



**FAKULTA  
ŠROJNÍ  
ČVUT V PRAZE**

## **Ústav konstruování a částí strojů**

**Konstrukce manipulátoru s využitím 3D  
tištěných dílů**

**Design of Manipulator with 3D printed parts**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

**2021**

**Adam BUZEK**

**Studijní program:** N2301 ŠROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

**Studijní obor:** 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika

**Vedoucí práce:** Ing. Jiří MRÁZEK Ph.D.



### **Čestné prohlášení**

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci s názvem „Konstrukce manipulátoru s využitím 3D tištěných dílů“ vypracoval samostatně pod vedením Ing. Jiřího Mrázka, Ph.D., s použitím literatury uvedené na konci diplomové práce v seznamu použité literatury.

V Praze dne 30. 7. 2021

Adam Buzek

### **Poděkování**

Toto poděkování věnuji své rodině, která mě podporovala během celého studia a během vývoje této diplomové práce. Dále bych rád poděkoval Martinovi Ježkovi za jeho morální podporu, bez které bych studium a tuto práci nedokončil. V neposlední řadě bych chtěl poděkovat také panu Ing. Jiřímu Mrázkovi, Ph.D., za důsledné vedení a inspiraci.

## **Anotační list**

Jméno autora: Adam BUZEK

Název BP: Konstrukce manipulátoru s využitím 3D tištěných dílů

Anglický název: Design of Manipulator with 3D printed parts

Rok: 2021

Studijní program: N2301 STROJNÍ INŽENÝRSTVÍ

Obor studia: 2301T047 Dopravní, letadlová a transportní technika

Ústav: Ústav konstruování a částí strojů

Vedoucí BP: Ing. Jiří Mrázek, Ph.D.

Bibliografické údaje: počet stran 100

počet obrázků 89

počet tabulek 5

počet příloh 1

Klíčová slova: manipulátor, robotické rameno, 3D tisk, úchopná hlavice

Keywords: manipulator, robotic arm, 3D printing, grabber

Anotace: Tato diplomová práce se zabývá koncepčním návrhem konstrukce robotického ramena s využitím 3D tisku

Abstract: This diploma thesis deals with the conceptual design of a robotic arm structure using 3D printing

## Obsah

Seznam zkratek .....	1
1. Úvod .....	5
1.1. Motiv práce .....	5
2. Rešerše .....	5
2.1. 3D Tisk.....	5
2.1.1. Výrobní proces tisku 3D modelu [1], [2],[3] .....	5
2.1.2. Materiály používané pro 3D tisk [4],[5] .....	6
PLA.....	6
ABS .....	7
ASA .....	8
PETG .....	9
Nylon .....	10
Kompozitní materiály.....	11
HIPS .....	11
PVA.....	12
Srovnání materiálů .....	13
2.1.3. Technologie 3D tisku .....	14
FDM (FFF) – Fused Deposition Modeling [11],[12],[13].....	14
SLA-Stereolitografie [11],[12],[13] .....	15
SLS-Selective laser Sintering [11],[12],[13],[14] .....	17
LOM-Laminated Object Manufacturing [11],[12],[13].....	18
Srovnání technologií 3D tisku .....	20
2.2. Manipulátory.....	20
2.2.1. Rozdělení manipulátoru pomoci kinematického řetězce [15],[16].....	20
Manipulátor typu „K“ .....	20
Manipulátor typu „C“.....	21
Manipulátor typu „S“ .....	21
Manipulátor typu „A“ .....	22
2.2.2. Běžně používané typy manipulátoru .....	22
Portálové manipulátory .....	23
Robotická ramena.....	24
Stewartová platforma (Hexapod) .....	26
2.3. Úchopné hlavice .....	26
2.3.1. Mechanické [22].....	26
Pasivní mechanické úchopné hlavice .....	26
Aktivní mechanické úchopné hlavice .....	27
2.3.2. Pneumatické [25] .....	27
Pasivní pneumatické hlavice .....	27
Aktivní pneumatické hlavice .....	28
2.3.3. Magnetické [25] .....	30
Pasivní magnetické hlavice.....	30
Aktivní magnetické hlavice.....	30

2.4.	Pohony .....	31
2.4.1.	Elektrické pohony.....	31
	Stejnoseměrné motory .....	31
	Asynchronní motory .....	32
	Krokové motory.....	33
2.4.2.	Hydraulické pohony .....	34
2.4.3.	Pneumatické pohony.....	35
3.	Konstrukční část .....	36
3.1.	Volba pohonu .....	36
3.1.1.	Přehled krokových motorů typu Nema.....	36
	Motory nema17.....	37
	Motory nema 23 .....	37
	Planetové převodovky pro motory nema 17 a 23.....	38
3.2.	Konstrukce podsestavy os 5 a 6 .....	39
3.2.1.	Model podsestavy os 5 a 6.....	39
3.2.2.	Shrnutí 3D tištěných dílů podsestavy os 5 a 6 .....	43
3.2.3.	Pohony os 5 a 6 .....	45
3.2.3.1.	Pohon osy 6 .....	45
3.2.3.1.	Pohon osy 5 .....	46
3.3.	Konstrukce podsestavy osy 4.....	48
3.3.1.	Model podsestavy osy 4 .....	48
3.3.2.	Shrnutí 3D tištěných dílů podsestavy osy 4.....	51
3.3.3.	Pohon osy 4 .....	53
3.4.	Konstrukce podsestavy osy 3.....	54
3.4.1.	Model podsestavy osy 3 .....	54
3.4.2.	Shrnutí 3D tištěných dílů podsestavy osy 3.....	57
3.4.3.	Pohon osy 3 .....	58
3.5.	Konstrukce podsestavy osy 2.....	59
3.5.1.	Model podsestavy osy 2 .....	59
3.5.2.	Shrnutí 3D tištěných dílů podsestavy osy 2.....	62
3.5.3.	Pohon osy 2 .....	63
3.6.	Konstrukce podsestavy osy 1.....	64
3.6.1.	Model podsestavy osy 1 .....	64
3.6.2.	Shrnutí 3D tištěných dílů podsestavy osy 1.....	67
3.6.3.	Pohon osy 1 .....	68
4.	Výpočtová část .....	69
4.1.	Kontrola kroutícího momentu na pohonech jednotlivých os.....	69
4.1.1.	Kontrola pohonu osy 6 .....	69
4.1.2.	Kontrola pohonu osy 5 .....	70
4.1.3.	Kontrola pohonu osy 4 .....	71
4.1.4.	Kontrola pohonu osy 3 .....	72
4.1.5.	Kontrola pohonu osy 2 .....	74
4.1.6.	Kontrola pohonu osy 1 .....	75

<b>4.2.</b>	<b>Výpočty ozubeného řemene.....</b>	<b>76</b>
4.2.1.	Výpočet vzdálenosti os ozubeného řemene pro pohon os 5 a 6.....	76
4.2.2.	Výpočet horizontálního umístění malé řemenice.....	77
4.2.3.	Výpočet natažení řemene pohonu os 5 a 6.....	77
4.2.4.	Vypočet minimální délky řemene osy 3.....	78
4.2.5.	Geometrie kuželového ozubeného soukolí.....	78
4.2.6.	MKP výpočtový model základny osy 1.....	80
5.	Závěr.....	85
	Seznam zdrojů.....	86
	Seznam Obrázků.....	89
	Seznam Tabulek.....	91
	Seznam příloh.....	92



**SEZNAM ZKRATEK**

PLA	Polyactic Acid	
ABS	Acrylonitrile Butadiene Styrene	
ASA	Acrylic Styrene Acrylonitrile	
PETG	Polyethylene Terephthalate Glycol	
HIPS	High Impact Polystyrene	
PVA	Polyvinyl Alkohol	
FDM	Fused Deposition Modeling	
FFF	Fused Filament Fabrication	
SLA	Stereolitografie	
LCD	Liquid Crystal Display	
DLP	Digital Light Procesing	
SLS	Selective Laser Sintering	
LOM	Laminated Object Manufacturing	
Typ K	Kartézský typ manipulátoru	
Typ C	Cylindrický typ manipulátoru	
Typ S	Sférický typ manipulátoru	
Typ A	Kartézský typ manipulátoru	
$\eta_{oz}$	Účinnost převodu ozubením	[-]
$\eta_{řem}$	Účinnost řemenového převodu	[-]
$b_1$	Šířka řemene os 5,6	[mm]
$c_s$	Konstanta tuhosti řemene	[N/mm]
$d_{řm}$	Průměr malé řemenice	[mm]
$d_{řv}$	Průměr velké řemenice	[mm]
$z_{řm}$	Počet zubů malé řemenice	[-]
$z_{řv}$	Počet zubů velké řemenice	[-]
$z_{ko}$	Počet zubů kuželového ozubeného kola	[-]
$z_{to}$	Počet zubů talířového ozubeného kola	[-]
$M_{k6}$	Maximální moment na motoru pro osu 6	[Nm]
$M_{k5}$	Maximální moment na motoru pro osu 5	[Nm]

$Z_{v4}$	Počet zubů velkého ozubeného kola osy 4	[-]
$Z_{m4}$	Počet zubů malého ozubeného kola osy 4	[-]
$M_{k4}$	Maximální moment motoru pro osu 4	[Nm]
$b_2$	Šířka řemene osy 3	[mm]
$d_{řm3}$	Průměr malé řemenice osy 3	[mm]
$d_{řv3}$	Průměr malé řemenice osy 3	[mm]
$M_{k3}$	Maximální moment na motoru pro osu 3	[Nm]
$Z_{v2}$	Počet zubů vnitřního ozubeného kola osy 2	[-]
$Z_{m2}$	Počet zubů malého ozubeného kola osy 2	[-]
$M_{k2}$	Maximální moment na motoru pro osu 2	[Nm]
$Z_{v1}$	Počet zubů vnitřního ozubeného kola osy 1	[-]
$Z_{m1}$	Počet zubů malého ozubeného kola osy 1	[-]
$M_{k1}$	Maximální moment na motoru pro osu 1	[Nm]
$m_z$	Hmotnost závaží	[kg]
$r_1$	Rozměr ramene 1	[mm]
$M_6$	Moment od zatížení osy 6	[Nm]
$i_6$	Převodový poměr osy 6	[-]
$M_{m6}$	Moment potřebný k pohonu osy 6	[Nm]
$m_{pú}$	Hmotnost úchopné hlavice	[kg]
$r_2$	Rozměr ramene 2	[mm]
$r_3$	Rozměr ramene 3	[mm]
$M_5$	Moment od zatížení osy 5	[Nm]
$i_5$	Převodový poměr osy 5	[-]
$M_{m5}$	Moment potřebný k pohonu osy 5	[Nm]
$m_{n6}$	Nesouměrné hmoty kolem osy 6	[kg]
$r_4$	Rozměr ramene 4	[mm]
$M_4$	Moment od zatížení osy 4	[Nm]
$i_4$	Převodový poměr osy 4	[-]
$M_{m4}$	Moment potřebný k pohonu osy 4	[Nm]
$m_{o56}$	Hmotnost osy 6	[kg]

$r_5$	Rozměr ramene 5	[mm]
$M_3$	Moment od zatížení osy 3	[Nm]
$i_3$	Převodový poměr osy 3	[-]
$M_{m3}$	Moment potřebný k pohonu osy 3	[Nm]
$r_6$	Rozměr ramene 6	[mm]
$M_2$	Moment od zatížení osy 2	[Nm]
$i_2$	Převodový poměr osy 2	[-]
$M_{m2}$	Moment potřebný k pohonu osy 2	[Nm]
$I$	Moment setrvačnosti otáčení kolem osy 1	[kg · mm <sup>2</sup> ]
$\varepsilon$	Zvolené maximální úhlové zrychlení	[rad/s <sup>2</sup> ]
$M_s$	Moment od setrvačnosti otáčení vůči ose 1	[Nm]
$M_{fr}$	Moment od odporu ložiska	[Nm]
$M_1$	Moment od zatížení osy 1	[Nm]
$i_1$	Převodový poměr osy 1	[-]
$M_{m1}$	Moment potřebný k pohonu osy 1	[Nm]
$L_{5,6}$	Délka použitého uzavřeného řemene	[mm]
$L$	Délka řemene	[mm]
$A$	Vzdálenost os řemenic při zanedbání úhlů opásání	[mm]
$A_{sk}$	Skutečná vzdálenost os řemenic os 5 a 6	[mm]
$h$	Vzdálenost os řemenic ve vertikálním směru	[mm]
$k_{\gamma 5,6}$	Tuhost řemene os 5 a 6	[N/mm]
$F_{6max}$	Síla na malé řemenici vyvozená z maximálního momentu motoru	[N]
$\Delta L_{6max}$	Protažení řemene osy 6	[mm]
$\varepsilon_1$	Poměrné protažení řemene	[-]
$A_3$	Skutečná vzdálenost os řemenic osy 3	[mm]
$L_{tr}$	Přídavek k délce řemene, na zajištění řemene	[mm]
$L_{p3}$	Délka řemene osy 3 bez přídavku	[mm]
$L_3$	Minimální délka řemene osy 3	[mm]
$z_1$	Počet zubů kuželového ozubeného kola	[-]
$z_2$	Počet zubů talířového ozubeného kola	[-]
$h_a^*$	Součinitel výšky zubu	[-]
$x$	Korekce kuželového ozubení	[-]
$\delta_1$	poloviční vrcholový úhel kuželového kola	[°]



---

$\delta_2$	poloviční vrcholový úhel talířového kola	[°]
$m_{te}$	Modul ozubených kol	[mm]
$L_e$	Kuželová vnější vzdálenost	[mm]
$h_{ae1}$	Výška hlavy zubu kola 1	[mm]
$h_{ae2}$	Výška hlavy zubu kola 2	[mm]
$A_1$	Výška hlavového kužele kola 1	[mm]
$A_2$	Výška hlavového kužele kola 2	[mm]

## 1. Úvod

Tato diplomová práce se zabývá koncepčním návrhem konstrukce 3D tištěného manipulátoru. Práce mapuje možnosti a omezení tohoto typu konstrukce.

### 1.1. Motiv práce

V rámci automatizace výrobních procesů, vzniká potřeba přepravy a pozicování materiálů. Jednou variantou zajišťující tyto potřeby jsou manipulátory.

Cílem této práce je koncepční návrh manipulátoru schopného upravit polohu materiálu o hmotnosti až 400g a dosahu až 400mm. Tento manipulátor by měl mít značnou část součástí vytištěnou pomocí 3D tisku, tak aby bylo nutno nakoupit minimum dalších součástí pro postavení a zprovoznění manipulátoru.

Manipulátor s využitím 3D tištěných dílů by měl být schopen vyplnit tu část trhu, kde není požadována vysoká přesnost pozicování a vysoká zatížitelnost. Účelem této konstrukce není konkurovat běžně užívaným robotům a manipulátorům se sériovou strukturou velkých světových výrobců. Motívem práce je tedy nalézt koncept řešení a zmapovat omezení velmi levné konstrukce manipulátoru i s přihlédnutím na omezenou životnost takové konstrukce. Realizace prototypu a ověření funkčnosti a životnosti bude předmětem navazujících prací.

## 2. Rešerše

Tato kapitola se věnuje krátkému shrnutí technologii 3D tisku, druhu manipulátorů, úchopů a senzorů, které je možné aplikovat při konstrukci 3D tištěného manipulátoru.

### 2.1. 3D Tisk

Popis aditivní technologie 3D tisku a shrnutí její možnosti

#### 2.1.1. Výrobní proces tisku 3D modelu [1], [2],[3]

CAD-Model

- Vytvoření 3D modelu ve CAD softwaru
- Konverze STL,VRML, 3MF
  - Převedení CAD modelu do formátu STL, 3MF
  - Formát STL popisuje geometrii povrchu, pomocí souřadnic bodů tvořící trojúhelníky. Nepopisuje jiné vlastnosti modelu
  - VRML-kromě popisu geometrie modelu zahrnuje i informace o barvě modelu, vytváří tak možnost použití více trysek materiálů, které mají jiné barvy vstupního materiálu
  - 3MF-popisuje geometrii modelu, druh materiálu, barvu materiálu, texturu a kompletní nastavení Sliceru

Nastavení parametrů Sliceru

- Slicer je software který převádí model na jednotlivé vrstvy

- Lze zde nastavit tloušťky vrstvy, teplotu trysky, teplotu podložky, rychlost tisku, podpory, výplně atd
- (Cura, Prusaslicer, Skeinforge)

Vytvoření G-codu

- G-code je soubor, který souřadnicově popisuje dráhu trysky a nastavení tiskárny
- Většinou se generuje přímo ve sliceru

Nahrání G-Codu do tiskárny

- Přenesení dat G-Codu z PC do tiskárny, pomocí Wi-Fi, flash-disku, paměťové karty, síťovým kabelem. Podle toho, co tiskárna nabízí

Příprava před tiskem

- Pokud to vyžaduje technologie, tak je nutné nanést na desku vrstvu materiálu s přilnavými účinky
- Popř. kalibrace tiskárny

Tisk

- Spuštění programu a čekání na vytisknutí dílu
- V případě výskytu problému, lze některé parametry tiskárny měnit přímo za chodu tiskárny

Dokončovací úpravy

- Odstranění přebytečného materiálu
- Úpravy povrchu
- Podle toho, co daná technologie vyžaduje

### 2.1.2. Materiály používané pro 3D tisk [4],[5]

V této kapitole se věnuji srovnání materiálů používaných pro 3D tisk.

#### PLA

PLA (Polylactic Acid) je vhodný pro 3D tisk vzhledem ke své snadné dostupnosti a snadnému tisku, díky tomu že pro tisk nejsou vyžadovány vysoké teploty. Mezi další přednosti materiálu je malá smrštitivost, vysoká tvrdost a poměrně velká pevnost v tahu. Nevýhodou je nízká teplotní odolnost a nízká odolnost vůči UV záření.

PLA je termoplast a lze jej proto opakovaně roztavit a rekrystalizovat, aniž by došlo k znehodnocení materiálu.

Existují modifikace tohoto plastu, například PLA HD, které mají zvýšenou odolnost vůči teplotě, a tím odstraňují jednu z jeho nevýhod.



Obr. 1: Ukázka modelů vytištěných z materiálu PLA [4]

### ABS

ABS (Acrylonitrile Butadiene Styrene) je materiál s vysokou pevností a vysokou tepelnou odolností (do 98°C bez známek deformace). Je vhodný pro vnitřní a venkovní použití. Z tohoto plastu jsou například vyrobeny kostky Lego. Nevýhodou je smršťivost materiálu, zápach vznikající při procesu tištění a potřeba vyšších teplot při tisku.

ABS je termoplast, takže jej lze opakovaně roztavit bez znehodnocení materiálu. Díky rozpustnosti v acetonu, lze po potření stykových ploch, spojit více výtisků dohromady. Díky acetonu lze taky vyhladit. [6]



Obr. 2: Ukázka model vytištěného z materiálu ABS a modelu následně vyhlazeného acetonem (vpravo) [5]

## ASA

ASA (Acrylic Styrene Acrylonitrile) je materiál podobných vlastností jako ABS. Oproti ABS je UV stabilní a při tisku se méně smršťuje a vyznačuje se také vysokou tepelnou odolností (do 93°C bez známek deformace). Jeho nevýhodou jsou vyšší pořizovací náklady a potřeba vyšších teplot při tisku. Pro své dobré mechanické vlastnosti využíván v automobilovém průmyslu. [7]

Díky rozpustnosti v acetonu, lze po potření stykových ploch, spojit více výtisků dohromady. Díky acetonu lze taky vyhladit.



*Obr. 3: Ukázka model vytištěného z materiálu ASA (vpravo) a modelu následně vyhlazeného acetonem (vlevo) [5]*



## PETG

PETG (Polyethylene Terephthalate Glycol) je modifikovaná verze materiálu PET, modifikovaná pomocí glykolu. Ten modifikuje vlastnosti, aby materiál byl vhodnější pro 3D tisk. Materiál je houževnatý a vyznačuje se dobrou tepelnou odolností (do 68°C bez známek deformace). Díky malé tepelné roztažnosti se nekrouť na podložce při 3D tisku. Další výhodou je možnost tisku průhledných součástí. Dále se vyznačuje odolností vůči vodě a chemickou nezávadností, díky které je tak jak materiál PET vhodný pro využití v potravinovém průmyslu. [8]

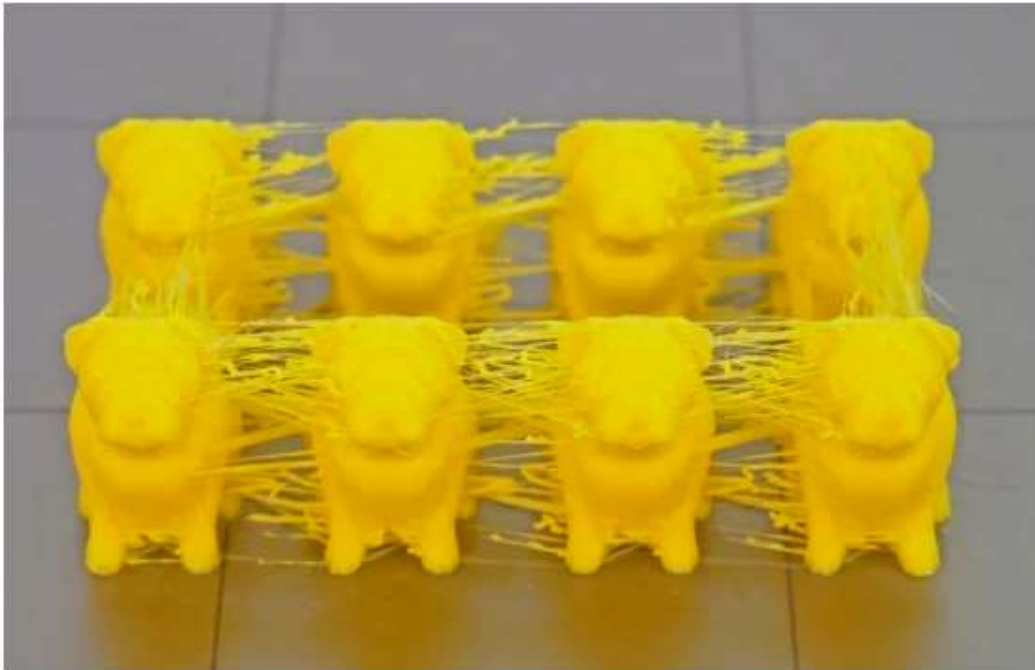


*Obr. 4: Ukázka 3D tištěného modelu pomocí materiálu PETG [8]*



*Obr. 5: Ukázka 3D tištěného modelu pomocí průhledného filamentu PETG [5]*

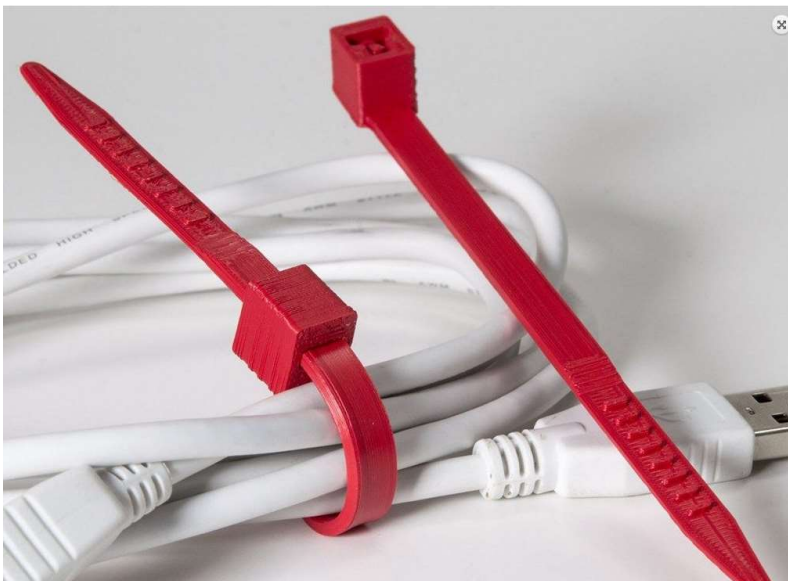
Nevýhodou tisknutí materiálu PETG je tzv. „stringování“, které se projevuje vytvořením tenkých vláken kolem modelu. Tyto vlákna lze odstranit horkovzdušnou pistolí. Následně je nutné výrobek opravit.



Obr. 6: Ukázka problému „stringování“ [5]

## **NYLON**

Nylon (polyamid) se vyznačuje svou pevností a odolností vůči otěru. V tenkých vrstvách je ohebný. Díky vysoké teplotní odolnosti (do 90°C bez známek deformace) je vhodný pro tisk technických a funkčních dílů. Nylon je velmi citlivý na vlhkost, proto je nutné filament skladovat v uzavřené nádobě ideálně s nějakým odvlhčovačem. Na trhu existuje více variant dostupných pro 3D tisk jako například Nylon 618, 645, FX256 a také Nylon PA6, který se již používá v automobilovém průmyslu díky své velké trvanlivosti. [9]



Obr. 7: Ukázka 3D tištěného modelu pomocí filamentu Nylon 618

## KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Kompozitní materiály jsou ze dvou složek. Hlavní je plastová složka, ve které je sekundární složka ve formě prachu a drobných částic. Vzniklé kompozitní materiály pak dle sekundární složky nazýváme například: copperfill, bronzefill, woodfill, bamboofill, karbonové nebo aramidové kompozitní materiály. Parametry tisku se mohou jednotlivých materiálů mohou v závislosti na použitém plastovém základu. V průběhu tisku je potřeba udržovat teplotu okolí nad hodnotou 120 °C, a proto musí být tisk prováděn ve vyhřívané komoře. V závislosti na použité sekundární složce materiál získává specifické vlastnosti, jako jsou korozivzdornost, žáruvzdornost, žárupevnost. Také mohou vyžadovat i dokončovací práce, jako je třeba leštění bronzefillu. [10]



Obr. 8: Ukázka tisku pomocí filamentu Bronzefill [10]

## HIPS

HIPS (High Impact Polystyrene) je materiál používaný na tisk podpor pro modely tištěné z materiálu ABS, jelikož má velmi podobné tiskové vlastnosti. Jedná se o levný, lehký a voděodolný materiál. Při jeho tisku je nutné mít uzavřený prostor 3D tisku s možností ventilace a také vyhřívanou základní desku. HIPS lze rozpustit v d-Limonenu, který se získává z citrusových plodů, běžně používaný v kosmetických výrobcích a také jako rozpouštědlo pro čištění oleje ze strojních součástí.



Obr. 9: Ukázka použití materiálu HIPS pro podpory 3D tištěné součástí a jeho rozpustnost [4]

### PVA

PVA (Polyvinyl Alkohol) je polymer rozpustný ve vodě velmi citlivý na okolní podmínky. Je využíván ke tvorbě podpěr pro modely tištěné z materiálu PLA. Má vyšší cenu než HIPS a kvůli jeho citlivosti, je nutné ho uschovávat v uzavřeném obalu.



Obr. 10: Ukázka použití materiálu PVA pro podpory 3D tištěné součástí a jeho rozpustnost [4]

**SROVNÁNÍ MATERIÁLŮ**

MATERIÁL	ABS	ASA	PLA	PETG	NYLON	HIPS	PVA
<b>PEVNOST V TAHU [MPA]</b>	40	55	65	53	40-80	32	78
<b>ODOLNOST (TRVANLIVOST)</b>	Dobrá	Výborná	Horší	Dobrá	Výborná	Dobrá	Dobrá
<b>MAXIMALNÍ PROVOZNÍ TEPLOTA [°C]</b>	98	95	52	73	80-95	100	75
<b>TEPLOTA TRYSKY [°C]</b>	220- 250	235-255	190- 220	230-250	220-270	230-245	185-200
<b>CENA [KČ/KG]</b>	599	710	590	599	1500	700	2000

*Tabulka 1: Srovnání materiálů vhodných pro 3D tisk [4],[5]*

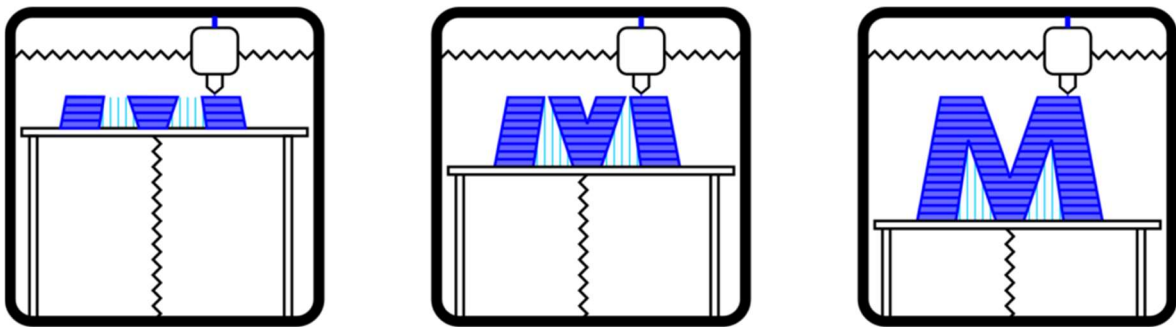
### 2.1.3. Technologie 3D tisku

V této kapitole se věnuji srovnání technologií 3D tisku.

#### FDM (FFF) – FUSED DEPOSITION MODELING [11],[12],[13]

FDM (Fused Deposition Modeling) je metoda patentována firmou Stratasys v roce 1989. po vypršení patentu si firma nechala registrovat název FDM jako ochrannou známku, takže ostatní výrobci 3D tiskáren používají název FFF (Fused Filament Fabrication). Technologie je založená na nanášení materiálu tavnou tryskou, vrstvu po vrstvě.

