

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: N2301 Strojní inženýrství
Studijní obor: 2301T001 Dopravní a manipulační technika

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Robotické manipulační rameno

Autor: **Bc. Jiří Kanta**
Vedoucí práce: **Ing. Roman ČERMÁK, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jiří KANTA**
Osobní číslo: **S18N0002P**
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Dopravní a manipulační technika**
Téma práce: **Robotické manipulační rameno**
Zadávací katedra: **Katedra konstruování strojů**

Zásady pro vypracování

Základní požadavky:

Navrhněte mechanizované manipulační rameno pro použití na robotické modulární platformě. Rameno musí umožňovat manipulaci s příslušenstvím manipulátoru pro NDT inspekce v prostředí energetických bloků a zároveň manipulovat s drobnými předměty. Efektivní zóna manipulace by měla být alespoň před čelní stranou manipulátoru. Navrhněte pohonné aktuátory ramene s možností jejich napájení a ovládáním z těla manipulátoru, ke kterému bude rameno pevně uchyceno s možností snadné demontáže. Rameno by mělo být schopno práce pod vodní hladinou. Zadání zahrnuje vypracování výrobní dokumentace a ověření prototypu.

Základní technické údaje:

Technické parametry jsou uvedeny v příloze zadání.

Osnova diplomové práce:

1. Rešerše, specifikace požadavků.
2. Konstrukční návrh.
3. Ověření navržené konstrukce na vyrobeném prototypu.
4. Zhodnocení práce, závěr.

Rozsah diplomové práce: **50-70 stran A4**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojího inženýra 1.*. Brno: Computer Press, 1999

HOSNEDL, S., KRÁTKÝ, J. *Příručka strojího inženýra 2.*. Brno: Computer Press, 1999

Podkladový materiál, výkresy, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Roman Čermák, Ph.D.**
Katedra konstruování strojů
Konzultant diplomové práce: **Bc. Vlastimil Habrcetl**
Centrum výzkumu Řež s.r.o., Plzeň
Datum zadání diplomové práce: **16. října 2019**
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václava Lašová, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

Poděkování

Touto cestou bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce Ing. Romanovi Čermákovi, Ph.D. za cenné rady a odbornou pomoc při zpracování této práce. Také bych chtěl poděkovat konzultantovi mé diplomové práce Bc. Vlastimilovi Habrcetlovi a všem zaměstnancům Centra výzkumu Řež s.r.o., kteří se jakkoli podíleli na mé práci, za cenné rady a časté konzultace. Dále mé poděkování patří Mgr. Pavlovi Martínkovi za korekturu diplomové práce, mým spolužákům, především Bc. Lukášovi Kožíškovi a Bc. Ondřeji Lucákovi, za pomoc při řešení problémů a mé rodině za cenné rady a podporu po celou dobu mého studia.

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Kanta	Jméno Jiří	
STUDIJNÍ OBOR	N 2301 „Dopravní a manipulační technika“		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Čermák, Ph.D.	Jméno Roman	
PRACOVISŤE	ZČU – FST - KKS		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Robotické manipulační rameno		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKS	ROK ODEVZD.	2020
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	113	TEXTOVÁ ČÁST	108	GRAFICKÁ ČÁST	5
---------------	-----	---------------------	-----	----------------------	---

<p style="text-align: center;">STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Tato diplomová práce obsahuje rešerši týkající se robotických manipulačních ramen vyrobených pomocí 3D tiskárny, specifikaci požadavků, koncepční a následný konstrukční návrh robotického ramene. Dále pak pevnostní kontrolu součástí vyrobených pomocí 3D tiskárny a hliníkové hřídele, výpočty ložisek a ozubeného řemene. Závěr práce je věnován vyhodnocení manipulačního rozsahu a odzkoušení vyrobeného prototypu.</p>
<p style="text-align: center;">KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Robotika, manipulace, robotické rameno, 3D tisk, MKP, konstrukce, návrh, rameno, prototyp.</p>

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Kanta	Name Jiří	
FIELD OF STUDY	N 2301 “Transport and handling machinery“		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Čermák, Ph.D.	Name Roman	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKS		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Robotic handling arm		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machine Design	SUBMITTED IN	2020
----------------	------------------------	-------------------	----------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	113	TEXT PART	108	GRAPHICAL PART	5
----------------	-----	------------------	-----	-----------------------	---

BRIEF DESCRIPTION	<p>This diploma thesis contains the literature review concerning 3D printed robotic manipulation arms, specification of requirements, conceptual and detailed design of the robotic arm. Furthermore both stress analysis of 3D printed parts and aluminum shaft, as well as bearing and toothed belt calculations. The conclusion of the thesis is devoted to the evaluation of the handling range and prototype testing.</p>
TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	
KEY WORDS	Robotics, manipulation, robotic arm, 3D printing, FEM, construction, design, arm, prototype

Obsah

Úvod	13
1 Robotika	14
1.1 Historie robotiky	14
1.2 Robot	15
1.2.1 Rozdělení robotů	15
2 3D tisk	17
2.1 Rozdělení 3D tiskáren dle principu tisku	18
2.1.1 Tekutý materiál vytvrzován v definované vrstvě	18
2.1.2 Materiál pojen pomocí laseru, lepidla apod.	18
2.1.3 Oddělování materiálu v každé vrstvě	19
2.1.4 Materiál vytlačován tiskovou hlavou	20
3 Open source robotická ramena	21
3.1 Niryo One	21
3.1.1 Technické specifikace	22
3.1.2 Příslušenství ramene Niryo One	22
3.2 Thor	24
3.2.1 Technické specifikace	25
3.3 Moveo.....	26
3.3.1 Technické specifikace	26
4 Specifikace požadavků na navrhované rameno	27
5 Návrh koncepce robotického ramene	28
5.1 Kinematická struktura	28
5.2 Počet stupňů volnosti.....	29
5.3 Aktuátory	30
5.3.1 Hydraulické aktuátory	30
5.3.2 Pneumatické aktuátory	30
5.3.3 Elektrické aktuátory.....	30
5.3.4 Výběr typu aktuátorů.....	30
5.4 Kabelový svazek.....	31
5.4.1 Prostor vedení kabelového svazku	31
5.4.2 Vodotěsnost kabelového vedení	32
5.5 Manipulační rozsah	32
5.6 Koncový efektor	33
5.6.1 Manipulační koncové efekторы	33

5.6.1.1 Magnetické efekty	34
6 Konstrukční návrh ramene	37
6.1 Obecné předpoklady k MKP analýzám	37
6.2 Konečná podoba robotického ramene	38
6.3 Volba servomotorů	39
6.3.1 Výpočet působících momentů v kloubech	40
6.3.1.1 MKP analýza	40
6.3.2 Výpočet krouticího momentu servomotoru koncového efektoru	42
6.3.3 Výběr servomotorů	45
6.4 Základna	46
6.4.1 MKP analýza	49
6.4.2 Kontrola řemene	51
6.4.2.1 Kontrola na pevnost tažného vlákna	51
6.4.2.2 Kontrola na únosnost zubů	51
6.4.2.3 Výpočet předepnutí	52
6.4.3 Kontrola ložiska	52
6.5 Rameno 1	54
6.5.1 MKP analýza	57
6.6 Rameno 2	59
6.6.1 MKP analýza	62
6.7 Rameno 3	64
6.7.1 MKP analýza	67
6.7.1.1 Vyhodnocení součástí vyrobených pomocí 3D tisku	68
6.7.1.2 Vyhodnocení hřídele	69
6.7.2 Kontrola ložiska	70
6.8 Rameno 4	71
6.8.1 MKP analýza	74
6.9 Rameno 5	75
6.9.1 MKP analýza	78
6.10 Koncový efektor	79
6.10.1 MKP analýza	82
6.10.1.1 Kompletní koncový efektor	82
6.10.1.2 Paralelogram	84
6.11 Kabelové vedení	89
6.11.1 Základna a rameno 1	89

6.11.2 Rameno 2.....	90
6.11.3 Rameno 3, 4 a 5.....	90
6.11.4 Koncový efektor.....	91
7 Manipulační prostor.....	92
8 Prototyp.....	93
8.1 Sestavení prototypu.....	93
8.2 Odzkoušení prototypu.....	93
9 Závěr.....	94
10 Seznam použité literatury.....	95
Seznam příloh.....	99
Vevázaných.....	99
Volně vložených.....	99

Seznam obrázků

Obrázek 1 - Android – písař Piera a Henry Drozů [3].....	14
Obrázek 2 - Servisní robot LT2/F "Bulldog" firmy SDR Tactical robots [6].....	15
Obrázek 3 - Android ASIMO [7].....	16
Obrázek 4 - Průmyslový robot LR Mate 200 iD/7L firmy Fanuc [9].....	16
Obrázek 5 - Porovnání subtraktivní (zelená) a aditivní (modrá) technologie [11].....	17
Obrázek 6 - Schéma SLA principu tisku [13].....	18
Obrázek 7 - Schéma SLS principu tisku [14].....	19
Obrázek 8 - Schéma LOM principu tisku [15].....	19
Obrázek 9 - Schéma FDM principu tisku [15].....	20
Obrázek 10 - Výtisk z 3D tiskárny Projet MJP 3600 firmy 3D SYSTEMS [17].....	20
Obrázek 11 - Open source robotické rameno Niryo One [19].....	21
Obrázek 12 - Open source robotické rameno Niryo One – rozměry (vlevo), rozsah rotace (vpravo) [20].....	22
Obrázek 13 - Open source robotické rameno Niryo One - 3 druhy chapadel [20].....	23
Obrázek 14 - Open source robotické rameno Niryo One - vakuová pumpa [20] [21].	23
Obrázek 15 - Open source robotické rameno Niryo One - elektromagnet [22].....	23
Obrázek 16 - Open source robotické rameno Thor [23].....	24
Obrázek 17 - Open source robotické rameno Thor - semi-diferenciál [23].....	25
Obrázek 18 - Open source robotické rameno Thor – rozměry [23].....	25
Obrázek 19 - Open source robotické rameno Moovo [26].....	26
Obrázek 20 - Robotický manipulátor Ilja.....	27

Obrázek 21 – Paralelní kinematická struktura (tripod) [30].....	28
Obrázek 22 - Sériová kinematická struktura [28].....	28
Obrázek 23 - Počet stupňů volnosti [32]	29
Obrázek 24 - Rameno s 6° volnosti [33]	29
Obrázek 25 - Pájecí spojka se smršťovací bužírkou [36].....	32
Obrázek 26 - Manipulační dosah.....	32
Obrázek 27 - Aktivní mechanický koncový efektor s rotační kinematikou [38]	35
Obrázek 28 - Aktivní mechanický koncový efektor s paralelní kinematikou [40]	36
Obrázek 29 - Konečná podoba robotického ramene	38
Obrázek 30 - Robotické rameno - rozdělení.....	39
Obrázek 31 - První návrh + rozměrové řady servomotorů.....	40
Obrázek 32 - Výpočet momentů - síť + okrajové podmínky	41
Obrázek 33 - Výpočet momentů - výsledek výpočtu - J2	41
Obrázek 34 – 3D model (vlevo) a kinematické schéma (vpravo) koncového efektoru.....	42
Obrázek 35 - Schéma uchopení břemene	42
Obrázek 36 - Grafická metoda zjištění krouticího momentu	44
Obrázek 37 - Použité servomotory - RŘ1 (vlevo), RŘ2 (uprostřed), RŘ3 (vpravo)....	45
Obrázek 38 – Základna robotického ramene.....	47
Obrázek 39 – Základna robotického ramene – rozstřel + detaily.....	48
Obrázek 40 - Základna robotického ramene - síť + okrajové podmínky	49
Obrázek 41 – Základna robotického ramene - výsledky MKP analýzy.....	50
Obrázek 42 - Schéma řemenového převodu.....	52
Obrázek 43 - Rameno 1	54
Obrázek 44 - Rameno 1 - rozstřel + detaily	56
Obrázek 45 - Rameno 1 - síť + okrajové podmínky.....	58
Obrázek 46 - Rameno 1 - výsledky MKP analýzy	59
Obrázek 47 - Rameno 2	59
Obrázek 48 - Konektor Binder série 718 – samice (vlevo), samec (vpravo) [50] [51]	60
Obrázek 49 - Rameno 2 - rozstřel + detaily	61
Obrázek 50 - Rameno 2 - síť + okrajové podmínky.....	63
Obrázek 51 - Rameno 2 - výsledky MKP analýzy	64
Obrázek 52 - Rameno 3	64
Obrázek 53 - Rameno 3 - rozstřel + detaily	66
Obrázek 54 - Rameno 3 - síť + okrajové podmínky.....	68
Obrázek 55 - Rameno 3 - výsledky MKP analýzy - 3D tisk	69

Obrázek 56 - Rameno 3 - výsledky MKP analýzy – hřídel.....	70
Obrázek 57 - Rameno 4.....	72
Obrázek 58 - Rameno 4 - rozstřel + detaily	73
Obrázek 59 - Rameno 4 - síť + okrajové podmínky.....	74
Obrázek 60 - Rameno 4 - výsledky MKP analýzy	75
Obrázek 61 - Rameno 5.....	76
Obrázek 62 - Rameno 5 - rozstřel + detaily	77
Obrázek 63 - Rameno 5 - síť + okrajové podmínky.....	78
Obrázek 64 - Rameno 5 - výsledky MKP analýzy	79
Obrázek 65 - Koncový efektor	80
Obrázek 66 - Koncový efektor - rozstřel + detaily.....	81
Obrázek 67 - Koncový efektor - forma na lepidlo	82
Obrázek 68 - Koncový efektor - síť + okrajové podmínky	83
Obrázek 69 - Koncový efektor - výsledky MKP analýzy	84
Obrázek 70 - Paralelogram - síť + okrajové podmínky + zkoumané polohy.....	85
Obrázek 71 - Paralelogram - detail ramene (vlevo) a kinematické schéma (vpravo) ..	86
Obrázek 72 - Paralelogram - výsledky MKP analýzy - 152°	87
Obrázek 73 - Grafická metoda zjištění působící síly – 152°	87
Obrázek 74 - Maximální rozměr přemísťovaného břemene	88
Obrázek 75 - Celkový pohled na kabelové vedení.....	89
Obrázek 76 - Kabelové vedení - základna a rameno 1	90
Obrázek 77 - Kabelové vedení - rameno 2.....	90
Obrázek 78 - Kabelové vedení - rameno 3, 4 a 5	91
Obrázek 79 - Kabelové vedení - koncový efektor.....	91
Obrázek 80 - Manipulační prostor - bokorys	92
Obrázek 81 - Manipulační prostor - půdorys	92

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Hodnoty předepnutí šroubových spojů	38
Tabulka 2 - Rozměrové řady servomotorů [42] [43] [44].....	39
Tabulka 3 - Výpočet momentů - výsledky výpočtů – první návrh.....	41
Tabulka 4 - Použité servomotory [42] [43] [44] [45].....	45
Tabulka 5 - Výpočet momentů - výsledky výpočtů – finální návrh.....	46
Tabulka 6 - Zatížení základny robotického ramene	49
Tabulka 7 - Základna robotického ramene - výsledky MKP analýzy	50

Tabulka 8 - Zatížení ramene 1	57
Tabulka 9 - Rameno 1 - výsledky MKP analýzy	58
Tabulka 10 - Zatížení ramene 2	62
Tabulka 11 - Rameno 2 - výsledky MKP analýzy	63
Tabulka 12 - Zatížení ramene 3	67
Tabulka 13 - Rameno 3 - výsledky MKP analýzy - 3D tisk	68
Tabulka 14 - Rameno 3 - výsledky MKP analýzy - hřídel.....	69
Tabulka 15 - Zatížení ramene 4.....	74
Tabulka 16 - Rameno 4 - výsledky MKP analýzy	75
Tabulka 17 - Zatížení ramene 5.....	78
Tabulka 18 - Rameno 5 - výsledky MKP analýzy	79
Tabulka 19 - Zatížení koncového efektoru.....	83
Tabulka 20 - Koncový efektor - výsledky MKP analýzy.....	83
Tabulka 21 - Zatížení paralelogramu	85
Tabulka 22 - Výsledky výpočtů paralelogramu	88
Tabulka 23 - Maximální napětí servomotorů	89

Seznam použitých veličin

Název veličiny	Značka veličiny	Jednotky
Průměr roztečné kružnice	d_0	mm
Průměr roztečné kružnice válečků	d_p	mm
Poloměr/délka ramene	r	mm
Rozteč	t	mm
Šířka řemene	b	mm
Hmotnost	m	g, kg
Síla	F	N
Tečná síla	F_T	N
Normálová síla	F_N	N
Obvodová síla	F_U	N
Předeřinovací síla	F_V	N
Síla působící na hřídele	F_W	N
Axiální síla	F_a	N
Radiální síla	F_r	N
Základní dynamická únosnost	C	N

Ekvivalentní dynamické zatížení	F_e	N
Trvanlivost ložiska	L_h	hod
Součinitel radiálního zatížení ložiska	X	-
Součinitel axiálního zatížení ložiska	Y	-
Otáčky	n	ot/min
Úhlová rychlost	ω	rad/s
Rychlost otáčení servomotoru	ω_S	sec/60°
Úhel rotace	φ	°
Krouticí moment	M	Nm, Nmm, kgfcm
Krouticí moment servomotoru	M_S	Nm, Nmm, kgfcm
Krouticí moment na rameni	M_R	Nm, Nmm, kgfcm
Jmenovitý moment	M_{spec}	Ncm/cm
Jmenovitý výkon	P_{spec}	W/cm
Výkon	P	W
Gravitační zrychlení	g	m/s ²
Převodový poměr	i	-
Počet zubů řemenice	z	-
Počet zubů řemene	Z_B	-
Počet zubů v záběru	Z_e	-
Součinitel tření	f	-

Úvod

Tato diplomová práce je věnována návrhu robotického ramene určeného k montáži na robotický manipulátor Ilja. Kombinací robotického ramene a tohoto manipulátoru by měl vzniknout servisní robot určený k manipulaci s drobnými předměty před tělem manipulátoru. Manipulátor Ilja je možno osadit buď magnetickým nebo pásovým podvozkem a v obou případech by měla být možnost manipulátor doplnit o robotické rameno a umožnit mu tak manipulaci s předměty. Rameno by nemělo sloužit pouze k manipulaci s předměty vyskytujícími se před manipulátorem, nýbrž i k manipulaci s NDT (non destructive testing – nedestruktivní testování) příslušenstvím, kdy se koncový efektor nahradí držákem právě tohoto příslušenství.

Toto téma bylo zvoleno v závislosti na požadavku Centra výzkumu Řež s.r.o. zkonstruovat robotické manipulační rameno sloužící, v kombinaci s robotickým manipulátorem Ilja, k manipulaci s předměty a NDT příslušenstvím v prostoru před manipulátorem. Téma manipulace s předměty v prostoru před robotickým manipulátorem Ilja je aktuální z důvodu toho, že manipulátor je sice schopen provádět vizuální inspekce prostor, kam se člověk nedostane, ať už z důvodů rozměrové nepřístupnosti, nebo z důvodu bezpečnosti, ale s předměty, které v těchto prostorech objeví není schopen jakkoliv manipulovat. Proto je potřeba navrhnout robotické manipulační rameno přizpůsobené právě manipulátoru Ilja.

Cílem práce je tedy navrhnout robotické rameno připevnitelné k manipulátoru Ilja. Dle zadání diplomové práce by poté mělo dojít k vyrobení prototypu a následnému odzkoušení jeho funkčnosti. Při návrhu ramene musí dojít k výběru vhodných aktuátorů, které budou napájeny z těla manipulátoru a celé rameno musí být navrženo jako ponořitelné pod vodní hladinu.

Celá práce bude strukturována do několika částí. Na začátku bude provedena stručná rešerše odvětví, které se této problematice týkají a budou představena některá již existující robotická ramena. Následně dojde ke specifikaci požadavků Centra výzkumu Řež s.r.o. a ke koncepčnímu návrhu robotického ramene, kde budou rozebrány jednotlivé prvky ramene a vybrána vždy nejvýhodnější varianta. Poté již dojde k detailnímu konstrukčnímu návrhu, kde se navrhne a následně zkontrolují jednotlivá dílčí ramena z pohledu pevnosti a na závěr této kapitoly bude popsáno kabelové vedení. Poté bude vyhodnocen manipulační prostor robotického ramene a v poslední části dojde ke zhodnocení funkčnosti prototypu a k celkovému zhodnocení práce.

