

**ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ**

KATEDRA ENERGETIKY

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Návrh modelu robotického manipulátoru

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Ing. Martin RÖDL**
Osobní číslo: **E18N0033K**
Studijní program: **N2644 Aplikovaná elektrotechnika**
Studijní obor: **Aplikovaná elektrotechnika**
Téma práce: **Návrh modelu robotického manipulátoru**
Zadávající katedra: **Katedra elektroenergetiky**

Zásady pro vypracování

1. Navrhněte konstrukci robotu.
2. Vyberte základní komponenty.
3. Navrhněte a realizujte výkonový měnič.
4. Navrhněte řídicí systém.

Rozsah diplomové práce: **40 – 60 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

1. Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Zdeněk Kehl**
Regionální inovační centrum elektrotechniky

Datum zadání diplomové práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Doc. Ing. Karel Noháč, Ph.D.
vedoucí katedry

V Plzni dne 9. října 2020

Abstrakt

Diplomová práce je zaměřena na návrh robotického manipulátoru. Je strukturovaná tak, že se nejdříve zabývá mechanickým modelem manipulátoru, poté výběrem ostatních součástí, reálným návrhem měniče a jeho realizací. Poslední kapitola představuje návrh řídicího systému, tak aby byl celý systém funkční jako celek

Klíčová slova

Robotické rameno, robotický manipulátor, BLDC motor, měnič, řízení motoru, řízení manipulátoru.

Abstract

The diploma thesis is focused on design robotic manipulators. The thesis is structured, that the beginning of the thesis is describing a mechanic model of the manipulator, then choosing other parts, description of the real design of the BLDC motor driver and its realization. The last chapter deals with designing of control system, so that manipulator is completed functional.

Key words

Robotic arm, robotic manipulator, BLDC motor, driver, IGBT, BLDC control, Robotic manipulator control.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této diplomové práce.

Dále prohlašuji, že veškerý software, použitý při řešení této diplomové práce, je legální.

.....
podpis

V Plzni dne 27.5.2021

Martin Rödl

Poděkování

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu diplomové práce Ing. Zdeňkovi Kehlovi za cenné profesionální rady, připomínky a metodické vedení práce.

Obsah

OBSAH	9
SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK	11
ÚVOD	12
1 KONSTRUKCE PRŮMYSLOVÉHO MANIPULÁTORU	14
1.1 PRŮMYSLOVÝ MANIPULÁTOR.....	14
1.2 KLASIFIKACE MANIPULÁTORŮ.....	14
1.3 KINEMATICKÁ STRUKTURA.....	14
1.3.1 Kinematická dvojice.....	14
1.4 ZÁKLADNÍ KINEMATICKÉ STRUKTURY.....	16
1.4.1 Kartézská struktura TTT.....	16
1.4.2 Cylindrická struktura RTT a sférická struktura RRT.....	17
1.4.3 SCARA kinematická struktura.....	17
1.4.4 Angulární kinematický řetězec.....	18
1.4.5 Paralelní struktura.....	19
1.5 NÁVRH KONSTRUKCE ROBOTA.....	20
1.5.1 Přesnost polohování.....	20
1.5.2 Návrh základny.....	22
1.5.3 Návrh hlavního ramene.....	23
1.5.4 Návrh druhého ramene.....	24
1.5.5 Návrh třetího ramene.....	26
1.5.6 Konstrukce Efektoru.....	27
1.5.7 Celková konstrukce manipulátoru.....	29
2 VÝBĚR ZÁKLADNÍCH KOMPONENTŮ	31
2.1 MOTORY.....	31
2.1.1 Krokové motory.....	31
2.1.2 Stejnsměrné motory.....	31
2.1.3 BLDC motory.....	31
2.1.4 Střídavé motory.....	32
2.1.5 Lineární motory.....	32
2.1.6 Elektrohydraulické servo motory.....	33
2.1.7 Porovnání motorů.....	33
2.1.8 Zvolení motoru.....	34
2.1.9 Výběr motoru báze k otáčení 1. ramene.....	37
2.2 PŘEVODOVKY.....	39
2.2.1 Převodovky na lineární převod.....	40
2.2.2 Převodovky rotačního pohybu.....	41
2.3 SPOJKY.....	42
3 NÁVRH A REALIZACE VÝKONOVÉHO MĚNIČE	43
3.1 PRINCIP MĚNIČE BLDC MOTORU.....	44
3.2 ŘÍZENÍ BLDC MOTORU SE SENZORY.....	45
3.3 NÁVRH MĚNIČE.....	47
3.4 NÁVRH SCHÉMATU MĚNIČE.....	49
3.5 REALIZACE MĚNIČE.....	51
3.6 ŘÍZENÍ VÝKONOVÉHO MĚNIČE.....	52
4 NÁVRH ŘÍDICÍHO SYSTÉMU	54
4.1 HLAVNÍ ŘÍDICÍ JEDNOTKA.....	54
4.2 BLOKOVÉ SCHÉMA ŘÍDICÍHO SYSTÉMU.....	54
4.3 HLAVNÍ ŘÍDICÍ JEDNOTKA.....	56
4.4 OVLÁDÁNÍ MANIPULÁTORU UŽIVATELEM.....	57

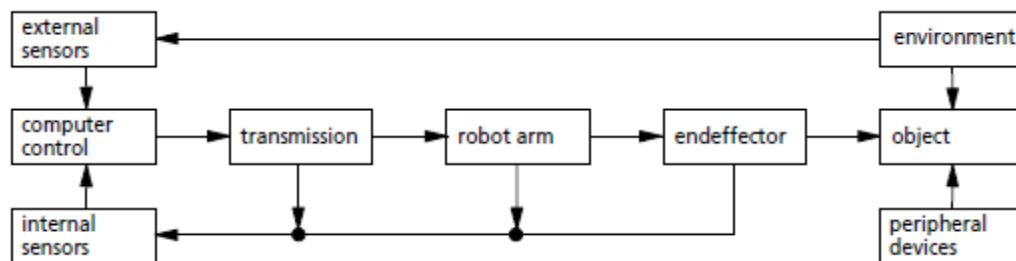
ZÁVĚR	60
SEZNAM LITERATURY A INFORMAČNÍCH ZDROJŮ	61
PŘÍLOHY	1

Seznam symbolů a zkratek

mm	.....	milimetr
V	.....	volt
Kg	.....	kilogram
BLDC	.....	Brushless direct current
i	.....	převodový poměr
ΔB_{xy}	.....	odchylka v rovině x, y
L	.....	délka
rpm	.....	otáčky za minutu
W	.....	watt
m/s, mm/s	.....	metr za sekundu, milimetr za sekundu
g	.....	gram
s	.....	sekunda
°	.....	stupeň
°C	.....	stupeň celsia
M_{\min}	.....	minimální potřebný moment pro rozběh motoru
f	.....	frekvence
F_g	.....	gravitační síla
de	.....	efektivní průměr

Úvod

Diplomová práce se zabývá komplexním návrhem robotického manipulátoru. Její cílem je navrhnout manipulátor nejen z hlediska konstrukce, ale i z ostatních hledisek potřebných k dosažení úplné funkce a použitelnosti manipulátoru. Systém návrhu manipulátoru popisuje obrázek č. 1, kde na začátku existuje objekt, se kterým se bude manipulovat. Dle objektu se následně navrhne potřebná konstrukce, pohony a jejich řídicí systém. Jako celek manipulátor musí zapadat do prostředí, ve kterém bude s objektem manipulovat.



Obrázek 1 - Systém návrhu manipulátoru [1]

Na začátku procesu si definujeme parametry, které chceme při návrhu manipulátoru dosáhnout:

- Nejnižší možná cena
- Nejnižší možná hmotnost
- Dosah – 400mm
- Výškový rozsah 400mm
- Minimální počet stupňů volnosti
- Přesnost polohování 0,5mm
- Napájení 24V
- Nosnost 0,2 kg

Z těchto kritérií budeme vycházet při návrhu manipulátoru. Každá z těchto kritérií má důležitý význam a bude určovat parametry navržené konstrukce.

Práce je rozdělena do čtyř kapitol. První kapitola se zabývá návrhem konstrukce manipulátoru. Na začátku kapitoly jsou popsány aktuální používané návrhové typy manipulátorů a následně je vybrán vhodný typ a zapracován do konstrukce splňující parametry na manipulátor.

V druhé kapitole je popsán výběr komponentů pro oživení konstrukce. Kapitola zároveň popisuje různé druhy použitý pohonů, typy sensorů, měničů a řídicích komponent použitých pro navrhovaný manipulátor.

Třetí kapitola se zabývá návrhem měniče pro ovládání pohonů manipulátoru. Popisuje proces návrhu měniče pro BLDC motor. Výsledkem kapitoly je funkčně navržený prototyp pro ovládání motorů a přenos signálu z řídicí jednotky.

Poslední kapitola obsahuje návrh řídicího systému, který částečně podléhá volbě komponent vybraných pro řízení. Výsledkem je grafický interface pro ovládání manipulátoru uživatelem, tak aby manipulátor mohl ovládat kdokoli bez potřeby znalosti programovacího jazyka. Systém je navržen tak, aby manipulátor mohl být ovládán odkudkoli a pomocí jakéhokoli zařízení s přístupem na internet. Cílem kapitoly je vytvořit webový interface, který bude ovládat robota a zároveň dá uživateli zpětnou vazbu.

1 Konstrukce průmyslového manipulátoru

1.1 Průmyslový manipulátor

Průmyslový robotický manipulátor je definován dle normy ISO 8373, která jej definuje jako automaticky řízený kinematický řetězec s nejméně třemi a více osami a jedná se o zařízení, jehož úkolem je přesun pracovního efektoru z jednoho bodu do druhého se správnou orientací. [2]

1.2 Klasifikace manipulátorů

Existuje mnoho kritérií, podle kterých lze klasifikovat manipulátory. Nejčastěji používaná kritéria jsou:

- počet stupňů volnosti,
- typ kinematické struktury,
- druhy použitých pohonů,
- geometrie pracovního bodu,
- pohybové charakteristiky,
- způsoby řízení,
- kompaktnost konstrukce.

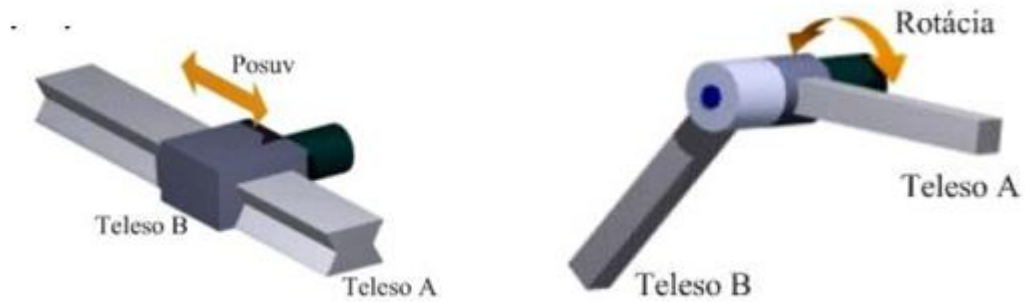
[2]

Samotná klasifikace manipulátorů by se dala rozepsat na celou publikaci. Pro potřeby diplomové práce se podrobněji podíváme na rozdělení dle kinematické struktury, které poskytne představu o nejčastěji používaných strukturách manipulátorů a robotů.

1.3 Kinematická struktura

1.3.1 Kinematická dvojice

Kinematická dvojice určuje způsob vazby mezi dvěma členy. Existují dvě základní vazby dvojice translační a rotační. Obě vazby nechávají jen jeden stupeň volnosti. Rotační vazbu označíme písmenkem R a translační T. Jak název kinematických dvojic značí, tak rotační vazba umožňuje vzájemnou rotaci dvou členů a translační vazba jejich vzájemný posuv, což je zřejmé z obrázku č. 2.



Obrázek 2 – Translační a rotační vazba [3]

Použití kinematických dvojic lze různě kombinovat a tvořit různou strukturu manipulátorů. Struktura manipulátoru a její posloupnost tvoří základní konstrukci manipulátoru. Také záleží na tom, jak je daná struktura otevřená či uzavřená. Příklady obou konstrukcí jsou zobrazeny na obrázku č. 3.



Obrázek 3 – Otevřený a uzavřený kinematický řetězec [3]

To jestli zvolit otevřený nebo uzavřený kinematický řetězec záleží především na kritériích použití. Mezi nejčastější kritéria patří:

- tvar a velikost pracovního prostoru,
- požadovaná dráha těžiště objektu manipulace,
- požadovaná přesnost,
- volba druhu pohonu jednotlivých os,
- vhodnost konstrukčního uspořádání,
- způsob součinnosti s periferiemi.

[2]

V dnešní době se nejčastěji používá koncepce s otevřeným kinematickým řetězcem především pro roboty a montážní linky. Uzavřené konstrukce mají velké použití u manipulací s těžkými břemeny, jako jsou např. paletizátory.

Na základě uspořádání struktury kinematických řetězců můžeme manipulátory roztrždit do základních skupin:

- kartézské TTT,
- cylindrické RTT,
- sférické RRT,
- angulární RRR.

[3]

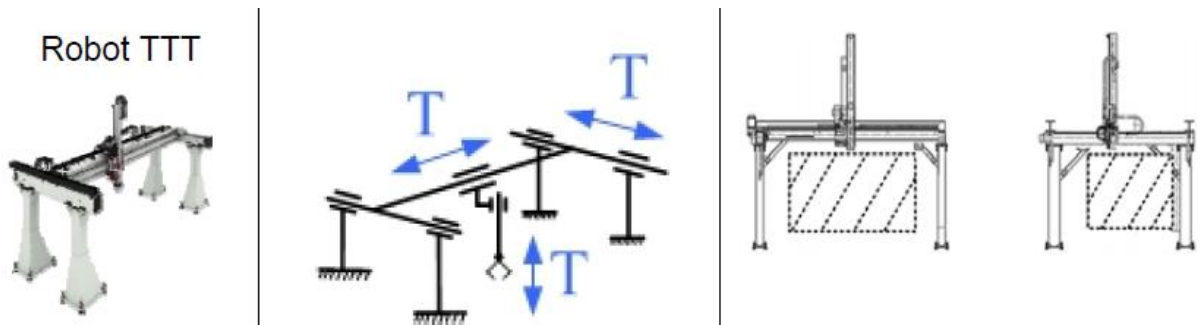
1.4 Základní kinematické struktury

Kinematická struktura určuje tvar manipulačního prostoru a určuje základní konstrukci manipulátoru. V rámci této práce jsou popsány nejvýznamnější struktury, ze kterých je následně vybrána jedna pro stavbu manipulátoru.

1.4.1 Kartézská struktura TTT

Kartézská struktura má tři prismatické spojení, kde jsou osy shodné s kartézským koordinačním systémem. Většina kartézských robotů je tvořena na sebe kolmými pojezdy a nosnou konstrukcí, která podpírá jednotlivé pohyblivé osy. Tato struktura je široce používána na těžší břemena hlavně díky její tuhosti. Používá se tak často pro paletizátory, automatické skladové systémy, ale i v případech kde je potřeba přesnost, tzn. např. řezání vodním paprskem nebo laserem.

Výhoda této struktury kromě tuhosti je také možnost konstruovat modulárně. Kde hlavní členy jsou stejné a potřebné pracovní rozměry se upraví jen velikostí konstrukce. Díky koordinačnímu systému je tato struktura relativně snadná na řízení. Dále její výhodou je, že není potřeba dodatečné síly motorů na to, aby se museli zatěžovat manipulací samotnou váhou konstrukce. [1]. Příklad této kinematické struktury je zobrazen na obrázku č. 4 včetně naznačeného manipulačního prostoru.



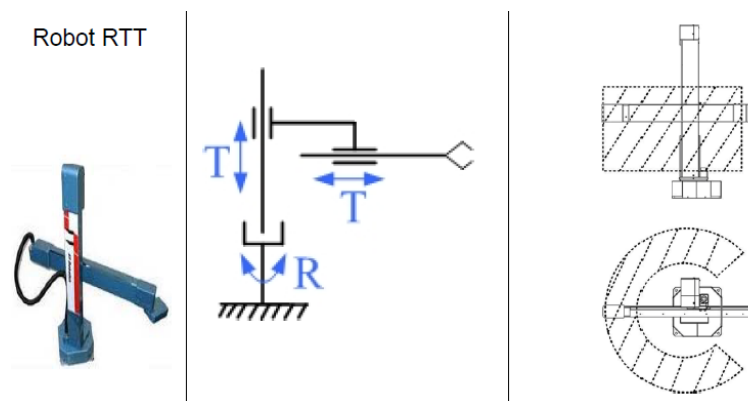
Obrázek 4 – Kartézská struktura [3]

1.4.2 Cylindrická struktura RTT a sférická struktura RRT

Cylindrická struktura se skládá z hlavní rotační kinematické dvojice a dále ze dvou na ní kolmých translačních dvojic, což je zobrazeno na obrázku č. 5. Je relativně jednodušší na řízení a robustnost konstrukce záleží na hlavním sloupu, který se otáčí kolem své osy.

