



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

**VÝVOJ A VÝROBA NÍZKONÁKLADOVÉHO ROBOTU PRO
INTERAKCI S OKOLÍM**

DEVELOPMENT AND PRODUCTION OF LOW COST AND ENVIRONMENT INTERACTION ROBOT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Michaela Tejchmanová

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Studentka: **Bc. Michaela Tejchmanová**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce: **doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.**
Akademický rok: 2015/16

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

Vývoj a výroba nízkonákladového robotu pro interakci s okolím

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

1. Zhodnocení současného stavu v oblasti vývoje a výroby robotů, které jsou určeny pro interakci s člověkem (např. pro univerzitní výzkum nebo v oblasti tzv. zábavné robotiky).
2. Návrh koncepce přiměřeně složitého robotu, zohledňující tyto parametry:
 - a. Počet stupňů volnosti a morfologie
 - b. Dosažitelná přesnost polohy
 - c. Velikost pracovního prostoru
 - d. Vlastní rozměry a hmotnost
 - e. Druhy pohonů a převodů
 - f. Autonomnost chování z hlediska výbavy senzorickým a řídicím systémem,to vše za předpokladu dobré dostupnosti komponent pořízených nákupem i popřípadě vlastní výrobou.
3. Tvorba konstrukční dokumentace návrhu robotu.
4. S přihlédnutím k účelu a použití robotu návrh jedné nebo více úloh, včetně pracovního cyklu manipulace.
5. Koncový efektor robotu pro předmět manipulace volte nákupem, popřípadě vlastním ideovým návrhem.
6. Odhad nákladů na případnou výrobu jednoho kusu robotu.
7. Eventuální výroba robotu jako celku nebo jedné vybrané podskupiny (konstrukčního nebo montážního uzlu).
8. Řešení bezpečnosti pracoviště (včetně a analýzy rizik komponent RTP).

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je navrhnout takový robot, který nepatří do typů běžně nabízených ke komerčním účelům, což jsou tzv. průmyslové. Návrh netypizovaného a nestandardního robotu je podřízen účelu a použití a také případným nákladům na výrobu prototypu ve vývojové a prototypové dílně zadavatele DP (tj. za cenu minimalizace nákladů na pořízení komponent a výrobu).

Seznam literatury:

Zelenka, A., Volf, L., Poskočilová, A. (2009): Projektování výrobních systémů – návody na cvičení. Skriptum FS ČVUT Praha. ISBN 978-80-01-04394-3.

Pomůcka pro projektování výrobních systémů, FS TU v Liberci, 2009, <http://www.kvs.tul.cz/PVSY>.

Jalový, M., Jalová, M., Andrlík, V. (2005): Průmyslové roboty a manipulátory. Skripta ČVUT Praha. ISBN 978-80-01-04321-1.

Shigley, J. E., Mischke, Ch. R., Budynas, R. G. (2010): Konstruování strojních součástí. ISBN 978-8-214-2629-0.

Firemní materiály a internet dodavatelů servopohonů.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
ředitel

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá vývojem a výrobou nízkonákladového robotu, který je určen pro prezentační a marketingové účely firem CUTTER Systems spol. s r. o. a N-ROTE Mechanical s r. o. Hlavní funkcí robotu je rozlévání nápojů do sklenic.

ABSTRACT

This thesis deals with design and productions of low-cost robot used for presentation and marketing purposes of companies CUTTER Systems spol. s.r.o. and N-ROTE Mechanical s.r.o. The main task of this robot is to serve beverages into glass containers.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robot, konstrukce, Arduino, 3D tisk

KEYWORDS

Robot construction, Arduino, 3D printing

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

TEJCHMANOVÁ, M. *Vývoj a výroba nízkonákladového robotu pro interakci s okolím*, Brno, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. 2016, 79 s., Vedoucí diplomové/bakalářské práce doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji všem, za všechno.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracovala jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Radka Knoflíčka, Dr. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 26. 5. 2016

.....

Tejchmanová Michaela

OBSAH

1	ÚVOD	11
2	MOTIVACE.....	13
3	CO JE TO ROBOT?	14
3.1	Průmyslové roboty	17
3.1.1	Využití průmyslových robotů	18
3.1.2	Výrobci průmyslových robotů	19
3.1.3	Robotika na MSV 2015	23
3.2	Zábavná robotika	23
3.2.1	Hračky	24
3.2.2	Roboty v domácnosti	25
4	KONSTRUKCE.....	26
4.1	Kinematický řetězec	26
4.1.1	Realizace rotační kinematické dvojice	27
4.1.2	Realizace translační kinematické dvojice	29
5	ŘÍZENÍ ROBOTU	32
5.1	Arduino	32
5.2	Řízení motorů	34
5.3	Senzorika	36
5.4	Napájení	37
6	VLASTNÍ KONSTRUKCE ROBOTU	38
6.1	Materiály	38
6.1.1	Přesnost a vůle	39
6.2	Robot a okolí.....	40
6.3	Osa C.....	41
6.4	Z osa.....	44
6.5	X osa	46
6.6	Koncový efektor	49
6.7	Výpočet ozubení	50
6.7.1	Výpočet napětí v ohybu v patě zubu	51
6.7.2	Výpočet napětí v dotyku.....	51
7	PRAKTICKÁ REALIZACE.....	53
8	SOFTWARE	62
9	BEZPEČNOST PRACOVISTĚ.....	67
10	CENOVÁ KALKULACE.....	68
11	ZÁVĚR.....	69
12	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	70
13	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	73
13.1	Seznam zkratk	73
13.2	Seznam symbolů	73
13.3	Seznam tabulek	74
13.4	Seznam obrázků	74

14 SEZNAM PŘÍLOH.....	77
1. Výkresová dokumentace sestavy a vybraných komponent	77
2. Schéma zapojení	77
3. Řídicí software robotu.....	77
4. Technický list robotu AlcBot.....	77

1 ÚVOD

Slovo *robot* slýcháme v dnešní době čím dál častěji, proniklo do masových médií a patrně není v moderní společnosti člověka, který by se s tímto pojmem nesetkal. Pro účely vědecké práce je však nutné tento pojem přesně vymezit a definovat. Tomuto úkolu je věnována první kapitola této práce. Kapitola se zabývá rozdělením robotů na průmyslové a servisní. Tato práce se primárně zaměřuje na roboty určené pro interakci s člověkem.

V druhé kapitole je přednesen hlavní cíl této práce – tedy konstrukce robotu **AlcBot 1.0**, určeného k rozlévání nápojů. Kapitola je převážně rešeršního charakteru, nicméně je v ní příležitostně zmíněno již konkrétní konstrukční řešení.

Další kapitoly jsou věnovány konstrukci robotu, elektronice, řízení a praktické realizaci stavby. Je zde prezentováno množství obrazového materiálu z výroby robotu. Součástí této práce je i výkresová dokumentace vybraných komponent a řídicí software robotu.

Použitý software

3D model a výkresová dokumentace jsou vytvořeny v softwaru Autodesk Inventor 2015 a AutoCAD 2014. Pro technologii 3D tisku je využita 3D tiskárna Prusa i3 a software Slic3r. Pro generování frézovacích programů je využit software CamBam plus 0.9.8. Software je naprogramován v prostředí Arduino IDE 1.6.6. Blokové schéma je vytvořeno v software fritzing 0.9.2b.

2 MOTIVACE

Motivací ke zvolení daného tématu diplomové práce byla především možnost praktické realizace v oblasti robotiky, která mne velmi zajímá. Chtěla jsem přesáhnout oblast čisté konstrukční strojařiny a ponořit se i do – mnou méně probádaných, nicméně velmi zajímavých – oblastí elektroniky a programování, neboť se chci i v těchto oblastech nadále odborně rozvíjet. Téma stavby robotu je v tomto ohledu téměř ideální. Zastávám názor, že funkční a provozuschopný výrobek má daleko větší vypovídající hodnotu než pouhý teoretický návrh, který nezohledňuje mnohá úskalí praktické montáže a ožívování daného výrobku. Praktická realizace vlastního návrhu s sebou nese nemalé problémy a zabere mnoho času navíc, odměnou autorovi je však radost a uspokojení z dokončeného funkčního díla.

Co se týče účelu robotu, mým cílem bylo postavit takový robot, který bude jednou za čas opravdu využívaný a nebude sloužit pouze jako statická dekorace. Stavba univerzálního robotu se mi jevila příliš komplikovaná, neboť je nutné zohlednit mnoho předem neznámých parametrů a musí zde existovat možnost jeho programování uživatelem, aby takový robot měl smysl. Jednouúčelový robot se z tohoto hlediska jeví pro mne vhodnější. Také jsem si přála, aby účel robotu byl poutavý a zajímavý pro každého, kdo s robotem přijde do styku nebo se o něm doslechne. Účel „rozlévání nápojů, především alkoholického charakteru“ mé přání splňuje dostatečně. Očekávám využívání robotu na častých teambuildingových akcích mého zaměstnavatele, případně na večírcích pořádaných mnou nebo mými přáteli.

3 CO JE TO ROBOT?

Jak již bylo předneseno v úvodu, slovo *robot* je dnes široce rozšířeno. Rozvoj robotiky úzce souvisí s rozvojem informačních technologií, elektroniky, vývojem nových materiálů a především s rostoucím ekonomickým potenciálem společnosti, jejímž hlavním zájmem je zpříjemnit a ulehčit si život. Roboty tento požadavek plně uspokojují.

Definovat, co přesně znamená *robot*, je poměrně komplikované. Definice slova *robot* existuje velké množství a vědecké kapacity se mnohdy na významu tohoto slova neshodnou. Zde jsou předloženy některé z definic. Z následujícího výčtu je možné si vytvořit představu, co všechno tento pojem zahrnuje.

Robot – zařízení, automaticky reagující na podněty okolí a současně na toto okolí zpětně působící

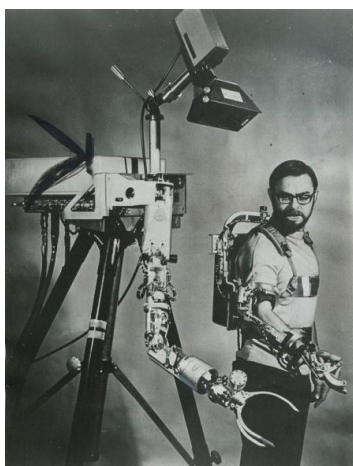
Robot – jeho součástí je senzorické vybavení a má minimálně dva stupně volnosti

Robot – automatický nebo počítačem řízený integrovaný systém, schopný autonomní, cílově orientované interakce s přirozeným prostředím, podle instrukcí od člověka. Tato interakce spočívá ve vnímání a rozpoznávání tohoto prostředí a v manipulování s předměty, popř. v pohybování se v tomto prostředí. [1]

Průmyslový robot je autonomně fungující stroj-automat, který je určen k reprodukci některých pohybových a duševních funkcí člověka při provádění pomocných a základních výrobních operací bez bezprostřední účasti člověka a který je k tomuto účelu vybaven některými jeho schopnostmi (sluchem, zrakem, hmatem, pamětí a podobně), schopností samovýuky, samoorganizace a adaptace, tj. přizpůsobivosti k danému prostředí. [2]

Podle stupně inteligence je možné roboty seřadit vzestupně do následujících skupin:

Teleoperátor – manipulátor s ručním řízením, jeho hlavním úkolem je násobit sílu anebo přesnost pohybu lidské ruky



3.1 - Teleoperátor NAT [3]



3.2 - Chirurgický robot Da Vinci [3]

Teleoperátory jsou často řízeny stylem Master – Slave, tedy zařízení (slave) přebírá podněty od člověka (master) a kopíruje jeho pohyb. Jejich využití je především v člověku nebezpečném prostředí (výbušném, kontaminovaném, atd.). Teleoperátory jsou také využívány v chirurgii pro zvýšení přesnosti pohybu – například při operacích.

Manipulátor – vykonává předem naprogramovanou opakující se úlohu, případně je řízen ručně

Manipulátor bývá velice omezeně vybaven senzorikou a není schopen pružně reagovat na okolní podmínky. Může být řízen ručně a sloužit pouze pro přenášení těžkých anebo rozměrných břemen nebo pracovat v automatickém cyklu na naprogramované neměnné úloze.

Průmyslový robot – vykonává naprogramovanou činnost a navíc je schopen pružně reagovat na měnící se vstupní podmínky



3.3 - Průmyslový robot Kuka KR16 [4]

Průmyslové roboty jsou více rozvedeny v Kapitole 3.1.

Kognitivní robot – je schopen se za provozu učit ze zkušeností a měnit svůj program podle potřeby, rozhodovat se za neúplných vstupních podmínek, předvídat události. Konstrukčně může být stejný jako průmyslové roboty.

Android – je zde snaha vizuálně napodobit člověka nebo jeho činnost, nese prvky umělé inteligence



3.4 - Android C-3PO [5]



3.5 - Android R2-D2 [5]

Roboty C-3PO a R2-D2 z kultovní filmové série Star Wars se řadí do kategorie androidů. Stavba robota je kompletně mechanická, C-3PO již nese vizuální prvky člověka. Roboty jsou obdařeny umělou inteligencí.

Humanoid – android, který je již velice podobný člověku. Může být k nerozeznání od člověka, je však uměle vyrobený a obsahuje minimum organických prvků. Může omezeně nabývat vědomí sebe sama a být obdařen lidskými emocemi.

Kyborg – neboli kybernetický organismus – jedná se o plné propojení organické a umělé části člověka/robota. Jsou možné dva typy, lidský mozek v umělém těle nebo biologické tělo s umělou inteligencí. Do této kategorie spadají i lidské bytosti, které byly uměle modifikovány.



3.6 - Humanoid Data [5]



3.7 - Kyborg Sedmá z devíti [5]

Příkladem humanoidního robota je robot Data ze seriálu Star Trek. Je obdařen umělou inteligencí a vědomím sebe sama. Postava jménem Sedmá z devíti ze stejného seriálu je

příkladem kyborga. Je to původem člověk, který je modifikován umělými prvky, které vedou ke zlepšení omezených možností člověka (zvýšení síly, rozvoj intelektu, zbystření smyslového vnímání).

Úroveň dnešního poznání lidstva zatím nedosahuje na takovou úroveň, aby bylo možné modifikovat opravdové plnohodnotné kyborgy, avšak určitý vývoj v této oblasti lze pozorovat především v oblasti medicíny. Umělé náhrady končetin nebo orgánů nejsou ničím neobvyklým. Aktivně probíhají testy umělých protéz, které jsou řízeny elektrickými impulsy z mozku.

Roboty lze dělit i podle jiných kritérií, než inteligence. Lze je rozdělit například podle pohyblivosti:

Mobilní roboty – roboty s pohyblivým (tzv. lokomočním) ústrojím – dále lze dělit na pozemní, podvodní, létající mobilní roboty

Stacionární roboty – roboty s pevným ukotvením k základu

Dále je lze rozdělit dle užití na **průmyslové roboty** a **servisní roboty**. [6] Oblast servisních robotů zahrnuje mnoho podskupin a tato práce se zaměřuje především na **zábavnou robotiku**. V následujících oddílech jsou tyto kategorie podrobněji rozebrány.

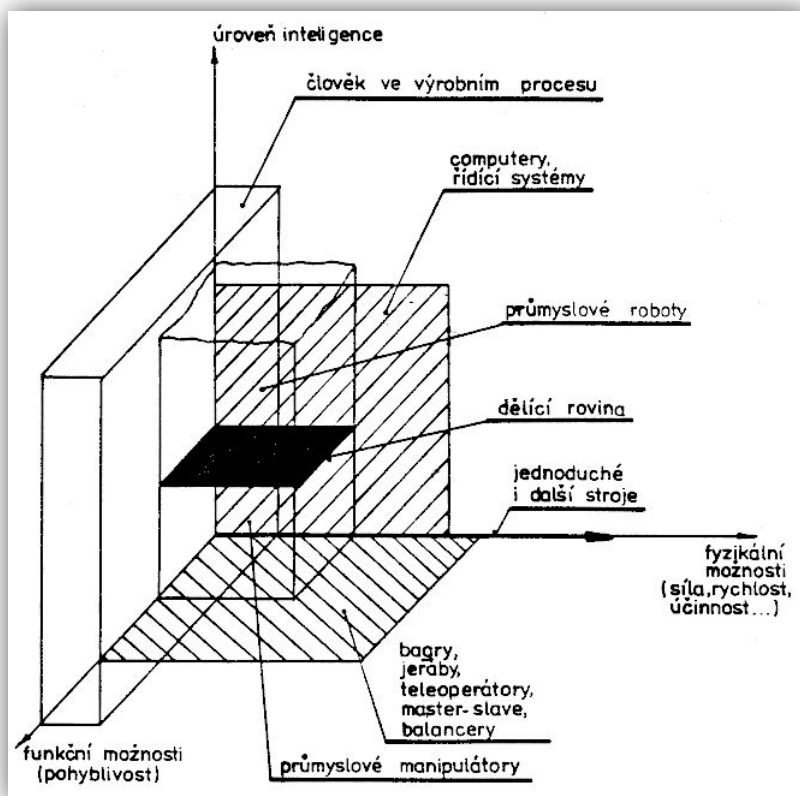
3.1 Průmyslové roboty

Průmyslové roboty slouží, jak již název napovídá, pro průmyslovou aplikaci. Jednoznačnost výše uvedených definic slova robot komplikuje mimo jiné i obtížné vymezení hranice mezi robotem a tzv. manipulátorem. Na Obrázku **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.** je vyznačena tato hranice. Je zde i naznačeno, v jakém vztahu se k robotům a manipulátorům nachází člověk. Je možné konstatovat, že robot obsahuje oproti manipulátoru lepší senzorické vybavení, je schopný reagovat na měnící se okolní podmínky. Je „chytřejší“ než manipulátor, který je schopný vykonávat pouze automatizovanou a opakovanou činnost (pick and place, tedy „zvedni a polož“), bez možnosti adaptovat se na okolní prostředí.

Podle normy ISO 8373 je průmyslový robot definován takto: [6]

Průmyslový robot je automaticky řízený, programovatelný, multifunkční manipulátor programovatelný v třech a více osách, který může být upevněn na místě nebo být mobilní, užívaný pro průmyslové automatizované aplikace.

Průmyslové roboty nacházejí uplatnění převážně v manipulačních nebo technologických operacích. V České Republice je 51% průmyslových robotů využito v oboru automobilního průmyslu. Celkový počet průmyslových robotů využívaných v provozu je 4 500. [6] Manipulační roboty jsou nejčastěji využívány pro paletizaci hotových výrobků, přesun výrobků mezi jednotlivými stanicemi na výrobní lince nebo zvedání těžkých anebo tvarově složitých součástí. Moderní výrobní podniky se přiklánějí k nasazování průmyslových robotů na své výrobní linky. Výhody robotů oproti lidské pracovní síle jsou rozebrány v Kapitole 3.1.1.



3.8 - Člověk ve vztahu k robotům a manipulátorům [7]

Technologické operace jsou roboty realizovány pomocí speciálních technologických hlavic. Mezi typické technologické operace patří lepení (nanášení lepidla), svařování, pájení, barvení (například karoserií aut); pomocí robotů je možné realizovat i třískové obrábění. Existují plně automatizované výrobní haly (například firem Tesla motors nebo Fanuc), ve kterých se nacházejí roboty určené pro manipulaci i technologické operace a podíl lidské práce ve výrobě je minimální.

3.1.1 Využití průmyslových robotů

Použití průmyslových robotů je pro výrobní firmy velice výhodné. Hlavní výhodou nasazení průmyslových robotů je ekonomická výhodnost. Vyšší náklady na pořízení a provoz robotu, respektive robotizovaného technologického pracoviště (RTP), mají dobu návratnosti 3 až 4 roky. Z toho vyplývají nižší náklady na provoz pracoviště jako takového. Je-li doba návratnosti delší, než je doba životnosti PR nebo RTP, pak se uvažuje o sociálních aspektech robotizace (humanizace práce člověka). Životnost průmyslových robotů je 12 – 15 let. [8] Mezi další výhody robotů patří:

- Možnost pracovat i v pro člověka nepříznivém prostředí (chlad, horko, tma, prašné, výbušné prostředí)
- Větší síla a rychlost oproti lidské obsluze
- Schopnost nepřetržitého a bezporuchového provozu
- Lepší kvalita a opakovatelnost výroby

Nahrazování lidské obsluhy průmyslovými roboty s sebou nese i jisté nevýhody, například propouštění méně kvalifikovaných a vzdělaných pracovníků, které robot ve své činnosti nahrazuje, což vede ke zvyšování nezaměstnanosti této skupiny lidí. Tento negativní důsledek však nepocítí uje zaměstnavatel, ale především celá společnost.