1 Robotika

Jak už název napovídá, robotika je obor, který se zabývá roboty, jejich designem, výrobou a využitím. Tento obor zahrnuje znalosti vědních disciplín, jako jsou mechanika, teorie řízení, elektrotechnika, měřicí technika, umělá inteligence a celé řady dalších vědních oborů. [1]

1.1 Historie robotiky

První průmyslové roboty vznikly až ve 2. polovině 20. století. Nicméně lidé měli umělé pomocníky v mysli už od nepaměti. Například podle řecké legendy si bůh kovářství Hefaistos vyráběl mechanické sluhy. Těmito sluhy byly nejen služebné, ale také například užitkové třínožky na vlastní pohon nebo robot Talos, který dohlížel na Krétu. [2]

Okolo roku 1495 navrhnul Leonardo Da Vinci robota, který měl mít proporce člověka. Jednalo se o mechanického rytíře, jenž seděl, mával pažemi a hýbal hlavou. [2]

První člověku opravdu podobný robot byl vyroben v 18. století švýcarskými mistry Pierem a Henrym Drozů. Jednalo se o androida (robot podobný člověku), který byl schopen napsat perem několik vět a velmi dobře napodobovat člověka. [1]



Obrázek 1 - Android – písař Piera a Henry Drozů [3]

Do roku 1920 však o výše zmíněných zařízeních nepřemýšleli jako o robotech. Slovo robot se totiž poprvé objevilo právě roku 1920 ve hře Karla Čapka R.U.R. Díky této hře se slovo robot stalo nejznámějším českým slovem na světě. Ke konci 1. poloviny 20. století se začaly objevovat první praktické aplikace, o kterých by se dalo říct, že spadají do oblasti robotiky. Jednalo se o teleoperátory sloužící k manipulaci s radioaktivními a jinými nebezpečnými materiály. [1]

Poté šel vývoj velmi rychle. Například v roce 1961 byl uveden do provozu první průmyslový robot UNIMATE firmy General Motors a v roce 1979 se průmyslové roboty stávají běžným prostředkem automatizace manipulačních operací, jako je svařování nebo například nanášení barev. Za konečný cíl robotiky by se dal považovat stav, kdy stroj nahradí člověka. Současná podoba robotiky tuto myšlenku potvrzuje, a to téměř ve všech odvětvích. Například v průmyslu je člověk nahrazován strojem již řadu let, kdy stroje vykonávají, nejen na výrobních linkách, lidskou činnost s vyšší spolehlivostí, rychlostí a přesností. Při pohledu do zdravotnictví

tomu není jinak. Existuje široká škála robotů, které jsou ovládány doktory sedícími za počítačem. Jedním z takovýchto robotů je systém Da Vinci. Tento víceramenný laparoskopický operační systém je ovládán lékařem sedícím u ovládací konzole, který pomocí joysticků ovládá ramena robota simulující pohyby lidských rukou. [1] [4]

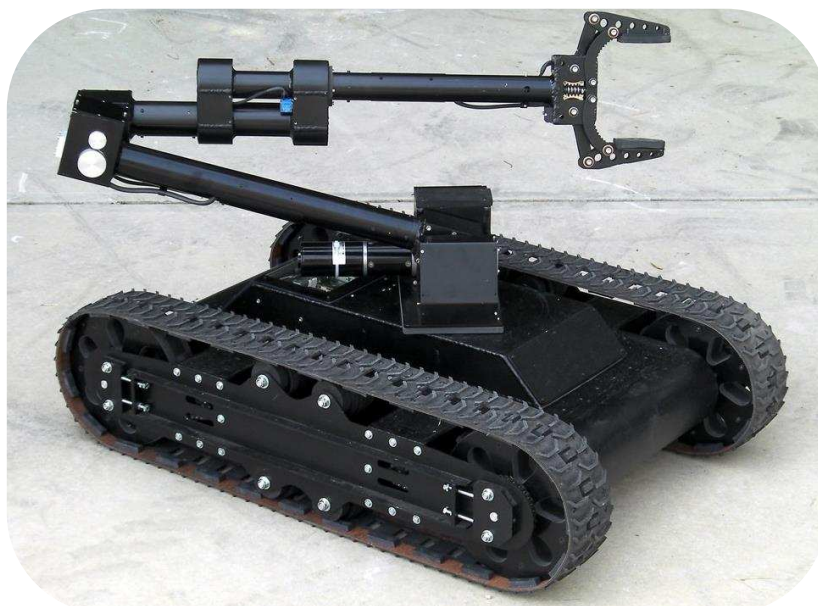
1.2 Robot

S přiznáním statusu robota je to poměrně složité, jelikož ne všem automatizovaným zařízením kolem nás chceme tento status přiznat. V dnešní době však panuje poměrně široká shoda na tom, že robot je robotem, splňuje-li tři podmínky: vnímá své okolí (zrak, hmat, sluch, čich), reaguje na podněty a situace (pomocí naprogramovaných algoritmů nebo pomocí umělé inteligence) a působí svou činností na fyzický svět (pomocí robotické paže, nástrojů apod.). [5]

1.2.1 Rozdělení robotů

Roboty můžeme dělit pomocí několika kritérií. Dva základní způsoby dělení robotů jsou hodnocení stupně vspělosti a dělení dle typu robota. Roboty se postupem času vyvíjejí a nyní existují 3 základní generace. Do první generace spadají roboty, jejichž činnost je řízena podle pevného programu. Nejsou tedy schopny změnit své chování a pohyby v závislosti na podnětech z okolí. Druhá generace robotů je již schopna na podněty z okolí reagovat, jsou totiž vybaveny senzory mapujícími okolní prostor. Nejvyspělejší třetí generace robotů je vybavena prvky umělé inteligence, kdy je robot schopen se přizpůsobovat a učit se. [6]

Pod dělením dle typu robota si můžeme představit rozdělení podle toho, jakou činnost robot vykonává a k čemu je vlastně určený. Z tohoto pohledu lze roboty dělit do 2 základních skupin. Do první skupiny spadají tzv. servisní roboty. Tyto roboty jsou specifické tím, že vykonávají činnost, kterou by měl člověk problém vykonat. Jedná se například o pyrotechnické činnosti, tedy zneškodnění nebezpečného předmětu, u kterého je riziko výbuchu. Mimo jiné existují průzkumné servisní roboty vybavené kamerovým systémem. Servisní roboty mohou být jak pozemní, vzdušné tak i podvodní. Mimo jiné mohou být vybaveny různými manipulačními prvky. Jedná se o různé druhy robotických ramen s různými pohony. [6]



Obrázek 2 - Servisní robot LT2/F "Bulldog" firmy SDR Tactical robots [6]

Pod servisní roboty spadají i tzv. androidy. Android je robot, vzhledem velice podobný člověku. Vzhled však není jediná vlastnost, již má člověk a android společnou. Android by měl být člověku podobný například i v chování, pohybech nebo třeba myšlení. [6]



Obrázek 3 - Android ASIMO [7]

Druhou skupinu tvoří roboty průmyslové. Existuje mnoho rozdílných definic průmyslových robotů, avšak ve snaze o sjednocení těchto definic, Mezinárodní organizace pro standardizaci definovala průmyslového robota, dle normy ISO 8373 (1998), jako: „Automaticky řízený, opětovně programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách, který může být upevněn na místě nebo mobilní k užití v průmyslových automatických aplikacích.“. Průmyslové roboty se tedy využívají pro práci, kde se vyžaduje vysoká přesnost, rychlost a spolehlivost. Mohou to být roboty určené pro prostou manipulaci s předměty, nebo například roboty určené pro svařování. [6] [8]



Obrázek 4 - Průmyslový robot LR Mate 200 iD/7L firmy Fanuc [9]

Náplní této diplomové práce je navrhnout robotické manipulační rameno, které se bude následně šroubovat k robotickému pohybovému modulu. Z obecného pohledu se tedy jedná o servisního robota, který bude mít za úkol někam dojet a manipulovat s předměty. Jelikož však náplní této práce není návrh robotického pohybového modulu a rameno bude svou základnou pouze přizpůsobeno k instalaci na již existující pohybový modul, bude se návrh podobat spíše návrhu průmyslového robota.

2 3D tisk

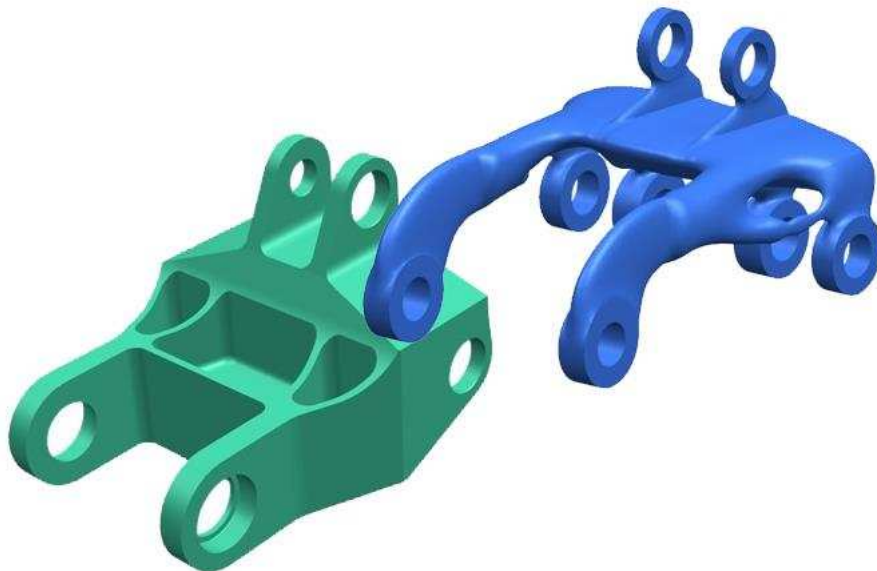
Jelikož je tato práce věnována návrhu robotického ramene, jehož většina dílů bude vytištěna na 3D tiskárně, je na místě objasnit si v následujících kapitolách technologie 3D tisku.

Ještě do nedávna byl 3D tisk modelů pouze okrajovou technologií pro nadšence. Nicméně v posledních letech se tato technologie výroby dostala snad do všech odvětví průmyslu. Výhody 3D tisku se využívají například v leteckém, automobilovém, ale také v lékařském průmyslu, kde se na 3D tiskárně vyrábí například dočasné zubní náhrady. [10]

Ačkoli 3D tisk zažil vzestup až v posledních letech, je tato technologie stará přibližně 40 let. K tomu, aby se tato technologie rozšířila dříve, bránila vyšší cena, složitá obsluha a komplikovaná dostupnost. Tyto mantinely postupem času vymizely a 3D tisk se tak stal velice vyhledávanou technologií nejen při výrobě prototypů a v malosériové výrobě. [10]

Nezpochybnitelnou výhodou 3D tisku je možnost vytvářet tvarově velmi složité konstrukce, které jsou ke všemu, oproti svým obráběným protějškům, výrazně lehčí. To však nejsou jediné výhody 3D tisku. Jelikož tiskárna nanáší materiál pouze tam, kde je potřeba, vzniká jen nepatrné množství odpadního materiálu. Tato metoda se označuje jako aditivní. Naproti tomu subtraktivní výroba spočívá v odebírání materiálu z polotovaru. Mluvíme tedy o obrábění a do této skupiny patří například vrtání, frézování, soustružení atd.. Odebíráním materiálu z polotovaru se nám vedle požadovaného výrobku vytvoří i velké množství odpadu, který lze sice recyklovat, ne však za cenu surového materiálu. [10]

Na obrázku 5 jsou dvě součásti, které slouží ke stejnému účelu. Rozdíl mezi nimi je v tom, že zelená součást je navržena na výrobu subtraktivní technologií, zatímco modrá součást na aditivní. Na první pohled je patrné, že při zachování dostatečných pevnostních vlastností je při výrobě aditivní technologií využito mnohem méně materiálu, což má pozitivní vliv jak na ekonomickou stránku věci, tak na celkovou hmotnost součásti.



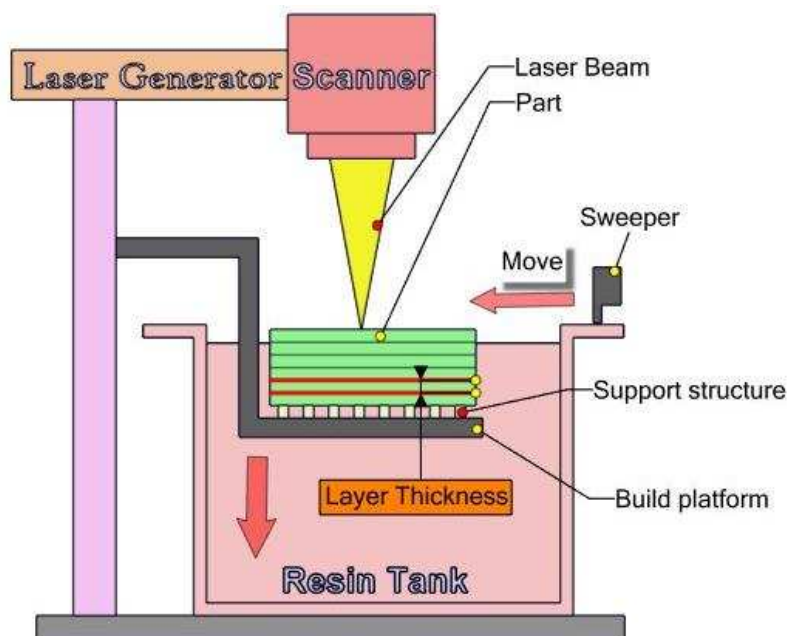
Obrázek 5 - Porovnání subtraktivní (zelená) a aditivní (modrá) technologie [11]

2.1 Rozdělení 3D tiskáren dle principu tisku

Existují desítky zkratků názvů tiskových technologií. Ve skutečnosti jsou však technologie označovány jinými zkratkami velice podobné, ne-li naprosto stejné. Je tomu tak z důvodu práv, patentů a ochranných známek vlastníka názvu tiskové technologie, a proto si jiní výrobci musí tutéž technologii označit jiným názvem. Aditivní technologii můžeme rozdělit do čtyř základních skupin podle toho, jakým způsobem je zpracováván materiál modelu. [12]

2.1.1 Tekutý materiál vytvrzován v definované vrstvě

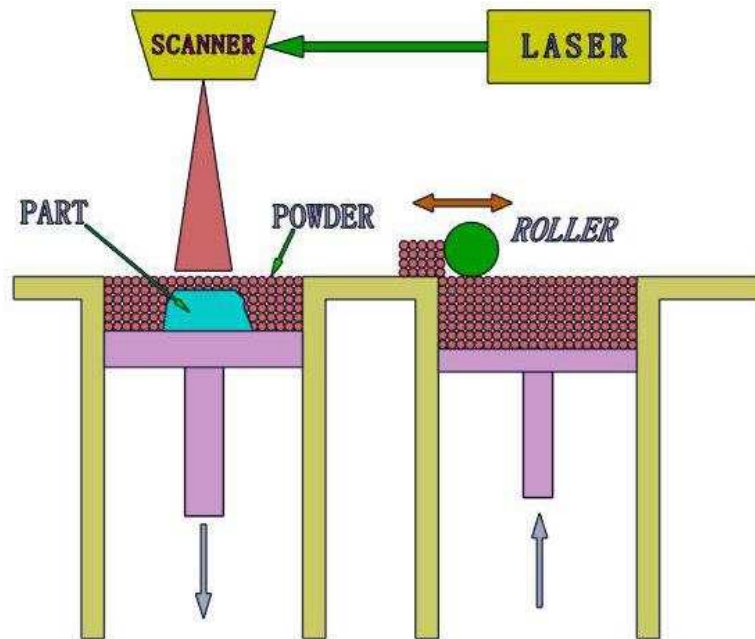
Tisková deska je umístěna v nádobě s tekutým polymerem. Výška tiskové vrstvy je v tomto případě dána rozdílem úrovně tiskové desky a hladiny polymeru. Vytvrzení polymeru je prováděno pomocí světelného paprsku, kdy paprsek vykreslí požadovaný tvar vrstvy, čímž dojde ke ztuhnutí polymeru. Další vrstva modelu je vytvořena vertikálním posunutím tiskové desky a následným opětovným vykreslením tvaru pomocí světelného paprsku, viz obrázek 6. Neznámějším označením a zároveň nejstarší technologií 3D tisku využívající tento princip je SLA (stereo litografie). Po vytisknutí je třeba model omýt v izopropylalkoholu a následně definitivně vytvrdit UV světlem. SLA je jednou z nejpřesnějších technologií a touto technologií lze tisknout desítky různých druhů polymerů. [12]



Obrázek 6 - Schéma SLA principu tisku [13]

2.1.2 Materiál pojen pomocí laseru, lepidla apod.

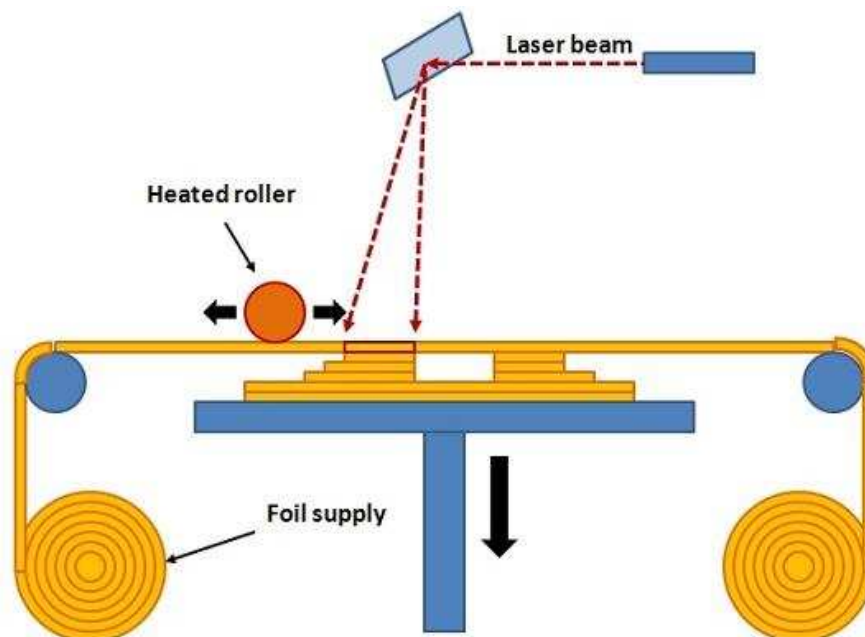
Stavební materiál je rozprostřen na stavební desce ve formě prášku. K vytvrzení prášku je používán buďto laser nebo lepidlo. Principiálně dochází k tvorbě součásti stejně jako u předchozí technologie, kdy laserový paprsek potažmo hlavice s lepidlem vykreslí požadovaný tvar, čímž dojde k vytvrzení prášku. Následně se stavební deska posune ve vertikálním směru a proces se opakuje viz obrázek 7. Mezi technologie využívající tento princip patří SLS (selective laser sintering), CJP (color jet printing) a DMP (direct metal printing). Tímto principem je možné tisknout celou škálu plastů, kovů a prášků na bázi sádry. Technologií CJP lze vytisknout téměř fotorealistický 3D model. [12]



Obrázek 7 - Schéma SLS principu tisku [14]

2.1.3 Oddělování materiálu v každé vrstvě

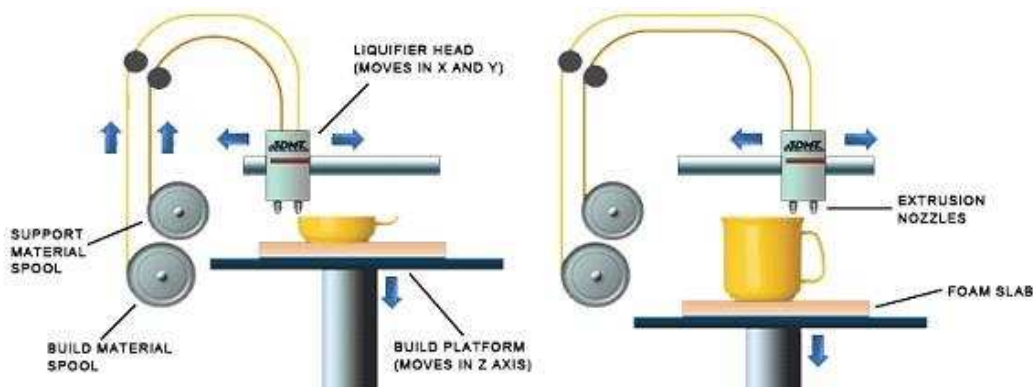
Tento princip je výrobci nejméně využíván. Zástupcem tohoto principu je technologie LOM (laminated object manufacturing) a stavebním materiálem je zde papír nebo folie. Stavební materiál je odvíjen z role nebo je podáván ze zásobníku např. formátu A4, A3 apod.. Tvar vrstvy je vyříznut ze stavebního materiálu a následně je další vrstva nalepena na předchozí viz obrázek 8. Po vyříznutí může být vrstva obarvena pomocí principu inkoustové tiskárny, čímž se docílí barevných efektů finálního výrobku. Tento princip sice není klasický 3D tisk, model se vyřezává a lepí, nicméně materiál se přidává, tudíž se jedná o aditivní technologii. [12]



Obrázek 8 - Schéma LOM principu tisku [15]

2.1.4 Materiál vytlačován tiskovou hlavou

Princip činnosti této metody spočívá v nanášení tiskového materiálu na tiskovou podložku po vrstvách. Po dokončení jedné vrstvy se posune tisková hlava nebo podložka a započne tisk další vrstvy viz obrázek 9. Nejznámějším zástupcem této metody tisku je tisk tavenou strunou neboli filamentem. Existuje velká škála pojmenování této metody jako například FDM (fused deposition modeling), PJP (plastic jet printing), FFF (fused filament fabrication) atd.. Tato metoda 3D tisku je velice oblíbená, a to hlavně z finančních důvodů, kdy jsou ceny oproti konkurenčním metodám 3D tisku výrazně nižší, a to jak v případě pořizovací ceny tiskárny, tak i v případě ceny stavebního materiálu. Další výhodou této metody je široké spektrum stavebních materiálů. Na druhé straně nevýhody této technologie spočívají v dlouhých časech tisku, v rozptylu tiskové přesnosti, volbě orientace tisku modelu, nutnosti konstruování podpěr atd.. [12]



Obrázek 9 - Schéma FDM principu tisku [15]

Pokud je žádaná vyšší přesnost tisku touto metodou, existuje technologie MJP (multi jet printing). Tato technologie spočívá v nanášení stavebního materiálu pomocí tisíců otvorů tiskové hlavy. Společně se stavebním materiálem je nanášena i vrstva vosku, který slouží jako podpora v místech, kde je to potřeba. Stavební materiál a vosk mají jinou teplotu tání, tudíž po vytištění je součást vložena do pece, kde je vosk rozpuštěn. Tato metoda se pyšní velmi vysokou přesností detailu a rozměru. [12]

Tato metoda 3D tisku byla záměrně ponechána až na konec, a to z toho důvodu, že firma zadávající tuto diplomovou práci, Centrum výzkumu Řež s.r.o., je vlastníkem 3D tiskárny Projet MJP 3600 firmy 3D SYSTEMS, a právě na této tiskárně bude rameno tisknuto. Jak už název napovídá, jedná se o tiskárnu využívající technologii MJP, tedy tisk základního stavebního materiálu společně s voskem jako podpěrou. Tato 3D tiskárna se pyšní parametry jako minimální tloušťka vrstvy 16 μm , přesnost 0,025 – 0,05 mm na 25,4 mm tisknutého modelu atd.. Kompletní informace o tiskárně jsou součástí volně vložených příloh této diplomové práce. [16]

Na obrázku 10 je znázorněna součást vytištěna pomocí 3D tiskárny Projet MJP 3600 firmy 3D SYSTEMS. Vlevo je zobrazena ve stavu, v jakém je vyjmuta z 3D tiskárny, tedy součást společně s voskovou podpěrou. Vpravo je již součást očištěna od vosku.



