídit dvě výkonová zařízení.

Tyto řadiče obsahují principiálně podobné vstupy a výstupy jako dříve zmíněný řadič, a proto budou zmíněny pouze vstupy a výstupy chybějící nebo přebývající. Mezi chybějící jednotky patří analogový výstup protékaného proudu pohonem a digitální vstupy pro možnosti vypnutí jednotlivých kanálů výkonové části. Řadič je naopak rozšířen o vstup STBY, který vypíná celý řídicí mikročip řadiče. Náčrt s jednotlivými označenými vstupy a výstupy řadiče je zachycen na obr. 4.10.



Obr. 4.10 – Náčrt vstupů a výstupů řadiče pro vývěvu a ventil (Pololu, 2018c)

#### 4.2.7 Cena elektronické části

Celková cena elektronických částí je popsána následující tab. 4.6, kde jsou rozepsány ceny jednotlivých použitých elektronických částí.

Tab. 4.6 – Soupis ceny elektronických částí

Název komponenty	Počet	Cena za kus	Cena celkem
Napájecí zdroj 12 V	1	1 238 Kč	1 238 Kč
Napájecí zdroj 5 V	1	235 Kč	235 Kč
Řídicí jednotka	1	520 Kč	520 Kč
Pohony	3	929 Kč	2 787 Kč
Pneumatický ventil	1	610 Kč	610 Kč
Vakuová pumpa	1	510 Kč	510 Kč
Řadiče pohonů	3	546 Kč	1 638 Kč
Řadiče ostatních výkonových částí	2	108 Kč	216 Kč

Celková cena všech použitých elektronických komponent byla vypočtena na 7 754 Kč.

### 4.3 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Jedním ze stěžejních bodů této práce je návrh a realizace konstrukčního řešení, které využívá podporu technologie moderního 3D tisku a je zhotoveno na základě vlastních návrhů jednotlivých konstrukčních komponent nebo s podporou běžně dostupných hliníkových komponent a spojovacích materiálů.

Proces tvorby konstrukčního řešení se potýká s jednoduchými, ale i složitými problémy, které nemusejí být prvotně zřejmé a vnášejí do celkového konstrukčního řešení nežádoucí vlastnosti, které by mohly být odstraněny již pečlivějším návrhem.

Vzhledem k využívání plastových komponent zhotovených pomocí 3D tiskárny může docházet k značnému opotřebování určitých komponent, které ale mohou být nahrazeny za nové díky uchování komponenty v podobě modelu a následnému opětovnému vytisknutí. Dále je možné jednoduše upravovat jednotlivé modely pro zajištění konstrukčního vylepšení. Proti výhodám, které realizace pomocí 3D nabízí, vystupuje do popředí hlavně nemožnost vytisknutí předmětu jakéhokoliv tvaru, kvůli omezením technologie 3D tisku. Při návrhu komponent je tedy potřeba zvážit, zda je model vytisknutelný a případně jej adekvátně přepracovat.

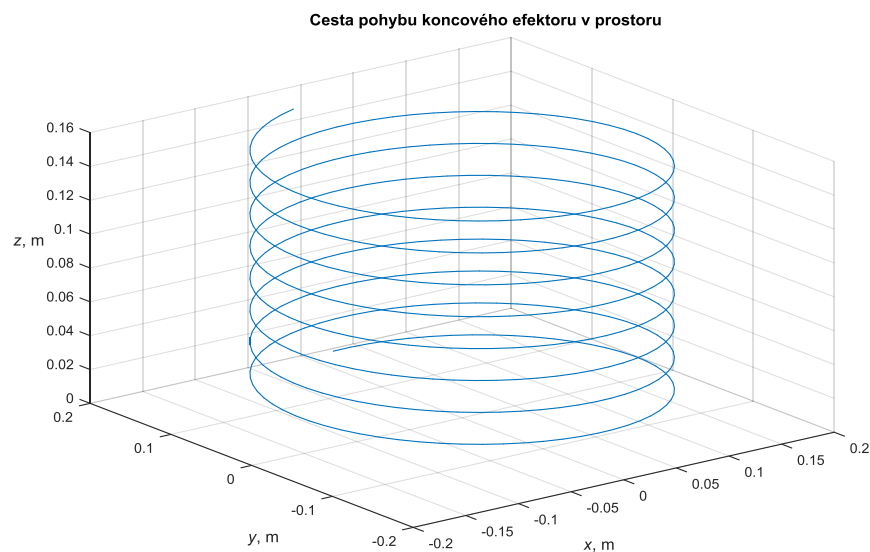
### 4.3.1 Stanovení velikostí paží a předloktí

Stanovení velikosti komponent se odvíjí od velikosti pracovního prostoru, který dokáže robota obsluhovat, ale také od minimální požadované přesnosti vzhledem k již známým pohonům. Pro vypočtení velikosti paží a předloktí tak, aby splňovaly podmínky pracovního prostoru a minimální přesnosti, byl použit iterativní proces s použitím programu Matlab. Tento proces probíhal následným způsobem.

Nejprve byly stanoveny zmíněné požadavky, minimální a maximální rozměry paží a předloktí a minimální a maximální výška umístění motoru nad podložkou. Pro jednotlivé kombinace délky paží a předloktí, a výšky byl prováděn výpočet mezních bodů pracovního prostoru, a zda jsou pro danou konfiguraci dané body dostupné. Následně se prováděly iterace, kde byla nejprve zvyšována velikost předloktí v rámci jedné délky paží a postupně pak byla zvyšována délka paží samotných a následně i výška umístění motoru. Při každé iteraci bylo ověřováno pokrytí pracovního prostoru a nejvyšší možná chyba polohování robota. Iterování tedy probíhalo přes tři cykly se zvyšováním délky předloktí, následně délky ramen a výšky umístění motoru nad podložkou.

Pro jednotlivé konfigurace byly vypočítány i přibližné momenty s využitím předdefinovaných odhadů hmotností a koeficientů tření pohybujících se komponent při kruhovém pohybu se zvyšující se výškou efektoru nad podložkou.

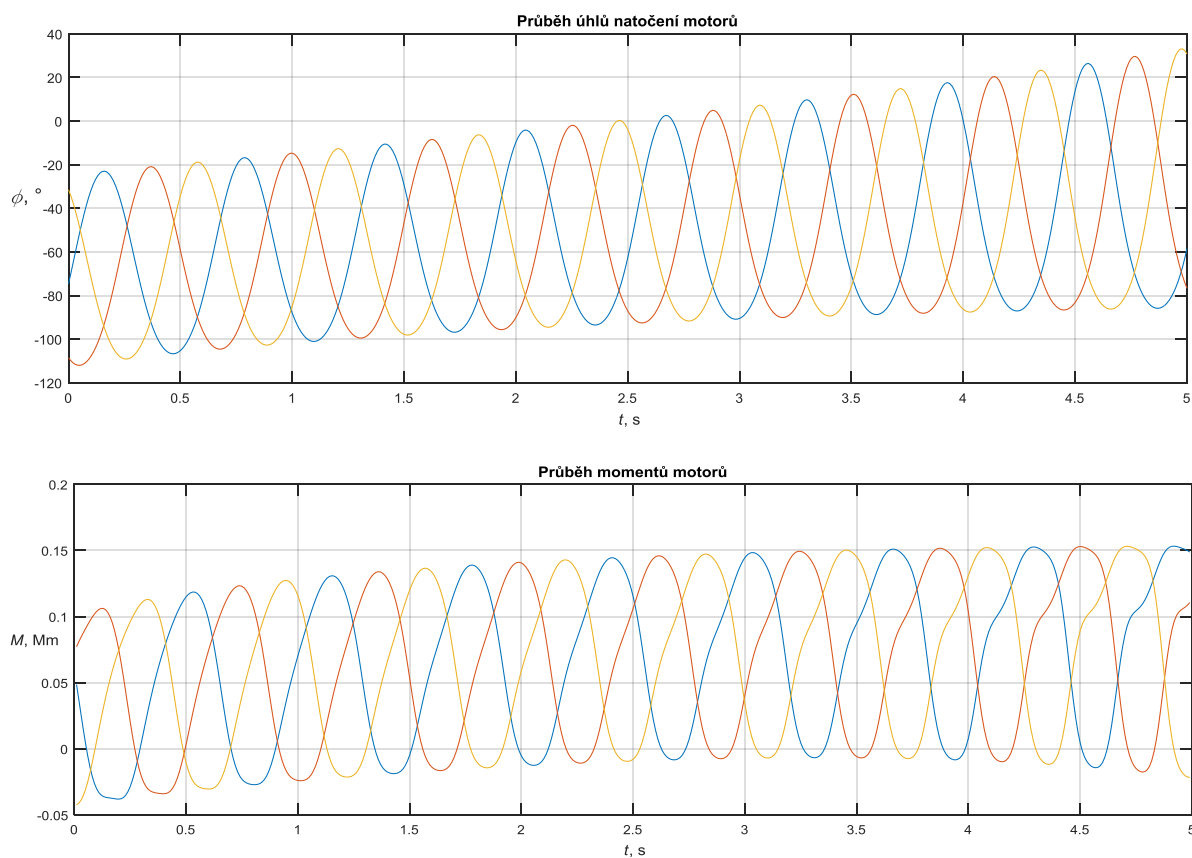
Z výstupu byla potom vybrána určitá konfigurace, která se jevila jako nejvýhodnější a pro danou konfiguraci byly vytvořeny různé grafické závislosti pro zmiňovanou cestu pohybu po kružnici s rostoucí souřadnicí  $z$ . Cesta pohybu efektoru je znázorněna na obr. 4.11.



Obr. 4.11 – Cesta pohybu koncové efektoru v prostoru



Dále pro danou cestu pohybu byly zaznamenány průběhy úhlu natočení jednotlivých pohonů a průběhy momentů jednotlivých pohonů, které jsou znázorněny na obr. 4.12.



Obr. 4.12 – Průběhy některých sledovaných veličin

Následně byly dané průběhy vyhodnoceny z pohledu rezervy v mezních oblastech tak, aby bylo splněno, že na pokrajích pracovního prostoru nebudou hodnoty sledovaných veličin na rozhraní, ale budou poskytovat určitou rezervu. Tato rezerva je potřebná pro možné neadekvátní odhady některých hmotností a koeficientů tření.

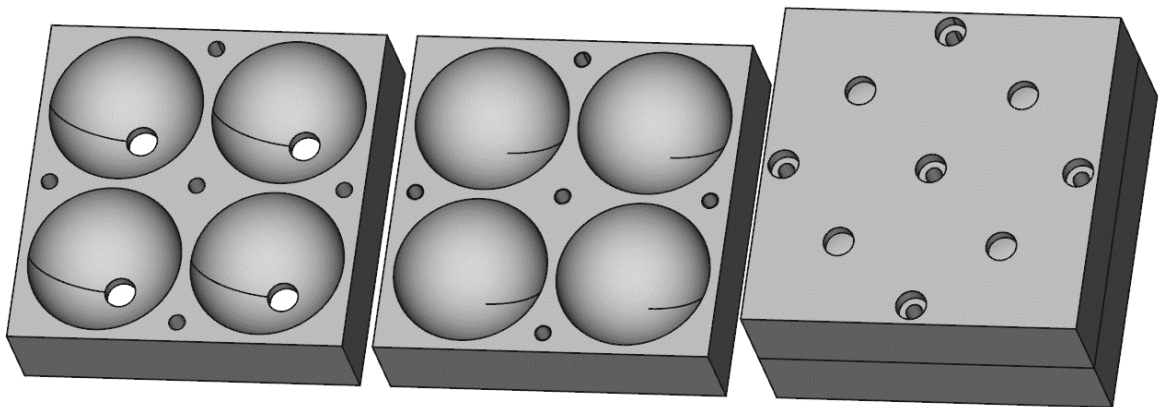
Na základě zmíněných kritérií byla vybrána konfigurace, jejíž parametry jsou popsány v tab. 4.7.

Tab. 4.7 – Důležité rozměry použité konfigurace

Název	Velikost
Vzdálenost motorů od středu základny	171,3 mm
Výška umístění motoru	371,8 mm
Délka paží	160 mm
Délka předloktí	310 mm
Vzdálenost úchyty od středu zápěstí	35 mm

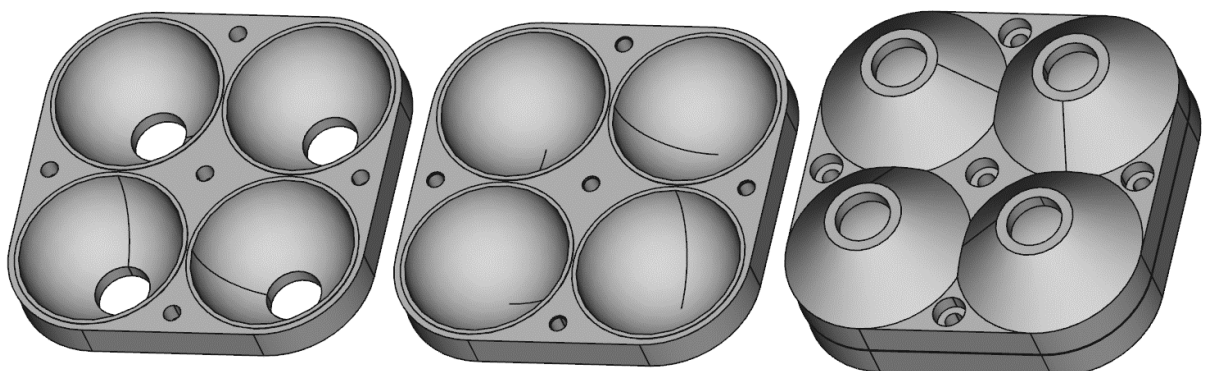
### 4.3.2 Manipulované předměty

Pro tvorbu manipulovaných předmětů, kterými jsou koule o průměru 30 mm, byl použit dvousložkový kondenzační silikon v kombinaci s barevnými pigmentovými pastami. Ideálním postupem výroby silikonových předmětů je pomocí odlévání silikonu. Vzhledem ke tvaru předmětu a viskozitě silikonu však odlévání nebylo v prvotní fázi uvažováno. Pro výrobu těchto koulí byla zhotovena první verze formy pomocí technologie 3D tisku, která je zobrazena na obr. 4.13.



Obr. 4.13 – První forma pro tvorbu manipulovaných předmětů

Jelikož bylo třeba silikon do forem injektovat s pomocí stříkaček, tak některé zhotovené koule byly velice porézní vlivem přítomnosti vzduchu při injektování. V závislosti na tomto problému byl navrhnout model druhé formy umožňující odlévání silikonu za cenu ztráty přesného tvaru koule. Nová verze modelu formy byla navržena s ohledem na spotřebu materiálu použitého pro tisk formy. Model druhé formy je znázorněn na obr. 4.14.



Obr. 4.14 – Druhá forma pro tvorbu manipulovaných předmětů

Oba modely se skládají ze dvou částí, které jsou před tvorbou odlitků sešroubovány a po dokončení procesu jejich tvorby a následného vysychání jsou rozšroubovány, čímž mohou z jednotlivých míst být odebrány jednotlivé odlitky.

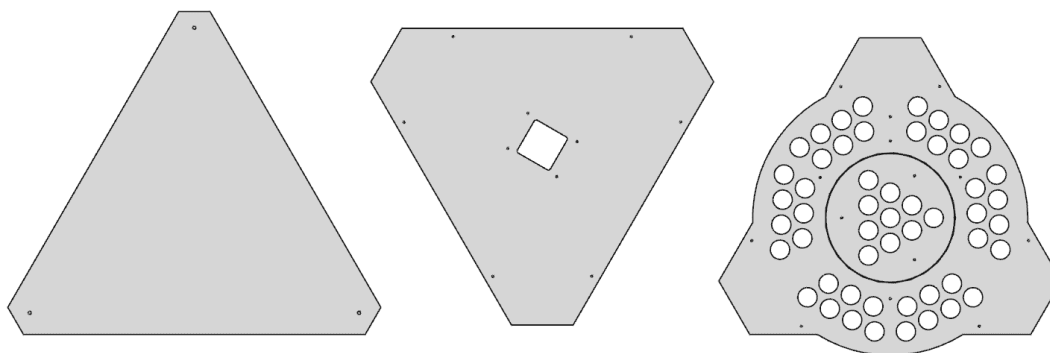
Při zhotovování dvousložkové směsi kondenzačního silikonu je třeba aplikovat přesné množství tvrdící složky, v závislosti na množství první složky, ale také přidané pigmentové pasty. Ideální podmínky nasycené směsi zajistí dostatečný čas pro odlévání a pro finální vytvrdnutí. U přesycených směsí dochází k rychlému tvrdnutí, čímž je znemožněno kvalitní odlévání, a naopak směsi bez dostatku tvrdidla nikdy nedosáhnou stavu ztvrdnutí. Jelikož byly manipulační předměty zhotovené různými barvami, tak je následně uvedeno barevné spektrum zhotovených míčků, jež je na obr. 4.15.



Obr. 4.15 – Barevné spektrum zhotovených manipulovaných předmětů

### 4.3.3 Hliníkové komponenty

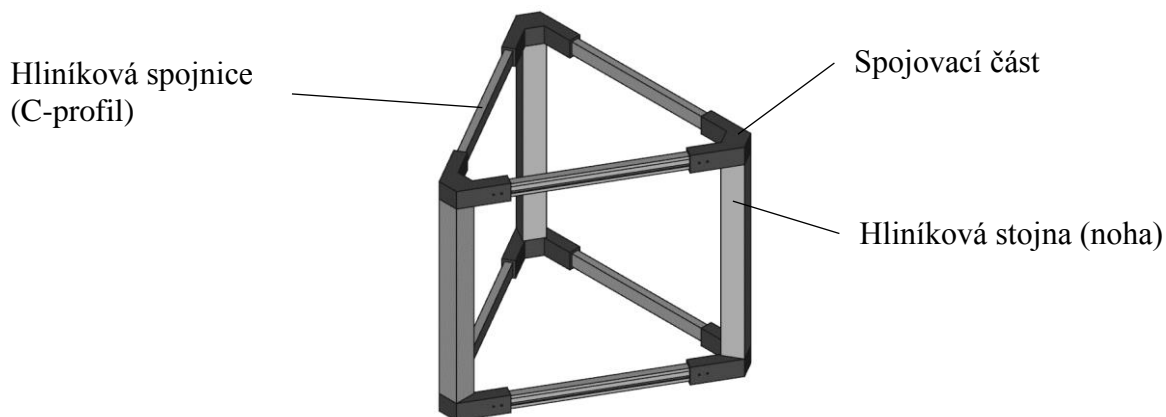
Pro účely tvorby robota byly vybrány dostupné hliníkové komponenty ve formě standardních hliníkových profilů. Hliníkové komponenty jsou použity výhradně pro nosnou část robota, která zajistí umístění funkčního systému robota do určité výšky. Dále jsou hliníkové komponenty využity pro zajištění povrchu pro umístění jednotlivých elektronických částí a dále jako kryty elektroniky. Hliníkové povrchové komponenty pro krytí, zajištění povrchu pro umístění elektronických částí a pro zajištění přesných pozic manipulovaných předmětů je na obr. 4.16.



Obr. 4.16 – Znázornění povrchových hliníkové části

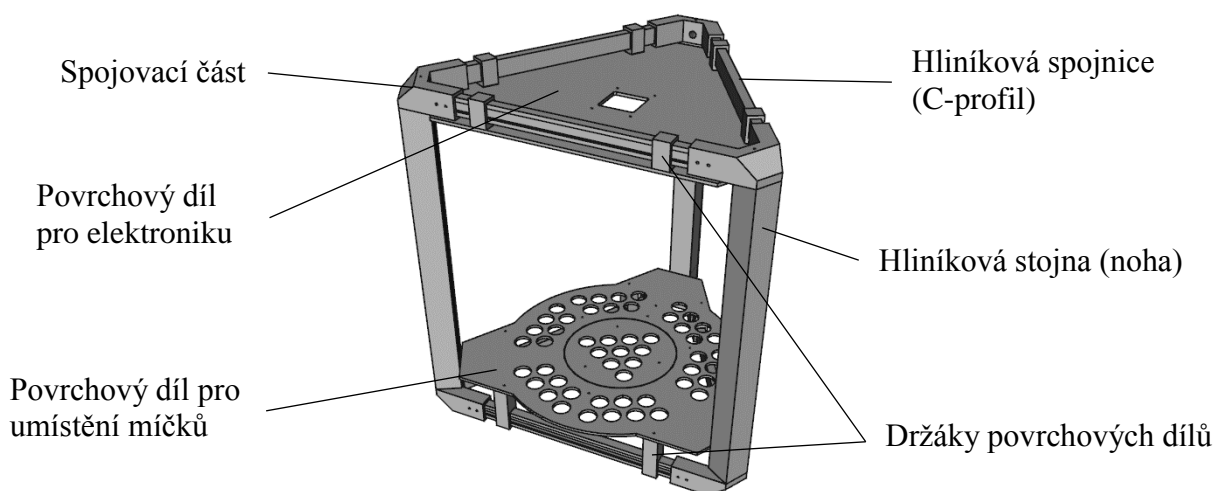
Povrchové díly byly zhotoveny s využitím technologie laserového řezání, kde byl využit přímo soubor modelu převedený do rovinného obrazce, tedy pro jednu hodnotu souřadnice z.

Hliníková část nosné konstrukce je složena ze tří čtvercových jeklů o délce strany 35 mm, tloušťce 2 mm a délce 420 mm, a dále šesti spojovacích hliníkových profilů ve tvaru C o celkovém rozměru 22,4 mm na 12,2 mm. Hliníkové komponenty jsou pospojovány pomocí navržených spojovacích částí, které jsou dále popsány. Spojená nosná část s popisem je znázorněna na obr. 4.17.



Obr. 4.17 – Nosná konstrukce robota

Pro uchycení povrchových hliníkových komponent k nosné konstrukci jsou použity vytištěné úchyty. Nosná konstrukce s povrchovými komponentami a popisem je znázorněna na obr. 4.18.