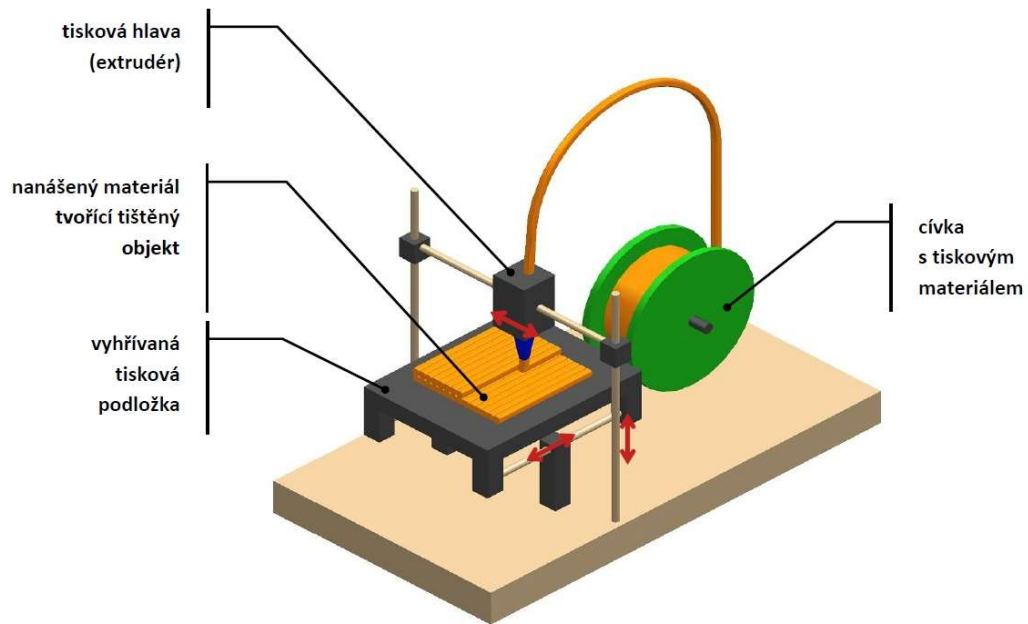
Proces je založen na tavení struny materiálu a následném nanášení vrstev plastu tryskou, do které je materiál vtačován extruderem (dávkovačem). Tryska nanáší materiál na vyhřívanou desku, rozehrátou na teplotu trochu vyšší než pracovní teplota nanášeného materiálu, aby se zabránilo deformacím spodních vrstev modelu a případnému odloupení spodních vrstev. Po nanesení se materiál ochladí vlivem okolní teploty a začne tuhnout. Další vrstvy se nanášejí na vrstvy předchozí, jenž jsou v ten moment už ztuhlé. Tímto způsobem se vymodeluje celý model. V průběhu celého tisku by měl být na model přiváděn vzduch za pomoci bočních větráčků. Je vhodné v průběhu tisku zajistit uzavřené prostředí tisku, aby nedocházelo k průvanu a změně okolní teploty.



Obr. 11: Princip metody FDM [13]

Hlavní nevýhodou této metody, spočívá tisk v místech, kde pod tištěným místem, není žádný materiál. Díky tomuto jevu tiskárna prakticky tiskne do vzduchu a může dojít k zhoršení kvality povrchu modelu, až celkové poškození modelu. Ke zabránění vzniku tohoto problému se používají podpory, které se tisknou současně s modelem pod těmito problémovými místy. Po dotisknutí se podpory odstraní. Další možností je použít tiskárnu se dvěma tiskovými hlavami, kdy do jedné je veden materiál, rozpustný ve vodě nebo jiné tekutině, který slouží jen k vytištění podpor. Tím se docílí zlepšení kvality výsledného modelu.

Jinou možností využití druhé tiskové hlavy, je použití druhé barvy a dosáhnout tak dvoubarevný model. V tomto případě je nutná velmi přesná kalibrace trysek, aby došlo k požadovanému výsledku.



Obr. 12: Schéma FDM Tiskárny [12]

Pro tisk metodou FDM můžeme použít veliký rozsah materiálu, např: ABS, ASA, PC, PETG, PLA.

#### Výhody

- Rozsah použitelnosti materiálu
- Cena materiálu
- Minimální odpad
- Pevnost vyrobeného modelu

#### Nevýhody

- Hrubá struktura
- Nutnost podpěr v případě tisku součásti s vertikálně složitějšími tvary

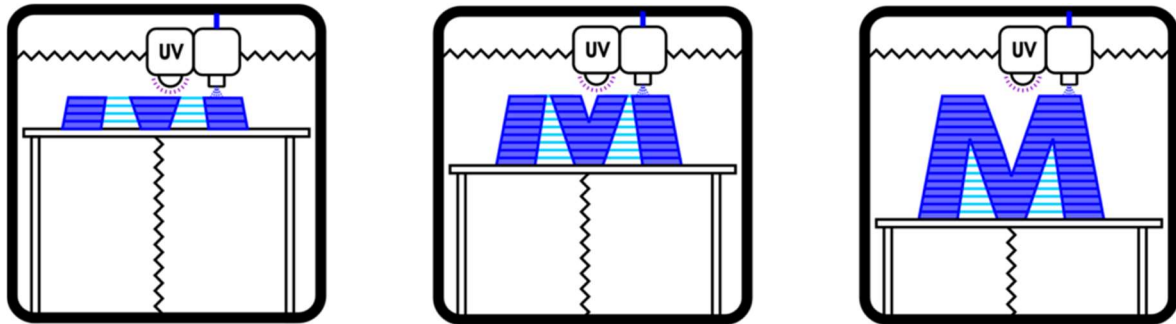
### SLA-STEREOLITOGRAFIE [11],[12],[13]

SLA (Stereolitografie) je nejstarší technologie 3D tisku

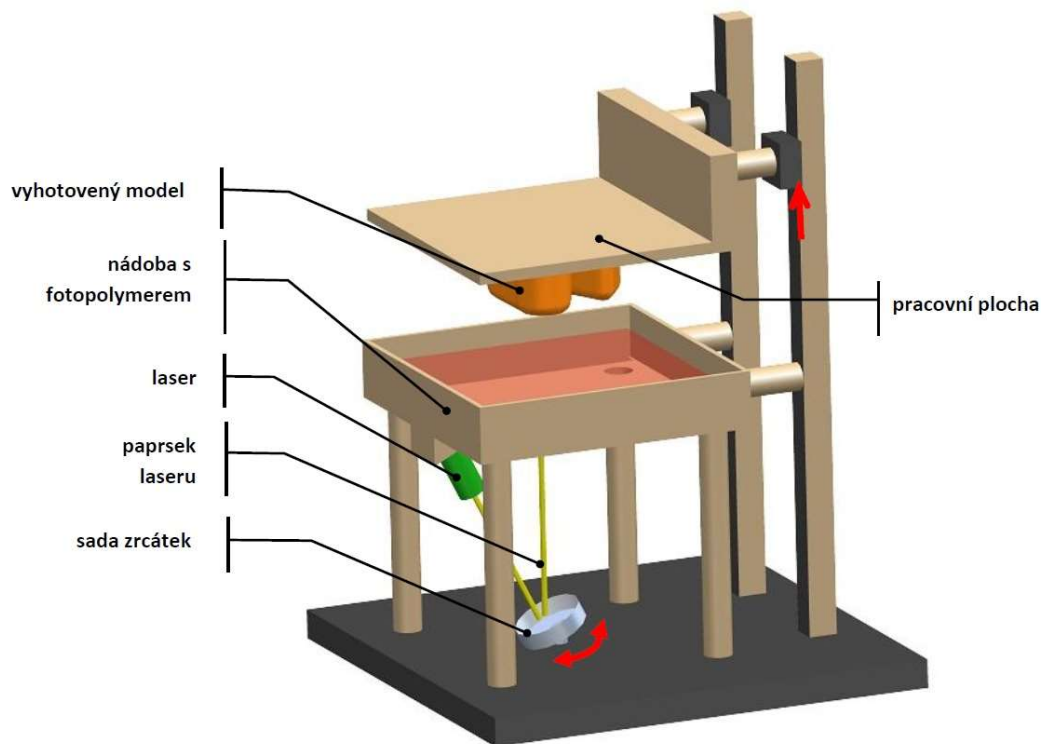
Princip spočívá na postupném vytvrzování tekutého fotopolymeru (pryskyřice) působením různých vlnových délek nejčastěji ultrafialovým zářením.

Model je tvořen vytvrzováním fotopolymeru, díky působení laseru. Laser vždy vytvrdí jednu vrstvu, následně se platforma posune ve vertikálním směru o tloušťku následující vrstvy. Dále se nanese další vrstva pryskyřice, kterou laser vytvoří. Výška vrstvy se pohybuje od 0,05 do 0,15 mm, a díky tomu je možno dosáhnout velmi kvalitního povrchu. Po skončení tisku se výrobek vytáhne z fotopolymeru a přesune se do nádoby s izopropylalkoholem, kde se omyje od zbývajících fotopolymeru. Pro zlepšení

mechanických vlastností se výrobek může po opláchnutí dále vytvrzovat UV zářením.  
[11],[12],[13]



Obr. 13: Princip metody SLA [13]

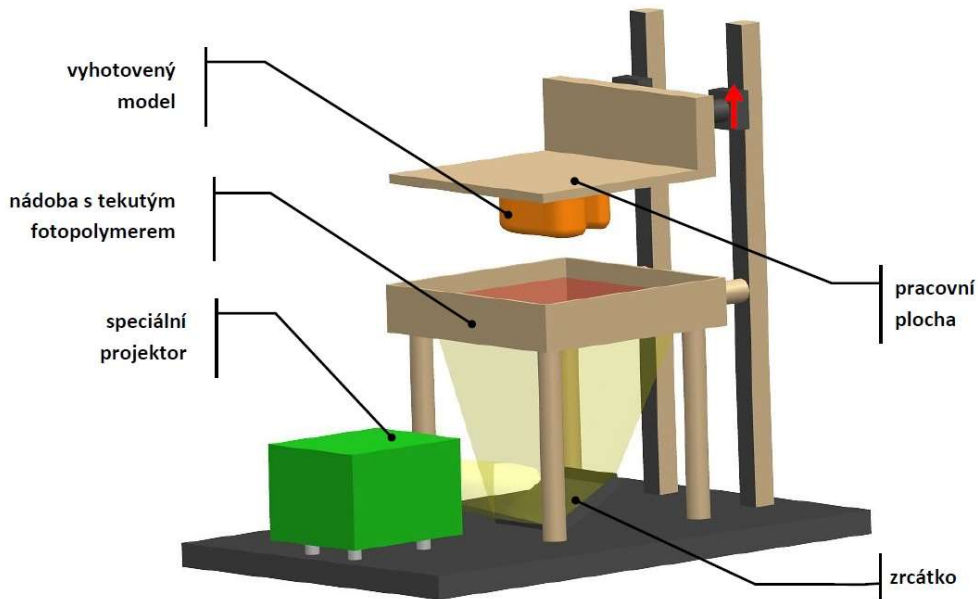


Obr. 14: Schéma SLA Tiskárny [12]

Nevýhodou, jako u metody FDM, je potřeba podpor v místech, kde pod tištěným místem, není žádný materiál. Další nevýhodou je nutnost větrání místnosti, kvůli výparům vzniklých v průběhu tisku. Poslední nevýhodou je omezenost výběru materiálu pouze na fotocitlivé materiály (fotopolymery).

Metody DLP (Digital Light Processing) a LCD (Liquid Crystal Display) jsou založeny na stejném principu jako je stereolitografie. Stejně jako u SLA je vytvrzovaným materiálem tekutý fotopolymer, změna je jen ve způsobu vytvrzování, kde se nevyužívá laser, ale u DLP se používá projektor a u LCD obrazovka, díky tomu se najednou tvoří celá jedna vrstva výrobku. Rozdíl v použitých zdrojích světla je větší přesnost tisku.



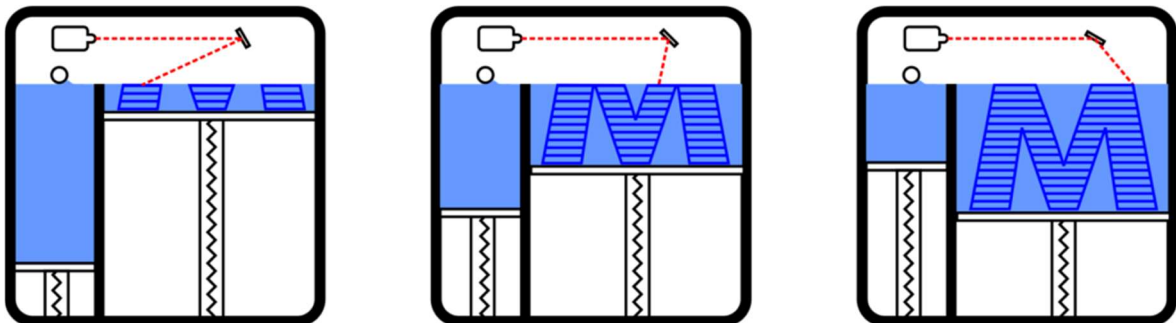


Obr. 15: Schéma DLP Tiskárny [12]

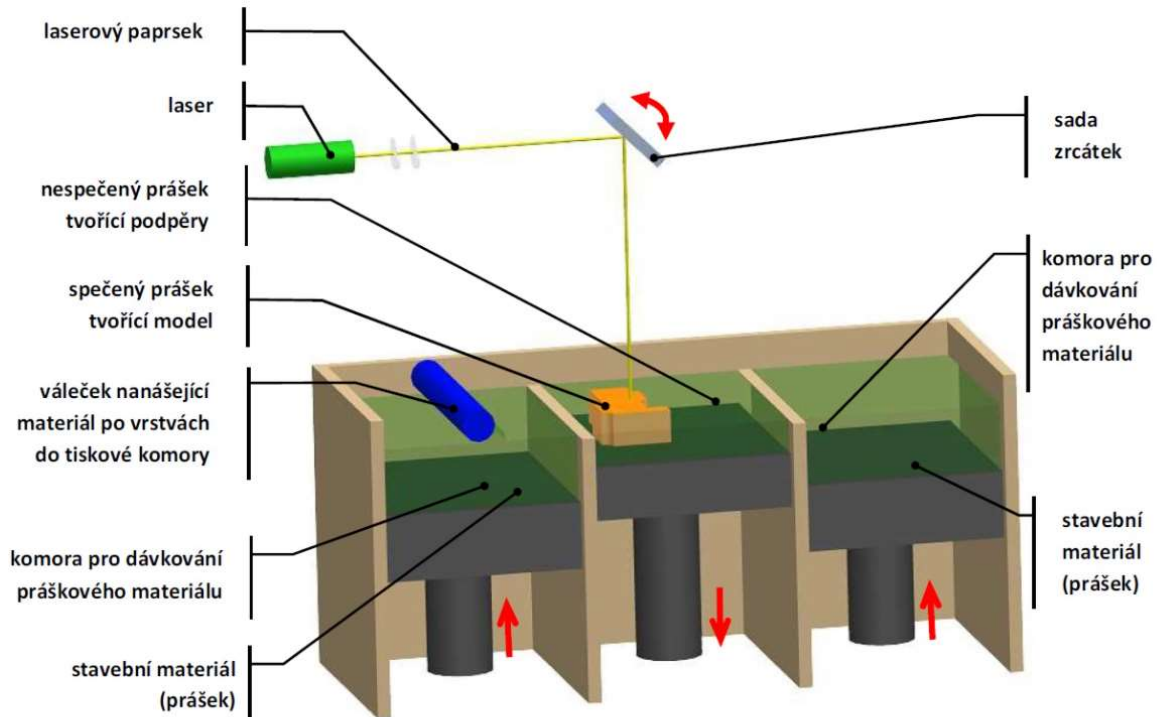
### SLS-SELECTIVE LASER SINTERING [11],[12],[13],[14]

Technologie SLS (Selective Laser Sintering) je založená na spékání materiálu v podobě prášku, pomocí laserového paprsku.

Proces je založen na nanesení vrstvy prášku, na které laser osvítl místa určena k vytvoření. Následně se platforma s tištěným modelem posune dolů o vzdálenost odpovídající výšce jedné vrstvy. Váleček nanese prášek ze zásobníku na pracovní prostor a laser osvítl a vytvrdí další vrstvu. Po ukončení tisku se model vyjme z prášku a očisti od zbytku prášku. V případě nějakých dutin modelu se prášek z modelu vysype.



Obr. 16: Princip metody SLS [13]

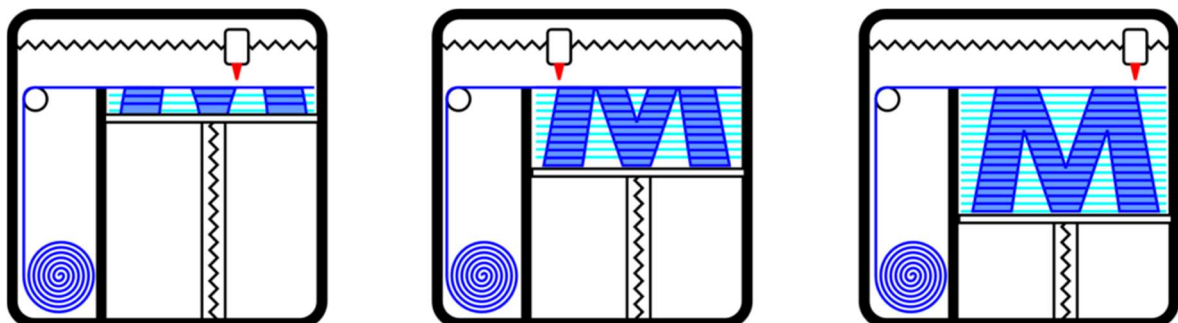


Obr. 17: Schéma SLS Tiskárny [12]

Výhodou této metody je široká škála tisknutelných materiálů. Vlastně lze použít jakýkoliv prášek, který se při působení tepla taví. Další výhodou této metody je minimální odpad, jelikož nevytvrzený prášek, lze znovu využít, bez žádné složité přípravy. Následně lze vytvářet modely s komplexní geometrií, kde jediný požadavek jen díra, kterou lze po dokončení tisku vysypat prášek z dutin. Nevýhodou je vysoká pořizovací cena tiskárny a časová náročnost tisku

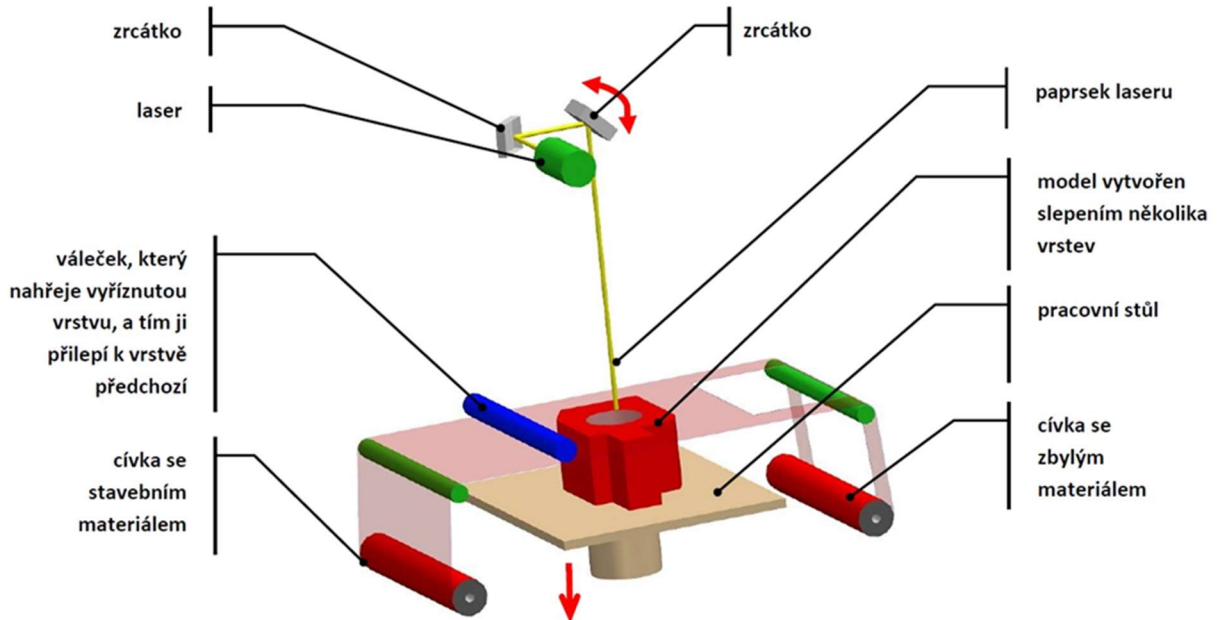
### LOM-LAMINATED OBJECT MANUFACTURING [11],[12],[13]

Technologie LOM (Laminated Object Manufacturing) byla vyvinutá společností Helixsys v roce 1991. Technologie je založená vytvoření celé jedné vrstvy. Pro tuto technologii se používá jako výrobní materiál plast nebo papír, na kterém je nanesená vrstva polyethylenu. Následujícím méně využívaným materiálem je kov v podobě tenkostěnného plechu. Velikost jedné vrstvy se pohybuje od 0.05 do 0.5 mm.



Obr. 18: Princip metody LOM [13]

Tiskárna se skládá z platformy, na níž je tvořen model, role materiálu, která se namotává na válec s přebytečným materiálem, vyhříváného válce sloužícího ke přitlačení jednotlivých vrstev k sobě a řezacího nástroje (nůž nebo CO2 laser).



Obr. 19: Schéma LOM tiskárny [12]

Na platformu tiskárny se nanese první vrstva a vyřeže se nožem nebo CO2 laserem požadovaný tvar. Následně platforma se posune dolů o výšku tloušťky vrstvy. Role materiálu se převinou tak, aby nad pracovním prostorem, byla nová vrstva materiálu. Přes pracovní prostor projede váleček, který přitlačí novou vrstvu na vrstvu předchozí tlakem 10-37 MPa a zároveň je vyhříván na 60-80°C. Díky tomu se vrstvy spojí. Dále probíhá zase řezání. Celý proces se opakuje až do konce tisku. Na konci se ručně odstraní přebytečný materiál, který byl při tisku rozřezán na čtverce, pro snadnější odstranění.

#### Výhody

Schopnost vyrábět modely velkých rozměrů (až 508x762x610mm) za použití levného papírového materiálu

Materiály jsou „environment friendly“ a neprokázal se potenciál poškození zdraví

#### Nevýhody

Ne konci tisku je nutný „decubing“ (ruční vyříznutí hlavní části od mřížky odpadu)

Velká produkce odpadu (nevyužitého materiálu)

Při procesu vznikají nepříjemné výpary

Proces lepení papíru, je požárním rizikem

Nemožnost tisku dutých součástí

Špatné mechanické vlastnosti

**SROVNÁNÍ TECHNOLOGIÍ 3D TISKU**

TECHNOLOGIE	FDM	SLA	SLS	LOM
<b>POUŽIVANÉ MATERIÁLY</b>	Plasty	Fotopolymery	Keramika, plasty	Papír nebo plast
<b>VÝHODY</b>	Minimální odpadní materiál, vysoká pevnost materiálu	Vysoká přesnost	Nízká cena materiálu, minimální odpadní materiál	Cena materiálu, kvalitní povrch
<b>NEVÝHODY</b>	Hrubá struktura	Nutnost dotvrzení modelu, Omezenost materiálu	Nedokonalý povrch, cena tiskárny	Velké množství odpadního materiálu
<b>VELIKOST VRSTVY [MM]</b>	0,1	0,01	0,06	0,1
<b>CENA TISKÁRNY</b>	Od 20 tis. Kč	cca 65 tis. Kč	5 mil. Kč	cca 250 tis. Kč

*Tabulka 2: Srovnání technologií 3D tisku [12]*

## 2.2. Manipulátory

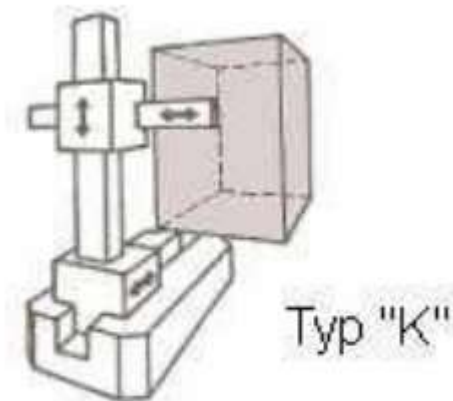
Pojmem manipulátor, nazývaném manipulační zařízení, a to jak ovládané automaticky naprogramovaným ovládním, umělou inteligenci anebo taky ovládané člověkem. Jejich úkolem je změnit polohu manipulovaného objektu bez použití lidské síly. Historicky u prvních ručních manipulátorů bylo jejich cílem zvýšit hmotnost objektu, kterým bylo manipulováno. V dnešní době jsou důležité i další motivy použití manipulátoru, jako zrychlení času změny polohy manipulovaného objektu, přesné uložení objektu anebo snížení nákladů potřebných ke zajištění změny polohy manipulovaného objektu.

### 2.2.1. Rozdělení manipulátoru pomoci kinematického řetězce [15],[16]

Základní typy manipulátorů jsou odvozeny podle kombinace pohybů, využitých pro manipulaci. Základní dva pohyby jsou posuv (T-Translace) a otáčení (R-Rotace).

#### MANIPULÁTOR TYPU „K“

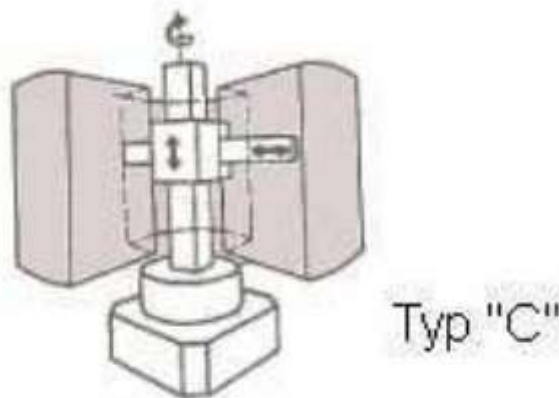
Manipulátor typu „K“ (TTT) je založen na posuvech ve 3 osách. K popisu této kombinace pohybu stačí použití kartézského (pravoúhlého) souřadnicového systému. Nevýhodou je, že předmět, se kterým je manipulováno nemění svojí orientaci vůči základním souřadnicím. Díky tomu nelze tímto manipulátorem předmět natočit.



Obr. 20: Schéma manipulátoru typu „K“ s vyznačením pracovního prostoru [15]

### MANIPULÁTOR TYPU „C“

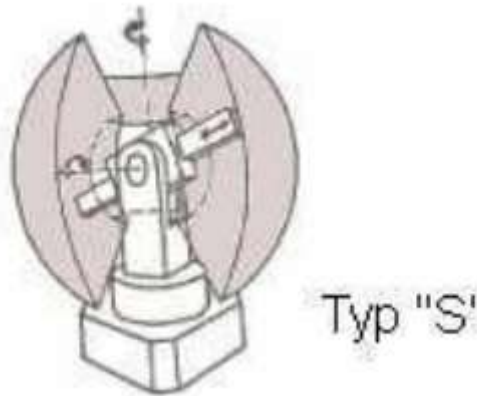
Manipulátor typu „C“ (RTT) je nabízí rotaci kolem hlavní osy, na které je rameno, zajišťující posuvy ve dvou osách. K popisu této kombinace pohybu je nutno použít cylindrický (válcový) souřadnicový systém. Díky rotaci kolem vlastní osy se zvětší pracovní prostor robota na válec kolem celého robota. Systém zase nezajišťuje natočení předmětu vůči vedlejším osám.



Obr. 21: Schéma manipulátoru typu „C“ s vyznačením pracovního prostoru [15]

### MANIPULÁTOR TYPU „S“

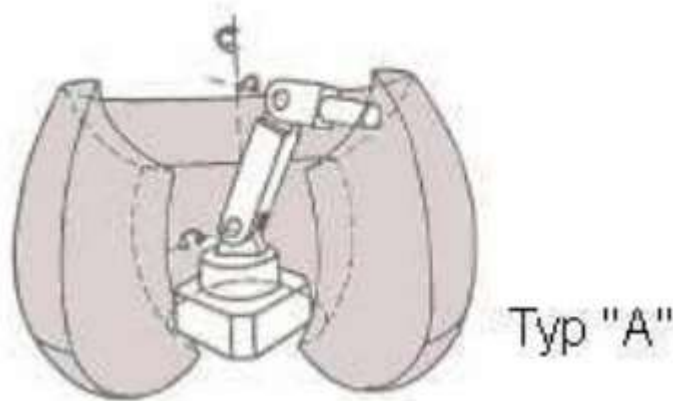
Manipulátor typu „S“ (RRT) je nabízí rotaci kolem hlavní i vedlejší osy manipulátoru, procházející ramenem, zajišťující posuv. K popisu této kombinace pohybu je nutno použít sférický (kulový) souřadnicový systém. Na rozdíl od předchozích typů, manipulátor zajišťuje i natočení manipulovaného předmětu.



Obr. 22: Schéma manipulátoru typu "S" s vyznačením pracovního prostoru [15]

### MANIPULÁTOR TYPU „A“

Manipulátor typu „A“ (RRR) nabízí rotaci kolem tří os manipulátoru. K popisu této kombinace pohybu je nutno použít angulární (složený kulový) souřadnicový systém. Zajišťuje libovolné natočení a polohu manipulovaného objektu v jeho pracovním prostoru. Na rozdíl od manipulátoru typu S, je pracovní prostor rozšířen o prostor blízký konstrukci manipulátoru.