Druhou velmi podobnou strukturou je sférická struktura, která se skládá ze dvou rotačních dvojic a jedné translační.

V případě obou těchto struktur je manipulační prostor blízký válci. V dnešní době už tyto dvě kinematické dvojice hrají menšinovou roli a moc často se nepoužívají, výjimkou jsou mechanismy k výměně nástrojů u CNC obráběcích strojů. [1].

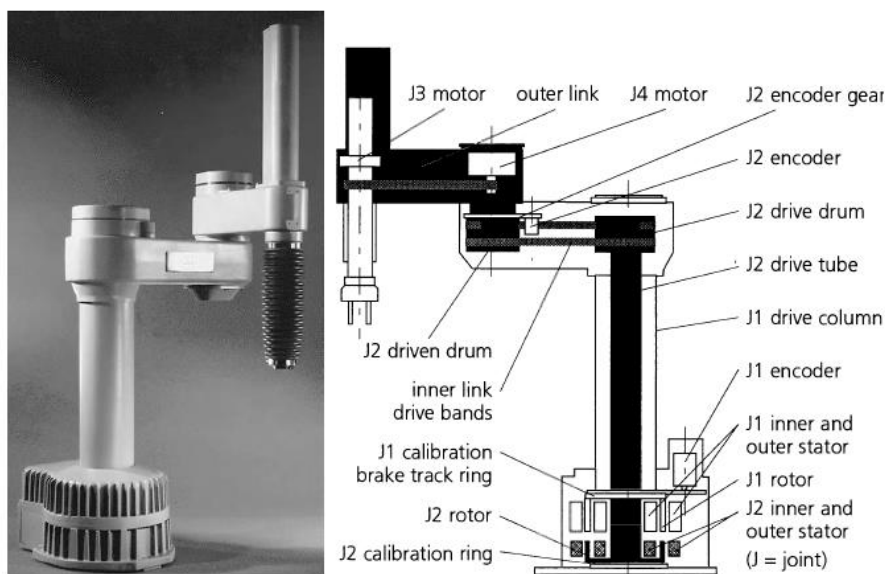


Obrázek 5 – Příklad RTT struktury [3]

1.4.3 SCARA kinematická struktura

SCARA je zkratka pro Selective Compliance Articulated Robot Arm, což zjednodušeně znamená, že manipulační prostor je rovnoběžný s rovinou země.

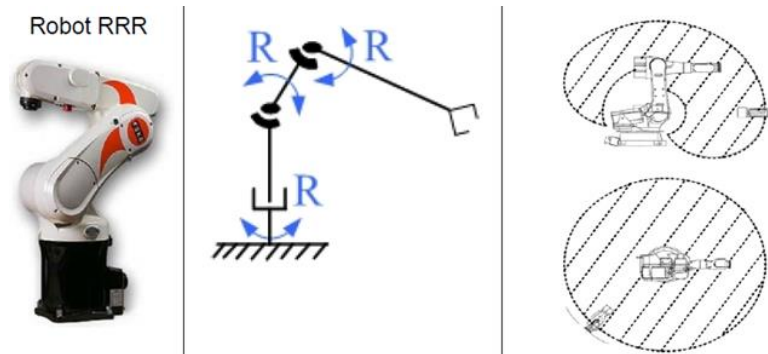
Kinematická struktura SCARA je sestavena ze dvou rotačních dvojic a jedné posuvné. Posuvná dvojice vymezuje výšku efektoru. Výhoda tohoto uspořádání je, že lze dosahovat vysoké rychlosti pohybu a zrychlení, vyšší přesnosti a u kooperativních robotů lze získat zpětnou vazbu od působící síly. Pracovní prostor této struktury tvoří dutý válec. Tato struktura je široce rozšířená u montážních strojů a dále i např. u podavačů pro testovací přístroje. U této struktury je složitější řízení způsobeno nejednoznačností úlohy. Příklad SCARA struktury lze vidět na následujícím obrázku. [1]



Obrázek 6 – Příklad struktury SCARA [1]

1.4.4 Angulární kinematický řetězec

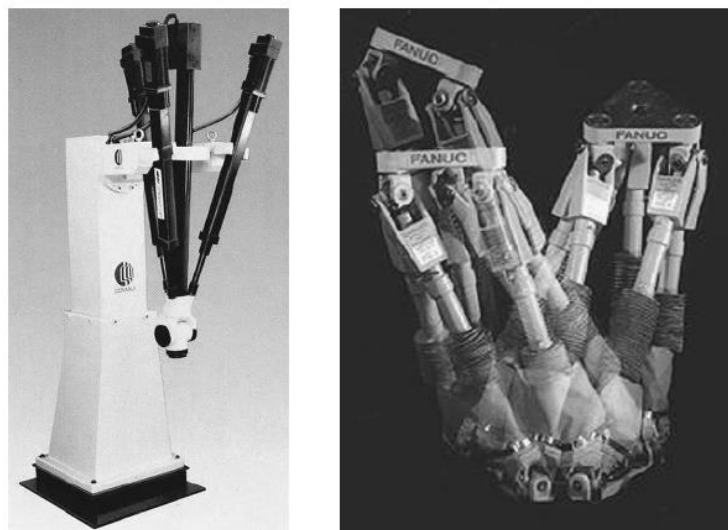
Angulární kinematický řetězec je v dnešní době nejvíce rozšířen. Skládá se nejméně ze tří rotačních dvojic. Tento řetězec klade potřebu velkého otáčivého momentu na motory, protože musí navíc manipulovat s váhou vlastních ramen a motorů. Proto často se používá ještě přídavných pneumatických nebo hydraulických motorů. Tato kinematická struktura je častá u svařovacích nebo manipulačních robotů v automobilovém průmyslu. Pracovní prostor u této struktury je tvořen anguloidním tělesem [1]. Příklad struktury a její pracovní prostor je ukázán na dalším obrázku.



Obrázek 7 – Příklad angulární struktury [3]

1.4.5 Paralelní struktura

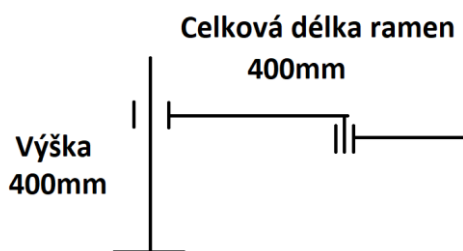
Paralelní struktura je tvořena protichůdnými prismatickými nebo rotačními dvojicemi. V dnešní době získala hodně na popularitě tripod struktura, která má tři až šest paralelních členů proti sobě připojených k základně. Pohyb efektoru je dán současným pohybem paralelních členů vůči základně. Pracovní prostor je individuální podle dané struktury a záleží na jednotlivých členech. Tato struktura má řadu výhod jako např. tuhost, přesnost, tlumení možnost vysokého zatížení. Jsou díky ní postaveny nové aplikace, které klasické konvekční struktury neumožňovali. Díky paralelní struktuře lze obrábět, odjehlovat, realizovat přesnou montáž, 3D tisk a dále se začíná využívat v dalších aplikacích. [1]. Příklad paralelní struktury můžete vidět na obrázku č. 8.



Obrázek 8 – Příklad paralelní struktury [1]

1.5 Návrh konstrukce robota

Návrh konstrukce vychází z požadovaných vlastností na manipulátor, které jsou definovány na začátku této práce. Pro naplnění požadavků z hlediska minimální ceny a hmotnosti byla zvolena obdoba struktury SCARA, kde první člen bude rotační a výškový posuv bude zajišťovat druhý člen. Další člen na pohyblivém rameni je opět rotační, viz obrázek č. 9.



Obrázek 9 – Zvolená struktura manipulátoru

Proč je struktura SCARA výhodná z hlediska ceny a hmotnosti? Na manipulátorech jsou nejdražšími součástkami motor a převodovky. Ostatní struktury na rozdíl od struktury SCARA a paralelní struktury kladou vysoké nároky na motory, a to proto, že musejí nést kromě váhy břemena také váhu samotného manipulátoru. Proto se u ostatních struktur používá nejčastěji ozubený planetový převod, na který se z hlediska přesnosti se kladou obrovské nároky minimalizovat vůle, což je extrémně náročné z hlediska výroby. U naší struktury si pro zajištění přesnosti postačíme pouze s řemenovými převody, u kterých lze dosáhnout minimální vůle i při vyšších převodech. Řemenový převody zase na druhou stranu nemají tuhost a lze přenášet daleko nižší moment než u klasických ozubených převodů. Paralelní struktura by v našem případě nevyhovovala z důvodu potřebného manipulačního prostoru, který by u této struktury kladl daleko větší nároky na konstrukci, která by dále nevyhovovala požadavku na nejnižší hmotnost.

1.5.1 Přesnost polohování

V idealizovaném světě se odchylky od výpočtové reality nemusí uvažovat. Bohužel u manipulátorů a robotů hraje konečná přesnost významnou roli a při zvyšování požadované přesnosti dochází k exponenciálnímu nárůstu ceny.

U manipulátorů ovlivňují konečnou přesnost dva důležité faktory, kterými jsou tuhost konstrukce a vůle v převodech. Tuhost konstrukce je možné eliminovat navržením vhodné konstrukce. Vůle v převodech je dána především výrobním faktorem a je hůře eliminovatelná.

Obecně můžeme říct, že mezi každou kinetickou dvojicí je odchylka mezi idealizovanou a reálnou pozicí. Z toho vyplývá, že celková odchylka je dána součtem jednotlivých odchylek v každé souřadnici. Pro celkovou odchylku tedy platí vztah č. 1.1, kdy n = počet kinematických dvojic řetězce.

$$\Delta_c = \sum_{i=1}^n \Delta_i, \text{ kde } i = 1, 2, \dots \quad (1.1)$$

Nepřesnost dílčích odchylek je dána vztahem:

$\Delta_x, \Delta_y, \Delta_z$, kde

$$\Delta_x = x_{max} - x_{min} = x_2 - x_1,$$

$$\Delta_y = y_{max} - y_{min} = y_2 - y_1, \quad (1.2)$$

$$\Delta_z = z_{max} - z_{min} = z_2 - z_1.$$

Pro celkovou nepřesnost poté platí

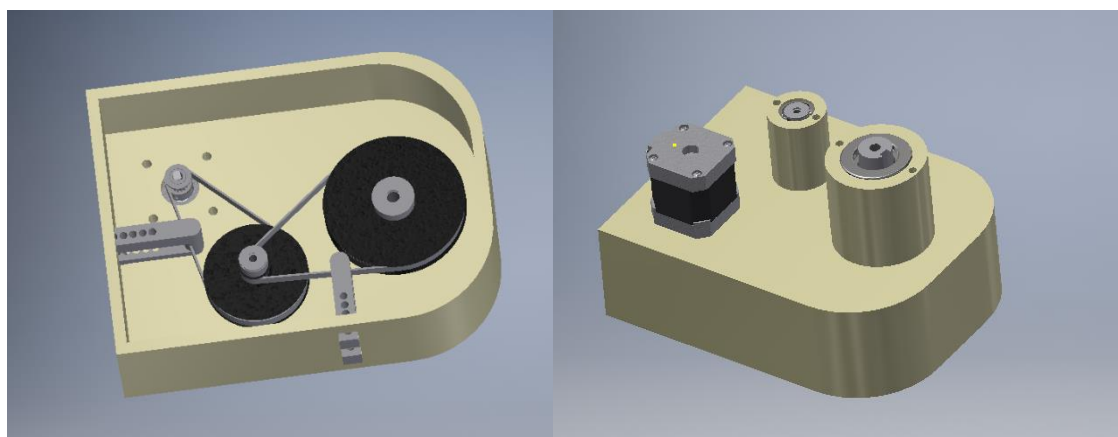
$$\Delta_c = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2} = \sqrt{\Delta_x^2 + \Delta_y^2 + \Delta_z^2} \quad (1.3)$$

Pokud víme, že chyby v jednotlivých osách jsou stejné, potom můžeme zjednodušit celkovou chybu vztahem č. 1.4.

$$\Delta_c = \Delta * \sqrt{3} = 1,73 \Delta \quad (1.4)$$

1.5.2 Návrh základny

Základna je hlavní součástí našeho manipulátoru a zajišťuje rotační pohyb hlavního navazujícího ramena, které bude na základnu napojeno přes hřídel. Hřídel přenáší moment pomocí pera. Hlavní rameno bude nasazeno na hřídel a bude k ní zajištěno šroubem, který vymezení axiální pohyb vůči hřídeli. Hřídel je upevněna ve dvou radiálních ložiskách a pod hlavním ramenem je umístěné axiální ložisko, které zajišťuje opěrnou plochu.



Obrázek 10 – Konstrukce základny

Postup při výběru motoru bude vysvětlen v následující kapitole o výběru součástek. K přenosu pohybu byl zvolen řemenový převod, který obsahuje napínače řemenů k dosažení správného napětí řemenů a tím vymezení vůle a zabránění přeskočení zubů. Na konstrukci převodovky je potřebné několik typů ozubených kol, kdy ozubené kolo na motoru označené jako z_1 má 16 zubů. Střední ozubené kolo z_2 a z_3 slouží pro převod a má 80 a 23 zubů. Poslední ozubené kolo z_4 , které přenáší moment na hlavní rameno má 110 zubů.

Takto poskládaná kola tvoří převodovku, která má převodový poměr $i = 24$ dle níže uvedeného vzorce č. 1.5.

$$i = \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} = \frac{80}{16} * \frac{110}{23} = 23,9 \quad (1.5)$$

Dále je pro nás nezbytné zjistit délku kroku s takovým převodovým poměrem. Pokud budeme zjednodušeně přepokládat, že část výseče je přímka můžeme následně dopočítat délku kroku v souřadnici x a y dle vzorce č. 1.6. Dle níže provedeného výpočtu je délka kroku po kružnici při převodu 23 je rovna 105mm, což je o řád vyšší oproti našemu požadavku. Krok můžeme snížit přidáním ještě přidavného ozubeného kola a tím dosáhnout zvýšení převodu. Nebo je možné vybrat motor již s převodovkou, kdy bude následně nutné k požadované přesnosti dopočítat vůli dané převodovky.

$$\Delta B_{xy} = \frac{P1 * d}{krok} = \frac{3,14 * 2 * 400}{23,9} - 105 \text{ mm} \quad (1.6)$$

$$\Delta B_x, \Delta B_y = \frac{105}{\sqrt{2}} = 74 \text{ mm} \quad (1.7)$$

1.5.3 Návrh hlavního ramene

Hlavní rameno navazuje na základnu. Jeho návrh je zobrazen na níže uvedeném obrázku č.11.



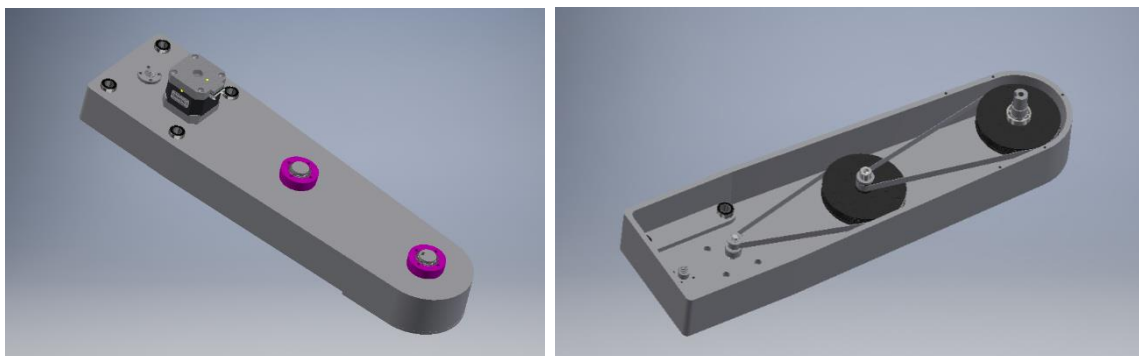
Obrázek 11 – Návrh hlavního ramene

Konstrukce hlavního ramene je jednoduchá. Obsahuje dvě základny, spodní a horní. Spodní základna má v sobě drážku, která zapadá do hnané hřídele a opírá se o axiální ložisko. Spodní a horní základna jsou spojeny pomocí vodících tyčí, které zajišťují axiální pohyb návazného ramene a zároveň fungují jako nosná konstrukce. Vodící tyče jsou k základnám připojeny pomocí svíracích klecí. Svírací klec je k základně přidělena pomocí šroubů.