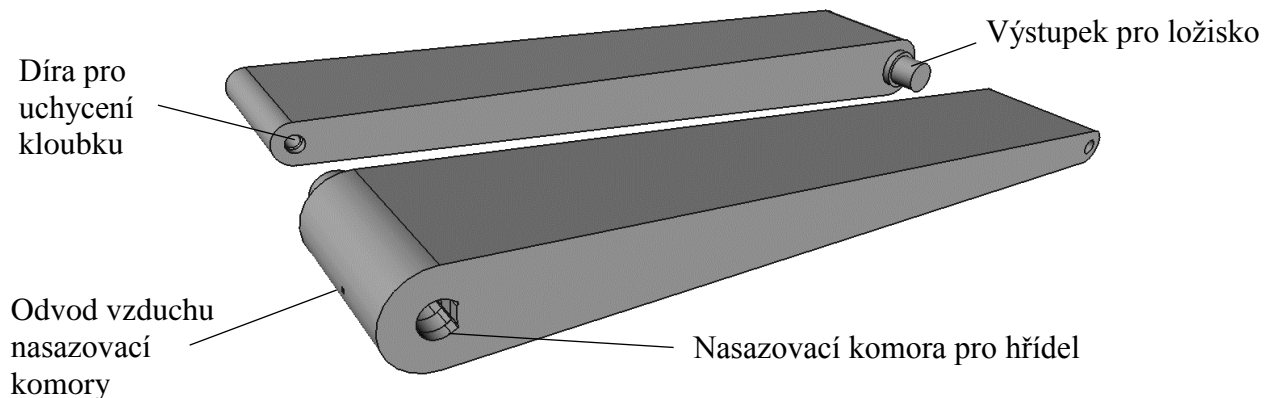
Obr. 4.18 – Nákres nosné konstrukce s povrchovými díly

#### 4.3.4 Model paže

Paže je jednou z nejdůležitějších částí pohybového ústrojí robota. Paže je přímo upevněna ke hřídeli pohonu, a proto je důležité zajistit dostatečnou pevnost její napojovací části. Pohon disponuje hřídelí tvaru D o průměru 6 mm, která byla pro první model paže vkládána přímo do paže.

Pro možné vložení byla vymodelována díra, která přesně odpovídala tvaru hřídele s malou rezervou. Při prvním vytištěném kusu paže však nebylo možné paži nasadit na celou hřídel, ale pouze zhruba do jedné čtvrtiny délky hřídele. Bylo zjištěno, že dochází ke vzduchotěsnému spoji a vlivem stlačování vzduchu nelze paži celou nasadit. Pro možnosti nasazení byl do paže přidán odvod vzduchu z nasazovací komory.

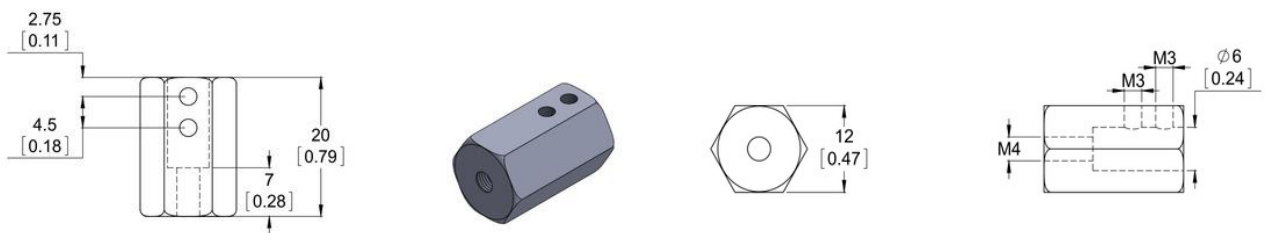
Dále byla provedena simulace pevnosti v programu FreeCAD, kde první návrh vyhovoval možnému působení torzního momentu 1,2 N·m, čímž odpovídal předpokladům při standardním zatížení robota, motory totiž mohou poskytovat při velkém zatížení i vyšší moment, než byl u modelu paží vypočítán za přijatelný. První model paže byl vyhotoven a proběhlo zátěžové testování, při zátěžovém testu paže obstála a byly zhotoveny další 2 paže. Model první paže je znázorněn na obr. 4.19.



Obr. 4.19 – První verze modelu paže

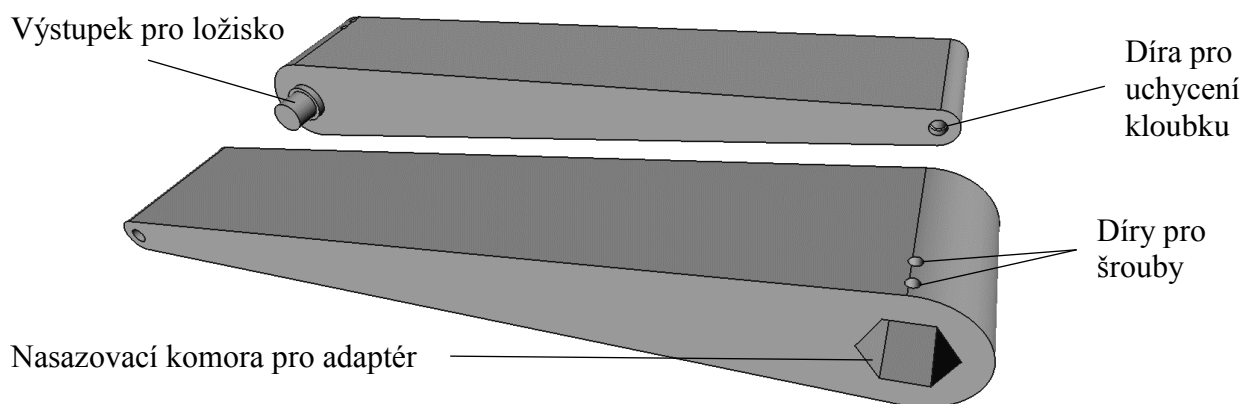
Vlivem času a neustálého provozu robota bylo vypořádáno, že komory pro hřídel vykazují vůli a s pažemi lze mírně pohybovat i při fixním stavu úhlu natočení pohonu. Tento efekt nastal dlouhodobým působením sil a následným vzniklým opotřebením paží.

Vzhledem k tomuto faktu a k předcházení nadbytečné údržby v podobě tisku a nahrazení nových paží bylo rozhodnuto, že hřídel bude opatřena kovovými adaptéry hřídele, které se budou nasouvat do výřezu v paži. Tyto adaptéry mají tvar šestihranu, jsou znatelně větší a zajistí vhodnější převedení síly z pohonu na paži. Adaptéry jsou znázorněny na obr. 4.20.



Obr. 4.20 – Adaptér hřídele a jeho rozměry (Pololu, 2018d)

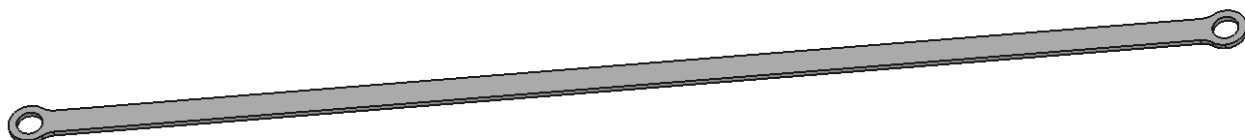
Vzhledem k radikální změně tvaru dané části byl vytvořen druhý model paže, který umožňuje prvotní aplikování adaptéru se zajištěním těsného spojení s paží a následné nasazení na hřídel pohonu a fixaci ke hřídeli pomocí šroubů. Druhý model paže je zachycen na obr. 4.21.



Obr. 4.21 – Druhá verze modelu paže

### 4.3.5 Model předloktí

Předloktí propojuje kloubky uchycené na paži s kloubky uchycenými na zápěstí. Pro možnost připnutí na kloubové ústrojí musí předloktí obsahovat na koncích kulový výřez pro možnost zajištění tohoto spojení. Pro předloktí je vyžadována nízká hmotnost v kombinaci s pevností ve směru kolmém na osu připnutých kloubků. Dle těchto parametrů byl navržen model předloktí, který je znázorněn na obr. 4.22.

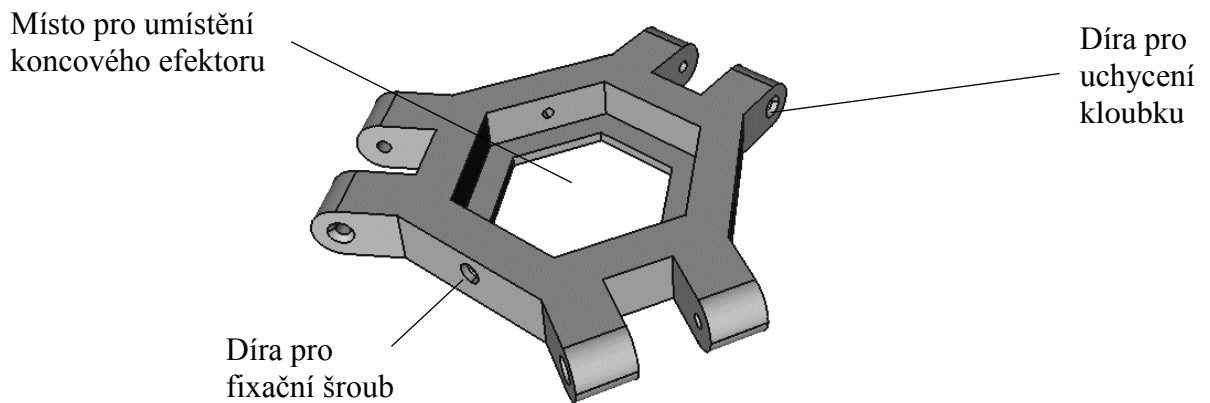


Obr. 4.22 – Model předloktí

Předloktí bylo podrobena zátěžové zkoušce pevnosti úchytů ke kloubovému ústrojí, kde splňovalo požadavky a následně byly dotisknuty zbývající předloktí pro možnost realizace.

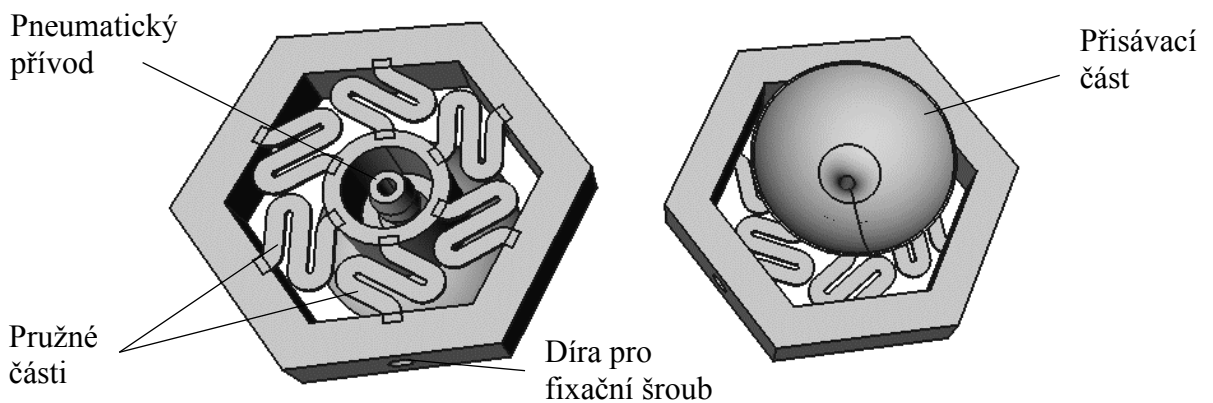
### 4.3.6 Model zápěstí a koncového efektoru

Zápěstí bylo navrženo tak, aby sloužilo jako část, kterou lze připojit k předloktím, a aby bylo možné k němu připevnit různé koncové efektoru. Dále bylo potřeba zajistit, aby obě části předloktí byly paralelně, což bylo realizováno umístěním děr pro uchycení kloubků ve stejné vzdálenosti od sebe jako u paží. Model zápěstí je zachycen na obr. 4.23.



Obr. 4.23 – Model zápěstí

Další důležitou částí je koncový efektor, který zajišťuje možnost přisávání manipulovaného předmětu. Pro tyto účely byl navržen speciální model s pružnými částmi, které zajišťují mírnou vůli koncového efektoru při dosedání na manipulovaný předmět. Obdobně potom i samotná přisávací část je zhotovena flexibilně, aby dokázala kopírovat nepřesnosti tvaru míčků a ty mohly být k efektoru přisávy. Model efektoru je znázorněn na obr. 4.24.

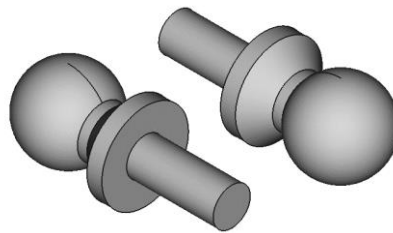


Obr. 4.24 – Model koncového efektoru

Vzhledem k variabilitě tvrdosti míčku bylo potřeba do středu efektoru přidat ocelovou pružinku, která podporuje rychlé položení manipulovaného předmětu.

### 4.3.7 Kloubová spojení

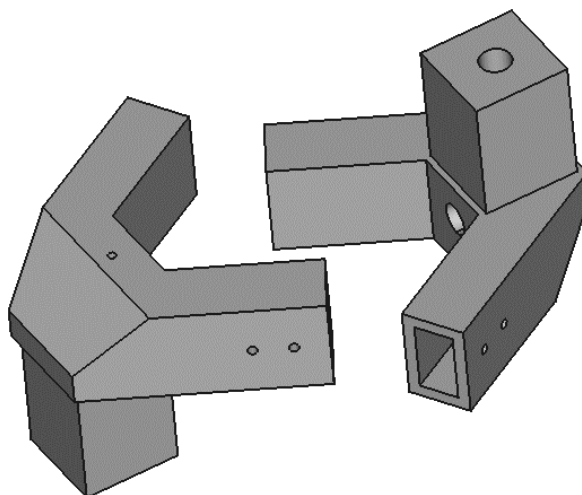
Pro zajištění spojení paže s předloktím a předloktí se zápěstím jsou použity mosazné kloubky se šroubovicí s jemným stoupáním, kterou lze zašroubovat do ostatních komponent tak, aby nedocházelo k protáčení kloubku a jeho postupnému odšroubování. Pro kloubek byl vytvořen model bez šroubovice, který tvarem odpovídá kloubku a je znázorněn na obr. 4.25.



Obr. 4.25 – Model kloubových spojení

### 4.3.8 Modely nosných a upevňovacích částí

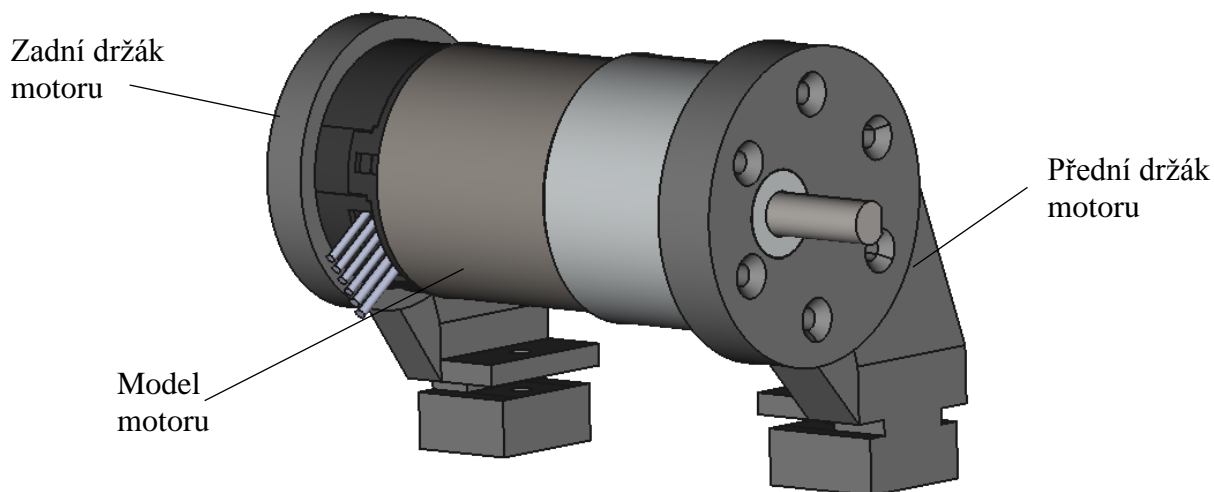
Jednotlivé hliníkové komponenty nosné části jsou spojeny pomocí navržené spojovací komponenty. Spojovací komponenta obsahuje přípojnou část, ke které lze připojit použité čtvercové hliníkové jekly, dále dvě části pro vložení a připojení hliníkových spojnic se vzájemným sevřeným úhlem  $60^\circ$  a díru pro vedení kabelů uvnitř konstrukce. Model spojky je znázorněn na obr. 4.26.



Obr. 4.26 – Model spojovací části nosné konstrukce

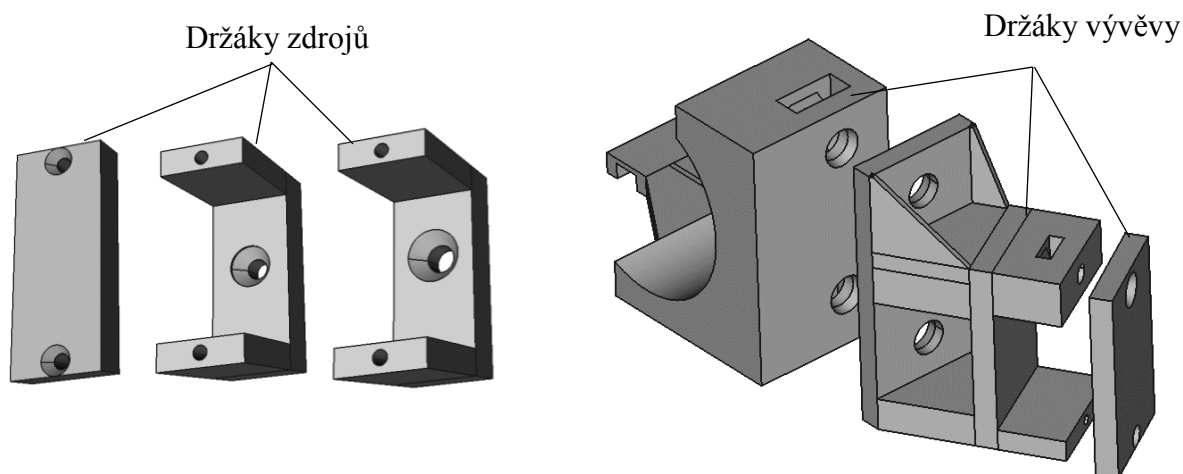
Dále bylo potřeba vyhotovit různé komponenty, které budou připojovat elektronické části k nosné konstrukci. První důležitou částí jsou držáky motoru, které zajišťují uchycení motoru k hliníkovým spojovacím částem. Tyto držáky motoru jsou zachyceny na obr. 4.27.





Obr. 4.27 – Model držáku motoru se zobrazeným motorem

Dále je potřeba ke konstrukci upevnit zdroje napájení, vakuovou pumpu a držáky elektronických částí. Tyto komponenty byly navrhovány vzhledem ke strojním nákresům jednotlivých zařízení a součástí v kombinaci s využitím modelu nosné konstrukce. Vybrané upínací realizované části jsou popsány na obr. 4.28.



Obr. 4.28 – Modely vybraných upínacích prvků

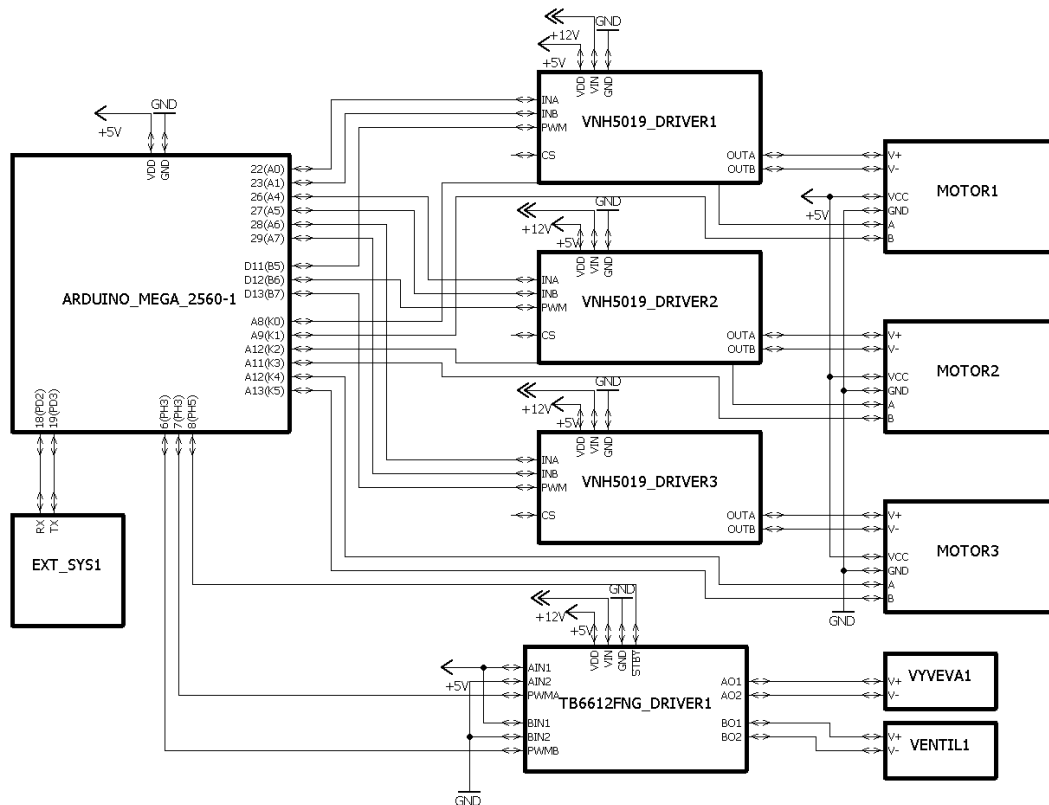
Držáky vývěvy jsou specifické tím, že mezi část, která uchytává vývěvu samotnou a část, která je uchycena na nosnou konstrukci, patří ještě gumové tlumicí komponenty, které značně potlačují přechod vibrací z vývěvy na konstrukci.