Obrázek 10 - Výtisk z 3D tiskárny Projet MJP 3600 firmy 3D SYSTEMS [17]

3 Open source robotická ramena

Výstupem této diplomové práce by měl být prototyp robotického manipulačního ramene vytištěného na 3D tiskárně s možností přišroubování na robotický pohybový modul. Bez ohledu na fakt, že přišroubováním na již zmíněný pohybový modul vznikne tzv. servisní robot, se výstup této práce nejvíce podobá open source robotickému ramenu. Open source je způsob tvorby dat, kdy je projekt poskytnut ostatním vývojářům, kteří ho mohou studovat potažmo i upravovat a většina open source robotických ramen je menších rozměrů, tištěných na 3D tiskárně. Na projektu se tedy může podílet opravdu kdokoliv a v praxi to může vypadat tak, že na dané věci mohou pracovat domácí kutilové, firmy nebo třeba zkušení vývojáři ve svém volném čase. [18]

V dnešní době existuje mnoho open source robotických ramen a každé je v něčem specifické. V následujících kapitolách budou ukázána tři open source robotická ramena, přičemž každé z nich bude stručně popsáno.

3.1 Niryo One

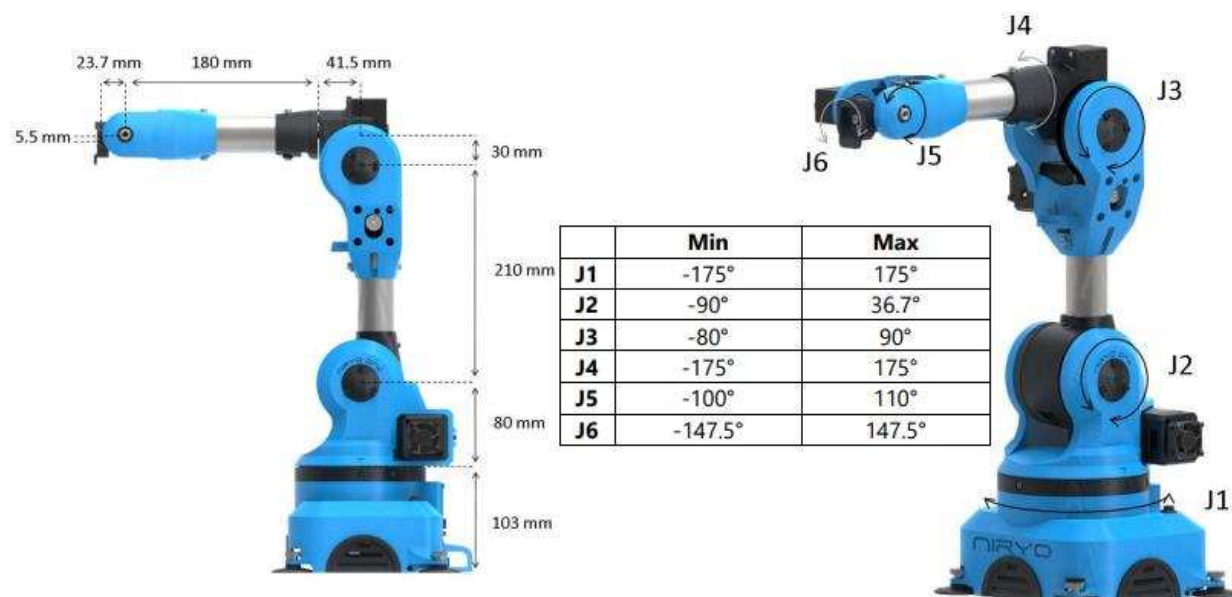
Niryo One je open source šestiosý robot navržený ve Francii, sloužící především pro vysokoškolské vzdělávání, odborné vzdělávání a pro laboratoře výzkumu a vývoje. Základní stavební části ramene jsou vytištěny z materiálu PLA pomocí 3D tiskárny. Tyto nosné části jsou doplněné o hliníkové trubky a vše je pospojováno pomocí spojovacího materiálu. Niryo je v základu osazen aktuátory v podobě tří servomotorů Dynamixel XL a trojicí krokových motorů, které se starají o pohyb ramene v šesti osách. Z krokových motorů je přenášen krouticí moment pomocí řemenových převodů, kdy převodové poměry jsou mnohem větší než 1, což má za následek zvětšení krouticího momentu. Krokovými motory jsou řízeny první tři stupně volnosti (směrem od základny k chapadlu), kde není požadavek na malé zástavbové prostory aktuátoru. O pohyb ve zbylých třech stupních volnosti se starají servomotory. Ty se obecně vyznačují menšími zástavbovými prostory a vyšším krouticím momentem na výstupu. [19]



Obrázek 11 - Open source robotické rameno Niryo One [19]

3.1.1 Technické specifikace

Jak již bylo zmíněno výše, jedná se o rameno se šesti stupni volnosti a o pohyby v těchto šesti osách se stará trojice krokových motorů společně s trojicí servomotorů. Hmotnost ramene je 3,3 kg a maximální dosah 440 mm. Na této vzdálenosti je rameno schopno manipulovat s břemenem o maximální hmotnosti 300 g. Na obrázku 12 jsou rozměry robotického ramene Niryo One (vlevo) a maximální rozsahy rotace v jednotlivých kloubech (vpravo). [19]



Obrázek 12 - Open source robotické rameno Niryo One – rozměry (vlevo), rozsah rotace (vpravo) [20]

3.1.2 Příslušenství ramene Niryo One

V open source verzi ramene Niryo One je nabízeno celkem 5 možností koncového efektoru. Jedná se o tři druhy robotických chapadel, vakuovou přísavku a elektromagnet. Robotické chapadla se od sebe liší provedením a také maximálním rozevřením, tudíž schopností uchopit různě velké předměty. Na obrázku 13 jsou znázorněny všechny tři druhy robotických chapadel. Každé chapadlo je trochu jiné a každé se hodí pro úchop jiného předmětu. Chapadlo vlevo na obrázku je standardním chapadlem vhodným pro sběr malých nebo tenkých předmětů, kde je vyžadována vyšší přesnost manipulace. Maximální rozevření chapadla je v tomto případě 27 mm. Chapadlo uprostřed je větší než předchozí a slouží pro sběr větších předmětů. Zásadní vlastností tohoto chapadla je fakt, že plochy prstů jsou vždy rovnoběžné, tudíž nedochází k posunu uchopovaného předmětu dopředu. Maximální rozevření tohoto chapadla je 60 mm. Vpravo na obrázku je tzv. adaptivní chapadlo. Tímto chapadlem lze zvedat tvarově složité nebo křehké předměty jako například kulaté předměty, vejce, jablko atd.. Princip úchopu spočívá v tom, že předmět obejmeme svými prsty a drží ho vždy ve středu pevně sevřený. Maximální rozevření adaptivního chapadla je 90 mm. [20]



Obrázek 13 - Open source robotické rameno Niryo One - 3 druhy chapadel [20]

Dalším doplňkem Nirya One, jež lze použít jako koncový efektor, je vakuová pumpa s přísavkou. Jak lze vidět na obrázku 14, jedná se o jednoduchý mechanismus, kdy je pomocí servomotoru ovládaná injekční stříkačka, jež je pomocí hadičky napojena na přísavku. Tímto systémem lze uchopovat a manipulovat například s rovnými deskami, různými víky krabiček atd.. Maximální hmotnost předmětu, kterým lze touto přísavkou manipulovat, je 350 g. [20]



Obrázek 14 - Open source robotické rameno Niryo One - vakuová pumpa [20] [21]

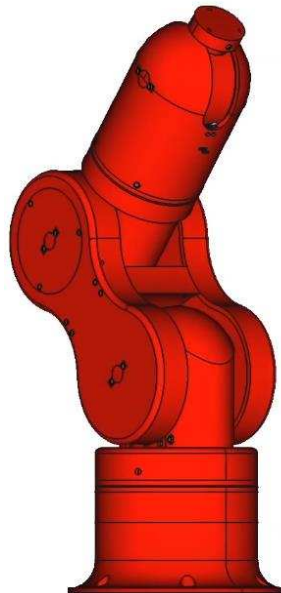
Posledním doplňkem, které Niryo One nabízí je koncový efektor v podobě elektromagnetu. Pomocí tohoto efektoru lze Niryem One manipulovat s malými feromagnetickými předměty. Elektromagnetický efektor se skládá ze samotného elektromagnetu a řídicí elektroniky. [22]



Obrázek 15 - Open source robotické rameno Niryo One - elektromagnet [22]

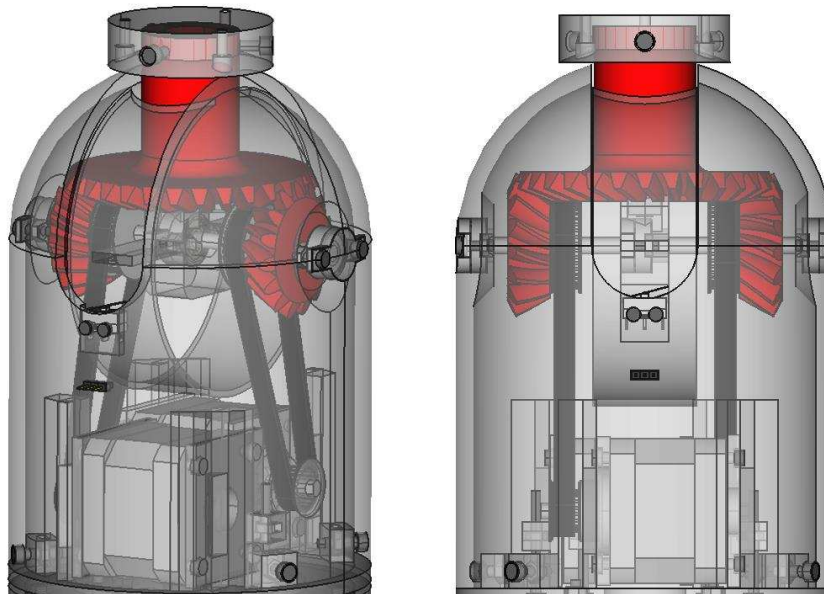
3.2 Thor

Dalším open source šestiosým robotickým ramenem tisknutelným na 3D tiskárně je Thor. Robotické rameno Thor vzniklo z diplomová práce, kdy autor měl za úkol navrhnout robotické manipulační rameno s šesti stupni volnosti tisknutelné na 3D tiskárně a následně spustit open source, tedy volné sdílení dat. Kromě cíle splnit požadavky na diplomovou práci, byl účel tohoto projektu podobný jako v případě Niryo One, tedy vytvořit robotické rameno sloužící k výukovým účelům. [23]



Obrázek 16 - Open source robotické rameno Thor [23]

K pohybu ve všech šesti osách slouží 7 krokových motorů. 7 motorů je použito z důvodu aplikace dvou krokových motorů na druhém stupni rotace, kde lze očekávat nejvyšší kroučící moment. K přenosu kroučících momentů z krokových motorů jsou pro první, druhý a čtvrtý otočný kloub využity ozubené převody. Třetí kloub je ovládán řemenovým převodem, avšak asi největší zajímavostí tohoto ramene je pohyb okolo páté a šesté osy. Ten je totiž realizován pomocí tzv. semi-diferenciálu. 3D model semi-diferenciálu je na obrázku 17 a principiálně funguje tak, že točí-li se obě menší kuželová kola na stejnou stranu, stejnou rychlostí, dochází pouze k rotaci velkého kuželového kola okolo osy menších kuželových kol. Pokud se však malá kola točí opačnými směry, stejnou rychlostí, dochází k rotaci velkého kuželového kola okolo vlastní osy. Tyto dva extrémy se dají samozřejmě kombinovat. Například, v případě, že by jedno z malých kuželových kol stálo a druhé se točilo, docházelo by k rotaci velkého kuželového kola jak okolo osy malých kuželových kol, tak okolo vlastní osy. [23]

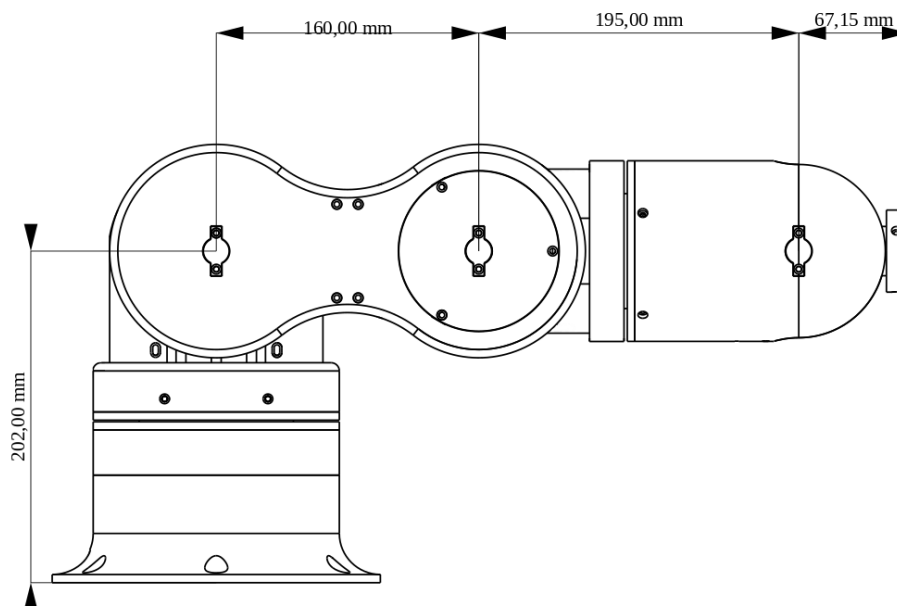


Obrázek 17 - Open source robotické rameno Thor - semi-diferenciál [23]

Koncový efektor není součástí open source projektu. Autor se totiž domnívá, že internet je plný všech možných chapadel, háků, vakuových přísavek atd.. Jeho myšlenka spočívá v tom, že navrhl adaptivní design koncového členu, který si buď každý uživatel přizpůsobí dle toho, jaký koncový efektor bude používat, přizpůsobí koncový efektor připojovacímu rozhraní, nebo si navrhne mezikus, který bude spojovat efektor s připojovacím rozhraním. [23]

3.2.1 Technické specifikace

Jak je popsáno výše, Thor je robotické manipulační rameno se šesti stupni volnosti, kde je použito sedm krokových motorů jako aktuátory. Ve svislé poloze je Thor vysoký cca 625 mm, přičemž horizontální dosah je, bez koncového efektoru, cca 423 mm. Na této vzdálenosti je Thor schopný manipulovat s břemeny o hmotnosti 750 g. Na obrázku 18 jsou základní rozměry manipulačního robotického ramene Thor. [23]



Obrázek 18 - Open source robotické rameno Thor – rozměry [23]

3.3 Moveo

Robotické manipulační rameno Moveo od firmy BCN3D se sídlem v Barceloně ve Španělsku je dalším open source robotickým ramenem, které zde bude popsáno. Rameno vzniklo, stejně jako dvě dříve popsaná, za účelem vzdělávání. Také proto bylo rameno umístěno do 15 vzdělávacích ústavů v Katalánsku. V základní verzi se jedná o rameno s pěti stupni volnosti. Od ramen, která zde byla popsána, se liší absencí rotační vazby koncového efektoru okolo své osy. Avšak, jelikož se jedná o open source verzi, existují varianty, kde je tato rotační vazba doplněna, tudíž se jedná o rameno se šesti stupni volnosti. [24]

V základní verzi je rameno vybaveno šesti krokovými motory a jedním servomotorem. Servomotor se však nestará o pohyb v jedné z pěti os pohybu, nýbrž o sevření chapadel koncového efektoru. Zde se nabízí otázka, proč je rameno vybaveno šesti krokovými motory, když se jedná o rameno pouze s pěti stupni volnosti? Je to z toho důvodu, že o pohyb v druhé ose se stará dvojice krokových motorů. V této ose je totiž očekáván největší moment působící proti aktuátoru. S výjimkou jednoho krokového motoru je krouticí moment z motorů přenášen pomocí řemenového převodu. Převodové poměry jsou navrženy do pomala, tudíž se zvyšujícím se krouticím momentem. Pouze v případě, kdy je část ramene otáčena okolo vlastní osy, je výstupní hřídel krokového motoru spojena s ramenem přímo, bez jakéhokoliv převodu. [25]



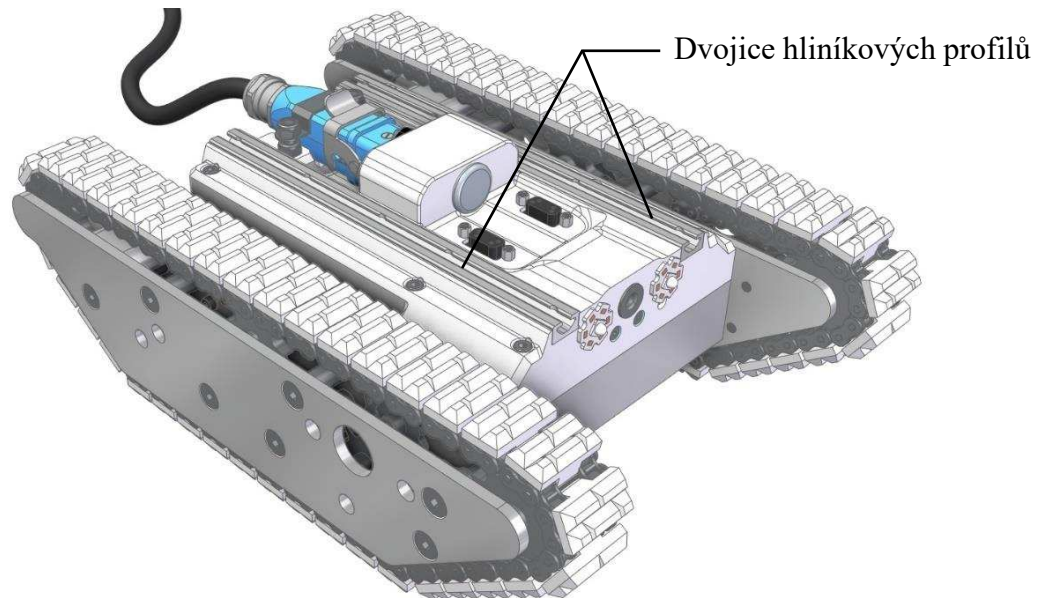
Obrázek 19 - Open source robotické rameno Moovo [26]

3.3.1 Technické specifikace

Robotické manipulační rameno model od firmy BCN3D má v základní verzi pět stupňů volnosti. O pohyb se stará šestice krokových motorů, jež přenášejí krouticí moment pomocí řemenových převodů. Co se týká bližší technické specifikace, jako je dosah ramene, nosnost, hmotnost atd., výrobce tyto parametry neudává. Na internetovém serveru YouTube je však uživatel Dr. D-flot, který testuje jeden z nejdůležitějších parametrů robotického manipulačního ramene. Tímto parametrem je nosnost a ve videu ukazuje, že rameno je schopno bez problémů manipulovat s břemenem o hmotnosti 118 g. S jistou dávkou plynulosti pohybu si rameno poradí i s břemenem o hmotnosti okolo 230 g. S těžšími předměty si rameno poradí jen v určité poloze posledního z ramen. Ve sklopené poloze, tedy v poloze, kdy na poslední krokový motor nepůsobí žádný moment, rameno zdvihne břemeno o hmotnosti cca 550 g. [27]

4 Specifikace požadavků na navrhované rameno

Požadavky zadavatele, Centrum výzkumu Řež s.r.o., na robotické manipulační rameno vyplývají ze zadání diplomové práce. Prvním požadavkem je snadná montáž a demontáž manipulačního ramene k tělu robotického manipulátoru Ilja. Mechanické přichycení ramene k tělu manipulátoru by mělo být realizované pomocí dvojice hliníkových profilů umístěných na vrchní části manipulátoru Ilja (obrázek 20).