Nasazení průmyslových robotů do výroby se vyplatí pouze za určitých podmínek. Především je to velkosériová výroba. Pro malé série by bylo nutné často robota seřadit na nový typ vyráběné součásti, což s sebou nese náklady a tzv. mrtvý čas na lince. Některé průmyslové aplikace obnášejí dlouhý a komplikovaný vývoj robotických systémů s nejistým výsledkem. U každé aplikace je nutno posoudit, jestli se nasazení robotu ekonomicky vyplatí.

3.1.2 Výrobci průmyslových robotů

V této kapitole jsou v krátkosti představeni nejvýznamnější výrobci průmyslových robotů. Kapitola je zaměřena na trend, kterým se robotika dnes ubírá a to je vývoj robotů, které mohou spolupracovat s lidmi bez nutnosti oddělovat roboty bezpečnostními prvky (ochranné klece, světelné závory a další). Tato kategorie je nazývána *collaborative robots*, v překladu *spolupracující roboty*. V odborných kruzích se někdy používá i označení *kolaborativní roboty*. Možnost spolupráce člověka a robotu je velice efektivní z hlediska zmenšení zástavbového prostoru. Ochranné klece mají velký zástavbový prostor a v případě, že se obsluha potřebuje do tohoto prostoru dostat, je nutné robot zastavit, čímž dojde k zastavení výrobního toku na lince.

Konstrukce kolaborativních robotů zahrnuje momentové a silové snímače, které okamžitě upozorní řídicí systém robotu v případě, kdy dojde k dotyku s překážkou. Řídicí systém vyhodnotí kolizi a robot je okamžitě zastaven. Tímto způsobem je výrazně eliminováno riziko poranění člověka.

Dalším směrem, kterým se výrobci robotů ubírají, je co nejsnazší programování těchto robotů. Všechny níže uvedené typy kolaborativních robotů je možno programovat bez hlubších technických a především programátorských znalostí. Roboty jsou schopny se požadovanou dráhu pohybu naučit pouhým vedením jejich efektoru a následným zapsáním dráhy do paměti robotu. Tato možnost vede ke snižování nákladů, neboť není nutná přítomnost kvalifikovaného (často externího a draze placeného) programátora ve firmě.

Kuka

Roboty Kuka jsou typické výraznou oranžovou barvou. Dělí se do čtyř kategorií podle nosnosti (od nízké – 5-16 kg po vysokou – 300-1300 kg). V dubnu roku 2013 byl na veletrhu v Hannoveru poprvé představen nový typ robotu s názvem LBR iiwa.[4] Tento robot je určen pro spolupráci s lidmi na jedné výrobní lince bez nutnosti bezpečnostních zábran. Některé zprávy uvádějí, že je tento typ prvním robotem na trhu, určeným pro spolupráci s lidmi, je to však mylná informace, jak je uvedeno níže u firmy Universal Robots.



3.9 - Kuka LBR iiwa [4]



3.10 - Kuka KR 16-2 [4]

ABB

Firma ABB se kromě robotiky zabývá také energetikou a automatizací. I tato firma představila svůj první model robotu, který je navržen pro spolupráci s lidmi a není nutno jej oddělovat bezpečnostními prvky. Firma tento typ robotu s názvem YuMi představila 13. dubna 2015 na veletrhu v Hannoveru. [9] Robot YuMi se od ostatních robotů v této kategorii liší nejenom dvěma rameny namísto jednoho, ale hlavně tím, že se u něj přímo předpokládá přímá spolupráce s člověkem na jednom pracovním stanovišti. Ramena robotu jsou identická a vzájemně nahraditelná. Systém robotu je vybavený automatickou detekcí vzájemné kolize ramen. Robot je určený především pro montáž jemných součástek.

Kromě tohoto typu vyrábí firma ABB i standardní průmyslové roboty s velkým rozsahem maximální nosnosti (3-500 kg).



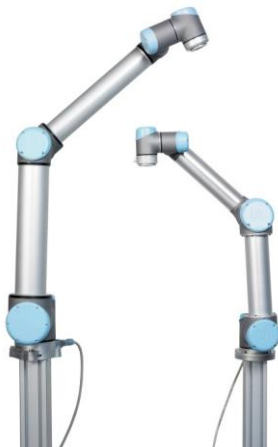
3.11 - ABB YuMi [9]



3.12 - IRB 140 [9]

Universal robots

Skutečně prvním robotem uvedeným na trh, který je určen pro spolupráci s lidmi bez nutnosti přítomnosti bezpečnostních zábran je typ UR5 od Dánské firmy Universal robots. První roboty tohoto typu byly uvedeny na trh v roce 2009, tedy 4 roky před typem LBR iiwa od firmy Kuka a 6 let před typem YuMi od firmy ABB. [10] Firma nabízí pouze tři typy robotů, lišící se maximální nosností (10, 5 a 3 kg). Jedná se o typy UR10, UR5 a nově i UR3, který byl na trh uveden v březnu roku 2015.



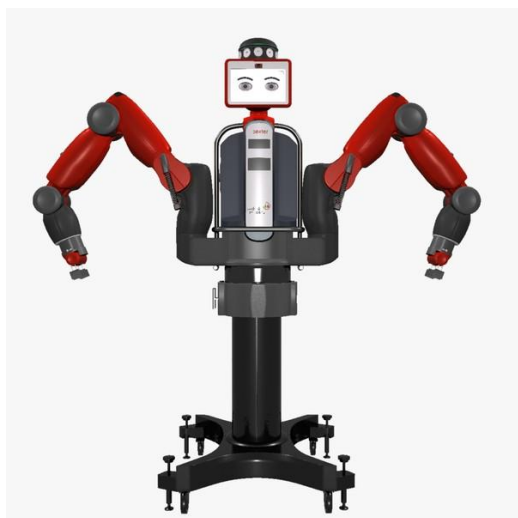
3.13 - UR10 a UR5 [10]



3.14 - UR3 [10]

Rethink robotics

Tato firma uvedla v roce 2012 na trh svůj robot pod názvem Baxter. Tento robot má nosnost 2,2 kg pro každé rameno. V roce 2015 přišla s druhým modelem s názvem Sawyer, s nosností 4 kg. Oba roboty jsou netypické svým LCD panelem s očima, který těmto robotům poskytuje lidšější výraz. Oba typy robotů jsou určeny především pro jemnou manipulační práci (například výroba a testování desek plošných spojů, atd.) Stejně jako předchozí modely je určen pro spolupráci s člověkem.



3.15 – Baxter [11]



3.16 – Sawyer [11]

Fanuc

Firma Fanuc představila v létě roku 2015 svůj první model kolaborativního robotu s označením CR 35ia. Tělo robotu je celé pokryto gumovým materiálem, při kolizi tedy nedojde ke zranění člověka. Je to nutné především díky jeho velikosti a hmotnosti. Nosnost tohoto robotu je 35 kg.



3.17 - Fanuc CR 35ia [12]

Zhodnocení rozdílů

Nejvíce se od konkurence liší robot CR 35ia od firmy Fanuc. Prvním rozdílem je maximální nosnost robotu. Kolaborativní roboty od konkurenčních firem mají nosnost 3-10 kg, CR 35ia je schopný manipulovat s nákladem až 35 kg. Rozdílné je i snímání kolize s překážkou (člověkem). Roboty firem Kuka, ABB a Universal robots snímají kolizi s překážkou pomocí snímačů proudu motoru – pokud je robotu kladen mechanický odpor, zvýší se proud protékající motory umístěných v kloubech robota a pomocí hodnoty tohoto proudu je poté vyhodnocena kolize. Firma Fanuc kolizi snímá rozdílným způsobem – po celém těle robotu pod gumovým materiálem jsou umístěny tenzometry, které snímají a vyhodnocují tlak. K zastavení robotu dojde tedy pouhým zatlačením na kterékoliv místo na těle robotu.

Každý z uvedených typů robotů je výhodnější použít pro rozdílné aplikace. Roboty Kuka LBR iiwa, UR, Baxter a Sawyer jsou vhodné především pro paletizaci a manipulaci lehčích součástí na výrobních linkách. Pro firmy jsou výhodné především proto, že není nutné linku zabezpečit ochranným plotem. Je však možné je využít i pro úkoly, na kterých se podílejí přímo s člověkem. Robot ABB YuMi nalezne využití na kompletačních stanicích, na kterých současně pracují i lidé. Předpokládá se zde vyšší interakce robotu a člověka než u ostatních typů, je možné pracovat na stejné pracovní úloze s člověkem. Robot Fanuc CR 35ia je vhodný pro manipulaci s těžšími břemeny a přímá interakce na stejné pracovní úloze s člověkem se u něj spíše nepředpokládá, i když je možná.

3.1.3 Robotika na MSV 2015

Mezinárodní strojírenský veletrh (MSV) je akce s dlouholetou tradicí. Veletrh se koná každoročně na podzim v Brně a je možné na něm shlédnout expozice významných firem působících v oboru strojírenství. Jelikož je robotika důležitou oblastí strojírenství, nejvýznamnější světoví výrobci robotů na MSV každoročně předvádí novinky z této oblasti. Na MSV 2015 se potvrdil trend uvedený výše, tedy roboty pro úzkou spolupráci s lidmi.

Firma Kuka zde představila model LBR iiwa, který byl na veletrhu k vidění již předchozí rok. Firma ABB zde měla expozici s robotem YuMi, který byl na MSV představen poprvé. Novinkou zde byl také kolaborativní robot CR 35ia od firmy Fanuc.

Zástupci uvedených firem zastávají názor, že budoucnost robotiky se bude ubírat směrem k vývoji umělé inteligence. V dnešní době jsou roboty schopné reagovat na měnící se okolní podmínky, toto chování se však odehrává na základě naučených vzorců a definovaných parametrů. Roboty nejsou prozatím schopné si poradit se situací, ve které se vyskytuje příliš mnoho neznámých. Ačkoliv z pochopitelných důvodů nebyli zástupci uvedených firem ochotni prozradit, jakým směrem se ubírá vývoj robotů v jejich firmě, umělá inteligence je pravděpodobně cíl, o jehož dosažení se firmy do budoucna budou snažit.

3.2 Zábavná robotika

Servisní roboty se od průmyslových podstatně liší. IFR definuje kategorii servisních robotů takto: [6]

Servisní robot pracuje v polo- nebo plně automatickém režimu a slouží k poskytování služeb užitečných pro blaho lidí. Tato kategorie nezahrnuje výrobní operace.

Kategorie servisní robotiky zahrnuje roboty pro domácí práce, zábavné roboty, asistenci pro postižené osoby. Do této kategorie spadají také roboty užívané v zemědělství, zdravotnictví, roboty pro profesionální úklid, vojenské účely a jiné. Tato práce se zaměřuje na roboty z kategorie zábavné robotiky. Zábavné roboty mají za úkol především pobavit a zaujmout svého majitele nebo uživatele. Většinou tyto roboty vznikají z těchto příčin:

- Prezentace technologií předních světových technologických firem na veletrzích a akcích
- Prodej movitějším lidem/firmám, které mají zálibu v moderních technologiích a chtějí zaujmout své okolí/zákazníky
- Vývoj a aplikace nových technologií
- Marketingové účely

Produkty, které lze zahrnout do kategorie zábavné robotiky jsou velice rozmanité. V drtivé většině případů to jsou roboty, které jsou schopné bezprostřední interakce s člověkem. Často jsou to technologicky vyspělá zařízení s různými hlasovými a řečovými moduly, s rozpoznáním obrazu apod. Zábavné roboty lze rozřadit do následujících kategorií.

3.2.1 Hračky

Roboty v této kategorii nacházejí uplatnění v domácnosti. Cílovými zákazníky tohoto produktu jsou především děti a mladí lidé. Příkladem produktu z této kategorie je projekt firmy LEGO s názvem Mindstorms.



3.18 - LEGO Mindstorms [5]

Jedná se o vývojovou platformu, skrze kterou je možné si postavit robota dle vlastních představ. Tato platforma má mnoho fanoušků po celém světě. Kromě zábavného účelu slouží i ke vzdělání a rozvinutí technických schopností. Tato platforma obsahuje množství senzorů, motorů a ovládacích prvků.

Dalším příkladem robotických hraček jsou robotická zvířata, která mají za úkol imitovat živé domácí mazlíčky. Firma Sony přišla v roce 1999 na trh s robotickým psem s názvem AIBO. Tento robot umí rozpoznat tvář a hlas svého „pána“, sám dokáže vyhodnotit, že je nutné dobít baterie a připojit se k dobíjecí stanici. Umí vyjadřovat emoce a hrát si s různými předměty i se svým majitelem. V roce 2006 firma z ekonomických důvodů ukončila vývoj a prodej tohoto robotu. [13]



3.19 - Sony AIBO [13]

3.2.2 Roboty v domácnosti

V případě robotů určených do domácnosti je často užití pojmu *robot* nesprávné, neboť tyto přístroje nesplňují definice uvedené v Kapitole 3. Často jsou to konstrukčně jednoduchá zařízení bez senzorického vybavení, disponující méně než třemi osami. Označení *robot* se však pro tyto zařízení již ustálilo a běžně se používá, proto je užíváno i v této práci.

Příkladem robotu vhodného do domácnosti je tzv. *bartender robot*, tedy robotický barman. Tyto roboty slouží k přípravě koktejlů. Takový robot se nachází například na luxusní výletní lodi Quantum of the Seas, která disponuje roboticky obsluhovaným barem. Robot Bionic stavbou připomíná průmyslové roboty uvedené v Kapitole 3.1



3.20 - Robot Bionic [14]

Dalším zástupcem robotu do domácnosti je v dnešní době velice moderní mobilní robotický vysavač. Vyrábí je například firma iRobot. Tento robot je vybaven senzorikou pro snímání zdí a překážek. Je řízen navigační kostkou, která s robotem komunikuje a udává mu informace o aktuální poloze.



3.21 - Roomba 880a Scooba 450 [15]

4 KONSTRUKCE

Existují konstrukční prvky, které jsou všem typům robotů společné, ať už se jedná o průmyslové či servisní roboty. V následujících kapitolách jsou tyto prvky podrobněji popsány. Při návrhu konstrukce robotu je nutné zohlednit následující parametry:

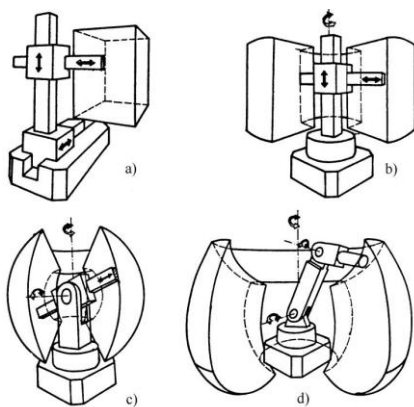
- velikost robotu
- počet stupňů volnosti
- hmotnost manipulovaného objektu
- kinematický řetězec
- okolí pracovního prostředí
- cena
- požadovaná přesnost

4.1 Kinematický řetězec

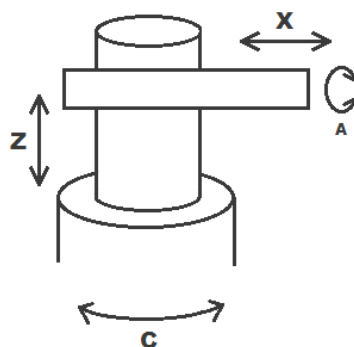
Robot je z hlediska kinematiky otevřený sériový kinematický řetězec. Existují i roboty s paralelní kinematikou, tato práce se však zaměřuje na roboty s kinematikou sériovou. Ve stavbě průmyslových robotů se používají především rotační a translační kinematické dvojice. Každá taková dvojice poskytuje robotu jeden stupeň volnosti. Někdy se stupně volnosti nazývají hovorově osy, tedy šestiosý robot znamená totéž, co robot se šesti stupni volnosti. Příkladem takových šestiosých robotů jsou průmyslové roboty zmíněné v Kapitole 3.1.2. Existují i kinematické dvojice poskytující více stupňů volnosti (válcová, rovinná, sférická), tyto jsou však obtížněji konstrukčně realizovatelné a u robotů se zpravidla nepoužívají. Pro dosažení libovolného bodu v třídimenzionálním prostoru potřebujeme nejméně tři kinematické dvojice. Spojení těchto kinematických dvojic do série se nazývá základní kinematický řetězec (ZKŘ). Existují čtyři základní typy kinematického řetězce.

- | | |
|---------------------------------------|--------------------|
| 1. Tři translační kinematické dvojice | T T T (na obr. a)) |
| 2. Jedna rotační a dvě translační KD | R T T (na obr. b)) |
| 3. Dvě rotační a jedna translační KD | R R T (na obr. c)) |
| 4. Tři rotační kinematické dvojice | R R R (na obr. d)) |

Každý z těchto typů ZKŘ umožňuje dosáhnout různého tvaru pracovního prostoru robotu.



4.1 - Tvar pracovního prostoru v závislosti na typu ZKŘ[16]



4.2 - Kinematický řetězec robotu **AlcBot**

Robot **AlcBot**, jehož vývoj je cílem této práce, má základní kinematický řetězec typu RTT, na Obrázku 4.1 typ b). Rotace je provedena v ose C, následují translace v osách Z a X. Obsluhovaný pracovní prostor má cylindrický tvar.

Tři kinematické dvojice postačují na dosažení libovolného bodu v prostoru, avšak kromě dosažení definované polohy je často nutné manipulovaný předmět určitým způsobem orientovat. K tomu slouží tzv. orientační ústrojí robotu, které bývá konstrukčně provedeno podobně jako polohovací ústrojí. Také je řešeno pomocí kinematických dvojic rotačních nebo translačních a tyto kinematické dvojice se podílejí na celkovém počtu stupňů volnosti robota. Nezapočítávají se však do základního kinematického řetězce.

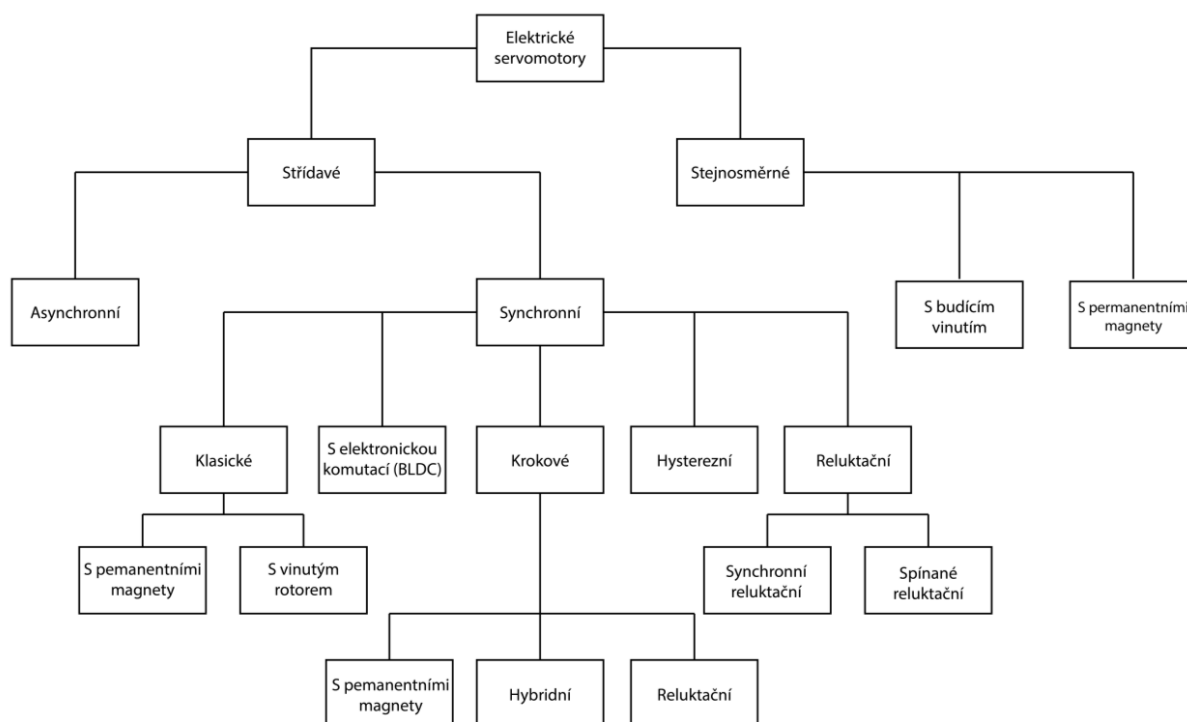
AlcBot má pouze jedno polohovací ústrojí – rotaci v ose A. Kinematika robotu je znázorněna na Obrázku 4.2.