Mimo zobrazené upínací prvky byly zhotoveny držáky pro řadič ventilu a vývěvy, pro ložisko připevňované k paži a také držáky povrchových hliníkových částí.

### 4.3.9 Propojení elektronických částí

Pro zajištění funkce celého systému je potřeba všechny elektronické části mezi sebou propojit. Jelikož se jedná o modulové části, tak k jejich propojení dochází pomocí propojovacích kabelů. Propojovací schéma je důležitou součástí pro programování řídicího systému.

V závislosti na propojení mohou být jednotlivé funkčnosti realizovány. V případě špatné realizace propojení nemusí některé části být funkční vzhledem k vnitřní struktuře periférií řídicího systému. Propojovací schéma modulů je na obr. 4.29.



Obr. 4.29 – Propojovací schéma jednotlivých modulů

Pro potřeby spuštění před programovaných akcí bez potřeby připojení externího řídicího systému bylo k řídicí části připojeno tlačítko, jehož jeden vývod je připojen na zemnicí svorku, a druhý vývod je připojen na pin 53 reprezentující pin B1 řídicího mikrokontroléru ATmega2560.

## 5 ŘÍDICÍ SYSTÉM DELTA ROBOTA

Řídicí systém delta robota má za úkol zajistit regulaci jednotlivých pohonů pomocí zpětnovazebního řízení dle čtených stavů z enkodérů pohonů, komunikaci s externím řídicím systémem, který ovládá pohyb robota a dále zajištění pohybu po určitém typu trajektorie.

Před zajišťováním správné trajektorie je nejprve třeba zajistit správné polohování na konkrétní jednotlivé pozice. Tento problém nastává v různých oblastech.

Nejprve je třeba vyřešit zpracovávání signálů z kvadrurních enkodérů, které je potřeba pro určení aktuální hodnoty úhlu natočení vůči počáteční pozici. Počáteční pozice může být nastavena kalibrací na předurčeném místě, ve kterém je známa pozice v pracovním prostoru robota, nebo pomocí externího systému, který dokáže aktuální pozici vyhodnotit.

Při znalosti úhlů natočení je již poskytována určitá zpětná vazba, kterou lze využít pro potřeby regulace pomocí standardních regulátorů, kterými jsou například P regulátor, PD regulátor anebo PID regulátor. Nastavení konstant regulátoru se odvíjí od požadavků na regulaci. Regulace úhlu natočení pohonů je následně popsána v oddílu 5.1.

### 5.1 REGULACE POHONŮ

Dle modelu stejnosměrného bezkartáčového motoru odvozeného v pododdílu 2.2.4, je rychlost otáčení motoru popsána soustavou diferenciálních rovnic, z které může být odvozen přenos odpovídající statické soustavě druhého stupně. Úpravou výsledné rovnice lze obdobně získat i přenos pro úhel natočení, který odpovídá přenosu astatické soustavy druhého stupně. Úhel natočení tedy s přivedeným kladným vstupním signálem roste. Jedná se o systémy popsané následujícími obrazovými přenosy

$$F_p(s) = \frac{K}{s \cdot (T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1)}, \quad (5.1)$$

$$F_v(s) = \frac{K}{(T_1s + 1) \cdot (T_2s + 1)}, \quad (5.2)$$

kde  $F_v$  – obrazový přenos pro rychlost otáčení motoru,

$F_p$  – obrazový přenos pro úhel natočení motoru,

$s$  – Laplaceův operátor,

$K$  – zesílení soustavy,

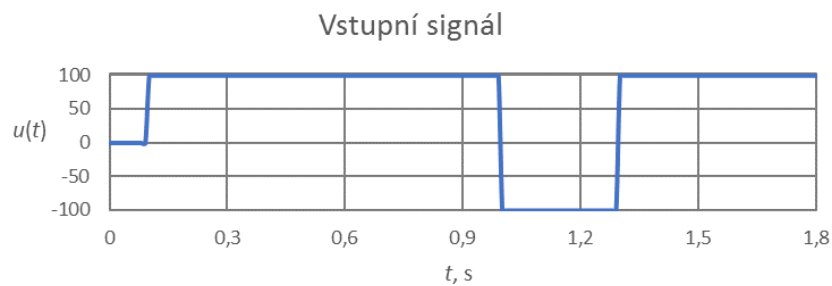
$T_1$  – časová konstanta soustavy, s,

$T_2$  – časová konstanta soustavy, s.

### 5.1.1 Charakteristiky motoru

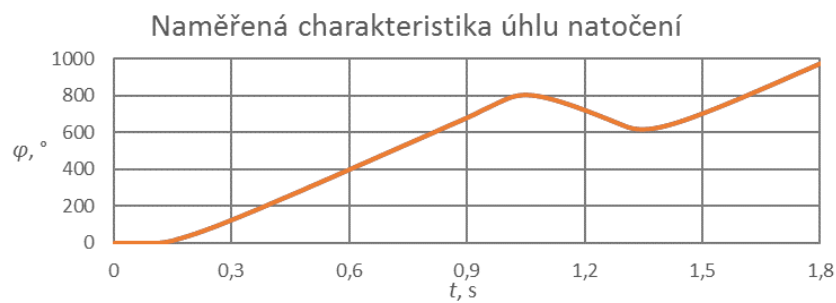
Pro návrh vhodného regulátoru je nejprve potřeba určit přenosové funkce systému. Pro určení parametrů přenosových funkcí existují různé metody, kde jednou z nejběžnějších a jednodušších metod je identifikace přenosu z přechodové charakteristiky. Dále lze použít metody založené na minimalizaci celkové chyby rozdílů naměřené charakteristiky s odhadovanou charakteristikou.

Prvním krokem k realizaci některé ze zmíněných metod je změření přechodové charakteristiky nebo obecnější charakteristiky, kde je znám průběh vstupní veličiny do systému. Na danou soustavu byl přiveden vstupní signál, který je zachycen na obr. 5.1.

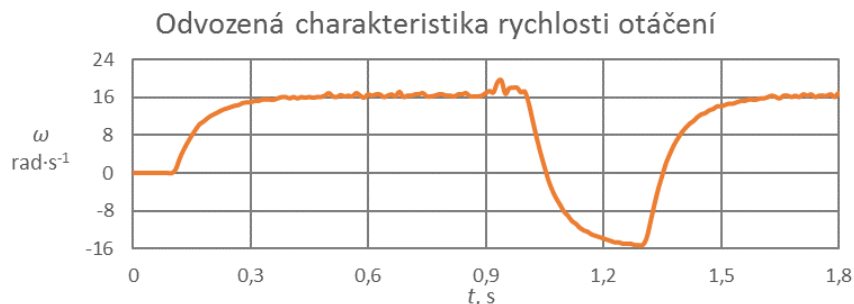


Obr. 5.1 – Průběh signálu vstupní veličiny

Pro daný vstupní signál byla změřena charakteristika pro úhel natočení pohonu, znázorněná na obr. 5.2 a dále byla pomocí její derivace odvozena charakteristika pro rychlost otáčení, která je znázorněna na obr. 5.3.



Obr. 5.3 – Naměřená charakteristika úhlu natočení



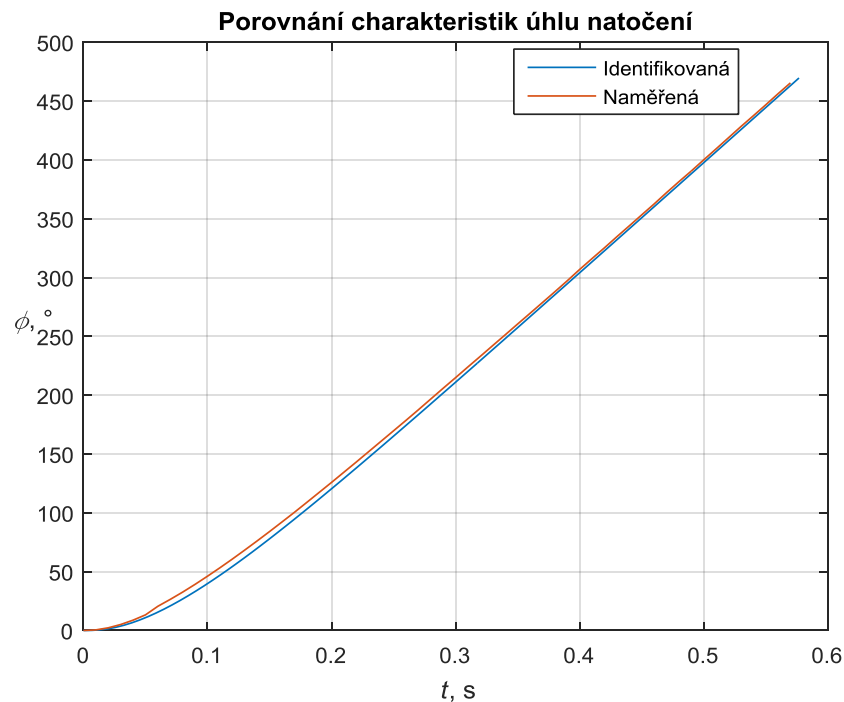
Obr. 5.2 – Odvozená charakteristika rychlosti otáčení

S využitím speciální funkce Matlabu, označené jako „tfest“, a znalosti počtu pólů a nul systému dle přenosových obrazů odvozeného modelu motoru, byly získány následující přenosy

$$F_p(s) = \frac{937,4}{s \cdot (0,0704s + 1) \cdot (0,0056s + 1)}, \quad (5.3)$$

$$F_v(s) = \frac{937,4}{(0,0704s + 1) \cdot (0,0056s + 1)}. \quad (5.4)$$

Pro systémy popsané přenosy 5.3 a 5.4 byly vygenerovány přechodové charakteristiky, které byly porovnány s naměřenými charakteristikami. Porovnání charakteristik pro úhly natočení reálného naměřeného přenosu a charakteristiky pro odhadnutý přenos je zachyceno na obr. 5.4.



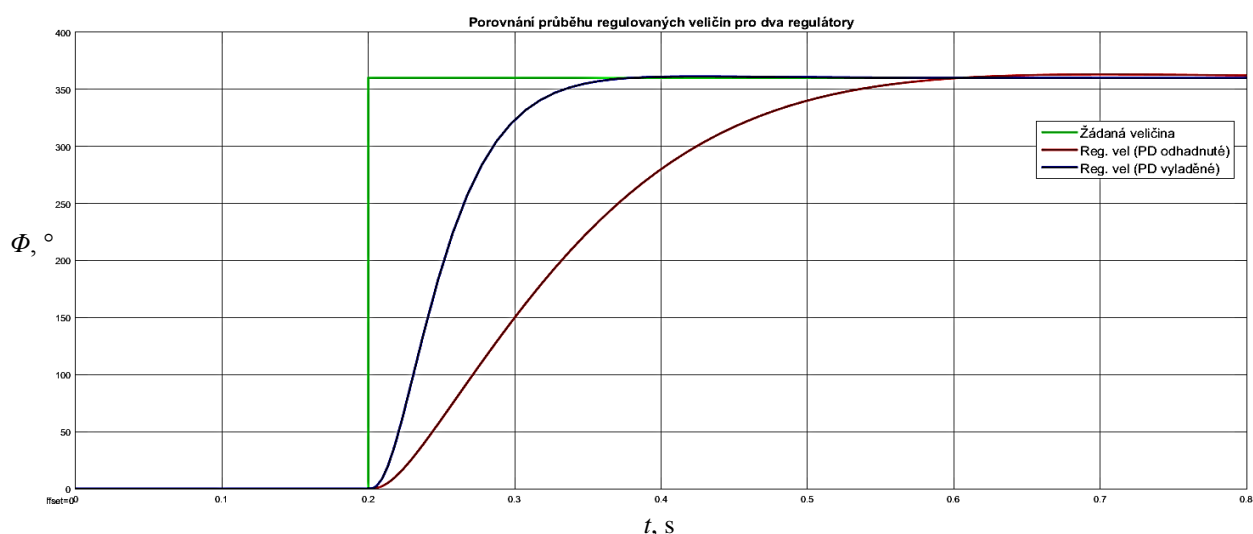
Obr. 5.4 – Porovnání přechodových charakteristik úhlu natočení

### 5.1.2 Návrh regulátoru

Prvním důležitým bodem před samotnou realizací návrhu regulátoru je určení regulované veličiny a jejích známých vlastností. Po určení veličiny lze již uvažovat nad konkrétním návrhem konkrétního regulátoru. Pro potřeby regulace úhlu natočení motorů byl určen vhodný regulátor v podobě PD regulátoru, který je schopen zajistit dostatečné vlastnosti regulace soustavy s integračním charakterem.

Pro vypočítání konstant PD regulátoru existuje nepřeberné množství metod, které mohou být zakládány na parametrech určených z přechodové charakteristiky při kmitání veličiny na mezi stability, tedy postupně s kmity o stálé amplitudě, nebo metody zakládáné na zkušenostech z předchozích pozorování nebo např. prostá metoda známá jako „pokus – omyl“.

Prvotní hodnota regulátoru byla nastavena metodou „pokus – omyl“ a dále byl využit nástroj pro ladění PID regulátorů, kterým byl nalezen vhodný regulátor. Porovnání regulačních pochodů prvotního a odladěného regulátoru je znázorněno na následujícím obr. 5.5.



Obr. 5.5 – Porovnání regulačních pochodů dvou regulátorů

Nalezené konstanty optimálního regulátoru jsou zapsány v následující tab. 5.1.

Tab. 5.1 – Optimální hodnoty konstant regulátoru

Název	Hodnota
Derivační časová konstanta – $T_D$	0,0012 s
Zesílení regulátoru – $K$	0,02

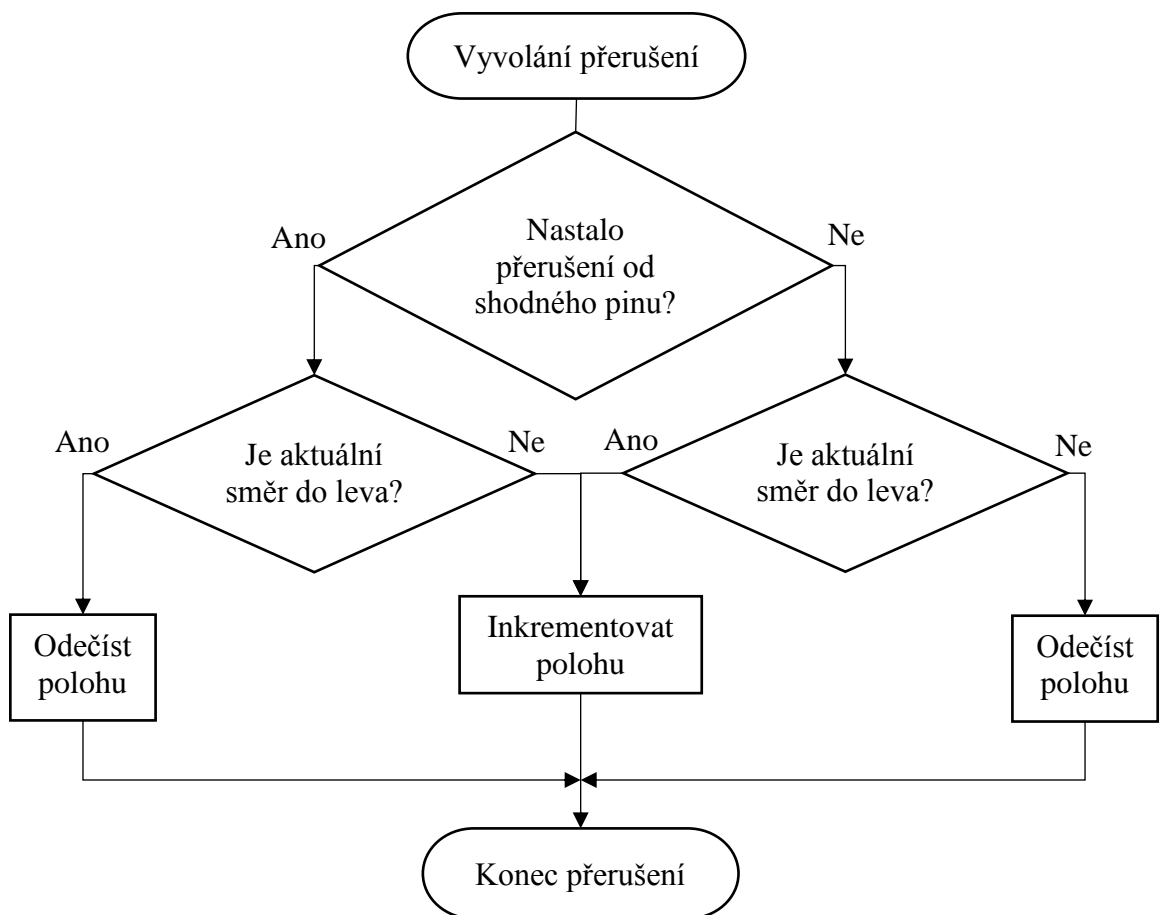
## 5.2 ŘÍDICÍ PROGRAM

Řídicí program zajišťuje správné chování robota v reakci na požadavky stanovené externím řídicím systémem. Pro správnou funkci robota a zajištění polohování koncového efektoru je třeba korektně zpracovávat signály ze snímačů, které jsou poskytnuty pro určení regulační odchylky, která je předávána internímu regulátoru polohy, jež zajišťuje nastavení výkonů motorů. První částí programu je zpracování signálu pro snímání polohy.

### 5.2.1 Zpracování snímání polohy

Pro účely zpracování kvadrurního signálu z rotačního enkodéru byl zhotoven kód přímo v jazyce symbolických adres tzv. „Assembleru“. Výhoda zpracování s podporou takto nízko úrovněho jazyka spočívá v naprosté kontrole daných procesů, které mohou být tímto druhem přístupu optimalizovány pro dosažení vyšší rychlosti provádění.

Signály z enkodérů jsou přivedeny na PORTK mikropočítače, kde jsou jednotlivé piny nastaveny jako zdroje externího přerušení se sestupnou i náběžnou hranou. Přerušení je vyvoláno jakoukoliv změnou daného pinu a všechny dané nastavené piny v tomto režimu vyvolají stejnou obsluhu přerušení. Při obsluze přerušení se identifikuje zdroj přerušení a v závislosti na posledním zdroji přerušení se identifikuje směr otáčení. Při každém přerušení se inkrementuje nebo odpočítává stav proměnné, ve které je uložena hodnota odpovídající úhlu natočení od resetování dané proměnné. Jednoduché znázornění funkce je na obr. 5.6.



Obr. 5.6 – Vývojový diagram funkce snímání polohy

Jelikož se zpracování snímání využívá přerušení změny pinu, které je v tabulce vektorů přerušení před ostatními použitými přerušeními, tak nemůže vlivem přerušení v programu docházet ke ztrátě informace o aktuální poloze.

## 5.2.2 Ovládání motorů

Důležitou součástí je ovládání motorů, které je zajištěno pomocí specifického postupu. Motor se může podle regulátoru pohybovat v kladném směru a v záporném směru s různým přiřazeným výkonem, řízeným pomocí pulzní šířkové modulace. Pro zajištění pulzní šířkové modulace byly nastaveny některé důležité registry, jejichž nastavení s popisem odpovídajících funkcí je uvedeno v následující tab. 5.2.

Tab. 5.2 – Nastavení registrů pro generování PWM

Registr	Hodnota	Popis
DDRB	11100000	Kombinace těchto registrů zajistí, aby dané piny byly výstupní.
PORTB	00011111	
TCCR1A	10101000	Zajištění chování daných výstupních pinů jako zdrojů fázově a frekvenčně korektního PWM signálu, nastavení zdroje časovače.
TCCR1B	00010001	
ICR1	400	Hodnota nastavení maximální šířky jednoho pulsu.

Další potřebnou funkčností je zajištění směru otáčení v závislosti na znaménku nastavované hodnoty PWM. Výkon motoru je řízen PWM signálem a jeho směr je řízen pomocí nastavení odpovídajících vstupů řadiče motoru označených jako INA a INB. Toho je docíleno pomocí podmínky, která vyhodnotí, zda je nastavovaná hodnota kladná nebo záporná a dle toho nastaví odpovídající kombinaci výstupů pro vstupy řadiče motoru INA a INB. Další funkcí je vypnutí motoru do volného stavu, kdy je hodnota PWM nastavena na nulovou a také nastavení motoru do stop stavu, kdy je uzamknut v dané pozici s nastavením hodnoty PWM na maximum a odpovídajícími vstupy řadiče na logickou hodnotu 1.

## 5.2.3 Typy pohybů a jejich obsluha

V závislosti na potřebě různých pohybů byla vytvořena sada předdefinovaných pohybů, které jsou popsány různými počty parametrů a jsou specifické různými rychlostními profily. Nad všemi předdefinovanými pohyby je nastavena určitá logika, aby docházelo k jejich správnému vykonávání.

Tohoto zajištění je dosaženo pravidelným voláním obslužné funkce, která je volána v obsluze přesušení od časovače nastaveného tak, aby bylo přerušení vyvoláno každou jednu milisekundu.



Každý pohyb se skládá ze sekvence bodů, které jsou určeny při založení dané akce daného pohybu ze zadaných bodů pohybu, kde je postupně pomocí obslužné funkce přistupováno na další následný bod v řadě.

V hlavní obslužné funkci je nejprve kontrolováno, zda existuje přiřazený pohyb k vykonání. V případě, že přiřazený pohyb existuje, tak je inkrementováno pořadí v sekvenci bodů, aby byla zajištěna návaznost daných pozic bodů.

Dále je provedena kontrola stavu motorů, kde je kontrolováno, zda chyba aktuální hodnoty úhlu natočení vůči požadované hodnotě natočení není větší než určitá definovaná konstanta. Tato kontrola je zavedena z důvodu možnosti zadání nevhodného pohybu, který není celý veden v pracovním prostoru robota, čímž by bez ošetření mohlo dojít k poškození součástí robota. Při vyvolání chybového stavu se nastaví motory do vypnutého stavu s nulovým PWM signálem a vynuluje se aktuální zadaný pohyb.