Pohyb v ose z zajišťuje pohybový šroub, na kterém se pohybuje maticové pouzdro. Pohybový šroub má posuv na otáčku 8mm. Při předpokladu, že budeme mít na jednu otáčku posuv 8mm nám vznikne nepřesnost v ose $\Delta Z = 8\text{mm}$. Tato nepřesnost je o řády vyšší než je potřeba k dosažení potřebné přesnosti, proto jí musíme řešit správným výběrem motoru nebo motoru s kombinovanou převodovkou.

1.5.4 Návrh druhého ramene

Druhé rameno navazuje na hlavní rameno. Jeho návrh je zobrazen na obrázku č. 12.



Obrázek 12 – Model druhého ramene

Rameno se skládá z hlavního tělesa, které je navrženo pro tisk na 3D tiskárně. Tuhost hlavního tělesa je simulována dle přílohy A. V hlavním tělese jsou umístěny pouzdra na vodící tyče, která se nasadí na vodící tyče v hlavním rameni. Vodící pouzdra zajišťují axiální pohyb po vodících tyčích. Dále je v hlavním tělese mezi pouzdry umístěna pohybová matice a motor na elektrickou energii. Posuvná matice přenáší sílu na pohybovou matici při rotačním pohybu šroubu hlavního ramene a tím zajišťuje pohyb po vodících pouzdrech. Vodící pouzdra jsou zajištěna pomocí zajišťovacích kroužků.

Na rameni je umístěný elektrický motor, který bude specifikován v následující kapitole. Na motoru je nasazený a zajištěný šroubem ozubený pastorek, který má 16 zubů a přenáší moment z motoru na střední převodové kolo. Velké převodové kolo z_2 má 110 zubů a menší ozubené kolo z_3 má 23 zubů. Řemenové soukolí přenáší převod na výstupní ozubené kolo z_4 se 110 zuby. Střední převodové kolo je umístěno na hřídeli, které je uloženo ve dvou ložiskách. Výstupní kolo přenáší moment na hřídel a ta přenáší moment na další rameno. Hřídel je umístěna ve dvou ložiskách a má v sobě drážku a závit pro připevnění následujícího ramena. Převodový poměr „ i “ na výstupní hřídeli je spočítán dle vzorce č. 1.8.

$$i = \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} = \frac{110}{16} * \frac{110}{23} = 32,9 \quad (1.8)$$

Na jednu otáčku motoru se hřídel otočí $1/32,9$. Na základě této informace můžeme spočítat krok po kružnici ramena pomocí převodového poměru a délky ramena dle vzorce č. 1.9.

$$\Delta B_{xy} = \frac{PI * d}{krok} = \frac{3.14 * 2 * 276}{32,9} = 52mm \quad (1.9)$$

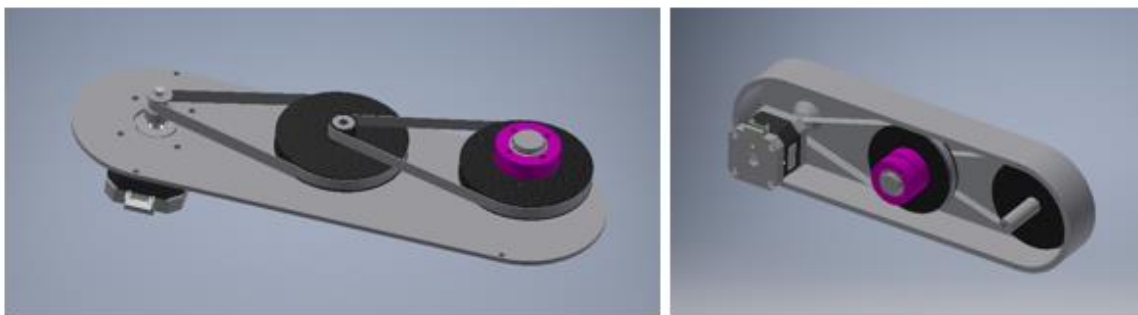
Pokud bychom nepoužili převodovku nebo motor s menším krokem bude výsledná chyba ve výši vypočtené dle vzorce č. 1.10.

$$\Delta B_x, \Delta B_y = \frac{52}{\sqrt{2}} = 36,8mm \quad (1.10)$$

1.5.5 Návrh třetího ramene

Třetí rameno navazuje na druhé rameno. Rameno je spojeno pomocí hnané hřídele, do které je našroubováno pomocí šroubu. Hlavní těleso obsahuje drážku, která zapadá do hřídele. Pomocí této drážky se vymezi rotační posuv a je umožněn přenos momentu od hnacího elektromotoru do druhého ramene. Třetí rameno se skládá z hlavního tělesa a nosné desky, kdy hlavní těleso zajišťuje tuhost konstrukce. Hlavní deska obsahuje soukolí pro ovládání efektoru.

Konstrukce třetího ramene je zobrazena na obrázku č. 13. Vlevo je část s nosnou deskou, kdy na nosné desce je umístěn elektromotor, který bude ovládat efektor. Na elektromotor je nasazen a pomocí šroubu zajištěn ozubený pastorek z1 s 16 zuby. Z pastorku se přenáší moment přes řemen k pomocnému převodovému kolu, které je uchyceno ve dvou radiálních kuličkových ložiscích. Pomocné převodové kolo se skládá ze dvou ozubených částí. Hnané ozubené kolo z2 má 110 zubů a hnací ozubené kolo, které přenáší moment přes řemen a má z3 se 23 zuby.



Obrázek 13 – Model třetího ramene

Moment z pomocného kola je dále přenášen na výstupní ozubené kolo, které má 44 se 110 zuby. Výstupní ozubené kolo přes drážku přenáší moment na výstupní hřídel. Převod z elektromotoru na výstupní hřídel spočítáme pomocí vzorce č. 1.11

$$i = \frac{z_2 z_4}{z_1 z_3} = \frac{110}{16} * \frac{110}{23} = 32,9 \quad (1.11)$$

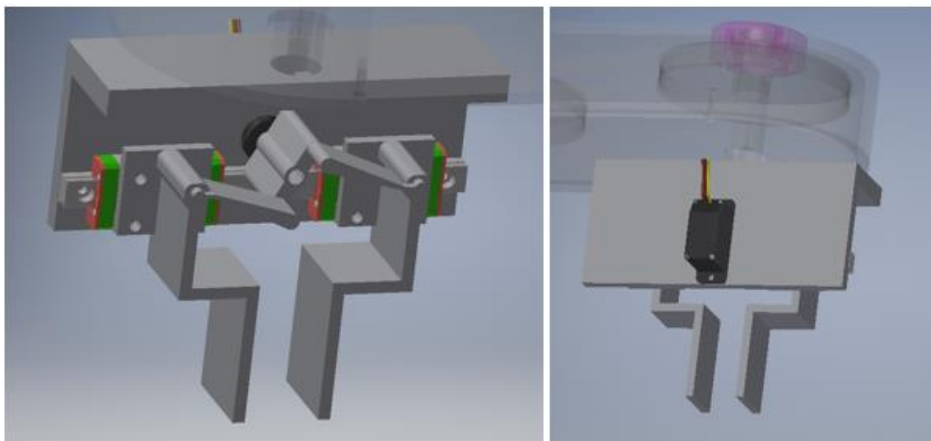
Při jedné otáčce motoru se hřídel otočí o přibližně 11°. Efektor je přímo nasazen na hřídeli, takže nelze mluvit o délkové chybě, ale o úhlové nepřesnosti. Z této úhlové nepřesnosti bychom měli vycházet při vybírání součástí pro konstrukci manipulátoru.

1.5.6 Konstrukce Efektoru

Efektorem nazýváme konečný člen manipulátoru nebo robota. V případě manipulátoru se jedná o úchopný systém, který je schopen zafixovat předmět, který má být přenášen. V případě robota se může jednat o účelný systém, který vykonává konečný proces. Například u svařovacího robota se jedná o svařovací systém, v případě montážního robota se může jednat například o rotační nástroj k zašroubování šroubů atd.

Efektor navržený pro náš manipulátor je zobrazen na obrázku č. 14. Je připojen k třetímu rameni pomocí výstupní hřídele, která má na konci drážku a díru se závitem. Na hřídel je nasazeno hlavní těleso, které má v sobě díru s drážkou přesně tak, aby zapadla přesně do hřídele. Poté se pomocí šroubu zajistí proti axiálnímu posuvu vůči hřídeli.

Samotný efektor má jednoduchou konstrukci, která se skládá z hlavního tělesa, z motoru převodového tělesa, konektorů, pojízdného vedení a ze dvou uchopovacích konečných členů.



Obrázek 14 – Konstrukce efektoru

Výstupní hřídel z třetího ramene nám umožňuje rotační pohyb efektoru. Pro zajištění samotného uchopovacího mechanismu potřebujeme další motor, který je naznačen na obrázku č. 14 vpravo. Samotná specifikace pohonu bude popsána v následující kapitole. Pohon je připevněn pomocí šroubů k hlavnímu tělesu efektoru. Rotační výstup pohonu přesahuje na druhou stranu, kde jsou umístěny hlavní prvky mechanismu.

Na obrázku č. 14 vlevo je vidět navržený mechanismus, který je uchycen na hlavním tělese. Tuhost a posuv zajišťuje lineární vedení, na kterém jsou připevněny uchopovací členy. Uchopovací členy mají jeden stupeň volnosti v ose lineárního vedení. Jejich pohyb můžeme ovládat pomocí mechanických konektorů. Mechanický konektor je připojen k tělesu pomocí rotační vazby a rotační vazby převodového tělesa. Převodové těleso je připevněno pomocí negativu rotačního členu a pomocí šroubu.

Převodový člen je důležitý člen efektoru, protože určuje posuv po ose lineárního vedení. Pohyb převodového členu je po kružnici, ale pohyb lineárního vedení je jen v jedné ose. Proto je potřeba pohyb převodového členu rozložit pomocí níže uvedeného vzorce č. 1.12.

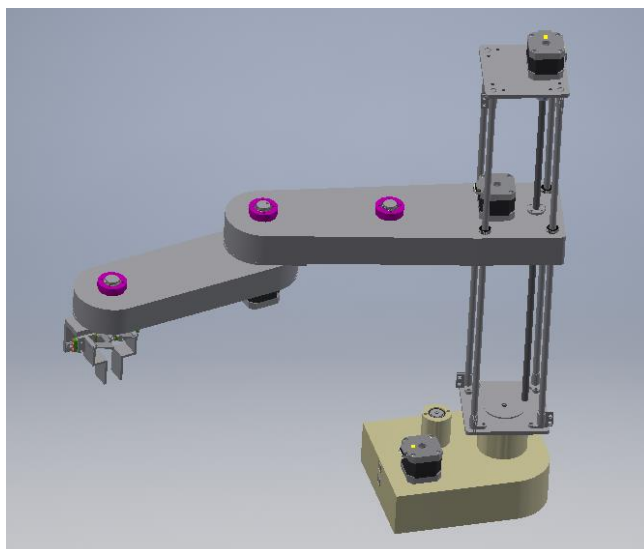
$$\Delta X = L + \cos r \quad (1.12)$$

Dle vzorce č. 1.12 vidíme, že efektor se pohybuje jen v jedné ose X, která je určena lineárním vedením. Daný krok bude záležet na aktuálním natočení převodového členu, který představuje ve vzorci $\cos r$, kde r je poloměr rotačního převodového členu. Převodový člen nám určuje rozsah pohybu uchopovacího členu. Délka L představuje spojovací člen mezi rotačním převodovým členem a uchopovacími prvky.

V této práci není stanoveno konkrétní zadání na manipulovaný objekt. Z tohoto důvodu se nebudeme zabývat manipulačním rozsahem. Konstrukce efektoru nám dává možnost, že při změně výrobku bychom mohli měnit převodový člen anebo uchopovací prvky. Častější variantou je výměna samotných uchopovacích prvků, což je v tomto případě relativně snadné a rychlé, protože uchopovací prvek je připevněn pouze šrouby.

1.5.7 Celková konstrukce manipulátoru

Na obrázku č. 15 je zobrazena konečná konstrukce se všemi výše popsanými sestavami dohromady.



Obrázek 15 – Model manipulátoru

Samotná báze robota musí být napevno připevněna ke statickému pevnému bodu např. zem nebo ke kovové konstrukci. Navržená konstrukce je uspořádána tak, aby se robot mohl otáčet nekonečně dokola. Z hlediska kabeláže to však není možné, protože by se po pár otáčkách překroutil. V rámci této práce tato skutečnost není zohledněna a pro praktické použití by bylo nezbytné pohyb omezit koncovými spínači nebo softwarově správným navrženým řídicím systémem.

Konečná navržená konstrukce má maximální dosah 500mm, což představuje přesah oproti zadání o 100mm. Výškový pohyb umožňuje konstrukce v rozsahu 400mm. Konečná konstrukce má 5° volnosti.

2 Výběr základních komponentů

2.1 Motory

Existuje několik hlavních variant elektro motorů, které lze použít jako pohon manipulátoru. Základní typy motorů budou shrnuty v rámci práce níže a bude vybrán vhodný typ motoru pro navrhovaný manipulátor.

2.1.1 Krokové motory

Krokový motor, jak už název napovídá, se pohybuje v jednotlivých krocích. Jednotlivé kroky jsou tvořeny spínáním příslušných statorových cívek a to tak, že pólové nastavce rotoru se otočí právě o rozdíl mezi vzájemným posuvem statorových a rotorových pólových nastavců. V dnešní době se nejčastěji používá hybridní krokový motor s délkou kroku $1,8^\circ$, který je velmi rozšířený a cenově dostupný. Momentová charakteristika krokového motoru dosahuje nejvyšších hodnot ve statické poloze, jelikož pólové nastavce rotoru jsou magnetickým polem natočeny souměrně k pólovým nastavcům cívek statoru, kterými právě prochází proud. Se zvyšujícími otáčkami moment krokového motoru klesá až k nule. [1]

2.1.2 Stejnoseměrné motory

Existuje několik základních druhů stejnosměrných motorů, které se dělí dle zapojení budícího vinutí. Jedná se o motory derivační, sériové a s cizím buzením. Momentová charakteristika je taková, že při rozběhu mají velký moment a se zvyšujícími se otáčkami dochází k jeho poklesu. Stejnoseměrné motory měly dominantní postavení v začátcích servo-řídících mechanismů pro roboty. Avšak jejich nevýhoda spočívá v mechanické komutaci prostřednictvím sběračů a uhlíků. Poslední vývoj v rámci těchto motorů však dokázal zvýšit servisní čas motoru až na 30 000 hodin. [1]

2.1.3 BLDC motory

BLDC je zkratka z anglického BrushLess DC a jedná se tedy o bezkartáčový stejnosměrný motor. BLDC motory v poslední době zaznamenaly velký rozvoj a nahrazují v některých aplikacích klasické komutátorové stejnosměrné motory. Jejich výhodou je, že odpadá mechanická komutace a s tím spojená údržba. BLDC motor je osazený

permanentními magnety a pevné vinutí je na statoru. Samotná komutace je zajištěna mimo motor pomocí elektroniky.

2.1.4 Střídavé motory

2.1.4.1 Synchronní motory

Synchronní motor, jak název napovídá, pracuje v synchronních otáčkách s točivým polem statoru. Jejich časté použití bylo u strojů, které vyžadovali velký výkon s konstantními otáčkami.