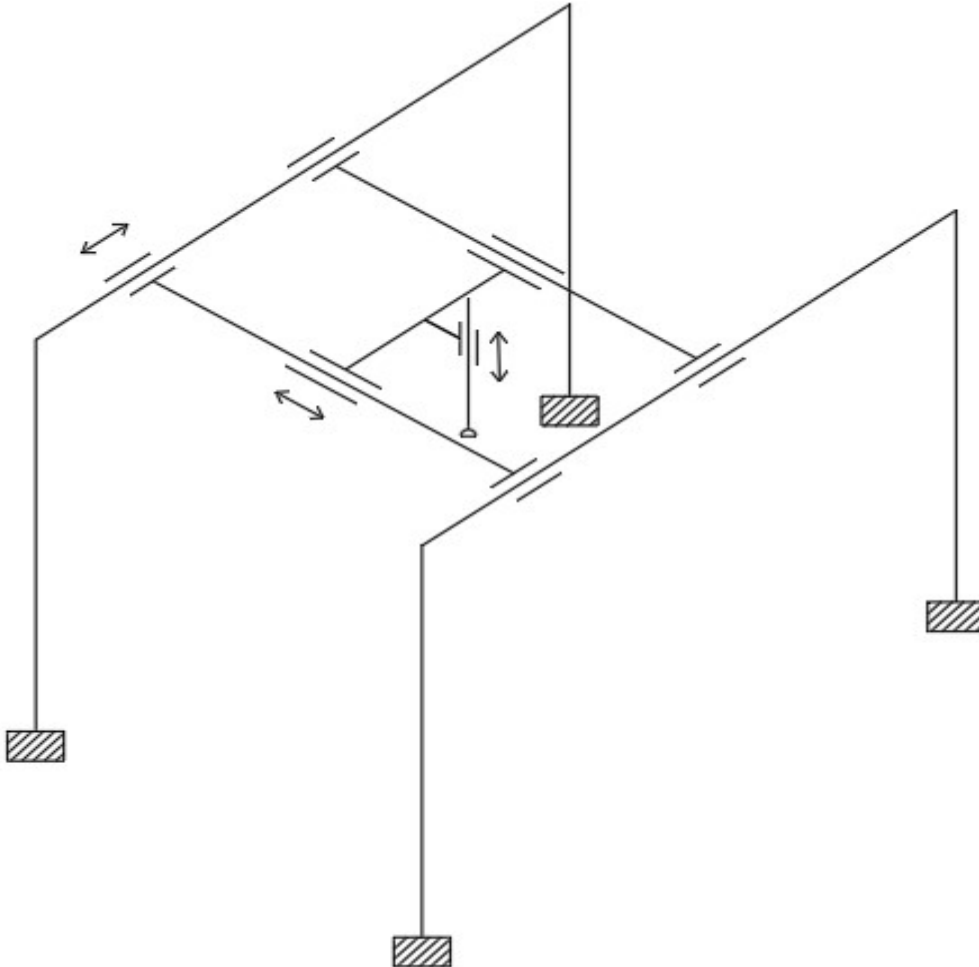
Obr. 23: Schéma manipulátoru typu "A" s vyznačením pracovního prostoru [15]

#### 2.2.2. Běžně používané typy manipulátoru

Pojem manipulátor je velmi široký a lze do něj zahrnout i jeřáby, nakladače kontejnerů atd. Jelikož se v rámci mé závěrečné práce věnuji manipulátoru s dosahem 400 mm, tak se v následujícím souhrnu, budu věnovat jen stacionárním manipulátorům, menších rozměrů.

## PORTÁLOVÉ MANIPULÁTORY

Portálové manipulátory jsou manipulátory typu „K“. Na pevném rámu tvořící portál, pojíždí příčka (most) ve směru první osy. Na příčce se nachází vozík, který po ní pojíždí a tím zajišťuje posun ve směru druhé osy. Na vozíku se vyskytuje rameno, které je poháněno tak, aby zajišťovalo posun ve směru svislé (třetí) osy. Na konci tohoto ramene je umístěn úchopný prvek, který může taky zajišťovat rotaci vůči svislé osy (tím vznikne kinematický řetězec TTTR) anebo jen prvek zajišťující uchopení manipulovaného předmětu (kinematický řetězec TTT).



Obr. 24: Schéma portálového manipulátoru



*Obr. 25: Ukázka portálového manipulátor [17]*

### **ROBOTICKÁ RAMENA**

Robotická ramena lze rozdělit podle počtu os, a to od ramen se třemi osami (Kinematický řetězec typu „K“) až po ramena se šesti osami (Kinematický řetězec typu „A“). Existují robotická ramena i s více osami, kde jsou další osy zajišťované přidáním dalších pohyblivých členů ramena. Tato ramena jsou využívána například u svařovacích robotů, kde je nutno se vyhnout kolizi ramene se svařovaným rámem.





Obr. 26: Ukázka 4-osého robotického ramena [18]



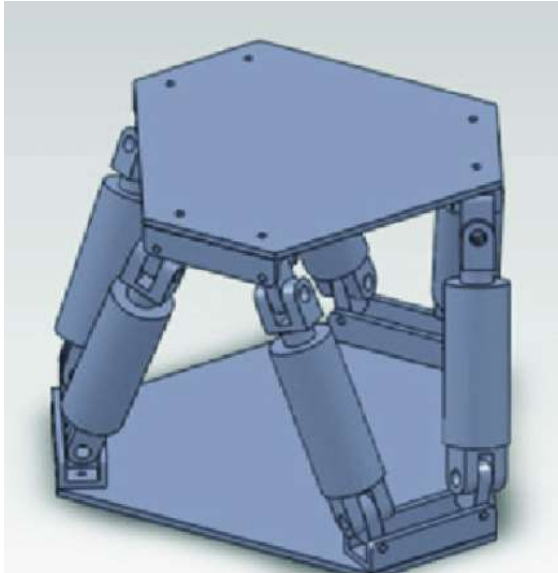
Obr. 27: Ukázka 6-osého robotického ramena [19]



Obr. 28: 7-osého robotického ramena [20]

## STEWARTOVÁ PLATFORMA (HEXAPOD)

Jedná se o manipulátor tvořen nepohyblivou platformou, pohyblivou platformou a šesti písty. Díky uložení pístů a kombinaci jejich výsunů, lze pohyblivou platformu naklopit jakýmkoliv směrem.



Obr. 29: Stewartová platforma [21]

### 2.3. Úchopné hlavice

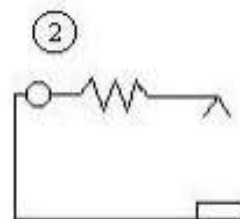
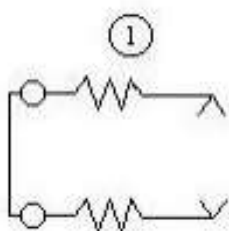
Úchopné hlavice jsou umístěné na konci manipulátoru a slouží k uchopení manipulovaného předmětu. Typ úchopného prvku se volí dle možnosti manipulátoru a také dle manipulovaného předmětu. Můžeme je rozdělit na mechanické, podtlakové a magnetické. [22]

#### 2.3.1. Mechanické [22]

Úchopné hlavice se skládají minimálně ze dvou úchopných prvků. Z nichž je maximálně jeden pevný a zbytek je pohyblivých. Mechanické hlavice se dále dělí podle způsobu vyvození upínací síly na pasivní a aktivní.

#### Pasivní mechanické úchopné hlavice

Pasivní úchopné hlavice se používají pro manipulaci lehčích objektů. Pasivní úchopné hlavice jsou sestaveny z odpružených prvků. Počet odpružených prvků a tvar úchopné hlavice je určen rozměry a tvarem manipulovaného objektu. Uvolnění manipulovaného objektu se provádí pohybem v tangenciálním směru.



Obr. 30: Schéma odpružených úchopných hlavic [22]

### Aktivní mechanické úchopné hlavice

Aktivní mechanické hlavice využívají pohyblivé čelisti, poháněné pohonem, který může být elektrický, pneumatický nebo hydraulický. Výhodou hlavic poháněných hydraulicky a pneumaticky je malý prostor potřebný pro pohon a také velké upínací síly.



Obr. 31: Ukázka pneumtické mechanické hlavice [23]



Obr. 32: Ukázka mechanické hlavice poháněné servomotorem [24]

#### 2.3.2. Pneumatické [25]

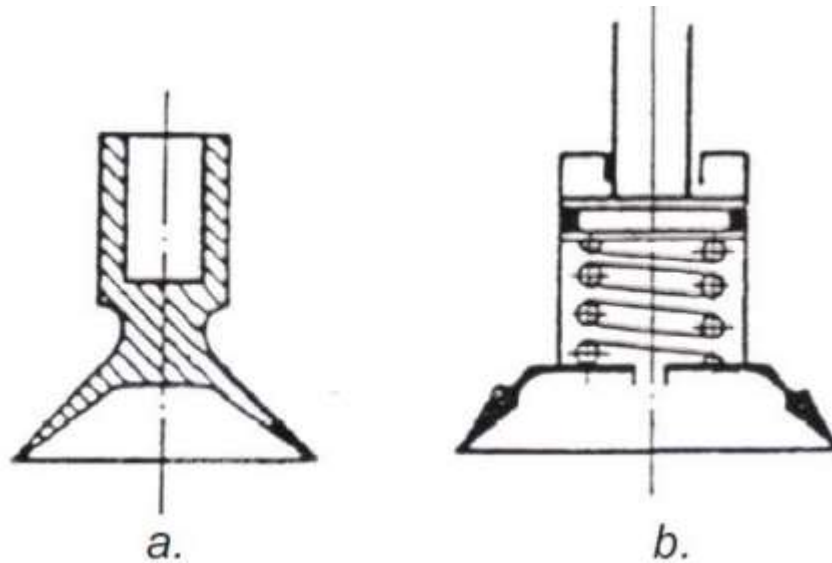
Pneumatické hlavice mohou využívat princip podtlaku nebo přetlaku. Také se dělí na pasivní a aktivní.

#### PASIVNÍ PNEUMATICKÉ HLAVICE

Pasivní pneumatické prvky jsou především pružné přísavky, které se po přisátí na objekt zdeformují, a tak zmenší objem vnitřního prostoru přísavky. Pružný materiál

zdeformované přísavky akumuloval deformační energii a ta má tendenci ho dostat do původního tvaru a vnitřní objem přísavky se částečně zvýší. Jelikož je ale celý prostor uzavřen tak změnou vnitřního objemu přísavky vznikne podtlak, ze kterého se vyvodí úchopná síla. Podmínkou použití těchto přísavek je těsnost styku mezi manipulovaným předmětem a přísavkou.

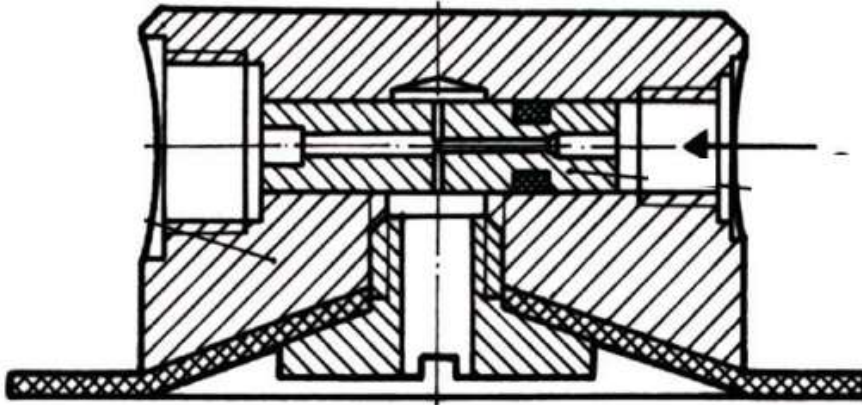
Dvě základní provedení deformačních přísavek jsou pryžové deformační přísavky a) s uchycením na čep (Obr. 33), nebo přísavky s proměnným vnitřním objemem, tvořeným odpruženým pístem. Druhou variantu lze využít, pokud není zajištěn dostatečně hladký povrch manipulovaného objektu. Uvolnění přísavek se provádí pomocí pohybu v tangenciálním směru.



Obr. 33: Základní provedení deformačních přísavek: a) pryžová deformační přísavka s uchycením na čep, b) přísavka s odpruženým pístem) [25]

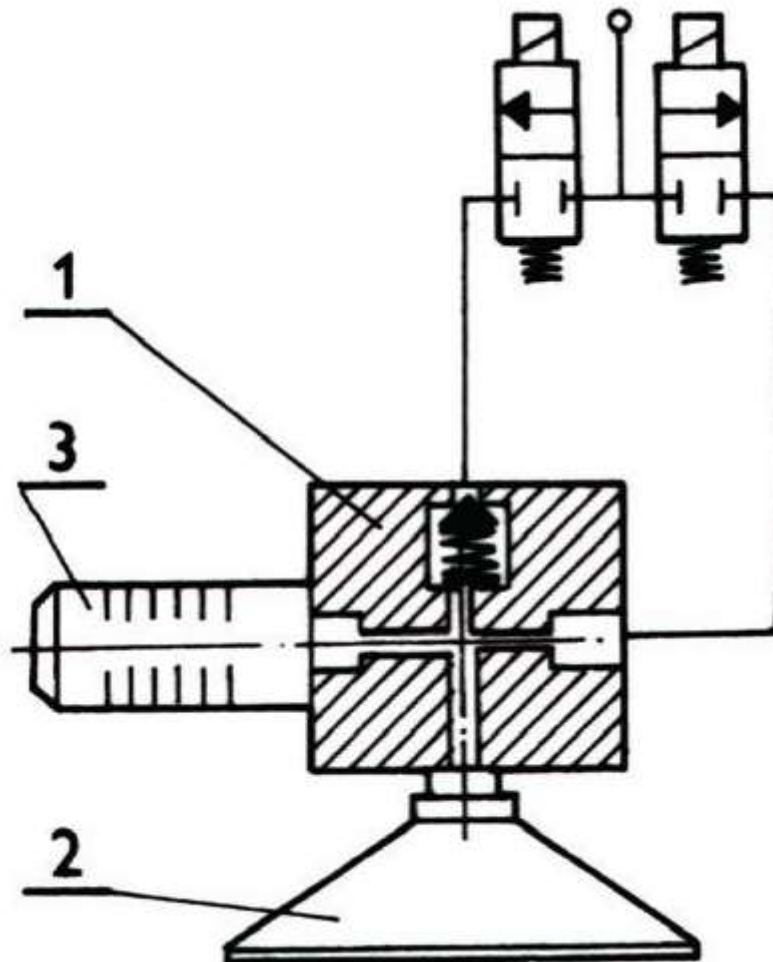
### AKTIVNÍ PNEUMATCKÉ HLAVICE

Aktivní úchopné hlavice využívají často vytvoření podtlakové komory v přísavce. Přísavky jsou připojené k čerpacímu tryskovému zařízení, které může být poháněno plynem, párou anebo i vodou. Přísavky mohou být připojené jednotlivě k čerpacímu zařízení anebo mohou být připojena do odsávacího vedení.



Obr. 34: Podtlaková aktivní přísavka [25]

Aktivní přísavky lze ovládat směrem proudění vzduchu, kdy prouděním v jednom směru se přísaví a v případě uvolnění předmětu se pustí vzduch druhým směrem.



Obr. 35: Příklad ovládní přísavky (1 – ejektorová hlavice, 2 – uchopovací manžeta, 3 – tlumič hluku) [25]

V praxi se používají obě varianty pneumatických přísavek pro manipulaci s plechy. Z provozních důvodů jsou pneumatické hlavice označovány často za velmi nespolehlivé, a to z důvodu rychlého opotřebení přísavek, obrovské citlivosti na poškození přísavky a při

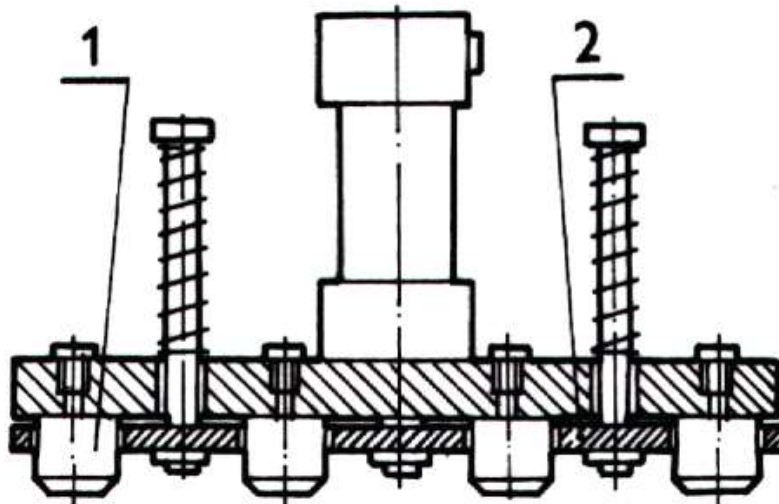
sebemenším znečištění manipulovaného předmětu, neostatečnou schopností vytvořit podtlak i při použití aktivní přísavky.

### 2.3.3. Magnetické [25]

Magnetické hlavice se dají použít na předměty s z feromagnetických materiálů. Hlavice se dělí na aktivní a pasivní. Problémem obou variant je nechtěné přitažení a zmagetizování, nežádoucích menších objektů a feromagnetických nečistot (kovové piliny atd.)

#### PASIVNÍ MAGNETICKÉ HLAVICE

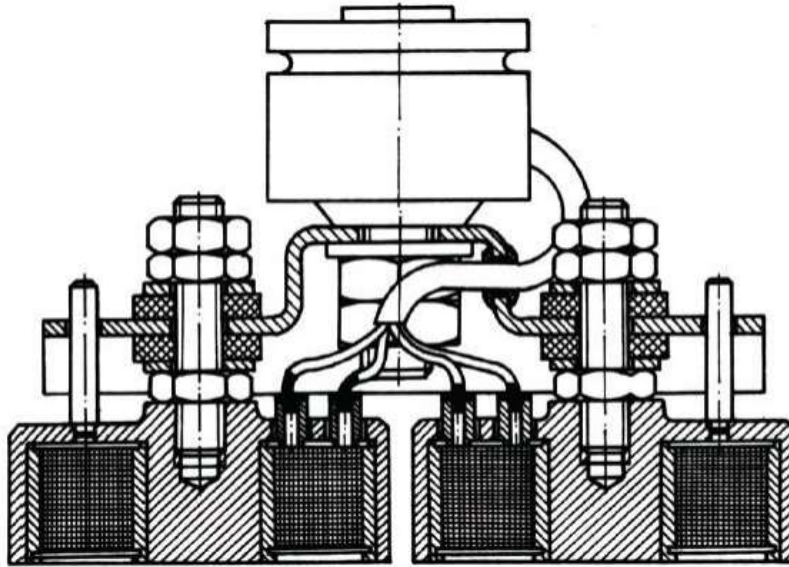
Úchopné prvky jsou řešeny permanentními magnety. Ty jsou rozmístěné po hlavici podle potřeby manipulovaného předmětu. Uvolnění předmětu lze realizovat stáhnutím předmětu tangenciálním pohybem ramenem. Další varianta je vlastní mechanismus uvolňování umístěn přímo na hlavici.



Obr. 36: Magnetické chapadlo s výsuvným vyhazovačem (1 – pouzdro s permanentními magnety, 2 – výsuvná deska) [25]

#### AKTIVNÍ MAGNETICKÉ HLAVICE

Aktivní magnetické hlavice jsou založené na elektromagnetech, které řeší i uvolňování manipulovaného předmětu. Tyto elektromagnety zajišťují uchopení předmětu jsou napájené stejnosměrným proudem a uvolňování se řeší obrácením směru proudu a tím odmagetováním. Tím se eliminuje problém uvolnění předmětu, který mohl být působením stejnosměrného magnetického proudu zmagetizován, kde by nestačilo pouze vypnout proud napájející elektromagnet.



Obr. 37: Elektromagnetická hlavice s dvojicí uchopovacích jednotek [15]

## 2.4. Pohony

Pohyby jednotlivých os manipulátorů zajišťují jejich pohony, které jsou buď přímo nebo pomocí převodového ústrojí spojeny s pohybovými mechanismy jednotlivých os. Mezi základní druhy pohonů manipulátoru patří elektrické, pneumatické a hydraulické pohony. Pohony manipulátoru musí zajišťovat pracovní rychlosti, plynulé rozběhy a zastavení, dostatečnou přesnost polohování a velký poměr výkonu k vlastní hmotnosti. Druh použitého pohonu ovlivňuje konstrukci a provozní vlastnosti manipulátoru.

### 2.4.1. Elektrické pohony

Elektrické pohony jsou elektromotory přeměňující elektrickou energii na mechanickou, využívají elektromagnetické pole vytvářené proudem procházejícím cívkou. Toto pole roztáčí rotor motoru. Výhodou těchto motorů je jednoduchý přívod energie, nízké provozní náklady a snadná údržba. V porovnání s pneumatickými či hydraulickými pohony mají větší poměr hmotnosti ke vyvinutému výkonu.

### STEJNOSMĚRNÉ MOTORY

Stejnsměrné motory jsou napájeny stejnosměrným napětím. Rozdělujeme je dle zapojení budícího vinutí na motory s vlastním buzením a motory s cizím buzením. Jejich otáčková charakteristika ukazuje, že při nízkých otáčkách motor vytváří velký moment a se zvětšujícími se otáčkami moment motoru klesá. Při jejich řízení lze použít měniče vstupního trojfázového proudu na stejnosměrný nebo řízené usměrňovače, které umožňují plynulou změnu otáček bez ohledu na změnu zatížení.



*Obr. 38: Stejnsměrný motor [26]*

### **ASYNCHRONNÍ MOTORY**

Asynchronní motory jsou napájeny střídavým trojfázovým elektrickým proudem. Vinutí na statoru je napájeno třífázovým proudem a tím vytváří točivé magnetické pole se synchronními otáčkami. Otáčky motoru jsou o něco nižší než synchronní otáčky vlivem skluzu.



*Obr. 39: Asynchronní motor [27]*



## KROKOVÉ MOTORY

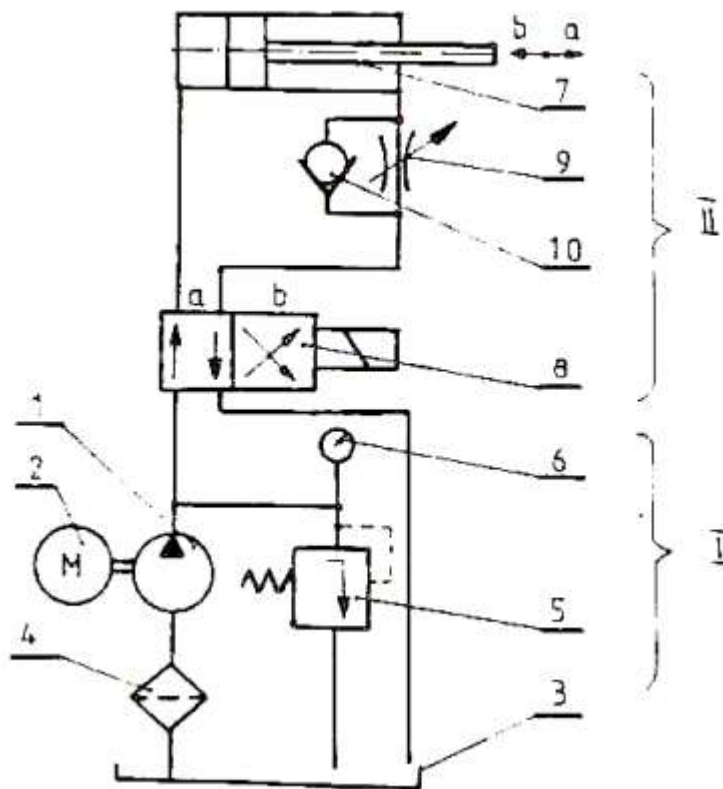
Krokové motory umožňují řízení rychlosti pohybu změnou frekvence vstupních impulsů. Poloha motoru se řídí pomocí počtu vstupních impulsů. Se zvyšujícím počtem impulsů klesá kroutící moment. Jejich velkou výhodou je jednoduché polohování, jehož přesnost závisí na počtu kroků na jednu otáčku a pracovní frekvenci.



Obr. 40: Krokový motor [28]

### 2.4.2. Hydraulické pohony

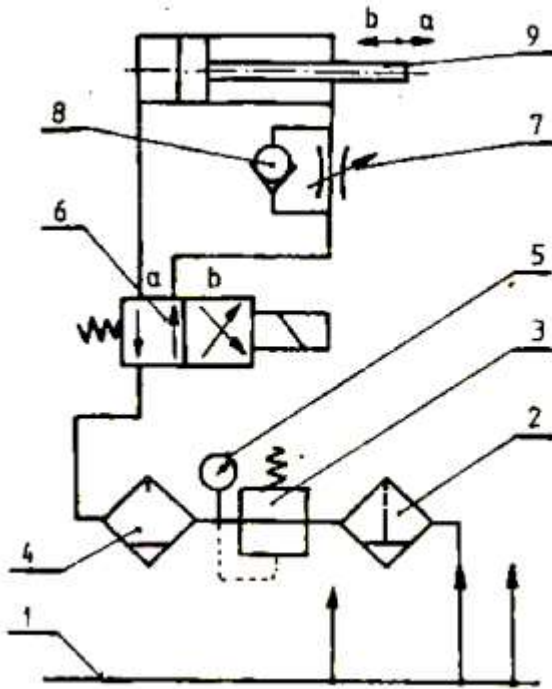
Pro použití hydraulických pohonů je třeba vytvořit celý hydraulický okruh. Ten se skládá minimálně z čerpadla, rozdělovače, nádrže a samotného hydraulického motoru, popř. pístu. Výhodou hydraulických pohonů je schopnost vyvinout vysoké výkony při malých zástavbových prostorech motoru. Taky vynikají plynulým chodem a jednoduchou regulací rychlosti. Hlavní nevýhodou je nutnost vytvoření celého hydraulického obvodu a také vyšší spotřeba energie.



Obr. 41: Hydraulický obvod (1 – hydrogenerátor, 2 – elektromotor, 3 – nádrž, 4 – filtr, 5 – pojistný ventil, 6 – manometr, 7 – hydromotor, 8 – rozvaděč, 9 – škrťací ventil, 10 – zpětný ventil) [29]

### 2.4.3. Pneumatické pohony

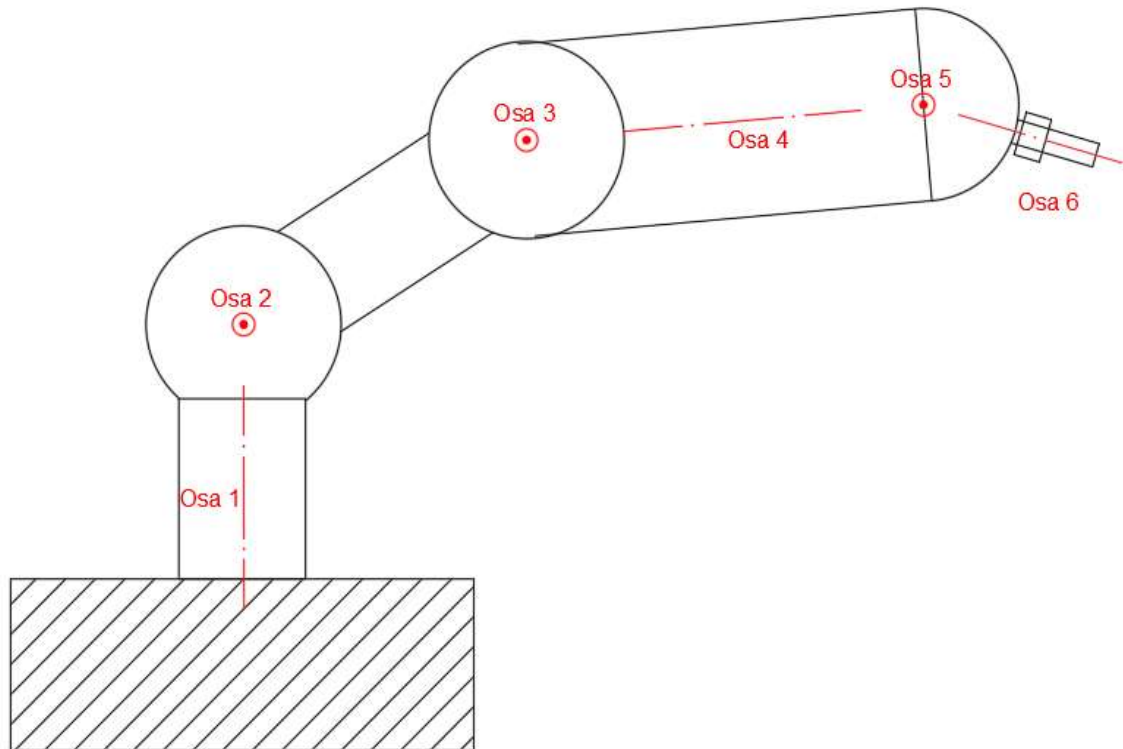
Pneumatické pohony jsou velmi podobné těm hydraulickým, s tím rozdílem, že jako hnací tekutina se používá stlačený vzduch. Také je pro jeho aplikaci vytvořit celý okruh. Většinou se pneumatické pohony využívají v aplikacích s menším výkonem pohonu.



Obr. 42: Pneumatický obvod (1 – centrální rozvod, 2 – filtr s odlučovačem vody, 3 – redukční ventil, 4 – maznice, 5 – manometr, 6 – rozvaděč, 7 – škrtkový ventil, 8 – zpětný ventil, 9 – pneumatický ventil) [29]

### 3. Konstrukční část

Jako typ svého manipulátoru jsem zvolil robotické rameno. Celé rameno lze rozdělit do pěti základních podsestav, které jsou určeny podle toho, kolem které osy zajišťují pohyb. Osy 5 a 6 jsou v jedné podstavě, z důvodu že pohyby kolem nich zajišťuje stejný pohon



Obr. 43: Schéma robotického ramena

#### 3.1. Volba pohonu

Jako pohon všech os volím krokové motory Nema od výrobce Nanotec. Tento typ motoru jsem volil kvůli dostupnosti v ČR a relativně nízké ceně.

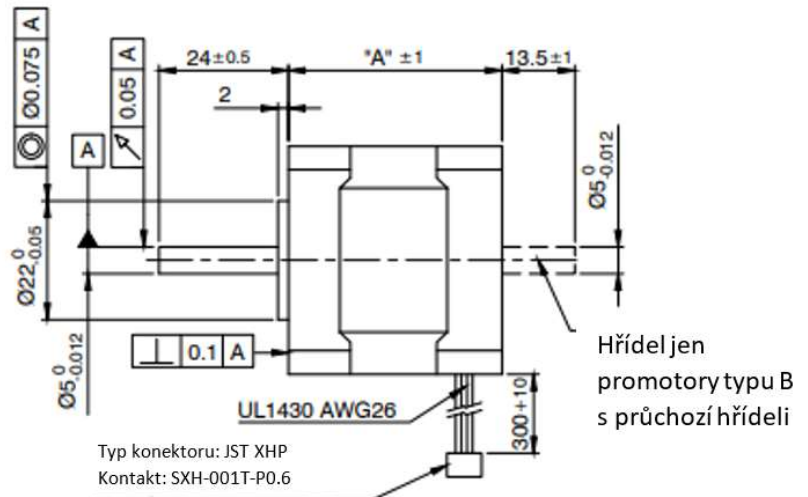
##### 3.1.1. Přehled krokových motorů typu Nema

V této kapitole se budu věnovat přehledu vybraných krokových motoru Nema 17 a Nema 23. Základní parametry tohoto srovnání jsou: maximální kroučící moment, rozměry a váha.