Obrázek 20 - Robotický manipulátor Ilja

Dalším požadavkem je možnost manipulace s drobnými předměty o hmotnosti cca 200 g a příslušenstvím pro NDT inspekce. Pro splnění tohoto požadavku bude zapotřebí navrhnout koncový efektor, jenž zajistí možnost uchopení drobných předmětů. Z tohoto požadavku také vyplývá nutnost navržení systému přichycení koncového efektoru ke zbytku ramene, pomocí kterého bude možnost jednoduše efektor vyměnit za držák příslušenství pro NDT inspekce. Manipulace by měla být realizována alespoň před čelní stranou manipulátoru, proto je potřeba při návrhu ramene zohlednit rozměry robotického manipulátoru Ilja.

Centrem výzkumu Řež je mimo jiné požadována schopnost práce robotického manipulačního ramene pod vodní hladinou v hloubce alespoň jednoho metru. To pro návrh ramene znamená nutnost volby vodotěsných pohonných aktuátorů, nebo kompletní utěsnění částí, které by mohla voda poškodit.

Co se týče materiálu ramene, jak bylo zmíněno v teoretické části této práce, nosné prvky budou vytištěny pomocí 3D tiskárny Projet MJP 3600 od firmy 3D SYSTEMS. Tiskový prostor v režimu UHD (Ultra High Definition), tedy v režimu vysoké přesnosti, má rozměry 203 x 185 x 203 mm. Předpokládaným materiálem tisku je Visijet M3 Crystal. Kompletní specifikace tiskárny a materiálu Visijet M3 Crystal je součástí volně vložených příloh této diplomové práce. Maximální rozměry tisknutelné součásti a materiál, ze kterého bude rameno tisknuto, je nutno vzít při návrhu v úvahu. [16]

Aktuátory robotického ramene by měly být napájeny pomocí konektorů umístěných na víku manipulátoru. Zde je tedy potřeba počítat s maximálně 12 V napájením, které je k manipulátoru přiváděno 100 m kabelem z autobaterie.

5 Návrh koncepce robotického ramene

V této kapitole budou stručně popsány možnosti provedení jednotlivých prvků ramene a následně bude vybrána vždy jedna varianta, nejvíce vyhovující požadavkům.

5.1 Kinematická struktura

Kinematickou strukturou se rozumí konstrukční uspořádání jednotlivých ramen. Rozlišujeme dvě kinematické struktury, a to sériovou a paralelní.

Paralelní kinematická struktura

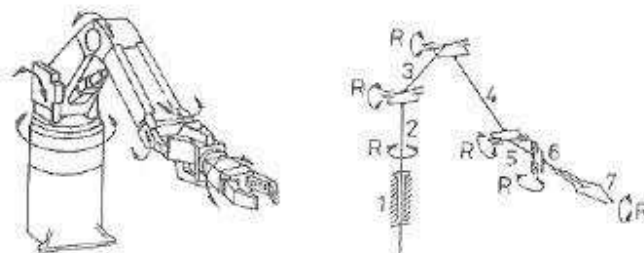
U paralelní kinematické struktury jsou jednotlivé členy, jak už název napovídá, řazeny paralelně. Konstrukčně je možné vytvořit tři (tripod) nebo až šesti (hexapod) vzpěrnou strukturu. Výhodou tohoto řešení je jeho tuhost, přesnost polohování cca $\pm 0,01$ mm a možnost použití shodných vzpěr, tudíž nižší nároky na výrobu. Další výhodou, oproti sériové struktuře, je vyšší rychlost pohybu, která je zapříčiněna menšími hmotami ramene, čehož se ve velké míře využívá například na výrobních linkách, jelikož dochází ke zkracování výrobních časů. Naopak nevýhody spočívají ve vysokých nárocích na řídicí systém a možnosti vzniku kolize mezi jednotlivými vzpěrami. [28] [29]



Obrázek 21 – Paralelní kinematická struktura (tripod) [30]

Sériová kinematická struktura

Sériová kinematická struktura se vyznačuje postupným navazováním kinematických dvojic do otevřeného kinematického řetězce. Na obrázku 22 je průmyslový robot sériové kinematické struktury. Výsledný pohyb se skládá z rotace nebo translace jednotlivých, na sebe navazujících, ramen. Toto uspořádání může přinášet jisté nevýhody, jako například nižší tuhost nebo přesnost polohování maximálně v řádu desetin milimetrů. To však závisí na použitých uloženíh jednotlivých ramen. Existují totiž robotická ramena sériové kinematické struktury s opakovatelnou přesností nastavení koncového efektoru v hodnotě 0,005 mm. Sériová kinematická struktura je používána cca u 90 % robotů a manipulátorů. Výhodou tohoto řešení je totiž jeho pohybová flexibilita, manipulační dosah a rozměrové parametry. [28] [29] [31]



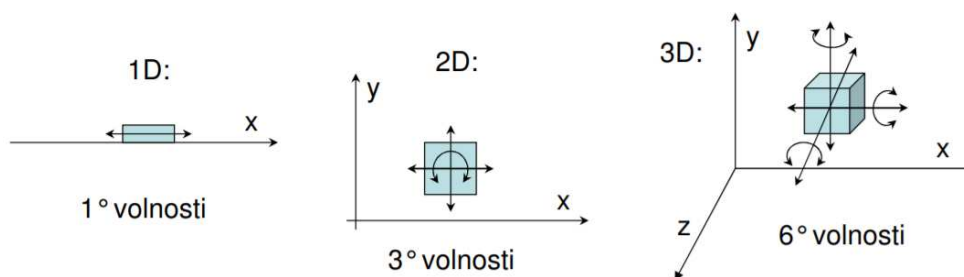
Obrázek 22 - Sériová kinematická struktura [28]

Právě pro nezpochybnitelné výhody flexibility pohybu, rozměrových parametrů a manipulačního dosahu sériové kinematické struktury bude rameno navrženo jako sériové.

5.2 Počet stupňů volnosti

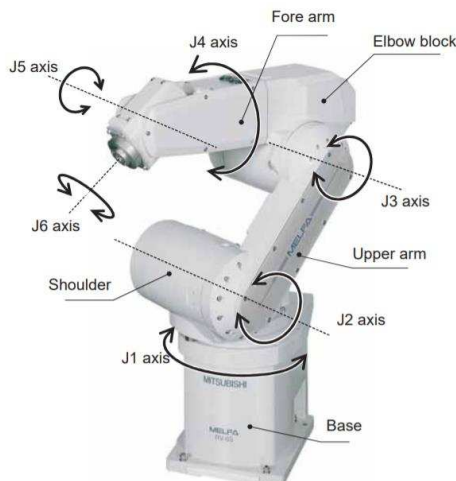
Počet stupňů volnosti robotického ramene určuje počet os, podle kterých lze pohybovat uchopeným předmětem. Nepočítaje koncový efektor, tedy jakýkoli pohon sevření koncových čelistí, tak se velmi často počet stupňů volnosti shoduje s počtem pohonů. Existují však i výjimky, jako například robotické rameno Thor, viz kapitola 3.2. U tohoto ramene je použita dvojice krokových motorů pro pohon jediné rotační vazby. [32]

Obecně platí fakt, že čím více stupňů volnosti, tím jsou lepší manipulační možnosti robota, avšak tím více se komplikuje řídicí systém. Pokud je od ramene požadována volná manipulace s tělesem v prostoru, musí mít rameno v daném prostoru alespoň tolik stupňů volnosti, jako má těleso. Jak je patrné z obrázku 23, v 1D prostoru má objekt 1° volnosti. Pro volný pohyb v tomto prostoru postačí pouze jeden pohon. Ve 2D prostoru má objekt 3° volnosti. Objekt se může volně translačně pohybovat ve dvou směrech a rotovat okolo jedné osy. Pro volný pohyb objektu ve 2D prostoru je zapotřebí minimálně trojice pohonů. Ve 3D prostoru má objekt 6° volnosti. Jedná se o 3 translační pohyby a o 3 pohyby rotační. Pro volný pohyb ve 3D prostoru je tedy zapotřebí minimálně 6 pohonů. Existuje mnoho aplikací, kde není potřeba manipulovat s objektem ve všech šesti osách a ramena jsou tudíž vybavena například pouze pěti kinematickými vazbami. A naopak, v případě, kdy je potřeba manipulovat s předměty za nějakými překážkami, mohou být ramena vybavena více jak šesti kinematickými vazbami. [32]



Obrázek 23 - Počet stupňů volnosti [32]

V našem případě bude rameno navrženo s 6° volnosti. Více stupňů volnosti by znamenalo větší zástavbový prostor a složitější ovládání ramene, přičemž není předpokládána manipulace s předměty za jakoukoli překážkou. Naopak méně stupňů volnosti by znamenalo omezení možnosti volně pohybovat a natáčet předmět v prostoru, což je nežádoucí. Na obrázku 24 je znázorněna koncepce robotického ramene, která bude využita při návrhu. Rameno bude vybaveno šesti otočnými vazbami a bude se skládat z pěti ramen, základny a koncového efektoru.



Obrázek 24 - Rameno s 6° volnosti [33]

5.3 Aktuátory

Aktuátor nebo též pohon je zařízení transformující energii ze zdroje na mechanický pohyb ve formě síly, momentu, polohy, úhlu atd. v závislosti na vstupním řídicím signálu. Aktuátory se dělí dle druhu zdrojové energie, která je transformována na energii mechanickou. [34] [35]

5.3.1 Hydraulické aktuátory

Pracovním médiem hydraulických aktuátorů je kapalina, konkrétně hydraulický olej, který je pomocí hydraulického vedení přiváděn do hydraulických akčních členů. Tyto akční členy mohou být s přímočarým nebo rotačním pohybem. Výhodou hydraulických aktuátorů je jejich účinnost, spolehlivost, vysoká tuhost a možnost plynulého řízení rychlosti a dosažení požadované polohy. Nevýhody těchto aktuátorů spočívají v potřebě samostatného a odděleného energetického bloku, v nutnosti odděleného vedení hydraulického pracovního média ke každému prvku ze soustavy aktuátorů, v možnosti úniku pracovního média vinou netěsného spojení, ve změně viskozity pracovní kapaliny v závislosti na teplotě nebo v hořlavosti pracovního média. [34]

5.3.2 Pneumatické aktuátory

Pneumatické pohony jsou v jistých ohledech velice podobné hydraulickým. Do aktuátorů se přivádí pracovní médium pomocí pneumatického vedení a ke každému aktuátoru je potřeba vést vlastní hadici s pracovním médiem. Pneumatické aktuátory však pracují, na rozdíl od hydraulických, se vzduchem. Pneumatické pohony mohou být, stejně jako hydraulické, s přímočarým nebo rotačním pohybem. Výhody pneumatických pohonů spočívají v konstrukční jednoduchosti, spolehlivosti a snadné údržbě, v možnosti přetížení motorů bez nebezpečí poruchy nebo v rychlosti pohybu. Hlavní nevýhodou je však obtížnost při přesném nastavování zdvihu. Mezi další nevýhody, vedle nutnosti vedení oddělených pneumatických hadic ke každému z aktuátorů, patří obtížné řízení rychlosti, poddajnost zapříčiněná stlačitelností vzduchu a drahý provoz, kdy je stlačený vzduch považován za jeden z nejdražších zdrojů energie. [34]

5.3.3 Elektrické aktuátory

Při realizaci rotačních vazeb u průmyslových robotů mají prioritní postavení elektrické aktuátory. Pneumatické a hydraulické aktuátory jsou v praxi využívány především při realizaci přímočarých pohybů. Výhody elektrických aktuátorů spočívají v jednoduchosti vedení energie k pohonům, jednoduchosti údržby, čistotě provozu a nižších pořizovacích, provozních i udržovacích nákladech. [34]

U průmyslových robotů se v dnešní době využívají především servomotory. U menších robotických ramen jsou kromě servomotorů využívány také krokové motory. Ty většinou přenášejí krouticí moment přes dodatečný převodový stupeň, realizovaný například pomocí řemenového převodu nebo převodu ozubenými koly. Servomotor tento dodatečný převodový stupeň většinou nepotřebuje, jelikož samotný servomotor je již vybaven převodovkou. Výhodou servomotorů, oproti krokovým motorům, v závislosti na požadavcích zadavatele této diplomové práce je fakt, že servomotory se vyrábějí také jako vodotěsné.

5.3.4 Výběr typu aktuátorů

Jelikož mají být aktuátory napájeny z těla manipulátoru a další dodatečné vedení pneumatických nebo hydraulických hadic k manipulátoru nepřichází v úvahu, jsou první dvě varianty aktuátorů popsaných výše zavrhnuty. Je tedy jasné, že se bude jednat o aktuátory

elektrické. Otázkou je, zda to budou krokové motory nebo servomotory. Požadavkem zadavatele na schopnost ramene práce pod vodní hladinou se jako jasná volba jeví servomotory. V případě použití krokových motorů by muselo dojít k utěsnění celého ramene a výstupní hřídele z krokových motorů by musely být vedeny například přes gufera. Také by se musely navrhovat vodotěsné průchody pro kabely, což by návrh velice komplikovalo a dost možná by došlo k nárůstu rozměrů celého ramene. K nárůstu rozměrů ramene by také došlo z důvodu nutnosti navržení dodatečných převodů, jelikož krokové motory podobných rozměrů jako servomotory mají o poznání nižší krouticí moment.

Pro návrh robotického ramene budou tedy použity servomotory. Servomotory budou muset být vodotěsné a s takovým krouticím momentem, aby unesly vlastní hmotnost ramene navýšenou o hmotnost cca 200 g přemísťovaného břemene.

5.4 Kabelový svazek

Jelikož v předchozí kapitole byly jako aktuátory zvoleny servomotory, jež jsou poháněny elektrickou energií, která bude dodávána prostřednictvím konektorů na víku manipulátoru, je potřeba tuto energii nějakým způsobem dopravit k servomotorům. Elektrická energie bude k servomotorům přiváděna pomocí elektrických kabelů.

5.4.1 Prostor vedení kabelového svazku

Pro vedení kabelového svazku se nabízí tři varianty.

Povrchové vedení

Jednou z variant je vedení kabelů po povrchu robotického ramene, tedy vizuálně ne moc hezké řešení, avšak velice funkční, jelikož lze kamkoli vložit rozpojovací konektor a následná údržba nebo záměna za jiný prvek je poměrně jednoduchá. Tento způsob řešení je velmi často volen u průmyslových robotů nebo menších, jednoduchých robotických ramen.

Vedení vnitřkem robotického ramene

Druhou možnou variantou je vedení kabelového svazku tělem robotického ramene. Tedy takovým způsobem, že je kabelový svazek schovaný a není vidět. Tato varianta je esteticky hezká, avšak přináší úskalí v rotačních vazbách, kdy je potřeba nějakým způsobem tuto rotační vazbu překonat. To se dá vyřešit například pomocí elektrických sběracích kroužků. Použitím těchto kroužků by však vzrostly rozměry robotického ramene, nehledě na to, že kroužky nejsou použitelné pod vodní hladinou, tudíž by muselo dojít k utěsnění celého ramene. Dalším možným řešením je kabely nerozpojovat a vést je, v ideálním případě, osou rotace. To však, obzvláště při použití servomotorů, může být nereálné, jelikož v ose rotace je umístěn právě servomotor. V tomto případě je nutné vést kabely na jistém poloměru od středu rotace nebo najít jinou, vhodnější cestu.

Kombinace

Kombinací výše zmíněných variant může dojít k jistému kompromisu. Ve většině částí robotického ramene může vést kabeláž vnitřkem a pouze v případě obtížného překonávání rotační vazby se kabeláž vyvede ven z těla manipulátoru. Zpět do vnitřních částí ramene bude kabeláž přivedena až za rotační vazbou. V tomto vyvedení kabelového svazku z těla robotického ramene je možné realizovat konektor, který usnadní případný servis nebo umožní výměnu dané části za jinou.

5.4.2 Vodotěsnost kabelového vedení

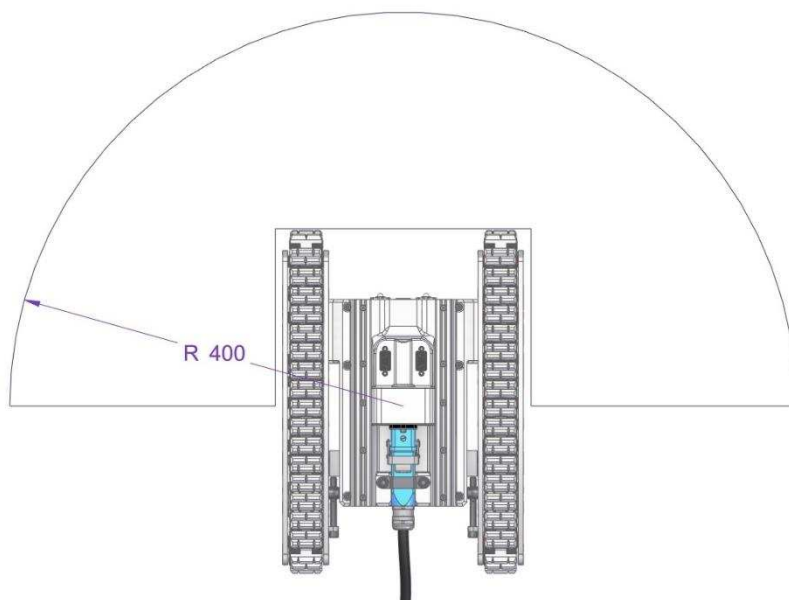
I kabelového vedení se týká schopnost práce pod vodní hladinou. Veškeré kabelové spoje tak musí být důkladně utěsněny. Proto je potřeba vybírat vodotěsné kabelové konektory s IP ochranou alespoň 67 (chráněno dotyku jakoukoli pomůckou, chráněno proti vniknutí prachu a chráněno proti ponoření do vody na 30 minut do hloubky 1,5 metru). Konektory jsou tedy řešitelné, avšak dalším problémem by mohla být délka kabelů dodávaných se servomotory. Ta je totiž poměrně malá, tudíž bude muset dojít k prodloužení. Kabelový spoj vzniklý právě tímto napojením musí být také vodotěsný. K docílení vodotěsnosti bude použito pájecích spojek se smršťovací bužirkou, které zaručí vodotěsný spoj.



Obrázek 25 - Pájecí spojka se smršťovací bužirkou [36]

5.5 Manipulační rozsah

Požadavkem zadavatele práce je schopnost manipulace s drobnými předměty před čelní stranou robotického manipulátoru Ilja. Po zobrazení manipulátoru v půdorysném pohledu a nakreslení kruhového manipulačního prostoru byl jako poloměr manipulačního prostoru zvolena hodnota 400 mm viz obrázek 26. Tento prostor je omezen 180° úhlem, jelikož se předpokládá použití servomotoru s rozsahem pohybu 180°. Touto linií vytvořený prostor by měl být dostatečný pro volnou manipulaci s drobnými předměty před manipulátorem.



Obrázek 26 - Manipulační dosah

Co se týče vertikálního rozsahu, tak v tomto ohledu zadavatel práce nemá žádné speciální požadavky. Jediným logickým požadavkem je minimalizace průjezdné výšky, proto bude snaha o navržení co nejnižšího ramene.

5.6 Koncový efektor

Z pohledu koncového prvku má zadavatel hned dva požadavky. Jedním z nich je manipulace s drobnými předměty a druhým požadavkem je manipulace s příslušenstvím pro NDT inspekce. Z tohoto důvodu bude navržena jednoduchá příruba pro snadnou montáž a demontáž koncového efektoru a případnou montáž a demontáž držáku příslušenství pro NDT inspekce, který bude pro jednotlivé prvky příslušenství vytištěn na 3D tiskárně.

Pod pojmem koncový efektor si můžeme představit zakončení robotického ramene určené nějaké operaci. Z konstrukčního hlediska můžeme koncové efekty dělit například na manipulační, montážní a technologické.