4.1.1 Realizace rotační kinematické dvojice

V současné době se pro realizaci rotační kinematické dvojice používají především elektromotory. Elektromotor je zařízení, které přeměňuje dodanou elektrickou energii na energii mechanickou. Elektromotory se liší způsobem, jakým energii transformují, obecně však lze říci, že je převod energie realizován za pomoci magnetického pole a z něj vycházejících sil.

Elektromotory lze rozdělit podle způsobu napájení. Mohou být napájeny střídavým elektrickým napětím (z rozvodné sítě nebo pomocí frekvenčního měniče) nebo stejnosměrným elektrickým napětím. Střídavé elektromotory se používají pro větší výkony, stejnosměrné elektromotory především pro lehčí aplikace, jemnou mechaniku a robotiku.

V případě robotů je nutné řídit přesné natočení motoru z důvodu dosažení definované polohy. K tomu se využívá tzv. servomechanismů. Pojem *servomotor* se používá pro motor libovolného typu, který navíc obsahuje enkodér. Enkodér je zařízení, snímající aktuální polohu natočení motoru. Enkodér tuto aktuální polohu předává řídicí elektronice motoru, která následně vyhodnocuje, jestli aktuální natočení motoru odpovídá žádaným hodnotám a případně rozdíl hodnot koriguje.

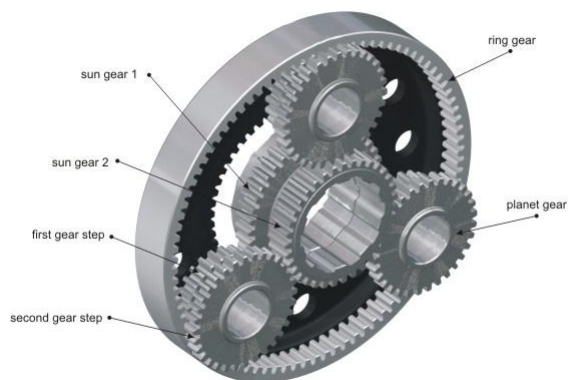


4.3 - Schematické rozdělení typů motorů[3]

Mezi základní parametry motoru patří výkon, otáčky a výstupní krouticí moment. V případě konstrukce robotu je nejdůležitějším parametrem výstupní krouticí moment, který je daný vlastní konstrukcí a principem činnosti elektromotoru. Hodnota krouticího momentu motoru je však ve většině případů nedostačující a z tohoto důvodu se využívá převodovky. Převodovka je zařízení, které mění otáčky a moment vstupního a výstupního zařízení. Pro tyto veličiny platí následující vztah:

$$i = \frac{n_1}{n_2} = \frac{M_2}{M_1} \quad (1)$$

Převod může být realizován ozubenými koly, řetězem, řemenem nebo jiným mechanickým principem. Ozubená kola využívá planetová převodovka, kterou je možné jako kompaktní zařízení připojit přímo k přírubě motoru a podstatně zvýšit jeho výstupní moment (převod až 100:1). Planetová převodovka může být i vícestupňová, což výsledný převodový poměr dále násobí (až k hodnotám 2000:1). Pro rotační osy průmyslových robotů se často používá cykloidní převodovka, pomocí které je dosaženo velkých převodových poměrů (až 300:1). Cykloidní převodovky dosahují menších vůlí, proto jsou vhodné pro aplikace vyžadující vysokou přesnost a díky své konstrukci lépe odolávají rázům a přetížení. Jsou však dražší. Planetová převodovka poskytuje větší převodové poměry, při použití více stupňů se však zvětšuje její délka.



4.4 - Planetová převodovka[16]

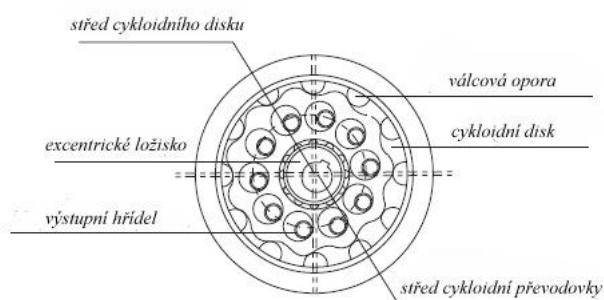


Schéma stavby cykloidní převodovky

4.5 - Cykloidní převodovka[16]

Použití dalších konstrukčních prvků, jako jsou ložiska, spojky, brzdy, enkodéry, atd. závisí především na konkrétním konstrukčním řešení rotační osy.

Pro lehkou mobilní robotiku se jako pohon často používají tzv. RC serva, říká se jim také modelářská serva. Jsou to stejnosměrné motory s integrovanou převodovkou a jednoduchou zpětnou vazbou pomocí potenciometru. Jejich výhody jsou velice malé zástavbové rozměry, malá hmotnost a především nízká cena (řádově stovky Kč).



4.6 – Modelářské RC servo [17]



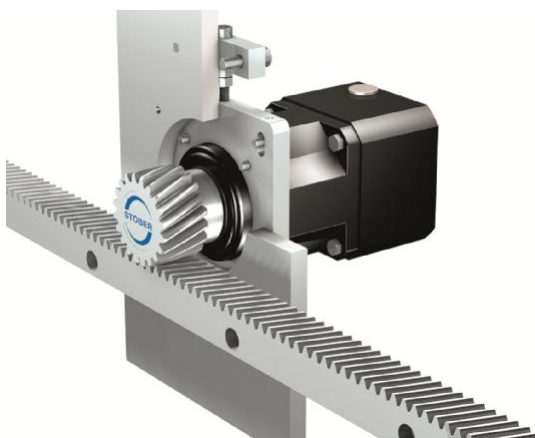
4.7 - Krokový motor firmy Polulu [17]

Pro pohon všech os ZKŘ robotu **Alcbot** se používají krokové motory. Jejich výhodou je jednoduchá kompaktní konstrukce, nízká cena a snadné řízení. RC servo se používá pro úchop v konstrukci koncového efektoru.

4.1.2 Realizace translační kinematické dvojice

Translační neboli posuvná kinematická dvojice se nejčastěji realizuje dvěma různými způsoby. Může být řešena jako přímý pohon pomocí pneumatického/hydraulického válce, případně pomocí lineárního elektromotoru. Druhý způsob je převod z rotačního pohybu na pohyb translační, což je možné provést několika způsoby. Pneumatický/hydraulický válec je výhodný z hlediska konstrukční jednoduchosti (jedná se o hotovou nakupovanou komponentu), jeho nevýhodou jsou však větší zástavbové rozměry a nehodí se pro dlouhé zdvihy. Pneumatický válec také není schopný vyvinout velké síly v porovnání s elektromotory a nesnese radiální a rázové zatížení pístnice. Lineární motor je vhodný pro aplikace vyžadující velké zrychlení a rychlosti. Konstrukčně je to vlastně elektromotor se statorem rozvinutým do roviny. Jeho nevýhodou je především vysoká cena.

Nejčastějším řešením je použití převodu rotačního pohybu na pohyb translační. Jako zdroj rotačního pohybu slouží elektromotor libovolného typu. Nejčastěji se používají servomotory synchronní, krokové nebo stejnosměrné, viz Kapitola 4.1.1. Převod může být realizován pomocí ozubeného pastorku a hřebene, kuličkového či trapézového šroubu. Také je možné použít nejrůznějších kulisových či vačkových mechanismů pro opakované kyvné anebo vratné translační pohyby.



4.8 - Pastorek a hřeben [18]



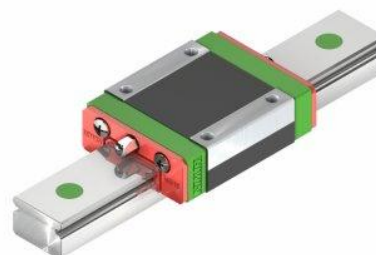
4.9 - Trapézový šroub s maticí [18]

Ozubený pastorek a hřeben je výhodné použít pro delší zdvihy. Pohybové šrouby se používají pro kratší zdvihy (do 3 m). Kuličkové šrouby mají oproti trapézovým větší účinnost (95-98%, trapézové 45-50%). Jsou však dražší a nejsou – na rozdíl od trapézových – samosvorné.

Posuvný pohyb je možné realizovat i pomocí ozubeného řemene s upínkou. Upínka spojuje pohybující se část zařízení a ozubený řemen. Řemen je navlečen na dvě řemenice – hnací a hnanou. Je to levné a jednoduché konstrukční řešení, vzhledem k pružnosti řemene je však dosaženo menší přesnosti pohybu. Výhodou je, že řemen nepřenáší vibrace a rázy. Stejný princip je možné použít i pro válečkový řetěz s unašeči.



4.10 - Upínka pro ozubený řemen [18]



4.11 - Valivý vozík firmy Hiwin [19]

Translační pohyb vyžaduje přítomnost vodících prvků. Vodicí prvky se rozlišují na valivé a klzné. Příkladem valivého vedení jsou kuličková valivá vedení. Tyto vozíky mají zabudované oběžné drážky pro kuličky, které se odvalují po profilové kolejnici. Vozíky se vyznačují vysokou účinností a únosností. Vozíky odolávají velkým momentům a silám ve všech směrech zatížení.

Zajímavou variantou kluzného vedení je drážkovaná hřídel s maticí. Toto řešení je vhodné při spojení přenosu rotačního i translačního pohybu a **Alcbot** má takto řešenou osu X a osu A. Motor je spojen s drážkovanou bronzovou maticí, která přenáší rotační pohyb na drážkovanou hřídel. Matice zároveň slouží jako vedení pro drážkovanou hřídel.



4.12 - Drážkovaná matice [18]



4.13 - Indukční snímače [20]

Na rozdíl od rotačního pohybu, jehož rozsah není zpravidla nijak omezený, translační pohyb je vymezen pro určitou vzdálenost. Počáteční a koncovou polohu je vhodné detekovat, k tomuto účelu se používají nejčastěji indukční snímače. Indukční snímač slouží i jako výchozí bod pro referenční (tzv. *HOME*) pozici pro translační osy. V případě, že je potřeba detekovat nevodivý materiál, se používají snímače kapacitní, které jsou dražší. Je možné snímat nejen koncové polohy, ale také pohyb v ose v celém jejím rozsahu. Pro tyto účely se používá analogové lineární odměřování, které funguje na induktivním, magnetickém, optoelektronickém nebo ultrazvukovém principu.

Z výše uvedeného textu je zřejmé, že konstrukční řešení rotační osy je jednodušší, než konstrukční řešení translační osy. Zatímco pro realizaci rotační osy potřebujeme pouze motor (případně s převodovkou), pro realizaci posuvné osy potřebujeme kromě motoru další komponenty. Nejspíše i z tohoto důvodu jsou roboty s kinematickým řetězcem RRR těmi nejčastěji používanými.

5 ŘÍZENÍ ROBOTU

Návrh řízení robotu je velice důležitou součástí návrhu celého robotu. Průmyslové roboty jsou komplexní systémy s velkým množstvím senzorů a akčních členů, vyžadují proto složité řízení. To je většinou realizováno pomocí PLC. PLC je kompaktní nebo modulární systém určený pro průmyslovou automatizaci. Je to v podstatě průmyslový počítač, na kterém běží řídicí program. Program běží ve smyčce, tedy se neustále opakuje a je schopný v téměř reálném čase (zpoždění v řádu mikrosekund) reagovat na změny na vstupech. Následně pomocí programu ovládá výstupy. Vstupů a výstupů může být velké množství, obzvláště u modulárních PLC. Modulární PLC obsahují většinou základní moduly – zdroj, CPU (výpočetní jednotka), moduly pro vstupy a výstupy, bezpečnostní moduly, moduly pro komunikaci, atd. Vstupy a výstupy mohou být digitální nebo analogové. Nevýhodou PLC je vysoká cena dosahující řádově stovek tisíc korun.



5.1 - PLC firmy Siemens [5]

5.1 Arduino

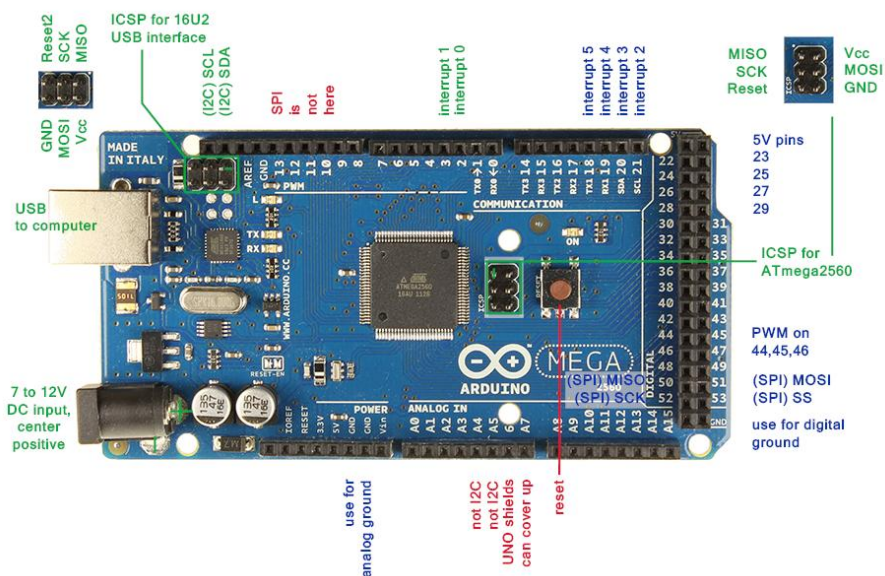
AlcBot je řízen pomocí platformy Arduino. Arduino je miniaturní počítač umístěný na jedné desce (DPS). Je založen na mikrokontroléru¹ ATMega firmy Atmel a vyrábí se v několika verzích. Jedná se o opensource projekt, na internetu jsou volně dostupná schémata všech typů DPS, která si uživatel může podle svých potřeb modifikovat nebo distribuovat dále. Pomocí Arduina lze ovládat různá drobná elektronická zařízení o malém počtu vstupů a výstupů (např. LED obrazovky, motory, atd.) Z internetu je možné zdarma stáhnout vývojové prostředí – Arduino IDE, ve kterém jdou snadno vytvářet řídicí programy a tyto programy se následně přes USB port počítače snadno nahrávají do Arduina. **AlcBot** je řízen pomocí desky Arduino MEGA 2560.

¹ Výraz mikrokontrolér označuje součástku, která v jednom pouzdře kromě mikroprocesoru integruje další prvky, jako např. RAM paměť, FLASH paměť, A/D převodník, atd.



5.2 - Arduino MEGA 2560 [5]

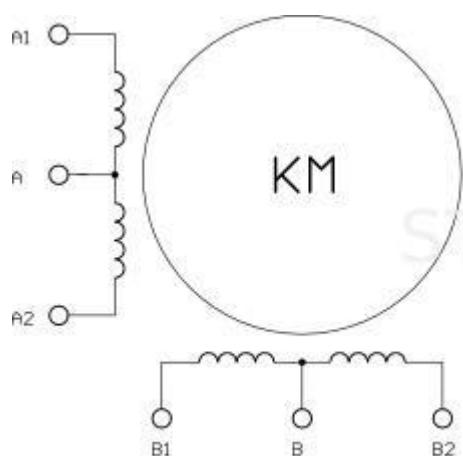
Arduino obsahuje množství pinů, jejichž počet a uspořádání se liší v závislosti na typu DPS. Nacházejí se zde piny GND (ground – 0 V) a +5 V, které jsou určené k napájení externích zařízení. Pro větší počet napájených zařízení je vhodnější použít externí napájecí zdroj. Dále se zde nacházejí analogové vstupní piny, digitální vstupní / výstupní piny a některé z těchto digitálních pinů jsou určeny pro PWM modulaci (u Arduino Mega jsou to piny 2-13). Další z těchto digitálních pinů jsou určeny také pro komunikaci (piny 0, 1, 14-21) nebo jsou to tzv. *Interrupt pins* (piny 2, 3, 18-21; více o *Interrupts* v Kapitole 8). Pomocí komunikačních pinů může Arduino komunikovat například s PC nebo s dalším Arduinem. Řízení probíhá pomocí digitálního signálu, který může nabývat hodnot LOW (odpovídá logické 0 – napětí na pinu 0 V) nebo HIGH (odpovídá logické 1 – napětí na pinu +5 V). V případě pinů s možností PWM modulace může být výstupní napětí v rozmezí 0-5 V.



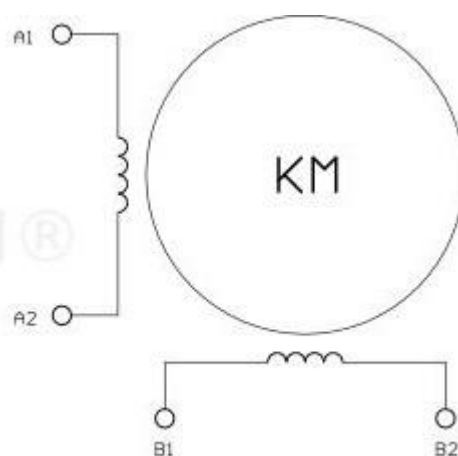
5.3 - Mapa pinů na desce Arduino Mega 2560 [21]

5.2 Řízení motorů

V konstrukci robotu **AlcBot** jsou pro pohon všech os použity krokové motory. Krokové motory se z hlediska řízení dělí na unipolární a bipolární.

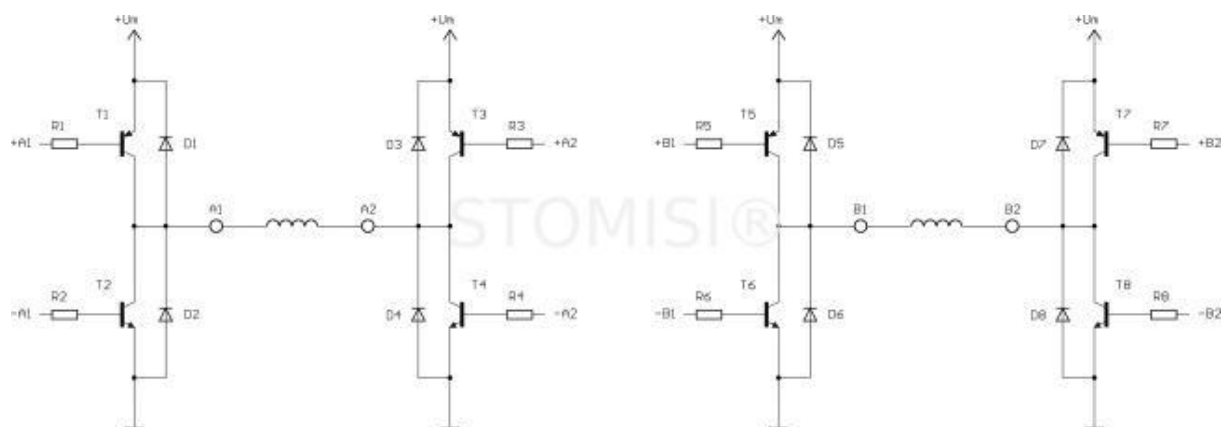


5.4 - Schéma unipolárního krokového motoru



5.5 - Schéma bipolárního krokového motoru

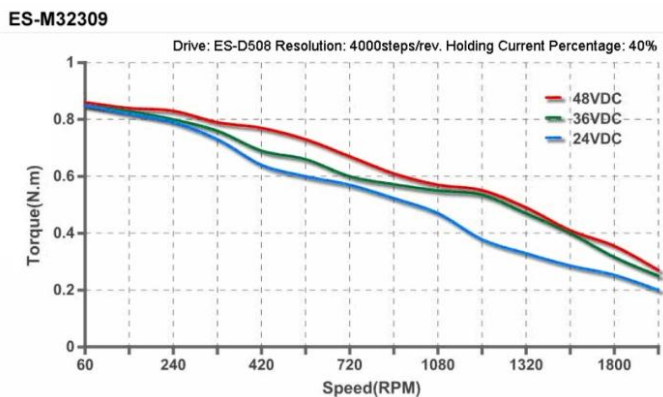
Při řízení unipolárního motoru je potřeba vodiče s označením A a B připojit ke kladnému napětí a vodiče A1, A2, B1, B2 jsou pomocí NPN tranzistorů spínány ke GND. Proud teče cívkami vždy od konce A ke koncům A1 a A2. Při řízení bipolárního krokového motoru je nezbytný tzv. H-bridge, pro každou fázi jeden, neboť proud cívkami teče v obou směrech. H-bridge zajišťuje usměrnění proudu potřebným směrem. Krokové motory malých velikostí bývají zpravidla dvoufázové (v tomto případě fáze s označením A a B).