Čelní pohled



Pohled z boku



Obr. 44: Skica motorů typu Nema z katalogu výrobce [30]

### MOTORY NEMA17

Typ	Kroutící moment [Ncm]	Kroutící moment [Nm]	Váha [kg]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Délka Výstupního hřídele [mm]
ST4209X1004	17	0,17	0,15	22	42,3	31	22
ST4209S0404	17,6	0,176	0,22	33,5	42,3	31	22
ST4209S1006	21,21	0,2121	0,22	33,5	42,3	31	22
ST4209S1404	22	0,22	0,22	33,5	42,3	31	22
ST4209M1206	35,36	0,3536	0,28	39,5	42,3	31	22
ST4209M1704	36	0,36	0,28	39,5	42,3	31	22
ST4209L1206	43,84	0,4384	0,35	47,5	42,3	31	22
ST4209L1704	44	0,44	0,35	47,5	42,3	31	22

Tabulka 3: Tabulka vybraných parametrů pro krokové motory Nema 17 [30]

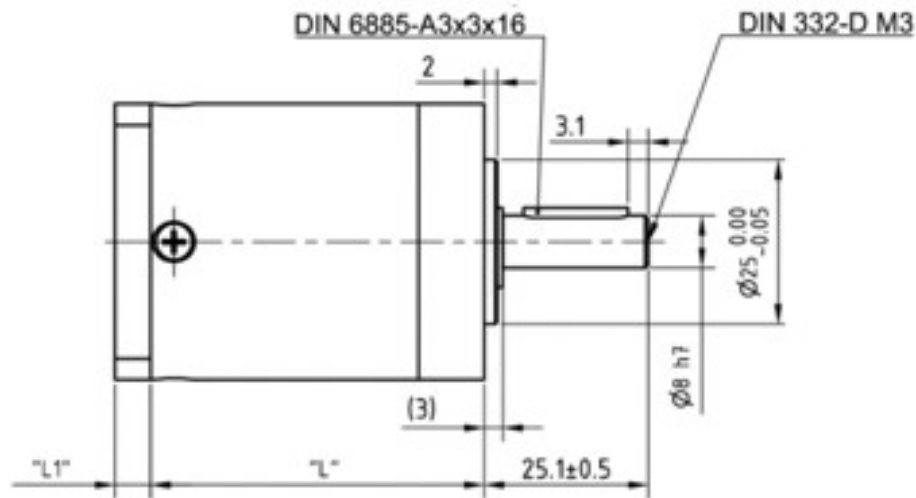
### MOTORY NEMA 23

Typ	Kroutící moment [Ncm]	Kroutící moment [Nm]	Váha [kg]	A [mm]	B [mm]	C [mm]	Délka Výstupního hřídele [mm]
ST5909X2508	60,81	0,6081	0,45	41	56,4	47,14	19
ST5909S1008	101,82	1,0182	0,65	51	56,4	47,14	19
ST5909M2008	104,65	1,0465	0,7	56	56,4	47,14	19
ST5909L1008	179,61	1,7961	1	76	56,4	47,14	19
ST5909L2008	179,61	1,7961	1	76	56,4	47,14	19
ST5909L3008	179,61	1,7961	1	76	56,4	47,14	19

Tabulka 4: Tabulka vybraných parametrů pro krokové motory Nema 23 [30]

## PLANETOVÉ PŘEVODOVKY PRO MOTORY NEMA 17 A 23

Výrobce motoru Nema k nim vyrábí i planetové převodovky.



Obr. 45: Skica planetové převodovky pro motory typu Nema z katalogu výrobce [30]

Typ	Převodový poměr [-]	Max. kroučící moment [Nm]	Účinnost [-]	Kompatibilní s motorem	Váha [kg]	Délka (L+L1) [mm]	Délka Výstupního hřídele [mm]
<b>GP42-S1-4-SR</b>	3,93	0,6081	0,91	Nema 17	0,27	42,7	19
<b>GP42-S1-5-SR</b>	5,25	1,0182	0,91	Nema 17	0,27	42,7	19
<b>GP42-S1-7-SR</b>	7,07	1,0465	0,9	Nema 17	0,27	42,7	19
<b>GP42-S1-9-SR</b>	8,73	1,7961	0,89	Nema 17	0,28	42,7	19
<b>GP56-S1-3-SR</b>	3,29	24,7	0,92	Nema 23	0,58	50,6	19
<b>GP56-S1-5-SR</b>	5,25	38,2	0,92	Nema 23	0,55	50,6	19
<b>GP56-S1-7-SR</b>	7,07	26,1	0,92	Nema 23	0,58	50,6	19

Tabulka 5: Přehled vybraných planetových převodovek pro motory Nema 17 a Nema 23 [31],[32]

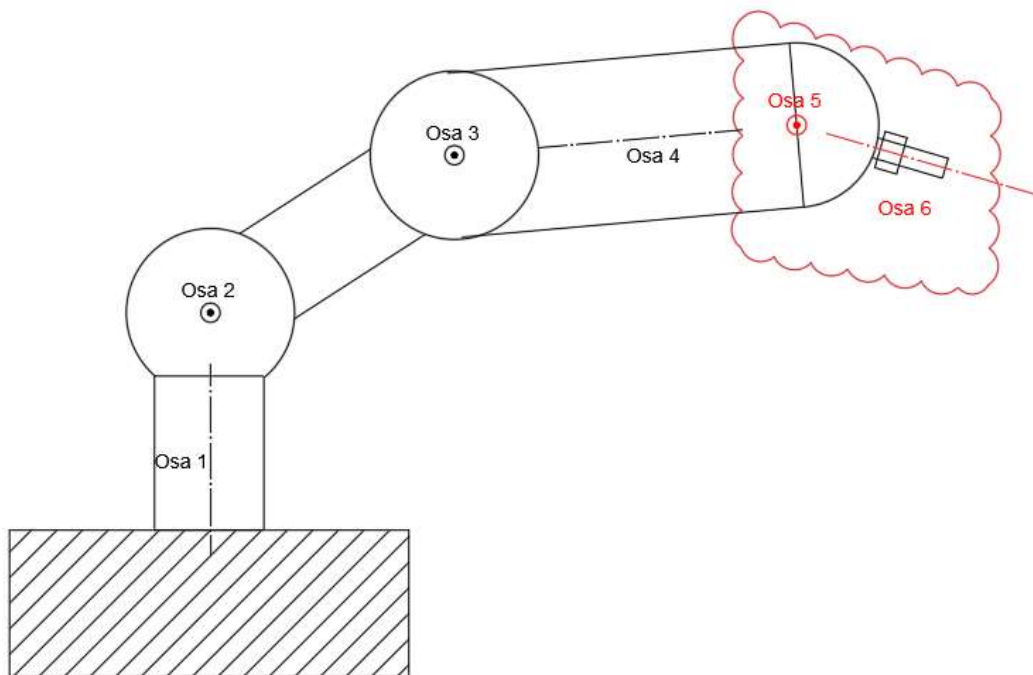
Pro pohon os 4,5 a 6 volím motor Nema 17 ST4209M1704. Pro zbytek os volím motor Nema 17 ST4209S1404 kombinovaný s planetovou převodovkou GP42-S1-5-SROV.

## 3.2. Konstrukce podsestavy os 5 a 6

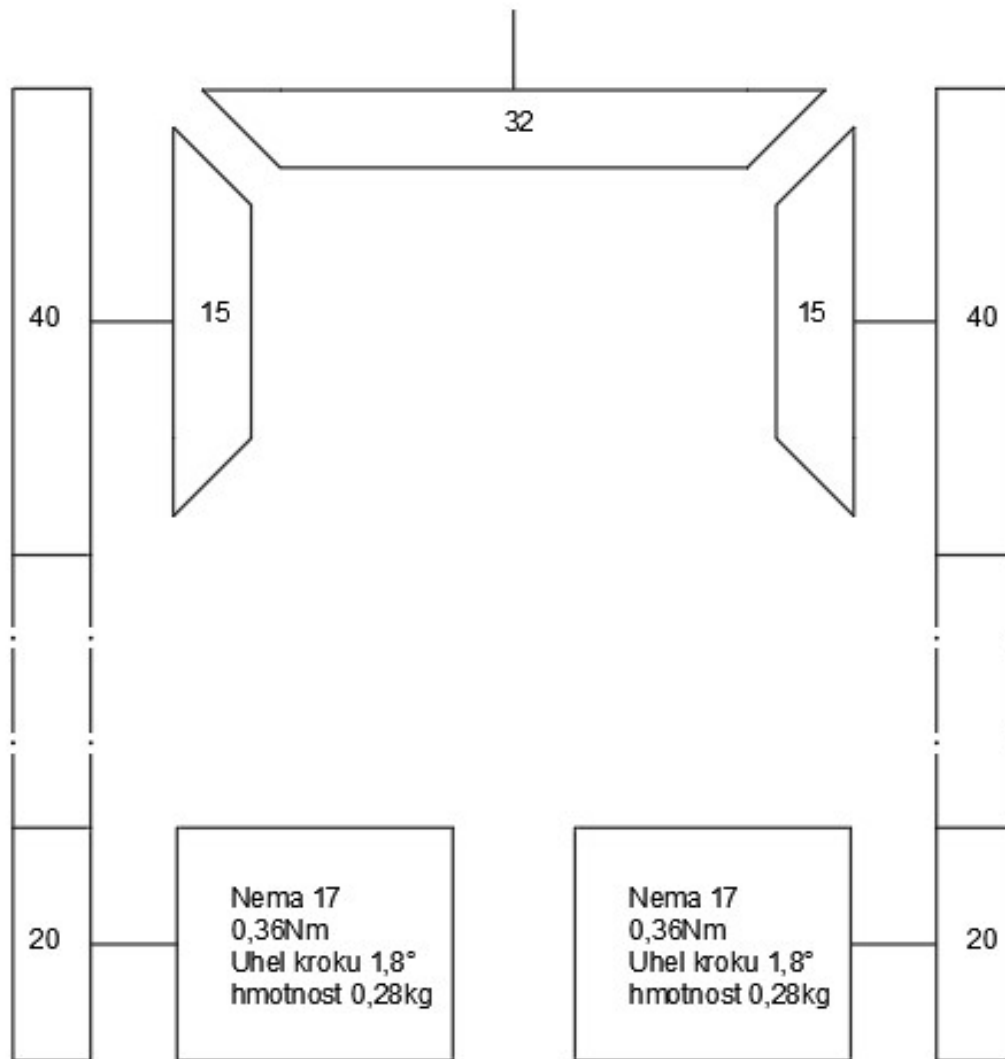
V této kapitole se zabývám konstrukčnímu řešení podsestavy os 5 a 6. Celá podsestava je konstruovaná s myšlenkou minimalizace její hmotnosti, protože ta má značný vliv na potřebné výkony pohonů dalších os.

### 3.2.1. Model podsestavy os 5 a 6

V této kapitole představuji svůj model podsestavy os 5 a 6



Obr. 46: vyznačení podsestavy os 5 a 6

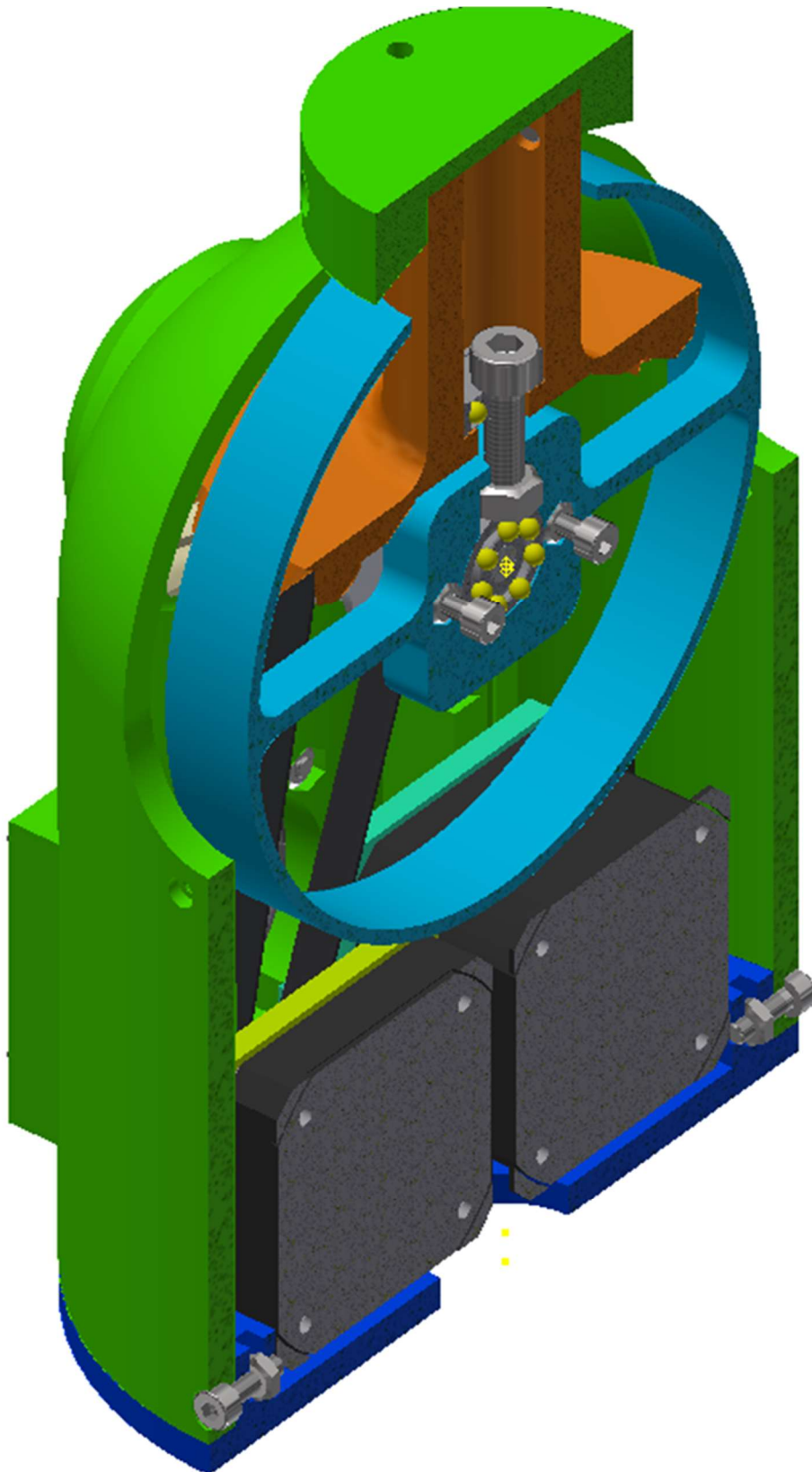


Obr. 47: Schéma pohonu os 5 a 6

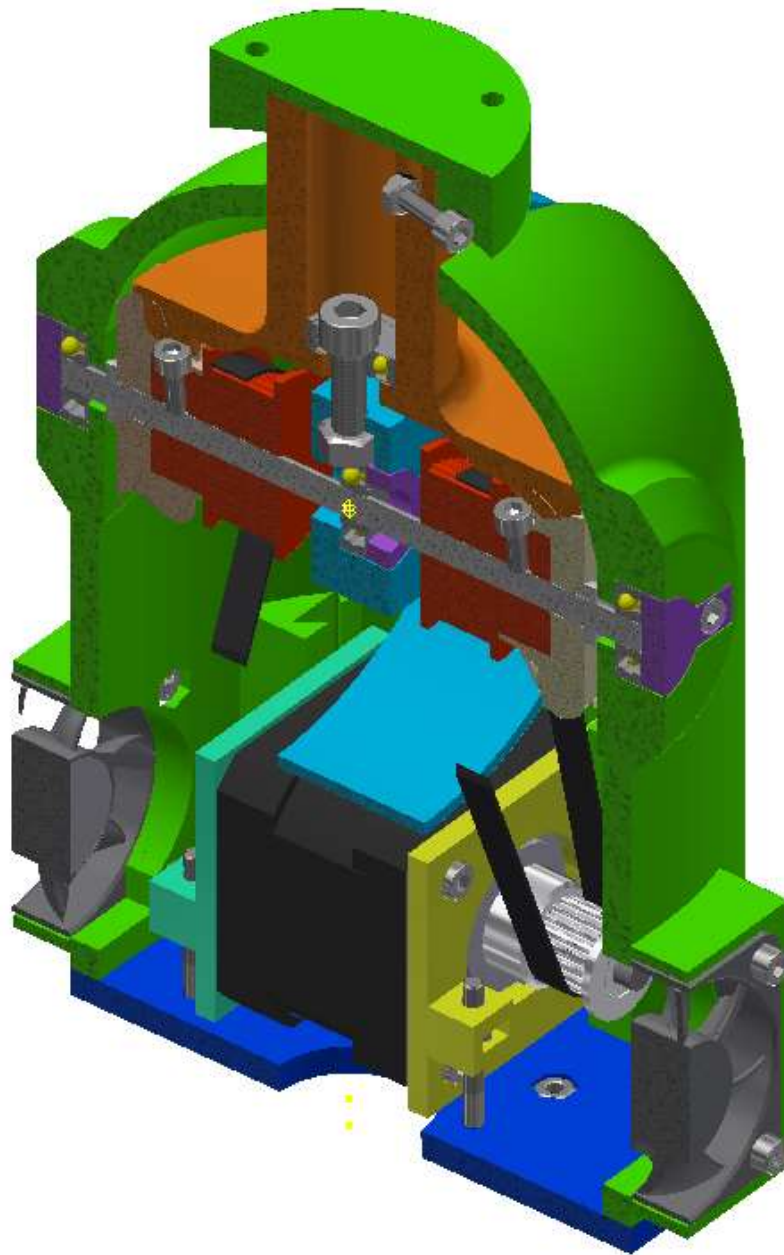




*Obr. 48: Podsestava os 5 a 6*



Obr. 49: 3D pohled na řez sestavou os 5 a 6



Obr. 50: 3D pohled na řez sestavou os 5 a 6

### 3.2.2. Shrnutí 3D tištěných dílů podstavy os 5 a 6

Celý model jsem navrhoval tak aby bylo možné použití co nejvíce součástí tištěných 3D tiskem.

#### **Spojovací díl s uchopovacím zařízením**

Jedná se o díl v spojující Robotické rameno s uchopovací hlavici tištěný z materiálu ABS. Tento díl je navržen pro upevnění hlavice pomocí tří šroubů. Tento díl je možné v případě potřeby vytisknout a vyměnit dle potřeby uchopovací hlavice

### **Ozubené talířové kolo 5/6**

Jedná se o ozubené talířové kolo se 32 zuby spojené s dutým válcem pro umístění ložiska a je na řezech zobrazen oranžovou barvou. Toto kolo je vytištěno z Nylonu, z důvodu vysoké pevnosti v tahu a odolnosti tohoto materiálu. Tato součást je značně namáhaná tak že by 3D tištěné zuby mohly mít značně zkrácenou životnost. Proto navrhuji použít 3D tišené kolo při tvorbě prvního konceptu a v případě selhání této součástky, nahradit kolem z materiálů vyšší jakosti a následně jen vytisknout válec pro ložisko, který se spojí pomocí šroubů s talířem.

### **Kuželová ozubená kola 5/6**

Jedná se o ozubená kola se 15 zuby znázorněná béžovou barvou. Stejně jako talířové kolo je tištěno z Nylonu. Také při selhání ozubeného převodu doporučuji nahradit nakupovanou součástí. Doba životnosti tištěných ozubených kol se očekává značně snížená a bude záviset na konkrétním spektru provozního zatížení. Po dohodě s vedoucím práce bylo dohodnuto, že předmětem zkrácené životnosti se budou zabývat navazující práce v experimentu. V této práci jsou tedy vytypovány tyto problematické uzly.

### **Velké řemenice**

Jedná se o řemenice se 40 zuby pro řemen GT2 založené na modelu kupované součásti. Na řezech je znázorněná červenou barvou a je tištěna z nylonu. Jelikož jeden z režimu pohonu je založen na protichůdném chodu řemenic, které jsou na stejné hřídeli, tak chci využít nízkého součinitele tření mezi nylonem a ocelí. Tato vlastnost nylonu může způsobit prokluz řemene. V tom případě existuje možnost tisknout část součásti s nylonu a druhou část z jiného materiálu. Druhou variantou je nakupovaná řemenice, kde bude nutno mezi řemenicí a hřídel dát kluzné ložisko. Valivé ložisko nelze použít z důvodů malých rozměrů řemenice.

### **Uložení převodu**

Jedná se o součást znázorněnou tyrkysovou barvou tištěnou z materiálu ABS. Umožňuje spojení mezi ozubeným talířovým kolem a hřídeli.

### **Uložení ložisek**

Díl zajišťující uložení ložiska je znázorněn fialovou barvou a tištěný z materiálu ABS. Ve celé sestavě robotického ramena se vyskytuje několikrát, a to průchozí s dírou pro hřídel a neprůchozí.

### **Uchycení motorů 5/6**

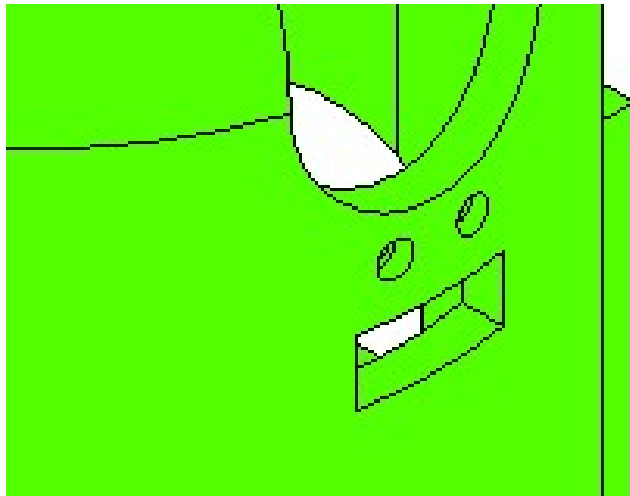
Jedná se do díly zajišťující uchycení motorů Nema 17 znázorněny odstíny zelené barvy. Také má varianty průchozí a neprůchozí.

### **Plášť os 5/6**

Díl zajišťující spojení celé podsestavy k sobě znázorněn zelenou barvou. Je vytištěn z materiálu ABS.

Tento díl umožňuje upevnění i dotykových senzorů pomocí 2 šroubů. Jelikož senzory mají různé rozteče tak je nutné dodržet rozteč na plášti 9,5mm anebo přizpůsobit

velikost uchycení nakoupeným sensorům. Pod tímto upevněním se nachází díra pro 3pinový kabel zajišťující řízení pohonu úchopné hlavice.



Obr. 51: Detail pláště ukazující díry pro uchycení sensorů a díru pro 3pinový kabel níže

Plášť také umožňuje uchycení dvou ventilátoru pro PC velikosti 40x40 mm. Tyto ventilátory mají normalizované rozměry, takže by neměl být problém s komptabilitou. Pro můj model požaduji instalaci ventilátoru tak aby jeden vháněl vzduch do modelu a druhý ho odsával z modelu.

### Spodní spojovací deska 5/6

Jedná se o díl spojující podsestavu os 5 a 6 s podsestavou osy 4. V modelu podsestavy je znázorněna tmavě modrou barvou. Uprostřed této desky se nachází díra pro kabely. Tato deska je tištěna z materiálu ABS.

#### 3.2.3. Pohony os 5 a 6

Pohony os 5 a 6 jsou zajišťované stejnými motory. Při opačném směru otáčení motory pomoci převodového ústrojí roztočí ozubené talířové kolo, čímž zajistí otáčení kolem osy 6. Při stejném směru otáčení ozubená kola vytvoří pevnou vazbu a tím zajistí otáčení kolem osy 5.

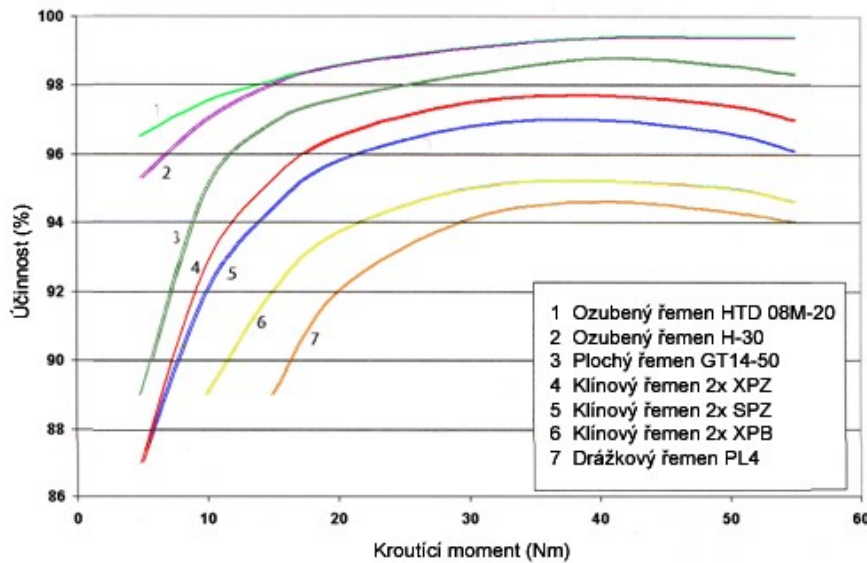
##### 3.2.3.1. Pohon osy 6

Osa 6 je poháněná dvěma motory (Viz obr.47). Jejich výkon je přenesený pomoci řemenů na ozubená kola. Ty zajišťují pohon talířového ozubeného kola

**Parametry pohonu:**

$\eta_{oz} = 0,96$	Účinnost převodu ozubením
$\eta_{řem} = 0,95$	Účinnost řemenového převodu (aproximována z tabulky níže)
$b_1 = 6 \text{ mm}$	Šířka řemene os 5,6
$c_s = 8\,400 \frac{N}{mm}$	Konstanta tuhosti řemene [33]
$d_{řm} = 12,3 \text{ mm}$	Průměr malé řemenice

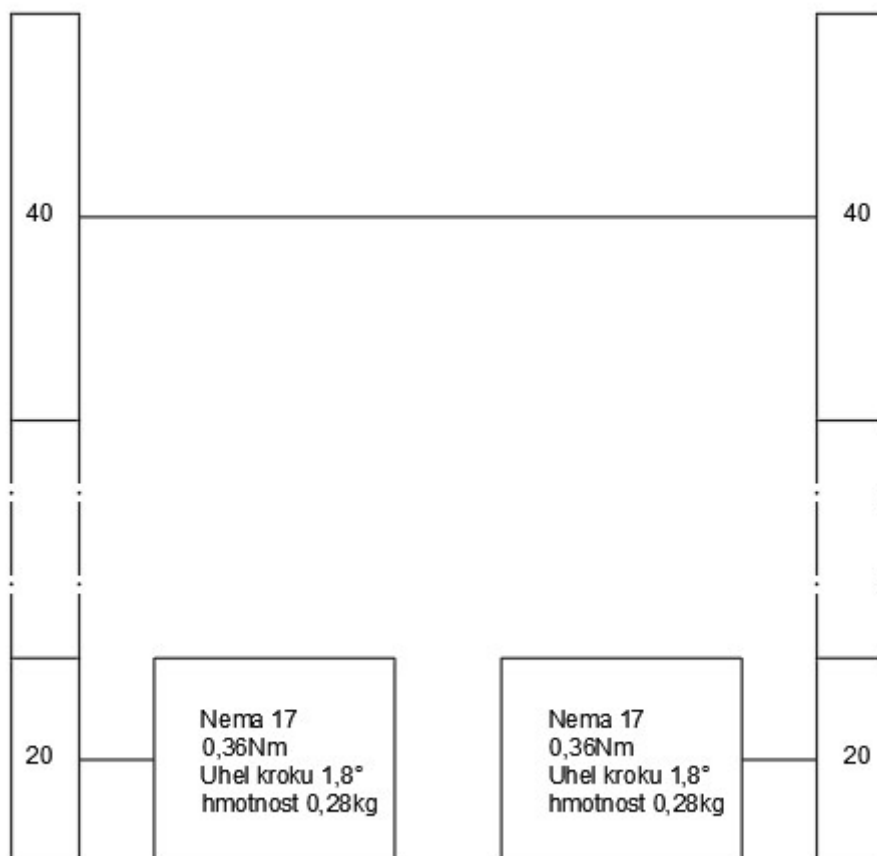
$d_{rv} = 25 \text{ mm}$	Průměr velké řemenice
$z_{rm} = 20$	Počet zubů malé řemenice
$z_{rv} = 40$	Počet zubů velké řemenice
$z_{ko} = 15$	Počet zubů kuželového ozubeného kola
$z_{to} = 32$	Počet zubů talířového ozubeného kola
$M_{k6} = M_{k5} = 0,36 \frac{\text{N}}{\text{m}}$	Maximální moment na motoru pro osy 5 a 6



Obr. 52: Srovnání účinnosti různých řemenů v závislosti na kroučícím momentu [34]

### 3.2.3.1. Pohon osy 5

Osa 6 je poháněná dvěma motory. Jejich výkon je přenesený pomocí řemenů na zastavené ozubené soukolí



Obr. 53: Schéma pohonu osy 5

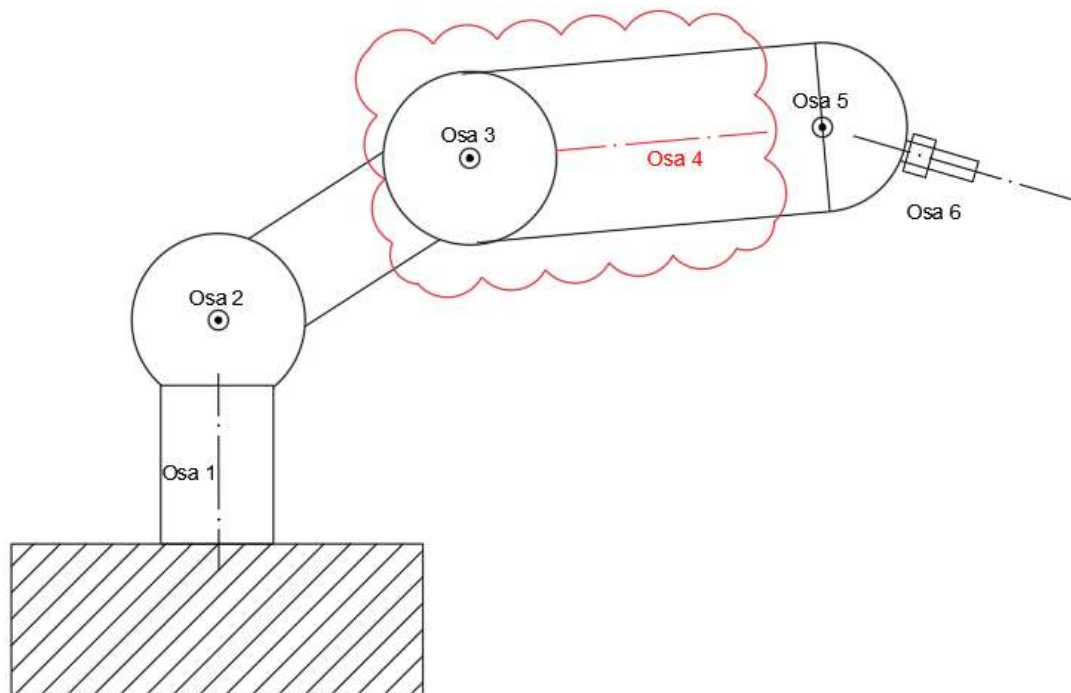
Parametry pohonu osy 5 jsou totožné s parametry pohonu osy 6.