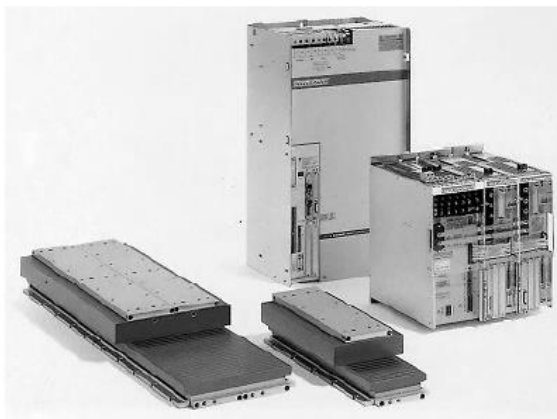
V poslední době zaznamenali obrovský rozmach synchronní motory s permanentními magnety, a to díky jejich jednoduché konstrukci a absenci vinutí na rotoru, které je nahrazeno permanentními magnety ze vzácných zemin. Motory s permanentními magnety jsou používány v rámci domácích spotřebičů až po pohony aut, tramvají i trolejbusů. Jejich zvyšující trend používání přineslo zdokonalení měničů synchronních motorů. Při řízení jsou použity stejné metody (např. vektorové řízení) jako pro asynchronní motory.

2.1.4.2 Asynchronní motory

Asynchronní motory jsou nejpoužívanější motory. Jejich konstrukce je jednoduchá a téměř bezúdržbová. Jsou používány až do výkonu 80kw a rotační rychlosti 10 000 rpm. Existují dvě základní varianty asynchronních motorů, a to s kotvou na krátko anebo s kotvou kroužkovou. Díky rozvoji měničů je lze v dnešní době dobře regulovat a řídit. [1]

2.1.5 Lineární motory

Lineární motor je druh pohonu, který nevykonává pohyb rotační, ale posuvný. Rotor a stator jsou naopak rozvinuté do roviny pohybu. Příklad lineárního motoru je zobrazen na obrázku č. 16.



Obrázek 16 – Lineární motor [1]

Lineární motory jsou používány pro kartézské manipulátory, kde se manipuluje v rovnoběžných osách. V porovnání s rotačními pohony je jejich největší výhodou vysoký výkon na jednotku váhy a také vysoká rychlost až do 3m/s akcelerace do 10g. V blízké budoucnosti lineární motory v některých oblastech, a to především v „high speed“ aplikacích, nahradí motory rotační. [1]

2.1.6 Elektrohydraulické servo motory

Elektrohydraulické servo motory se skládají z hydromotoru a servo ventilu, který ovládá motor. Jejich výhodou je, že lze dosahovat vysokého momentu a regulovat jeho chod v celém rychlostním rozsahu. Nevýhodou je nákladné zařízení pro přenos hydraulické kapaliny a s ním spojenou údržbou. [1]

2.1.7 Porovnání motorů

Tabulka č. 1 ukazuje vhodnost použití jednotlivých druhů motorů.

Tab. 1 Porovnání typů motorů pro použití manipulátorů [1]

Srovnání pohonů		
Typ motoru	Maximální výstupní výkon	Specifické vlastnosti
<i>Krokový motor</i>	<i>1 kw</i>	<i>Ovládání v otevřené smyčce</i>
		<i>Zahřívání při držení v jedné poloze</i>
		<i>Špatné dynamické vlastnosti</i>
<i>Stejnoseměrný motor</i>	<i>5 kw</i>	<i>Dobrá ovladatelnost přes proud kotvy</i>
		<i>Vysoký počáteční moment</i>
		<i>Opotřebení kartáčů</i>

<i>BLDC motor</i>	<i>10 kw</i>	<i>Bezúdržbový</i>
		<i>Komutace elektronicky</i>
		<i>Vysoký poměr výkon/hmotnost je při použití vzácných prvků pro magnety</i>
<i>Synchronní motor</i>	<i>20 kw</i>	
<i>Asynchronní motor</i>	<i>50 kw</i>	<i>Bezúdržbový</i>
		<i>Robustní</i>
		<i>Velký otáčkový rozsah</i>
		<i>Drahý na ovládání</i>

Vzhledem k naší potřebě relativně malého výkonu a použití malého stejnosměrného napětí přicházejí v úvahu BLDC motor a krokový motor.

2.1.8 Zvolení motoru

2.1.8.1 Výběr motoru efektoru

Nejdříve si zvolíme motor efektoru, abychom znali jeho váhu, vč. znalosti váhy předmětu, se kterým budeme manipulovat, pro návržení motorů dalších ramen. Pro udržení břemene 0,2kg, který působí tíhovou silou přibližně 2N, potřebujeme určit moment pro udržení břemene pomocí třecí síly. Třecí síla se vypočítá ze smykového tření a normálové síly.

Materiál uchopovacích členů zvolíme HIPS, protože je lehce tisknutelný na 3D tiskárně. HIPS je svými vlastnostmi podobný gumě, která má vysoký koeficient tření s ostatními materiály např. s dřevem 0.95. Pro zjednodušení výpočtu v rámci této práce budeme uvažovat hodnotu rovnou 1. Uchopovací polohu zvolíme při natočení konektoru na 45° a konektor má poloměr 0,03m. Z těchto informací vypočítáme potřebný moment motoru dle vzorce č. 2.1.

$$M_{min} = \frac{Fg * f * \sin 45^\circ * d_e}{2} = \frac{2 * 1 * 0,707 * 0,03}{2} = 0,021 Nm \quad (2.1)$$

Pro efektor jsem vybral modelářský servo MG90 motor s napájením 5V a momentem 0.25kg cm, který odpovídá momentu 0,024Nm. Servo motor je zobrazeno na obrázku č. 17 a váží 9g.



Obrázek 17 – Servomotor efektoru

2.1.8.2 Výběr motoru k otáčení efektoru

Samotný efektor i s motorem má 152g a s manipulačním objektem je to dohromady 352g. Převodovka má převodový poměr 32,9. Pro manipulaci by bylo vhodné ovládat minimálně efektor po 1°.

V diplomové práci nebudeme dále uvažovat brzdny moment převodovky, který je velmi nízký díky kuličkovým ložiskám. Jediný vliv na zrychlení a brždění otáčení bude mít moment setrvačnosti soustavy. Jelikož se ale moment setrvačnosti u členitých těles špatně stanovuje, zjednodušíme těleso efektoru na válec o poloměru 60mm. Poté můžeme vypočítat moment setrvačnost efektoru dle vzorce č. 2.2.

$$J_e = \frac{mr^2}{2} = \frac{0,152 * 0,06^2}{2} = 0,547 g * m^2 \quad (2.2)$$

Moment setrvačnosti nám vyjadřuje, že pokud bychom chtěli zrychlení 1 rad/s tak je potřeba vynaložit právě výše vypočtený moment setrvačnosti efektoru. Dále si stanovíme jednoduché pravidlo, že pokud chceme být schopni okamžitě rozjet a zastavit pohyb ramene, musí být moment setrvačnosti 50 krát větší než moment setrvačnosti. V tomto případě by tedy potřebný moment byl, 2,7 μNm. Potřebný moment je velmi malý a s ohledem na řízení a ovladatelnost v rámci své práce volím krokový motor Nema 17 17HS4023 s momentem 30 mNm a hmotností 132g. S tímto motorem a převodovkou je možno řídit jednotlivé kroky s krokem 0,05°.

2.1.8.3 Výběr motoru k otáčení 3. ramene

Samotné 3. rameno má váhu 0,548kg. Dále je potřeba přičíst efektor s břemenem a motor k otáčení ramena. Celková hmotnost soustavy je dohromady 0,832kg. Pro stanovení momentu je třeba opět spočítat momentem setrvačnosti. Tentokrát se spočítá moment setrvačnosti jako tyč s osou otáčení na konci dle vzorce č. 2.3.

$$Jr2 = \frac{ml^2}{3} = \frac{0,832 * 0,2^3}{3} = 6,656 g * m^2 \quad (2.3)$$

Dříve vybraný krokový motor je i v tomto případě dostatečný a proto jej zvolím opět. Tento motor je možné ovládat po 1,8° krocích. Konečný manipulační krok ramene v rovině xy je 36,8/200 tedy 0,18mm, což je dostatečná hodnota.

2.1.8.4 Výběr motoru k zvedání 2. ramene

Celková hmotnost, se kterou je potřeba pohybovat nahoru a dolů pomocí pohybového šroubu je i s břemenem 1,8kg, což odpovídá přibližně gravitační síle 18N. Ke zvedání je použit šroubový mechanismus se šroubem o středním průměru 7mm a stoupáním 8mm. Šroub je vyroben z oceli a matice z bronzu. Hodnota tření mezi nimi je 0,1. Z těchto

hodnot dokážeme vypočítat minimální potřebný moment ke zvednutí břemene, který vypočteme dle vzorce číslo 2.4.

$$\begin{aligned}
 M_{min} &= \frac{Fd}{2} * \frac{(\pi\mu d) - p}{\pi d + \pi p} + \frac{F\mu d}{2} \\
 &= \frac{18 * 0,007}{2} * \frac{\pi * 0,1 * 0,007 - 0,008}{\pi * 0,007 + \pi * 0,008} + \frac{18 * 0,1 * 0,007}{2} \\
 &= 1,445 \text{ mNm}
 \end{aligned}
 \tag{2.4}$$

Pro dobrou dynamiku jsem volil motor s minimálně 10krát větším momentem. Tím je BLDC motor od firmy ICAN model 42BLF-0330NBB s napájecím napětím 24V, maximálními otáčkami 3000 rpm, momentem 0,1Nm, výkonem 30W s integrovanou převodovkou 1:10 a váhou 0,33kg s integrovanými polohovými sensory. Díky tomu můžeme ovládat 6 poloh motru s převodem 1:10 a jsme schopni polohovat v ose Z po 0,13mm.

2.1.9 Výběr motoru báze k otáčení 1. ramene

Celková váha celého otočného ramene je i s manipulačním břemenem 3,03kg. Pro výběr motoru opět je potřeba znát moment setrvačnosti. Ten se spočítá dle vzorce č. 2.5.

$$J_{r2} = \frac{ml^2}{3} = \frac{3,03 * 0,4^3}{3} = 64,64 \text{ g} * \text{m}^2
 \tag{2.5}$$

Na základě výsledků výpočtu volím BLDC motor s vestavěnou převodovkou 1:50, viz obrázek č. 18.



Obrázek 18 – Zvolený typ BLDC motoru

Zvolený BLDC motor má šest kroků na jednu otáčku a navíc vestavěnou převodovku 1:50. Tyto informace jsou dostatečné pro stanovení konečné délky kroku dle níže uvedených vzorců č. 2.6 a 2.7

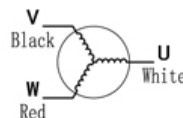
$$\Delta B_{xy} = \frac{\pi * d}{\text{krok}} = \frac{3.14 * 2 * 400}{23,9 * 300} = 0,35\text{mm} \quad (2.6)$$

$$\Delta B_x, \Delta B_y = \frac{105}{\sqrt{2}} = 0,24\text{mm} \quad (2.7)$$

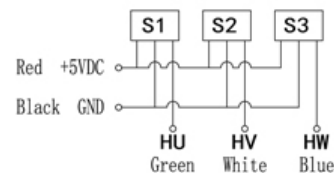
Na základě výše provedených výpočtů je zřejmé, že pomocí báze můžeme daný koncový bod polohovat pomocí chyby 0,24mm. Tuto chybu musíme přičíst následně k celkové chybě. Další parametry motoru jsou zobrazeny na níže uvedeném obrázku č. 19.

Technical Specifications		
ITEM	Unit	Info
Voltage	VDC	24
Rated power	W	60
Ratio		1 : 50
No load speed	rpm	100
Rated speed	rpm	80
Rated current	A	3.7
Peak current	A	11
Resistance	Ω	$1.07 \pm 10\%$
Inductance	mH	$2.1 \pm 20\%$
Poles		4
Rated torque	N · m	7.36
Peak torque	N · m	22.08
Backlash	arcmin	≤ 25
Rotor inertia	$g \cdot cm^2$	110
Voltage constant	V_{rms}/K_{rpm}	4.8
Efficiency		ca. 92%
Noise	dB	≤ 45
Sealing		ball bearing
Protective system		IP 40
Lubrication		life grease
Operating temperature	$^{\circ}C$	$-25 \sim +50$
Storage temperature	$^{\circ}C$	$-25 \sim +80$
Method of working		S1
Life time	h	≥ 5000
Weight	g	ca.1270

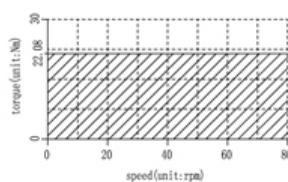
Motor winding diagram



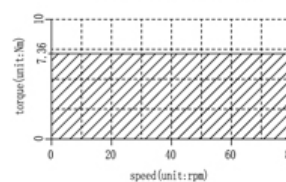
Hall diagram



Starting Torque & Speed



Running Torque & Speed



PN: PB60650391

Obrázek 19 – Parametry BLDC motoru

Při zatížení dosahuje motor otáček 80rpm a při nezatížení 100rpm. Jelikož motor na bázi ovládá rameno, které je uloženo v ložiscích, můžeme uvažovat nezatíženou hodnotu. Motor by tak otočil ramenem o celou otáčku za cca 12s. Což se zdá hodně, ale při poloměru otáčení se jedná o rychlost pohybu přibližně 210mm/s.

2.2 Převodovky

Elektrické pohony generují výkon s přijatelnou účinností jen při určitých otáčkách. Z tohoto důvodu nejsou, až na některé výjimky, vhodné pro přímé spojení s hnanou částí. V manipulátorech a robotech se nejčastěji používá převod z vysokých otáček a nízkého momentu na vysoký výstupní moment s nižšími otáčkami.

Přesto, že převodovka poskytuje převod z vyšších otáček na vyšší moment, vznikají v řetězci pohon – převodovka další problémy. Žádná převodovka není plně bez vůle, což je u přesných manipulátorů velký problém a každé zpřesnění se vyvažuje již dříve zmíněnou vyšší cenou. Druhým problémem, který může nastat, je že převodovka je zdrojem oscilací

a torzních kmitů. Z tohoto důvodu jsou na převodovky kladeny požadavky dle níže uvedené na obrázku č. 20.

Kvalitativní požadavky na převody robotů

Požadavek	Typická hodnota
velmi malá vůle	několik oblouk. minut
vysoká účinnost	80 - 95 %
velká redukce otáček v málo krocích	$i = (100 - 320):1$
malé momenty setrvačnosti	
malá hmotnost	
malé vnější rozměry	
kompaktnost	
malé ztráty třením	
vysoká tuhost	
vysoká hustota výkonu	

Obrázek 20 – Porovnání typů motorů pro použití manipulátorů

Nejdůležitějšími parametry jsou malá vůle a celková kompaktnost převodovky. Rozměry a hmotnost jsou dány momentem, které převodovka musí přenášet.

2.2.1 Převodovky na lineární převod

Převod z rotačního pohybu na lineární se používá v řadě aplikací, jako jsou kartézští manipulátory. Příklad lineárního převodu s požadavky lze nalézt na obrázku č. 21.



Obrázek 21 – Lineární převodovka [1]

U našeho manipulátoru využíváme lineární převodový mechanismus u osy Z, kde měníme výšku prvního ramene vůči základně. Převodový mechanismus je konstruován za pomoci pohybového šroubu a pohybové bronzové matice. Otáčením motoru o jednu celou otáčku se posune rameno o výšku 8mm, což je dáno stoupáním pohybového šroubu. Tyto pohybové šrouby se používají např. v 3D tiskárnách. U větších aplikací, kde se přenášejí větší síly, se používají kuličkové matice. Šroub má půl kulatý profil a matice obsahuje valivá tělesa, čímž je zmenšeno tření při pohybu.

Námi použitý pohybový šroub je z oceli a matice je vyrobena z bronzu. Tření udávané ocel/bronz je v hodnotě 0.1. Oproti kuličkovým šroubům se jedná o vysokou hodnotu, protože ta se běžně pohybuje řádově v setinách. Bohužel oproti našemu mechanismu je cena až 10krát větší. Maximální únosnost našeho 8mm šroubu je 1420N, což je dostatečná hodnota pro náš manipulátor.

2.2.2 Převodovky rotačního pohybu

Převodovky rotačního pohybu jsou aplikovány víceméně ve všech rotačních ústrojích manipulátorů. Existuje řada rotačních převodů a nejčastěji se jedná o:

- ozubené,
- harmonické,
- řemenové,
- řetězové,
- cyklopřevody,
- kloubové.

[2]

Pro náš manipulátor jsme využili především řemenové převody a to z důvodu, že při správném napnutí řemenu lze odstranit vůli. Jako řemen jsme použili rozvodový řemen GT1, který se vyznačuje půl kruhovým profilem, je dobře dostupný na trhu a vyznačuje se i nižší cenou. Maximální síla, kterou řemen vydrží je 800N. Používá se především v aplikacích, kde je potřeba nižší přenášený moment jako například u 3D tiskáren. Ozubená kola pro převod byla vymodelována pomocí grafického programu a byly navrženy k vytištění na 3D tiskárně.