Manipulační koncový efektor

Manipulační koncový efektor slouží k uchopování předmětů a následné manipulaci s nimi. Tyto efekty mohou být navrženy jako jednoúčelové, přemísťující pouze přesně daný objekt, velice často využívány na výrobních linkách v průmyslu, nebo mohou být navrženy jako univerzální, sloužící k manipulaci s předměty různých tvarů, hmotností a rozměrů. Univerzální manipulační koncové efekty jsou velmi často využívány u robotických ramen s blíže nedefinovanými parametry přemísťovaného objektu. [37]

Montážní koncový efektor

Montážní koncové efekty jsou navrženy pro konkrétní operace, kdy robotické rameno společně s montážním koncovým efektem vkládá danou součást na přesně definované místo. Typickým příkladem takovéto operace je například montáž šroubů. Do koncového efektoru jsou přiváděny šrouby v přesně definované poloze. Koncový efektor vybavený elektrickým nebo pneumatickým šroubovákem šroub uchopí a přišroubuje s daným utahovacím momentem, na požadované místo. [37]

Technologický koncový efektor

Technologickými koncovými efekty se rozumí efekty vykonávající jakoukoli technologickou činnost ve výrobním procesu, od nýtování přes frézování ke svařování. Přesnost takovéto technologické operace je však závislá na konstrukci robotického ramene, které efektor nese. [37]

Z výše napsaného a z požadavků zadavatele práce jasně vyplývá, že v našem případě se bude jednat o návrh manipulačního koncového efektoru. Manipulačních koncových efektorů však existuje celá řada. Výběr toho nejvhodnějšího popisuje následující kapitola.

5.6.1 Manipulační koncové efekty

Základní způsob dělení manipulačních koncových efektorů spočívá v posouzení, zda lze nebo nelze ovládat úchopnou sílu působící na přemísťovaný objekt. Podle tohoto kritéria rozlišujeme efekty aktivní nebo pasivní.

Pasivní efekty

Pasivní efekty nemají schopnost řízení přídržné síly a lze jimi objekt uchopit, avšak k uvolnění je většinou zapotřebí jiné zařízení nebo lidská síla. Mezi typické pasivní manipulační koncové efekty patří například permanentní magnet nebo klasický hák. [37]

Aktivní efekty

Aktivní manipulační koncové efekty mají schopnost ovládnutí síly, kterou je objekt držen. Jsou tedy schopny objekt uchopit a následně uvolnit. Typickými představiteli této skupiny jsou efekty s elektromagnety nebo například mechanické efekty s možností pohybu čelistí. [37]

Jak již bylo naznačeno v předchozích odstavcích, manipulační koncové efekty se také mohou dělit podle toho, zda se jedná o mechanické, magnetické nebo pneumatické. Tyto efekty se následně dělí na aktivní a pasivní.

5.6.1.1 Magnetické efekty

Magnetické pasivní efekty

Magnetické pasivní efekty jsou vybaveny permanentním magnetem a používají se pro manipulaci s menšími a lehčími magnetickými předměty. Nosnost takového efektoru je dána vlastnostmi, množstvím a rozmístěním použitých magnetů. Nespornou výhodou pasivního magnetického efektoru je jeho konstrukční jednoduchost. Na druhou stranu, hlavní nevýhodou je zachytávání jiných magnetických částí, které mohou ovlivnit schopnost bezpečného přemístování objektu. Kromě této nevýhody je tu ještě jedno omezení, a to v procesu uvolňování objektu. Pro uvolnění je totiž potřeba další zařízení nebo lidská obsluha, jelikož zde není možnost přerušování působení magnetické síly.

Magnetické aktivní efekty

S tímto problémem si poměrně snadno poradí aktivní magnetický efektor. Ten je totiž osazen elektromagnetem, který je většinou napájen stejnosměrným elektrickým proudem, jímž lze regulovat velikost přídržné magnetické síly. V případě potřeby uvolnění objektu od magnetu se přerušuje dodávka elektrického proudu, čímž přestane působit magnetická síla vyvolaná elektromagnetem. Avšak při držení magnetického objektu může dojít ke zmagnetování přemístované součásti, načež nemusí dojít k odpojení. Pro odmagnetování součásti postačí do cívek přivést proud v opačném směru, čímž dojde k uvolnění objektu od elektromagnetu. [37]

Pneumatické pasivní efekty

Pro uchopení předmětu se mohou používat pneumatické efekty. Ty pracují na principu podtlaku. Pneumatické efekty se také dělí na aktivní a pasivní. V případě pasivních efektů se podtlak vytváří stlačením přísavky, čímž se vytlačí vzduch v přísavce a zmenší se objem vnitřního prostoru. Síla, kterou je objekt přídržován, je závislá na velikosti stykové plochy mezi přísavkou a objektem, tvaru a materiálu přísavky. Aby byl tento způsob uchopení objektu spolehlivý, potřebujeme zajistit vysokou těsnost styku a plocha objektu by měla být rovná a hladká. Klasickým příkladem aplikace pasivních přísavek je použití při přemístování plechových nebo skleněných desek. Při použití pasivních přísavek nastává, stejně jako v případě pasivních magnetických efektů, problém při uvolňování přemístovaného objektu. Pro uvolnění objektu je potřeba buďto vyvinout větší axiální sílu, než je schopna vyvinout přísavka, nebo uvolnění objektu řešit tangenciálním posuvem například k hraně přemístovaného objektu.

Pneumatické aktivní efekty

Nevýhoda pasivních přísavek je opět odstraněna při použití aktivních podtlakových efektů. Aktivní podtlakový efektor je připojen pomocí hadice k ejektoru nebo vývěvě. Pomocí jedno z těchto prvků je odsáván vzduch z prostoru přísavky, čímž se, po přiložení přísavky k objektu, v přísavce vytváří podtlak. Jelikož odsáváním vzduchu dochází ke změně objemu a následné deformaci přísavky, je zde docíleno stejného efektu, jako u pasivních podtlakových efektů. Avšak na rozdíl od pasivních efektů je v případě aktivních mnohem

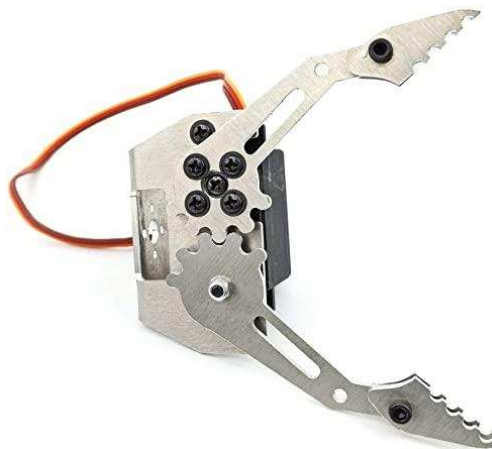
snazší uvolňování přemísťovaného objektu. Toho se docílí pouhým přerušením odsávání a vpuštěním atmosférického vzduchu do prostor přísavky přes přívodní hadici. Nevýhodou tohoto typu přísavky je nutnost vedení pneumatické hadice ke koncovému efektoru. [37]

Mechanické pasivní efektor

V dnešní době nepoužívanější jsou mechanické efektor. Konkrétně však aktivní mechanické efektor, které se skládají z akčního prvku (nejčastěji pneumatický nebo elektrický) a čelistí, jež jsou přizpůsobeny konkrétní aplikaci. Aktivní mechanické efektor téměř úplně vytlačily mechanické pasivní, které byly využívány dříve. Mezi pasivní mechanické efektor patří různé háky, podpěry, čepy a lůžka. K uchopení objektu dochází určeným pohybem, jako je zaháknutí, nasunutí atd.. K uvolnění objektu se využívá například zpětného pohybu robotického ramene.

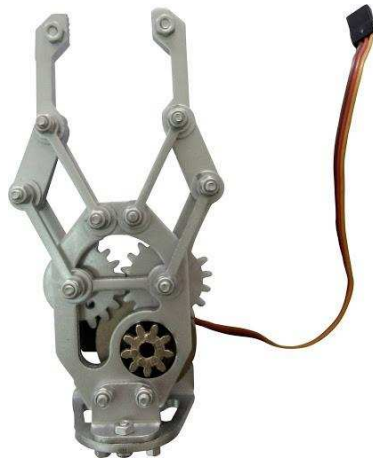
Mechanické aktivní efektor

Aktivní mechanické efektor využívají akčních prvků jako jsou pneumatické válce nebo například servomotory, na které jsou napojeny čelisti. U aktivních mechanických efektorů lze tedy řídit velikost síly, kterou je objekt svírán. Stejně jako u předchozích efektorů i aktivní mechanické efektor mohou být různého provedení. Tyto efektor se snaží nahradit uchopovací možnosti lidské ruky. Lidská ruka je schopna vykonat přibližně 70 % všech uchopovacích činností pouze dvěma prsty. To je přesně důvod, proč na trhu s mechanickými efektor je většina právě dvoučelistových. Podle druhu kinematiky se následně dvoučelistové efektor dělí na rotační a paralelní. Rotační efektor jsou charakteristické pohybem koncových čelistí po křivce s úhlem rozevření až 90°. Výhodou tohoto řešení je jeho jednoduchá kinematika. Aktivní mechanický koncový efektor s rotační kinematikou je na obrázku 27.



Obrázek 27 - Aktivní mechanický koncový efektor s rotační kinematikou [38]

Paralelní efektor jsou charakteristické, jak už název napovídá, paralelním nebo spíše rovnoběžným pohybem čelistí vůči sobě. Tento pohyb může být realizován pomocí lineárního vedení nebo rotačními vazbami s využitím paralelogramu. Lineární vedení paralelního efektoru může být, oproti rotačním vazbám s využitím paralelogramu, rozměrově náročnější. Paralelní efektor se nejvíce hodí na přemísťování objektů s rovnoběžnými stěnami, ale poradí si i s objekty jiných tvarů v závislosti na konstrukci čelistí. Aktivní mechanický efektor s paralelní kinematikou s využitím paralelogramu je na obrázku 28. [37] [39]



Obrázek 28 - Aktivní mechanický koncový efektor s paralelní kinematikou [40]

Požadavkem zadavatele práce je schopnost manipulovat s drobnými předměty o hmotnosti cca 200 g, nspecifikovaného materiálu a tvaru. Předpokladem je, že se nebude jednat pouze o magnetické materiály, tudíž z našeho výběru vypadává jakýkoli efektor pracující s magnety. V případě použití pneumatického efektoru by muselo být rameno vybaveno vývěvou napájenou z manipulátoru nebo by musela být vedena pneumatická hadička z místa obsluhy manipulátoru Ilja. To by znamenalo cca 100 m hadičku připevněnou k napájecímu a datovému kabelu. Z hlediska účinnosti tohoto řešení je realizace takového efektoru velice nevýhodná, jelikož na takové vzdálenosti by docházelo k velké tlakové ztrátě. Jako nejvýhodnější koncový efektor se jeví mechanický. Jelikož je požadavkem manipulovat s objekty nspecifikovaného tvaru a rozměrů, bude se jednat o aktivní efektor. Z pohledu univerzálnosti bude efektor navržený jako dvoučelist'ový a v závislosti na celkových rozměrech a volbě aktuátorů, viz kapitola 5.3 bude koncový efektor navržený jako paralelní s využitím paralelogramu viz obrázek 28.

6 Konstrukční návrh ramene

V této kapitole bude kompletně popsán konstrukční návrh robotického ramene. Při návrhu ramene byly využity dva CAD programy. Pro konstrukční návrh byl využit Solid Edge a pro MKP výpočty byl využit program NX, kdy byly modely převáděny ze Solid Edge do NX formou modelů ve formátu step.

Jelikož bude rameno vyrobeno pomocí 3D tisku, je možné navrhovat komplikovanější tvary součástí, které by subtraktivní metodou výroby byly buď velice obtížně vyrobitelné nebo dokonce nevyrobitelné.

6.1 Obecné předpoklady k MKP analýzám

Materiál VisiJet M3 Crystal

V tomto okamžiku je nutné si uvědomit, že 3D tisk, ať už je sebelepší kvality, je stále metoda výroby součástí, při které dochází k vrstvení stavebního materiálu. Vytisknutá součást je tedy anizotropní, což v praxi znamená, že má různé mechanické vlastnosti v různých směrech. S tímto předpokladem by správně mělo být počítáno při MKP výpočtech. MKP výpočty v této práci jsou však do jisté míry zjednodušené a jak bude patrné z následujících výsledků, rameno bude, z důvodů nejistých mechanických vlastností 3D tisku, předimenzované. MKP analýzy zde budou sloužit spíše pro kontrolu únosnosti servomotorů a případné odhalení slabých míst jednotlivých částí robotického ramene. Zjednodušení v případě 3D tisku spočívá v uvažování izotropního materiálu s mechanickými vlastnostmi viz volně vložená příloha č. 4. Jediná informace, která není v datasheetu a je potřebná pro výpočty, je poissonova konstanta. Přesnou informaci o poissonově konstantě, materiálu VisiJet M3 Crystal, výrobce neuvádí. Při výpočtech tak bude počítáno s hodnotou $\mu = 0,203$. Tato hodnota byla zjištěna měřením vzorků vytištěných z PLA materiálu, který má jinak velice podobné mechanické vlastnosti. Mez pevnosti v tahu materiálu VisiJet M3 Crystal, ke které budou vyhodnocovány veškeré výpočty, je 42,4 MPa. [16] [41]

Ostatní materiály

Veškeré komponenty robotického ramene, se kterými je počítáno v MKP, mají přiřazené vlastnosti reálného materiálu (až na zjednodušení v případě 3D tisku). V případě servomotorů, jejichž obaly jsou hliníkové, avšak není známa přesná slitina, je v MKP uvažován materiál EN AW 6061. Hustota slitiny pro jednotlivé servomotory je upravena tak, aby celková hmotnost motoru v CAD softwaru odpovídala skutečné hmotnosti.

Kontakt

Při MKP analýzách je velice často užíváno vazby Surface-to-Surface Contact. U této vazby se zadává koeficient tření, přičemž v této práci se setkáme se třením mezi těmito materiály: ocel-plast / plast-plast / hliník-plast. Koeficient tření mezi těmito materiály se pohybuje v rozmezí 0,2 – 0,4. Pro sjednocení je, při kontaktu těchto materiálů, uvažován koeficient 0,3.

Šroubové spoje

V práci se také velmi často setkáme se šroubovými spoji. V MKP analýzách jsou všechny 3D šroubové spoje nahrazeny 1D šroubovými spoji, které jsou realizovány pomocí funkce 1D Bolt Connection. Toto nahrazení spočívá ve vytvoření 1D růžic RBE3 namísto hlavy šroubu/matice nebo samotného závitu, v případě šroubování do dané součásti, a tyto hvězdice následně spojí 1D prvkem s vlastnostmi jako reálný šroub. Na takto vytvořený šroubový spoj se následně aplikuje předepnutí. Předepnutí je závislé od velikosti použitého šroubu a v této

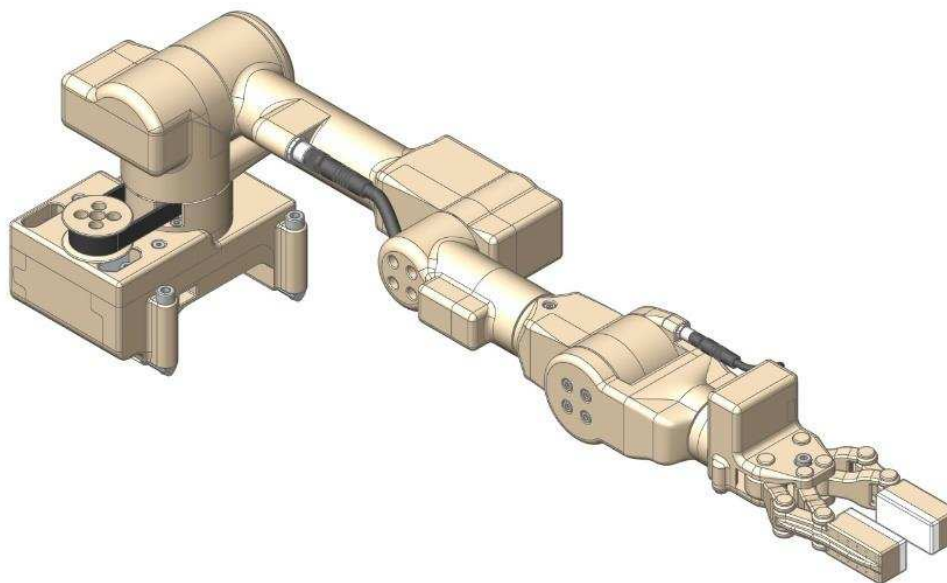
práci se setkáme se šrouby: M2, M3, M4 a M5. Jelikož budou spojovány plastové součásti tištěné na 3D tiskárně, budou tomu také uzpůsobeny hodnoty předepnutí. V tabulce 1 jsou uvedeny hodnoty předepnutí jednotlivých šroubových spojů.

Šroub	Předepnutí [N]
M2	110
M3	230
M4	500
M5	600

Tabulka 1 - Hodnoty předepnutí šroubových spojů

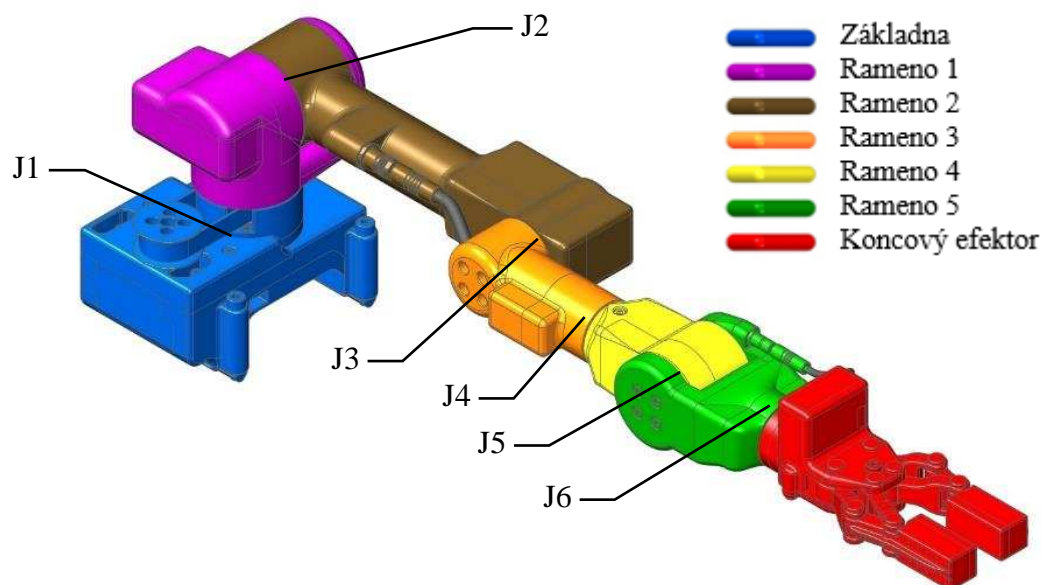
6.2 Konečná podoba robotického ramene

Jak bylo psáno v předešlých kapitolách, jedná se o robotické rameno se sériovou kinematickou strukturou, angulárním manipulačním prostorem, šesti stupni volnosti realizovanými pomocí servomotorů, kombinovaným vedením kabelového svazku, manipulačním dosahem cca 400 mm a mechanickým manipulačním dvoučelistovým koncovým efektem. Konečná podoba robotického ramene je na obrázku 29.



Obrázek 29 - Konečná podoba robotického ramene

Konečné podoby robotického ramene bylo dosaženo postupnými kroky. Prvním z nich bylo určení, z kolika a z jakých částí se bude rameno skládat. Na obrázku 30 je rameno rozděleno do sedmi částí, každá část jinou barvou. Modrou barvou je znázorněna základna, která obstarává spojení mezi víkem robotického manipulátoru a ramenem, a je v ní umístěný servomotor, který se stará o první stupeň rotace. S prvním otočným ramenem (fialová barva) je základna spojena pomocí křížového ložiska a moment ze servomotoru je přenášeny pomocí ozubeného řemene. Ve všech následujících částech ramene je vždy po jednom servomotoru a s následující částí je spojena buď pomocí pouze servo páky nebo servo páky doplněné o kluzné pouzdro nebo, jako v případě oranžového a žlutého ramene, pomocí hliníkové hřídele. Na obrázku 30 jsou mimo jiné vyznačeny jednotlivé otočné klouby (J1 – J6), které se starají o všech šest stupňů volnosti. Všechny klouby by měly mít 180° rozsah rotace. Jednotlivé konstrukční prvky budou popsány v následujících kapitolách.