Při úspěšné kontrole chyby stavu se dále postupuje na výpočet akčního zásahu pomocí regulátoru, který pro danou regulační odchylku nastavuje hodnotu výkonu motorů. Zobrazení zdrojového kódu pro kontrolu chybových stavů a pro výpočet akčního zásahu je znázorněn na obr. 5.7.

```
inline void MotorsDriver::computeController(){
    for (uint8_t i = 0; i < MOTORS_COUNT; i++) {
        int16_t e = desiredAngles[i] - controlledAngles[i];
        motors[i].set(CONTROLLER_KP*e + (e - lastError[i])*CONTROLLER_KD);
        lastError[i] = e;
    }
}

inline void MotorsDriver::checkMotorState(){
    for (uint8_t i = 0; i < MOTORS_COUNT; i++) {
        int16_t e = desiredAngles[i] - controlledAngles[i];
        error |= e > MAX_ERROR;
        error |= e < -MAX_ERROR;
    }
}
```

Obr. 5.7 – Zdrojový kód kontroly chybového stavu a výpočtu akčního zásahu

Tento postup obslužné funkce je prováděn pro každý definovaný pohyb, jelikož tato funkce spravuje a hlídá různé nebezpečné stavy a řídí postupné zpracovávání jednotlivých bodů v rámci celého pohybu.

V rámci generování určité trajektorie ze zadaných bodů jsou vytvořeny tři základní typy pohybů, které zajišťují různé rychlostní profily a různé tvary trajektorií. Jelikož se obsluha přerušování vyvolává každou jednu milisekundu, tak je potřeba zajistit, aby výpočty jednotlivých sekvencí vnitřních bodů byly v tomto čase realizovány.

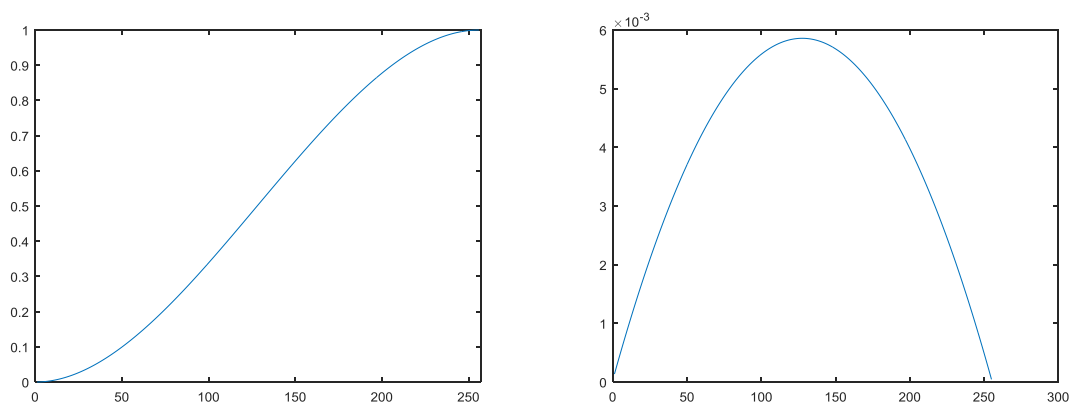
Před zahájením popisu jednotlivých bodů je třeba zmínit, že počáteční bod pohybu nikdy není zadáván, ale je vždy určen řídicím systémem před zahájením počátku pohybu, kde se jedná o aktuální pozici, ve které se před zahájením pohybu robot nacházel. Tato funkčnost je zavedena vzhledem k ochraně chybového stavu a aby nemusel nadřazený systém tuto problematiku vnitřně sledovat.

Prvním pohybem je tzv. rychlostní pohyb, u kterého je zadáván přírůstkový bod a časový interval, po který se bude daný přírůstek přičítat k aktuální pozici bodu koncového efektoru. Velikost přírůstku rychlostního bodu je vzhledem k mechanickým omezením ještě dělena hodnotou 256.

Druhým pohybem je tzv. lineární pohyb, kterému je zadáván koncový bod a čas, za který se má daný pohyb vykonat. Sekvence jednotlivých žádaných bodů je zde vypočítána vzhledem k počátečnímu bodu, koncovému bodu a časovému intervalu. Mezi počáteční a koncový bod je umístěn určitý počet bodů odpovídající hodnotě zadanému časovému intervalu. Lineární pohyb zajišťuje pohyb bez ohledu na rychlostní profil, čímž je na začátku a konci pohybu generováno značné úsilí pro zahájení a zastavení pohybu.

Posledním pohybem je pohyb po Bézierově křivce, který je zadán třemi body a časovým intervalem. Konkrétně byla vybrána Bézierova křivka složená ze čtyř bodů. Pro Bézierovu křivku se zajištěním hladkého rychlostního profilu, s nulovou počáteční a koncovou rychlostí, byla v programu Matlab předpočítána transformační matice, která je násobena prvotními čtyřmi body ze zadání křivky a díky ní je daných podmínek dosaženo.

Transformační matice je vypočtena součinem vektoru kroků a bázové matice. Vektorem kroků je možné zajistit dosažení různých rychlostních profilů. Nástin hodnot vektoru pro získání transformační matice zobrazených do plochy a hodnot rychlostního profilu je znázorněn na obr. 5.8.



Obr. 5.8 – Vektor kroků a odpovídající rychlostní profil

Časový interval všech pohybů je vždy zadáván v milisekundách, jelikož 1 ms je nejmenším možným časovým intervalem pro vykonání posunu. Body, které jsou zadávány do jednotlivých definovaných pohybů, musí být z pracovního prostoru být převedeny na strojové souřadnice, což zajišťuje výpočet inverzní kinematiky.

Pro výpočet inverzní kinematiky byl použit vzorec, který je odvozen v pododdílu 3.3.2. Tento vzorec využívá předdefinované konstanty, které jsou popsány v tab. 4.7 a byl upraven do tvaru programu pro mikrokontrolér, jehož zdrojový kód je na obr. 5.9.

```
Point calcAngles(float x, float y , float z){
    Point angles;
    float x_cos = x*COS_120;
    float x_sin = x*SIN_120;
    float y_cos = y*COS_120;
    float y_sin = y*SIN_120;
    angles.alpha = calcAngle(x, y, z)*STEPS_PER_RADIAN + 0.5;
    angles.beta = calcAngle(x_cos - y_sin, y_cos + x_sin, z)*STEPS_PER_RADIAN + 0.5;
    angles.gamma = calcAngle(x_cos + y_sin, y_cos - x_sin, z)*STEPS_PER_RADIAN + 0.5;
    return angles;
}

float calcAngle(float x, float y, float z){
    y += offsetY;
    z += offsetZ;
    float L_2 = pow(z, 2) + pow(y, 2);
    return asin((pow(x, 2) + L_2 + pow(RAMENO, 2) -
                pow(TYCKA, 2))/(2*RAMENO*sqrt(L_2))) + atan(y/z);
}
```

Obr. 5.9 – Zdrojový kód pro výpočet inverzní kinematiky

Další možné pohyby lze zajistit kombinací předdefinovaných pohybů. V robotu je dále implementován pohyb po kružnici s využitím lineárních pohybů, trvajících 5 ms, protože výpočet bodu inverzní kinematiky a obsluhování ostatních částí během pohybu zatěžuje výkonný čas procesoru. Kružnice se skládá z počtu bodů určeného časem zadaného trvání pohybu děleného hodnotou 5. Při průběhu mohou být nastaveny parametry proměnlivě tak, že se poloměr kružnice může měnit v rámci pracovního prostoru a obdobně pak i hodnota souřadnice z. Tímto může být zajištěn pohyb po spirále nebo po šroubovici.

## 5.2.4 Komunikace s externím systémem

Pro zajištění pohybů robota je potřeba, aby robot komunikoval s externím řídicím systémem, který bude robotu určovat danou trajektorii vzhledem k exteroceptivnímu snímání zajištěného externím systémem.

Pro účely komunikace vzhledem k definovaným pohybům byl stanoven komunikační protokol, jehož struktura je popsána tab. 5.3.

Tab. 5.3 – Popis komunikačního protokolu

Položka	Počet bitů	Popis
Příkaz	4	Určuje danou akci (kalibrace, pohyb, stop, ...).
Pohyb	3	Definuje, o který typ pohybu se jedná.
Rotace	1	Definuje body, které rotují kolem středu pracovního prostoru.
Body	48 až 144	Udává všechny hodnoty souřadnic zvolených bodů.
Čas	16	Udává dobu časového intervalu vykonání pohybu

První položkou komunikačního protokolu je příkaz, kterým je určena požadovaná akce. První možnou akcí je kalibrace. Jedná se o ruční navedení efektoru robota do středu souřadného systému a spuštění kalibrace pro definování počáteční pozice snímačů polohy. Kalibraci je vždy potřeba provést před zahájením prvního pohybu robota, aby se nastavily vhodné hodnoty polohy pro určitou počáteční pozici.

Další akcí je pohyb, který dále využívá ostatní části komunikačního protokolu. Dále existuje akce stop, která na příkaz externího řídicího systému zastaví robota. Následně existují akce s kombinacemi přísávání a pouštění manipulovaného předmětu. První touto akcí je kombinace zahájená přísátím manipulovaného předmětu a následně provedení pohybu, kde je předmět uchycen, dokud se neprovede příkaz, ve kterém je při ukončování pohybu manipulovaný předmět položen. Vzhledem k době trvání procesu pouštění je pokyn k pouštění realizován již 100 ms před koncem samotného pohybu.

Jak bylo zmíněno, tak pohyb může být různý dle předdefinovaných pohybů nebo jejich složenin, a proto je potřeba určit, o jaký druh pohybu se jedná, pomocí určité logické kombinace.

Rotace je speciální příznak, který udává, zda se daný bod pohybuje v prostoru po kružnici, aby byl robot připraven na nezávislé vykonávání daných pohybů v kombinaci s pohybem po kružnici.

Body jsou proměnlivou částí vzhledem k druhu nastaveného pohybu. Nejmenší možnou velikostí bodů je 48 b, které popisují hodnoty jednoho souřadného bodu v prostoru pracovního prostoru. Čas je potom potřebným parametrem pro vykonání pohybu za daný časový interval.

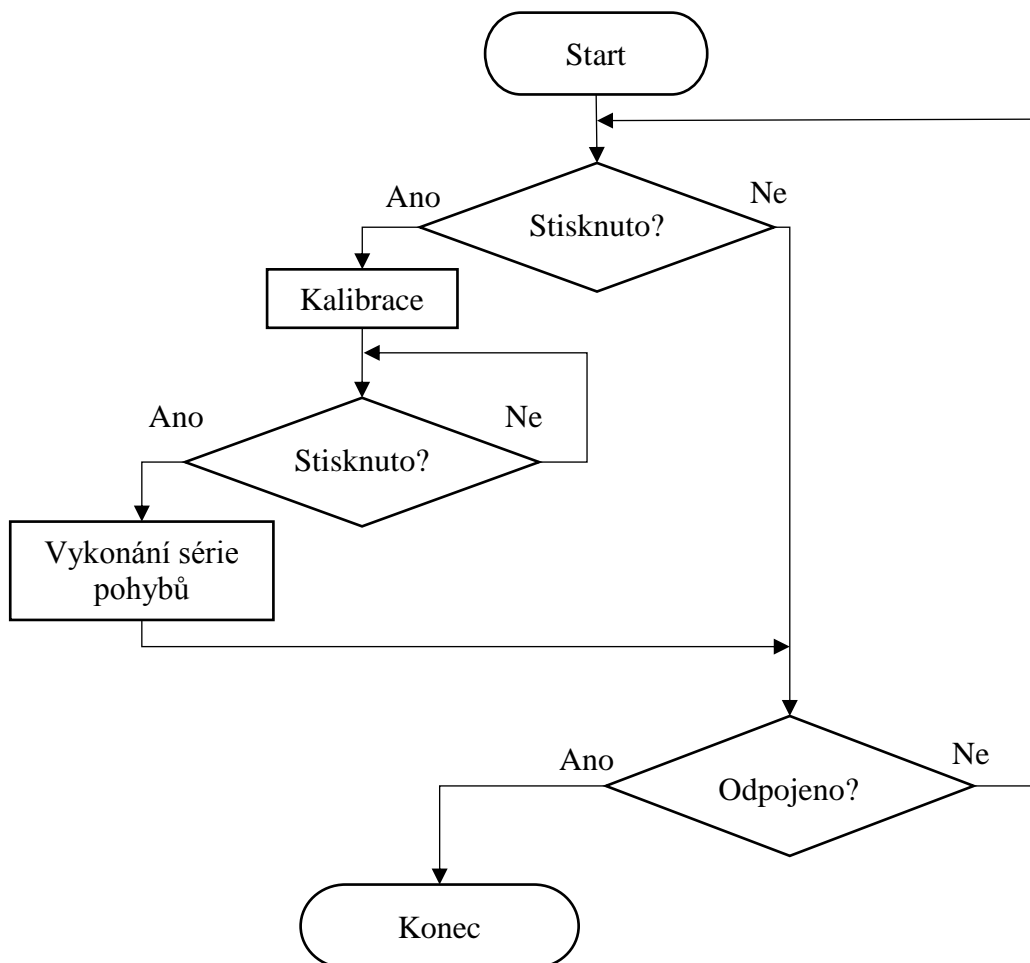
Popis jednotlivých logických kombinací pro řízení robota je popsán v příloze B.

### 5.2.5 Struktura řídicího programu

Celý program pro řízení robota se skládá ze dvou funkčních částí. První funkční částí programu je ukázková verze pohybů sloužící výhradně pro ověření funkčnosti částí robota před připojením samotného externího řídicího systému.

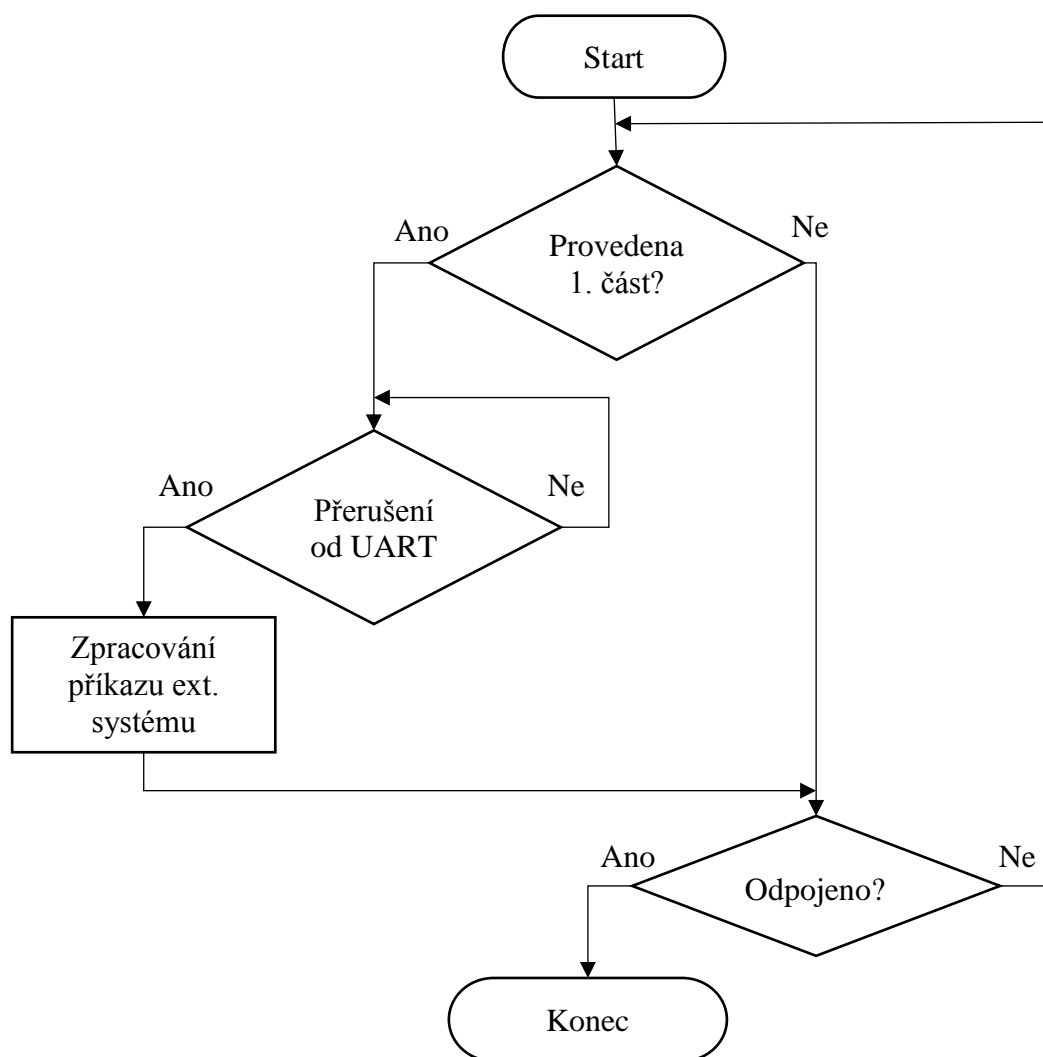
Prvotním úkonem této části je kalibrace úhlů natočení pohonů, která je zajištěna ručním navedením koncového efektoru na manipulovaný předmět, jenž je umístěn ve středu souřadného systému. Pro danou pozici je v programu použit výpočet inverzní kinematiky, díky kterému jsou zjištěny úhly natočení pohonů pro počátek souřadného systému. Kalibraci je třeba spustit stisknutím tlačítka.

Po druhém stisku tlačítka je provedena série pohybů, které jsou provedeny napříč celým pracovním prostorem robota, čímž obsluhující uživatel může určit, zda nejsou jednotlivé mechanické části nadměrně opotřebyeny. Struktura první části programu je zachycena vývojovým diagramem na obr. 5.10.



Obr. 5.10 – První část řídicího programu

Druhá funkční část je spouštěna přerušением od sériové linky, která přijímá informace z nadřazeného řídicího systému. Před zahájením samotného řízení musí být nejprve uskutečněna první část řídicího programu, kde je ověřena funkčnost systému robota. Po provedení kontroly funkčnosti robota obsluhou může být realizováno ovládání nadřazeným systémem. Příznak provedení první části je uložen po celou nepřerušovanou dobu běhu programu. Vývojový diagram druhé části řídicího programu robota je na obr. 5.11.



Obr. 5.11 – Druhá část řídicího programu

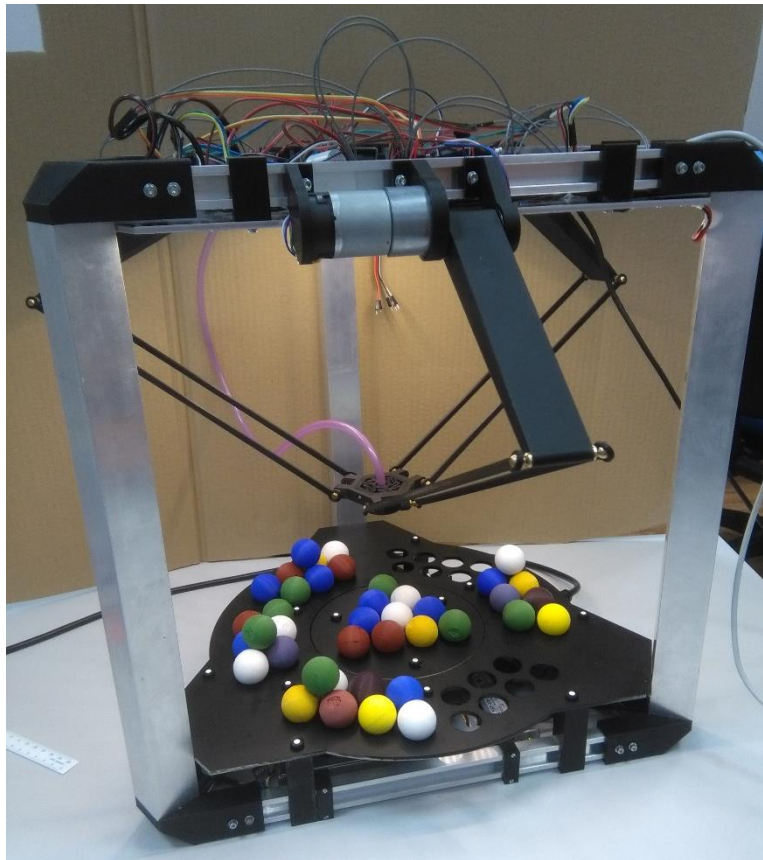
## 6 ZHODNOCENÍ

Pro realizaci konstrukce delta robota byly zvoleny hliníkové komponenty v kombinaci s vlastními navrženými částmi, které byly vytištěné za pomoci 3D tiskárny. Pro složení celé konstrukce bylo třeba zajistit postupné skládání jednotlivých komponent.

Nejprve byly umístěny držáky motorů, držáky ložisek a držáky povrchových hliníkových částí ke kolejnicovým (spojnicovým) hliníkovým částem, které byly následně umístěny do nosných vytisknutých spojnic nosné části.

Obdobně byly propojeny i spodní spojnicové hliníkové části se spojnicemi nosné části. Dvě vzniklé části byly dále spojeny nosnými hliníkovými jekly. Ke spodní části byly připevněny zdroje napětí, vývěva a povrchová hliníková část. Na vrchní díl byla umístěna elektronika a jednotlivé potřebné držáky pro elektroniku.

Elektronika byla dále propojena dle uvažovaného propojovacího schématu, kde od napájecích zdrojů byly vedeny kabely prostřednictvím kabelových žlabů uvnitř jednotlivých nosných spojnic nosné části. Dále byly na spodní povrchovou část umístěny manipulované předměty. Fotografie znázorňující funkční realizaci, bez vrchního krytu elektroniky, delta robota je znázorněna na obr. 6.1.