5.6 - Schéma H-bridge

Hlavním parametrem krokových motorů je jejich krouticí moment. Ten závisí především na velikosti napětí a proudu, přivedených na fázi a také na jeho otáčkách. Na následujícím obrázku je příklad momentové charakteristiky třífázového krokového motoru s momentem 0,9 N.m a se zpětnou vazbou. Z obrázku lze vidět, že se zvyšujícími se otáčkami

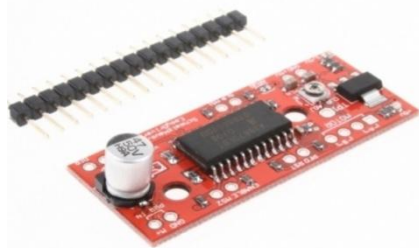
postupně klesá krouticí moment motoru. Při příliš nízkých otáčkách je však zhoršena plynulost rotace rotoru a dochází k trhavým pohybům rotoru.



5.7 - Příklad momentové charakteristiky krokového motoru [19]

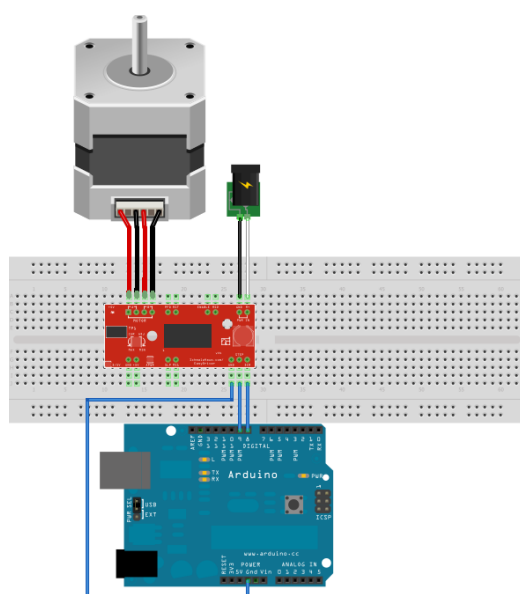
Vzhledem k jednoduché konstrukci krokových motorů lze spínání fází motoru ovládat ručně nebo přímo pomocí Arduina – stačí pouze na jednotlivé fáze přivádět napětí ve vhodném pořadí. Tento způsob řízení však není příliš vhodný, zejména kvůli tzv. přechodovému ději na cívce motoru. Po přivedení napětí na cívku trvá krátký čas (v řádech ms), než se na cívce objeví požadovaný proud. Ze začátku je tedy vhodné na motor přivést napětí co nejvyšší (i vyšší, než je jmenovité napětí motoru) a po dosažení požadované hodnoty proudu na cívce toto napětí snížit na normální hodnotu, aby nedošlo k přehřátí a tím ke zničení motoru. Proto se k řízení krokových motorů používají drivery, které fungují jako spínané zdroje a slouží k regulaci napětí a proudu. Drivery obsahují mimo jiné i proudové ochrany, aby motor nebyl zničen příliš vysokým proudem. Pomocí jednoduchého digitálního signálu lze řídit natočení a směr otáčení hřídele motoru – tzv. STEP (krok) a DIR (direction - směr) řízení. Drivery jsou schopny zajistit i dělení jednotlivých kroků, tzv. mikrokrokování, kterého je dosaženo vhodným poměrem napětí na sousedních fázích. Při mikrokrokování nejsou fáze spínané pouze střídavě jedna po druhé, ale mohou být sepnuty i současně a v různých poměrech.

Krokové motory robotu **AlcBot** jsou řízeny pomocí driveru Easy Driver s čipem A3967. Tento driver je určený k řízení dvoufázového bipolárního krokového motoru pomocí signálů STEP / DIR. DPS driveru obsahuje dva H-bridge, pro každou fázi je určený jeden. Tento driver umožňuje mikrokrokování velikosti až 1/8 kroku. Schéma připojení Arduina a krokového motoru k driveru je zobrazeno na Obrázku 5.9.



5.8 - Easy Driver

Piny *STEP* a *DIR* na driveru jsou propojeny s libovolnými digitálními piny na Arduino. Každá náběžná hrana signálu detekovaná na pinu *STEP* způsobí otáčku motoru o jeden krok. Mikrokrokování (plný krok, 1/2, 1/4 nebo 1/8 kroku) lze nastavit pomocí kombinace hodnot LOW a HIGH na pinech *MS1/MS2*. Směr otáčení motoru závisí na logické hodnotě signálu na pinu *DIR*. Hodnota LOW způsobí otáčení jedním směrem, hodnota HIGH otáčení druhým směrem. Před každým krokem driver detekuje hodnotu signálu na pinu *DIR*, otáčení rotoru je tedy možné měnit po každém kroku.



5.9 – Schéma připojení motoru a driveru k Arduino [22]

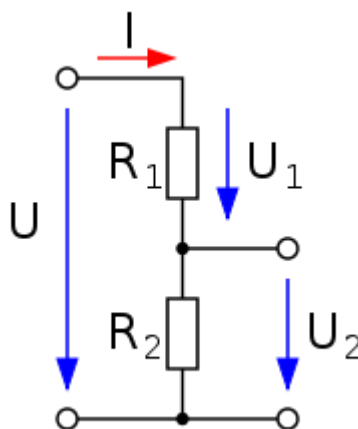
5.3 Senzorika

Senzorické vybavení robotů patří k finančně nejnákladnějším částem celého systému. Senzory obsahují citlivá čidla a miniaturní elektronické součástky, jejichž náročná výroba úměrně zvyšuje jejich cenu. V případě návrhu robotu **AlcBot** je cena hlavním parametrem, z toho důvodu robot téměř žádnou senzoriku neobsahuje. Jedinými snímači jsou indukční čidla pro nulování polohy všech os. Bez tohoto referenčního mechanismu by docházelo k narůstání chyb při ztrátě kroků krokových motorů. Robot před každým cyklem zreferuje polohu a pokud dojde ke ztrátě kroku, chyba polohy se bude vyskytovat pouze v aktuálním cyklu. Umístění indukčních čidel je popsáno dále v Kapitole 7.

Indukční čidla jsou napájena stejnosměrným napětím hodnoty 24 V. Při sepnutí se na jejich výstupu objeví logická 1 (odpovídající 24 V). Arduino má na pinech maximální napětí 5 V, vyšší napětí vede k jeho nevratnému poškození. Je tedy nutné vyrobit napěťový dělič, který výstupní napětí čidel sníží na hodnotu 5 V. Podle Obrázku 5.10 je napětí čidla $U = 24 \text{ V}$. Žádaná hodnota je $U_2 = 5 \text{ V}$. Je nutné vhodně zvolit hodnotu rezistorů R_1 a R_2 , podle vzorce

$$U_2 = U * \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (2)$$

Rezistor R_2 má zvolenou hodnotu 1000Ω . Dopočítaná hodnota rezistoru R_1 je poté 3900Ω . Praktická realizace napěťového děliče je popsána dále v Kapitole 7. Princip funkce napěťového děliče je na Obrázku 5.10.



5.10 - Schéma napěťového děliče [5]

5.4 Napájení

Arduino má vlastní síťový adaptér s hodnotou výstupního napětí 9 V . Drivery krokových motorů lze napájet napětím $6 - 30 \text{ V}$ [22]. Vyšší napájecí napětí produkuje vyšší krouticí moment motoru, nicméně drivery pak produkují značné množství tepla. Drivery jsou napájeny síťovým adaptérem $24 \text{ V} / 2,7 \text{ A}$. Ze stejného adaptéru vedou napájecí vývody pro indukční čidla.



5.11 - Síťový adaptér [23]

K řídicí elektronice robotu jsou tedy připojeny dva adaptéry – jeden pro Arduino a jeden pro ostatní periferie. Praktická realizace napájení je popsána v Kapitole 7 a blokové schéma elektrického zapojení je v Příloze 2.

6 VLASTNÍ KONSTRUKCE ROBOTU

Na následujících stránkách je podrobně vysvětlena konstrukce robotu **AlcBot**. Součástí kapitoly je množství obrazového materiálu a výpočty nutné pro správné dimenzování pohonů.

6.1 Materiály

V současné době se často diskutuje o možnostech použití 3D tisku při prototypové výrobě. 3D tisk je velice výhodný při výrobě malého počtu plastových součástí. Často je využíván pro výrobu různých přípravků a netypických součástí. Při výrobě plastových součástí se nejvíce využívá technologie vstřikování plastů, nicméně výroba lisovací formy pro vstřikování plastů je velice drahá (v řádech desetitisíců až statisíců Kč) takže se tato technologie vyplatí až pro velkosériovou výrobu. 3D tisk je levnou alternativou. Technologie 3D tisku spočívá ve vytlačování jednotlivých vrstev roztaveného plastu na pevnou podložku. Materiál ve formě struny (o průměru většinou 1,75 nebo 3 mm) se protlačuje skrz trysku, která strunu ohřívá na teplotu tavení. Natavený materiál je poté tryskou vytlačován ve formě linky na podložku. Výsledný objekt je vytvářen po jednotlivých vrstvách. 3D tiskárny mají pořizovací cenu v řádu tisíců až desetitisíců Kč a 1 kg materiálu stojí cca 500 Kč. V konstrukci robotu **AlcBot** zaujímají součásti vyrobené technologií 3D tisku značný podíl.

Preferovaným materiálem je v tomto případě PLA plast, který je biologicky odbouratelný, tedy ekologický. Složení PLA je na bázi rostlinného škrobu. Nevýhodou je teplotní nestabilita, materiál se při cca 60° C začíná deformovat a ztrácí své mechanické vlastnosti. Alternativou k PLA plastu je ABS plast, jehož složení je na bázi ropy. Jeho výhodou je vyšší teplotní odolnost a stabilita. Autorka této práce se rozhodla využít PLA právě z důvodu ekologičnosti. **AlcBot** pracuje v prostředí s pokojovou teplotou cca 20°, k teplotním deformacím by tedy nemělo docházet. Hlavním zdrojem vzniku tepla jsou motory a řídicí elektronika. Plastové součásti, které jsou v přímém styku s těmito komponentami by se mohly časem deformovat, proto je nutná jejich občasná vizuální kontrola během provozu robotu a případné nahrazení těchto součástí součástmi z jiného materiálu pokud bude docházet k závažným deformacím.

Kromě PLA plastu je robot vyroben převážně ze slitiny hliníku. Tento materiál je v konstrukci zastoupen v případě deskových součástí, které se vyrábějí pomocí technologie řezání laserem a v případě ložiskových domků, které si autorka práce vlastnoručně vyfrézovala. Výhodou hliníku oproti oceli je malá hmotnost a jednodušší obrábění. Nevýhodou je nižší pevnost a otěruvzdornost.

Dalšími materiály využitými v konstrukci jsou ocel (trapézové šrouby, ložiska, vodící tyče, atd.) a bronz (trapézová a drážková matice). Pro šroubové spoje se využívají šrouby s válcovou hlavou s vnitřním šestihranem dle normy DIN 912 (tzv. *imbus* šrouby). Montáž těchto šroubů je velice snadná a nedochází při ní ke stržení drážky, na rozdíl například od šroubů s křížovou drážkou, která má tendence se při neopatrné montáži ničit, což ztěžuje následnou demontáž.

6.1.1 Přesnost a vůle

V případě ozubených kol vytisknutých na 3D tiskárně je nutné se zamyslet nad otázkou přesnosti a vůlí. Přesnost výroby se u technologie 3D tisku špatně určuje. Polohování trysky 3D tiskárny má přesnost v řádech desítek mikrometrů, nicméně přesnost výsledné součásti je velice ovlivněna chováním nataveného materiálu. Vzhledem k hrubosti povrchu a teplotní nestabilitě materiálů (obzvláště ABS má tendence se chladnutím smršťovat) je těžké dopředu určit celkovou výslednou přesnost – vždy záleží na tvaru výsledné součásti a na parametrech tisku. V případě výroby ozubených kol se tyto nežádoucí vlastnosti materiálu promítnou v podobě vůle v ozubení. Vůle v ozubení je velkým problémem u univerzálních robotů a strojů obecně, neboť tyto stroje nemají definovaný pracovní cyklus a vůle v ozubení způsobí hysterezi polohování v případě reverzace směru otáčení ozubených kol. Tato hystereze následně zanechá nepřesnost do polohování. V případě robotu **AlcBot** nicméně tato vůle v ozubení nezpůsobí problémy, neboť pracovní cyklus je definovaný a neměnný. V případě, že bude tato hystereze softwarově kompenzována (je zahrnuta během programování pracovního cyklu), nebude způsobovat problémy při polohování koncového efektoru.

V případě trapézového šroubu a matice vzniká totožný problém. Pro univerzální stroje a roboty je nutné matici pohybového šroubu libovolným způsobem předepnout. V praxi se používá předepnutí pomocí distanční podložky, difference ve stoupání závitu matice, zvolením vhodné velikosti kuliček, atd. V případě robotu **AlcBot** je pro osu Z zajištěno předepnutí matice pomocí vlastní váhy přesouvaných součástí. Matice vždy dosedá na stejnou plochu závitu šroubu. V případě osy X toto předepnutí zajištěno není, hystereze vzniklá vůli mezi maticí a šroubem je opět softwarově kompenzována pomocí pevného pracovního cyklu, ve kterém je tato hystereze již zahrnuta.

Dalším problémem, který je nutné řešit, je tzv. ztráta kroků krokových motorů. Krokové motory lze řídit i bez zpětné vazby, pokud jsou dodrženy podmínky, že motor nebude momentově přetížen a nedojde k výpadku napájení. Při splnění těchto podmínek lze uvažovat, že se rotor nachází v předpokládané poloze a není nutné polohu kontrolovat zpětnou vazbou. Zpětná vazba polohy bývá řešena nejčastěji pomocí optických inkrementálních enkodérů. Tyto součásti jsou však poměrně drahé (v řádech tisíců až desetitisíců Kč), pro konstrukci robotu **AlcBot** tedy nejsou využity. Pokud však je motor přetížen nebo dojde k výpadku proudu, nastane ztráta kroku. Ztráta kroku probíhá takto:

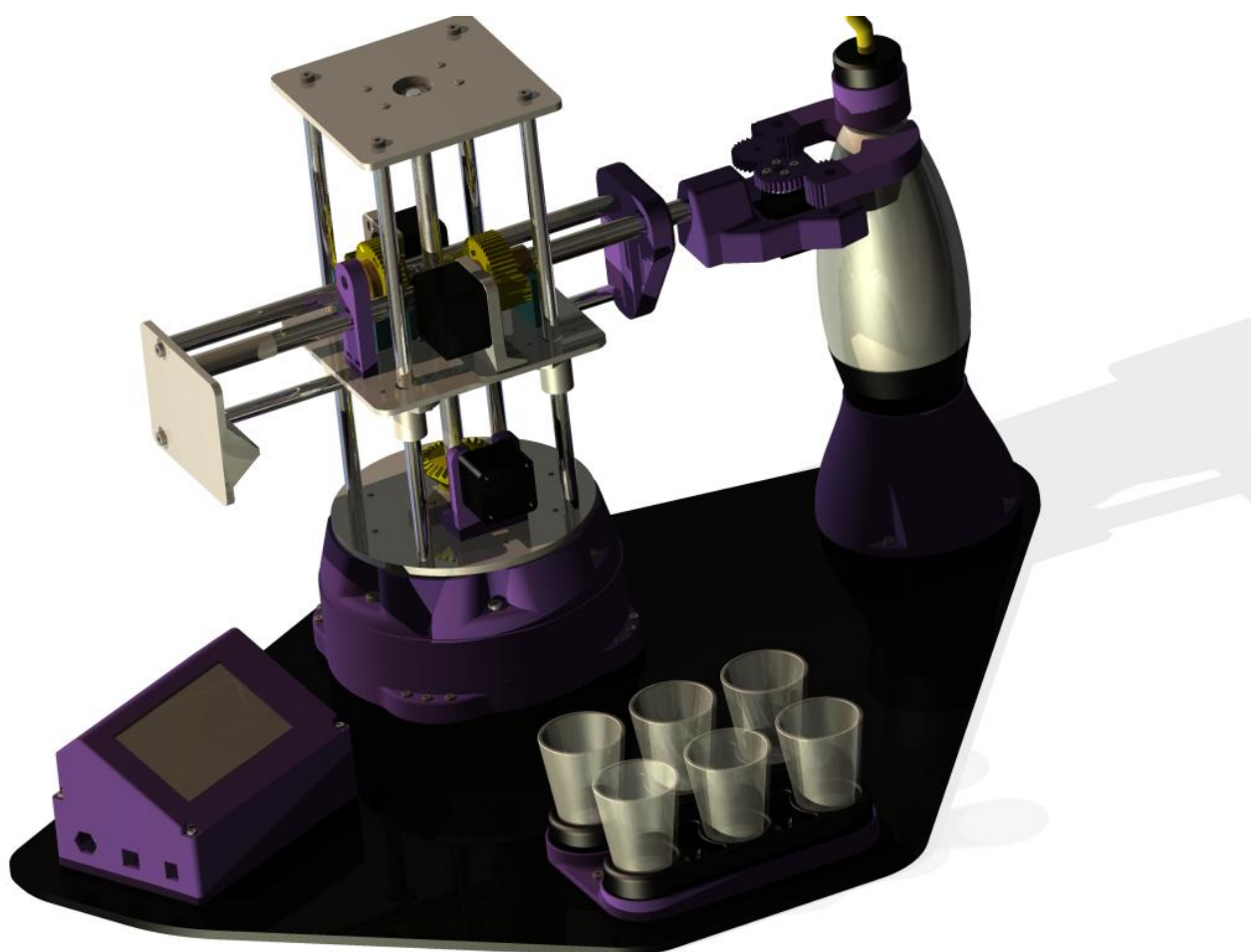
Sousední fáze statoru krokového motoru jsou postupně sepnuty a rotor by se měl pootočit o jeden krok, nicméně pokud je momentová zátěž na hřídeli rotoru příliš velká, nedojde k pootočení, neboť zátěžný moment má větší hodnotu než moment motoru. V případě, že je součástí motoru zpětnovazební smyčka, je tato chyba vyhodnocena a následně korigována. Pokud však zpětná vazba chybí, rotor na konci cyklu nedosáhne žádané polohy (natočení), ale tato poloha je změněna o chybějící počet kroků, které se vykonaly „naprázdno“ bez skutečného pootočení hřídele rotoru. Laicky řečeno, „motor si myslí, že je jinde, než je ve skutečnosti“.

Se vzrůstajícím počtem cyklů může tato chyba narůstat. Tomu je v případě robotu **AlcBot** zabráněno použitím indukčního čidla pro určení referenční *HOME* pozice každé osy. K referování polohy dojde před každým automatickým cyklem a v případě, že dojde v průběhu cyklu u krokového motoru ke ztrátě kroku, nebude tato chyba se vzrůstajícím

počtem cyklů narůstat. Na ovládacím panelu je umístěno *HOME* tlačítko, takže je možné osy zreferovat kdykoliv.

6.2 Robot a okolí

Pracovní cyklus – rozlévání nápojů z lahve – vyžaduje k úspěšnému splnění jak samotný robot, tak i jeho periferie. Součástí robotu je i koncový efektor pro uchopení lahve, jehož konstrukce je provedena nad rámec zadání diplomové práce. Robot je přišroubován k základní desce, která je vyfrézovaná z 6 mm plastu. K základní desce je přišroubován i podstavec lahve. Základní deska zajišťuje umístění lahve v definovaných prostorových souřadnicích vůči poloze robotu. K desce je připojena i stanice určená pro uložení 6-ti ks sklenic, které jsou takto umístěny také v definovaných prostorových souřadnicích. Díky tomu je pracovní cyklus robotu neměnný a odpadá zde požadavek přítomnosti komplikované senzoriky určené k detekci polohy lahve a sklenic. K základní desce je připojena i ovládací stanice s tlačítkovou klávesnicí, ve které je umístěna kompletní řídicí elektronika. Konkrétní řešení je dále rozebráno v Kapitole 7. Na Obrázku 6.1 je zobrazeno celé robotizované pracoviště včetně periferií.