2.3 Spojky

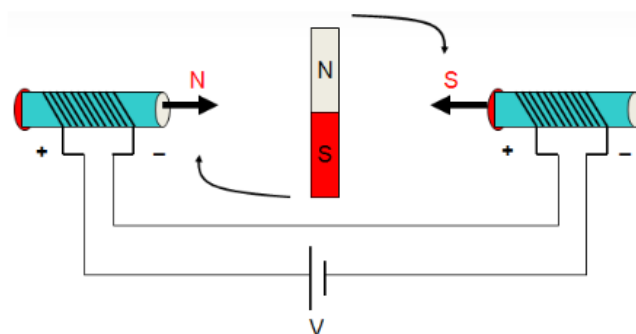
Spojky jsou používány pro spojení hnané a hnací části. Spojky jsou důležitou součástí hnacího řetězce, protože ovlivňují jeho chování. Jejich použití bývá různé od vyrovnání nesouososti, tlumení kmitů nebo bezpečnostní spojky, které se přeruší při překročení přenášeného momentu a tím zabrání větším škodám, které by mohly vzniknout. [2]

U našeho manipulátoru není použit žádný speciální typ spojek. Pro spojení hnané a hnací části je použit mechanismus drážka/pero. Drážka je vyrobena na hřídelích a pero působí jako element, který přenáší moment. Výhoda tohoto spojení je, že se jedná o spojení bezvúlové.

3 Návrh a realizace výkonového měniče

Výkonový měnič je navržen pro motor, který ovládá bázi. V předchozí kapitole byl vybrán BLDC motor, který je vyobrazen na obrázku č. 18, a informace o jeho parametrech byly prezentovány na obrázku č. 19.

Pro realizaci měniče je potřeba popsat princip fungování BLDC motoru. Základní princip fungování motoru je zobrazen na obrázku č. 22, kde rotor motoru je nahrazen permanentním magnetem. Stator představují cívky připojené ke zdroji napětí. Proud procházející cívkou vytvoří magnetické pole, které k sobě přitahuje póly rotoru a vytvoří tak sílu, která pootočí rotorem.



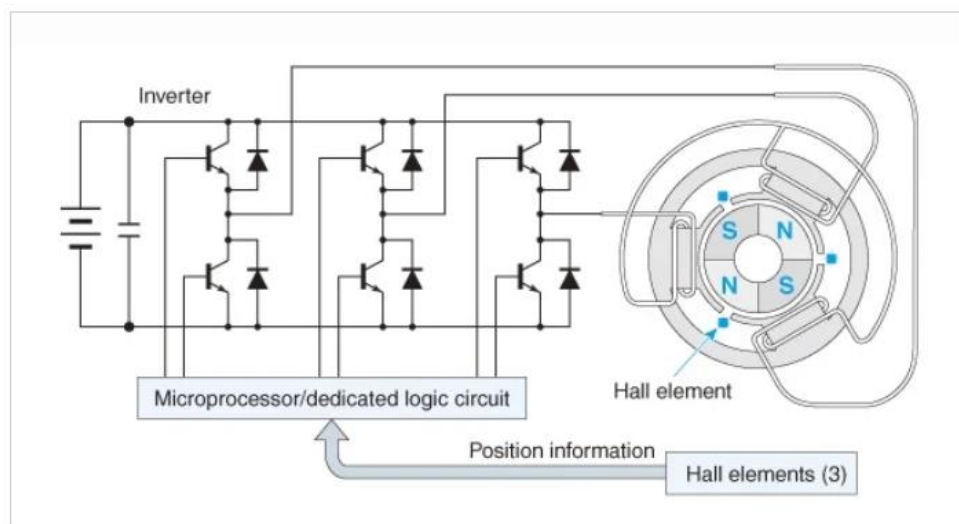
Obrázek 22 – Princip BLDC motoru

Jakmile se póly rotoru přiblíží k cívce, je potřeba změnit polaritu proudu a tím se změní i polarita magnetického pole cívky. Permanentní magnet s cívkou pak vytvoří moment, který otáčí rotorem. V případě zobrazeném na obrázku č. 21 by bylo obtížné zajistit otáčivý pohyb, protože není zajištěno, že se rotor otočí daným směrem. Pro zajištění rotačního pohybu by bylo potřeba přidat více pólů v rotoru nebo přidat statorové vinutí.

Mezi hlavní parametry motoru patří napájecí napětí 24V, maximální špičkový proud 11A a zátěžový proud 3,7A. Motor má zabudovanou převodovku 1:50 a je dimenzován na zátěžové otáčky 80 rpm. Pro napájení měniče bude využit univerzitní laboratorní zdroj DIAMETRAL P230R15D, který umožňuje plynulou regulaci napětí od 0 do 30V a omezení vstupního proudu od 0,1A do 4A.

3.1 Princip měniče BLDC motoru

Vybraný BLDC motor má čtyři magnetické póly a tři satorové vinutí zapojené do hvězdy jako je zobrazeno na obrázku č. 23. U klasických stejnosměrných motorů je komutace zajištěna mechanicky. U BLDC motorů se komutace realizuje pomocí měniče a vnějšího logického obvodu, který měnič ovládá. Na obrázku č. 23 se měnič skládá z 6 spínačů a zpětných diod. Spínače jsou ovládány pomocí mikroprocesoru. Pro zajištění toho, aby procházel satorovou cívkou proud je potřeba, aby byl sepnut jeden horní a jeden spodní spínač. A protože jsou satorové cívky spojeny do hvězdy, bude proud procházet vždy nejméně dvěma cívkami. To jakým směrem a jakými cívkami bude procházet proud, závisí na kombinaci sepnutých spínačů.



Obrázek 23 – Schéma měniče BLDC motoru

K otočení BLDC motoru je potřeba spínací sekvence dvojice spínačů, která vytvoří točivé magnetické pole. Tato sekvence spínání slouží k ovládní BLDC motorů a také se využívá u tzv. bez senzorových BLDC motorů. Jejich nevýhodou je, že není známa poloha rotoru. Samotné vytvoření točivé magnetického není dostatečnou podmínkou k plynulému otáčení rotoru. Např. se může stát, že magnetický tok je nedostatečný proti mechanickému momentu rotoru nebo může být magnetický tok naopak velký, což způsobí trhaný pohyb rotoru. Přesto je tento způsob řízení využíván tam, kde je dopředu znám průběh mechanického momentu rotoru jako např. u vysoko otáčkových BLDC motorů dronů.

V našem případě má BLDC motor v sobě zabudované Hallovy sensory, které jsou důležitou součástí, abychom byli schopni určit aktuální polohu rotoru. Což je důležité také pro brzdící moment i pro rozjezd. Detailněji se způsobu řízení BLDC motoru se sensory bude věnovat následující kapitola.

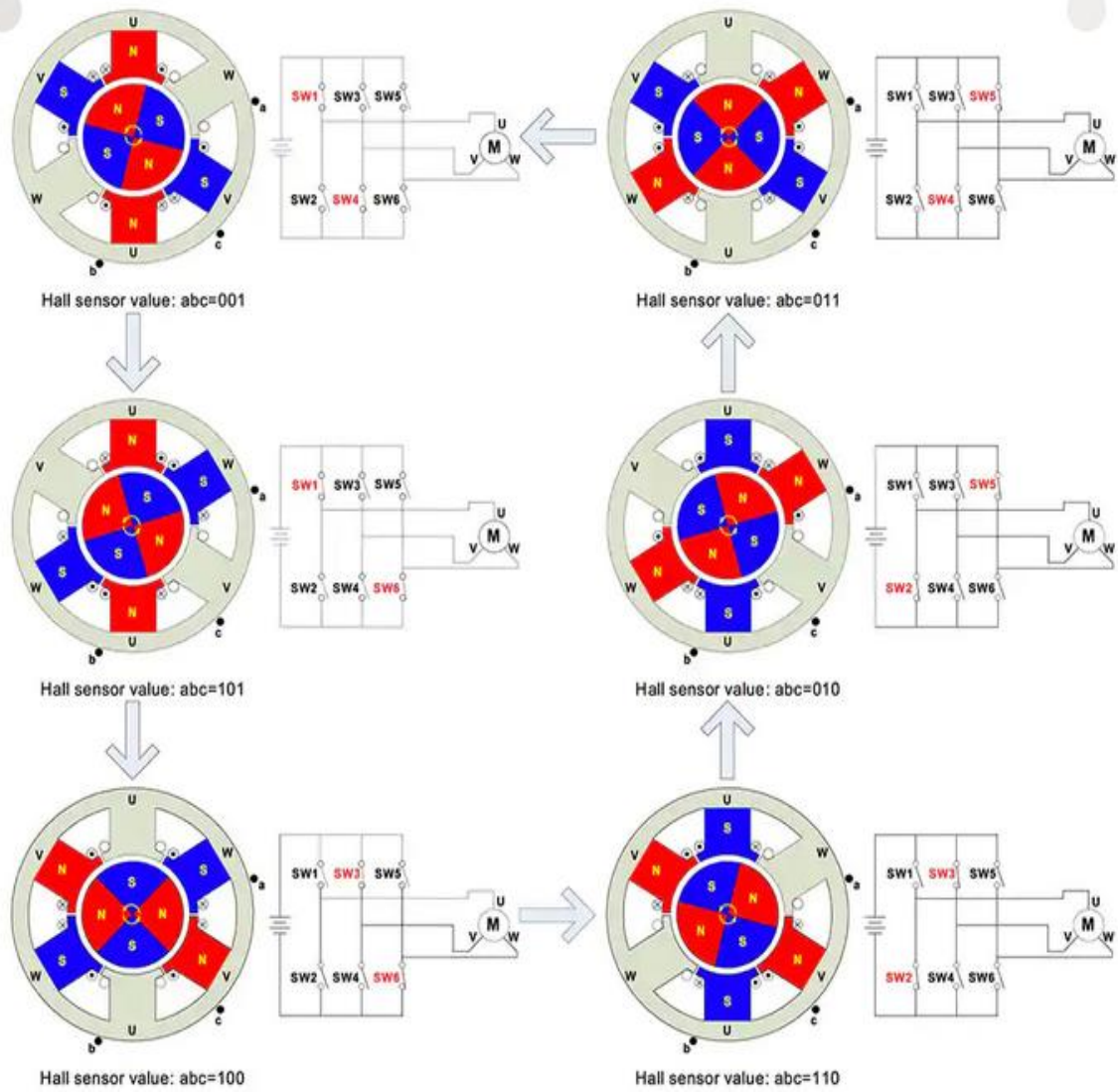
3.2 Řízení BLDC motoru se sensory

V BLDC motoru osazeném senzory bývá často i obvod, který generuje logickou jedničku nebo nulu v závislosti na poloze motoru. Pomocí více senzorů jsme schopni určit polohu motoru a podle toho sepnout příslušnou statorovou cívku dle požadovaného směru otáčení.

V našem případě jsou senzory napájeny pomocí 5V, viz obrázek č. 19 s parametry BLDC motoru. Napěťový výstup ze senzorů byl zjištěn pomocí multimetru při otáčení rotoru. Příslušná Hallova sonda má napěťový výstup 0,3V nebo 0V. Jako logickou jedničku na ADC převodníku nastavíme napěťovou hranici 0,25V. Nad tuto hodnotu budeme považovat výstup za logickou jedničku a pod touto hranicí jako logickou nulu.

Řízení BLDC motoru se sensory je zobrazeno na obrázku č. 24, kde je zobrazen 4 pólový motor se třemi statorovými cívkami U, V, W. Jednotlivé obrázky nám ukazují jednotlivé kroky rotoru při jeho otáčení. Směr otáčení rotoru na obrázku č. 24 probíhá protisměru hodinových ručiček.

Hallovy senzory jsou na obrázku č. 24 označené písmeny A, B, C. Jejich výstupní hodnota je zapsaná pod obrázky jednotlivých kroků pootočení rotoru. Uvedená hodnota určuje jaké spínače je potřeba sepnout, aby se rotor posunul o další krok. Sepnutím vyznačených spínačů dle jednotlivých obrázků níže dosáhneme toho, že se na konkrétních statorových cívkách vytvoří magnetické pole, které přitáhne rotor do potřebné polohy a tím dojde k jeho otočení. Obrázek č. 24 ukazuje posloupnost kroků, aby bylo dosaženo celé jedné otáčky.



Obrázek 24 – Princip otáčení BLDC motoru

Proto, aby bylo možné mikrokontrolérem řídit jednotlivé kroky, je potřeba sestavit komutační tabulku č. 2, která označuje, v jaké poloze rotoru jsou jednotlivé spínače sepnuty. Tabulka se poté implementuje do programového řešení ovládání měniče.

Tab. 2 Komutační tabulka

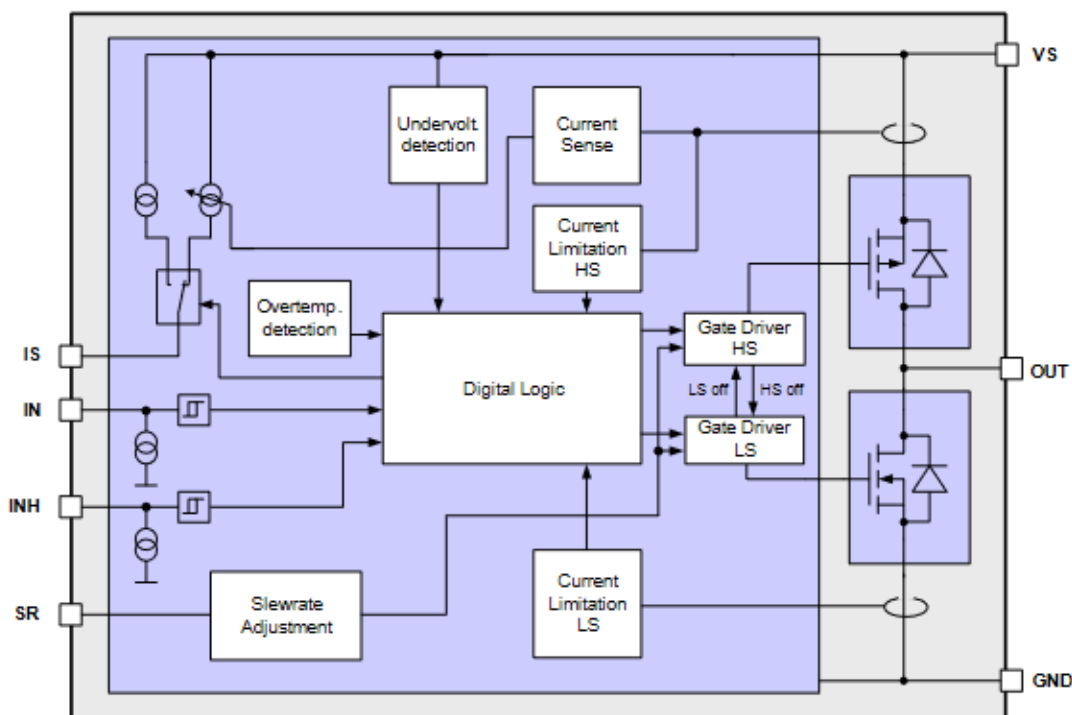
Komutační tabulka					
Sensory polohy			Spínače fází		
A	B	C	U	V	W
0	0	1	H	L	X
1	0	1	H	x	L
1	0	0	x	H	L
1	1	0	L	H	x
0	1	0	L	x	H
0	1	1	x	L	H

V komutační tabulce ve sloupcích ABC je označena pozice rotoru, které odpovídá sepnuté poloze spínačů. Písmeno H značí sepnutý horní spínač u dané fáze z anglického “High”. Písmeno L značí sepnutý dolní spínač z anglického “Low” a křížek značí, že v dané fázi není sepnutý žádný spínač.

Výhodou BLDC motoru je to, že sepnutím spínačů je motor schopen držet moment v dané poloze. Což je důležitá vlastnost v případě našeho manipulátoru, která je potřeba pro brždění či držení momentu namísto.

3.3 Návrh měniče

Nejdůležitější součástí měniče jsou půlmůstky. Půlmůstek je často realizován pomocí dvojice MOSFETů a antiparalelních diod. Jako hlavní součástku jsem zvolil BTN8962, která splňuje parametry pro ovládání našeho vybraného BLDC motoru. Součástka BTN8962 je integrovaný půl můstek. Vnitřní schéma integrovaného obvodu je vyobrazeno na následujícím obrázku č. 25.