Obr. 6.1 – Fotografie realizace delta robota

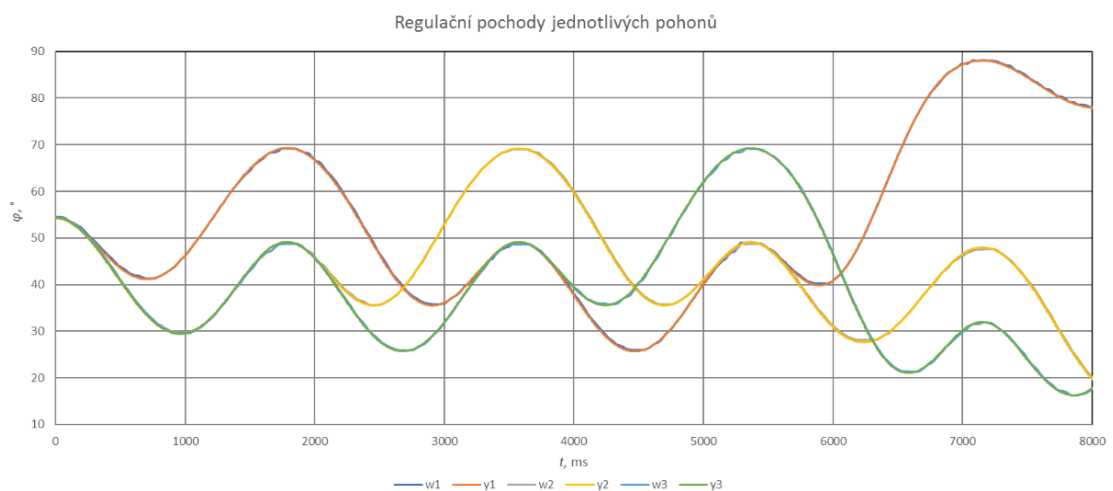
Pro potřeby zajištění vhodné regulace je třeba převést konstanty PD regulátoru získané z vyladování PD regulátoru v simulaci na hodnoty pro regulátor v řídicím systému. Nalezené hodnoty je tedy třeba dále přepočítat na konstanty, které mohou být v řídicím programu robota použity, protože zde dochází k nesrovnalostem mezi výkony simulovaného regulátoru, definicí úhlu natočení v řídicím systému a vzorkovací frekvencí použitou pro nastavování regulátoru robota. Vzhledem k těmto faktům byl proveden převod, kde  $360^\circ$  odpovídá hodnotě 4 480 poskytované enkodéry na 1 otáčku hřídele motoru a dále dochází k přepočtům hodnot regulátorů vzhledem ke spouštění funkce obsluhující regulátor. Dle hrubého přepočtu a následného doladění byly určeny konstanty, které jsou nastavovány v ovládání pohonů, jež jsou popsány v tab. 6.1.

Tab. 6.1 – Hodnoty nastavení konstant regulátoru v MCU

Název	Hodnota
Konstanta pro derivaci	4
Konstanta pro zesílení	10

Všechny tři pohony jsou řízeny regulátorem se stejnými parametry, i přes mírné odlišnosti jednotlivých motorů. Pro potřeby regulace polohy je však řešení dostačující a jsou splněny potřebné požadavky. Jelikož regulátor má za úkol regulovat pouze polohu, tak nemohou být uskutečněny přesuny přes celý pracovní prostor robota trvající méně než 400 ms, jejichž rychlost vede k vyšší regulační odchylce.

Při daném nastavení regulátoru byly naměřeny závislosti v rámci sekvence různých pohybů pro všechny pohony. Tyto charakteristiky jsou znázorněny na obr. 6.2.



Obr. 6.2 – Regulační pochody jednotlivých pohonů



Na obr. 6.2 jsou znázorněny sady žádaných a naměřených veličin, kde každá sada odpovídá regulačnímu pochodu jednoho pohonu. Daná sekvence pohybů trvala 8 s a bylo dosaženo maximální regulační odchylky o hodnotě 16 pulsů enkodéru, která odpovídá  $1,2^\circ$  úhlu natočení pohonu. Absolutní přesnost během provádění pohybu se tedy pohybovala přibližně okolo 8 mm. Opakovaná přesnost polohování, po dosažení koncového bodu pohybu, byla potom zajištěna s rozdílem maximálně 1 puls enkodéru odpovídající  $0,08^\circ$  úhlu natočení motoru, což odpovídá hodnotě přesnosti polohování okolo 0,5 mm.

Rychlost přesunu celým operačním prostorem byla minimálně 300 ms při maximálních hodnotách regulační odchylky do 30 kroků enkodéru, které ještě zajistí správnou funkci bez bezpečnostního vypnutí pohybu. Očekávaný přesun prostorem za 400 ms odpovídá 2,5 přesunům pracovním prostorem robota za 1 s, což stanovuje rychlost robota na 150 cyklů za minutu. Porovnání očekávaných a dosažených parametrů je zachyceno v tab. 6.2.

Tab. 6.2 – Porovnání požadovaných a dosažených parametrů

Parametr	Požadovaná hodnota	Dosažená hodnota
Pracovní prostor	$\varnothing 300 \text{ mm} \times 170 \text{ mm}$	$\varnothing 310 \text{ mm} \times 180 \text{ mm}$
Opakovaná přesnost	0,5 mm	0,5 mm
Rychlost	100 cyklů za min.	150 cyklů za min.
Příkon	0,5 kW	350 W

Posledním sledovaným parametrem pro vlastní návrh delta robota byla celková cena na jeho realizaci. Pro elektronické části již byly stanoveny náklady a dále je potřeba popsat ostatní náklady a vyhodnotit celkovou částku potřebnou k realizaci delta robota. Soupis všech nákladů je zachycen v tab. 6.3.

Tab. 6.3 – Položky nákladů na realizaci

Název	Hodnota
Elektronické části	7 754 Kč
Hliníkové komponenty a jejich úpravy	2 854 Kč
Materiál pro tisk 3D komponent	1 250 Kč
Materiál na tvorbu manipulovaných předmětů	2 530 Kč

Celkové náklady na realizaci delta robota byly přibližně 14 400 Kč. Tyto náklady jsou pod požadovanou hodnotou 20 000 Kč, čímž byl tento požadavek splněn.

## 7 ZÁVĚR

V práci byly vysvětleny základní teoretické podklady robotiky a principů manipulátorů, které se dále specializovaly na delta roboty a jejich používaná řešení. Daná jednotlivá konstrukční řešení používaných delta robotů byla podrobně popsána dle reálného uplatnění v průmyslu a jeho aplikacích.

Obsáhlou částí práce bylo odvození základních matematických podkladů pro odvození rovnic potřebných k analýze pohybu, konkrétně specializované na výpočet dopředné a inverzní kinematiky.

Postupným cyklem návrhu a vývoje zařízení delta robota byla zhotovena funkční konstrukce, která byla složena z hliníkových komponent a vlastních navržených částí vytištěných na 3D tiskárně.

Dále byla vybrána a propojena elektronika zařízení a byl navržen řídicí systém robota, který zajišťuje vykonání potřebných úkonů dle příkazů externího systému komunikujícího přes standardní sériové rozhraní.

Delta robot byl úspěšně zrealizován v závislosti na jeho požadovaných vlastnostech, kde kompletní proces porovnání je popsán v kapitole 6.

Pro dané řešení by bylo dále vhodné vypracovat návrh kaskádního řízení, pro specializované řízení rychlosti otáčení a výkonu motorů, které by mohlo vést k výslednému přesnějšímu řízení pohybu po dané trajektorii za kratší časový interval a dále tak zajistit vyšší absolutní i opakovanou přesnost polohování.

Výpočet inverzní kinematiky zabírá velké množství procesorového času. Díky velikosti časového intervalu potřebného na výpočet převodu jednoho bodu, je vhodné minimalizovat četnost počítaných bodů, což je v práci aplikováno. Jiným možným řešením, vhodným k dalšímu výzkumu, je hledání aproximace dané převodní funkce inverzní kinematiky na jednoduchou funkci, která bude snižovat nároky na náročnost a čas jejího výpočtu.

## LITERATURA

- AEROTECH, 2018. *RCP-DELTA Delta Robot and Controller*. In: Aerotech [online]. Pittsburgh: Aerotech [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.aerotech.com/product-catalog/delta-robots/rcp-delta.aspx?p=%2fproduct-catalog%2fdelta-robots.aspx%3f>
- ASYRIL, 2018. *Pocket Delta Robot*. Asyрил SA [online]. 2 s. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.asyрил.com/documentation/datasheet/Asyрил Datasheet Robot en.pdf>
- ATMEL. 2014. *Atmel ATmega640/V-1280/V-1281/V-2560/V-2561/V*. [online]. [cit. 2018-04-20]. Dostupné z: [http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561\\_datasheet.pdf](http://ww1.microchip.com/downloads/en/DeviceDoc/Atmel-2549-8-bit-AVR-Microcontroller-ATmega640-1280-1281-2560-2561_datasheet.pdf)
- CLAVEL, Reymond. 2014. *How to correctly compute direct kinematics for a delta robot?*. In: STACK OVERFLOW [online]. Stack Exchange [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://stackoverflow.com/questions/18162880/how-to-correctly-compute-direct-kinematics-for-a-delta-robot>
- CODAIN ROBOTICS, 2018. *DELTA ROBOT / 3-AXIS / 2-AXIS / PICK-AND-PLACE*. Direct Industry [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/codian-robotics/product-126561-1538309.html>
- CVEJN, Jan. 2015. *Průmyslové roboty – učební text*. 44 s. [offline]. [cit. 2018-03-15].
- FANUC, 2018. *DELTA ROBOT / 3-AXIS / FOR ASSEMBLY / FAST*. Direct Industry [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/fanuc-europe-corporation/product-32007-1643342.html>
- FANUC, 2018. *DELTA ROBOT / 3-AXIS / PICK-AND-PLACE / HIGH-SPEED*. Direct Industry [online]. [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/prod/fanuc-europe-corporation/product-32007-1499823.html>
- FANUC, 2018. *M-2 iA 6H*. Fanuc [online]. Praha: FANUC Czech [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/%C5%99ada-m2/m-2ia-6h>
- FANUC, 2018. *M-3iA/6S*. Fanuc [online]. Praha: FANUC Czech [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/%C5%99ada-m3/m-3ia-6s>
- FANUC, 2018. *M-3iA/6A*. Fanuc [online]. Praha: FANUC Czech [cit. 2018-04-10]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/%C5%99ada-m3/m-3ia-6a>

- KAULER, Jan. 2016. *Materiály k 1. přednášce: Kinematická dvojice, Třídy a rozdělení kinematických dvojic, Kinematické řetězce, Kinematické řetězce. Robotika v lékařství.* [offline]. [cit. 2018-03-16].
- KOHOUT, T. 2008. *Roboty a manipulátory – učební text VOŠ a SPŠ Kutná Hora.* 27 s. [online]. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z: [http://www.edumat.cz/texty/Roboty\\_manipulatory.pdf](http://www.edumat.cz/texty/Roboty_manipulatory.pdf)
- MALÉŘ, K. 2016. *Měření a simulace na DC motoru.* Diplomová práce. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, Katedra elektrických pohonů a trakce. 55 s. Vedoucí práce: V. Hlinovský.
- MAXON MOTOR USA. 2013 *Human like bipedal walking robot.* Maxon precision motors [online]. Fall River: Maxon precision motors [cit. 2018-03-20]. Dostupné na URL: [https://maxonmotorusa.wordpress.com/2013/02/25/maxon\\_amber2/](https://maxonmotorusa.wordpress.com/2013/02/25/maxon_amber2/)
- OMRON, 2018. *Sysmac Delta.* Omron [online]. Omron Corporation [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: [https://industrial.omron.us/en/products/x-delta#delta\\_robot\\_series](https://industrial.omron.us/en/products/x-delta#delta_robot_series)
- PANASONIC, 2018. *Parallel Link Robot.* In: Panasonic [online]. Rolling Meadows: Panasonic Corporation of North America [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.panasonicfa.com/content/parallel-link-robot>
- PELICAN, 2018. *Air Pump Change-Over Valve* [online]. Pelican Parts [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: [https://www.pelicanparts.com/More\\_Info/0015408697.htm?pn=001-540-86-97-M244](https://www.pelicanparts.com/More_Info/0015408697.htm?pn=001-540-86-97-M244)
- POLOLU, 2018. *70:1 Metal Gearmotor 37Dx70L mm with 64 CPR Encoder* [online]. Pololu Corporation [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2825>
- POLOLU, 2018. *VNH5019 Motor Driver Carrier* [online]. Pololu Corporation [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/1451>
- POLOLU, 2018. *TB6612FNG Dual Motor Driver Carrier* [online]. Pololu Corporation [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/713>
- POLOLU, 2018. *12mm Hex Wheel Adapter for 6mm Shaft (2-Pack)* [online]. Pololu Corporation [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2686>
- PRINTSPACE, 2016. *Altair 3 Pro.* In: PrintSpace 3D [online]. PrintSpace 3D [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.printspace3d.com/store/3d-printers/altair-3/>

- LYNCH, C. 2010. *Rotary Encoder*. Neuroscience and Robotics Laboratory [online]. Northwestern: Neuroscience and Robotics Laboratory [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: [http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Rotary\\_Encoder](http://hades.mech.northwestern.edu/index.php/Rotary_Encoder)
- Rostock: an amazing delta robot 3D printer prototype, 2012. In: 3ders.org [online]. 3ders.org [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <https://www.3ders.org/articles/20120714-rostock-an-amazing-delta-robot-3d-printer-prototype.html>
- SIDDHARTH, Chandrasekaran, 2013. *Stepper Motors - Introduction and Working Principle*. EmbedJournal [online]. EmbedJournal [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://embedjournal.com/stepper-motors-introduction-and-working-principle/>
- Singapore startup looking to raise \$75,000 for cheapest PrintM3 Delta 3D printer, 2014. In: 3ders.org [online]. 3ders.org [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.3ders.org/articles/20140606-singapore-startup-looking-to-raise-for-cheapest-printm3-delta-3d-printer.html>
- SIPRO, 2018. *SIAX D3 500*. In: Sipro [online]. VERONA: SIPRO S.r.l. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.sipro.vr.it/en/delta-robot/delta-robot-SIAX-D3-500.html>
- SIPRO, 2018. *SIAX D3 700*. In: Sipro [online]. VERONA: SIPRO S.r.l. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.sipro.vr.it/en/delta-robot/delta-robot-SIAX-D3-700.html>
- SIPRO, 2018. *SIAX D4 1200*. In: Sipro [online]. VERONA: SIPRO S.r.l. [cit. 2018-04-15]. Dostupné z: <http://www.sipro.vr.it/en/delta-robot/delta-robot-SIAX-D4-1200.html>
- SPADARO, Jason, 2016. *Cartesian Vs. Delta Printers: How Do They Work?*. PrintSpace 3D [online]. PrintSpace 3D [cit. 2018-04-05]. Dostupné z: <https://www.printspace3d.com/cartesian-vs-delta-printers-work/>
- ŠTURSA, Dominik. 2014. *Simulační model stejnosměrného motoru*. Semestrální práce. Pardubice: Univerzita Pardubice, Fakulta elektrotechniky a informatiky, Katedra řízení procesů. s. 2–4.
- TAMAGAWA SEIKY. 2018. *Absolute singleturn rotary encoder*. Tamagawa Seiky Co., Ltd. [online] Tokio: Tamagawa Seiky Co., Ltd [cit. 2018-03-20]. Dostupné z: <https://www.tamagawa-seiki.co.jp/products/rotaryencoder/absolute-singleturn.html>
- TME, 2018. *MEAN WELL RS-25-5* [online]. TME Czech Republic [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/rs-25-5/napajeci-zdroje-pro-vestavbu/mean-well/>

- TME, 2018. *MEAN WELL RSP-320-12* [online]. TME Czech Republic [cit. 2018-04-27].  
Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/rsp-320-12/napajeci-zdroje-pro-vestavbu/mean-well/>
- TME, 2018. *SPARKFUN ELECTRONICS INC. ROB-10398* [online]. TME Czech Republic [cit. 2018-04-27]. Dostupné z: <https://www.tme.eu/cz/details/sf-rob-10398/mikromotorky-a-prislusenstvi/sparkfun-electronics-inc/rob-10398/>
- TYSON, Mark. 2013. *Robotics 101*. ABB. 58 s. [cit. 2018-03-16]. Dostupné z:  
[http://www02.abb.com/global/zaabb/zaabb011.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/0f55ae5d8012b4a6c1257b7200358d2e/\\$file/dmro+1+-+introduction+to+robotics.pdf](http://www02.abb.com/global/zaabb/zaabb011.nsf/bf177942f19f4a98c1257148003b7a0a/0f55ae5d8012b4a6c1257b7200358d2e/$file/dmro+1+-+introduction+to+robotics.pdf)
- WILLIAMS, Robert, 2016. *The Delta Parallel Robot: Kinematics Solutions* [online]. Ohio [cit. 2018-04-20]. Dostupné z:  
<https://www.researchgate.net/file.PostFileLoader.html?id=58bd7d14404854027f09f5d0&assetKey=AS%3A468931250003970%401488813330544>
- WITTENSTEIN, 2018. *Gearboxes and actuators for Delta robots*. In: WITTENSTEIN [online]. Bartlett: WITTENSTEIN holding [cit. 2018-04-15]. Dostupné z:  
<https://www.wittenstein-us.com/delta-robot/>

## **PŘÍLOHY**

**A - CD**

**B - Uživatelský návod**

**C - Konstrukční díly**

**Příloha k diplomové práci**

DELTA ROBOT

Dominik Štursa

**CD**



## **Obsah**

- 1 Text diplomové práce ve formátu PDF
- 2 Úplné zdrojové kódy aplikací mikropočítače
- 3 Zdrojové soubory všech vytvořených 3D modelů
- 4 Fotodokumentace
- 5 Videodokumentace
- 6 Ostatní

**Příloha k diplomové práci**

DELTA ROBOT

Dominik Štursa

**UŽIVATELSKÝ NÁVOD**

DELTA ROBOT

## Obsah

	Seznam obrázků .....	2
	Seznam tabulek .....	3
	ÚVOD .....	4
1	OBSLUHA ZAŘÍZENÍ .....	5
2	KOMUNIKACE S ROBOTEM .....	6
	ZÁVĚR .....	8

## **Seznam obrázků**

Obr. 1.1 – Spínač a napájecí konektor .....	5
---	---

## **Seznam tabulek**

Tab. 2.1 – Popis komunikačního protokolu .....	6
Tab. 2.2 – Tabulka příkazů .....	6
Tab. 2.3 – Tabulka pohybů .....	6
Tab. 2.3 – Tabulka pohybů – pokračování .....	7

## ÚVOD

Tato příloha obsahuje uživatelský návod (manuál) pro ovládání samotného zařízení a pro ovládání zařízení prostřednictvím externího systému. Uživatel zařízení by si nejprve měl tento návod prostudovat, aby se předcházelo možnému bezpečnostnímu ohrožení nebo zničení samotného zařízení. Zařízení je napájeno střídavým napětím, které může ohrožovat osoby, které s ním přijdou do styku.

Při používání samotného zařízení musí být zařízení připojeno, přes EURO kabel do přípojky na robotu. Pro komunikaci zařízení s počítačem je třeba využít USB kabelu zakončeného konektorem typu B pro možnost připojení do zařízení a standardním konektorem (typ A) pro zapojení do externího systému. Tento druh kabelu je běžně využíván pro připojení tiskáren, případně starších externích pevných disků. Dále jsou vyvedeny přímo komunikační kabely, kterými lze robota propojit s interním řídicím systémem v případě jeho vlastního namontování.

V příručce je dále popsáno, jakým způsobem se zařízením komunikovat, aby vykonávalo požadované funkce.

# 1 OBSLUHA ZAŘÍZENÍ

Nejprve je třeba přívodní napájecí kabel připojit do odpovídajícího konektoru na robotu. Po přivedení kabelu může být robot zapnut spínačem umístěným vedle konektoru pro přívodní napětí tak, jak je naznačeno na obr. 1.1.



Obr. 1.1 – Spínač a napájecí konektor

Po zapnutí systému se rozsvítí osvětlení robota. Nyní může být k robotu připojen externí systém pomocí USB kabelu.

Po dokončení práce s robotem by měl být vypnut vypínač a odpojen kabel přívodního napájení.

## 2 KOMUNIKACE S ROBOTEM

Po připojení externího systému pomocí USB kabelu k robotu může být zahájena komunikace. Pro účely komunikace je třeba nastavit komunikační rozhraní externího systému na rychlost  $1 \text{ Mb}\cdot\text{s}^{-1}$  a dodržovat komunikační protokol, jehož struktura je popsána tab. 2.1.

Tab. 2.1 – Popis komunikačního protokolu

Položka	Počet bitů	Popis
Příkaz	4	Určuje danou akci (kalibrace, pohyb, stop, ...).
Pohyb	3	Definuje, o který typ pohybu se jedná.
Rotace	1	Definuje body, které rotují kolem středu pracovního prostoru.
Body	48 až 144	Udává všechny hodnoty souřadnic zvolených bodů.
Čas	16	Udává dobu časového intervalu vykonání pohybu

První položkou komunikačního protokolu je příkaz, kterým je určena požadovaná akce. Tabulka jednotlivých příkazů je popsána na tab. 2.2.

Tab. 2.2 – Tabulka příkazů

Název	Hodnota	Popis
Kalibrace	0000	Zajistí mírné dojetí a nastavení počátečních souřadnic.
Pohyb	0001	Informuje, že se jedná o pohyb.
Stop	0010	Zastaví robota.
Přísání a pohyb	0011	Informuje, že bude nasán manipulovaný předmět a bude proveden dále definovaný pohyb.
Pohyb a puštění	0100	Informuje, že bude proveden definovaný pohyb a na jeho konci bude puštění manipulovaného předmětu.
Manipulace	0101	Zajistí nasátí, pohyb a následné puštění man. předmětu.

Popis pohybů a počet potřebných bodů je popsán tab. 2.3.

Tab. 2.3 – Tabulka pohybů

Název	Hodnota	Popis
Rychlostní	000	Vykonává rychlostní pohyb. Potřeba zaslat 1 bod.
Lineární	001	Vykonává lineární pohyb. Potřeba zaslat 1 bod.
Bézier	011	Pro vykonání je následně třeba zaslat 3 body.



Tab. 2.4 – Tabulka pohybů – pokračování

Název	Hodnota	Popis
Kružnice	010	Následně je třeba zaslat 2 B o poloměru kružnice a 1 B o výšce. Střed je vždy ve středu souřadného systému.

Při zadání konkrétní kombinace pro daný pohyb je třeba poslat korektní počet bodů, kde nejméně je možné zaslat 3krát 16 b pro zajištění jednoho bodu v rámci souřadného systému.