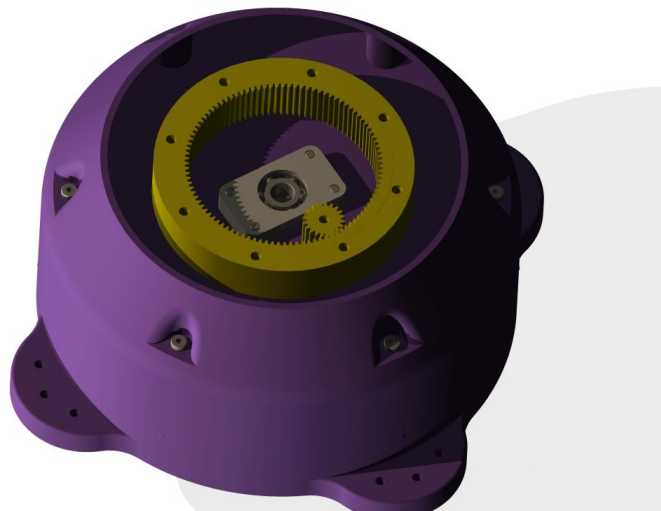
6.1 - Robotizované pracoviště

6.3 Osa C

Hlavním prvkem osy C je 5 mm tlustá deska z hliníkové slitiny s čepem umístěným v její ose. Čep je uložen ve dvou kuličkových ložiskách – radiálně-axiálním a radiálním a zajištěn pomocí pojistného kroužku. Ložiska jsou uložena v ložiskových domcích, které jsou vyfrézované z hliníkové slitiny. Rotační pohyb je vyvozován pomocí krokového motoru s pastorkem umístěným na hřídeli rotoru. Pastorek je v záběru s ozubeným kolem s vnitřním ozubením, které je přišroubováno k hliníkové desce. Dochází zde k rotačnímu pohybu hliníkové desky vůči základně robotu.

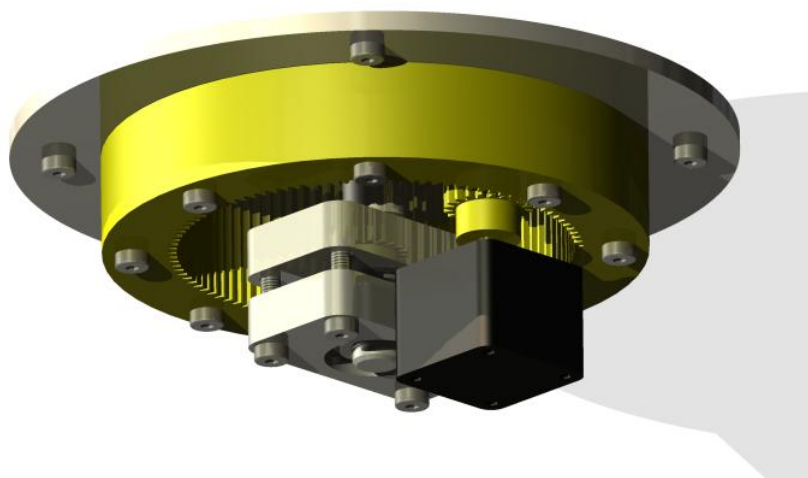


6.2 - Pohled na C osu



6.3 - Pohled dovnitř osy C

Základna, na obrázku fialovou barvou, je vyrobena z PLA plastu a je složená ze dvou částí. Pastorek a ozubené kolo jsou také vyrobeny z PLA plastu. Pastorek je k hřídeli motoru uchycen pomocí dvou stavěcích šroubů (tzv. „červíků“). Pomocí těchto šroubů dochází k přenosu krouticího momentu z hřídele motoru na pastorek.



6.4 - Detail mechanismu C osy

Pro pohon osy C je využit motor s přírubou NEMA14. Parametry motoru jsou vypsány na Obrázku 6.6.



Stepper Motor: Bipolar, 200 Steps/Rev, 35x36mm, 2.7V, 1 A/Phase
 Krokový motor NEMA14
 Bipolární, 4-drátový
 Napětí 2.7V
 Odpor vinutí 2.7 Ohm
 Proud fáze 1A
 200 celokroků na otáčku
 Krouticí moment 0.14 Nm (při nízkých otáčkách)
 Hřídel 5mm

6.5 - Krokový motor osy C [17]

6.6 - Parametry krokového motoru osy C [17]

Potřebný krouticí moment je vypočten dle následujících vztahů podle [24 str. 257]. Výpočet je prováděn ze statického a dynamického hlediska. Výpočet motoru ze statického hlediska zahrnuje pouze síly, které je třeba při pohybu překonat. Vypočtený moment je tedy nejnižší možný (pokud by byl menší, tak by odporové síly zabránily pohybu) a nezahrnuje zrychlení, kterého je třeba dosáhnout. I přes vypočtené hodnoty je vhodné motor dostatečně předdimenzovat. Cena krokových motorů se pro danou velikost příruby NEMA 14, resp. NEMA 17, s vyšším krouticím momentem příliš nemění, jedná se řádově o desítky korun. Je tedy vhodnější zvolit motor s co nejvyšším momentem pro danou velikost příruby.

Dynamické hledisko zahrnuje již potřebné zrychlení a momenty setrvačnosti. Pro osu C je rozsah pohybu přibližně 90° a potřebný čas pootočení o tento úhel je 2 s. Čas pootočení je voleným parametrem a je v případě potřeby možné ho upravit. Je však potřeba jeho hodnotu udržovat v rozumných mezích, aby celý cyklus netrval nevhodně dlouhou dobu.

Statické hledisko

Nejprve je spočítána celková účinnost, ve které jsou zahrnuty účinnosti převodů a valivých vedení

$$\eta_c = \eta_p * \eta_v = 0,96 * 0,98 = 0,94 [-] \quad (3)$$

Hodnota momentu motoru ze statického hlediska se pak spočítá jako

$$M_{ksc} = \frac{F_t * r}{i * \eta_c} = \frac{m * g * f * r}{i * \eta_c} = \frac{8,5 [kg] * 9,81 [m.s^{-2}] * 0,002 [-] * 10 [mm]}{5 [-] * 0,94 [-]} = 0,003 [N.m] \quad (4)$$

Moment ze statického hlediska vychází velice malý, neboť kuličková ložiska mají nízké tření, které navíc vzniká na malém poloměru.

Dynamické hledisko

Při výpočtu z dynamického hlediska je nutné zjistit úhlovou rychlost, resp. otáčky krokového motoru příslušné pohybové osy robotu. Pootočení ramena o 90° má být vykonáno za 2 s, tedy 1 ot/ 8 s. Převrácená hodnota je poté 0,125 ot/s.

$$\omega_D = 2 * \pi * n = 2 * \pi * 0,125 [s^{-1}] = 0,78 [rad. s^{-1}] \quad (5)$$

$$\varepsilon_D = \frac{\omega_D}{t_R} = \frac{0,78 [rad. s^{-1}]}{1 [s]} = 0,78 [rad. s^{-2}] \quad (6)$$

$$\varepsilon_M = \varepsilon_D * i = 0,78 [rad. s^{-2}] * 5 [-] = 3,9 [rad. s^{-2}] \quad (7)$$

Dále je třeba vypočítat moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru (hodnota momentu setrvačnosti J je získána ze software Autodesk Inventor, v kterém je robot modelován) a zátěžný moment redukováný na hřídel motoru, který má v tomto případě shodný vzorec se statickým krouticím momentem.

$$J_{red} = \frac{J}{i^2} = \frac{0,082 [kg. m^2]}{5^2 [-]} = 0,004 [kg. m^2] \quad (8)$$

$$M_{zred} = \frac{m * g * r * f}{i * \eta_c} = M_{Mc} = 0,003 [N. m] \quad (9)$$

$$M_{kdc} = J_{red} * \varepsilon_M + M_{zred} = 0,004 [kg. m^2] * 3,9 [rad. s^{-2}] + 0,003 [N. m] = 0,02 [N. m] \quad (10)$$

Požadovaný moment motoru je 0,02 N.m, skutečný moment motoru je 0,14 N.m. Krokový motor je tedy předdimenzován, což není na závadu, bezpečnost je v tomto případě dostatečně vysoká. Pro zvýšení bezpečnosti je možné prodloužit dobu pohybu, tedy snížit rychlost. Pokud jsou však otáčky krokového motoru příliš pomalé, dochází k trhavým pohybům. Dalším řešením by bylo zvětšit převod, tedy zmenšit počet zubů pastorku nebo zvětšit počet zubů vnějšího ozubeného kola. Toto řešení by však zasáhlo do vlastní konstrukce, neboť by bylo potřeba změnit rozteč montážních děr na desce a tedy vyrobit novou desku s čepem. Toto řešení není příliš efektivní, vhodnější by tedy bylo prodloužit dobu pohybu případně vyměnit aktuální krokový motor za silnější.

6.4 Z osa

Jak již bylo zmíněno, osa Z se realizuje pomocí trapézového šroubu s maticí. Šroub je uložen v obou koncích v radiálně-axiálních kuličkových ložiskách s kosoúhlým stykem pro zachytávání axiálních sil. Přenos krouticího momentu z motoru na šroub je realizován pomocí dvou kuželových ozubených kol z PLA plastu, vytisknutých na 3D tiskárně. Jedno kolo je pomocí dvou stavěcích šroubů po obvodu uchyceno k obrobenému konci trapézového šroubu. Kolo slouží zároveň jako distance mezi osazením šroubu a ložiskem. Druhé ozubené kolo je pomocí dvou stavěcích šroubů uchyceno k hřídeli motoru. Stavěcí šrouby zajišťují přenos krouticího momentu z hřídele motoru na první ozubené kolo a z druhého ozubeného kola na šroub.



6.7 - Pohled na Z osu

K trapézové matici, která vykonává translační pohyb, je uchyceno patro z hliníkové slitiny. Na tomto patře jsou umístěny součásti nezbytné pro realizaci osy X a naklápěcího pohybu – osy A. K patru jsou pomocí šroubů uchyceny čtyři valivá pouzdra. Valivá vedení zachycují nežádoucí klopné momenty, které se tak nepřenáší na trapézový šroub s maticí.

Motor, který pohání osu Z je velikosti NEMA14. Parametry motoru jsou zobrazeny na Obrázku 6.9. Potřebný krouticí moment motoru je vypočten dle následujících vztahů [24 str. 220]. Voleným parametrem je posuvová rychlost 0,01 m/s. (Pro lepší představu reálného posuvu odpovídá 1 cm/s.)



Stepper Motor: Bipolar, 200 Steps/Rev, 35x36mm, 2.7V, 1 A/Phase
Krokový motor NEMA14
Bipolární, 4-drátový
Napětí 2.7V
Odpor vinutí 2.7 Ohm
Proud fáze 1A
200 celokroků na otáčku
Krouticí moment 0.14 Nm (při nízkých otáčkách)
Hřídel 5mm

6.8 - Krokový motor osy Z [17]

6.9 - Parametry krokového motoru osy Z [17]

Statické hledisko

Nejdříve je spočítána celková účinnost pohybového mechanismu

$$\eta_c = \eta_v * \eta_s * \eta_L * \eta_p = 0,98 * 0,4 * 0,97^2 * 0,96 = 0,34 [-] \quad (11)$$

Následně je vypočten potřebný krouticí moment motoru

$$M_{ksz} = \frac{m * g * p}{2 * \pi * i * \eta_c} = \frac{6 [kg] * 9,81 [m.s^{-2}] * 3 [mm]}{2 * \pi * 4 [-] * 0,34 [-]} = 0,01 [N.m] \quad (12)$$

Dynamické hledisko

Nejdříve se spočítá lineární zrychlení,

$$a = \frac{v}{t_r} = \frac{0,01 [m.s^{-1}]}{1 [s]} = 0,01 [m.s^{-2}] \quad (13)$$

z kterého se dále počítá zrychlení úhlové pomocí vztahu

$$\varepsilon_s = \frac{a * 2 * \pi}{p} = 0,02 [rad.s^{-2}] \quad (14)$$

$$\varepsilon_M = \varepsilon_s * i = 0,02 [rad.s^{-2}] * 4 [-] = 0,08 [rad.s^{-2}] \quad (15)$$

Redukovaný moment setrvačnosti vychází velice malý, a proto jej lze zanedbat.

$$J_{red} = \frac{m * \left(\frac{p}{2 * \pi}\right)^2}{i^2} = \frac{6 [kg] * \left(\frac{3 [mm]}{2 * \pi}\right)^2}{4^2 [-]} = 0,54 * 10^{-6} \cong 0 \quad (16)$$

Krouticí moment motoru tedy musí být větší než zátěžný moment redukováný na hřídel motoru. Zátěžný moment M_{zred} počítá i se souřadnicí b působíště gravitační síly. Zde uvažujeme vyložení 150 mm od středu trapézového šroubu.

$$M_{zred} = \frac{3 * m * g * b * f * p}{2 * \pi * i * \eta_c} =$$

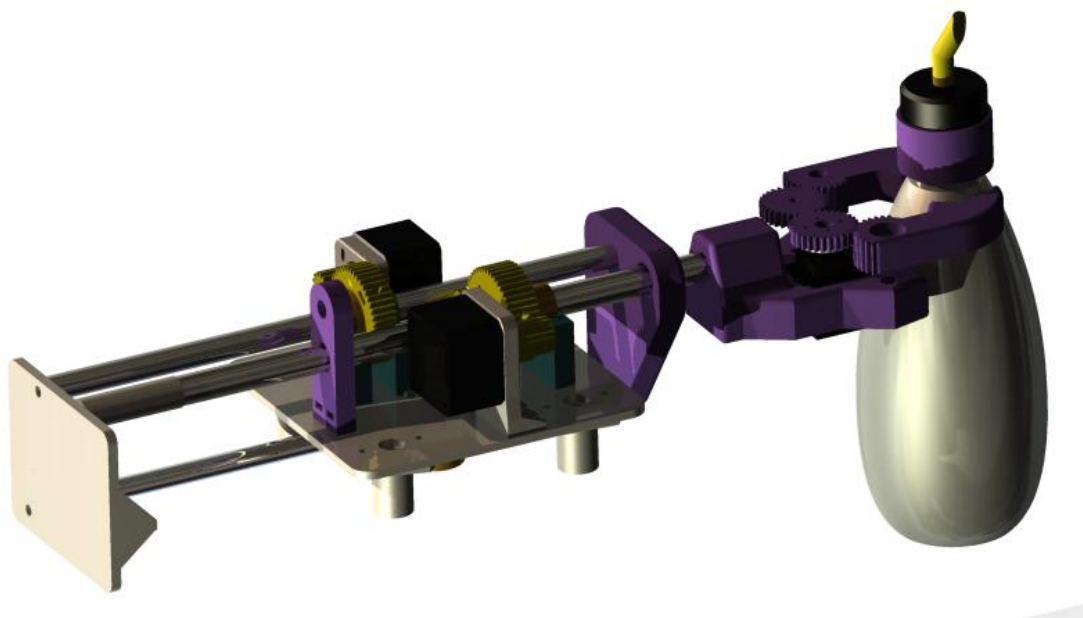
$$= \frac{3 * 6 [kg] * 9,81 [m.s^{-2}] * 0,15 [m] * 0,16 [-] * 3 [mm]}{2 * \pi * 4 [-] * 0,34 [-]} = 0,001 [N.m] \quad (17)$$

$$M_{kdZ} = J_{red} * \varepsilon_M + M_{zred} \cong 0 + 0,001 [N.m] = 0,001 [N.m] \quad (18)$$

Jelikož z dynamického hlediska vycházejí velice malé hodnoty pro krouticí moment motoru, je vhodnější se řídit statickým hlediskem. Je to pochopitelné, neboť u trapézového šroubu je třeba překonat především pasivní odpory a tření, aby se mechanismus dal do pohybu. Moment setrvačnosti i zátěžný moment redukováný na hřídel motoru vycházejí ve velmi malých číslech, což je dáno jednotkami milimetrů a malou hmotností přesouvaných hmot.

6.5 X osa

X osa je, stejně jako osa Z, realizovaná pomocí trapézového šroubu s maticí. Jako vedení slouží jedno valivé vedení a drážkovaná hřídel s bronzovou maticí. Tato hřídel slouží nejenom jako vedení, ale navíc realizuje naklápění pro lahev – osu A. Na trapézovou i drážkovanou matici jsou pomocí stavěcích šroubů uchyceny ozubená kola s čelním ozubením, vytisknutá na 3D tiskárně. Obě osy jsou poháněny krokovými motory s pastorky.



6.10 - Pohled na X osu

Výpočet osy X probíhá obdobně jako u osy Z, jen se zde mění směr působení gravitace. Motor pohánějící osu X je velikosti NEMA14. Motor má krouticí moment 0,1 N.m. Parametry motoru jsou zobrazeny níže. Posuvová rychlost je zvolena 0,01 m/s (odpovídá posunu 1 cm za sekundu).



Stepper Motor: Bipolar, 200 Steps/Rev, 35x28mm, 10V, 0.5 A/Phase
Krokový motor NEMA14
Bipolární, 4-drátový
Napětí 10V
Odpor vinutí 20 Ohm
Proud fáze 0.5A
200 celokroků na otáčku
Krouticí moment 0.099 Nm (při nízkých otáčkách)
Hřídel 5mm

6.11 - Krokový motor osy X [17]

6.12 - Parametry krokového motoru osy X [17]

Statické hledisko

Nejdříve je spočítána celková účinnost pohybového mechanismu

$$\eta_c = \eta_v * \eta_s * \eta_L * \eta_p = 0,8 * 0,4 * 0,6 * 0,96 = 0,2 [-] \quad (19)$$

Následně je vypočten potřebný krouticí moment motoru

$$M_{ksX} = \frac{m * g * f * p}{2 * \pi * i * \eta_c} = \frac{3 [kg] * 9,81 [m.s^{-2}] * 0,16 * 3 [mm]}{2 * \pi * 4 [-] * 0,2 [-]} = 0,01 [N.m] \quad (20)$$

Dynamické hledisko

Nejdříve se spočítá lineární zrychlení,

$$a = \frac{v}{t_r} = \frac{0,01 [m.s^{-1}]}{1 [s]} = 0,01 [m.s^{-2}] \quad (21)$$

z kterého se dále počítá zrychlení úhlové pomocí vztahu

$$\varepsilon_s = \frac{a * 2 * \pi}{p} = 0,02 [rad.s^{-2}] \quad (22)$$

$$\varepsilon_M = \varepsilon_s * i = 0,02 [rad.s^{-2}] * 4 [-] = 0,08 [rad.s^{-2}] \quad (23)$$

Redukovaný moment setrvačnosti vychází velice malý, a proto jej lze zanedbat.

$$J_{red} = \frac{m * \left(\frac{p}{2 * \pi}\right)^2}{i^2} = \frac{3 [kg] * \left(\frac{3 [mm]}{2 * \pi}\right)^2}{4^2 [-]} = 0,27 * 10^{-6} \cong 0 \quad (24)$$

Krouticí moment motoru musí být větší než zátěžný moment redukováný na hřídel motoru.

$$M_{zred} = \frac{m * g * f * p}{2 * \pi * i * \eta_c} = \frac{3 [kg] * 9,81 [m.s^{-2}] * 0,16 [-] * 3 [mm]}{2 * \pi * 4 [-] * 0,2 [-]} = 0,002 [N.m] \quad (25)$$

$$M_{kdx} = J_{red} * \varepsilon_M + M_{zred} \cong 0 + 0,002 [N.m] = 0,002 [N.m] \quad (26)$$

Podobně jako u osy Z, je vhodnější řídit se výpočtem ze statického hlediska. Pohybový mechanismus s trapézovým šroubem musí překonat na začátku pohybu pasivní odpory způsobené třením. Po rozběhu již moment zátěže je téměř nulový.

Dalším nezbytným výpočtem je výpočet naklápění lahve – osy A. Naklápění je realizováno pomocí drážkové hřídele, drážky přenáší krouticí moment od motoru přes matici na hřídel. Hřídel je v matici možno posouvat. Parametry motoru jsou uvedeny níže.