### 3.3. Konstrukce podestavy osy 4

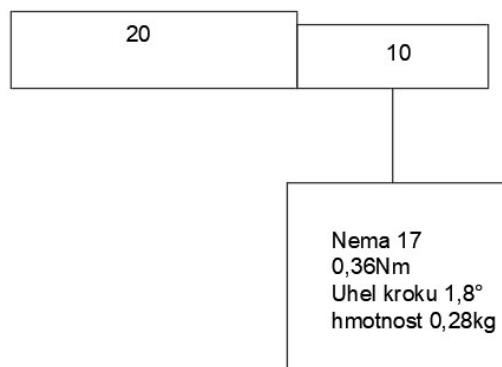
V této kapitole se zabývám konstrukčnímu řešení podestavy osy 4

#### 3.3.1. Model podestavy osy 4

V této kapitole představuji svůj model podestavy osy 4

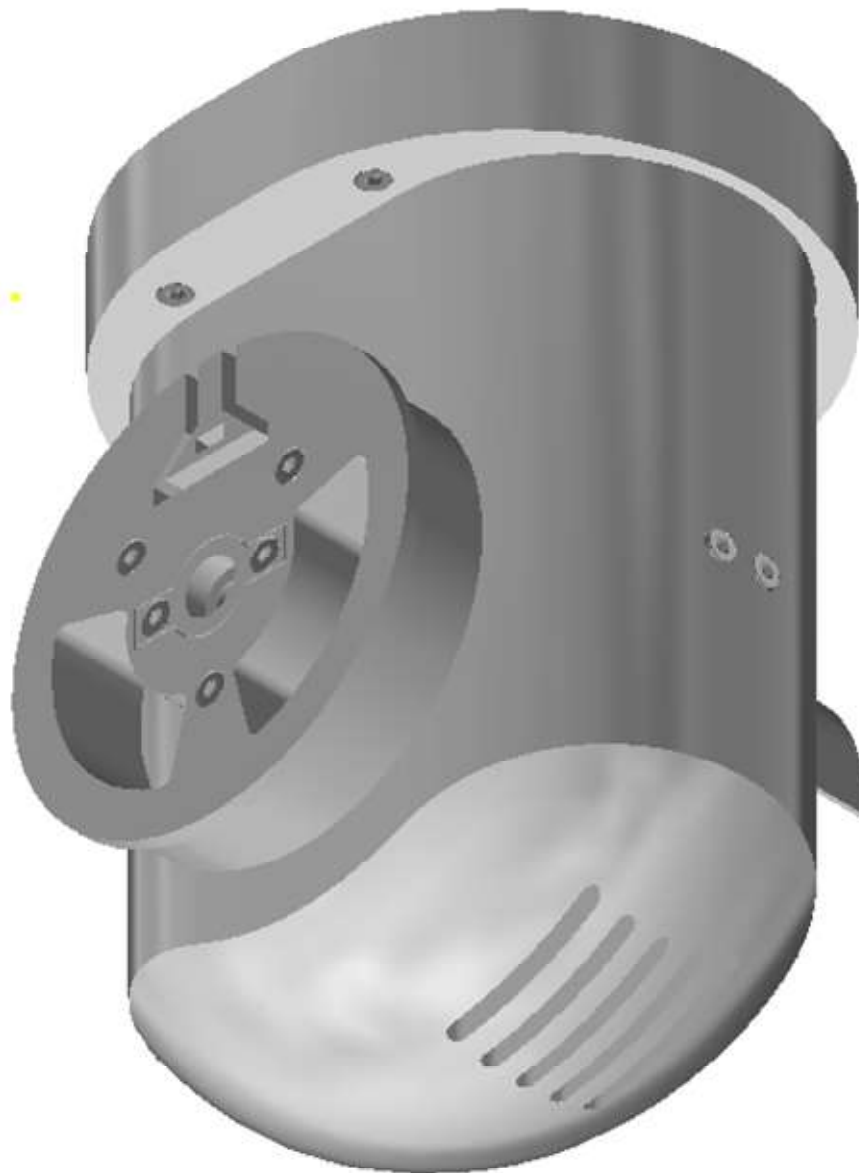


Obr. 54: Vyznačení podestavy osy 4

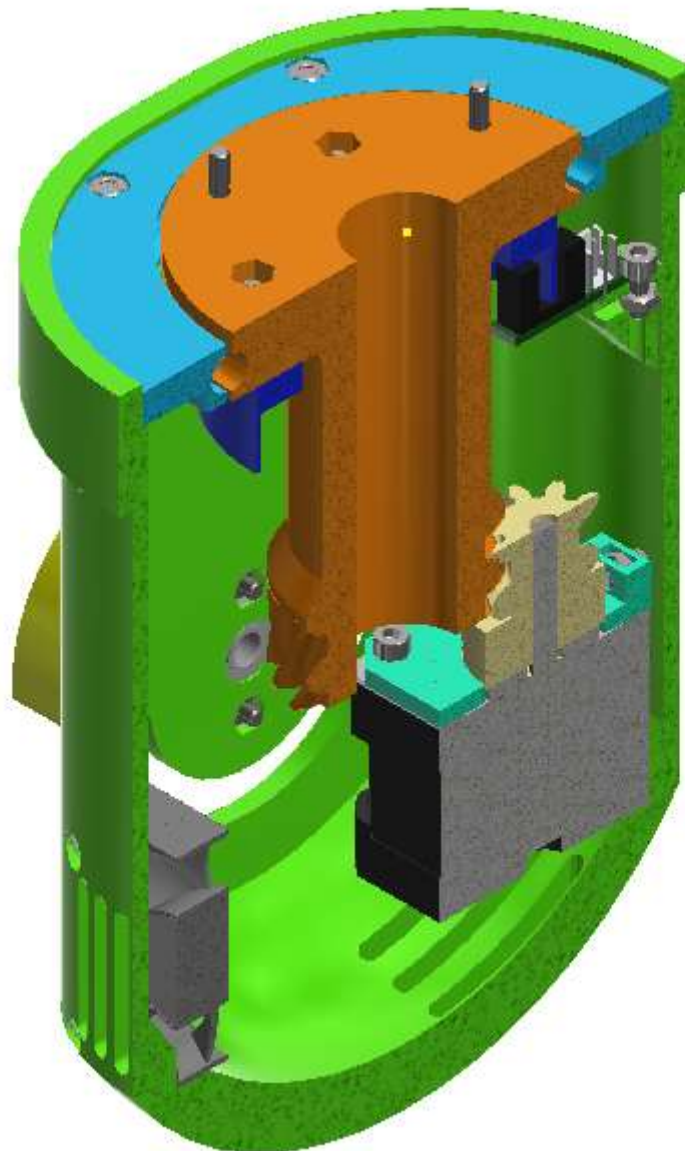


Obr. 55: Schéma pohonu osy 4

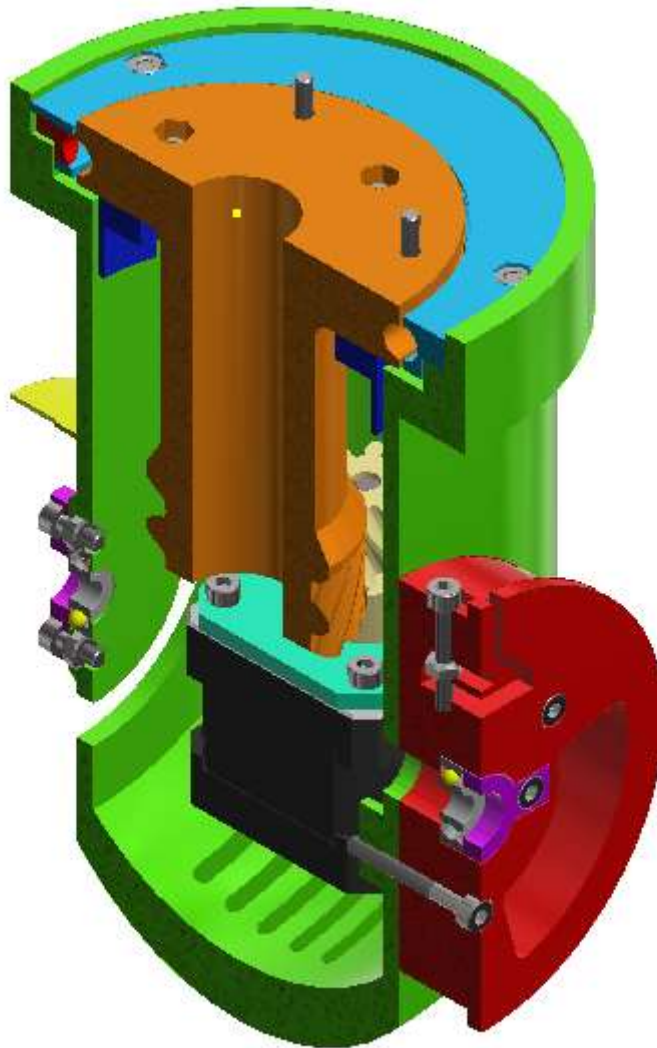




*Obr. 56: Podsestava osy 4*



*Obr. 57: 3D pohled na řez sestavou osy 4*



Obr. 58: 3D pohled na řez sestavou osy 4

### 3.3.2. Shrnutí 3D tištěných dílů podsestavy osy 4

#### Plášť osy 4

Plášť osy 4 je znázorněn zelenou barvou. Je to součást tištěná z materiálu ABS. Celý tvar pláště je velmi limitován podsestavami okolních os. Ze strany optického kotouče osy 3 je připraven výřez pro vedení kabelů.

#### Velké ozubené kolo osy 4

Jedná se o součást s ozubením o počtu 20 zubů tištěnou z Nylonu. V řezu podsestavy je znázorněna oranžovou barvou. Součást také zajišťuje spojení s podsestavou os 5 a 6. Dále taky zajišťuje polovinu drážky pro ložiskové kuličky, která jsou do drážky vkládána. V případě volby jiného řešení kombinovaného ložiska, bude

nutno součást upravit. V případě nevyhovující odolnosti ozubení, lze nahradit kupovaným ozubením, které bude nutno spojit s dutým válcem ke zbytku sestavy.

#### **Deska spojení s osou 4**

Součást tištěná z materiálu ABS a v řezech zobrazená tyrkysovou barvou. Zajišťuje druhou polovinu drážka pro ložiska. Do této drážky vede díra, kterou se ložiska do drážky vloží. Tato díra je pak zaplněna ucpávkou.

#### **Ucpávka díry pro ložiska**

Jedná se o malou součást sloužící k tomu, aby se ložiska v provozu nezasekla v díře, kterou byla vložena. Tato součást je tištěná z materiálu ABS

#### **Malé ozubené kolo osy 4**

Jedná se o součást s ozubením o počtu 10 zubů tištěnou z Nylonu. V řezu podsestavy je znázorněná béžovou barvou. V případě nevyhovující odolnosti ozubení, lze nahradit kupovaným ozubením.

#### **Uchycení motoru osy 4**

Uchycení motoru osy 4 je tištěno z materiálu ABS a je znázorněno modrým odstínem zelené barvy.

#### **Optický kotouč osy 4**

Jedná se o kotouč, na kterém je nalepená stupnice, podle které optický senzor snímá natočení kolem osy 4. Tato součást je tištěna z materiálu ABS. Na obrázcích řezu je znázorněna tmavě modrou barvou.

#### **Optický kotouč osy 3**

Jedná se o kotouč, na kterém je nalepená stupnice, podle které optický senzor snímá natočení kolem osy 3. Tato součást je tištěna z materiálu ABS. Na obrázcích řezu je znázorněna žlutou barvou.

#### **Řemenice osy 3**

Jedná se řemenici, ve které je pevně uchycen řemen obsluhující natočení kolem osy 3. Tato součást je tištěna z materiálu ABS. Na obrázcích řezu je znázorněna červenou barvou.

#### **Uložení ložisek**

Díl zajišťující uložení ložiska je znázorněn fialovou barvou a tištěný z materiálu ABS. Ve celé sestavě robotického ramena se vyskytuje několikrát, a to průchozí s dírou pro hřídel a neprůchozí.

### 3.3.3. Pohon osy 4

Pohon osy 4 je zajišťován motorem, jehož výkon je přenášen ozubeným soukolím.  
(Viz obr. 55)

**Parametry pohonu:**

$$\eta_{oz} = 0,96$$

Účinnost převodu ozubením

$$z_{v4} = 20$$

Počet zubů velkého ozubeného kola osy 4

$$z_{m4} = 10$$

Počet zubů malého ozubeného kola osy 4

$$M_{k4} = 0,36 \frac{N}{m}$$

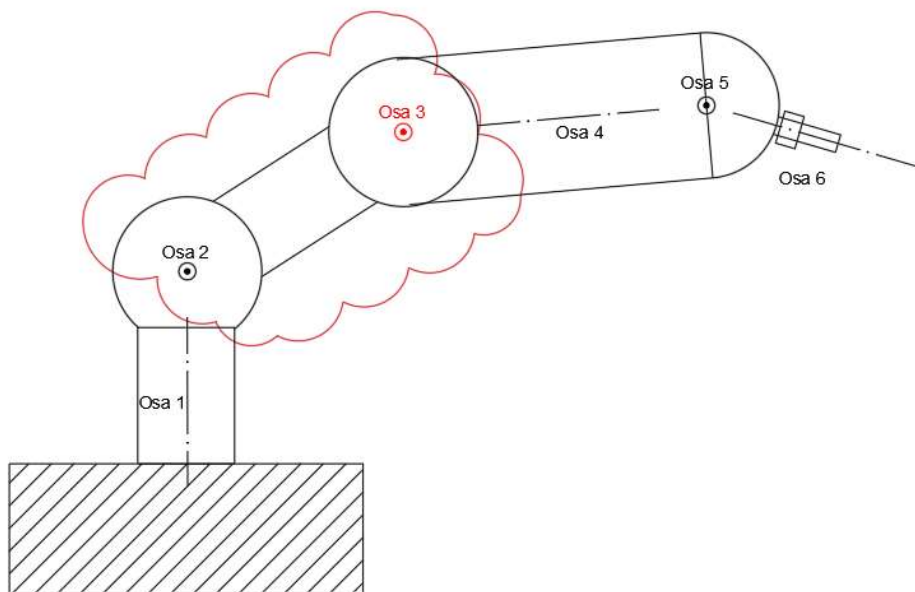
Maximální moment motoru pro osu 4

### 3.4. Konstrukce podsestavy osy 3

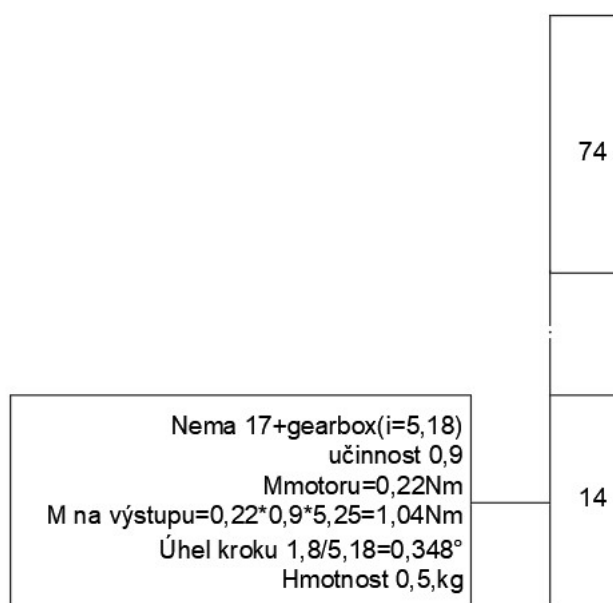
V této kapitole se zabývám konstrukčnímu řešení podsestavy osy 3

#### 3.4.1. Model podsestavy osy 3

V této kapitole představuji svůj model podsestavy osy 3



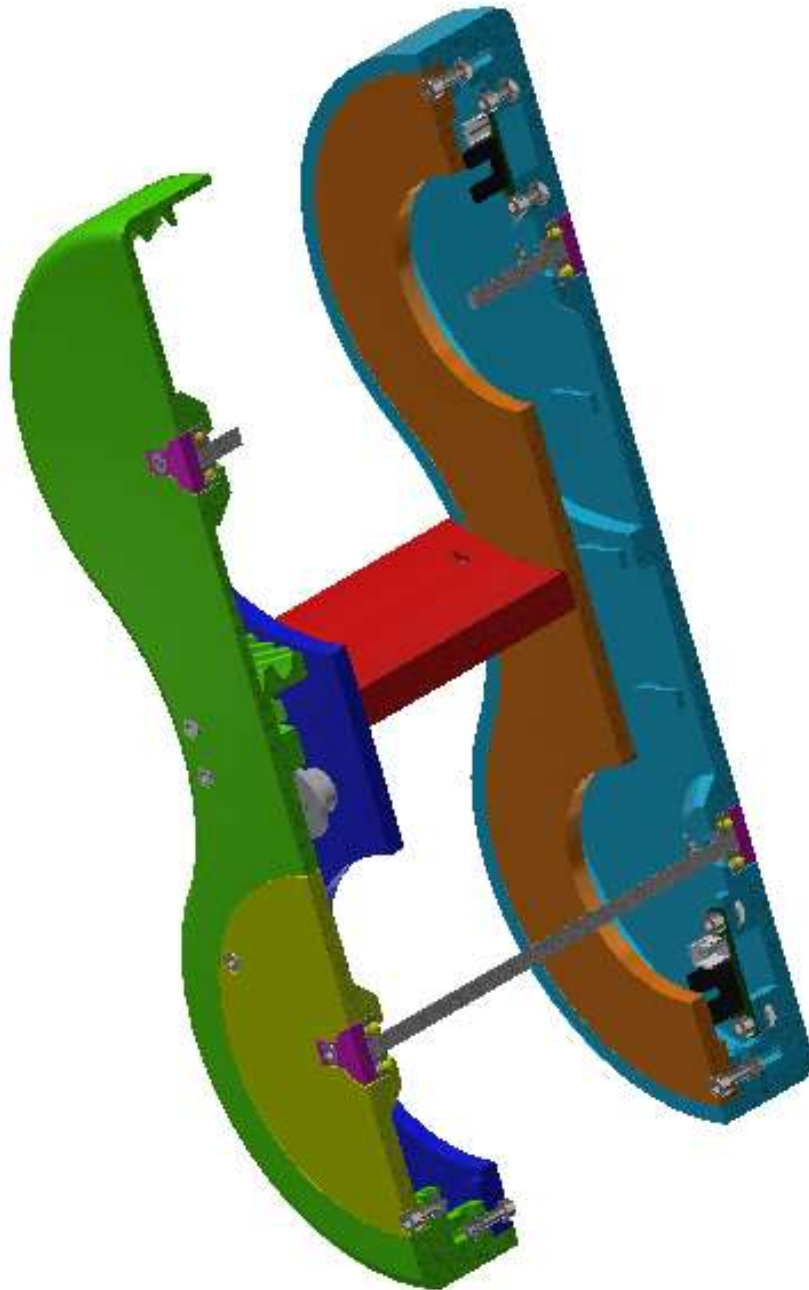
Obr. 59: Vyznačení podsestavy osy 3



Obr. 60: Schéma pohonu osy 3

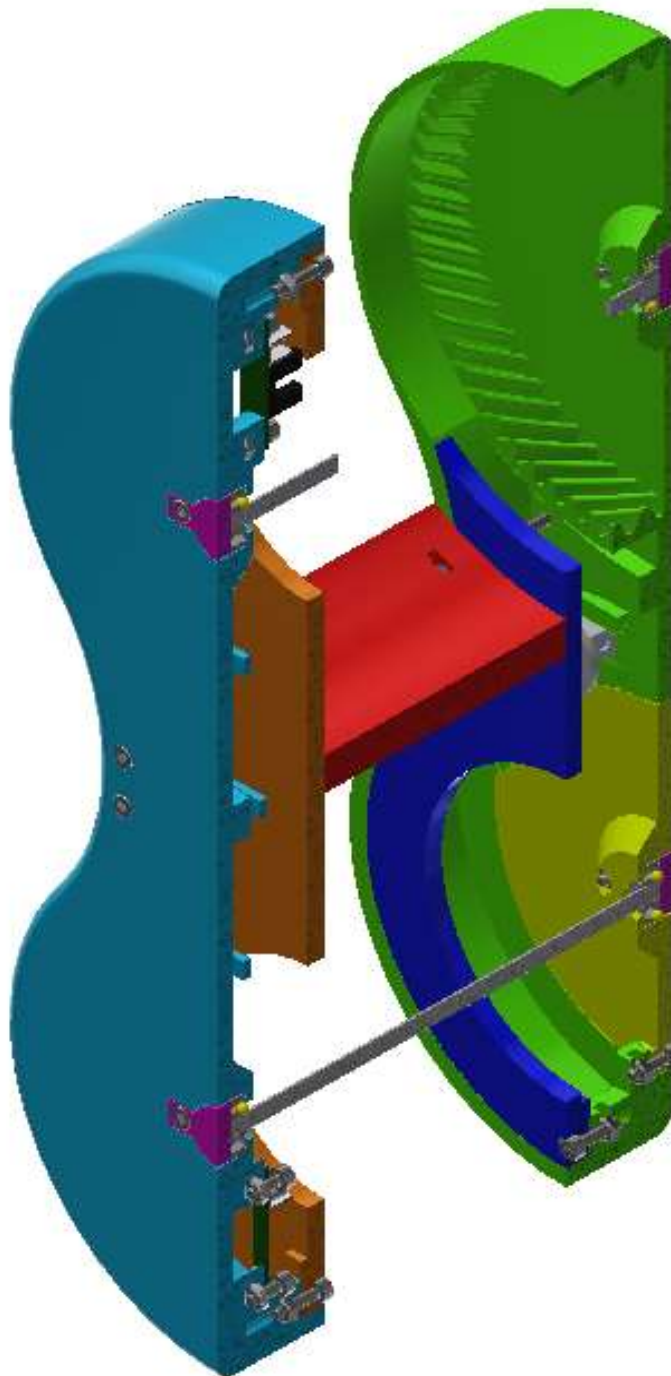


*Obr. 61: Podsestava osy 3*



*Obr. 62: 3D pohled na řez sestavou osy 3*





*Obr. 63: 3D pohled na řez sestavou osy 3*

### **3.4.2. Shrnutí 3D tištěných dílů podsestavy osy 3**

#### **Vnější plášť osy 3**

Vnější plášť osy 3 je vytištěn z materiálu ABS. Tato součást je znázorněná tyrkysovou barvou. Tento plášť zajišťuje uchopení obou hřídeli. V modelu pláště jsou zakomponovány kapsy na uchycení kabelů vedoucí k osám 4,5 a 6.

### Vnitřní deska osy 3

Vnitřní deska osy 3 je vytištěna z materiálu ABS. Tato součást je znázorněna oranžovou barvou.

### Spojení osy 3

Spojení osy 3 zajišťuje propojení obou hlavních částí osy 3 a taky omezuje pohyb kolem os 2 a 3 tak aby nedošlo k přílišnému natočení těchto os. Tato součást je vytištěna z materiálu ABS. Na obrázku řezu je znázorněna červenou barvou.

### Vnější plášť osy 3 s ozubením

Vnější plášť osy 3 s vnitřním ozubením je vytištěn z Nylonu. Na obrázku řezu je znázorněna zelenou barvou. Plášť zahrnuje i tištěné ozubení, které zajišťuje otáčení kolem osy 2. V případě selhání tohoto ozubení by bylo možné nahradit ho vnitřním ozubeným kolem kupovaným. V tom případě by bylo nutno celý plášť přizpůsobit. Plášť zajišťuje taky díru zjednodušující instalaci řemene.

### Menší vnitřní deska osy 3

Vnitřní deska osy 3 je vytištěna z materiálu ABS. Tato součást je znázorněna tmavě modrou barvou.

### Víko pro instalaci řemene

Víko pro instalaci řemene osy 3 je vytištěna z materiálu ABS. Tato součást je znázorněna žlutou barvou.

### Uložení ložisek

Díl zajišťující uložení ložiska je znázorněn fialovou barvou a tištěný z materiálu ABS. Ve celé sestavě robotického ramena se vyskytuje několikrát, a to průchozí s dírou pro hřídel a neprůchozí.