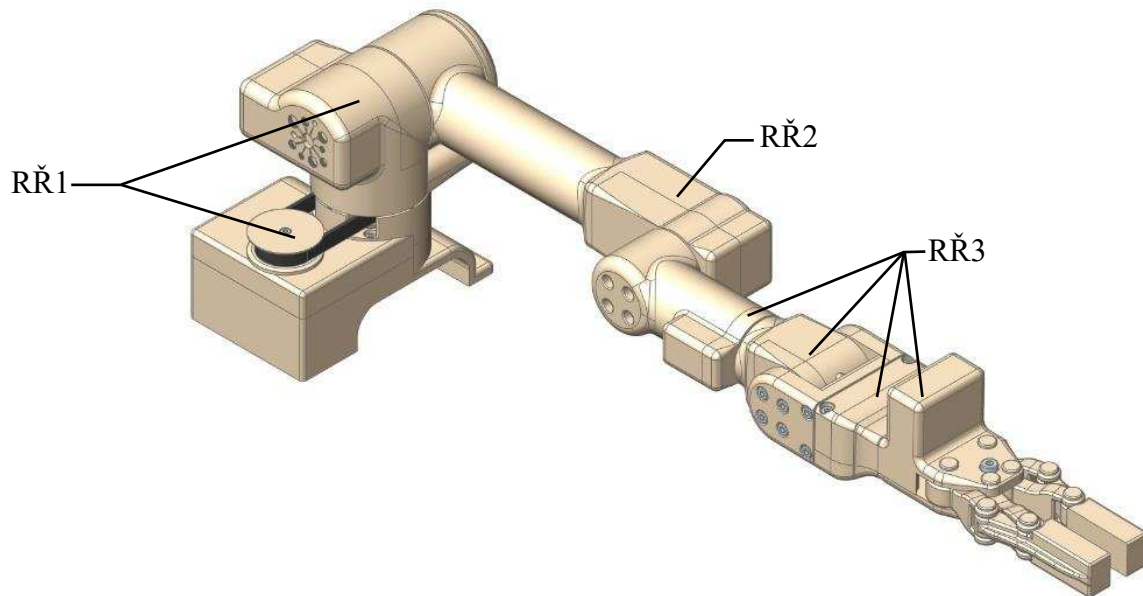
Obrázek 30 - Robotické rameno - rozdělení

6.3 Volba servomotorů

Při prvotním návrhu robotického ramene (obrázek 31), bylo počítáno se třemi rozměrovými řadami servomotorů, viz tabulka 2. Každá rozměrová řada obsahuje servomotory s různými krouticími momenty. Jde tedy pouze o to, zda navržená rozměrová řada v jednotlivých kloubech obsahuje servomotor, který by krouticím momentem vyhovoval momentu, který vznikne působením hmotnosti břemene navýšenému o vlastní hmotnost ramene. Na obrázku 31 je znázorněno, kde byla zvolená jaká rozměrová řada.

Rozměrová řada 1 (RŘ1)	Rozměrová řada 2 (RŘ2)	Rozměrová řada 3 (RŘ3)

Tabulka 2 - Rozměrové řady servomotorů [42] [43] [44]



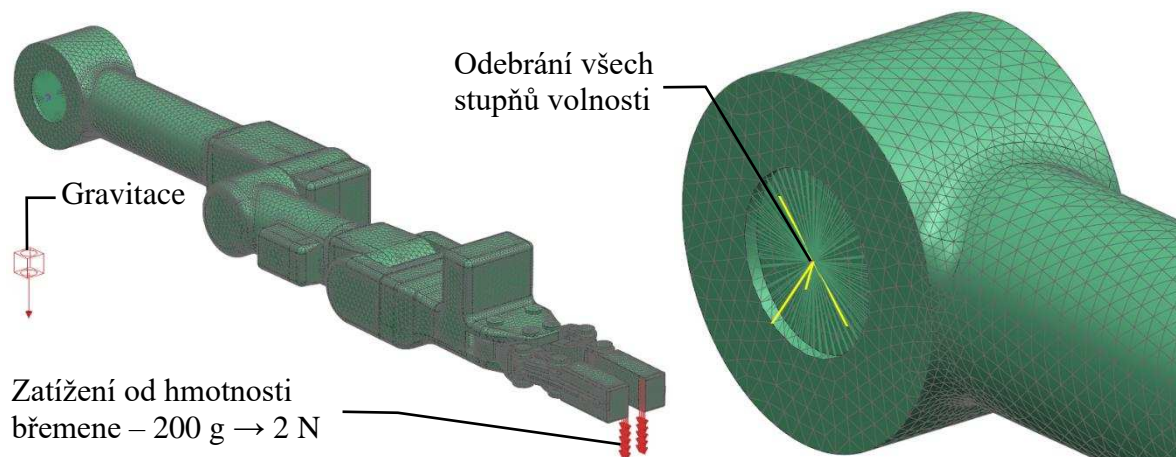
Obrázek 31 - První návrh + rozměrové řady servomotorů

6.3.1 Výpočet působících momentů v kloubech

V této kapitole budou, pomocí MKP analýz v softwaru Siemens NX, zjištěny momenty působící v jednotlivých kloubech. Tento výpočet se však bude týkat pouze kloubů J2, J3 a J5 viz obrázek 30. V kloubu J1 totiž nedimenzujeme servomotor z pohledu momentu vyvolaného vlastní hmotností ramene a hmotností břemene, jelikož tuto reakci pohlcuje ložisko, přes které je první rameno spojeno se základnou. V kloubech J4 a J6 sice vzniknou ohybové momenty, avšak tyto momenty pohlcují ložiska v servomotorech a pro určení krouticích momentů servomotorů nejsou tyto ohybové momenty směrodatné. Z podstaty věci totiž u těchto servomotorů budou momenty závislé na způsobu uchopení přemísťovaného objektu. Klíčovým parametrem pro velikosti momentů působících na tyto servomotory bude poloha těžiště přemísťovaného objektu. Proto, pro zabezpečení plynulé manipulace, bude potřeba operátorem zajistit uchopení objektu pokud možno co nejdříve k těžišti.

6.3.1.1 MKP analýza

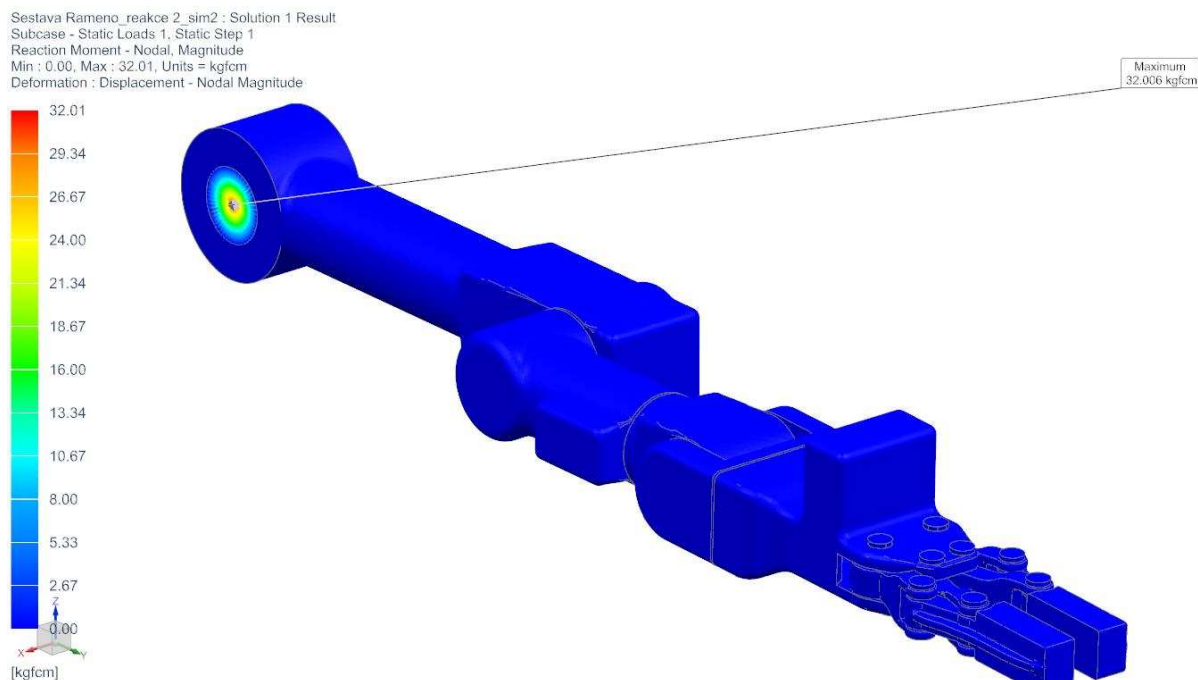
V tomto případě je celé rameno zasítované 3D tetraedrovou sítí a spojení mezi jednotlivými prvky je realizované pomocí funkce Mesh Mating. Tato funkce zajistí pevné spojení v uzlových bodech jednotlivých součástí. Rameno je zatíženo gravitační silou, tedy vlastní hmotností ramene a silou 2 N mezi čelistmi koncového efektoru, což odpovídá přemísťovanému břemenu o hmotnosti 200 g. Všech šest stupňů volnosti je odebráno ve středovém bodě RBE2 elementu, který reprezentuje kruhovou servo páku v místě, kde je rameno 1 spojené s ramenem 2 viz obrázek 32 respektive 30. RBE2 element je vytvořen funkcí 1D Connection.



Obrázek 32 - Výpočet momentů - síť + okrajové podmínky

Pro výpočet krouticích momentů servomotorů je tento příklad vzorový. V případě zbylých dvou servomotorů se postupovalo stejně, akorát se RBE2 element aplikoval v místech napojení ramen 2-3 a 4-5 a ve středech těchto ruzic byly odebrány všechny stupně volnosti.

Na obrázku 33 je vidět výsledek výpočtu simulace. Krouticí moment působící v kloubu J2 od zatížení břemene a vlastní hmotnosti ramene vyšel 32,01 kgfcm. Jednotka kgfcm (kilogram force centimeter) je volena s ohledem na udávaný krouticí moment servomotorů, který je uváděn právě v této jednotce.



Obrázek 33 - Výpočet momentů - výsledek výpočtu - J2

Tento výsledek výpočtu je opět vzorový a zbylé výsledky výpočtů jsou uvedeny v tabulce 3.

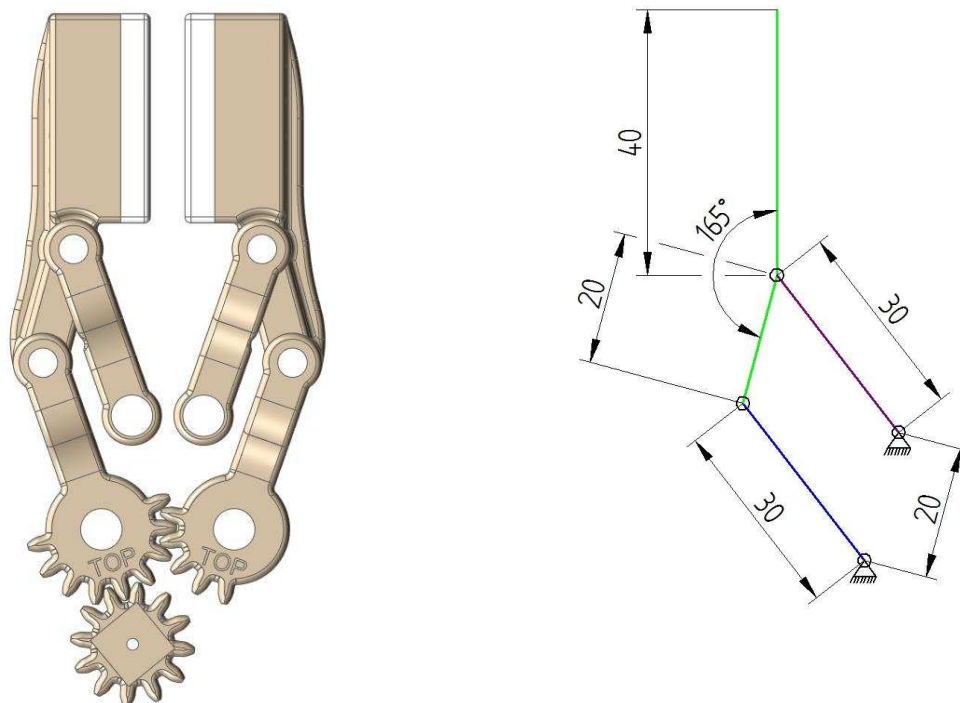
Kloub	J2	J3	J5
Krouticí moment [kgfcm]	32,01	15,54	8,26

Tabulka 3 - Výpočet momentů - výsledky výpočtů - první návrh

6.3.2 Výpočet krouticího momentu servomotoru koncového efektoru

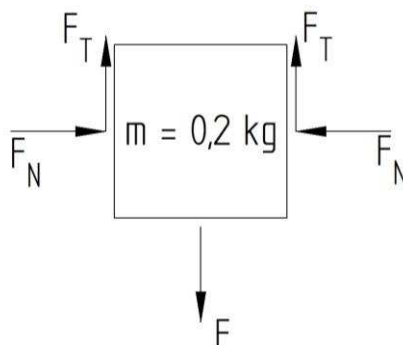
V této kapitole bude proveden výpočet minimálního krouticího momentu servomotoru koncového efektoru. Při výpočtu bude vycházeno z hmotnosti břemene, které by měl koncový efektor udržet a rozměrů čelistí a paralelogramu koncového efektoru. Hmotnost přemísťovaného břemene by měla být 200 g. Pro výpočet je potřeba vědět součinitel tření mezi čelistmi koncového efektoru a přemísťovaným předmětem. Hodnota toho součinitele je však neznámá, jelikož materiál přemísťovaného břemene se může lišit. Čelisti koncového efektoru budou mít jistou povrchovou úpravu snižující součinitel tření, avšak ani to není směrodatné pro určení přesného součinitele. Proto při tomto výpočtu bude uvažována hodnota součinitele tření 0,1, což je opravdu extrémní případ, který odpovídá například součiniteli tření dvou namazaných ocelových součástí.

Pro výpočet je také potřeba znát přesné rozměry ramen koncového efektoru. Na obrázku 34 je vlevo 3D model koncového efektoru a vpravo kinematické schéma poloviny koncového efektoru se základními rozměry. Jednotlivá ramena jsou znázorněna odlišnými barvami a mezi nimi je realizována rotační vazba.



Obrázek 34 – 3D model (vlevo) a kinematické schéma (vpravo) koncového efektoru

Nyní je třeba vypočítat, jak velkou silou musí koncový efektor břemeno svírat, aby ho bezpečně udržel. K tomuto výpočtu poslouží schéma na obrázku 35.



Obrázek 35 - Schéma uchopení břemene

Pro sílu F platí vztah:

$$F = m * g = 0,2 * 9,81 = 1,96 \text{ N}$$

Z obrázku 35 je z rovnováhy sil ve svislém směru patrné, že:

$$F = 2 * F_T \rightarrow F_T = \frac{F}{2} = \frac{1,96}{2} = 0,98 \text{ N}$$

Mezi tečnou a normálovou silou platí, při využití součinitele tření, vztah:

$$F_N = \frac{F_T}{f} = \frac{0,98}{0,1} = 9,8 \text{ N}$$

Kde:	F_T	- tečná síla [N]
	F_N	- normálová síla [N]
	F	- síla [N]
	m	- hmotnost [kg]
	g	- gravitační zrychlení [ms^{-2}]
	f	- součinitel tření [-]

Síla 9,8 N je minimální síla, kterou musí koncový efektor působit jednou z čelistí koncového efektoru. Pro zjištění minimálního krouticího momentu bude využita metoda grafického řešení na kinematickém schématu z obrázku 34. Na obrázku 36 je již kinematické schéma doplněno o nositelky sil působící v jednotlivých uzlech. Při grafické metodě se budou vyšetřovat silové účinky na zeleném rameni, které jsou v jednotlivých uzlech stejně velké a opačně orientované, jako silové účinky na ostatních ramenech. Jelikož se jedná o statické vyšetřování sil, měly by být veškeré silové účinky působící na jedno rameno v rovnováze, proto by se nositelky těchto sil měly střetnout v jednom bodě.

Červenou barvou je znázorněn moment, který je třeba vyšetřit. Černou barvou jsou uvedeny hodnoty, které jsou známy, přičemž je respektováno měřítko: 1 mm = 1 N. Úhel 152° je volen proto, že v tomto natočení ramen vůči sobě by mělo dojít k dosednutí obou čelistí na sebe, přičemž k vyvození síly 9,8 N je v této poloze potřeba nejvyšší možný moment.

Tyrkysovou barvou je zobrazena nositelka síly, která působí na přemísťované břemeno. Tato síla působí kolmo na čelist koncového efektoru, proto i nositelka této síly je kolmá k přímce představující jednu z čelistí.

Fialové rameno je tzv. nezátížený binární člen, což v praxi znamená, že přenáší pouze reakce, a to ve vazbách na své okolí. Pro tyto reakce platí, že musí být v rovnováze. Jelikož jsou pouze dvě, musí ležet na jedné nositelce a musí být stejně velké opačně orientované. Nositelka těchto sil tedy musí procházet oběma body, jak uložení v rámu, tak vazbou se zeleným ramenem. Tohoto poznatku lze s výhodou využít a nositelku tak vést těmito dvěma body a najít průsečík této nositelky s tyrkysovou nositelkou.

Jelikož silové účinky působící na jedno rameno mají být v rovnováze, a nositelka síly z posledního uzlu (modré a zelené rameno) je neznámá a v případě modrého ramene se nejedná o nezátížený binární člen, využije se skutečnosti, že všechny nositelky se mají střetnout v jednom bodě. Poslední nositelka zátěžné síly se vytvoří spojením průsečíku tyrkysové a růžové nositelky s bodem spojení modrého a zeleného ramene.

Jelikož již jsou známy nositelky všech sil, lze přejít k prostřednímu schématu na obrázku 36. Nejprve se vytvoří rovnoběžka s tyrkysovou nositelkou a jelikož normálová síla, kterou je potřeba působit jednou z čelistí na přemísťované břemeno, je jedinou silou, která je

známá, vynese se na tuto rovnoběžku její velikost v měřítku: 1 mm = 1 N. Nyní stačí vytvořit rovnoběžky se zbylými nositelkami z prvního schématu. Jedna z nositelek je vedena jedním bodem vyměřené síly na tyrkysové nositelce a druhá nositelka druhým bodem. Po vynesení těchto nositelek vznikne jejich průsečík. Vzdálenost tohoto průsečíku s průsečíkem s tyrkysovou nositelkou udává velikost síly působící v daném uzlu.

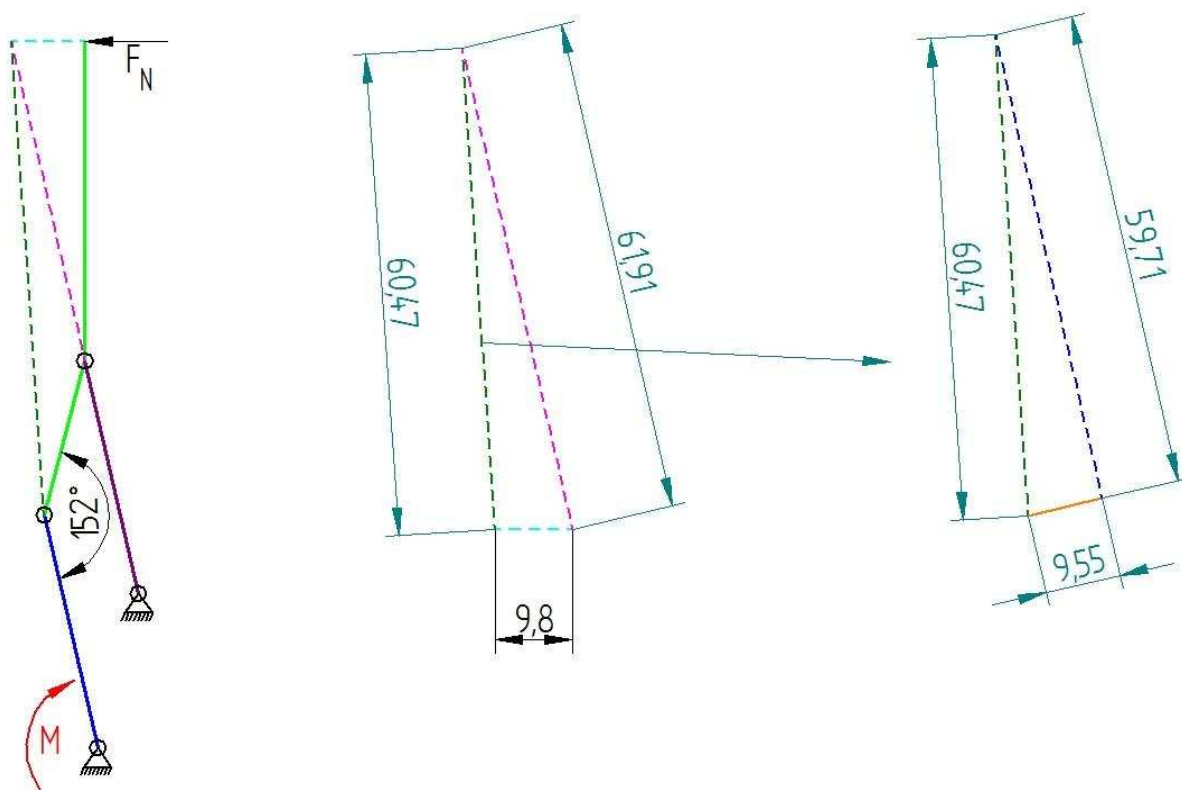
Jelikož je zapotřebí zjistit moment M , který působí na modré rameno, je potřeba rozložit sílu zjištěnou z tmavě zelené nositelky. Toto rozložení je realizováno do rovnoběžného (modrá přerušovaná čára) a kolmého (oranžová čára) směru k modrému rameni. Právě kolmý silový účinek je síla, která se hledá. Tato síla totiž působí proti krouticímu momentu servomotoru na rameni 30 mm. Z obrázku 36 je patrné, že velikost oranžové úsečky je 9,55 mm, což odpovídá 9,55 N. Z těchto hodnot se minimální krouticí moment servomotoru vypočítá jako:

$$M = F * r = 9,55 * 0,03 = 0,287 \text{ Nm}$$

Tento krouticí moment je minimální potřebný pro udržení břemene o hmotnosti 200 g v případě, že by byl servomotor přímo připojený k rameni modré barvy nebo prostřednictvím ozubených kol s převodovým poměrem 1. V tomto případě a v tomto směru chodu krouticího momentu je však servomotor spojený prostřednictvím ozubených kol s převodovým poměrem 0,8. Minimální potřebný krouticí moment se pak vypočítá jako:

$$M_s = 0,287 * 0,8 = 0,23 \text{ Nm}$$

- Kde: M - krouticí moment [Nm]
 M_s - krouticí moment servomotoru [Nm]
 r - délka ramene



Obrázek 36 - Grafická metoda zjištění krouticího momentu

6.3.3 Výběr servomotorů

Výběr servomotorů probíhal v závislosti na požadavku vodotěsnosti, vypočítaných momentů z předešlých kapitol a na zástavbových prostorech servomotorů. S ohledem na tyto parametry byly zvoleny servomotory, viz tabulka 4.