Obrázek 25 – Diagram součástky BTN8962

BTN8962 má 4 vstupy a jeden výstup. Kde vstupní piny IN a INH slouží k ovládní výstupu. Pokud je na pinu INH napětí 3V-5V, tak je aktivovaná spodní strana a pokud stejné napětí ještě přiložíme na pin IN, pak sepne horní polovinu můstku, ale zároveň rozepneme spodní. Pin SR slouží k nastavení rychlosti sepnutí výstupních spínačů. Poslední vstupní pin IS lze použít na snímání výstupního proudu.

Výhoda BTN8962 je v tom, že nikdy nemůže být najednou aktivován spodní a horní spínač a tím způsobit zkrat. Tato ochrana je důležitá při prototypování, jako je tomu v našem případě. Další ochranou, kterou BTN8962 má a která je naznačena v diagramu na obrázku č. 25 je ochrana proti nadměrnému proudu. BTN8962 limituje maximální hodnotu proudu na hodnotu cca. 70A v závislosti na teplotě. Další ochrana je proti přehřátí. Pokud BTN8962 detekuje přehřátí, tak spadne do Stand-by módu, při kterém nelze spínat horní část půlmůstku do okamžiku, kdy teplota neklesne pod hodnotu 85°C.

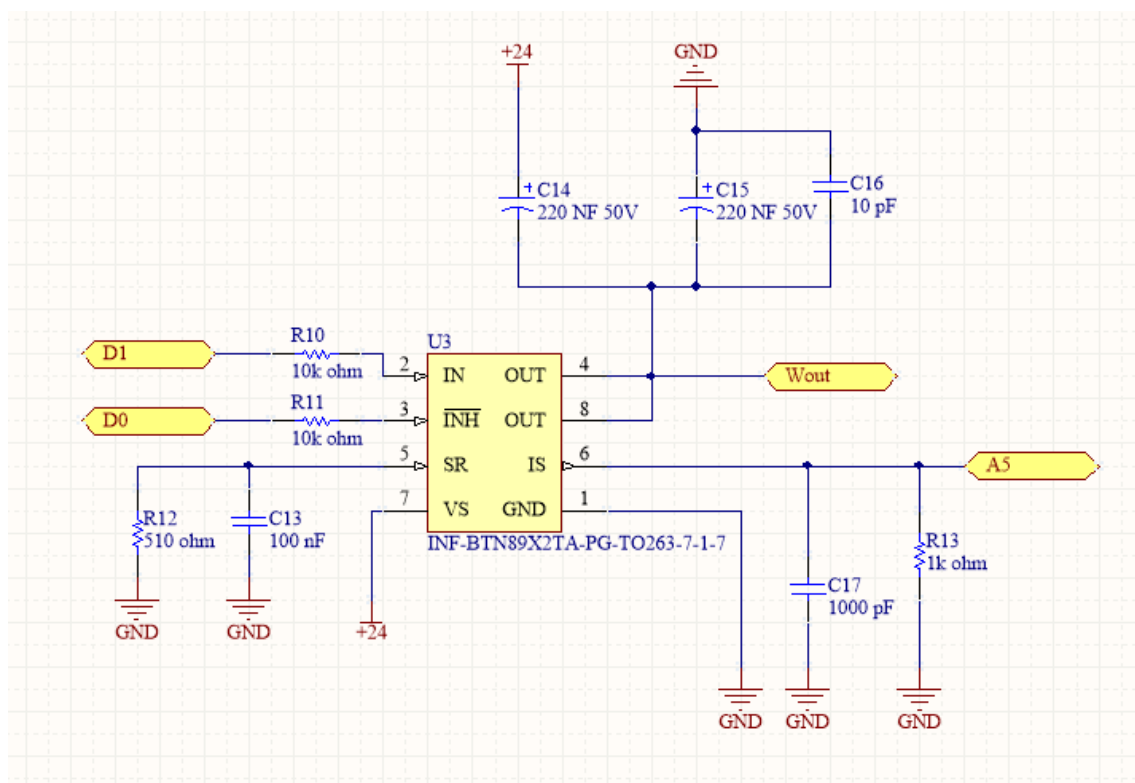
Další parametry BTN8962 jsou uvedeny v tabulce č. 3. Základní parametr součástky, kterým je napájecí napětí, je dostatečný pro napájení námi zvoleného BLDC motoru. Z ostatních parametrů je důležitý např. Fall/Rise čas, který omezuje frekvenci PWM.

Tab. 3 Provozní parametry BTN8962

Provozní parametry BTN8962	
Napájecí napětí	5,5-40V
Dlouhodobý výstupní proud	30A
Krátkodobá proudová špička	70A
Maximální teplota	150°C
Teplota sepnutí ochrany	85°C
Zpoždění při sepnutí	5,5us
Fall/Rise čas	0,25us

3.4 Návrh schématu měniče

Schéma měniče je navrženo v programu CircuitMaker. Výsledné schéma se nachází v příloze č. C. Schéma bylo sestaveno na základě doporučení z datasheetu BTN8962. Na obrázku č. 26 se nachází schéma můstku pro jednu cívku W, které bude dále detailněji popsáno.



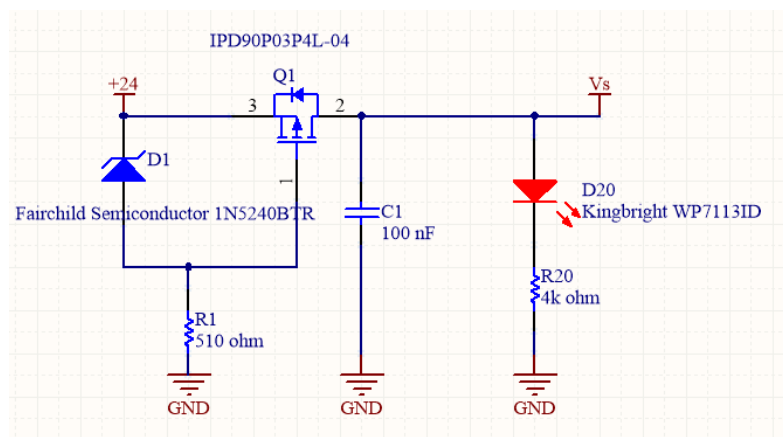
Obrázek 26 – Schéma můstku cívky W

Piny D1, D0 značí vstupní digitální piny mikrokontroléru, kterými bude ovládáno spínání výstupu pomocí pinů IN a INH. Mezi piny D0, D1 a IN, INH byl vložen 10kΩ rezistor, který omezuje proudové špičky.

Mezi Pin SR (Slew rate) a GND byl vložen 510Ω rezistor a 100nF kondenzátor. Pin SR slouží k nastavení Rise/fall času, který nám udává zpoždění sepnutí výstupních spínačů. Nastavení SR se používá k úpravě elektromagnetické kompatibility, aby zařízení splňovalo normy pro elektromagnetické rušení. Datasheet BTN8962 neobsahuje formuli pro nastavení SR, ale udává tři hodnoty rezistorů a dané časy zpoždění. K vybranému rezistoru uvádí zpoždění $4\mu\text{s}$. Zpoždění sepnutí nás limituje maximální PWM frekvenci, protože PWM frekvence by měla být minimálně 10krát vyšší než spínací čas. Toto zpoždění tedy limituje maximální PWM frekvenci na 25kHz . Protože datasheet dále uvádí, že slew rate závisí na napětí na pinu SR, je pro jeho stabilitu vložen 100nF kondenzátor.

Pin IS slouží k získání hodnoty výstupního proudu a je spojen se zemí o PULL DOWN rezistorem o hodnotě $1\text{k}\Omega$, který slouží jako převodník proudu na napětí. Z důvodu rušení je přidán keramický kondenzátor o hodnotě 1000pF umístěný co nejbližší k výstupu do ADC převodníku mikrokontroléru. Na výstupu jsou přidány dva elektrolytické kondenzátory 220nF a jeden keramický 10pF . Kondenzátory jsou na napětí 50V , aby existovala rezerva při překmitu.

Datasheet dále doporučuje před vstupní napájecí obvod vložit ochranu proti přepólování. Navržený obvod je znázorněn na obrázku č. 27. Hlavní součástí je P-MOFSET IPD90P0304 a dále zenerova dioda, která je zde umístěna pro ochranu Gate-MOFSETu. V případě přepólování bude Zenerova dioda polarizována propustně a vytvoří se na ní napětí cca 1V a tím se tranzistor uzavře.

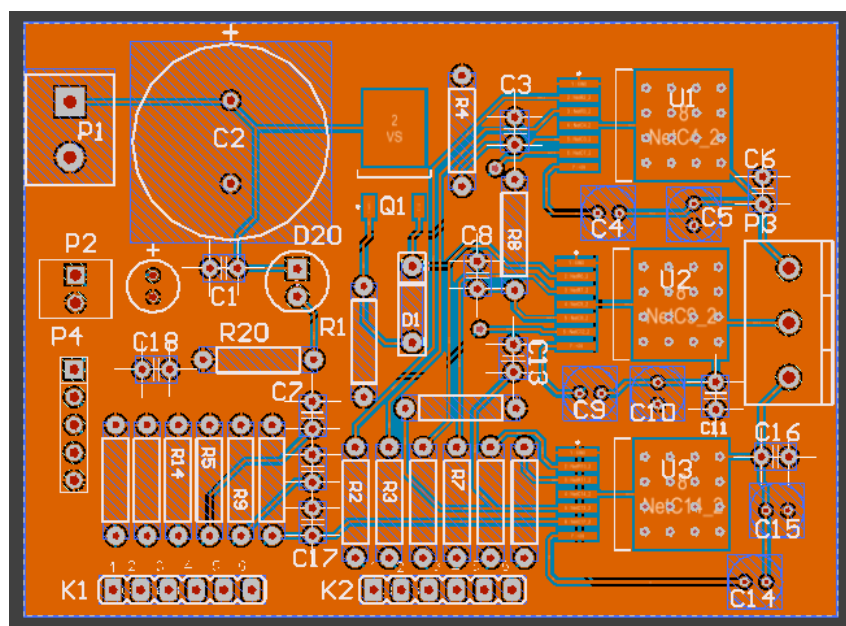


Obrázek 27 – Ochranný obvod proti přepólování

Dále je na vstupu přidána led dioda, která indikuje, že je měnič pod napětím.

3.5 Realizace měniče

Návrh plošné desky byl realizován opět v programu CircuitMaker. Výsledná deska plošného spoje je vyobrazena na obrázku č. 28, kde je vidět i footprint součástek. Nejčastěji byly zvoleny součástky s drátovými vývody pro jednodušší pájení. Plocha desky je na obou stranách pokryta polygonem rozlité mědi, který má potenciál GND. Program CircuitMaker umožňuje nastavení pravidla na hlídání izolační vzdálenosti mezi cestami. Toto pravidlo bylo zvoleno na hodnotu 50V, která je dostatečná pro 24V motor a dále byla nastavena velikost cesty na hodnotu 20A.



Obrázek 28 – Plošná deska měniče

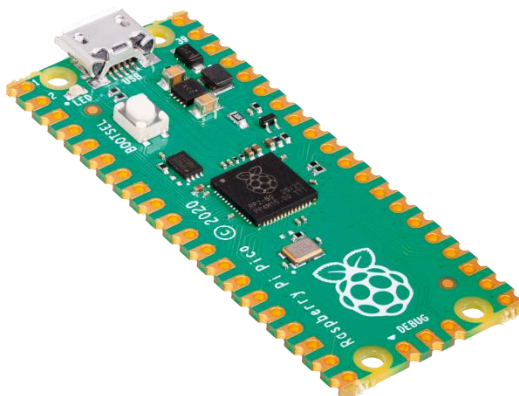
Samotná výroba plošné desky byla realizována ve společnosti JLCPCB v Číně, kam byly zaslány výrobní soubory vygenerované programem CircuitMaker. Finálně vyrobený a osazený měnič je zobrazen na obrázku č. 29.



Obrázek 29 – Výsledná podoba měniče

3.6 Řízení výkonového měniče

Pro řízení výkonového měniče byl zvolen mikrokontrolér Raspberry Pico. Raspberry Pico je vývojová deska osazená chipem Dual Core Cortex M0 s taktom 133MHz a s 40 programovatelnými GPIO Piny s rozestupem 2,54mm pro snadné pájení. Celá deska je zobrazena na obrázku č. 30.



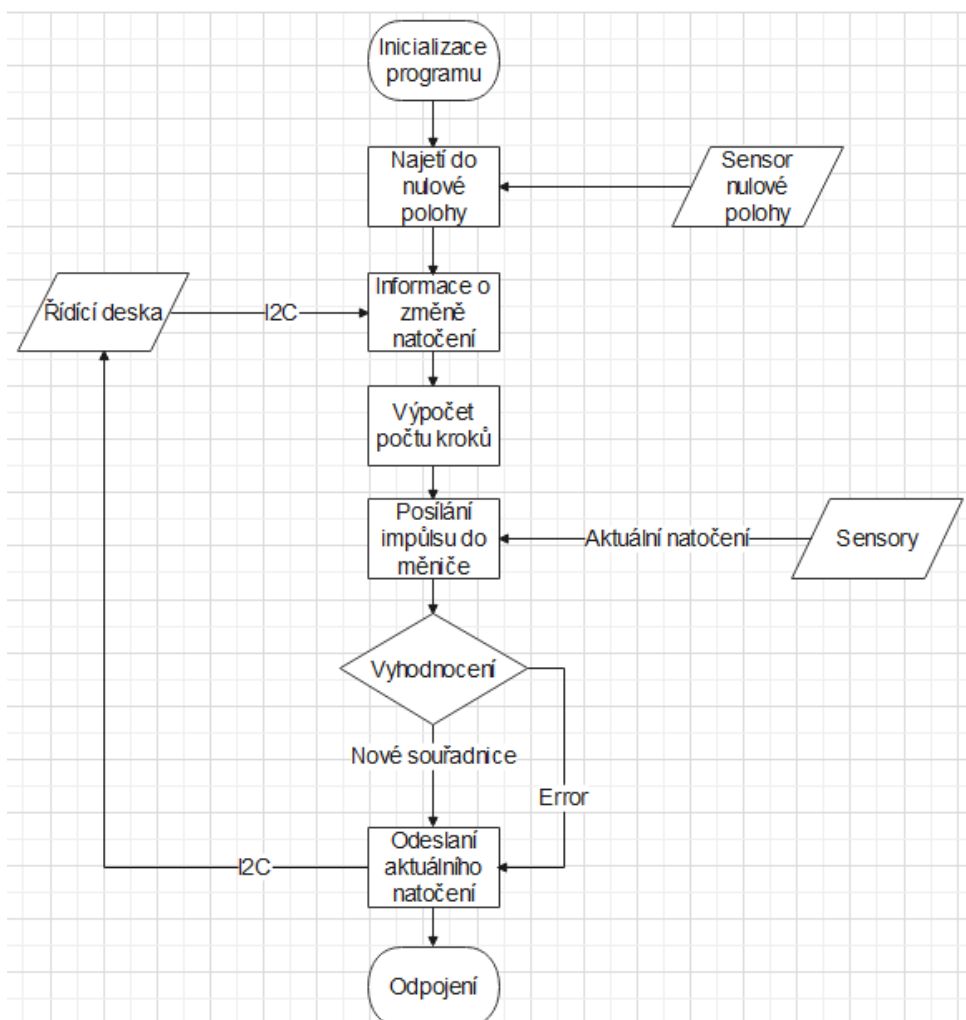
Obrázek 30 – Raspberry Pico

Raspberry Pico obsahuje USB port, takže ho lze jednoduše programovat bez převodníku a napájet pouze pomocí USB. V rámci vybraného mikrokontroléru jsou podporovány programovací jazyky C/C++ a micropython. Lze ho napájet napětím v rozmezí 3,3 – 5V.

Programu Mikrokontroléru popisuje obrázek č. 31. Nejprve mikrokontrolér inicializuje nulovou polohu, tím že posílá impulsy do měniče než dostane signál od koncového spínače

nulové polohy. Poté přes komunikaci I2C obdrží informaci o úhlu, na který se má rameno natočit. Mikokontrolér si z úhlu dopočítá potřebný počet kroků motoru.

Poté posílá impulsy do měniče a na základě zpětné vazby od sensorů odpočítává kroky. Když odpočítá potřebný požadovaný počet kroků zašle informaci o aktuální poloze. V případě, že se v určitém intervalu nedostane do požadované polohy a zašle řídicí jednotce chybovou hlášku a informaci o aktuální poloze.