#### 3.4.3. Pohon osy 3

Pohon osy 3 je zajišťován motorem, jehož výkon je přenášen řemenovým převodem. (Viz obr 60)

#### Parametry pohonu:

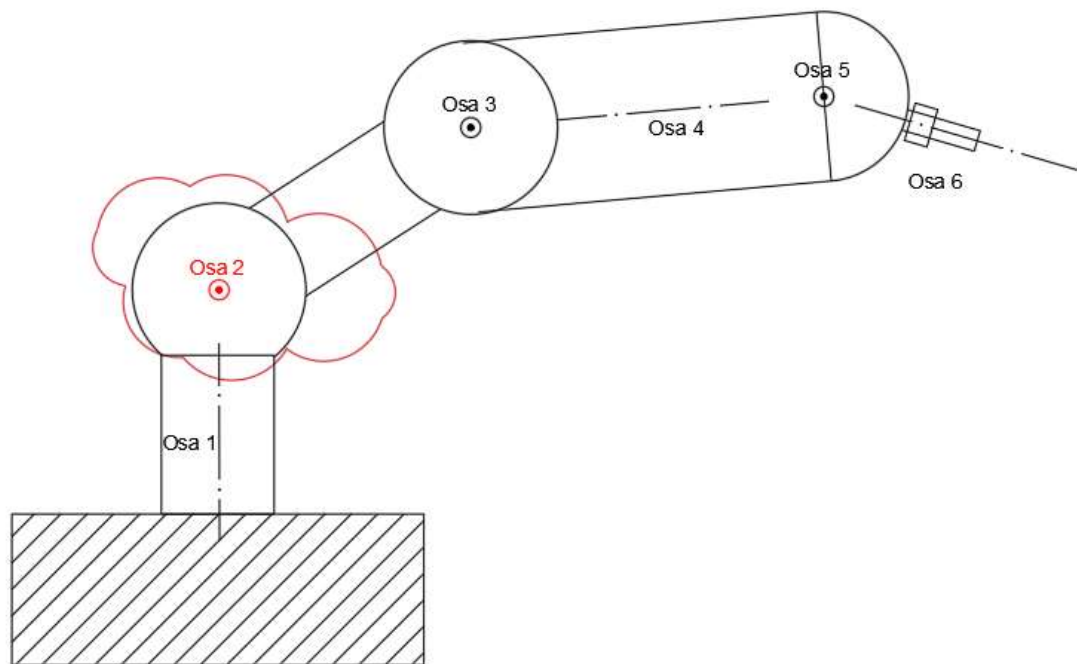
$\eta_{rem} = 0,95$	Účinnost řemenového převodu (aproximována z tabulky níže)
$b_2 = 6 \text{ mm}$	Šířka řemene osy 3
$c_s = 8\,400 \frac{N}{mm}$	Konstanta tuhosti řemene [33]
$d_{řm3} = 12,3 \text{ mm}$	Průměr malé řemenice osy 3
$d_{řv3} = 74 \text{ mm}$	Průměr velké řemenice osy 3
$M_{k3} = 1,04 \frac{N}{m}$	Maximální moment na motoru pro osu 3

### 3.5. Konstrukce podsestavy osy 2

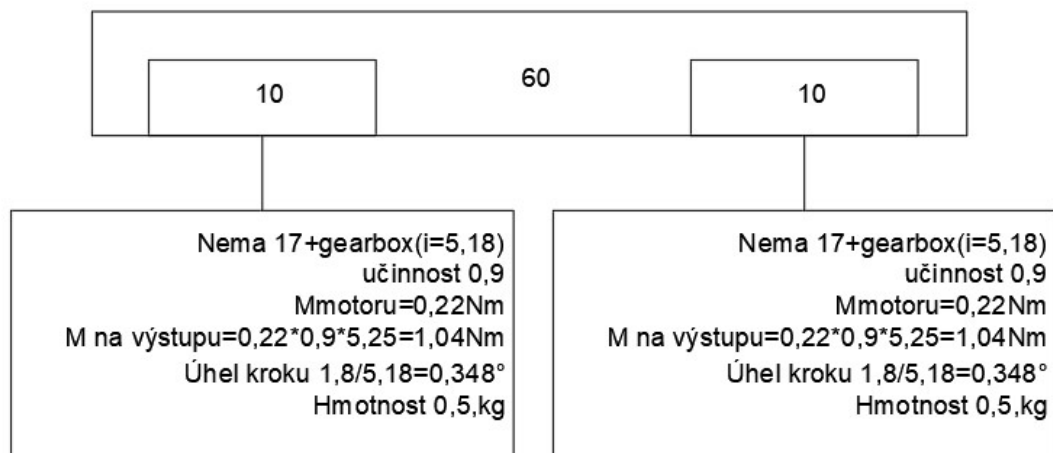
V této kapitole se zabývám konstrukčnímu řešení podsestavy osy 2

#### 3.5.1. Model podsestavy osy 2

V této kapitole představuji svůj model podsestavy osy 2



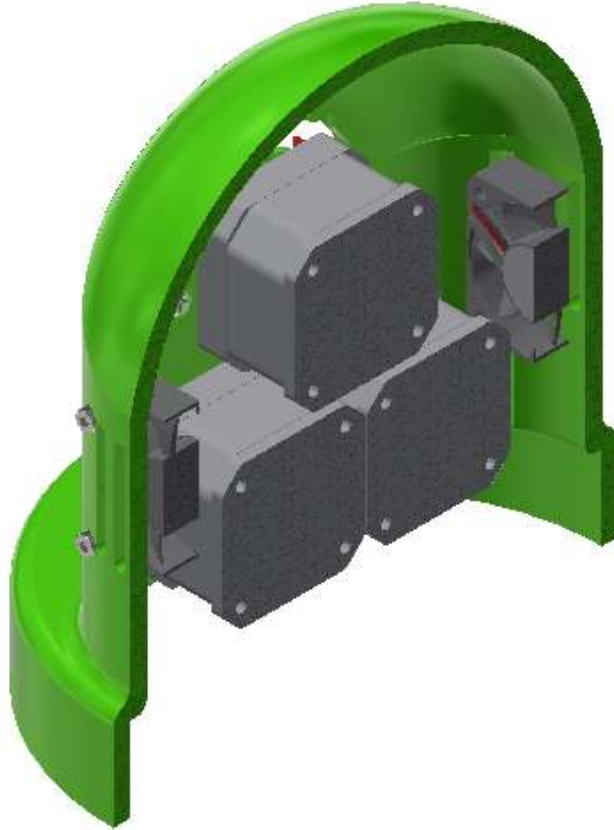
Obr. 64: Vyznačení podsestavy osy 2



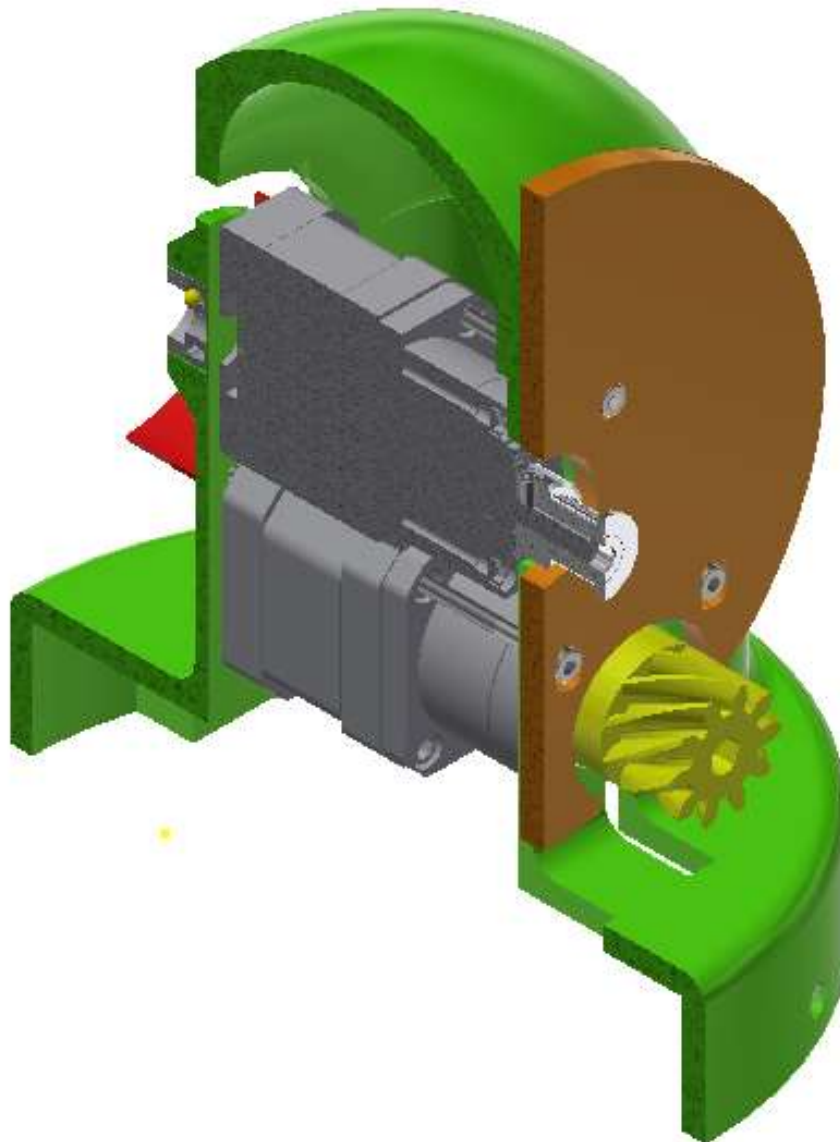
Obr. 65: Schéma pohonu osy 2



*Obr. 66: Podsestava osy 2*



*Obr. 67: 3D pohled na řez sestavou osy 2*



Obr. 68: 3D pohled na řez sestavou osy 2

### 3.5.2. Shrnutí 3D tištěných dílů podsestavy osy 2

#### Plášť osy 2

Plášť osy 2 je vytištěn z materiálu ABS a je v řezech zobrazen zelenou barvou. Tento plášť zajišťuje upevnění všech tří motorů s převodovkami. Kvůli instalaci motorů jsou v plášti výřezy na jejich hřídel. Z druhé strany pláště je výřez na protažení kabelů.

#### Deska os 2 a 3

Deska os 2 a 3 je vytištěna z materiálu ABS. Tato součást je znázorněná oranžovou barvou.

### Malé ozubené kolo osy 2

Jedná se o součást s ozubením o počtu 10 zubů tištěnou z Nylonu. V řezu podsestavy je znázorněná žlutou barvou. V případě nevyhovující odolnosti ozubení, lze nahradit kupovaným ozubením.

### Optický kotouč osy 2

Jedná se o kotouč, na kterém je nalepená stupnice, podle které optický senzor snímá natočení kolem osy 2. Tato součást je tištěna z materiálu ABS. Na obrázcích řezu je znázorněna červenou barvou.

#### 3.5.3. Pohon osy 2

Pohon osy 2 je zajišťován motory, jejíž výkon je přenášen ozubeným soukolím.

(Viz obr. 65)

#### Parametry pohonu:

$$\eta_{oz} = 0,96$$

Účinnost převodu ozubením

$$z_{v2} = 60$$

Počet zubů vnitřního ozubeného kola osy 2

$$z_{m2} = 10$$

Počet zubů malého ozubeného kola osy 2

$$M_{k2} = 1,04 \frac{N}{m}$$

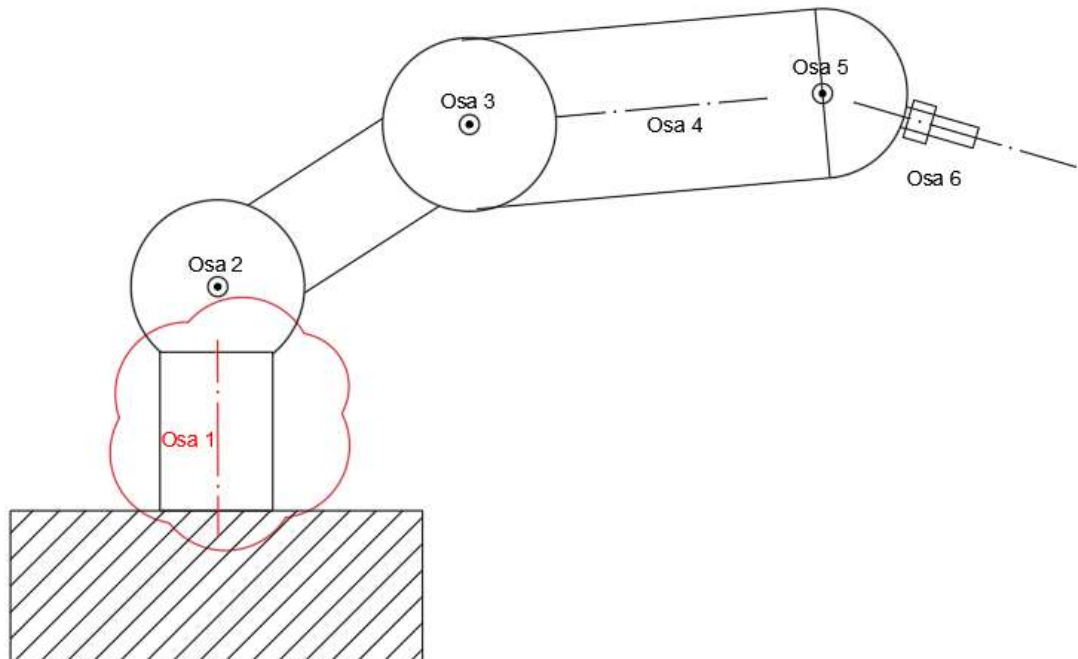
Maximální moment na motoru pro osu 2

### 3.6. Konstrukce podsestavy osy 1

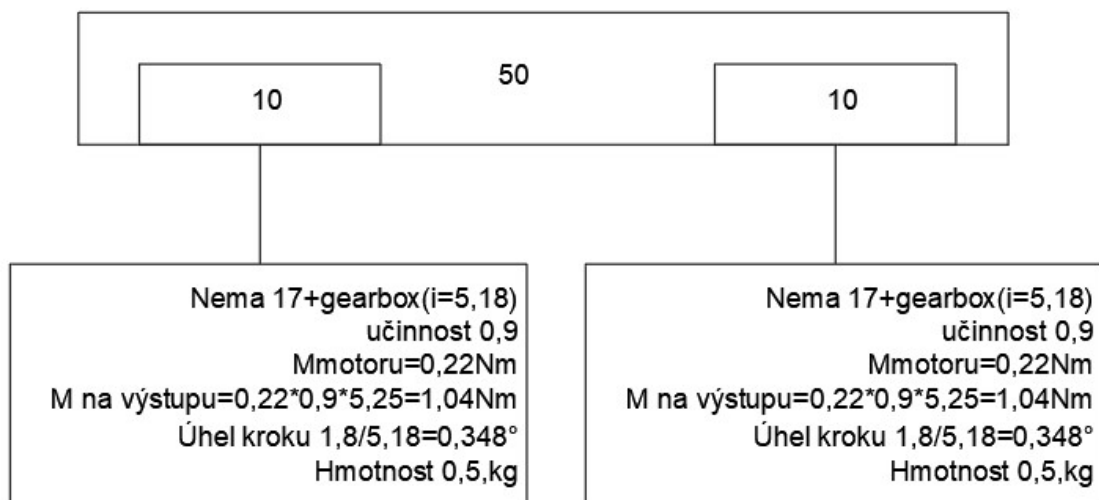
V této kapitole se zabývám konstrukčnímu řešení podsestavy osy 1

#### 3.6.1. Model podsestavy osy 1

V této kapitole představuji svůj model podsestavy osy 1

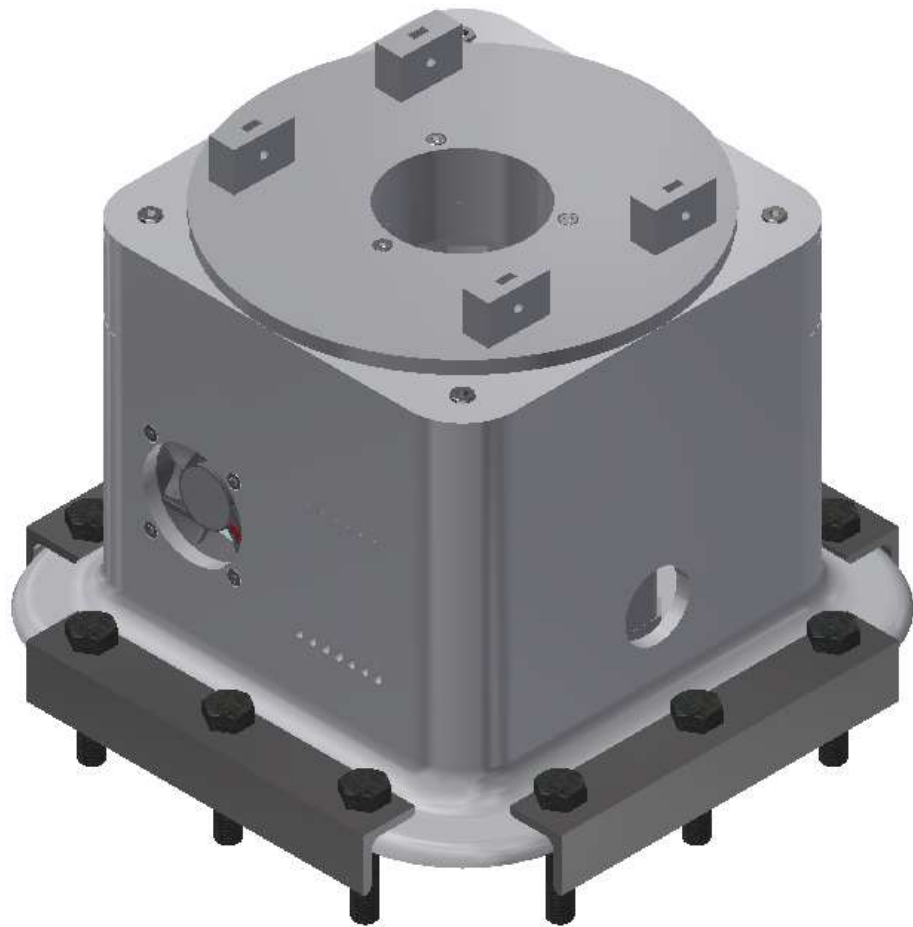


Obr. 69: Vyznačení podsestavy osy 1

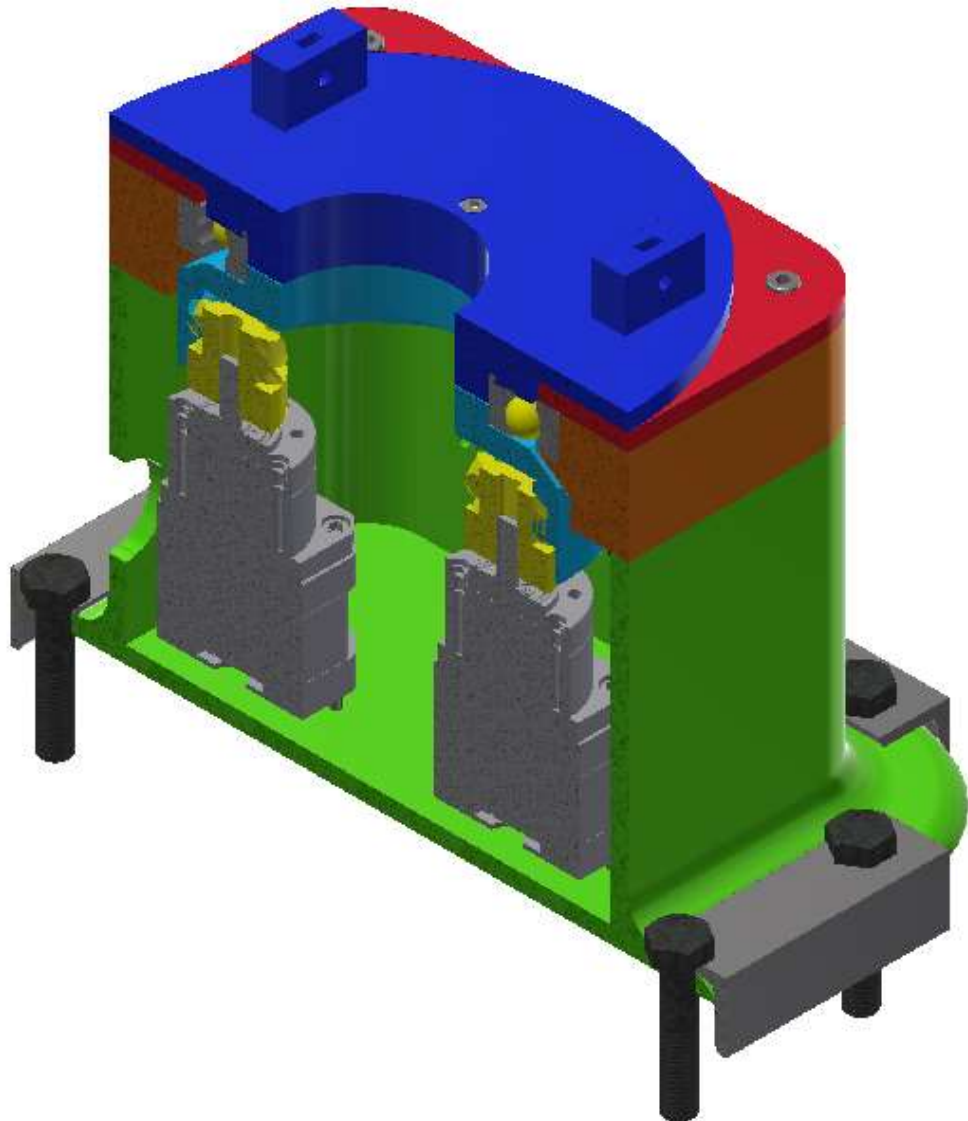


Obr. 70: Schéma pohonu osy 1

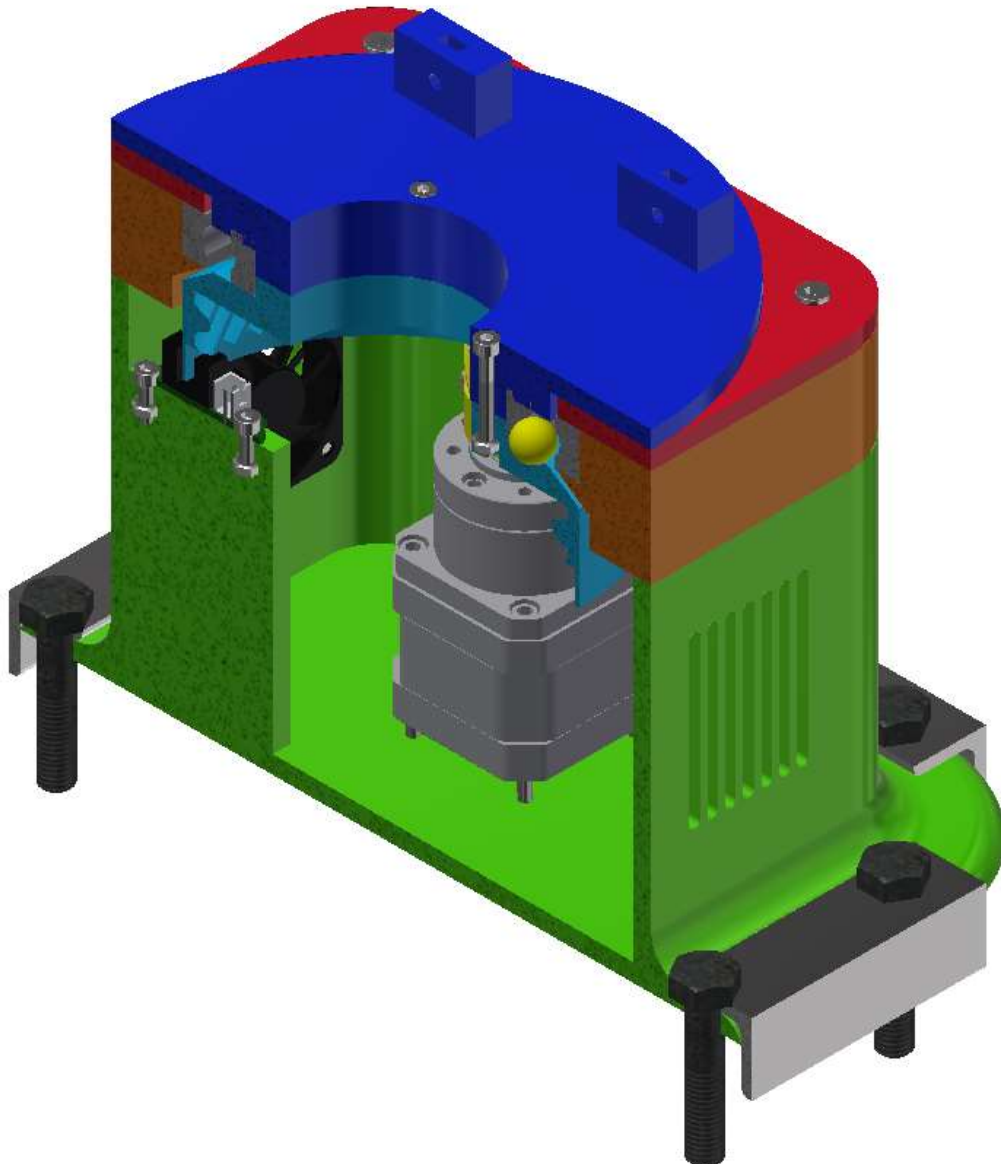




*Obr. 71: Podsestava osy 1*



*Obr. 72: 3D pohled na řez sestavou osy 1*



Obr. 73: 3D pohled na řez sestavou osy 1

### 3.6.2. Shrnutí 3D tištěných dílů podsestavy osy 1

#### Základna

Základna je vytištěná z materiálu ABS. V řezech je základna znázorněná zeleně. Součást je založená na čtvercovém profilu. Tento profil jsem zvolil kvůli jednoduchosti přípravy upevnění zbývajících komponent. Na spodku základny je přírubový způsob upevnění celého robotického ramena pomoci šroubu M8. Z důvodu lepšího rozložení napětí je mezi šroubem a základnou umístěn L profil.

#### Malé ozubené kolo osy 1

Jedná se o součást s ozubením o počtu 10 zubů tištěnou z Nylonu. V řezu podsestavy je znázorněná žlutou barvou. V případě nevyhovující odolnosti ozubení, lze nahradit kupovaným ozubením.

### **Velké ozubené kolo osy 1**

Součást zajišťuje otáčení kolem osy 1 pomocí vnitřního ozubení s 50 zuby tištěna z Nylonu. V řezu podsestavy osy 1 je znázorněná tyrkysovou barvou. Z vnějšku součásti bude nalepená stupnice, podle které optický senzor snímá natočení kolem osy 1. V případě nevyhovující odolnosti ozubení, lze nahradit kupovaným ozubením.

### **Uložení ložiska osy 1**

Uložení ložiska osy 1 je vytištěno z materiálu ABS. Tato součást je znázorněná oranžovou barvou.

### **Deska uložení ložiska osy 1**

Deska uložení ložiska osy 1 je vytištěna z materiálu ABS. Tato součást je znázorněná červenou barvou.

### **Spojka os 1 a 2**

Spojka os 1 a 2 je vytištěna z materiálu ABS. Tato součást je znázorněná tmavě modrou barvou. Uprostřed této součásti je díra na vedení kabelů.

#### **3.6.3. Pohon osy 1**

Pohon osy je zajišťován motory, jejíž výkon je přenášen ozubeným soukolím. (Viz obr.70)

#### **Parametry pohonu:**

$$\eta_{oz} = 0,96$$

Účinnost převodu ozubením

$$z_{v1} = 50$$

Počet zubů vnitřního ozubeného kola osy 1

$$z_{m1} = 10$$

Počet zubů malého ozubeného kola osy 1

$$M_{k1} = 1,04 \frac{N}{m}$$

Maximální moment na motoru pro osu 1

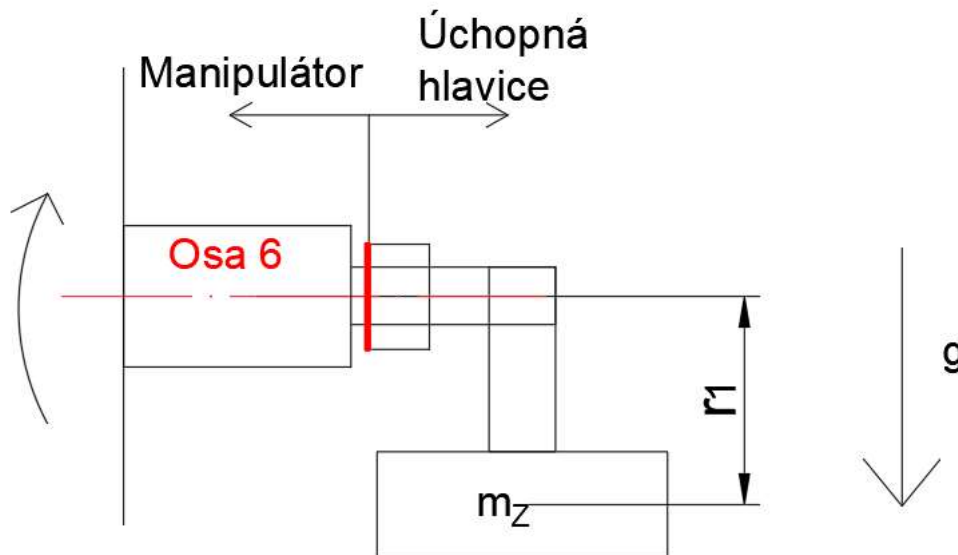
## 4. Výpočtová část

V této části se budu věnovat výpočtům potřebných při konstrukci. Pro všechny výpočty uvažuji hmotnost manipulovaného předmětu 400g a hmotnost úchopné hlavice 100g. Suma těchto hmotností mi dá hmotnost závaží  $m_z = 500g$ . Jedná se o odhad nejvíc nepříznivých poloh mechanismů a v těchto polohách byly vypočteny momenty. Pro tyto momenty jsou kontrolovány pohony všech os. Nebylo uvažováno hledisko dynamiky

### 4.1. Kontrola kroutícího momentu na pohonech jednotlivých os

V této kapitole se věnuji kontrole, zda-li mnou zvolené motory vyhovují. Při výpočtu neuvažuji setrvačné síly, jelikož díky malým úhlovým zrychlením by byly nevýznamné porovnáním s momentem odvozeného od zatížení. Jedná se o odhad nejvíc nepříznivých poloh mechanismů a v těchto polohách byly vypočteny momenty. Pro tyto momenty jsou kontrolovány pohony všech os. Nebylo uvažováno hledisko dynamiky. Velmi pravděpodobně z konstrukčních důvodů budou omezeny rozsahy pohybu některých os. V navazujících pracích bude prozkoumán mechanismus v celém spektru rozsahu pohybu. S reálnými hodnotami hmotností bude taky dořešena výpočtová část dynamiky. Předpokládáme, že v navazujících pracích bude docházet k dílčím úpravám konstrukčního řešení.