Jelikož je kružnice složená ze sady lineárních pohybů, tak je vždy pro danou kružnici nejprve uskutečněn přejezd do počáteční pozice začátku dle výpočtu kružnice.

Posledním parametrem je čas v milisekundách, který určuje dobu trvání pohybu. Nejnižší možná časová hodnota pro provedení pohybu je 400 ms a maximální hodnota je omezena na 5 000 ms.

## ZÁVĚR

Pro použití zařízení nejprve vyhledejte vhodné místo, kde lze zařízení spustit, aniž by jeho činnost byla pro okolí riziková. Zařízení v prostoru pohybuje mechanickými částmi a je vhodné dbát opatrnosti při pohybu v blízkosti robota. Před zapojením napájecího konektoru zkontrolujte, zda je vypínač na zařízení vypnut.

Když je zařízení připojené do elektrické sítě, tak nikdy neodebírejte krycí části. Při manipulaci se zařízením je doporučeno dbát na pokyny v této příručce.

**Příloha k diplomové práci**

DELTA ROBOT

Dominik Štursa

**KONSTRUKČNÍ DÍLY**

DELTA ROBOT

## Obsah

	Seznam obrázků .....	2
	ÚVOD .....	3
1	KONSTRUKCE .....	4
	ZÁVĚR .....	18

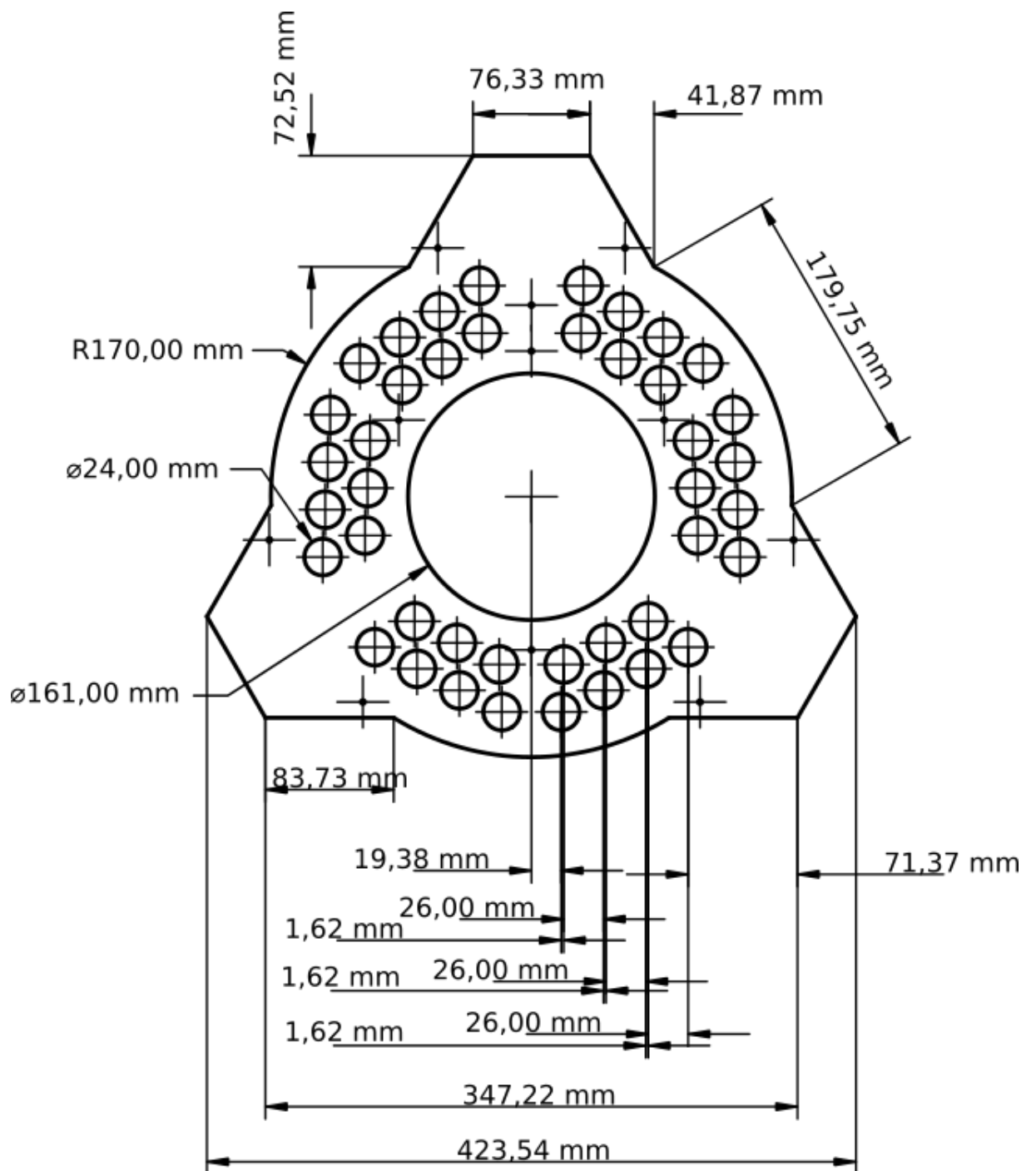
## Seznam obrázků

Obr. 3.1 – Plochá spodní pevná deska	4
Obr. 3.2 – Držák řadiče nebo napájecí svorkovnice (bokorys)	5
Obr. 3.3 – Plochá spodní otočná deska	5
Obr. 3.4 – Držák řadiče nebo napájecí svorkovnice (půdorys)	6
Obr. 3.5 – Plochá vrchní deska	6
Obr. 3.6 – Držák matic pro fixaci hliníkových C profilů (půdorys)	8
Obr. 3.7 – Držák vrchní pevné desky	8
Obr. 3.8 – Držák motoru 2 (bokorys)	9
Obr. 3.9 – Držák motoru 2 (pohled zezadu)	9
Obr. 3.10 – Držák motoru 1 (bokorys)	10
Obr. 3.11 – Držák motoru 1 (pohled zepředu)	10
Obr. 3.12 – Držák zdroje, díl 1 (pohled zepředu)	11
Obr. 3.13 – Držák zdroje, díl 1 (bokorys)	11
Obr. 3.14 – Držák zdroje, díl 2 (půdorys)	12
Obr. 3.15 – Držák zdroje, díl 2 (bokorys)	12
Obr. 3.16 – Nosná spojka (pohled shora)	13
Obr. 3.17 – Nosná spojka (řez středem úchytů C profilů)	13
Obr. 3.18 – Manipulátor	14
Obr. 3.19 – Nosná spojka (řez středem nosné části)	14
Obr. 3.20 – Složená konstrukční část (pohled shora)	15
Obr. 3.21 – Složená konstrukční část (pohled zleva)	16
Obr. 3.22 – Rameno robota	17

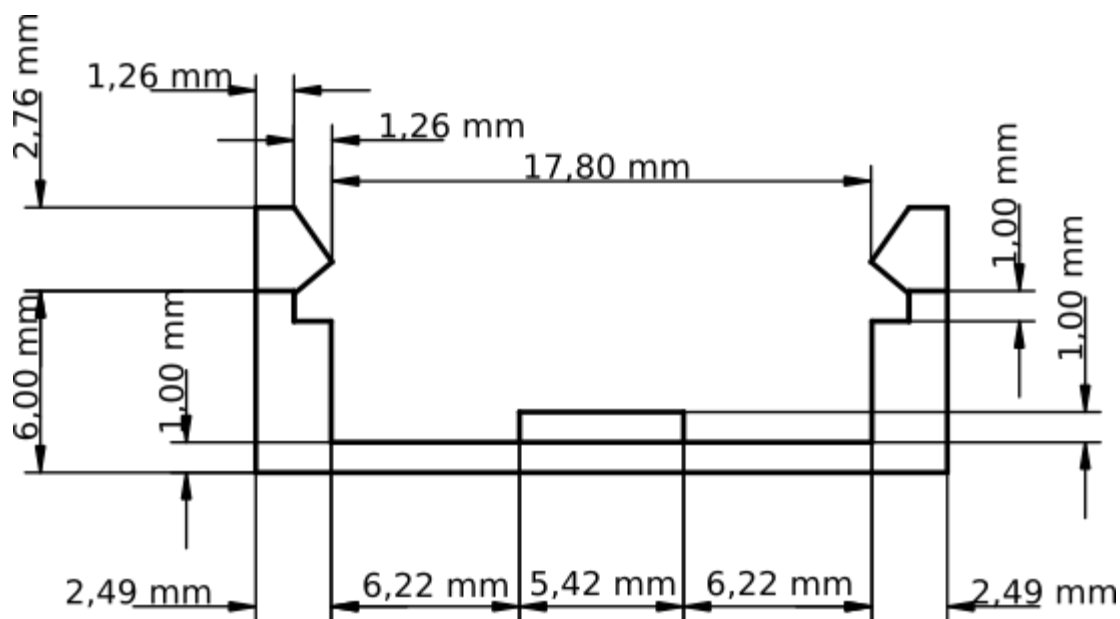
## ÚVOD

Tato příloha obsahuje okótované nákresy jednotlivých navržených komponent potřebných pro konstrukci delta robota. Jednotlivé komponenty nejsou v měřítku, ale u jednotlivých kót jsou uvedeny potřebné jednotky. Důvodem tohoto přístupu jsou rozsáhlé rozdíly velikostí jednotlivých komponent.

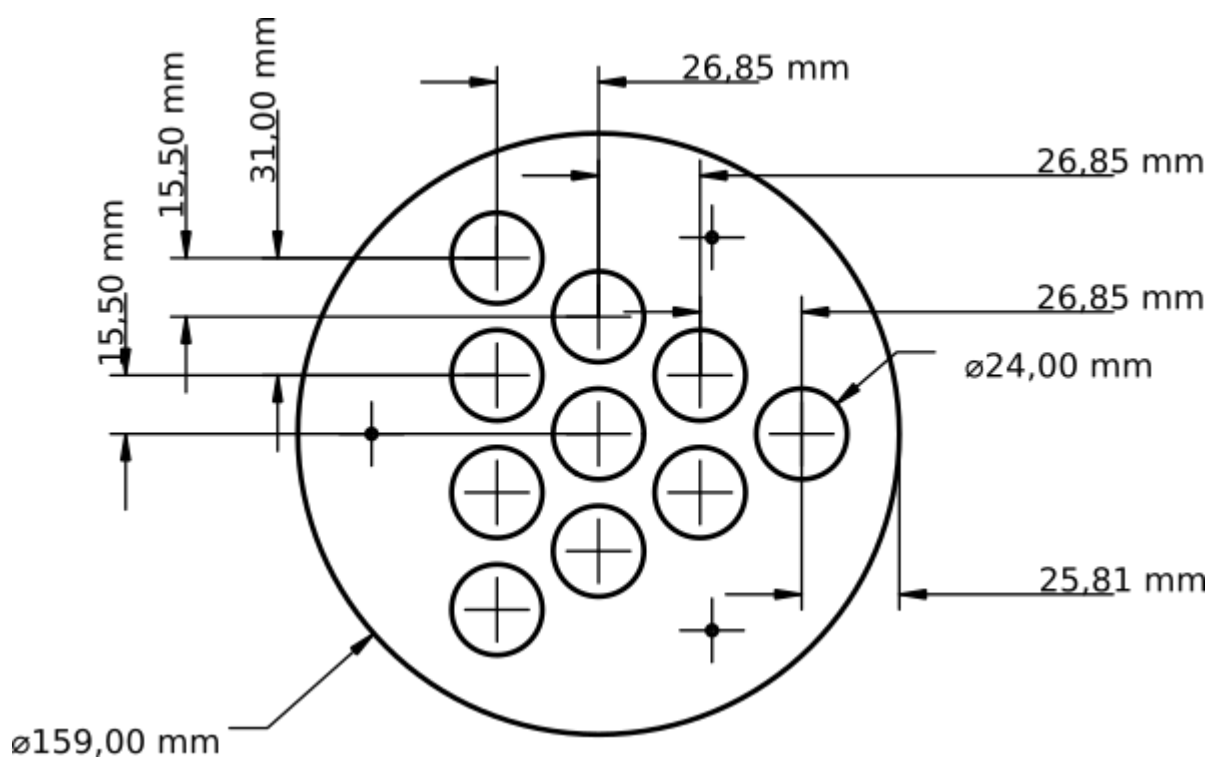
### 3 KONSTRUKCE



Obr. 3.1 – Plochá spodní pevná deska

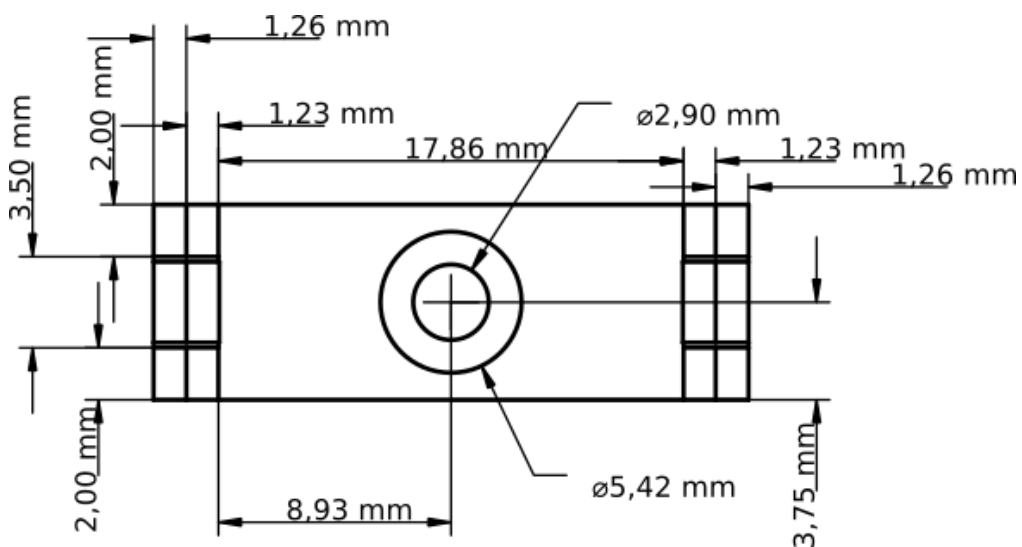


Obr. 3.2 – Držák řadiče nebo napájecí svorkovnice (bokorys)

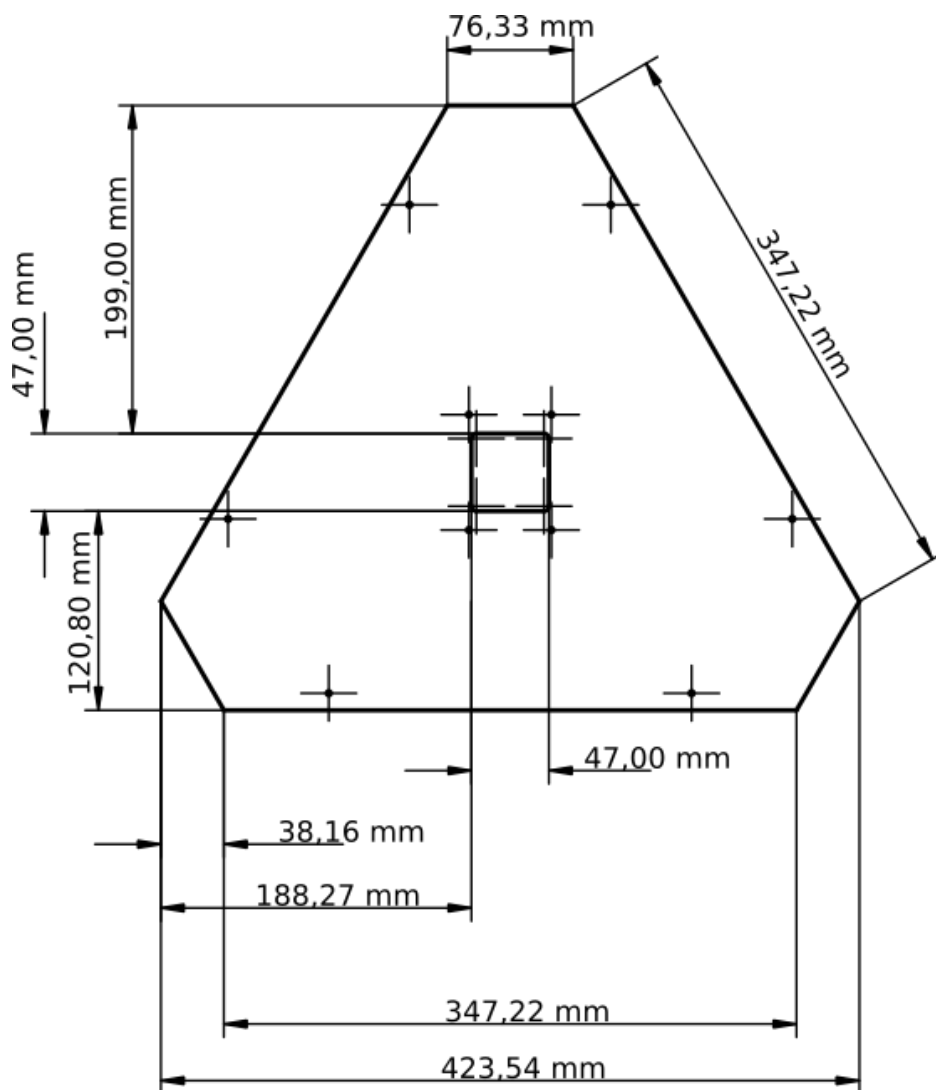


Obr. 3.3 – Plochá spodní otočná deska

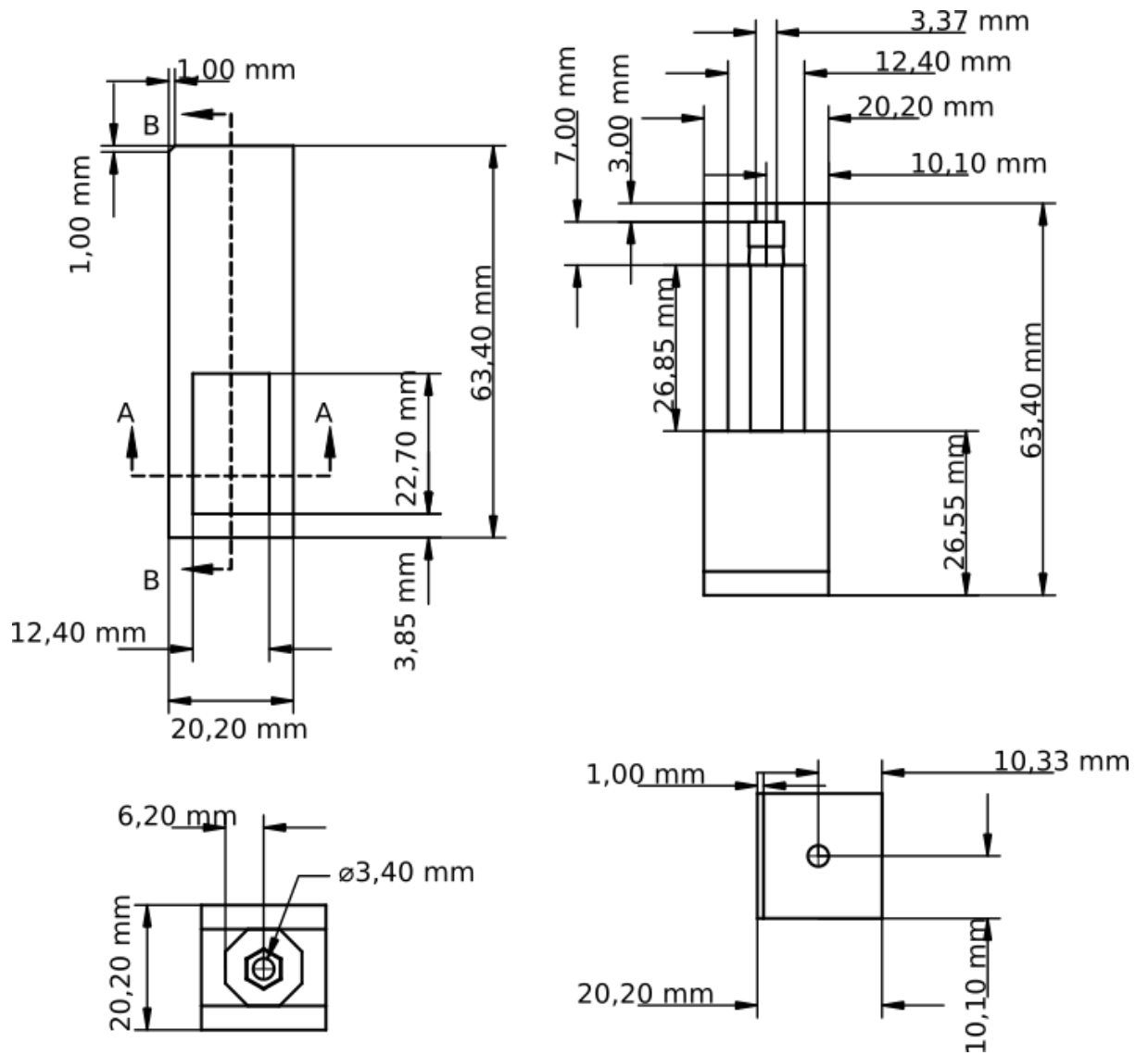




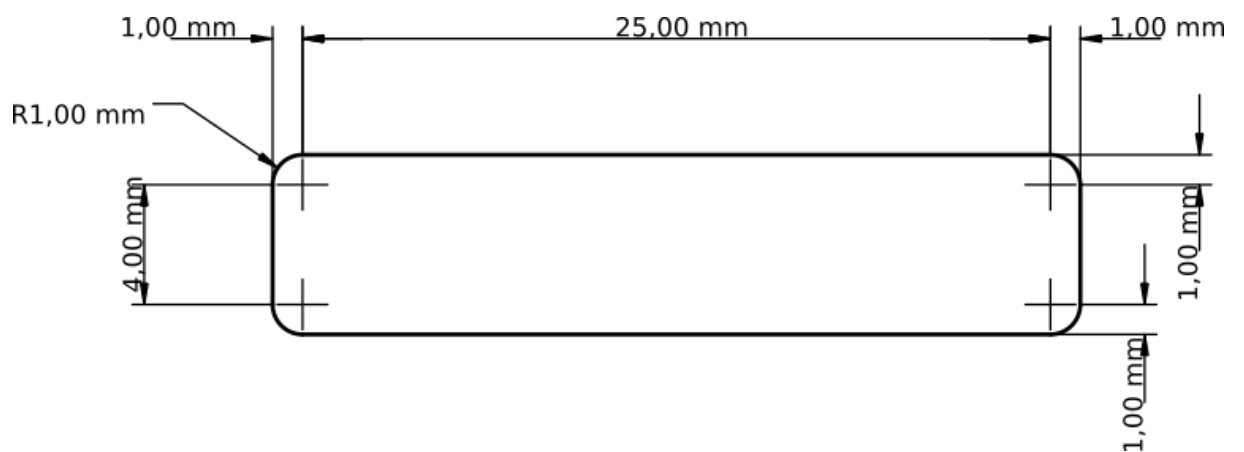
Obr. 3.4 – Držák řadiče nebo napájecí svorkovnice (půdorys)