Kloub	Servomotor	Rozměrová řada	Krouticí moment [kgfcm]	Krouticí moment [Nm]
J1	JX PDI HV7246MG [42]	1	38,6 – 47,8	3,79 – 4,69
J2				
J3	JX PDI HV7232MG [45]	1	26,2 – 31,5	2,57 – 3,01
J4	Kingmax CLS2035HHV [44]	3	3,8 – 6,2	0,37 – 0,61
J5	JX PDI HV5212MG [43]	2	9,45 – 11,82	0,93 – 1,16
J6	Kingmax CLS2035HHV [44]	3	3,8 – 6,2	0,37 – 0,61
Koncový efektor				

Tabulka 4 - Použité servomotory [42] [43] [44] [45]

Kromě výše uvedených kritérií byly servomotory vybírány také z pohledu dostupnosti. Byly vybrány dostupné motory s vyššími krouticími momenty, než byly vypočítané momenty působící od hmotnosti břemene a vlastní hmotnosti ramene. To má za následek, že například v případě kloubu J3 je servomotor o cca 10 kgfcm silnější, než by bylo potřeba. Je to proto, že je to první servomotor s vyšším krouticím momentem, který byl dostupný. Rozmezí krouticích momentů v tabulce 4 znamená, že tento moment lze řídit velikostí napětí. Všechny tyto servomotory jsou digitální, vodotěsně, s kovovými převody a v hliníkových obalech. Všechny servomotory rozměrové řady 1 jsou vybaveny třemi kuličkovými ložisky a servomotory rozměrové řady 2 a 3 jsou vybaveny dvojicí kuličkových ložisek. Na obrázku 37 jsou znázorněny rozměrové řady použitých servomotorů.



Obrázek 37 - Použité servomotory - RŘ1 (vlevo), RŘ2 (uprostřed), RŘ3 (vpravo)

Jak je patrné z tabulky 4 a obrázků 30 a 31, ne všechny rozměrové řady souhlasí s prvotně navrženými. Je to z toho důvodu, že v prvotně navržené rozměrové řadě se nevyrábí dostatečně silný servomotor pro potřebný krouticí moment. Proto bylo potřeba servomotory zvětšit a následně přemodelovat konstrukční návrh ramene.

Upravené rameno je vidět na obrázku 29. V tomto kroku došlo k vícero úpravám nežli jen ke zvětšení servomotorů v kloubech 3 a 5. Jednu z větších úprav můžeme registrovat v prodloužení ramene 3. Toto prodloužení bylo realizováno proto, že v tomto místě je navržen

servomotor třetí rozměrové řady, který měl držet zbytek ramene pouze na výstupní hřídeli. Na servomotor by tedy působil poměrně velký ohybový moment, přičemž výrobce neuvádí maximální možné zatížení tímto momentem. Proto je v tomto místě navržena hřídel, která bude přenášet krouticí moment ze servomotoru na rameno 4 a bude přes ložisko uložena v těle ramene, čímž bude pohlcovat moment vzniklý vlastní hmotností zbylého ramene a hmotností břemene.

Druhá významná úprava se také týká servomotoru rozměrové řady 3. a to konkrétně v případě uchycení koncového efektoru. První návrh měl servomotor, obstarávající poslední rotační vazbu J6, umístěný v koncovém efektoru. Toto provedení by však znamenalo, že by servomotor byl zatěžován jak vlastní hmotností, tak hmotností přemísťovaného břemene navýšenou o vlastní hmotnost koncového efektoru, která by byla, umístěním servomotoru do koncového efektoru, ještě větší, v důsledku vytvoření uchycení motoru. Proto byl návrh upraven a servomotor z kloubu J6 přesunut do ramene 5.

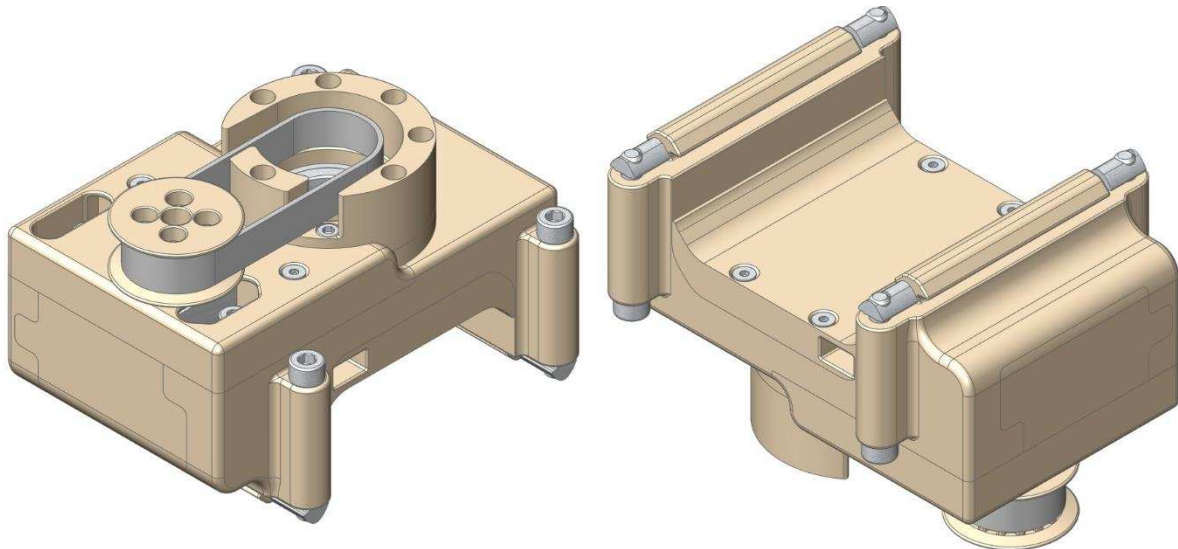
Po přepracování ramene do finální podoby proběhl kontrolní výpočet momentů. Ten proběhl stejným způsobem jako v případě předchozích výpočtů. Na rozdíl od předchozích výpočtů však byly zjištěny momenty ve všech kloubech ramene, které se budou hodit při dalším počítání. Výsledné momenty jsou o něco menší než momenty, které vyšly v předchozích výpočtech. To je pravděpodobně způsobeno tím, že v tomto případě výpočtů byl použit konečný model ramene, u kterého jsou již v rameni vytvořeny kanály pro vedení kabelového svazku. Výsledky výpočtů jsou v tabulce 5. V kloubech J1 a J2 působí stejné momenty, jelikož rameno je zatíženo pouze svislými silami a tyto dva klouby jsou přesně nad sebou.

Kloub	J1	J2	J3	J4	J5	J6
Krouticí moment [kgfcm]	25,54	25,54	12,14	7,65	5,13	2,99
Krouticí moment [Nm]	2,504	2,504	1,191	0,75	0,503	0,293

Tabulka 5 - Výpočet momentů - výsledky výpočtů – finální návrh

6.4 Základna

Základna je jedinou nehybnou částí robotického ramene. Pomocí základny je robotické rameno jako celek spojeno s robotickým manipulátorem Ilja. Toto spojení je realizované pomocí dvojice hliníkových profilů, viz kapitola 4 a protikusů vytvořených na spodní ploše dosedacích ploch základny robotického ramene viz obrázek 38. Pro docílení co největší tuhosti spojení jsou protikusy vytvořeny po celé délce základny vyrobené pomocí 3D tisku a doplněné o 4 ocelové jezdce, které také pasují do hliníkových profilů a pomocí kterých, společně se čtyřmi imbusovými šrouby M5x40, se rameno pevně zajistí, viz detail na obrázku 39.



Obrázek 38 – Základna robotického ramene

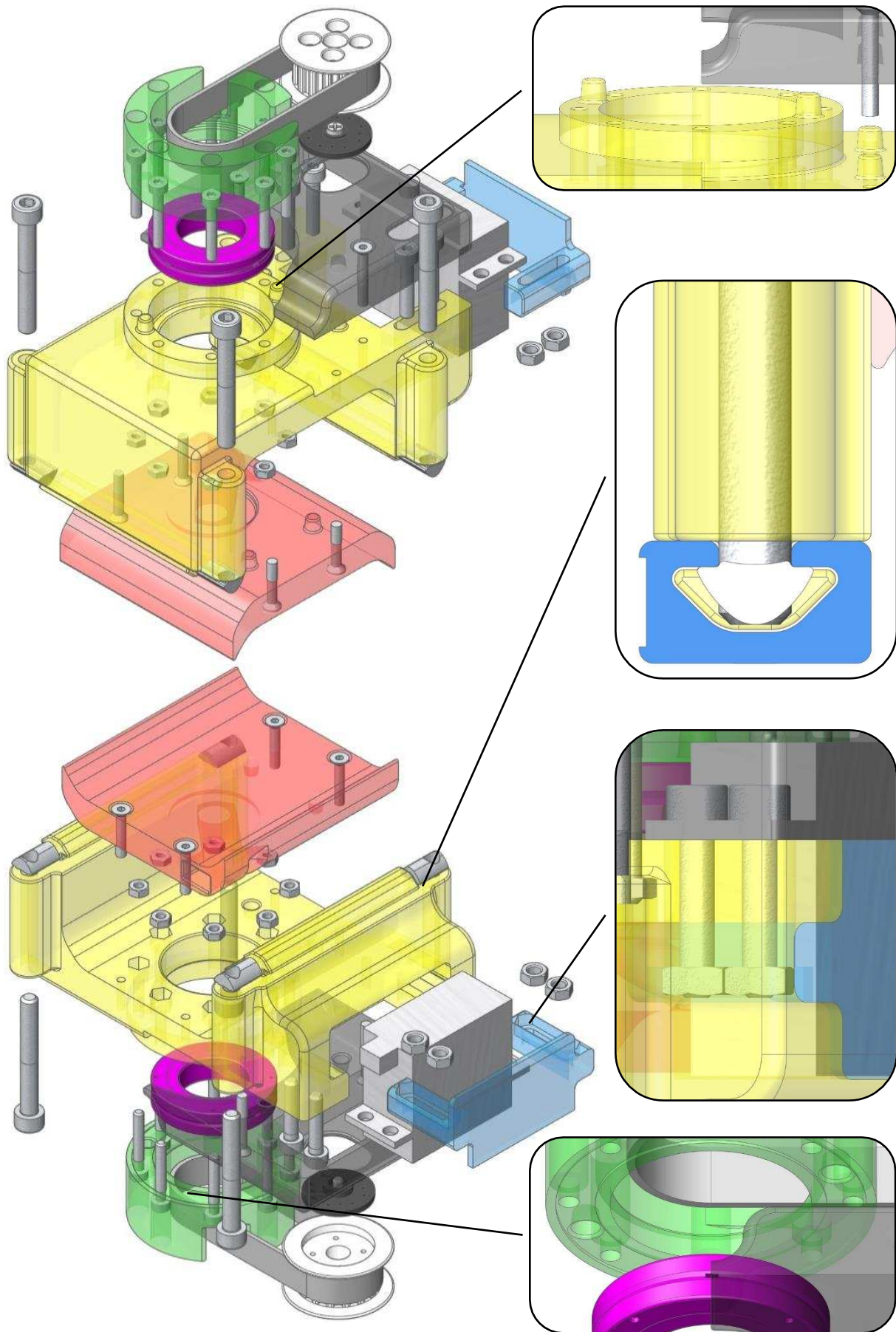
Základna robotického ramene se skládá z 8 hlavních částí, viz obrázek 39. Základna (žlutá barva) je nositelem ostatních částí. Přes křížové ložisko (fialová barva), které je k základně připevněno pomocí příruby (zelená barva) a osmi imbusových šroubů M3x20 s maticemi M3, je přenášeno zatížení z ramene 1 do základny a zároveň je pomocí tohoto ložiska realizována otočná vazba ramene 1. Pro matice M3 jsou ze spodní strany základny vytvořena osazení přesného tvaru, což v případě 3D tisku není žádný problém. Příruba je na základně středěná pomocí středících prvků viz detail na obrázku 39.

Do základny je z boku vsunut servomotor JX PDI HV7246MG (stříbrná barva), který je k základně přichycen pomocí čtyř imbusových šroubů M4x20 a matic M4, které jsou vloženy do víka (modrá barva) viz detail na obrázku 39. Víko je vsunuto přes servomotor a uzavírá tak bok základny. Otvory pro šrouby jak v základně, tak ve víku jsou oválného tvaru, a to z důvodu možnosti nastavování napnutí řemene.

Přes servomotor je nasazený kryt (černá barva), který je k základně přišroubován pomocí dvojice imbusových šroubů M3x20 se zapuštěnou hlavou. V tomto případě, jelikož se jedná o pouhý kryt, který nepřenáší žádné výrazné zatížení, není použita matice, ale je vyříznut závit přímo do těla základny. Kryt je na základně přesně usazen pomocí středících prvků.

Na hřídel vystupující přes kryt ze servomotoru je nasazena servo páka kruhového tvaru. K této servo páce je vruty dodávanými k servomotoru přišroubovaná řemenice (bílá barva). Řemenice přenáší krouticí moment ze servomotoru na řemen a ten ho přenáší na řemenici, která je součástí ramene 1.

Poslední významnou částí základny je vedení kabelového svazku (červená barva). Tento díl má za úkol vést kabelový svazek, který je přiváděn z ramene 1 osou rotace právě tohoto ramene, před základnu. K základně je vedení kabelového svazku připevněno pomocí čtyř imbusových šroubů M3x16 se zapuštěnou hlavou a stejně jako v případě krytu je závit vyříznut přímo do těla základny. I vedení kabelového svazku je k základně přesně polohováno pomocí středících prvků.



Obrázek 39 – Základna robotického ramene – rozstřel + detaily

6.4.1 MKP analýza

Pro výpočet pomocí MKP je nutné znát okrajové podmínky. Pro tento výpočet budou okrajovými podmínkami moment působící od hmotnosti břemene a vlastní hmotnosti ramene (2,5 Nm) a moment, který je schopný vyvinout servomotor umístěný v základně (4,69 Nm). Model základny byl pro účely MKP analýzy zjednodušen z důvodu urychlení výpočetních časů. Zjednodušení spočívalo v odstranění většiny zaoblení a odstranění 3D šroubů, které byly nahrazeny 1D elementy.

Všechny součásti, kromě křížového ložiska, byly zasít'ovány čtyřstěnnými elementy s meziuzlem CTETRA(10). Křížové ložisko bylo zasít'ované taženou sítí s meziuzlem CHEXA(20). Všem komponentám byl přiřazen materiál, ze kterého jsou ve skutečnosti vyrobeny. Modře je na obrázku 40 znázorněn 3D tisk, červeně servomotor, světle zeleně ocel a tmavě zeleně plast. Žlutou barvou jsou znázorněny 1D prvky, do kterých spadají šroubové spoje, vytvořené pomocí funkce Bolt Connection, a 1D růžice RBE2 v křížovém ložisku, do jejíž středu se následně aplikuje zatížení od momentu. Předpoklady ohledně materiálových vlastností, viz kapitola 6.1.

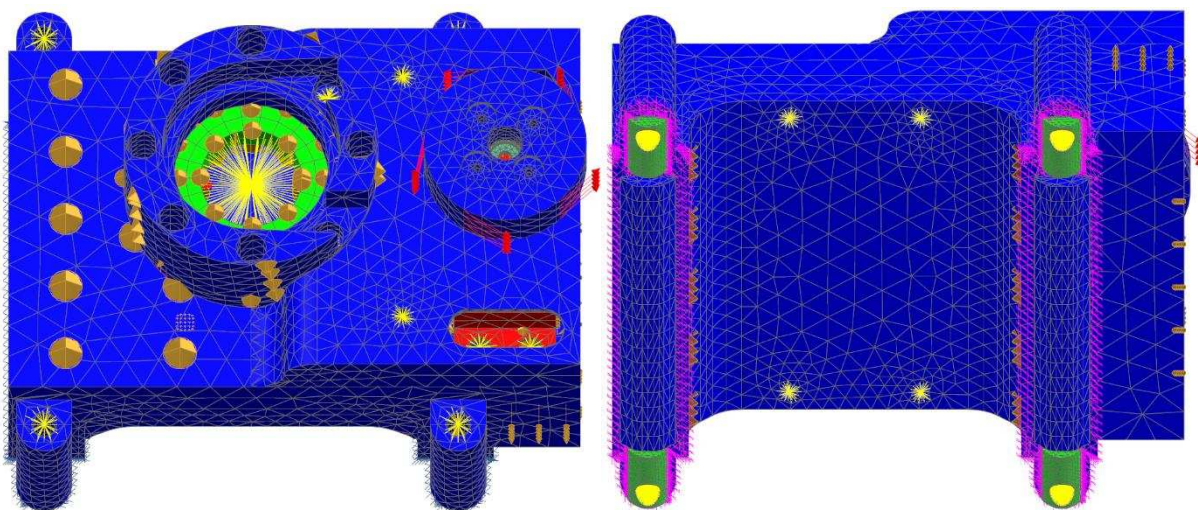
Mezi součástmi, které jsou spojeny pomocí šroubových spojů, je realizována vazba Surface-to-Surface Contact. Pro všechny třecí plochy je uvažován koeficient tření 0,3.

Jak je psáno výše, moment od hmotnosti břemene a vlastní hmotnosti ramene je aplikován do středu 1D růžice vytvořené v křížovém ložisku. Moment od servomotoru je aplikován na zjednodušenou řemenici. Působící moment je vyznačen červenými šipkami. Souhrn všech zatěžujících sil a momentů je v tabulce 6.

Zatížení	Hodnota
Moment od hmotnosti	2,5 Nm
Moment od servomotoru	4,69 Nm
Předepnutí šroubového spoje M3	230 N
Předepnutí šroubového spoje M4	500 N
Předepnutí šroubového spoje M5	600 N

Tabulka 6 - Zatížení základny robotického ramene

Všechny stupně volnosti jsou odebrány na spodních plochách základny a vrchních plochách ocelových jezdců, jež jsou v kontaktu s hliníkovými profily na víku robotického manipulátoru, viz detail na obrázku 39.



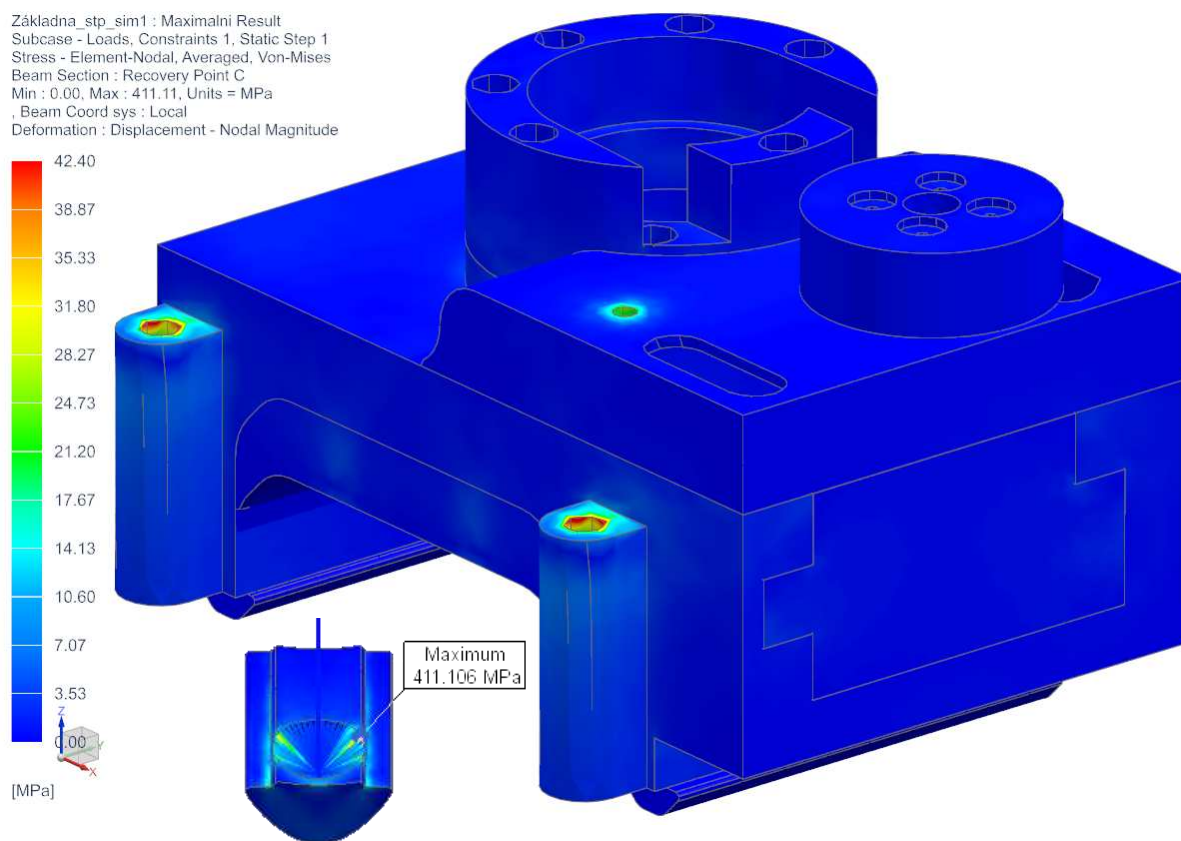
Obrázek 40 - Základna robotického ramene - síť + okrajové podmínky

Co se týče kontroly pevnosti, tak ta proběhne pouze na dílech tištěných na 3D tiskárně. U servomotorů je předpoklad, že vydrží zatížení, které samy produkují, a co se ocelového spojovacího materiálu týče, tak tam je předpoklad, že vydrží větší zatížení než součásti tištěné na 3D tiskárně.