Obrázek 31 – Výsledná podoba měniče

4 Návrh řídicího systému

4.1 Hlavní řídicí jednotka

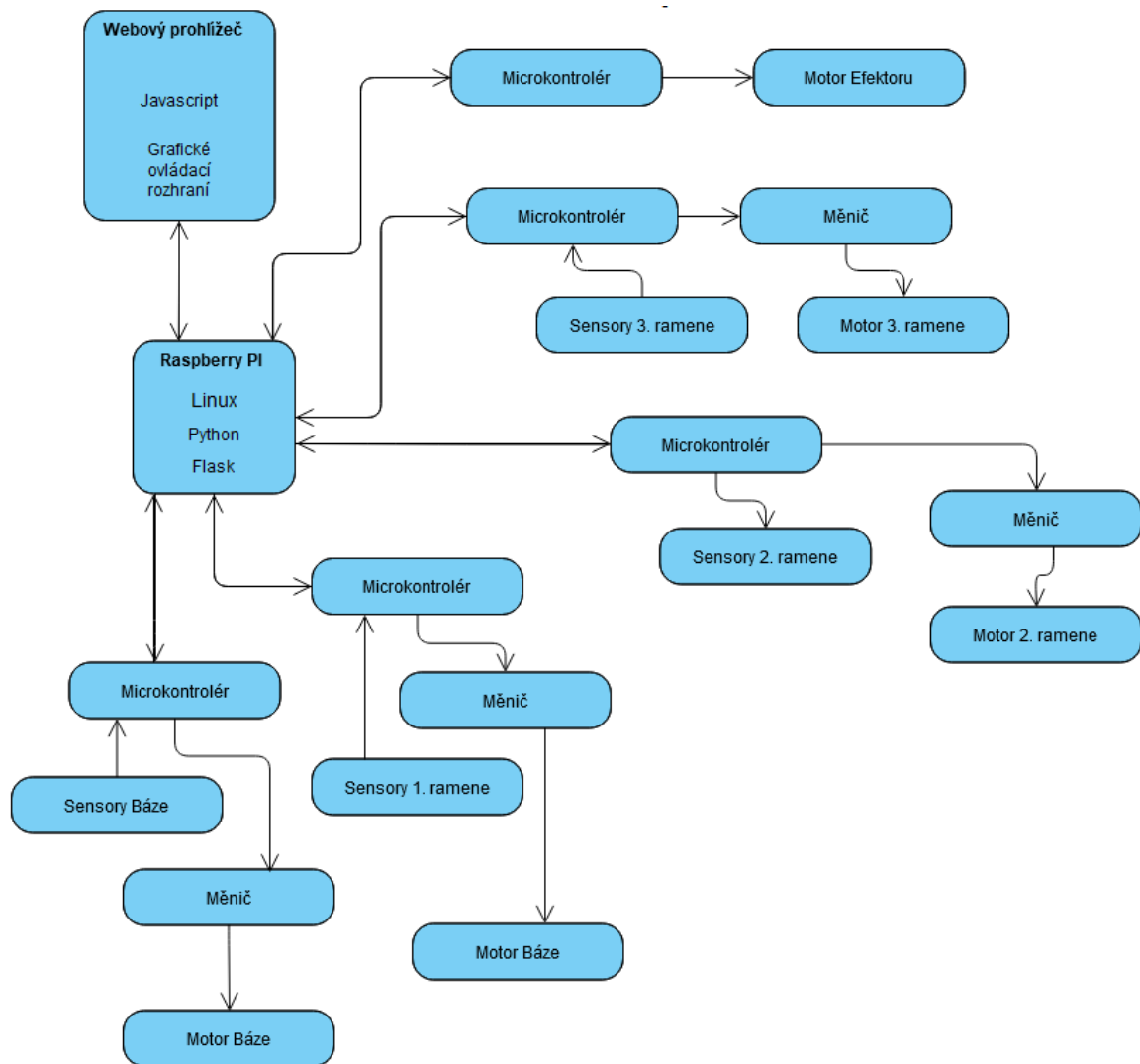
Výběr řídicího čipu vychází ze způsobu řízení a komunikace. Na trhu existuje obrovské množství čipů a jednotek, které by bylo možné pro řízení použít. Vzhledem ke znalostem programování vysoko úrovněových jazyků jako je Python nebo Javascript jsem zvolil jako nejvhodnější variantu Raspberry PI 4.

Hlavním čipem tohoto kompaktního počítače je 64-bit ARM-Cortex A72 s RAM pamětí až 8 GB. Hlavní výhodou je, že z hlediska stavby systému lze na Raspberry provozovat operační systém Linux a zároveň má výstupní/vstupní konektory pro přijímání/odesílání signálů, které se budou vhodné k řízení výkonového měniče.

Výhoda zmíněného operačního systému je také v tom, že na něm lze relativně jednoduše naprogramovat server a vytvořit tak ovládací interface přes webové prostředí. Je tedy možné vytvořit prostředí, které ovládá manipulátor odkudkoli, kde je přístup k internetu.

4.2 Blokové schéma řídicího systému

Zjednodušené schéma řízení manipulátoru je vyobrazeno na obrázku č. 32. Hlavní centrální jednotkou je Raspberry PI, na kterém je spuštěn server naprogramovaný v jazyce Python pomocí Frameworku Flask. Server komunikuje s uživatelem přes internet tím, že si uživatel do prohlížeče zadá IP adresu daného serveru a může zasílat příkazy odkudkoliv. Po zadání adresy server odešle program k uživateli. Program se spustí v prohlížeči uživatele. Uživatel následně ovládá manipulátor posíláním příkazů o natočení jednotlivých motorů manipulátoru pomocí grafického prostředí ve webovém prohlížeči. Po odeslání příkazu, dostane uživatel zpětnou vazbu o vykonání daného příkazu.



Obrázek č. 32 – Řídící schéma manipulátoru

Raspberry PI jako server komunikuje s jednotlivými kontroléry, které ovládají jejich příslušné měniče. Jelikož neexistuje zpětná vazba od motoru, tak musí kontrolér počítat provedené kroky, aby věděl aktuální polohu ramene. Z důvodu nezbytnosti získání referenčního bodu musí kontrolér natočit rameno do nulové polohy při každé inicializaci. Pro tento účel jsou jako jediné sensory, použity jsou koncové spínače. Koncové spínače zároveň omezí maximální a minimální hodnotu natočení. Dále koncové spínače disponují pouze signály HIGH nebo LOW, které kontrolér vyhodnotí pomocí okamžitého zachycení hodnoty tak, aby v případě potřeby zastavil okamžitě motor.

4.3 Hlavní řídicí jednotka

Jak již bylo popsáno dříve, byl jako hlavní řídicí jednotka vybrán počítač Raspberry PI. Raspberry PI je malý kompaktní počítač, který je zobrazen na obrázku č. 33.

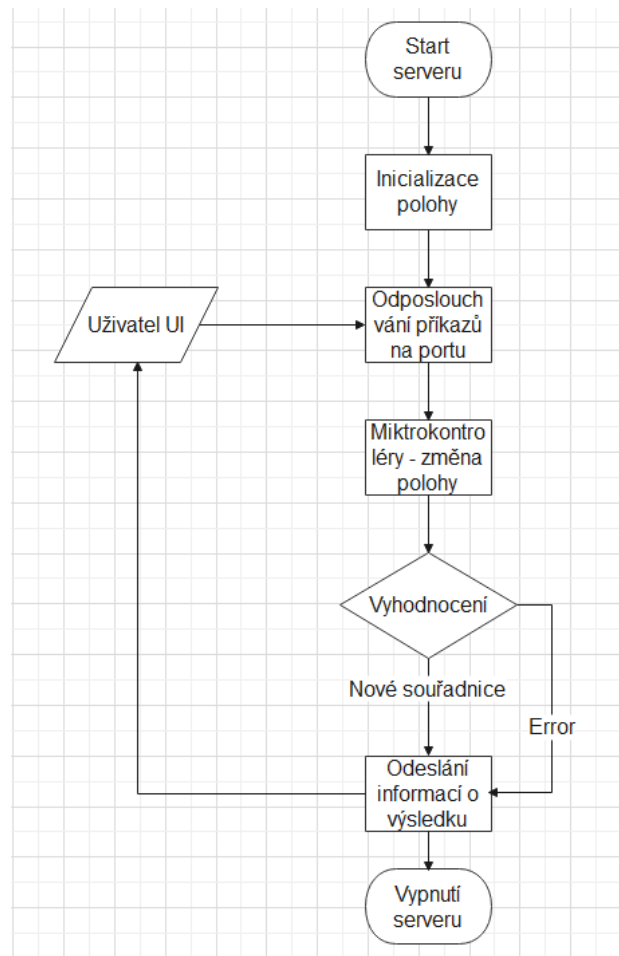


Obrázek 33 – Kompaktní počítač Raspberry PI

Hlavním čipem je 64 bitový procesor ARM Cortex. Raspberry PI s RAM pamětí 8 GB jako permanentní paměť je využívána externí SD karta, která může mít až 64GB. V případě, že by došlo k výpadku energie, tak je možné obnovit veškeré procesy, které na tomto počítači běžely v době přerušení.

Program, který byl napsán pro řízení manipulátoru, běží na operačním systému Raspbian, což je speciální verze operačního systému Linux optimalizovaná přímo pro Raspberry. Raspberry má v sobě také integrovaný Wifi a LAN modul, takže ho lze lehce připojit na internet a zasílat příkazy pro ovládání manipulátoru odkudkoliv. Důležitou vlastností je také to, že Raspberry má v sobě integrované GPIO, díky kterému lze jednoduše komunikovat přes komunikační protokol I2C s ostatními kontroléry.

Program, který ovládá manipulátor je naprogramován v pythonu. Pro jeho spuštění je potřeba nainstalovat Python interpretor, který čte kód napsaný v pythonu. Flowchart programu je zobrazen na obrázku č. 34.



Obrázek 34 – Flowchart programu manipulátoru

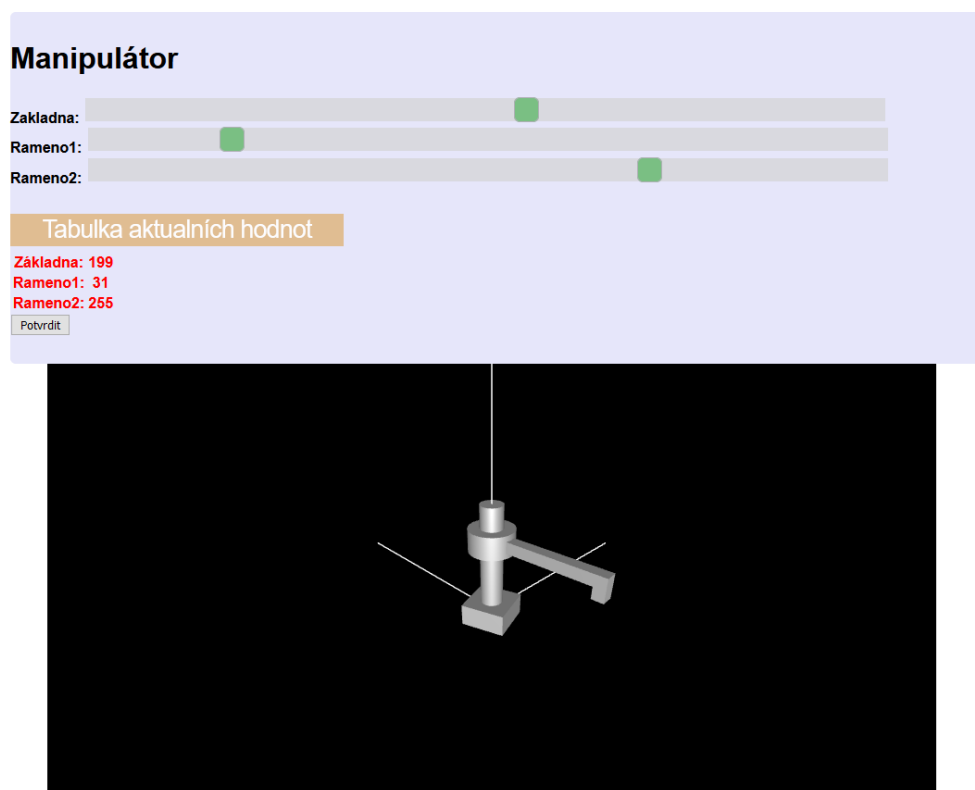
Aby program běžel tak jak má, je potřeba nejprve zapnout server. Server je programem, který odposlouchává specifický port. V případě, že přijde požadavek na tento server, tak server tento požadavek vyhodnotí na základě parametrů daného požadavku. Mezi hlavní parametry požadavku patří metoda, specifická URL adresa a případně přiložená data. Data jsou připojeny v těle zprávy. V našem případě se jedná o údaje, které uživatel zasílá z webového prohlížeče - například požadované natočení jednotlivých ramen. Tyto údaje program zpracuje a pošle je do příslušného mikrokontroléru. Mikrokontrolér na tento příkaz odpoví po dokončení pohybu zpět na server a ten následně odpoví statusem OK nebo chybovou hláškou se specifikací chyby. Program je spuštěn a odposlouchává port, dokud není externě ukončen.

4.4 Ovládání manipulátoru uživatelem

Uživatelské prostředí je napsáno v jazyce Javascript a zasazeno do Html tagů, tak aby bylo čitelné pro webový prohlížeč. Toto řešení je výhodné, protože neklade na uživatelský

počítač žádné speciální nároky a manipulátor lze ovládat z jakéhokoli zařízení, které je připojené k internetu a má nainstalovaný libovolný webový prohlížeč.

Program funguje tak, že uživatel zadá IP adresu mikropočítače Raspberry PI, který musí být připojený k internetu. Server má v sobě naprogramovaný příslušný HTML a Javascript program, který následně zašle uživateli. Tento program je čitelný pro webový prohlížeč, který zobrazí program do grafické podoby. Uživatelské prostředí, které se uživateli zobrazí, je zobrazeno na obrázku č. 35.



Obrázek 35 – Uživatelské rozhraní

Výše uvedené uživatelské rozhraní se skládá ze tří sekcí. První sekce je ta, kde pomocí posuvníků uživatel zadá úhel vybraného ramene. Druhá sekce zobrazuje aktuální polohu manipulátoru, kde jsou uživateli poskytnuty informace o jednotlivých nastavených hodnotách. Třetí sekcí je plátno, kde je zjednodušeně vyobrazený manipulátor a uživatel může vidět polohu natočení pro manipulaci s posuvníkem.

Třetí sekce je naprogramovaná pomocí knihovny Three.js. Jedná se o opensourcovou javascriptovou knihovnu, která poskytuje možnost naprogramovat 3D zobrazení v

internetovém prohlížeči. Základem je vytvoření scény a následné naprogramování jednotlivých kloubů a ramen. Program scény je přiložen na CD v příloze. Scéna zobrazuje natočení, které uživatel zadává v první části. Poté co klikne na tlačítko „potvrdit“, se odešle vybrané natočení ramen na příslušný server.

Komunikace mezi serverem a klientem je naprogramováno pomocí metody AJAX, což je zkratka pro “Asynchronous JavaScript and XML”. Jak z překladu vyplívá, jedná se o asynchronní komunikaci se serverem. To zjednodušeně znamená, že program se zpracovává řádek po řádku, ale vykoná se příkaz, který se odešle na server a čeká na odpověď. Jakmile odpověď přijde, tak program pokračuje ve vykonávání dalších příkazů. Výhoda komunikace pomocí AJAX je, že lze získat data na pozadí běhu programu, aniž by se zasahovalo do grafického uživatelského prostředí. Data jsou ve formátu XML a požadavek se vytváří pomocí XMLHttpRequest, což je funkce, která už je implementovaná v samotném prohlížeči. Jakmile přijde odpověď ze serveru, tak se jednotlivé polohy aktualizují v prostřední sekci UI a uživatel může znovu upravit natočení ramen a zaslat informace o požadovaném natočení na server.

Závěr

Cílem této diplomové práce bylo navrhnout celý systém manipulátoru, navrhnout a realizovat vybraný výkonový měnič pro zvolený motor manipulátoru a vytvořit systém pro jeho řízení.

První část práce se zabývala konstrukčním návrhem, kde došlo k popsání způsobu tvorby konstrukce a jednotlivých dílčích částí. Návrh konstrukce se rozdělil na jednotlivé funkční celky od základny, ramena a uchopovacího efektoru. Výstupem této části je navržený model, který je přiložen k této práci ve STEP souboru na CD.