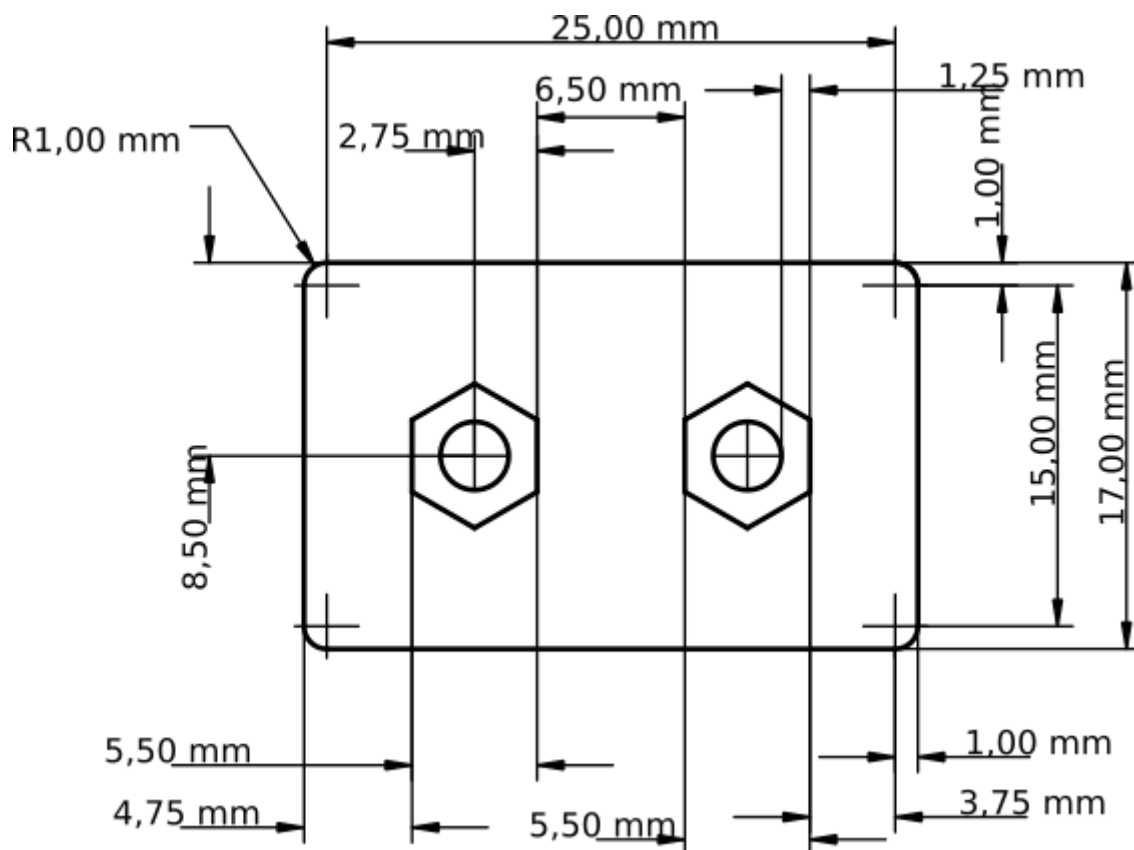
Obr. 3.5 – Plochá vrchní deska



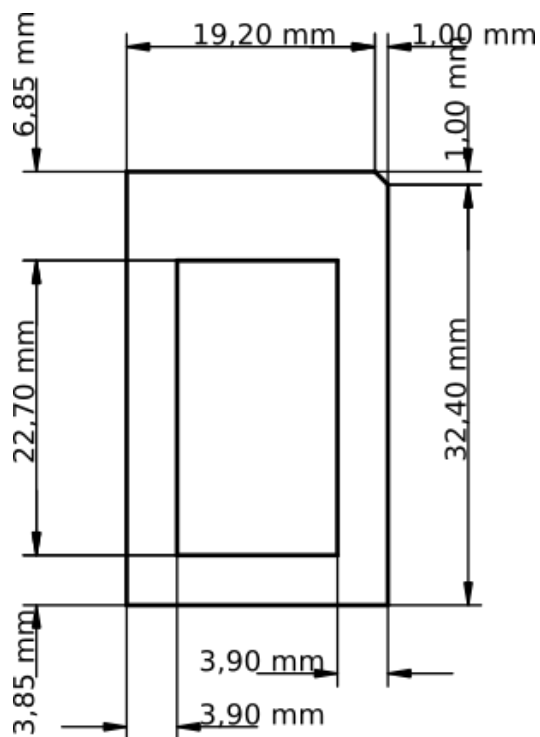
Obr. 3.6 – Držák spodní pevné desky



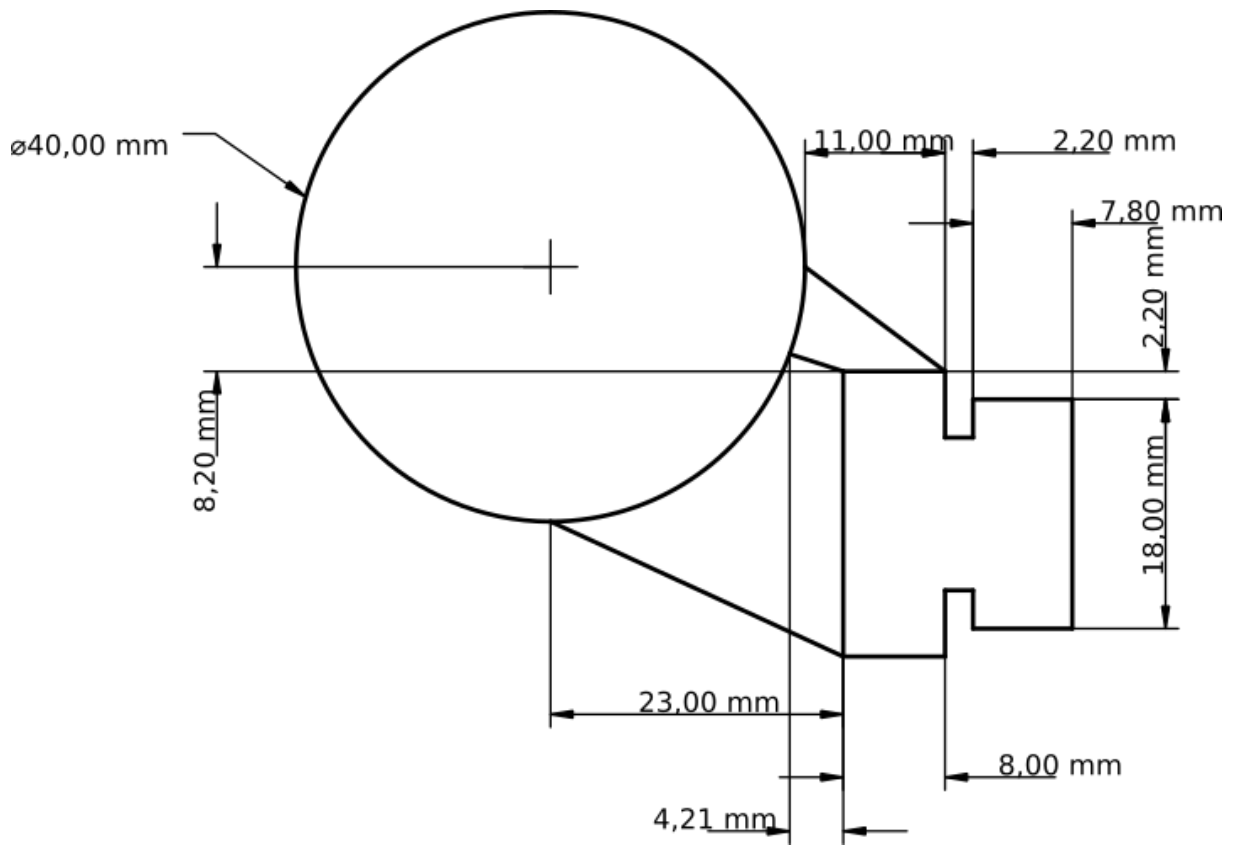
Obr. 3.7 – Držák matic pro fixaci hliníkových C profilů (bokorys)



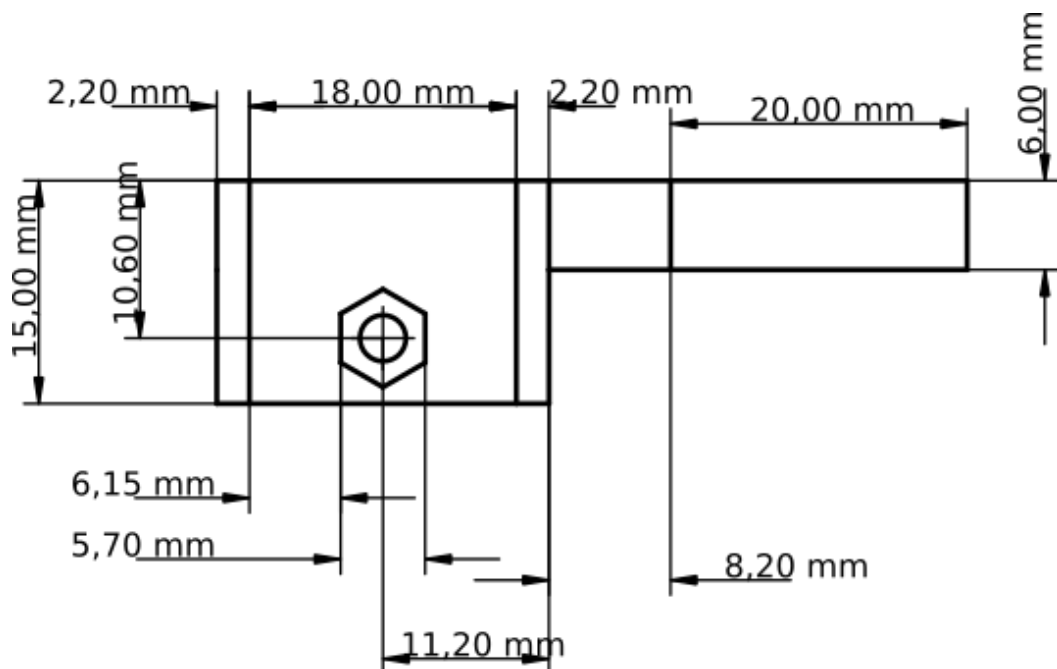
Obr. 3.6 – Držák matic pro fixaci hliníkových C profilů (přodorys)



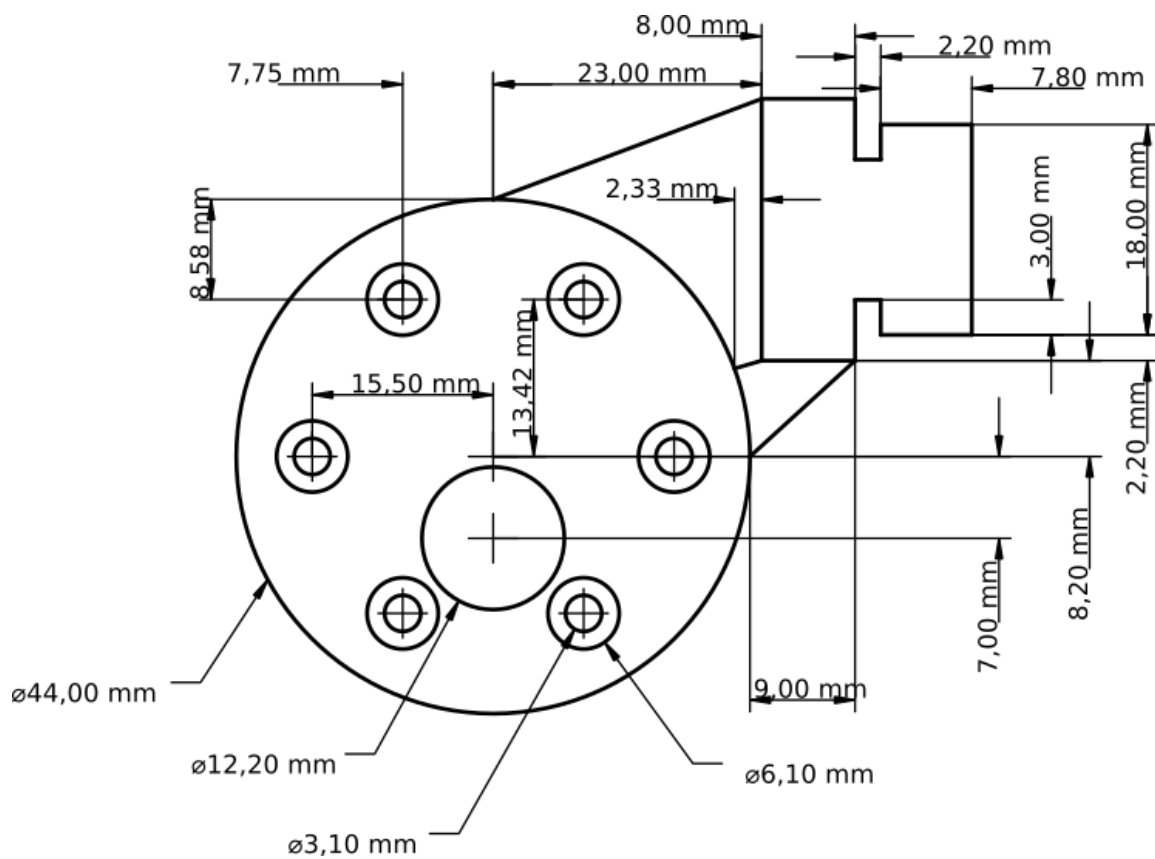
Obr. 3.7 – Držák vrchní pevné desky



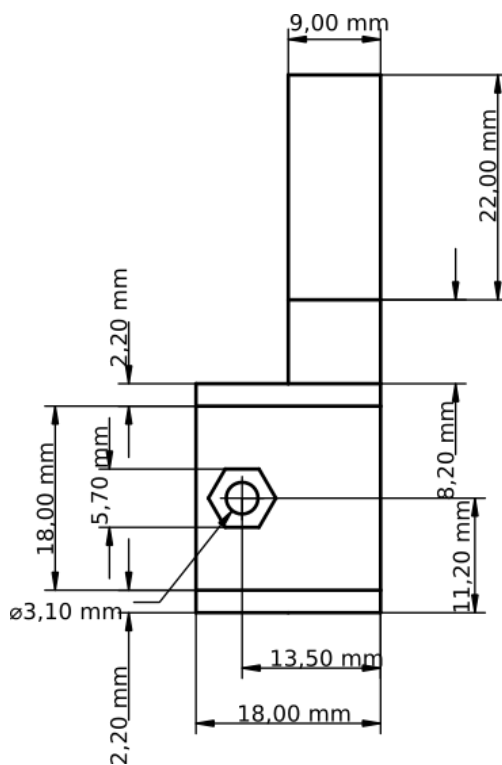
Obr. 3.9 – Držák motoru 2 (pohled zezadu)



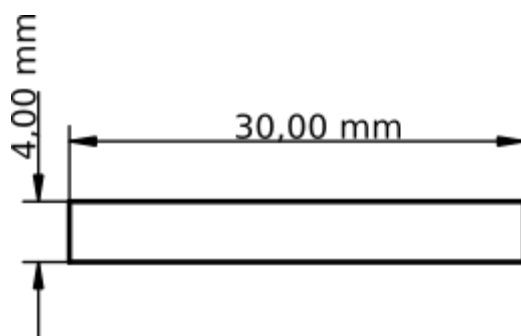
Obr. 3.8 – Držák motoru 2 (bokorys)



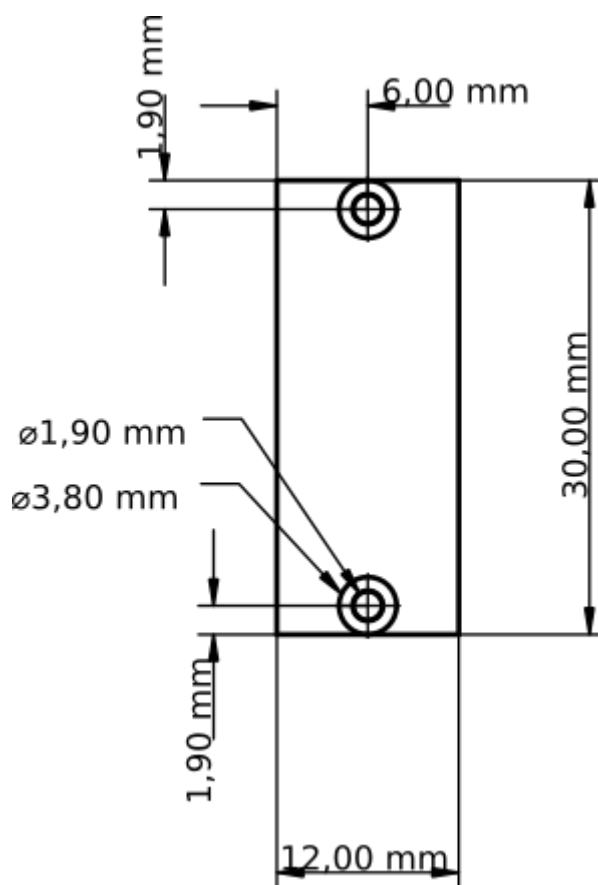
Obr. 3.11 – Držák motoru 1 (pohled zepředu)



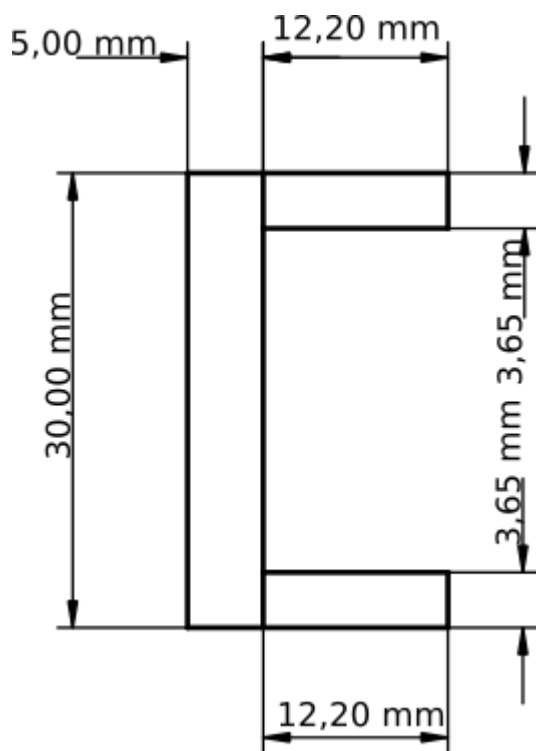
Obr. 3.10 – Držák motoru 1 (bokorys)



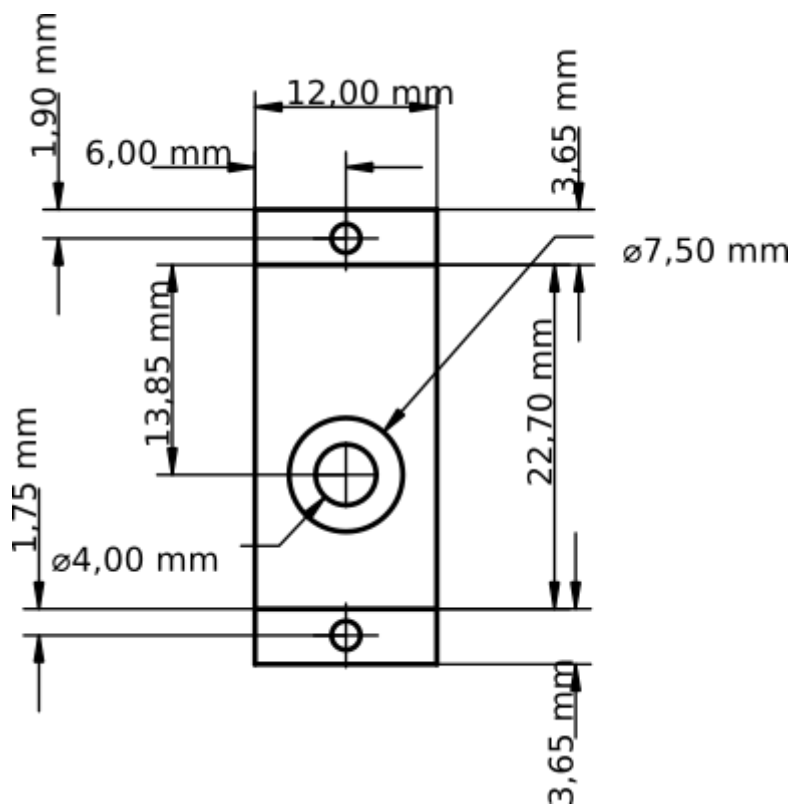
Obr. 3.13 – Držák zdroje, díl 1 (bokorys)