Krokový motor NEMA17, SX17-1003LQEF
Bipolární, 4-drátový
Napětí 4.4V
Odpor vinutí 4.4 Ohm
Proud fáze 1A
200 celokroků na otáčku
Krouticí moment 0.3 Nm (při nízkých otáčkách)
Hřídel 5mm

6.13 - Krokový motor osy A [17]

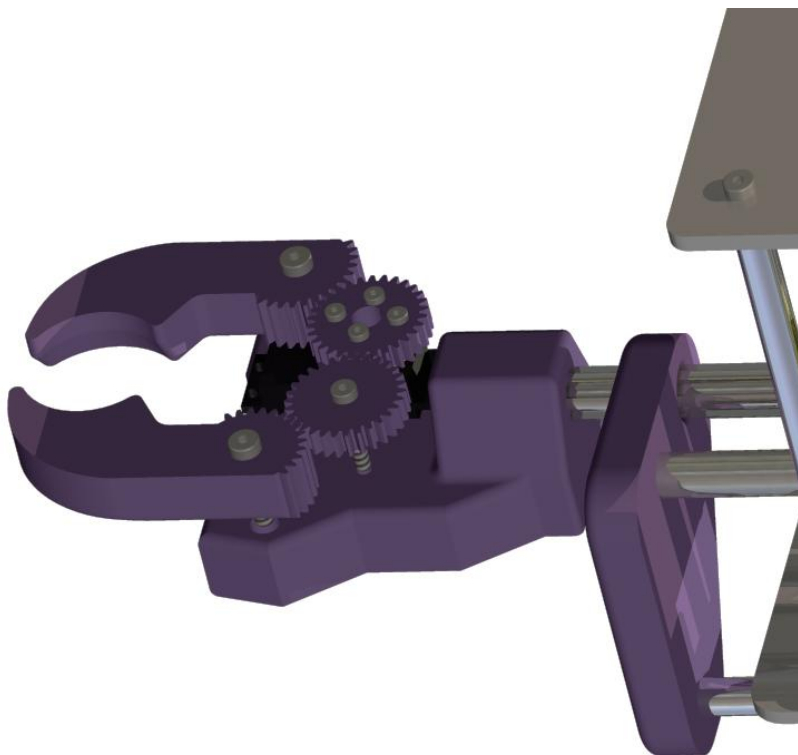
6.14 - Parametry krokového motoru osy A [17]

$$M_{ksA} = \frac{m * g * r}{2 * \pi * i * \eta_c} = \frac{1 [kg] * 9,81 [m.s^{-2}] * 120 [mm]}{2 * \pi * 4 [-] * 0,2 [-]} = 0,23 [N.m] \quad (27)$$

Motor osy A je nejsilnější neboť překonává největší zátěžný moment. Naklápění kapaliny působí na poměrně velké páce. Bezpečnost zde není příliš vysoká, a jestli se v praxi ukáže, že motor je příliš slabý, bude vhodné jej vyměnit za silnější, případně zvýšit převod.

6.6 Koncový efektor

Koncový efektor je tvořen dvěma uchopovacími prsty s gumovou páskou, která zajišťuje větší tření. Úchop lahve probíhá u jejího hrdla, které je nejvhodnějším místem pro uchopení z tvarového hlediska. Prsty jsou umístěny v ocelových čepech a jejich součástí je ložisko, které zajišťuje plynulé otáčení. Základem efektoru je deska s tvarovým otvorem, do kterého je zasunuta a přišroubována drážková hřídel. Efektor se otáčí spolu s drážkovou hřídelí.



6.15 - Koncový efektor

6.7 Výpočet ozubení

PLA materiál má definované určité mechanické, fyzikální a chemické vlastnosti. Nicméně technologie 3D tisku tyto vlastnosti mění, neboť dochází k lepení jednotlivých vláken na sebe při nepříliš vysoké teplotě a tlaku (tryska má teplotu cca 200°C, po vytlačení materiál rychle chladne). Spojení jednotlivých vrstev a vláken k sobě není příliš pevné – ve srovnání s tlakovým vstřikováním. Výpočty je nutné brát pouze jako informativní a nespolehat se na ně. Pokud by existoval požadavek na vysokou spolehlivost a bezpečnost, bylo by vhodné součásti vyrobit jinou technologií (například vstřikováním plastu do formy). PLA plast je také náchylný na okolní vlhkost, pokud je uchováván ve vlhkém prostředí, dochází za studena k rozpadu polymerních řetězců a zhoršování jeho vlastností. [25] Vybrané mechanické vlastnosti PLA jsou uvedeny v Tabulce 1.

Tabulka 1 – Vybrané mechanické vlastnosti PLA

Mechanické vlastnosti PLA	
Mez kluzu σ_E [MPa]	53
Tažnost [%]	10-100
Modul pružnosti E [GPa]	3,5-4,5
Poissonovo číslo μ [-]	0,3

V Tabulce 2 je uveden přehled parametrů všech ozubených kol. **AlcBot** obsahuje celkem 4 ozubené převody, jeden pro každou osu. Převod osy C je složen z pastorku a ozubeného věnce s vnitřním ozubením. Osa Z je převodována pomocí kuželových kol s šikmým ozubením. Pro výpočty z důvodu zjednodušení uvažujeme ozubení přímé. Osy X a A obsahují převody pomocí čelních ozubených kol. Výpočty jsou prováděny dle [26].

Tabulka 2 - Vybrané charakteristiky ozubených kol

Kolo	Modul m_o [mm]	Počet zubů z [-]	Průměr d [mm]	Úhel profilu α [-]		Šířka ozubení b [mm]	Lewisův součinitel tvaru Y [-]
GearC1	1	19	19	20°		25	0,314
GearC2	1	95	95	20°		25	0,447
GearZ1	1,5	15	22,5	20°	$\beta = 10^\circ$	7,2	0,290
GearZ2	1,5	30	45	20°	$\beta = 10^\circ$	7,2	0,359
GearX1	1	15	15	20°		12	0,290
GearX2	1	45	45	20°		12	0,397
GearA1	1	15	15	20°		15	0,290
GearA2	1	45	45	20°		15	0,397

6.7.1 Výpočet napětí v ohybu v patě zubu

Nejdříve je nutné spočítat tangenciální složku síly působící na kolo F_T

$$F_T = \frac{2M_k}{d} \quad (28)$$

V Tabulce 3 jsou uvedeny zadané krouticí momenty a vypočtené tangenciální složky síly.

Tabulka 3 - Krouticí momenty a složky síly pro jednotlivé osy

Osa	Krouticí moment M_K [N.m]	Tangenciální složka síly F_T [N]
C	0,14	14,7
Z	0,3	26,7
X	0,1	13,3
A	0,1	13,3

Dále je třeba znát Lewisův součinitel tvaru Y , pro jednotlivá kola je tento parametr uveden v Tabulce 2. [26 str. 783] Napětí v ohybu v patě zubu se pak spočítá

$$\sigma_F = \frac{F_T}{bmY} \quad (29)$$

Výsledná napětí pro jednotlivé osy jsou zaneseny v Tabulce 4.

6.7.2 Výpočet napětí v dotyku

Napětí v dotyku je také označováno jako Hertzovo kontaktní napětí. Ve styku ozubených kol vzniká trojosá napjatost a za napětí v dotyku σ_H se považuje maximální hodnota napětí σ_z . [26 str. 788] Pro Hertzovo kontaktní napětí platí

$$\sigma_H = \sqrt{\frac{F}{\pi b} \frac{\frac{1}{\rho_1} + \frac{1}{\rho_2}}{\frac{1 - \mu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \mu_2^2}{E_2}}} \quad (30)$$

Pro sílu F platí

$$F = \frac{F_T}{\cos \alpha} \quad (31)$$

Poloměr křivosti evolventy ρ se spočítá

$$\rho = \frac{d \sin \alpha}{2} \quad (32)$$

Poissonovo číslo μ a modul pružnosti E jsou uvedeny v Tabulce 1. Výsledné Hertzovo kontaktní napětí je uvedeno v Tabulce 4.

Tabulka 4 - Výsledná napětí

Kolo	Napětí v ohybu v patě zubu σ_F [MPa]	Napětí v dotyku σ_H [MPa]
GearC1	1,87	12,7
GearC2	1,31	12,7
GearZ1	8,52	32,8
GearZ2	6,89	32,8
GearX1	3,82	20,1
GearX2	2,79	20,1
GearA1	3,06	17,9
GearA2	2,23	17,9

Z tabulky lze vyčíst, že vypočtená napětí v ohybu v patě zubu jsou řádově menší než mez kluzu a koeficient bezpečnosti se pohybuje v rozmezí 6-40. Nejkritičtější hodnoty jsou u ozubených kol osy Z. Napětí v dotyku je řádově vyšší, stále však koeficient bezpečnosti má hodnotu alespoň 1,5.

Pro ozubená kola osy Z jsou hodnoty bezpečnosti malé z důvodu malé šířky zubu, což je dáno tvarem ozubených kol. Je žádoucí, aby ozubená kola osy Z byla častěji vizuálně kontrolována, zda nedochází k vylamování vrstev. Pokud by došlo k vylamování, bylo by vhodné tvar ozubených kol upravit, aby šířka zubu byla větší. Jak již bylo zmíněno na začátku výpočtové kapitoly, materiálové konstanty jsou sice definované pro PLA plast, nebere se však v potaz technologie výroby (3D tisk), která bude mít podstatný vliv na chování materiálu. Nejlepší metodou ověření koeficientu bezpečnosti by byla praktická zkouška zatěžování ozubení, při které by došlo k experimentálnímu zjištění pevnosti ozubených kol. Taková zkouška je však mimo možnosti autorky práce.

7 PRAKTICKÁ REALIZACE

V této kapitole se nachází obrazová dokumentace realizace stavby robotu s komentáři k skutečně provedeným pracím. Obrázky jsou řazeny chronologicky, postupně jak robot vznikal. Při praktické realizaci docházelo k řadě problémů, které jsou v této kapitole popsány. Tyto problémy vycházejí především z faktu, že se jedná o prototypovou výrobu. Výrobek samotný je tedy jakýmsi testovacím kusem, na kterém by se při sériové výrobě odhalily nedostatky. Jelikož se však sériová výroba neuvažuje, chyby je nutné řešit během realizace. Dalším důvodem vzniku problémů je jistý nedostatek zkušeností autorky práce v oboru stavby robotů. Problémy jsou nepříjemnou součástí každého projektu, nicméně vyřešený problém znamená novou zkušenost a je tedy ve výsledku přínosem.

Komentáře k jednotlivým krokům jsou psány pomocí první osoby, především proto, aby se příliš často neopakovalo slovní spojení *autorka práce*. Dalším důvodem je snaha o přímé předání zkušenosti čtenáři a vtažení čtenáře do náročného a bezesporu zajímavého procesu stavby robotu.



7.1 - Stavba osy C



7.2 - Hotová osa C

Na Obrázku 7.1 je zobrazen první krok stavby robotu. Podle 3D počítačového modelu jsem vytiskla základnu robotu z fialového PLA plastu. Dále jsem vytiskla ozubená kola a nechala si vypálit hliníkovou desku C osy. Na tuto desku jsem nechala přivařit čep.

Problém č. 1: hliníkový čep není navařený zcela kolmo

Důsledek: při rotačním pohybu dochází k házení a naklápění

Řešení: vzhledem k malému rozsahu pohybu v ose C (cca 90°) není problém příliš závažný, deska s čepem se tedy nevyrábí znovu

Dalším problémem je omezený rozsah tiskové plochy na 3D tiskárně. Tisková plocha je omezena prostorem velikosti 200x200x200 mm. V některých místech půdorys základny tyto rozměry překračuje, dolní část základny bylo nutné rozdělit na 2 části a tisknout je zvlášť. Vzhledem k lehce nepředvídatelnému chování roztaveného plastu zde vznikly drobné odchylky ve výšce jednotlivých částí základny. Tyto odchylky jsou velikosti cca 0,5 mm a vykompenzovaly se sešroubováním základny.

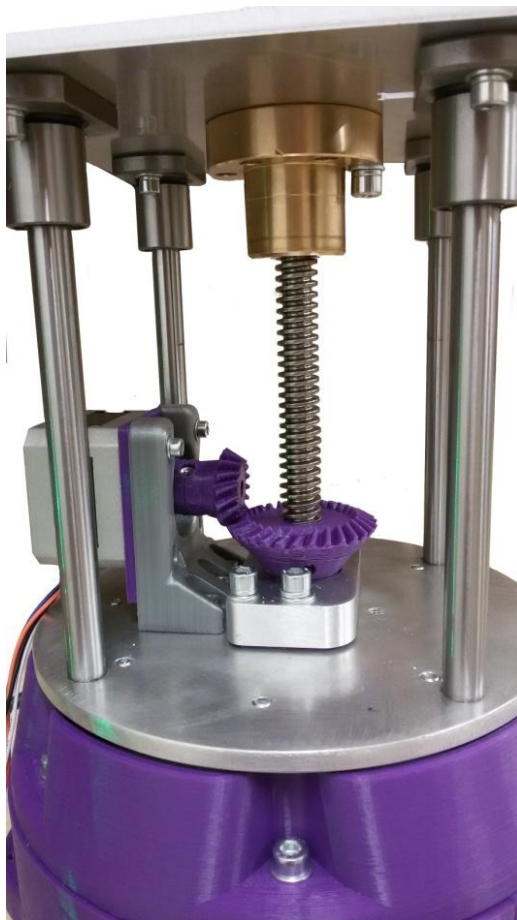
Při testovacím provozu jsem si všimla, že házení, způsobené odchylkou kolmosti čepu od desky, se zhoršuje. Po rozebrání osy C jsem zjistila, že je to způsobené zvlněním materiálu v místě uchycení motoru k plastové desce. Motor se při provozu zahřívá a PLA materiál při

cca 60° ztrácí své mechanické vlastnosti a začíná se deformovat. Přílišné přehřátí bylo způsobeno větším odběrem proudu (motor má jmenovitý proud 0,5 A / fáze, driver defaultně napájí proudem 0,75 A / fázi). Tohoto faktu jsem si všimla až v momentě, kdy se motor znatelně přehříval. Snížila jsem tedy výstupní proud driveru a motor se již tolik nepřehřívá.

Problém č. 2: motor se přehřívá a materiál se teplem deformuje

Důsledek: mimoběžnost os ozubených kol, nerovnoměrné zabírání zubů, házení

Řešení: umístění hliníkové desky mezi desku základny a motor, která rovnoměrně odvede teplo a plast se nebude deformovat v místě šroubového spoje; výroba nové základny; dodržování jmenovitého proudu motoru



7.3 - Realizace osy Z

Z 12 mm hliníkové desky jsem si vyfrézovala ložiskový domek, do kterého jsem umístila ložisko a celou sestavu přišroubovala k hliníkové desce C osy. Do ložiska jsem následně vsadila opracovaný trapézový šroub s upnutým ozubeným kolem. Na 3D tiskárně jsem si vytiskla ozubená kola s šikmým ozubením, jejichž výroba z oceli je poměrně složitá a nákladná. Cena vytisknutého ozubeného kola se pohybuje řádově v desítkách korun. Nevýhodou je nízká pevnost a sklony k vylamování zubů. Výhodou je velice malá hmotnost, možnost rychlé náhrady a úpravy jednotlivých dílů. Během tisku ozubených kol jsem narazila na řadu úskalí. 3D tisk je technologie, kterou lze přirovnat k moderní alchymii – je nutné odladit mnoho parametrů, aby bylo dosaženo požadovaného výsledku. Každá cívka materiálu se chová nepatrně odlišně a každý tisknutý model vyžaduje odlišné zacházení a nastavení

s přihlédnutím k tvaru a účelu. V Tabulce 5 jsou zaneseny některé parametry tisku, které ovlivňují výslednou kvalitu součásti. Tyto parametry je nutné udržovat přibližně na průměrných hodnotách a vyvarovat se extrémů. Nejsou to však zdaleka všechny parametry, problematika 3D tisku by si vyžádala rozsahem druhou diplomovou práci.

Tabulka 5 - Vybrané parametry ovlivňující kvalitu 3D tisku

Parametr	Příliš velká hodnota	Příliš malá hodnota
Výkon větráku chlazení	Vrstvy nepřilnou k sobě, součást se rozpadá	Vrstvy nestíhají zasychat, při tisku šikmých visutých ploch se vrstvy bortí
Teplota trysky	V trysce se tvoří bublinky, nekvalitní povrch	Materiál se špatně pojí, vrstvy se odlupují
Hustota výplně	Větší spotřeba materiálu, delší doba tisku	Malá pevnost, sklony ke zlomení
Rychlost posuvu	Nekvalitní detaily, vlákna k sobě nemusí přilnout u složitějších tvarů (např. ozubení)	Vznik tzv. oozing (tvorba vlásečnic), delší doba tisku, vrstvy postupně chladnou a hůře se pojí
Vzdálenost trysky od podložky v HOME pozici osy Z	Materiál dobře nepřilne k podložce, v průběhu tisku se odlupuje od podložky a těleso se deformuje	Dráha materiálu je příliš široká, dochází k nerovnostem na povrchu v důsledku vytlačení materiálu

Prvním úskalím u vytištěných ozubených kol bylo řezání závitů na stavěcí šrouby. Dále jsem řešila zlomený držák motoru - je třeba dbát na to, aby zatížení působilo kolmo na vrstvy. Pokud je zatížení ve směru rovnoběžném s vrstvami, materiál má sklony se více lámat, neboť spojení jednotlivých vrstev je nejslabším článkem co se týče pevnosti součástky.

Problém č. 3: stržené závity v ozubených kolech

Řešení: Vložení ocelové matice do osazení kola

Problém č. 4: Držák motoru se láme

Řešení: Otočení součásti při tisku o 90° - zatížení jde nyní kolmo na vrstvy

Deska osy C a kalené vodící tyče jsou spojeny pomocí šroubů se zapuštěnou hlavou. Pokud je to možné, je lepší se těmito šroubům vyhnout, neboť jimi nelze vykompenzovat drobné nepřesnosti v poloze a naklopení tyčí. Pokud je zahloubení pro hlavu šroubu vyrobeno křivě, i dotahovaný šroub má tendenci se nakřivit, spolu s vodící tyčí. Vodící pouzdra poté po tyči nejezdí plynule a v krajních polohách drhnou. Je tedy nezbytné tyto nepřesnosti nějakým způsobem eliminovat. Při montáži osy Z se mi osvědčil následující postup.

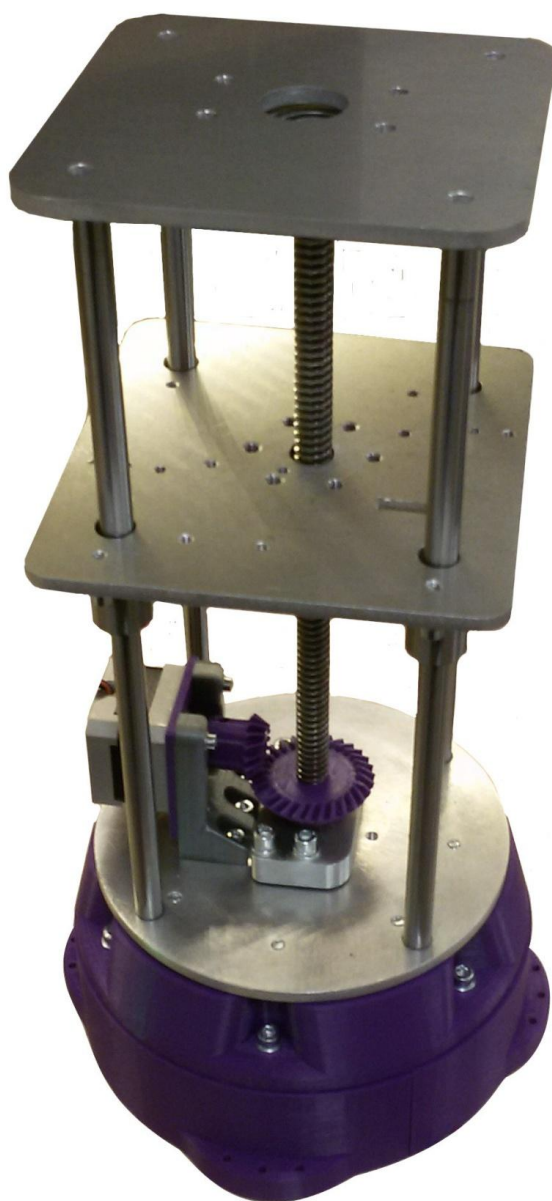
Usadila jsem trapézový šroub s nasunutou maticí do dolního ložiska. Vodící tyče jsem přišroubovala k desce osy C pouze volně, aby bylo možné jimi v malém rozsahu naklápět. Hliníkové patro jsem nasunula na vodící tyče a napevno přišroubovala k vodícím pouzdrům. Patro jsem uchytila k trapézové matici napevno. Sjela jsem patrem do nejnižší polohy. V této poloze jsem dotáhla vodící tyče napevno. Vyjela jsem patrem do nejvyšší možné polohy a vyzkoušela, že patro jezdí v celém rozsahu pohybu volně a plynule. Na horní konec trapézového šroubu jsem nasadila ložisko v ložiskovém domku. Horní hliníkovou desku jsem

položila na horní konec vodících tyčí a na ložiskový domek. Utáhla jsem napevno vodící tyče a ložiskový domek. Průchozí díry na šrouby v horní desce jsou větší a je možno jimi kompenzovat nepřesnosti v poloze jednotlivých prvků. Nepřesnosti vznikají ruční výrobou děr v desce - laserem je možno vypálit do 5 mm tlusté desky díry o průměru min. 3,5 mm. Menší díry jsou výrobcem gravírovány v podobě křížků a je nutno je pomocí důlčíku vyrobit ručně. Je zřejmé, že ruční výroba nemůže dosáhnout přesnosti laseru a poloha děr se bude odchýlovat od ideální polohy.