Druhá část se zabývala výběrem samotných komponent k oživení manipulátoru. Byly v ní vybrány jednotlivé komponenty pro pohyb jednotlivých ramen a efektoru spolu se zdůvodněním jejich výběru.

Třetí část se zabývala návrhem měniče pro motor báze. V programu Circuit-maker došlo k návržení schématu měniče pro ovládání motoru. Zde byl realizován i jeho 3D model a byly vytvořeny výrobní podklady pro desku plošného spoje, který byl následně vyroben společností JLCPCB. Na desku plošného spoje byly následně napájeny vybrané komponenty a měnič byl oživen. Pomocí kontroléru Raspberry Pico byl měnič oživen a otestován na vybraném motoru. Program k pohybu motoru je přiložen k této diplomové práci.

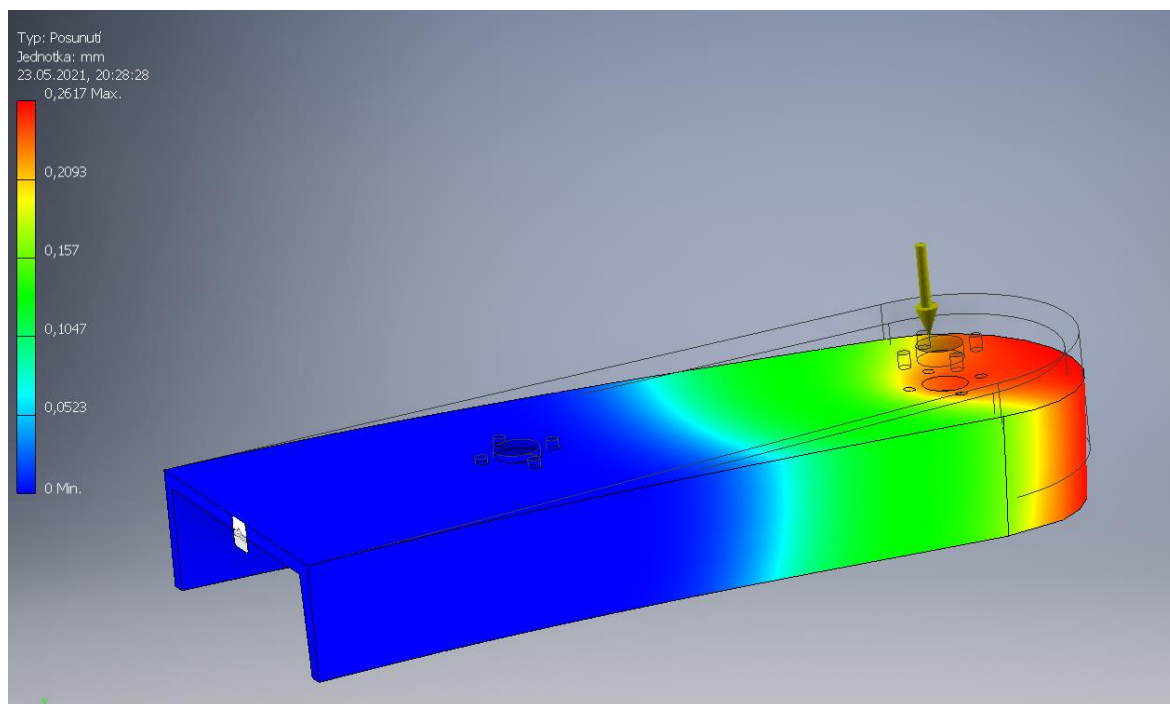
Poslední část se zabývala systémem řízení manipulátoru. Bylo navrženo schéma řízení a vybrán klíčová komponenta Raspberry PI, pro kterou byl navržený program, který ovládá manipulátor. Následně byl napsán webový server, který poslouchá příkazy přicházející z internetu, a který je dále deleguje na příslušné mikrokontroléry. Bylo navrženo grafické prostředí, ve kterém může uživatel jednoduše ovládat natočení jednotlivých ramen, tak aby bylo možno ovládat manipulátor z jakéhokoli zařízení, které má přístup k internetu a nainstalovaný webový prohlížeč. Tento program je též přiložen k této diplomové práci.

Seznam literatury a informačních zdrojů

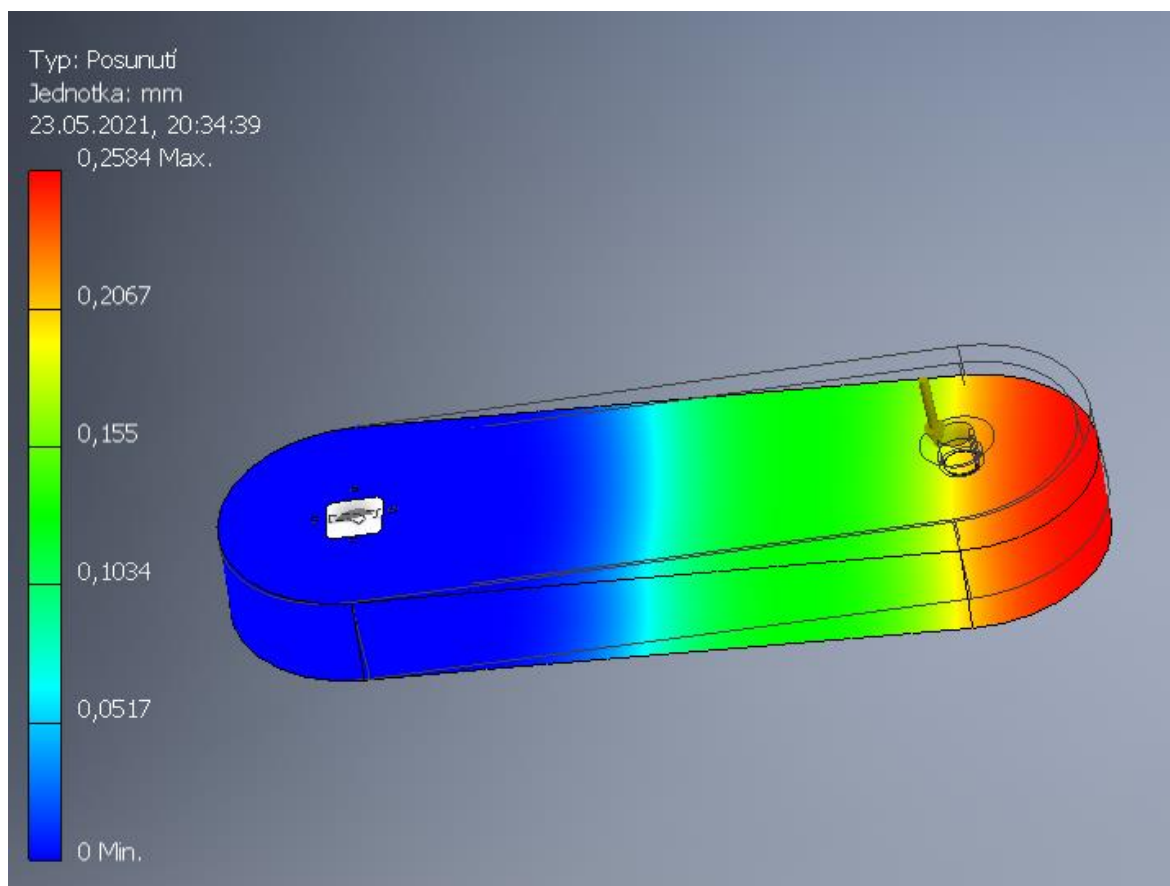
- [1] NOF, Shimon Y. Handbook of industrial robotics. New York, 1999. ISBN 0-471-17783-0.
- [2] SKAŘUPA, Jiří. Průmyslové roboty a manipulátory [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008] [cit. 2021-5-23]. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [3] VITRALAB. *Leonardo da Vinci Programme. LLP/LDV/TOI/2009/SK/93100530* Příručka. *Automatizační a robotická technika. Košice, September 2011 64 s*
- [4] FISCHER J., KACER J., KAULER J. *Kinematika pohybu robotických systémů. Skripta VA vBrně, 2004*

Přílohy

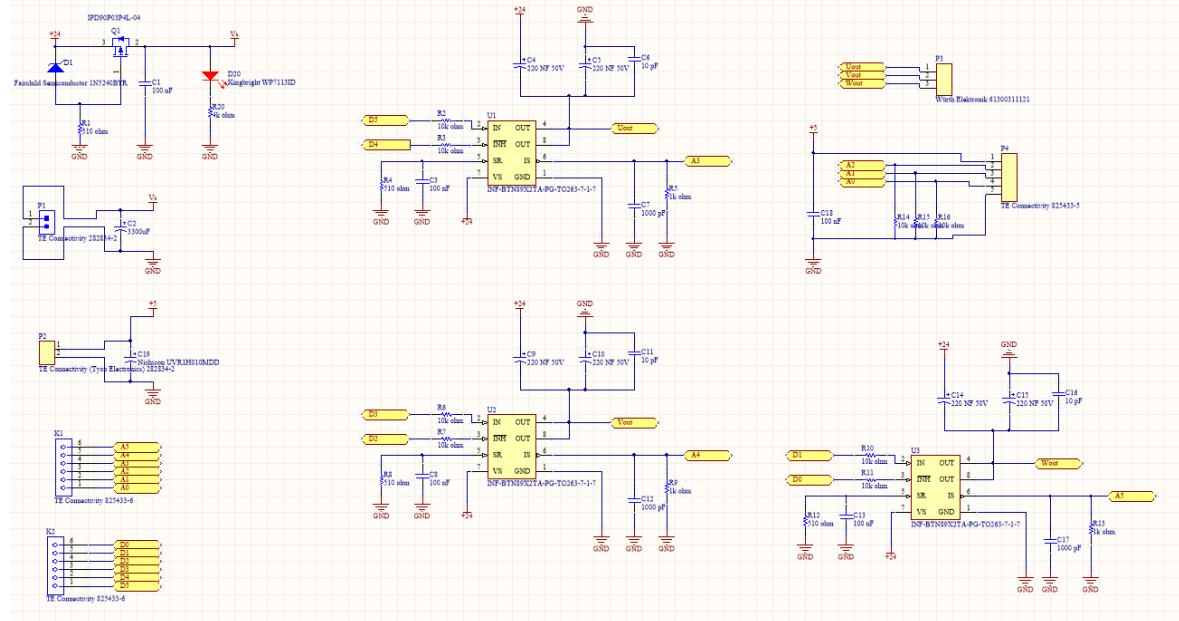
Příloha A – Simulace konstrukce 2. Ramene



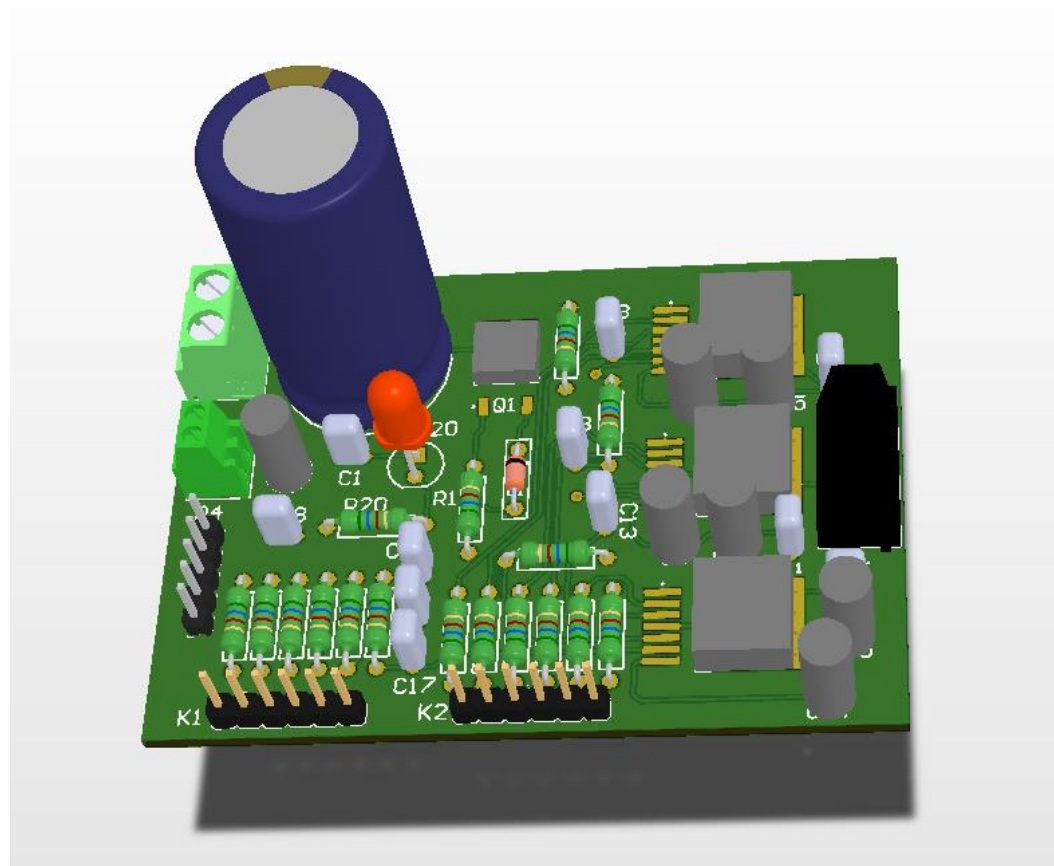
Příloha B – Simulace konstrukce 3. ramene



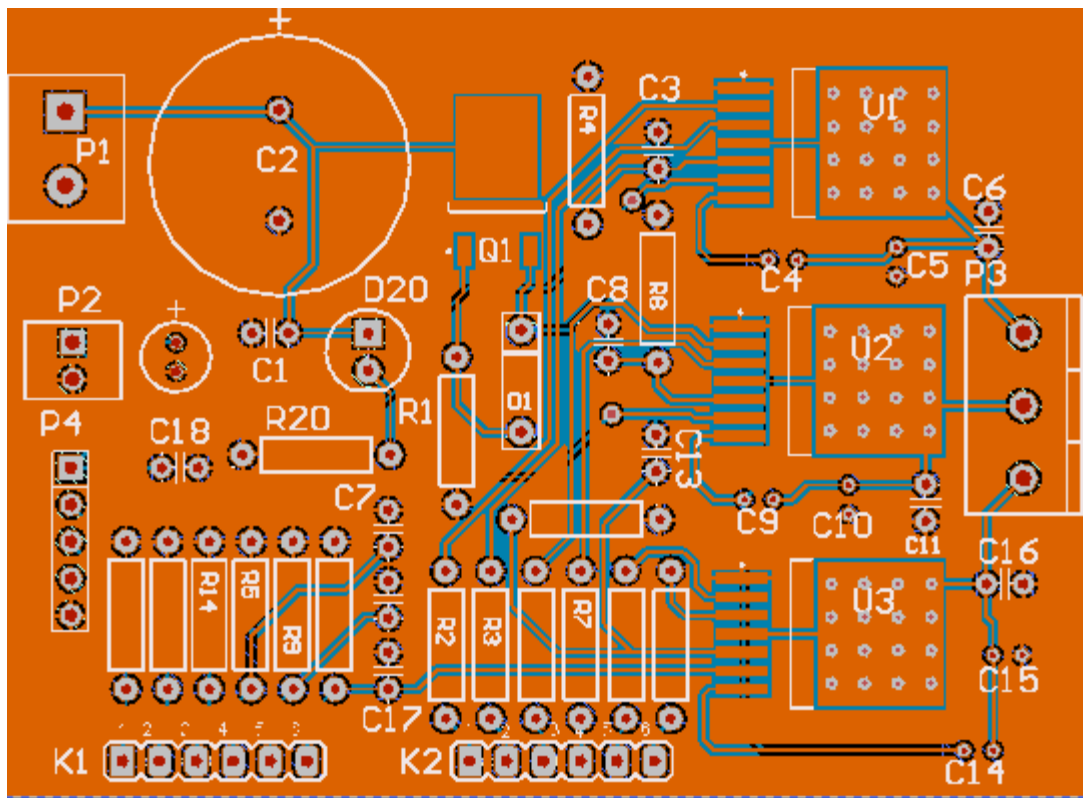
Příloha C – Schéma měniče



Příloha D – 3D model měniče



Příloha E – Horní vrstva plošného spoje



Příloha F – Spodní vrstva plošného spoje