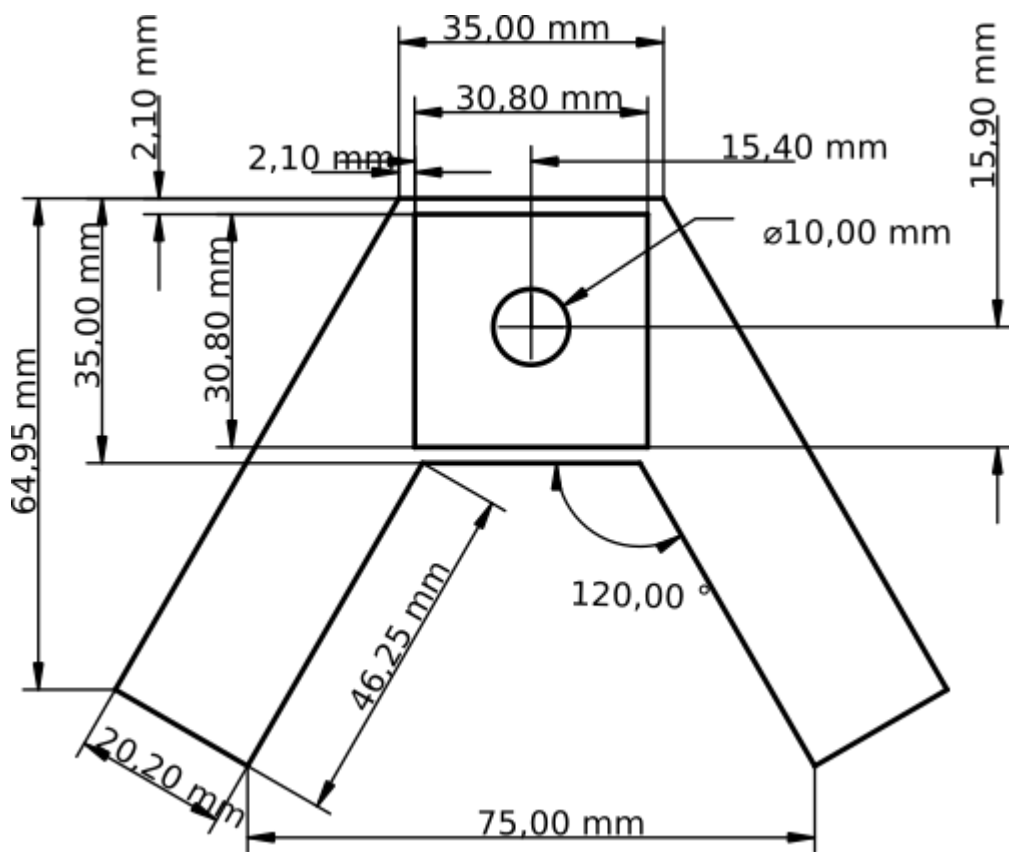
Obr. 3.12 – Držák zdroje, díl 1 (pohled zepředu)



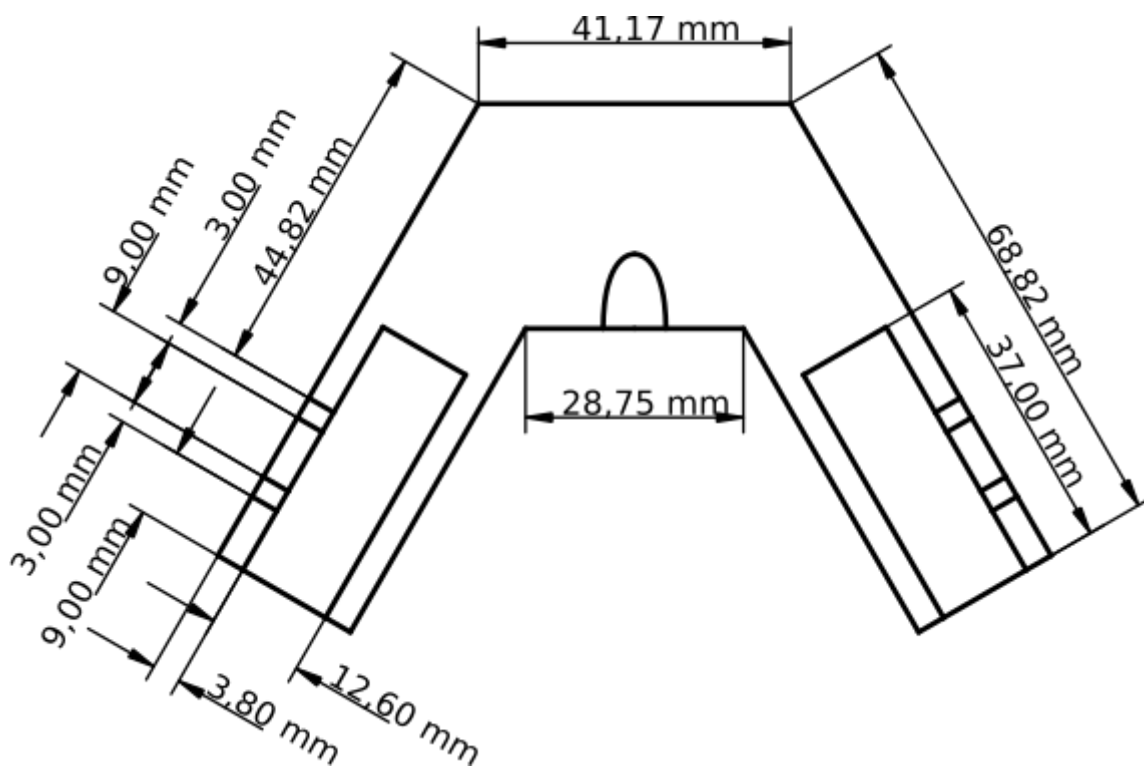
Obr. 3.15 – Držák zdroje, díl 2 (bokorys)



Obr. 3.14 – Držák zdroje, díl 2 (půdorys)

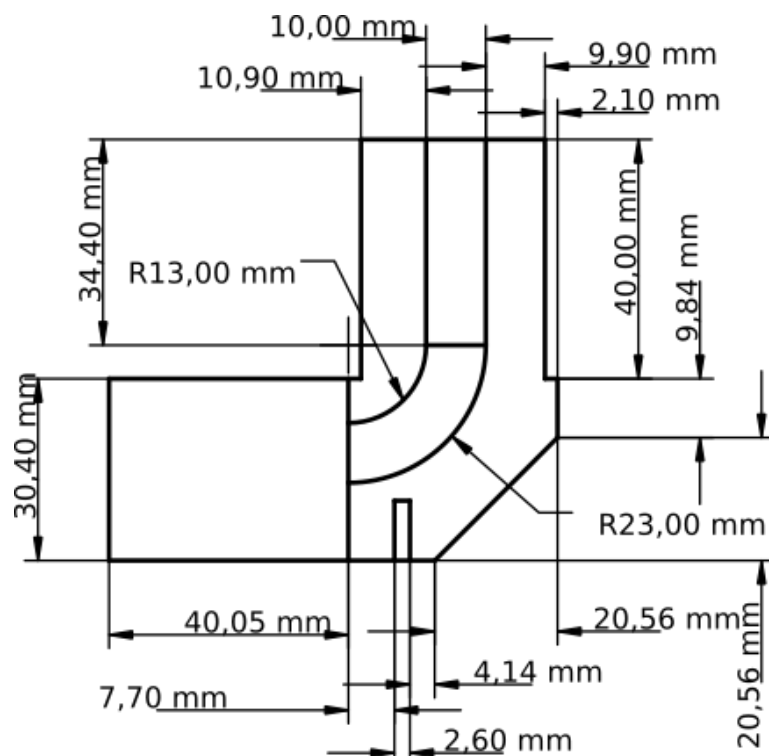


Obr. 3.16 – Nosná spojka (pohled shora)

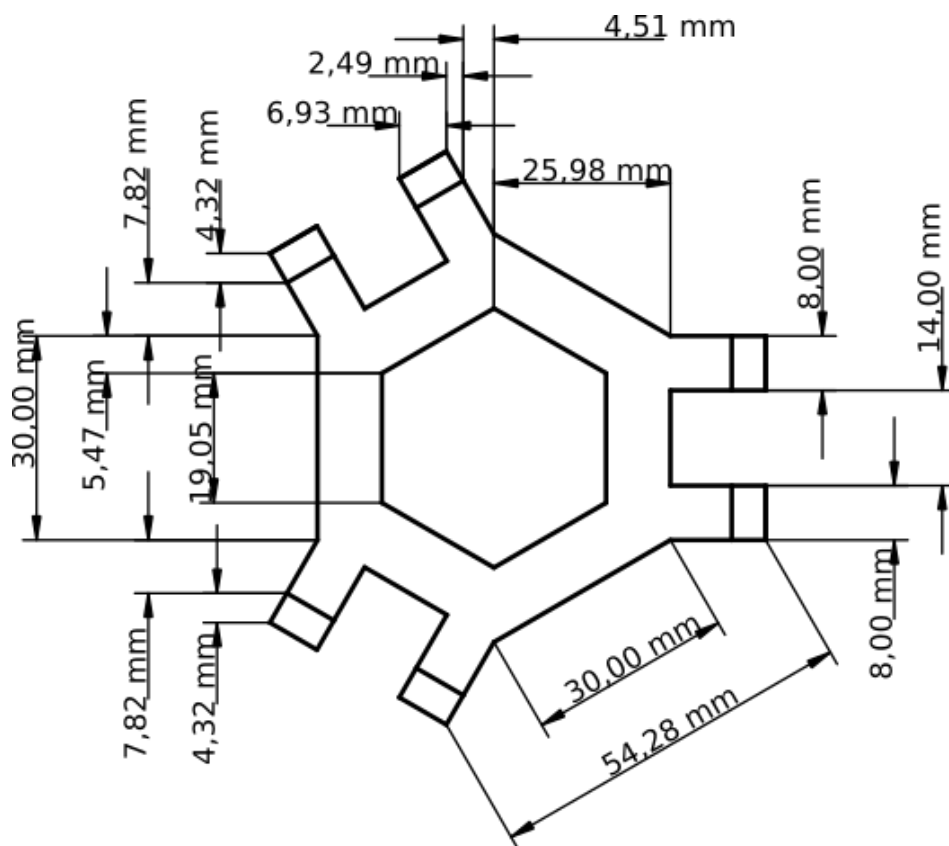


Obr. 3.17 – Nosná spojka (řez středem úchyťů C profilů)

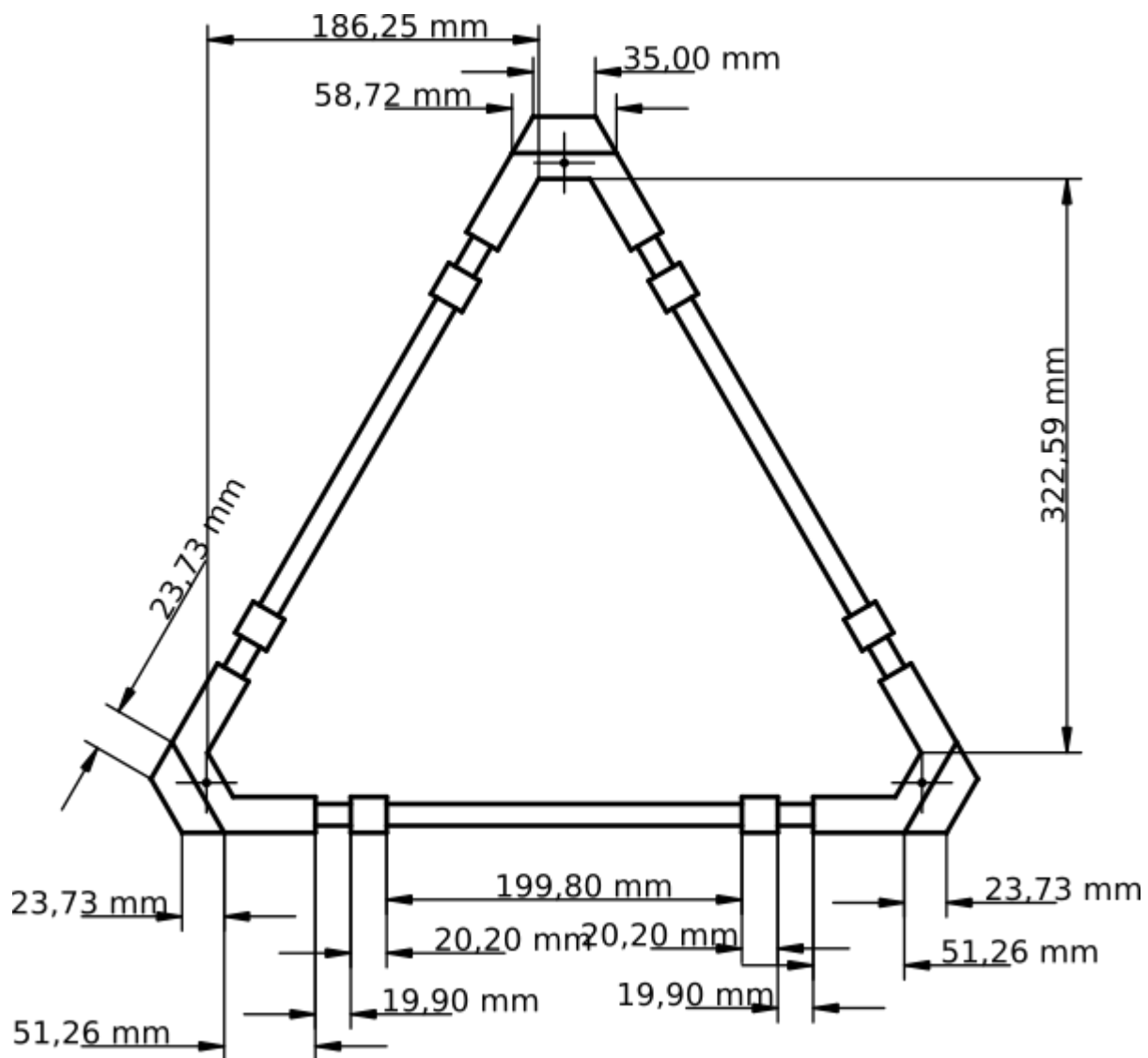




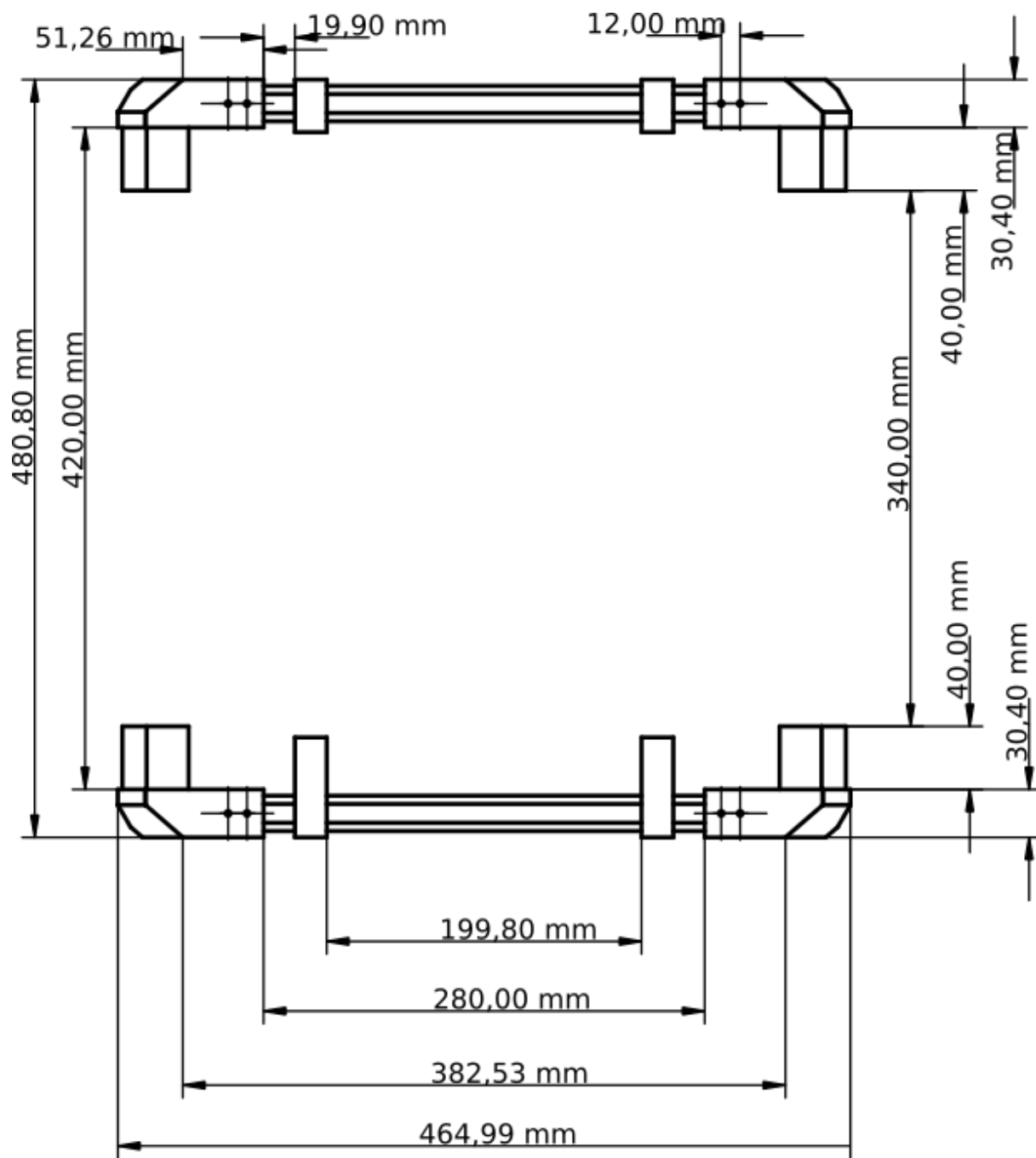
Obr. 3.19 – Nosná spojka (řez středem nosné části)



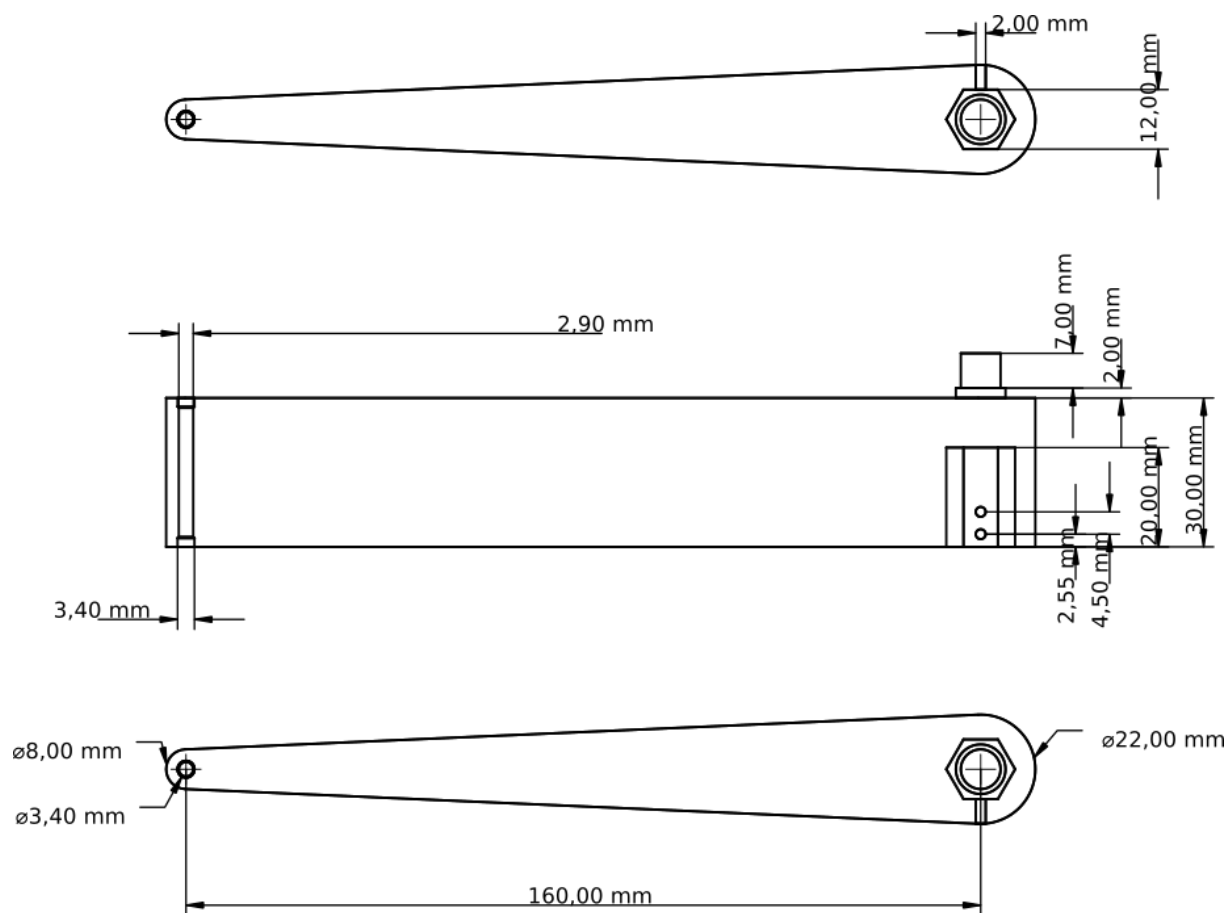
Obr. 3.18 – Manipulátor



Obr. 3.20 – Složená konstrukční část (pohled shora)



Obr. 3.21 – Složená konstrukční část (pohled zleva)



Obr. 3.22 – Rameno robota

## ZÁVĚR

Jednotlivé okótované nákresy nejsou v měřítku, ale obsahují rozměry pro možnou reálnou výrobu. V některých případech nejsou okótovány všechny potřebné rozměry, jedná se o díly s více stejnými částmi nebo o symetrické díly, které mohou být symetrické dle různých os. Ploché desky nejsou zobrazeny v bokorysu, vzhledem k jednotné tloušťce 4 mm.

Všechny další ostatní rozměry jsou dohledatelné v příložených souborech na CD. Jelikož jsou komponenty určeny výhradně pro 3D tisk, tak není doporučeno vyrábět komponenty jinou technologií.

Všechny potřebné dokumenty pro realizaci jednotlivých komponent jsou přiloženy na CD. Jedná se o soubory obsahující 3D modely vytvořené pomocí programu FreeCAD. Pro otevření, správu a úpravy modelů je doporučeno využít tento zmíněný bezplatný program.