#### 4.1.1. Kontrola pohonu osy 6



Obr. 74: Schéma zatížení při otáčení kolem osy 6

#### Výpočet momentu vůči ose 6

$$m_z = 500g = 0,5kg$$

$$r_1 = 50mm = 0,05m$$

$$M_6 = m_z \cdot r_1 \cdot g = 0,5 \cdot 0,05 \cdot 9,81 = 0,245 \text{ Nm} \quad (1)$$

**Výpočet převodového poměru na pro pohon osy 6**

$$i_6 = \frac{z_{to}}{z_{vo}} \cdot \frac{z_{řv}}{z_{řm}} = \frac{32}{15} \cdot \frac{40}{20} = 4,26 \quad (2)$$

**Výpočet potřebného momentu na pohonu vůči ose 6**

$$M_{m6} = \frac{M_6}{i_6 \cdot \eta_{řem} \cdot \eta_{oz}} = \frac{0,245}{4,26 \cdot 0,95 \cdot 0,96} = 0,063 \text{ Nm} \quad (3)$$

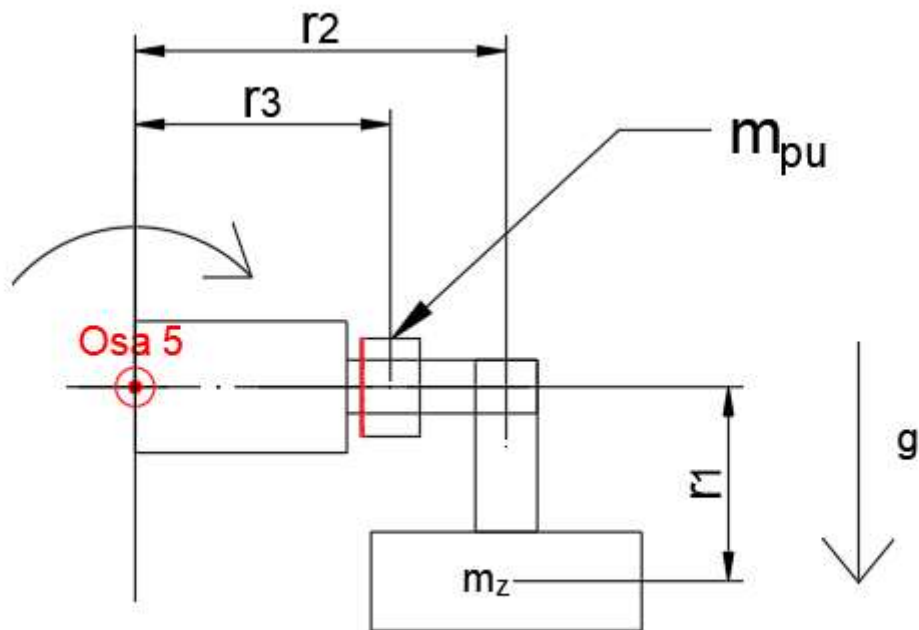
**Výpočet maximálního kroutící moment obou motorů pro pohon osy 6**

$$M_{km6} = 2 \cdot 0,36 = 0,72 \text{ Nm} \quad (4)$$

$$M_{km6} > M_{m6}$$

Moment motorů je větší než moment požadovaný -> **motory vyhovují**

#### 4.1.2. Kontrola pohonu osy 5



Obr. 75: Schéma zatížení při otáčení kolem osy 5

**Výpočet momentu vůči ose 5**

$$m_z = 500 \text{ g} = 0,5 \text{ kg}$$

$$m_{pu} = 70 \text{ g} = 0,07 \text{ kg}$$

$$r_1 = 50 \text{ mm} = 0,05 \text{ m}$$

$$r_2 = 80 \text{ mm} = 0,08 \text{ m}$$

$$r_3 = 70 \text{ mm} = 0,07 \text{ m}$$

$$\begin{aligned} M_5 &= m_z \cdot r_2 \cdot g + m_{pu} \cdot r_3 \cdot g \\ &= 0,5 \cdot 0,08 \cdot 9,81 + 0,07 \cdot 0,07 \cdot 9,81 \\ &= 0,441 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (5)$$

**Výpočet převodového poměru na pro pohon osy 5**

$$i_5 = \frac{z_{řv}}{z_{řm}} = \frac{40}{20} = 2 \quad (6)$$

**Výpočet potřebného momentu na pohonu vůči ose 5**

$$M_{m5} = \frac{M_5}{i_5 \cdot \eta_{řem}} = \frac{0,441}{2 \cdot 0,95} = 0,232 \text{ Nm} \quad (7)$$

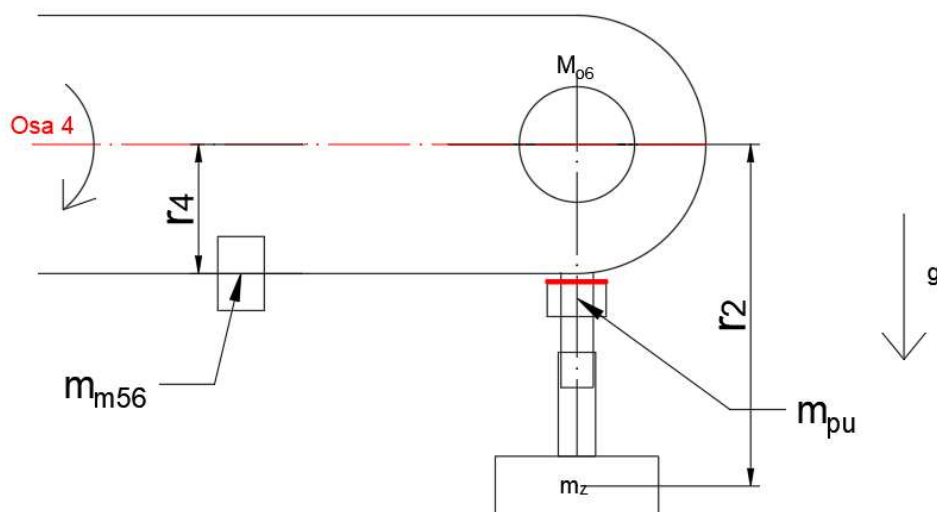
**Výpočet maximálního kroutící moment obou motorů pro pohon osy 4**

$$M_{km5} = 2 \cdot 0,36 = 0,72 \text{ Nm} \quad (8)$$

$$M_{km5} > M_{m5}$$

Moment motorů je větší než moment požadovaný -> **motory vyhovují**

#### 4.1.3. Kontrola pohonu osy 4



Obr. 76: Schéma zatížení při otáčení kolem osy 4

**Výpočet momentu vůči ose 4**

$$m_z = 500 \text{ g} = 0,5 \text{ kg}$$

$$m_{pu} = 70 \text{ g} = 0,07 \text{ kg}$$

$$m_{n56} = 100 \text{ g} = 0,1 \text{ kg}$$

$$r_1 = 50 \text{ mm} = 0,05 \text{ m}$$

$$r_2 = 80 \text{ mm} = 0,08\text{m}$$

$$r_3 = 70 \text{ mm} = 0,07\text{m}$$

$$r_4 = 55\text{mm} = 0,055\text{m}$$

$$\begin{aligned}
 M_4 &= m_z \cdot r_2 \cdot g + m_{pu} \cdot r_3 \cdot g + m_{n56} \cdot r_4 \cdot g \\
 &= 0,5 \cdot 0,08 \cdot 9,81 + 0,07 \cdot 0,07 \cdot 9,81 \\
 &\quad + 0,1 \cdot 0,055 \cdot 9,81 = 0,447 \text{ Nm}
 \end{aligned}
 \tag{9}$$

#### Výpočet převodového poměru na pro pohon osy 4

$$i_4 = \frac{z_{v4}}{z_{m4}} = \frac{20}{10} = 2 \tag{10}$$

#### Výpočet potřebného momentu na pohonu vůči ose 4

$$M_{m4} = \frac{M_4}{i_4 \cdot \eta_{oz}} = \frac{0,447}{2 \cdot 0,96} = 0,232\text{Nm} \tag{11}$$

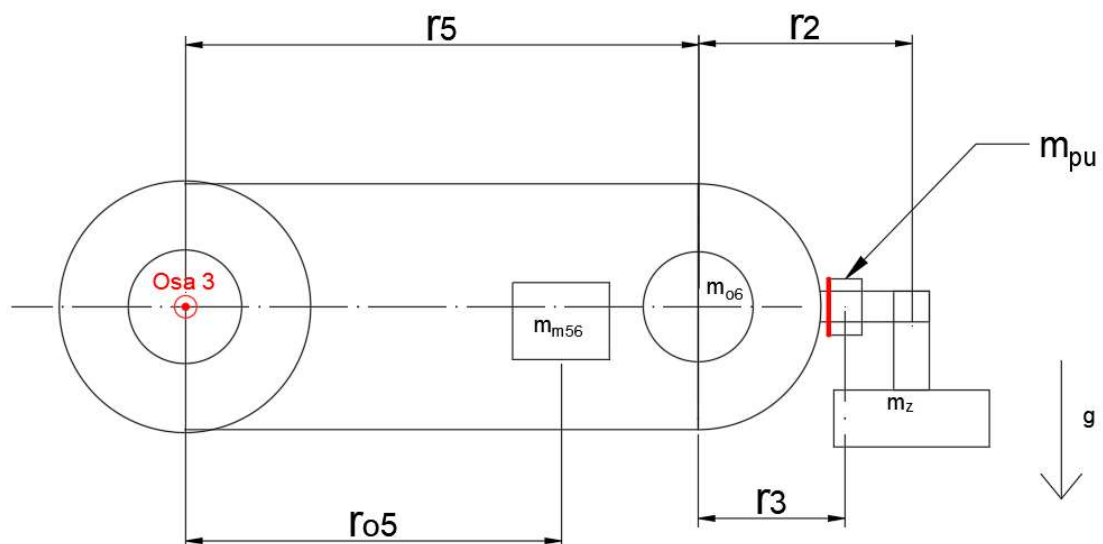
#### Výpočet maximálního kroutící moment motoru pro pohon osy 4

$$M_{km4} = 1 \cdot 0,36 = 0,36\text{Nm} \tag{12}$$

$$M_{km} > M_{m4}$$

Moment motoru je větší než moment požadovaný -> **motor vyhovuje**

#### 4.1.4. Kontrola pohonu osy 3



Obr. 77: Schéma zatížení při otáčení kolem osy 3



**Výpočet momentu vůči ose 3**

$$m_z = 500g = 0,5kg$$

$$m_{pu} = 70g = 0,07kg$$

$$m_{n56} = 100g = 0,1kg$$

$$m_{o56} = 600g = 0,6kg$$

$$r_2 = 80 \text{ mm} = 0,08m$$

$$r_3 = 70 \text{ mm} = 0,07m$$

$$r_5 = 195mm = 0,195m$$

$$\begin{aligned} M_3 &= m_z \cdot (r_2 + r_5) \cdot g + m_{pu} \cdot (r_5 + r_3) \cdot g + m_{o6} \\ &\quad \cdot (r_5) \cdot g + m_{m56} \cdot (r_{o5}) \cdot g \\ &= 0,5 \cdot (0,08 + 0,195) \cdot 9,81 + 0,07 \\ &\quad \cdot (0,07 + 0,195) \cdot 9,81 + 0,5 \cdot (0,195) \\ &\quad \cdot 9,81 + 0,1 \cdot (0,157) \cdot 9,81 = 2,64 \text{ Nm} \end{aligned} \quad (13)$$

**Výpočet převodového poměru na pro pohon osy 3**

$$i_3 = \frac{d_{řv3}}{d_{řm3}} = \frac{74}{14} = 5,29 \quad (14)$$

**Výpočet potřebného momentu na pohonu vůči ose 3**

$$M_{m3} = \frac{M_3}{i_3 \cdot \eta_{řem}} = \frac{2,64}{5,29 \cdot 0,95} = 0,525 \text{ Nm} \quad (15)$$

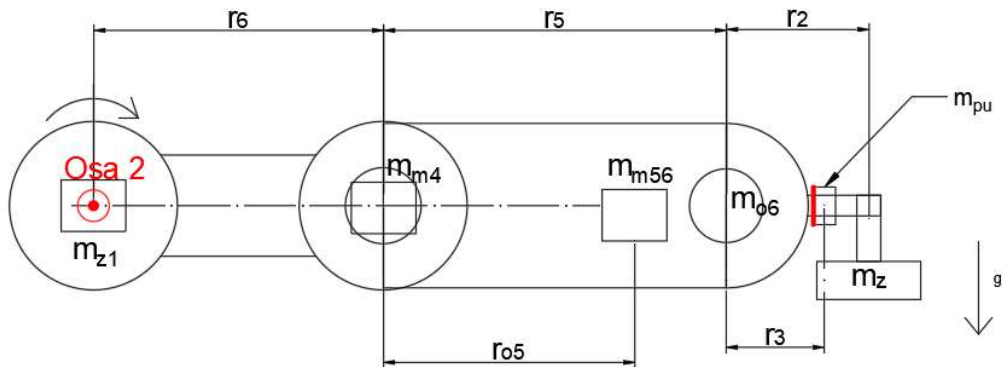
**Výpočet maximálního kroutící moment motoru pro pohon osy 3**

$$M_{km3} = 1 \cdot 1,04 = 1,04 \text{ Nm} \quad (16)$$

$$M_{km3} > M_{m3}$$

Moment motoru je větší než moment požadovaný -> **motor vyhovuje**

#### 4.1.5. Kontrola pohonu osy 2



Obr. 78: Schéma zatížení při otáčení kolem osy 2

#### Výpočet momentu vůči ose 2

$$m_z = 500g = 0,5kg$$

$$m_{pu} = 70g = 0,07kg$$

$$m_{n56} = 100g = 0,1kg$$

$$m_{o56} = 600g = 0,6kg$$

$$r_2 = 80 \text{ mm} = 0,08m$$

$$r_3 = 70 \text{ mm} = 0,07m$$

$$r_5 = 195mm = 0,195m$$

$$r_6 = 160mm = 0,160m$$

$$\begin{aligned} M_2 &= m_z \cdot (r_2 + r_5 + r_6) \cdot g + m_{pu} \cdot (r_3 + r_5 + r_6) \cdot g + m_{o56} \cdot (r_5 + r_6) \\ &\quad \cdot g + m_{m5} \cdot (r_{o5} + r_6) \cdot g + m_{m4} \cdot r_6 \cdot g \\ &= 0,5 \cdot (0,08 + 0,195 + 0,160) \cdot 9,81 + 0,07 \cdot (0,07 \\ &\quad + 0,195 + 0,160) \cdot 9,81 + 0,6 \cdot (0,195 + 0,160) \cdot 9,81 \\ &\quad + 0,6 \cdot (0,157 + 0,160) \cdot 9,81 + 0,5 \cdot 0,160 \cdot 9,81 \\ &= 7,166 \text{ Nm} \end{aligned} \tag{17}$$

#### Výpočet převodového poměru na pro pohon osy 2

$$i_2 = \frac{z_{v2}}{z_{m2}} = \frac{60}{10} = 6 \tag{18}$$

#### Výpočet potřebného momentu na pohonu vůči ose 2

$$M_{m2} = \frac{M_2}{i_2 \cdot \eta_{oz}} = \frac{7,116}{6 \cdot 0,96} = 1,24 \text{ Nm} \tag{19}$$

## Výpočet maximálního kroutící momentu motoru pro pohon osy 2

$$M_{km2} = 2 \cdot 1,04 = 2,08 Nm \quad (20)$$

$$M_{km2} > M_{m2}$$

Moment motorů je větší než moment požadovaný -> **motory vyhovují**

### 4.1.6. Kontrola pohonu osy 1

Moment vůči ose 1 závisí jen na momentu z odporu ložiska a momentu setrvačnosti.

#### Výpočet momentu setrvačnosti při otáčení kolem osy 1



Obr. 79: Poloha ramene použita k výpočtu momentu setrvačnosti

$$I = 52\,851 \text{ kg} \cdot \text{mm}^2 = 0,052\,851 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad \text{Získáno z modelu v programu Inventor}$$

$$\varepsilon = 0,2 \text{ rad/s}^2 \quad \text{Zvolené maximální úhlové zrychlení}$$

$$M_s = I \cdot \varepsilon = 0,053 \cdot 0,2 = 0,0106 \text{ Nm} \quad (21)$$

#### Odpor celkový valivého ložiska

Odpor je vypočten pomocí online kalkulačky SKF [35] pro zatížení odpovídajícímu 1kN při 6 ot/min a maximální teplotě 40°C. Odpor se skládá z odporu valení a odporu tření ložiska. Zatížení 1 kN jsem zvolil protože se jedná o nejmenší možné zatížení použitelné ve výše zmíněné kalkulačce i když maximální zatížení ložiska od modelu ramena je 0,1 kN.

$$M_{fr} = 97 \text{ Nmm} = 0,097 \text{ Nm}$$

#### Výpočet kroutícího momentu vůči ose 1

$$M_1 = M_{fr} + M_s = 0,097 + 0,0106 = 0,108 \text{ Nm} \quad (22)$$

#### Výpočet převodového poměru na pro pohon osy 1

$$i_1 = \frac{z_{v1}}{z_{m1}} = \frac{50}{10} = 5 \quad (23)$$

**Výpočet potřebného momentu na pohonu vůči ose 1**

$$M_{m1} = \frac{M_1}{i_1 \cdot \eta_{oz}} = \frac{0,108}{5 \cdot 0,96} = 0,022 \text{ Nm} \quad (24)$$

**Výpočet maximálního kroutící momentu motoru pro pohon osy 1**

$$M_{km1} = 2 \cdot 1,04 = 2,08 \text{ Nm} \quad (25)$$

$$M_{km1} > M_{m1}$$

Moment motorů je větší než moment požadovaný -> **motory vyhovují**

**4.2. Výpočty ozubeného řemene**

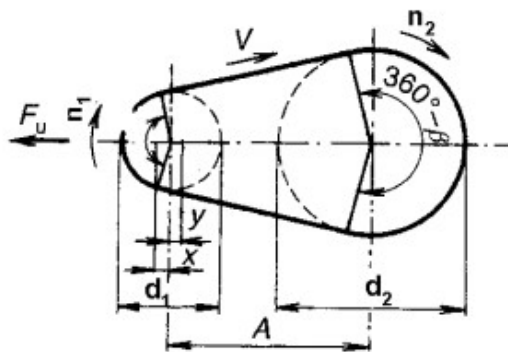
V této kapitole se věnuji výpočtům ozubeného řemene

**4.2.1. Výpočet vzdálenosti os ozubeného řemene pro pohon os 5 a 6**

$L_{5,6} = 200 \text{ mm}$  Délka použitého uzavřeného řemene

$d_{řm} = 12,3 \text{ mm}$  Průměr malé řemenice

$d_{řv} = 25 \text{ mm}$  Průměr velké řemenice



Obr. 80: Geometrie řemenového převodu

**Výpočet vzdálenosti os při zanedbání úhlů opásání**

$$L = \frac{\pi \cdot d_{řv}}{2} + \frac{\pi \cdot d_{řm}}{2} + 2 \cdot A \quad (26)$$

$$A = \frac{L - \frac{\pi \cdot d_{řv}}{2} - \frac{\pi \cdot d_{řm}}{2}}{2} = \frac{200 - \frac{\pi \cdot 25}{2} - \frac{\pi \cdot 12,3}{2}}{2} \quad (27)$$

$$= 70,704 \text{ mm}$$

**Vzorec pro výpočet reálné délky řemene**

$$L_{p\ 5,6} = \frac{\pi \cdot d_{řv}}{2} + \frac{\pi \cdot d_{řm}}{2} + 2 \cdot A \cdot \sin \frac{\alpha}{2} + \frac{2 \cdot \pi \cdot d_{řv} \cdot \gamma}{360} - \frac{2 \cdot \pi \cdot d_{řm} \cdot \gamma}{360} \quad (28)$$

**Z něho odvozené skutečná vzdálenost os**

$$A_{sk} = \frac{L_{p\ 5,6} - \frac{\pi \cdot d_{rv}}{2} - \frac{\pi \cdot d_{rm}}{2} + \frac{\pi \cdot \gamma \cdot (d_{rv} - d_{rm})}{180}}{2 \cdot \sin \frac{\alpha}{2}} \quad (29)$$

Kde:

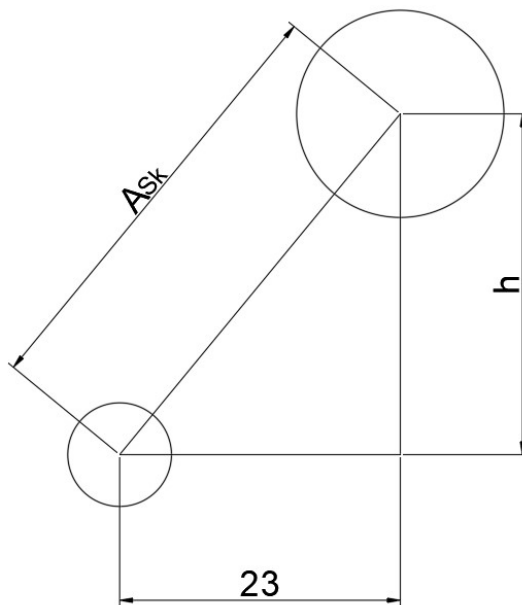
$$\alpha = 2 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{d_2 - d_1}{2 \cdot A} \right) \quad (30)$$

$$\gamma = 90 - \frac{\alpha}{2} \quad (31)$$

Tyto vzorce jsem použil k iteračnímu výpočtu vzdálenosti os, která mi vyšla:

$$A_{sk} = 70,5 \text{ mm}$$

#### 4.2.2. Výpočet horizontálního umístění malé řemenice



Obr. 81: Schéma polohy řemenic

$$h = \sqrt{A_{sk}^2 - 23^2} = \sqrt{70,5^2 - 23^2} = 66,7 \text{ mm} \quad (32)$$

#### 4.2.3. Výpočet natažení řemene pohonu os 5 a 6

Tuhost řemene [36]

$$k_{r5,6} = \frac{4 \cdot c_s \cdot b}{L} = \frac{4 \cdot 8400 \cdot 6}{200} = 1008 \frac{N}{mm} \quad (33)$$

Výpočet natažení pro maximální moment motoru

$$F_{6max} = \frac{M_{k6}}{\frac{d_{rv}}{2}} = \frac{2 \cdot M_{k6}}{d_{rv}} = \frac{2 \cdot 0,36}{0,0123} = 58,536 \text{ N} \quad (34)$$

$$\Delta L_{6max} = \frac{F_{6max}}{k_{\check{r}5,6}} = \frac{58,536}{1008} = 0,057 \text{ mm} \quad (35)$$

**Poměrné protažení řemene**

$$\varepsilon_1 = \frac{\Delta L_{6max}}{L} = \frac{0,057}{200} = 28,5 \cdot 10^{-5} = 0,028\% \quad (36)$$

#### 4.2.4. Vypočet minimální délky řemene osy 3

$$A_3 = 160 \text{ mm}$$

$$d_{\check{r}m} = 12,3 \text{ mm}$$

$$d_{\check{r}v} = 74 \text{ mm}$$

$$L_{tr} = 30 \text{ mm}$$

Přídavek k délce řemene, na zajištění řemene

$$\alpha_3 = 2 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{d_{\check{r}v} - d_{\check{r}m}}{2 \cdot A} \right) = 2 \cdot \cos^{-1} \left( \frac{74 - 12,3}{2 \cdot 160} \right) = 157,8^\circ \quad (37)$$

$$\gamma_3 = 90 - \frac{\alpha_3}{2} = 90 - \frac{157,8}{2} = 11,12^\circ \quad (38)$$

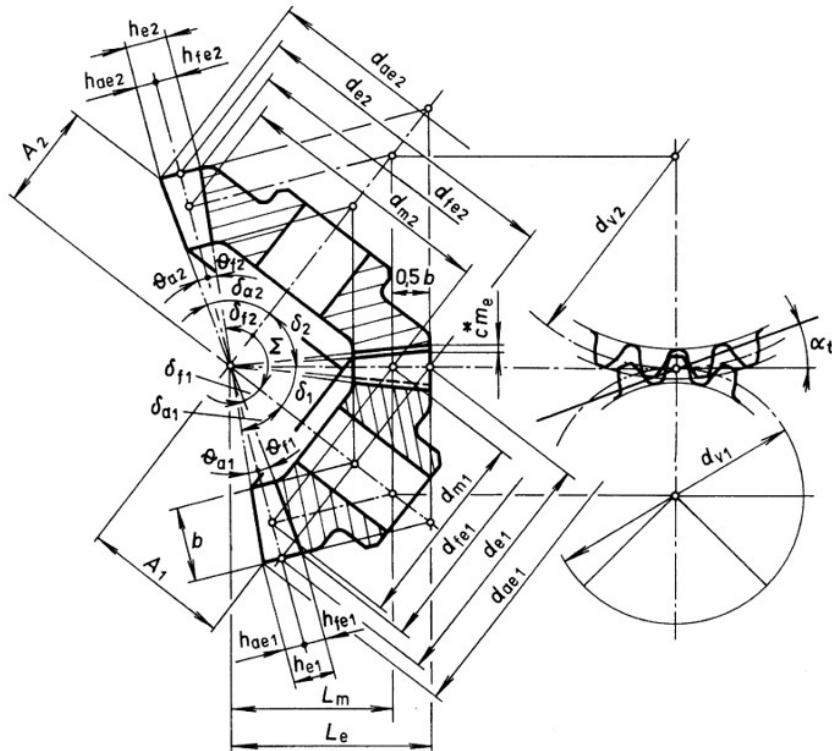
$$\begin{aligned} L_{p3} &= \frac{\pi \cdot d_{\check{r}v}}{2} + \frac{\pi \cdot d_{\check{r}m}}{2} + 2 \cdot A \cdot \sin \frac{\alpha_3}{2} + \frac{2 \cdot \pi \cdot d_{\check{r}v} \cdot \gamma_3}{360} - \frac{2 \cdot \pi \cdot d_{\check{r}m} \cdot \gamma_3}{360} \\ &= \frac{\pi \cdot 74}{2} + \frac{\pi \cdot 12,3}{2} + 2 \cdot 160 \cdot \sin \frac{157,8}{2} \\ &\quad + \frac{2 \cdot \pi \cdot 74 \cdot 11,12}{360} - \frac{2 \cdot \pi \cdot 12,3 \cdot 11,12}{360} = 462 \text{ mm} \end{aligned} \quad (39)$$

**Minimální délka řemene osy 3**

$$L_3 = L_{p3} + L_{tr} = 492 \text{ mm} \quad (40)$$

#### 4.2.5. Geometrie kuželového ozubeného soukolí

V rámci geometrie ozubeného soukolí je potřeba určit výšku hlavového kužele obou kol. Tento rozměr je nutno znát pro správnou montáž ozubení



Obr. 82: Geometrie kuželového ozubeného kola [37]

### Parametry soukolí

$$z_1 = 15$$

$$z_2 = 32$$

$$h_a^* = 1$$

$$x = 0$$

$$\delta_1 = 25,11^\circ$$

$$\delta_2 = 64,89^\circ$$

$$m_{te} = 2,5 \text{ mm}$$

### Kuželová vnější vzdálenost

$$L_e = 0,5 \cdot m_{te} \cdot \sqrt{z_1^2 + z_2^2} = 0,5 \cdot 2,5 \cdot \sqrt{15^2 + 32^2} = 44,177 \text{ mm} \quad (41)$$

### Výška hlavy zubu

$$h_{ae1} = (h_a^* + x) \cdot m_{te} = (1 + 0) \cdot 2,5 = 2,5 \text{ mm} \quad (42)$$

$$h_{ae2} = (h_a^* - x) \cdot m_{te} = (1 - 0) \cdot 2,5 = 2,5 \text{ mm} \quad (43)$$

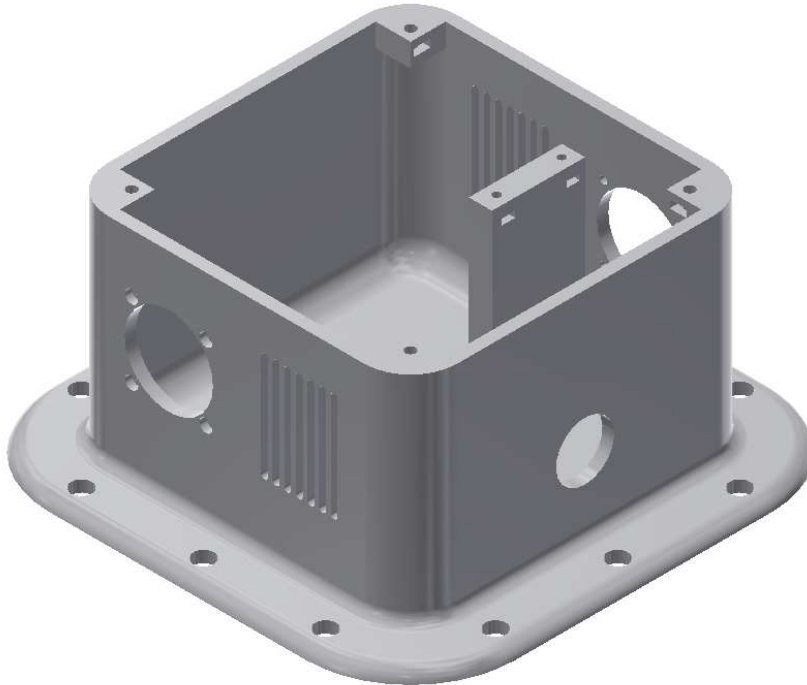
### Výška hlavového kužele

$$A_1 = L_e \cdot \cos \delta_1 - h_{ae1} \cdot \sin \delta_1 = 44,177 \cdot \cos 25,11 - 2,5 \cdot \sin 25,11 = 38,92 \text{ mm} \quad (44)$$

$$A_2 = L_e \cdot \cos \delta_2 - h_{ae2} \cdot \sin \delta_2 = 44,177 \cdot \cos 64,89 - 2,5 \cdot \sin 64,89 = 16,48 \text{ mm} \quad (45)$$

#### 4.2.6. MKP výpočtový model základny osy 1

Pro výpočet MKP byl použit model základny osy 1. Tento výpočet je brán jako orientační, jelikož se jedná o 3D tištěný díl a tím pádem je materiál se nechová jako izotropní. Cílem tohoto výpočtu je zobrazení kritických míst.



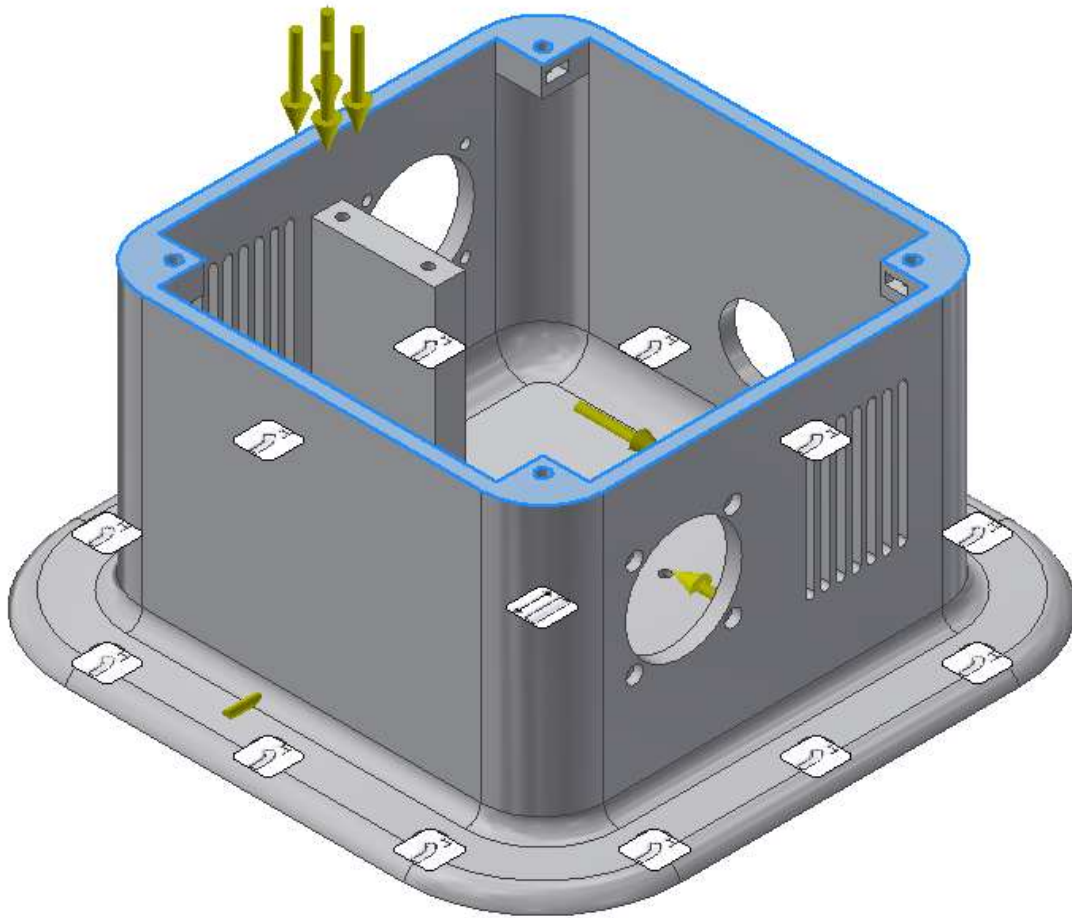
*Obr. 83: Model základny osy 1*

Materiálové vlastnosti tohoto modelu jsou nastaveny z knihovny Autodesku jako materiál ABS vstřikovaný. Tento materiál byl zvolen, protože materiálové vlastnosti 3D tištěného plastu ABS se v různých studii liší například i podle podmínek tisku.