Problém č. 5: Vodící pouzdra drhnou o vodící tyče, patro jezdí ztuhle

Důsledek: Přílišné zatížení motoru, opotřebování částí, hluk

Řešení: Utahování tyčí s patrem v dolní poloze, tvorba větších děr na šrouby pro kompenzaci nepřesností, vhodný postup utahování jednotlivých prvků



7.4 – Realizace osy Z

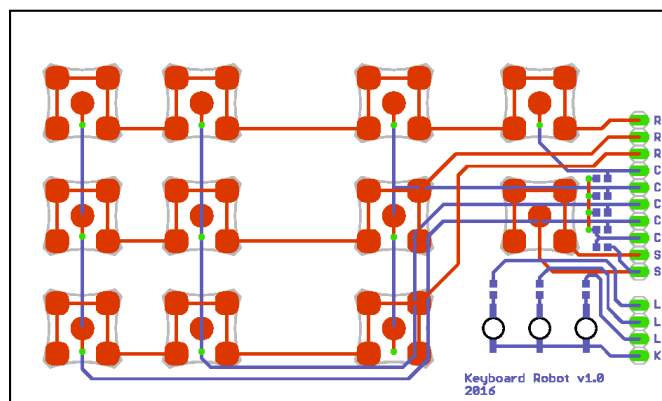
Jakmile byly mechanicky zprovozněny dvě osy, začala jsem realizovat elektrické zapojení a ožívování robotu. Práce tedy probíhaly paralelně – stavba, zapojení i programování. Na 3D tiskárně jsem si vytiskla krabičku pro umístění elektroniky. V této fázi stavby jsem narazila na úskalí obnažených elektrických kontaktů a neopatrnou manipulací došlo ke zkratu a zničení 2 ks driverů krokových motorů. Vyrobila jsem tedy ochranná pouzdra na drivery, aby při vzájemném dotyku driveru nedocházelo k dotyku pinů, přenosu elektřiny a tím zničení driveru.



7.5 – Krabička na elektroniku

Krabička se skládá ze dvou částí. V dolní části se nachází Arduino a 4 ks driverů krokových motorů. Krabička obsahuje i jeden náhradní driver, v případě, že dojde ke zničení jednoho, bude možné jej okamžitě nahradit. Cena driverů je nízká (150 Kč) a vzhledem k nepřiliš vysoké kvalitě výroby driverů jejich samovolné zničení není vzácným jevem. Dolní část krabičky obsahuje výřez, kterým jsou do krabičky přivedeny kabely od motorů a čidel. Na druhé straně jsou tři otvory na konektory – napájení Arduino (9 V), komunikace Arduino s PC pomocí USB a napájení driverů (24 V).

Horní část krabičky obsahuje zapuštění pro maticovou žabkovou klávesnici. Klávesnici jsem si nechala zakázkově vyrobit ve firmě CUTTER Systems. Na klávesnici se nacházejí tlačítka pro manuální pohyb všech tří os v obou směrech, dále tlačítko **STISK** pro sevření a rozevření uchopovacích kleštin a tlačítko **KLOP** pro naklopení osy A. Tlačítko **HOME** provede vynulování polohy všech tří os. Tlačítko **START** spouští automatický cyklus a tlačítkem **STOP** je možné kdykoliv přerušit cyklus. Na klávesnici jsou umístěny i tři LED diody. Modrá LED vlevo svítí, pokud je robot v HOME pozici. Pokud je s robotem manipulováno v ručním režimu, modrá LED zhasne, a opět se rozsvítí, až když dojde k referování polohy. Zelená LED několikrát zabliká po dokončení cyklu, aby upozornila uživatele, že byl cyklus dokončen. Bílá LED svítí neustále, pokud je Arduino pod napětím. Na Obrázku 7.6 je schéma maticové klávesnice. Na pin CP je přivedeno napětí +5 V. Arduino automaticky pomocí knihovny Keypad je schopné detekovat stisk tlačítek. Tlačítko STOP je vyvedeno zvlášť a má vlastní vstup i výstup – výstupní pin je přiveden do Arduino jako *Interrupt* z důvodu okamžitého přerušení toku programu.



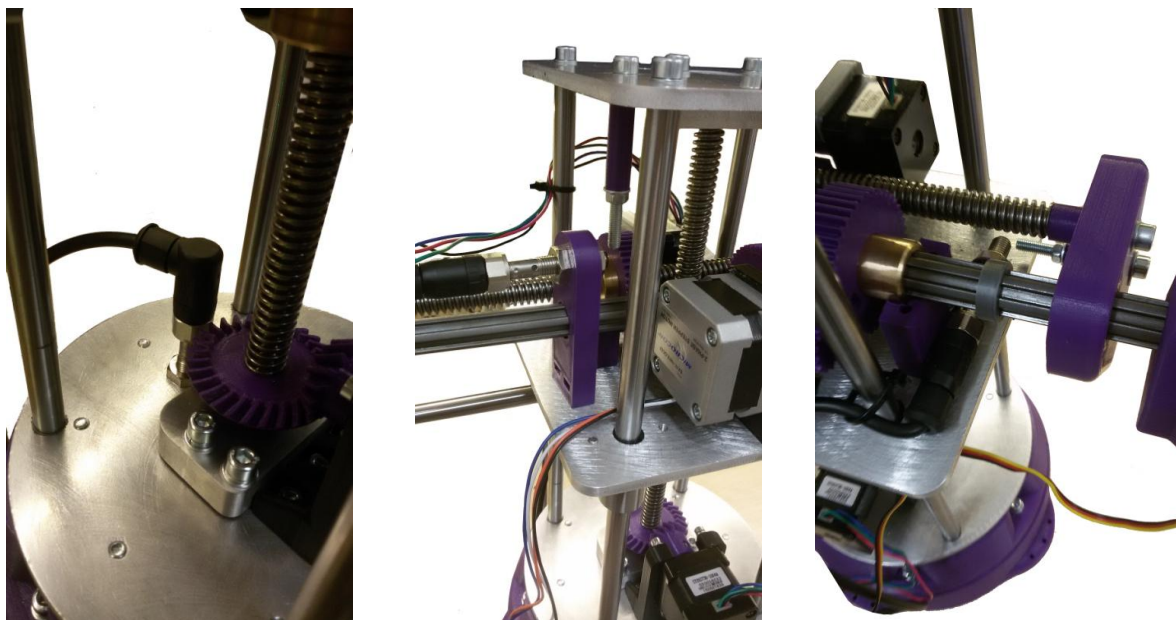
7.6 - Schéma maticové klávesnice

Jakmile byly hotové výpalky zadního konce robotu, pustila jsem se do realizace osy X a osy A. Na hliníkové patro jsem dovrtila závity pro přišroubování pouzder na bronzové matice. Pouzdra jsou tisknutá na 3D tiskárně a slouží k zamezení axiálního posuvu matic. Také jsem vytiskla vedení drážkové hřídele, aby nedocházelo k jejímu naklápění. Trapézový šroub je na zadním konci napevno uchycen k hliníkovému zadnímu dílu. Drážková matice je na obou koncích volná, tedy při přílišném vysunutí docházelo k jejímu naklápění.



7.7 – Realizace osy X a A

Dále jsem zapojila indukční čidla. Čidlo osy C je připevněno maticemi k hliníkové desce. Čidlo osy Z je upevněno maticemi k upravenému vedení drážkované hřídele a čidlo osy X je připevněno k hliníkovému patru pomocí stahovací pásky. Všechna čidla detekují pohyb šroubu, upevněného k pohybující se částem.



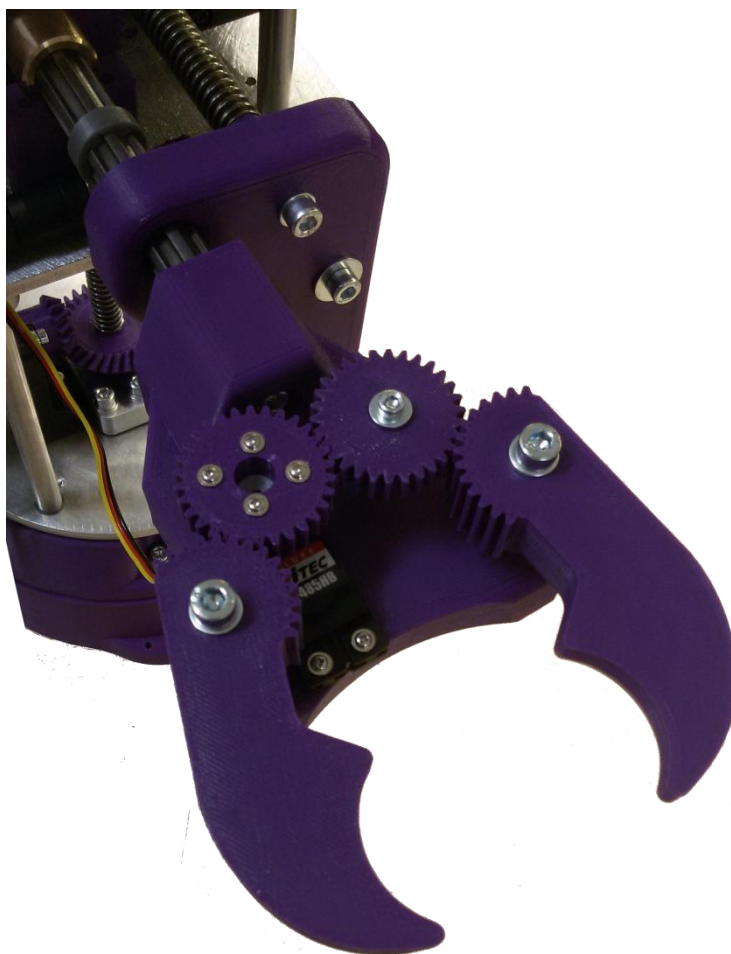
7.8 - Indukční čidla

Čidla jsou napájena stejnosměrným 24 V napětím, jejich výstup je tedy také signál s hodnotou napětí 24 V. Jelikož Arduino snese signál o maximální hodnotě 5 V, bylo nutné vyrobit napěťový dělič. Více je o tomto tématu popsáno v Kapitole 5.3. Napěťový dělič jsem vyrobila pomocí univerzálního plošného spoje, na který jsem připájela rezistory o hodnotách 1000 Ω a 4700 Ω . V Kapitole 5.3 je vypočítaná hodnota odporu $R_2 = 3900 \Omega$, nicméně jsem měla k dispozici 4700 Ω rezistory a tak jsem je využila. Výsledná hodnota U není tedy 5 V, ale pouze přibližně 4,2 V. Tuto hodnotu Arduino detekuje jako logickou 1, stejně jako 5 V. Do dutinek (na Obrázku 7.9 vpravo) jsou přivedeny výstupy z čidel. Kabely uprostřed jsou výstupy z děliče určené k zapojení do Arduino s hodnotou výstupního napětí 4,2 V. Kabel vlevo je přiveden na GND pin Arduino.



7.9 - Napěťový dělič vlastní výroby

Následovalo vytvoření koncového efektoru. K prstům jsem přilepila gumové pásky pro lepší úchop.



7.10 - Koncový efektor



7.11 - Upravená lahev Sodastream

Lahev s rozlévanou kapalinou je značky Sodastream. Tato lahev nejlépe splňuje mé požadavky – je lehká a zároveň pevná. Na 3D tiskárně jsem si vytiskla náhradní víčko lahve, do kterého jsem vyvrtala otvor a vsadila dávkovač. Dávkovač je běžně k sehnání v barmanských potřebách. Dávkovač obsahuje kuličkový mechanismus a při překlopení lahve nadávkuje přesně požadovaný objem kapaliny.

Závěr stavby mechanické části spočíval ve výrobě podstavce na lahev a podstavce sklenic. Tyto podstavce jsem přišroubovala k vyfrézované plastové desce s přesně umístěnými otvory, takže sklenice i lahev se nacházely v definovaných souřadnicích vůči poloze robotu.

Na Obrázku 7.12 je již vidět dokončené a funkční robotizované pracoviště se všemi periferiemi.



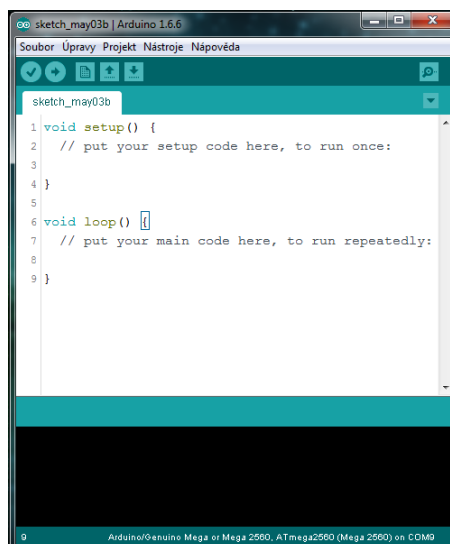
7.12 - Dokončené robotizované pracoviště

8 SOFTWARE

Software je „duše“ každého stroje, zodpovědný za jeho chování. Řídící software robota **AlcBot** je psaný v jazyce Wiring určeném pro programování procesorů. Tento programovací jazyk vychází z programovacího jazyku C a C++ a je velice vhodný pro začátečníky, neboť jeho struktura je jednoduchá a srozumitelná. Vývojové prostředí se jmenuje Arduino IDE a v tomto prostředí je možné programovat kromě Wiringu také v C nebo C++.



8.1 - Logo projektu Arduino



8.2 - Vývojové prostředí Arduino IDE

Programování pro Arduino navzdory své jednoduchosti přináší některá úskalí. Především je to absence multitaskingu, tedy možnosti vykonávat několik vláken programu současně. Není možné například současně blikat LEDkou a otáčet motorem – procesor Arduina dokáže vykonávat pouze jeden úkol v danou dobu. Stejně tak není možné například otáčet více motory současně. Konkrétně to bude rozvedeno v následujících komentářích.

Struktura programu pro Arduino sestává z několika základních částí. Na začátek je nutné deklarovat proměnné. Na začátku programu se také připojují knihovny. Na Obrázku 8.3 lze vidět importované knihovny **Servo** (pro ovládání RC serv) a **Keypad** (pro ovládání maticové klávesnice). Každá knihovna obsahuje přídatné funkce, které je možné používat.

```
1 #include <Servo.h>
2 #include <Keypad.h>
```

8.3 - Připojení knihoven

```
34 //definování pinu
35 int dirC = 40;
36 int stepC = 30;
```

8.4 - Deklarování proměnných

Následují dvě hlavní části programu – funkce *Setup()* a funkce *Loop()*. Funkce *Setup()* se provede pouze jednou při spuštění. Do této funkce je potřeba vložit počáteční nastavení, například určení, zda-li má být daný pin v módu *INPUT* nebo *OUTPUT*.

```
58 void setup() {
59
60 //krokove motory
61 pinMode(dirC, OUTPUT); //dir osa C
62 pinMode(stepC, OUTPUT); //step osa C
```

8.5 - Nastavení módu pinů

V módu *INPUT* se pin chová jako vstupní (hodnota se načítá), v *OUTPUT* módu se pin chová jako výstupní (hodnota se posílá). Dále se uvnitř funkce *Setup()* nastavují různé parametry například pro motory, klávesnici atd. Příkazem *pinMode()* se nastavuje mód pinů, příkazem *digitalWrite()* se poté na pin pošle příslušná hodnota HIGH (odpovídá napětí +5 V) nebo LOW (odpovídá napětí 0 V). Obdobně lze použít příkaz *analogWrite()*, který na výstup pomocí PWM modulace přivede libovolnou (v rámci daného rozlišení) hodnotu mezi 0 – 5 V.

Funkce *Loop()* se provádí cyklicky v nekonečné smyčce, funguje tedy na podobném principu jako programy PLC. Do této funkce se zapisuje hlavní část programu. Z funkce *Loop()* lze volat vlastní funkce. Vlastní funkce se deklarují datovým typem proměnné, kterou má funkce vrátit (například *int*, *double*, atd.), případně pokud funkce nic nevrací, uvede se slovem *void*. Vlastní funkci je možné zapsat před nebo za funkci *Loop()*. Není vhodné ji psát dovnitř funkce *Loop()* neboť by byla deklarovaná stále dokola.

Otáčení motoru se realizuje pomocí střídavého zasílání hodnot *HIGH* a *LOW* na *STEP* pin driveru krokového motoru (viz. Kapitola 5.2 Řízení motorů). Rychlost krokování lze řídit dvěma způsoby. Pomocí funkce *delay()* nebo *millis()*, reps. *micros()*.

Funkce *delay()* slouží, jak již název napovídá, k pozastavení toku programu. Vstupním parametrem je číslo definující počet milisekund. Funkce *delayMicroseconds()* má stejnou funkci jako funkce *delay()*, jen parametr je předáván v jednotkách mikrosekund. Funkce nemá žádné výstupní ani vstupní parametry. Funkce *delay()* pozastaví činnost mikroprocesoru na definovanou dobu. Po tuto dobu tedy nemohou běžet žádné další funkce a nejsou detekovány změny na vstupech. To je nevýhoda funkce *delay()* a mezi uživateli se příliš nedoporučuje ji užívat.

```
117 //----- funkce otaceni motoru -----
118 void stepperC(int delayC) {
119     digitalWrite(stepC, HIGH);
120     delayMicroseconds(delayC);
121     digitalWrite(stepC, LOW);
122     delayMicroseconds(delayC);
123     return;
124 }
```

8.6 - Krokování motoru pomocí funkce delay()

Druhým způsobem, jak řídit tok programu je pomocí odečítání času, což je realizováno funkcí `millis()`. Tato funkce vrací číslo udávající, jak dlouho program již běží. Tato funkce se na první pohled nemusí jevit příliš užitečně, nicméně s ní lze vykonávat stejné algoritmy jako s funkcí `delay()` bez pozastavení činnosti procesoru, je tedy možné s Arduinem provádět i jakýsi multitasking – tedy běh více vláken programu současně. Obdobně existuje i funkce `micros()`, která vrací stejný parametr v mikrosekundách. Programování pomocí funkce `millis()` je složitější, ale z hlediska optimalizace běhu programu je daleko vhodnější.

Na Obrázku 8.6 lze vidět jednoduchý způsob krokování motoru. Na Obrázku 8.7 je zobrazen složitější způsob pomocí funkce `micros()`. V druhém případě se porovnává, kolik času uběhlo od posledního kroku. Pokud je interval větší, než zadaná hodnota (`delayC`, stejně jako v předchozím případě), provede se krok. V případě, že je zavolána funkce `stepperC()`, běží ve `while()` smyčce tak dlouho, dokud není krok proveden. V případě, že by zde tato smyčka nebyla, funkce by skončila dříve, než by se krok vykonal.

```
130 //----- funkce otaceni motoru -----
131 void stepperC(int delayC) {
132     stepDone = 0;
133     while (stepDone == 0){
134
135         curTime = micros();
136         if (curTime - prevTimeC >= delayC){
137             prevTimeC = curTime;
138
139             if (digitalRead(stepC) == LOW){
140                 digitalWrite(stepC, HIGH);
141             }
142             else {
143                 digitalWrite(stepC, LOW);
144             }
145             stepDone = 1;
146         }
147     }
148     return;
149 }
```

8.7 - Krokování motoru pomocí `micros()`

Krokování je řízeno pomocí zpoždění, tedy čím vyšší parametr `delayC` (obdobně `delayZ`, `delayX` a `delayA`), tím pomalejší otáčení hřídele motoru.