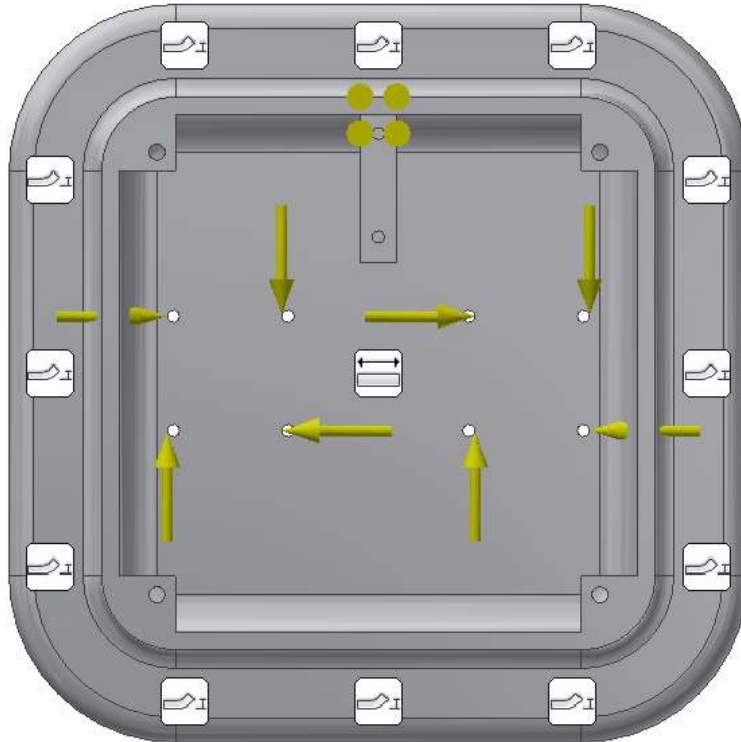
Pro výpočet byly zvoleny dva typy zatížení. Prvním zatížením je tlak (0,175 MPa), který reprezentuje působení hmotnosti zbytku modelu na vrchní plochu základny. Druhým typem zatížení jsou síly působící na díry, které slouží k upevnění motorů. Tyto síly jsou vyvozené z maximálního momentu motoru a vzdálenosti děr od středu otáčení motoru. Velikost takto vyvozené síly vychází na 8,36N.

Dále byly zvolené vazby zabraňující pohyb v místech děr pro spojení robotického ramena s podkladem, na kterém stojí. Taky byla použita vazba zabraňující prohnutí dna základny směrem k podkladu. Tato vazba vychází z předpokladu, že manipulátor bude upevněn na pevném podkladu, takže se dno nebude mít kam prohnout.

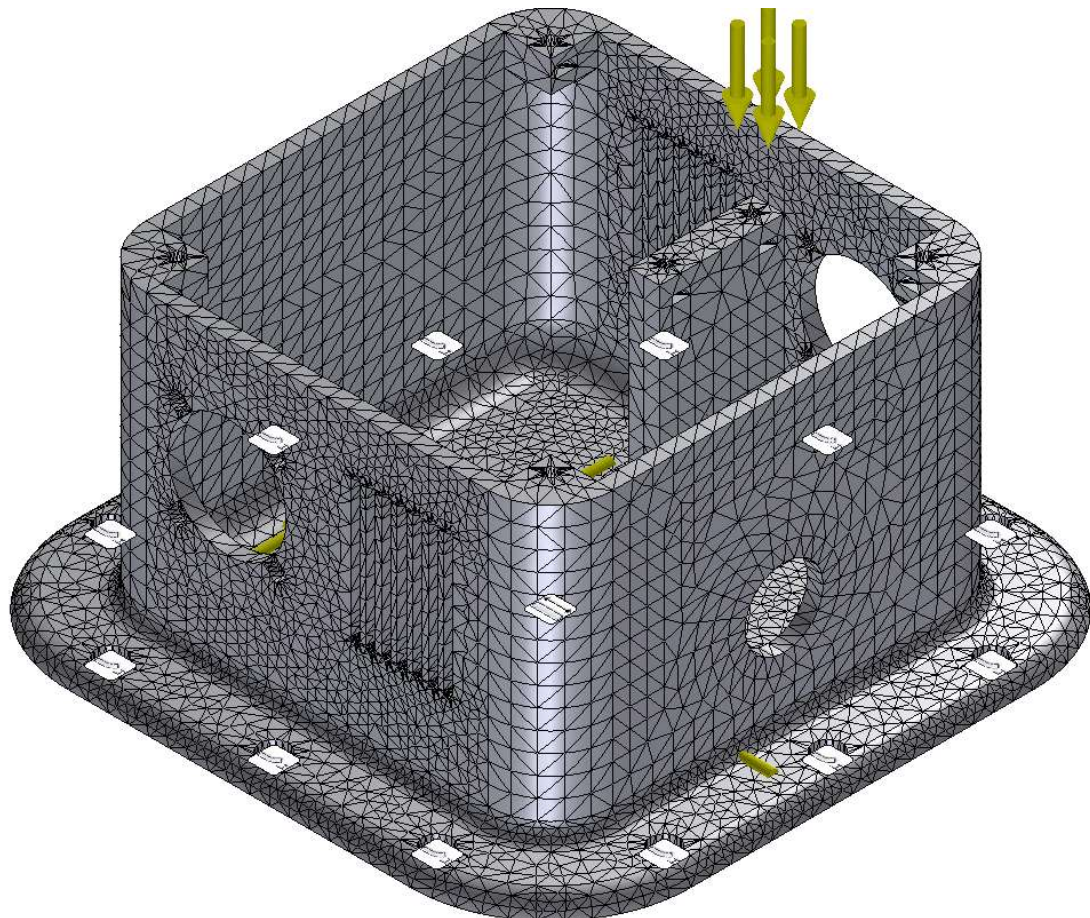




Obr. 84: Použité zatížení pro MKP výpočet



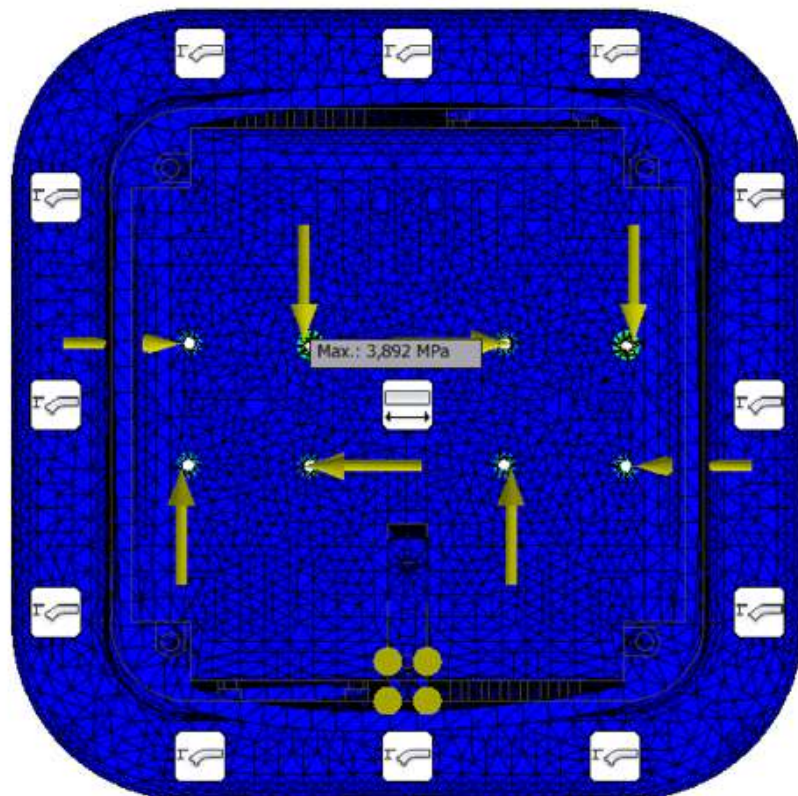
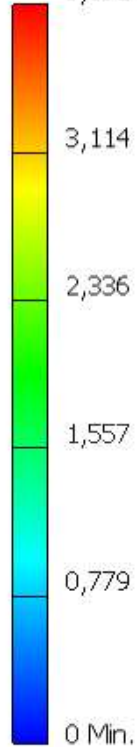
Obr. 85: Použité zatížení pro MKP výpočet



Obr. 86: Síť použitá pro MKP výpočet

Model základny byl vysítován pomocí prvků typu čtyřstěnu (TET). Pro složitější části konstrukce byla síť zhuštěna. Velikost sítě byla volena úměrně velikosti součásti.

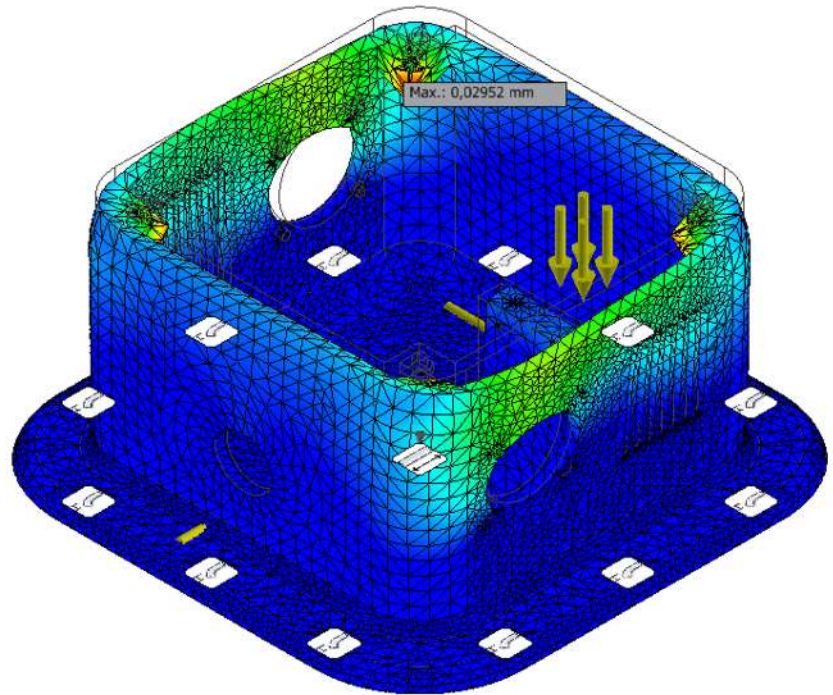
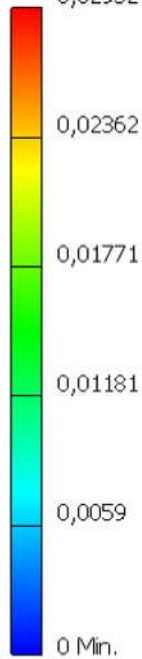
Uzly:147528  
 Prvky:85946  
 Typ: Napětí Von Mises  
 Jednotka: MPa  
 28.07.2021, 0:56:00  
 3,892 Max.



Obr. 87: Vizualizace vypočtu napětí pomocí MKP

Byla vytvořena vizualizace toku napětí. Největší napětí o hodnotě 3,89 MPa se nachází kolem díry zajišťující upevnění motorů. Vzhledem k tomu že mez pevnosti v tahu pro 3D tištěný materiál ABS se pohybuje od 35 do 85 MPa, dle podmínek tisku, nejedná se o žádné kritické napětí vedoucí k selhání součástky.

Uzly:147528  
 Prvky:85946  
 Typ: Posunutí  
 Jednotka: mm  
 28.07.2021, 1:05:38  
 0,02952 Max.



Obr. 88: Posouzení posunutí pro zadané zatížení

Maximální posunutí 0,03mm je v místě hrany výstupku sloužícího ke spojení s další součástí. Toto posunutí je malé a svým umístěním neohrožuje funkčnost součástky. V místech stěny základny nad otvorem pro větráček dochází k posunutí kolem 0,02mm. Toto posunutí taktéž neovlivní funkčnost základny.

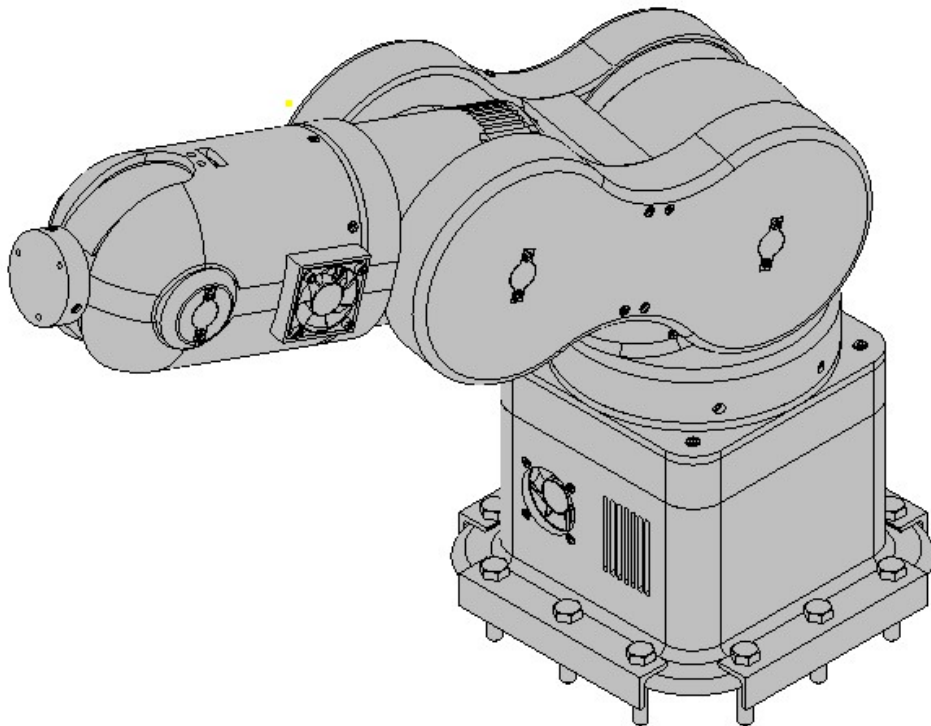
Jak už bylo na začátku této kapitoly zmíněno, výpočty MKP jsou brány jako orientační, z důvodu anizotropie materiálu.

## 5. Závěr

V diplomové práci jsem se v prvních kapitolách věnoval řešerši manipulátoru, úchopných hlavic, pohonů, materiálu vhodných pro 3D tisk a samotných způsobů 3D tisku. Inspirován touto řešerší vznikl koncept robotického ramena, který byl dále rozvinut.

V dalších kapitolách jsem vypracoval návrh konstrukce robotického ramena. Celý model jsem navrhoval tak aby bylo možné použití co nejvíce součásti tištěných 3D tiskem. Tištěné díly zajišťující přenos výkonu byly navrženy tak aby v případě selhání mohly být nahrazeny díly z materiálu vyšší jakosti.

Dále jsem se věnoval kontrolním výpočtům pohonů, řemenových převodů a také orientačnímu MKP výpočtu základny manipulátoru.



*Obr. 89: Finální koncepční model robotického ramena*

Výsledkem této práce je koncepční návrh robotického ramena. Vytypovanými problematickými uzly se budou zabývat navazující práce v experimentu

## SEZNAM ZDROJŮ

- [1] JUHÁSZ, Vojtěch. *Využití metod 3D tisku v automobilovém průmyslu* [online]. Brno, 2020 [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/192187>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav automobilního a dopravního inženýrství. Vedoucí práce Jan Fojtášek.
- [2] KOČÍ, Jakub. 3MF file format and why it's great. *Prusa Printers Blog* [online]. 2019 [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: [https://blog.prusaprinters.org/3mf-file-format-and-why-its-great\\_30986/](https://blog.prusaprinters.org/3mf-file-format-and-why-its-great_30986/)
- [3] What file formats are used in 3D Printing? *NIH 3D Print Exchange* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://3dprint.nih.gov/faqs/1781>
- [4] Ultimate 3D Printing Materials Guide. *Simplify 3D* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://www.simplify3d.com/support/materials-guide/>
- [5] 3D tisk: jak funguje FDM/FFF tiskárna? *Svět Hardware* [online]. 2019 [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-fdm-fff-tiskarna/48457>
- [6] Vyhlazování 3D výtisku acetonem. *Powerprint 3D* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://powerprint3d.cz/vyhlazovani-3d-vytisku-acetonem/>
- [7] Prusament ASA. *Prusament* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-asa/>
- [8] Prusament PETG. *Prusament* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://prusament.com/cs/materials/prusament-petg/>
- [9] Materiálový slovník:Nylon. *Materiál pro 3D* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/materialovy-slovník/nylon/>
- [10] Průvodce materiály. *Prusa 3D* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.cz/materialy/>
- [11] KLOSKI, Liza Wallach a Nick KLOSKI. *Začínáme s 3D tiskem*. Přeložil Jakub GONER. Brno: Computer Press, 2017. ISBN 978-80-251-4876-1.
- [12] Přehled technologií 3D tisku. *DK Metal* [online]. 2018 [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <http://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologie-3D-tisku>
- [13] TECHNOLOGIE 3D TISKU. *3D Tisk Online* [online]. 2018 [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://www.3dtisk-online.cz/3d-tisk-brno-technologie-3d-tisku/>
- [14] HODEK, Josef. *Práva o stavu 3D tisku pro Českou technologickou platformu STROJÍTENSTVÍ* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <http://docplayer.cz/18792004-Aditivni-technologie-zprava-o-stavu-3d-tisku-pro-ceskou-technologickou-platformu-strojitenstvi-o-s-josef-hodek.html>
- [15] KOLÍBAL, Zdeněk, KNOFLÍČEK, Radek. *Morfologická analýza stavby průmyslových robotů*. vyd. Košice: VIENALA, 2000. 185 s. ISBN 80-88922-27-5.
- [16] BUZEK, Vladimír. *Periferní zařízení RTP*. Ostrava: Ediční středisko VŠB, 1993. 160 s. ISBN 80-7078-159-9.
- [17] Paletizační manipulátor. *Ekobal* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://www.ekobal.cz/balici-technika/paletizace/paletizacni-manipulator-manipulator>



- [18] Hulk Robot 3/4 Axis Automatic Industrial Robot Arm For Industry and Education. Oz Robotic [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://ozrobotics.com/shop/hulkrobot-3-4-axis-automatic-industrial-robot-arm-for-industry-and-education/>
- [19] Robotic Arm with 6 axis, industrial robot. 3D rendering isolated on white background - Image ID: 2CAP0AF. Alamy [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://www.alamy.com/robotic-arm-with-6-axis-industrial-robot-3d-rendering-isolated-on-white-background-image368047527.html>
- [20] AMBER B1 modular 7-axis robot arm. Geeky gadgets [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://www.geeky-gadgets.com/robot-arm-22-04-2021/>
- [21] Pessoa, Marcus & Trabasso, Luís Gonzaga. (2017). Robot Based Flight Simulator Development Project. 10.1007/978-3-319-46792-4\_16. [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/figure/Stewart-platform-Hexapod\\_fig12\\_309172153](https://www.researchgate.net/figure/Stewart-platform-Hexapod_fig12_309172153)
- [22] RUMÍŠEK, Pavel. Automatizace., 2003. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Diplomová práce.
- [23] JMHZ2, Úchopná hlavice, paralelní pohyb, 2 čelisti. SMC [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://www.smc.eu/cs-cz/produkty-a-podpora/jmh2-uchopna-hlavice-paralelni-pohyb-2-celisti~164192~cfg>
- [24] XIAO R Full Aluminum Alloy Manipulating Gripper Grab Robot Arm With 180° Servo For RC Models. *Banggood* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: [https://www.banggood.com/XIAO-R-Full-Aluminum-Alloy-Manipulating-Gripper-Grab-Robot-Arm-With-180-Servo-For-RC-Models-p-1347673.html?cur\\_warehouse=CN](https://www.banggood.com/XIAO-R-Full-Aluminum-Alloy-Manipulating-Gripper-Grab-Robot-Arm-With-180-Servo-For-RC-Models-p-1347673.html?cur_warehouse=CN)
- [25] BLECHA, Petr at al. Mechatronika., 2008. Vysoké učení technické v Brně. Učební texty.
- [26] Stejnosměrný motor 36 V Bezkomutátorový 4000 ot/min 9,8 A. *RS Online* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://cz.rs-online.com/web/p/stejnosmerne-motory/5366046>
- [27] Asynchronní Motor S Trojfázovým Indukčním Elektromotorickým Motorem. *Hanzel Motor* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <http://cz.hanzelmotor.org/asynchronous-motor/ie2-motor/asynchronous-motor-three-phase-induction.html>
- [28] Krokový motor 2,8 V Hybridní, Krokový s permanentním magnetem 1,68 A. *RS Online* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://cz.rs-online.com/web/p/stejnosmerne-motory/8928732>
- [29] VOLEK, F. Základy konstruování a částí strojů II. Mechanizmy strojů. Zlín: UTB, 2009. ISBN 80-7318-11-8



- [30] Nanotec catalog 2019. *Nanotec* [online]. 2019 [cit. 2021-7-17].  
Dostupné z:  
[https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Katalog/nanotec\\_catalog\\_2019.pdf](https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Katalog/nanotec_catalog_2019.pdf)
- [31] Katalog GP42 GP 56 EN. *Nanotec* [online]. 2019 [cit. 2021-7-17].  
Dostupné z: [https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Katalog/GP42\\_GP56-EN.pdf](https://en.nanotec.com/fileadmin/files/Katalog/GP42_GP56-EN.pdf)
- [32] GP56-S1-5-SR High torque planetary gearboxes. *Nanotec* [online].  
[cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://en.nanotec.com/products/2804-gp56-s1-5-sr>
- [33] Urethane Timing Belts and Pulleys. *Bearings and industrial supply* [online]. Gates Mectrol, 2014 [cit. 2021-7-17]. Dostupné z:  
<https://www.bearingsandindustrialsupply.com/pdf/gates-mectrol-belt-pulley.pdf>
- [34] Jaká je účinnost řemenových převodů? *Tyma* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z: <https://www.tyma.cz/technicke-informace/caste-dotazy/ucinnost-remenu/>
- [35] Skfbearingselect. *SKF* [online]. [cit. 2021-7-17]. Dostupné z:  
<https://skfbearingselect.com/#/size-lubrication/single-bearing>
- [36] Timing Belt Theory, GATES Mectrol, Inc., 2006, Handbook
- [37] BOLEK, Alfred a Kochman JOSEF. *Části strojů 2 svazek*. Páte vydání. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1990.



**SEZNAM OBRÁZKŮ**

Obr. 1: Ukázka modelů vytištěných z materiálu PLA [4].....	7
Obr. 2: Ukázka model vytištěného z materiálu ABS a modelu následně vyhlazeného acetonem (vpravo) [5] .....	7
Obr. 3: Ukázka model vytištěného z materiálu ASA (vpravo) a modelu následně vyhlazeného acetonem (vlevo) [5].....	8
Obr. 4: Ukázka 3D tištěného modelu pomocí materiálu PETG [8].....	9
Obr. 5: Ukázka 3D tištěného modelu pomocí průhledného filamentu PETG [5].....	9
Obr. 6: Ukázka problému „stringování“ [5] .....	10
Obr. 7: Ukázka 3D tištěného modelu pomocí filamentu Nylon 618 .....	10
Obr. 8: Ukázka tisku pomocí filamentu Bronzefill [10] .....	11
Obr. 9: Ukázka použití materiálu HIPS pro podpory 3D tištěné součástí a jeho rozpustnost [4] .....	12
Obr. 10: Ukázka použití materiálu PVA pro podpory 3D tištěné součástí a jeho rozpustnost [4] .....	12
Obr. 11: Princip metody FDM [13].....	14
Obr. 12: Schéma FDM Tiskárny [12] .....	15
Obr. 13: Princip metody SLA [13] .....	16
Obr. 14: Schéma SLA Tiskárny [12] .....	16
Obr. 15: Schéma DLP Tiskárny [12].....	17
Obr. 16: Princip metody SLS [13] .....	17
Obr. 17: Schéma SLS Tiskárny [12] .....	18
Obr. 18: Princip metody LOM [13].....	18
Obr. 19: Schéma LOM tiskárny [12].....	19
Obr. 20: Schéma manipulátoru typu “K” s vyznačením pracovního prostoru [15] .....	21
Obr. 21: Schéma manipulátoru typu “C” s vyznačením pracovního prostoru [15] .....	21
Obr. 22: Schéma manipulátoru typu “S” s vyznačením pracovního prostoru [15].....	22
Obr. 23: Schéma manipulátoru typu “A” s vyznačením pracovního prostoru [15] .....	22
Obr. 24: Schéma portálového manipulátoru .....	23
Obr. 25: Ukázka portálového manipulátor [17].....	24
Obr. 26: Ukázka 4-osého robotického ramena [18] .....	25
Obr. 27: Ukázka 6-osého robotického ramena [19] .....	25
Obr. 28: 7-osého robotického ramena [20].....	25
Obr. 29: Stewartová platforma [21] .....	26
Obr. 30: Schéma odpružených úchopných hlavic [22] .....	27
Obr. 31: Ukázka pneumatické mechanické hlavice [23].....	27
Obr. 32: Ukázka mechanické hlavice poháněné servomotorem [24].....	27
Obr. 33: Základní provedení deformačních přísavek: a) pryžová deformační přísavka s uchycením.....	28
Obr. 34: Podtlaková aktivní přísavka [25].....	29
Obr. 35: Příklad ovládání přísavky (1 – ejektorová hlavice, 2 – uchopovací manžeta, .....	29
Obr. 36: Magnetické chapadlo s výsuvným vyhazovačem (1 – pouzdro s permanentními magnety, 2 – výsuvná deska) [25] .....	30
Obr. 37: Elektromagnetická hlavice s dvojicí uchopovacích jednotek [15] .....	31
Obr. 38: Stejnoseměrný motor [26] .....	32
Obr. 39: Asynchronní motor [27].....	32
Obr. 40: Krokový motor [28].....	33
Obr. 41: Hydraulický obvod (1 – hydrogenerátor, 2 – elektromotor, 3 – nádrž, 4 – filtr, 5 – pojistný ventil, 6 – manometr, 7 – hydromotor, 8 – rozvaděč, 9 – škrtkový ventil, 10 – zpětný ventil) [29].....	34
Obr. 42: Pneumatický obvod (1 – centrální rozvod, 2 – filtr s odlučovačem vody, 3 – redukční ventil, 4 – maznice, 5 – manometr, 6 – rozvaděč, 7 – škrtkový ventil, 8 – zpětný ventil, 9 – pneumatický ventil) [29] .....	35
Obr. 43: Schéma robotického ramena.....	36
Obr. 44: Skica motorů typu Nema z katalogu výrobce [30].....	37
Obr. 45: Skica planetové převodovky pro motory typu Nema z katalogu výrobce [30].....	38
Obr. 46: vyznačení podsestavy os 5 a 6.....	39

Obr. 47: Schéma pohonu os 5 a 6.....	40
Obr. 48: Podsestava os 5 a 6.....	41
Obr. 49: 3D pohled na řez sestavou os 5 a 6 .....	42
Obr. 50: 3D pohled na řez sestavou os 5 a 6 .....	43
Obr. 51: Detail pláště ukazující díry pro uchycení senzorů a díru pro 3pinový kabel níže .....	45
Obr. 52: Srovnání účinnosti různých řemenů v závislosti na kroutícím momentu [34].....	46
Obr. 53: Schéma pohonu osy 5.....	47
Obr. 54: Vyznačení podsestavy osy 4 .....	48
Obr. 55: Schéma pohonu osy 4.....	48
Obr. 56: Podsestava osy 4 .....	49
Obr. 57: 3D pohled na řez sestavou osy 4 .....	50
Obr. 58: 3D pohled na řez sestavou osy 4 .....	51
Obr. 59: Vyznačení podsestavy osy 3 .....	54
Obr. 60: Schéma pohonu osy 3.....	54
Obr. 61: Podsestava osy 3 .....	55
Obr. 62: 3D pohled na řez sestavou osy 3 .....	56
Obr. 63: 3D pohled na řez sestavou osy 3 .....	57
Obr. 64: Vyznačení podsestavy osy 2 .....	59
Obr. 65: Schéma pohonu osy 2.....	59
Obr. 66: Podsestava osy 2 .....	60
Obr. 67: 3D pohled na řez sestavou osy 2 .....	61
Obr. 68: 3D pohled na řez sestavou osy 2 .....	62
Obr. 69: Vyznačení podsestavy osy 1 .....	64
Obr. 70: Schéma pohonu osy 1.....	64
Obr. 71: Podsestava osy 1 .....	65
Obr. 72: 3D pohled na řez sestavou osy 1 .....	66
Obr. 73: 3D pohled na řez sestavou osy 1 .....	67
Obr. 74: Schéma zatížení při otáčení kolem osy 6 .....	69
Obr. 75: Schéma zatížení při otáčení kolem osy 5 .....	70
Obr. 76: Schéma zatížení při otáčení kolem osy 4 .....	71
Obr. 77: Schéma zatížení při otáčení kolem osy 3 .....	72
Obr. 78: Schéma zatížení při otáčení kolem osy 2 .....	74
Obr. 79: Poloha ramene použita k výpočtu momentu setrvačnosti.....	75
Obr. 80: Geometrie řemenového převodu.....	76
Obr. 81: Schéma polohy řemenic .....	77
Obr. 82: Geometrie kuželového ozubeného kola [37] .....	79
Obr. 83: Model základny osy 1 .....	80
Obr. 84: Použité zatížení pro MKP výpočet .....	81
Obr. 85: Použité zatížení pro MKP výpočet .....	82
Obr. 86: Síť použitá pro MKP výpočet .....	82
Obr. 87: Vizualizace vypočtu napětí pomocí MKP .....	83
Obr. 88: Posouzení posunutí pro zadané zatížení .....	84
Obr. 89: Finální koncepční model robotického ramena .....	85



## SEZNAM TABULEK

Tabulka 1: Srovnání materiálů vhodných pro 3D tisk [4],[5] .....	13
Tabulka 2: Srovnání technologií 3D tisku [12] .....	20
Tabulka 3: Tabulka vybraných parametrů pro krokové motory Nema 17 [30] .....	37
Tabulka 4: Tabulka vybraných parametrů pro krokové motory Nema 23 [30] .....	37
Tabulka 5: Přehled vybraných planetových převodovek pro motory Nema 17 a Nema 23 [31],[32] .....	38



## SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Konceptní výkres robotického ramene