Pokud existuje potřeba detekovat změnu na vstupu za každých okolností (například Total STOP tlačítko) kvůli bezpečnosti, existují zde tzv. *Interrupts*. Pokud je detekován signál na *Interrupt* pinu, dojde k pozastavení činnosti procesoru a je vykonána speciální ISR (*interrupt service routine*) funkce – například funkce, která zastaví činnost všech pohonů. Po vykonání ISR funkce pokračuje běh programu v místě přerušení. ISR funkce nevrací žádný parametr a nefunguje v ní funkce *delay()*. Na Obrázku 8.8 je část kódu uvnitř funkce *Setup()*. Je zde definován Interrupt pin (u Arduina Mega jsou interrupt piny na číslech 2, 3, 18, 19, 20, 21). Při detekci sestupné hrany signálu na tomto pinu (z hodnoty +5 V na hodnotu 0 V / z *HIGH* na *LOW*) procesor přeruší svoji činnost a provede kód uložení ve funkci *stop()*. Po provedení funkce *stop* procesor pokračuje ve vykonávání aktuálního procesu.

```

95 //interrupt - STOP tlačítko
96 pinMode(interruptPin, INPUT_PULLUP);
97 attachInterrupt(digitalPinToInterrupt(interruptPin), stop, FALLING);

```

8.8 - Nastavení Interrupt

Na Obrázku 8.9 je zobrazena funkce pro úchop lahve. Tato funkce zasílá RC servomotoru hodnotu úhlu, o který se má příruba motoru natočit. Ve funkci je nejdříve snímána aktuální hodnota úhlu, a když je efektor v pozici *SEVŘENO*, dostane se do pozice *OTEVŘENO*. Obdobně to platí i naopak.

```

276 //----- funkce uchop -----
277 void uchop() {
278     servoAngle = servoUchop.read();
279     if (servoAngle == 0) {
280         servoAngle = 75;
281     }
282     else {
283         servoAngle = 0;
284     }
285     servoUchop.write(servoAngle);
286     Serial.println(servoAngle);
287     return;
288 }

```

8.9 - Funkce uchop()

Na Obrázku 8.10 je výpis části funkce *home()*. Funkce je volána po stisku tlačítka **HOME** na ovládací klávesnici a také je provedena vždy na začátku funkce *start()*, která obstarává průběh celého automatického cyklu. Referování polohy probíhá postupně po jednotlivých osách, neboť Arduino není schopné multitaskingu a tedy neumí vykonávat krokování všech motorů současně. Toto omezení lze obejít vhodným využíváním funkce *millis()*, avšak je to poměrně komplikované. Při referování je navíc nutné snímat vstupy z čidel a při vykonávání kroku by mohlo dojít k opožděné detekci vstupního signálu z čidel. Je tedy vhodnější referování provádět postupně.

Nejprve je v cyklu ověřována podmínka, že referování není dokončeno. Cyklus je ukončen, jakmile je referování polohy hotové. Podmínka *if()* zajišťuje, že referování následující osy proběhne až s určitým zpožděním proti předchozí ose. Další *while()* cyklus zajišťuje, že se osa posouvá, dokud není detekován výstup z indukčního čidla. Jakmile je výstup detekován, je obrácen směr posuvu osy a proveden definovaný počet kroků opačným směrem, aby byl signál z čidla znovu na hodnotě logická 0. Tento posuv probíhá pomalejší rychlostí z důvodu vylepšení přesnosti posuvu. V tomto momentě je ukončen nadřazený *while()* cyklus a referování příslušné osy je dokončeno.

```

290 //----- funkce HOME -----
291
292 int home() {
293     homeDone = 0;
294     homeCdone = 0;
295     homeZdone = 0;
296     homeXdone = 0;
297
298     digitalWrite(dirC,HIGH);
299     digitalWrite(dirZ,HIGH);
300     digitalWrite(dirX,HIGH);
301     int homeTime = 0;
302
303     while (homeZdone == 0) {
304         curTime = millis();
305         if (curTime - homeTime >= 10) {
306             while (digitalRead(senzorZ) == LOW) {
307                 stepperZ(delayZ);
308             }
309             digitalWrite(dirZ,LOW);
310             for (int i=0; i<=1600; i++){
311                 stepperZ(1000);
312             }
313             homeZdone = 1;
314         }
315     }
316
317     homeTime = millis();

```

8.10 - Funkce home()

Kód celého řídicího programu je přiložen jako Příloha 3.

9 BEZPEČNOST PRACOVISTĚ

Jelikož **AlcBot** není výrobkem určeným na trh, nemusí k němu být přiloženo tzv. prohlášení o shodě. Prohlášení o shodě je listina, která dokládá, že výrobek splňuje požadavky technických předpisů platných v ČR. Toto prohlášení se přikládá k výrobkům převážně elektrotechnického a strojního charakteru, jakým **AlcBot** bezpochyby je.

I přes skutečnost, že AlcBot není určený k prodeji, měl by splňovat určité bezpečnostní požadavky. Autorka práce se rozhodla k robotu nevyrábět zakrytování, neboť bez krytů je dobře přístupný celý pohybový mechanismus robotu. Robot se díky absenci krytů stává vizuálně přitažlivějším a zajímavějším. Je tím ale snížena jeho bezpečnost.

U robotu by měly být umístěny ochranné cedule, které zakazují manipulaci nepovolaným osobám a upozorňují na možné riziko poranění. V manuálu robotu musí být zdůrazněno, že manipulace s robotem je povolena pouze pověřeným a řádně proškoleným osobám.

Rizikové části robotu jsou především tyto:

Tabulka 6 - Rizikové části robotu

Část robotu	Riziko
Pohybové šrouby	Poranění vtáhnutím
Uchopovací prsty	Poranění sevřením
Ozubené soukolí	Poranění vtáhnutím
Elektromotory	Poranění stejnosměrným napětím
Řídicí panel	Poranění stejnosměrným napětím

Řešením, omezujícím tyto rizika na minimální hodnotu, je přidání ochranných krytů k pohybovým osám robotu. Další možnosti jsou světelné závory, které přeruší automatický cyklus, jakmile nastane přerušení světelného paprsku. Světelné závory však vyžadují pokročilé řízení (především přítomnost PLC), k Arduinu by je bylo možné jen stěží připojit. Nejvhodnějším řešením se pro tuto aplikaci jeví prosté ústní varování, případně přítomnost varovné cedule.

10 CENOVÁ KALKULACE

Níže je rozepsána cenová kalkulace robotu. V ceně je zohledněn prototypový vývoj, který zahrnuje i logicky nevyhnutelné chyby vývojáře, jako vícenáklady při návrhu, čas strávený nad řešením nových problémů, atd. Pokud by byl **AlcBot** vyráběn sériově a byl určen k prodeji, cena by byla nižší.

Vývoj robotu trval přibližně 250 hodin, včetně výroby. Při vývoji bylo zničeno několik dílů elektroniky a při vývoji plastových dílů se spotřebovalo nezanedbatelné množství PLA materiálu na vadné kusy. Část PLA materiálu se zničila při chybách tisku (např. když krokový motor v tiskárně ztratil krok a došlo k posunu souřadného systému během tisku). Cenová kalkulace započítává všechny tyto položky. Je zde i uvedena kalkulace času, stráveného nad vývojem. Tato cena ovšem do výsledné ceny robotu započtena není, neboť vývoj robotu byl řešen v rámci diplomové práce a ne jako pracovní projekt. Započítávat tuto položku tedy není relevantní, nicméně je zde pro zajímavost uvedena.

Uvedené ceny jsou bez DPH.

Materiál	Cena za j.m. [Kč]	Cena celkem [Kč]
PLA plast – 2 kg	575,-	1 150,-
Hliníkové díly	-	820,-
Pohybové díly	-	3 020,-
Zámečnické práce	-	520,-
Indukční čidla – 3ks	288,-	864,-
Krokové motory – 5 ks	415 – 535,-	2 280,-
Easy Drivery – 11 ks	156,-	1 716,-
Arduino Mega – 3 ks	773,-	2 319,-
Práce – 250 h	400,-	100 000,-
Celkem za jeden kus	12 689,- bez nákladů na vynaloženou práci	

11 ZÁVĚR

Cílem práce bylo navrhnout nízkonákladový robot, který bude sloužit k interakci s člověkem. Robot, autorkou této DP nazvaný jako **AlcBot v1.0**, byl vytvořen k prezentačním účelům firmy CUTTER Systems spol. s r. o. a slouží pro pobavení a zaujetí zákazníků a návštěv. Hlavním parametrem byla co nejnižší pořizovací cena, byla upřednostňována před vysokou kvalitou zvolených komponent. Jelikož se nejedná o poloautomatický stroj nasazovaný do průmyslového prostředí a nejedná se ani o zakázkovou výrobu pro zákazníka, není nižší kvalita výroby na závadu.

Osobní motivací autorky práce bylo během tvorby diplomové práce získat co nejvíce zkušeností, naučit se novým dovednostem a vytvořit konstrukčně zajímavé dílo, které bude mít přesah do oblastí elektroniky a programování. Tyto cíle byly zcela splněny. Autorka práce během stavby robotu musela vyřešit mnoho problémů, díky kterým získala mnoho cenných zkušeností. Některé prvky (např. koncový efektor) byly řešeny nad rámec zadání diplomové práce, avšak bez těchto prvků by robot stěží mohl být označen za hotové a funkční dílo.

I přesto, že **AlcBot** v současné chvíli může být označen za hotový projekt, existuje zde velký potenciál pro rozšíření a vylepšení. Jedním z vylepšení, které autorka práce plánuje do budoucna, je přidání LCD displeje s možností volby počtu sklenic, do kterých má robot nápoj rozlít. V současné chvíli je do řídicího programu robotu napevno zanesen počet sklenic. Pomocí rozšíření ovládací klávesnice a interakcí pomocí LCD displeje by bylo možné tento počet redukovat. Dalším vylepšením, které se brzy ukáže jako nezbytné, je chlazení elektroniky robotu. Drivery krokových motorů mají vysokou provozní teplotu a plastová pouzdra, v kterých jsou umístěna, se časem deformují. Úprava bude zahrnovat nahrazení plastových pouzder hliníkovými a umístění ventilátoru do stěny krabičky. Cirkulací vzduchu by mělo dojít ke redukci ohřívání vzduchu uvnitř krabičky.

Co se týče zadaných cílů, i přes jejich značnou obsáhlost byly splněny všechny.

12 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] **HAVEL, I. M.** *Robotika. Úvod do teorie kognitivních robotů*. Praha : SNTL, 1980.
- [2] **BELJANIN, P. N.** *Promyšlené roboty*. Moskva, Rusko : Mašinostrojenie, 1975.
- [3] **KOLÍBAL, Z.** *Průmyslové roboty I: Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů (PRaM)*. Brno : Nakladatelství Vysokého učení technického v Brně, 1993. 80-214-0526-0.
- [4] Premiere LBR iiwa. *Kuka robotics*. [Online] [Citace: 1. 11 2015.] http://www.kuka-robotics.com/en/pressevents/news/NN_130326_Premiere_LBR_iiwa.htm.
- [5] Wikimedia commons. [Online] <https://commons.wikimedia.org/wiki/>.
- [6] *World Robotics, Industrial Robots*. Germany : Published by the IFR Statistical department, 2011.
- [7] **NODA, K.** *Posobiye po primeněniyu promyšlennyyh robotov. (překlad z japonštiny)*. Moskva, Rusko : autor neznámý, 1975.
- [8] *Robot Works*. [Online] [Citace: 18. 10 2015.] <https://www.robots.com/faq/show/how-much-do-industrial-robots-cost>.
- [9] YuMi. *ABB*. [Online] [Citace: 1. 11 2015.] <http://new.abb.com/products/robotics/cs/yumi>.
- [10] Historie. *Universal Robots*. [Online] [Citace: 1. 11 2015.] <http://www.universal-robots.com/cs/o-ur/na%C5%A1e-historie>.
- [11] Rethink robotics. [Online] <http://www.rethinkrobotics.com/>.
- [12] Fanuc. [Online] <http://www.fanuc.eu/cz/cs>.
- [13] Sony Aibo. [Online] <http://www.sony-aibo.com/>.
- [14] Royal Caribbean. [Online] <http://www.royalcaribbean.com/connect/first-look-quantum-of-the-seas-royal-caribbeans-brand-new-smartship/>.
- [15] iRobot. [Online] <http://www.irobot.com/>.
- [16] **Prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.** *Průmyslové roboty - základní učební text*. Brno : VUT, 2014.
- [17] Snail instruments. [Online] <http://www.snailshop.cz/>.
- [18] T.E.A. Technik. [Online] <http://www.teatechnik.cz/>.
- [19] CNC shop. [Online] http://www.cncshop.cz/hybrid-servomotory_c.
- [20] Sick. *Sensor intelligence*. [Online] <https://www.sick.com/cz/cs>.
- [21] Arduino info. [Online] <https://arduino-info.wikispaces.com/MegaQuickRef>.
- [22] **Schmalz, Brian.** Easy Driver. [Online] <http://www.schmalzhaus.com/EasyDriver/>.
- [23] T.M.E Electronic components. [Online] <http://www.tme.eu/cz/>.
- [24] **MAREK, J. a kol.** *Konstrukce CNC obráběcích strojů*. Praha : MM Publishing, 2014. 978-80-260-6780-1.
- [25] **ŠMOTEK, J.** *Biodegradovatelné nanokompozitní materiály*. Zlín : Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2013.

[26] **SHIGLEY, Joseph Edward a Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS.** *Konstruování strojních součástí.* Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2010. 978-80-214-2629-0.

13 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

13.1 Seznam zkratk

ABS – Akrylonitrilbutadienstyren – termoplastický polymer na bázi ropy
 CPU – Central Processing Unit – centrální procesorová jednotka (procesor)
 DPS – deska plošných spojů
 GND – Ground – zem, odpovídá hodnotě stejnosměrného napětí 0 V
 ISR – interrupt service routine
 LED – Light Emitting Diode – dioda emitující světelné záření
 MSV – mezinárodní strojírenský veletrh
 PC – Personal Computer – osobní počítač
 PLA – Polylactid Acid – termoplastický polymer na bázi biomasy
 PLC – Programmable Logic Controller – programovatelný ovladač
 PWM – Pulse Width Modulation – pulzně šířková modulace
 RTP – robotizované technologické pracoviště
 ZKŘ – základní kinematický řetězec

13.2 Seznam symbolů

a	[mm/s ²]	Lineární zrychlení
b	[mm]	Šířka ozubení
d	[mm]	Průměr ozubeného kola
E	[GPa]	Modul pružnosti
ε_s	[rad/s ²]	Úhlové zrychlení pohybového šroubu
ε_D	[rad/s ²]	Úhlové zrychlení desky osy C
ε_M	[rad/s ²]	Úhlové zrychlení motoru
f	[-]	Součinitel tření
F	[N]	Síla
F_T	[N]	Třecí síla
i	[-]	Převodový poměr
J	[kg/m ²]	Moment setrvačnosti
J_{RED}	[kg/m ²]	Moment setrvačnosti redukováný na hřídel motoru
m	[kg]	Hmotnost
m_o	[mm]	Modul ozubeného kola
M_K	[N.m]	Krouticí moment
M_{ksA}	[N.m]	Krouticí moment osy A

M_{ksC}	[N.m]	Krouticí moment osy C ze statického hlediska
M_{kdC}	[N.m]	Krouticí moment osy C z dynamického hlediska
M_{ksZ}	[N.m]	Krouticí moment osy Z ze statického hlediska
M_{kdZ}	[N.m]	Krouticí moment osy Z z dynamického hlediska
M_{ksX}	[N.m]	Krouticí moment osy X ze statického hlediska
M_{kdX}	[N.m]	Krouticí moment osy X z dynamického hlediska
M_{zred}	[N.m]	Zátěžný moment redukováný na hřídel motoru
n	[s ⁻¹]	otáčky
η_C	[-]	Celková účinnost
η_L	[-]	Účinnost ložisek
η_s	[-]	Účinnost šroubu
η_p	[-]	Účinnost převodu
η_v	[-]	Účinnost vedení
σ_E	[MPa]	Mez kluzu
σ_H	[MPa]	Hertzovo napětí
ρ	[mm]	Poloměr křivosti evolventy ozubeného kola
p	[mm]	Stoupání trapézového šroubu
r	[mm]	Poloměr působíště třecí síly
R_1	[Ω]	Odpor rezistoru R_1
R_2	[Ω]	Odpor rezistoru R_2
t_R	[s]	Čas rozběhu
μ	[-]	Poissonovo číslo
v	[m/s]	Posuvová rychlost
ω_D	[rad/s]	Úhlová rychlost desky osy C
Y	[-]	Lewisův součinitel tvaru
z	[-]	Počet zubů ozubeného kola

13.3 Seznam tabulek

Tabulka 1 – Vybrané mechanické vlastnosti PLA.....	50
Tabulka 2 - Vybrané charakteristiky ozubených kol	50
Tabulka 3 - Krouticí momenty a složky síly pro jednotlivé osy	51
Tabulka 4 - Výsledná napětí	52
Tabulka 5 - Vybrané parametry ovlivňující kvalitu 3D tisku	55
Tabulka 6 - Rizikové části robotu	67

13.4 Seznam obrázků

3.1 - Teleoperátor NAT [3]	14
3.2 - Chirurgický robot Da Vinci [3]	14

3.3 - Průmyslový robot Kuka KR16 [4]	15
3.4 - Android C-3PO [5]	16
3.5 - Android R2-D2 [5]	16
3.6 - Humanoid Data [5]	16
3.7 - Kyborg Sedmá z devíti [5]	16
3.8 - Člověk ve vztahu k robotům a manipulátorům [7]	18
3.9 - Kuka LBR iiwa [4]	20
3.10 - Kuka KR 16-2 [4]	20
3.11 - ABB YuMi [9]	20
3.12 - IRB 140 [9]	20
3.13 - UR10 a UR5 [10]	21
3.14 - UR3 [10]	21
3.15 – Baxter [11]	21
3.16 – Sawyer [11]	21
3.17 - Fanuc CR 35ia [12]	22
3.18 - LEGO Mindstorms [5]	24
3.19 - Sony AIBO [13]	24
3.20 - Robot Bionic [14]	25
3.21 - Roomba 880a Scooba 450 [15]	25
4.1 - Tvar pracovního prostoru v závislosti na typu ZKŘ[16]	26
4.2 - Kinematický řetězec robotu AlcBot	26
4.3 - Schematické rozdělení typů motorů[3]	28
4.4 - Planetová převodovka[16]	29
4.5 - Cykloidní převodovka[16]	29
4.6 – Modelářské RC servo [17]	29
4.7 - Krokový motor firmy Polulu [17]	29
4.8 - Pastorek a hřeben [18]	30
4.9 - Trapézový šroub s maticí [18]	30
4.10 - Upínka pro ozubený řemen [18]	30
4.11 - Valivý vozík firmy Hiwin [19]	30
4.12 - Drážkovaná matice [18]	31
4.13 - Indukční snímače [20]	31
5.1 - PLC firmy Siemens [5]	32
5.2 - Arduino MEGA 2560 [5]	33
5.3 - Mapa pinů na desce Arduino Mega 2560 [21]	33
5.4 - Schéma unipolárního krokového motoru	34
5.5 - Schéma bipolárního krokového motoru	34
5.6 - Schéma H-bridge	34
5.7 - Příklad momentové charakteristiky krokového motoru [19]	35
5.8 - Easy Driver	35
5.9 – Schéma připojení motoru a driveru k Arduino [22]	36
5.10 - Schéma napěťového děliče [5]	37
5.11 - Síťový adaptér [23]	37
6.1 - Robotizované pracoviště	40
6.2 - Pohled na C osu	41
6.3 - Pohled dovnitř osy C	41
6.4 - Detail mechanismu C osy	41

6.5 - Krokový motor osy C [17]	42
6.6 - Parametry krokového motoru osy C [17]	42
6.7 - Pohled na Z osu	44
6.8 - Krokový motor osy Z [17].....	45
6.9 - Parametry krokového motoru osy Z [17]	45
6.10 - Pohled na X osu.....	46
6.11 - Krokový motor osy X [17]	47
6.12 - Parametry krokového motoru osy X [17]	47
6.13 - Krokový motor osy A [17]	48
6.14 - Parametry krokového motoru osy A [17]	48
6.15 - Koncový efektor	49
7.1 - Stavba osy C	53
7.2 - Hotová osa C	53
7.3 - Realizace osy Z.....	54
7.4 – Realizace osy Z	56
7.5 – Krabíčka na elektroniku.....	57
7.6 - Schéma maticové klávesnice	58
7.7 – Realizace osy X a A.....	58
7.8 - Indukční čidla	59
7.9 - Napěťový dělič vlastní výroby	59
7.10 - Koncový efektor	60
7.11 - Upravená lahev Sodastream	60
7.12 - Dokončené robotizované pracoviště.....	61
8.1 - Logo projektu Arduino	62
8.2 - Vývojové prostředí Arduio IDE	62
8.3 - Připojení knihoven.....	62
8.4 - Deklarování proměnných	62
8.5 - Nastavení módu pinů.....	63
8.6 - Krokování motoru pomocí funkce delay()	63
8.7 - Krokování motoru pomocí micros().....	64
8.8 - Nastavení Interrupt	65
8.9 - Funkce uchop().....	65
8.10 - Funkce home().....	66

14 SEZNAM PŘÍLOH

- 1. Výkresová dokumentace sestavy a vybraných komponent**
- 2. Schéma zapojení**
- 3. Řídicí software robotu**
- 4. Technický list robotu AlcBot**