Na obrázku 41 je vidět výsledek MKP analýzy. Maximální hodnota je 411 MPa, avšak v tomto případě se jedná o špičku, která vznikla na hraně díky použití 1D šroubového spoje viz detail na obrázku 41. Jak již bylo psáno, bude se vyhodnocovat pouze pevnost součástí tištěných na 3D tiskárně. Z tohoto důvodu byly skryty všechny ostatní součásti. Maximální hodnoty napětí v součástech tisknutých na 3D tiskárně se pohybují okolo 40 MPa. Tato hodnota je však opět pouze v oblasti napojení 1D růžic, tudíž se jedná o singularitu, které vznikají připojením dokonale tuhých elementů RBE3 a ve skutečnosti budou tyto hodnoty o poznání nižší. Maximální hodnoty napětí mimo šroubové spoje se pohybují do 15 MPa, tudíž se dá hovořit o bezpečnosti cca 2,8 vůči mezi pevnosti v tahu (42,4 MPa) materiálu VisiJet M3 Crystal.

Materiál	Maximální napětí (mimo 1D elementy) [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Bezpečnost
VisiJet M3 Crystal	15	42,4	2,8

Tabulka 7 - Základna robotického ramene - výsledky MKP analýzy



Obrázek 41 – Základna robotického ramene - výsledky MKP analýzy

6.4.2 Kontrola řemene

K přenosu krouticího momentu ze servomotoru v základně na rameno 1 je navržen ozubený řemen SYNCHREFLEX 10T05-0180. Jedná se o polyuretanový ozubený řemen tloušťky 10 mm, profilem T5 a délce 180 mm. V této kapitole si ověříme, zdali řemen vydrží maximální zatížení od servomotoru a také vypočítáme předepínací sílu. Obvodová síla vypočítaná v této kapitole pak bude vstupem při kontrole ložiska jakožto radiální síla. Kontrolní výpočty jsou prováděny dle doporučení výrobce řemenů. Řemenový převod je navržen s převodovým poměr 1. Z důvodu únosnosti řemene bude omezen krouticí moment servomotoru. Toto omezení bude provedeno elektronicky, kdy bude servomotor napájen 6 V, čímž dojde k omezení krouticího momentu na 3,79 Nm. [46]

Parametry potřebné k výpočtu

Krouticí moment servomotoru	$M_S = 3,79 \text{ Nm}$
Rychlost otáčení servomotoru	$\omega_s = 0,12 \text{ sec}/60^\circ(6V)$
Počet zubů řemenice	$z = 16$
Počet zubů řemene	$z_B = 36$
Rozteč	$t = 5 \text{ mm}$

6.4.2.1 Kontrola na pevnost tažného vlákna

$$d_0 = \frac{z * t}{\pi} = \frac{16 * 5}{\pi} = 25,47 \text{ mm} \cong 0,02547 \text{ m}$$

$$F_u = \frac{2 * 10^3 * M}{d_0} = \frac{2 * 3,79}{0,02547} = 297,6 \text{ N}$$

Kde: F_u - obvodová síla [N]

d_0 - průměr roztečné kružnice [mm]

Tabulková hodnota přípustné síly pro řemen 10T05 je 330 N, z čehož vyplývá, že řemen z pohledu pevnosti tažného vlákna vyhovuje

6.4.2.2 Kontrola na únosnost zubů

Pro zjištění koeficientů jako jmenovitý moment a jmenovitý výkon, který jsou potřebný pro kontrolu na únosnost zubů, jsou potřeba znát otáčky. Ty se vypočítají z rychlosti otáčení servomotoru následovně:

Servomotor se při napětí 6 V otočí o 60° za 0,12 sec.

360° (2π rad) zvládne za $6 * 0,12 = 0,72$ sec.

$$\omega = \frac{2\pi}{0,72} = 8,73 \text{ rad/s}$$

$$n = \frac{\omega * 60}{2\pi} = \frac{8,73 * 60}{2\pi} = 83,4 \text{ ot/min}$$

Tabulkové parametry

Jmenovitý moment	$M_{\text{spec}} = 1,91 \text{ Ncm/cm}$
Jmenovitý výkon	$P_{\text{spec}} = 0,147 \text{ W/cm}$
Počet zubů v záběru	$z_e = 12$

Výpočet šířky řemene z rovnice pro výkon

$$P = \omega * M = 8,73 * 3,79 = 33,1 \text{ W}$$

$$b = \frac{P}{z * z_e * P_{spec}} = \frac{33,1}{16 * 12 * 0,147} = 1,17 \text{ mm}$$

Výpočet šířky řemene z rovnice pro moment

$$b = \frac{100 * M}{z * z_e * M_{spec}} = \frac{100 * 3,79}{16 * 12 * 1,91} = 1,03 \text{ mm}$$

- Kde: P - výkon [W]
b - šířka řemene [mm]
 ω - úhlová rychlost [rad/s]
n - otáčky [ot/min]

Z pohledu šířky navržený řemen o šířce 10 mm vyhovuje.

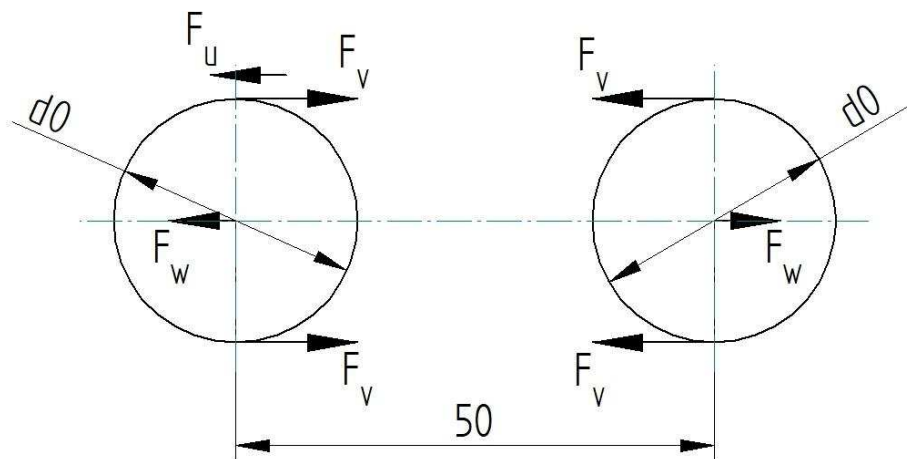
6.4.2.3 Výpočet předepnutí

Na obrázku 42 je schéma řemenového převodu. Pro předepínací sílu F_v , při $z_B = 36$, platí, dle výrobce, vztah:

$$F_v = \frac{1}{3} F_u = \frac{1}{3} * 297,6 = 99,2 \text{ N}$$

Z obrázku 42 je patrné, že pro síly F_w , působící na hřídele, platí vztah:

$$F_w = 2 * F_v = 2 * 99,2 = 198,4 \text{ N}$$



6.4.3 Kontrola ložiska

V první rotační vazbě je navrženo křížové ložisko RB 2008 UU CC0 od firmy THK. Toto ložisko je navrženo z důvodu vysoké přesnosti, zástavbových rozměrů a schopnosti přenášet radiální i axiální zatížení.

Na ložisko působí tři druhy zatížení. V axiálním směru je to síla od vlastní hmotnosti ramene a hmotnosti břemene. Hmotnost navrženého ramene, bez základny, je 1730 g. Společně s hmotností břemene je celková hmotnost 1930 g, což vyvolá axiální sílu o velikosti 18,9 N. Největší síla, která na ložisko může působit, v radiálním směru je obvodová síla F_u vyvolaná v řemenovém převodu. Velikost této síly je 297,6 N. Posledním zatěžujícím účinkem působícím

na ložisko je moment vyvolaný vlastní hmotností ramene a hmotností břemene. Velikost tohoto momentu je 2,5 Nm. Výpočet bude proveden dle doporučení výrobce ložiska. [47] [48]

Parametry pro výpočet

Axiální síla	$F_a = 18,9 \text{ N}$
Radiální síla	$F_r = 297,6 \text{ N}$
Moment	$M = 2,5 \text{ Nm} \cong 2500 \text{ Nmm}$
Rozměry ložiska	20 x 36 x 8 mm
Průměr roztečné kružnice válečků	$d_p = 27 \text{ mm}$
Základní dynamická únosnost	$C = 3230 \text{ N}$

Ložisko bude kontrolováno jako dynamicky zatěžované oscilačním pohybem v rozsahu 180°. V prvním kroku výpočtu je třeba rozhodnout o velikosti dynamických koeficientů. To se provede porovnáním výsledku následujícího vzorce s tabulkou v datasheetu od výrobce, kde jako rozhodující hodnota je 1,5:

$$\frac{F_a}{F_r + 2 * \frac{M}{d_p}} = \frac{18,9}{297,6 + 2 * \frac{2500}{27}} = 0,04 < 1,5 \rightarrow X = 1 \text{ a } Y = 0,45$$

Následuje výpočet ekvivalentního dynamického zatížení F_e :

$$F_e = X * \left(F_r + \frac{2 * M}{d_p} \right) + Y * F_a = 1 * \left(297,6 + \frac{2 * 2500}{27} \right) + 0,45 * 18,9 = 491,3 \text{ N}$$

Jelikož řemenový přenos krouticího momentu je s převodovým poměrem 1, shodují se otáčky servomotoru s otáčkami ramene 1, tedy i s otáčkami ložiska. Jak již bylo psáno výše, ložisko bude kontrolováno na trvanlivost při oscilačním pohybu v rozsahu 180°. Pro výpočet trvanlivosti ložiska při oscilačním pohybu platí vzorec:

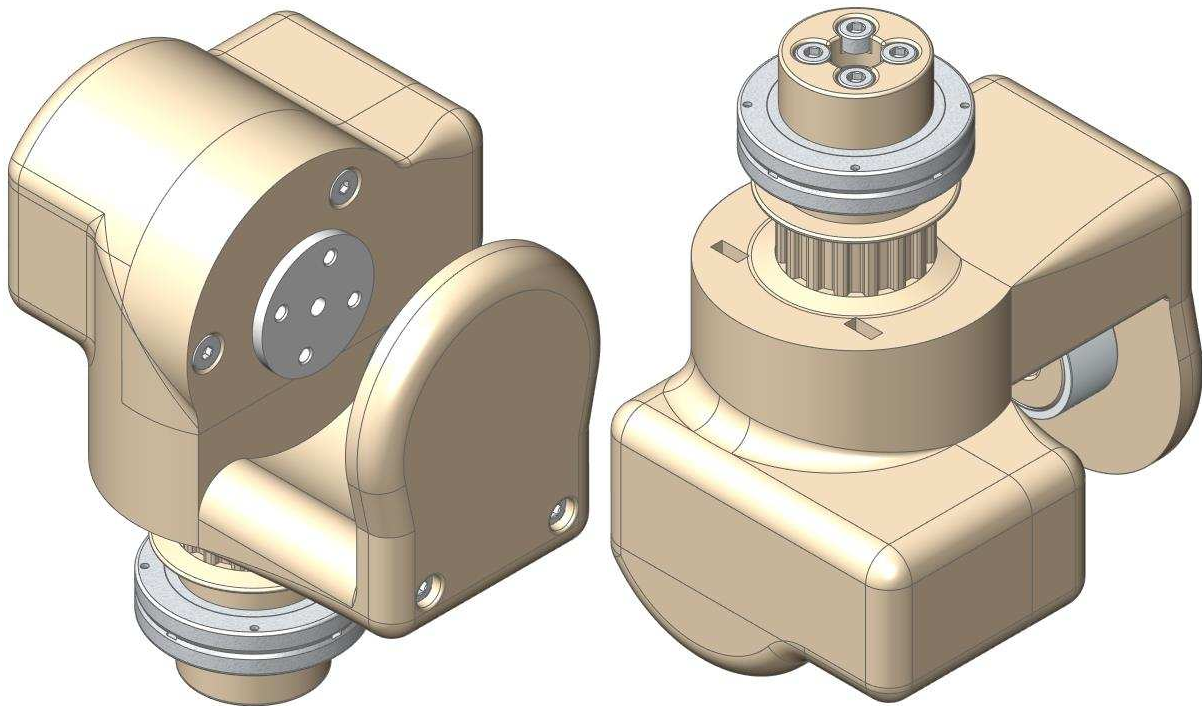
$$L_h = \left(\frac{C}{F_e} \right)^{\frac{10}{3}} * \frac{360 * 10^6}{2 * \varphi * n * 60} = \left(\frac{3230}{491,3} \right)^{\frac{10}{3}} * \frac{360 * 10^6}{2 * 180 * 83,4 * 60} = 106382,1 \text{ hod}$$

- Kde: X - součinitel radiálního zatížení ložiska [-]
Y - součinitel axiálního zatížení ložiska [-]
 L_h - trvanlivost ložiska [hod]
 φ - úhel rotace [°]
n - otáčky [ot/min]

Trvanlivost ložiska přes 100 000 hodin je dostatečná, tudíž lze konstatovat, že ložisko vyhovuje. V jiných případech by bylo možno ložisko zmenšit, jelikož trvanlivost přes 100 000 hodin je zbytečná, ale v tomto případě se ložisko zmenšovat nebude ze dvou důvodů. Prvním z nich jsou zástavbové prostory, kdy ložisko vyhovuje svými rozměry a druhým důvodem je fakt, že menší křížová ložiska se pravděpodobně nevyrobí.

6.5 Rameno 1

Rameno 1 je první pohyblivou částí a jeho rotace je zajištěna pomocí výše popsaného ložiska a ozubeného řemenu. Rameno se otáčí okolo svislé osy a jeho hlavní funkcí je natáčení ramene v rádiu 180° před prostorem robotického manipulátoru Ilja. Toto rameno společně se základnou určují nejnižší možnou průjezdnou výšku, jelikož všechna ostatní ramena je možné nastavit pod úroveň tohoto ramene. Minimální průjezdná výška manipulátoru Ilja osazený robotickým ramenem je 235 mm. Na obrázku 43 je vidět rameno ve složeném stavu.



Obrázek 43 - Rameno 1

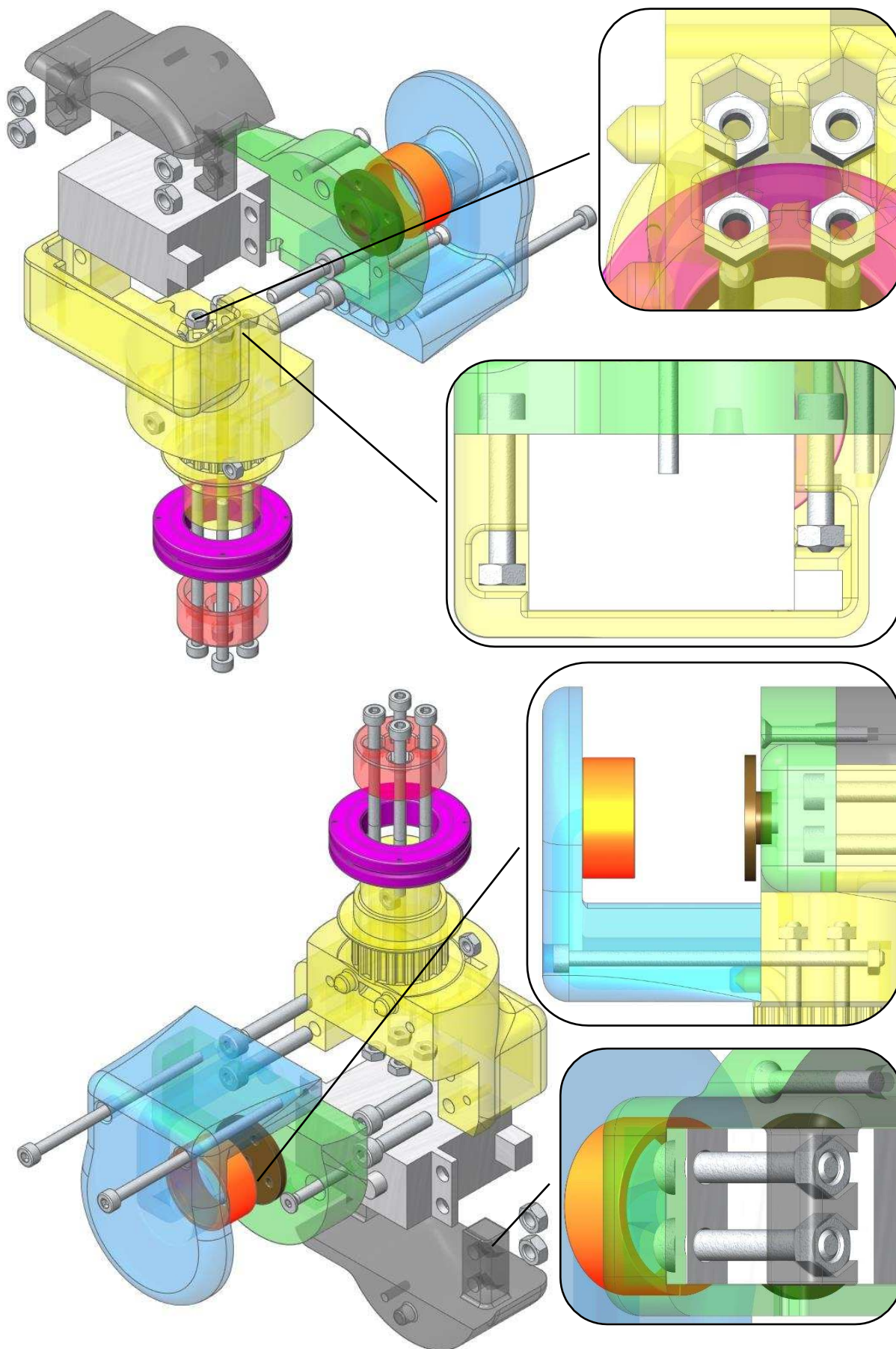
Rameno 1 je v rozstřelu na obrázku 44. Jednou z hlavních částí je křížové ložisko (fialová barva), které mají rameno 1 a základna společně. Ložisko je za vnější kroužek uchyceno v základně a za vnitřní kroužek je k ložisku přichyceno rameno 1. Vnitřní kroužek ložiska je nasunut na osazení ramene (žlutá barva). K rameni je ložisko přichyceno pomocí příruby (červená barva) za pomoci čtveřice imbusových šroubů M3x50 a matic M3, které jsou vloženy do přesného osazení v rameni. Imbusové šrouby zde slouží také jako výztuha, jelikož tato část ramene bude poměrně silně zatěžována. Součástí ramene je řemenice, která slouží k přenosu krouticího momentu pomocí ozubeného řemene ze servomotoru umístěného v základně.

Do ramene je shora zasunutý servomotor JX PDI HV7246MG (stříbrná barva), který je, stejně jako v případě základny, zajištěný pomocí víka (černá barva), ve kterém je vytvořené osazení pro čtyři matky M4, do nichž se skrz otvory v rameni šroubují imbusové šrouby. V tomto případě se jedná o dva imbusové šrouby M4x25 a dva M4x20. Rozdílné délky šroubů jsou voleny s ohledem na využití nosného materiálu ramene a na výskyt kabelového vedení ze servomotoru.

Přes servomotor je nasazený kryt (zelená barva), který je k rameni a k víku přišroubován pomocí dvojice imbusových šroubů M3x20 se zapuštěnou hlavou. Tyto šrouby se šroubují

přímo do těla ramene a víka, kde je pro ně vyříznutý závit. Přesnou polohu krytu, vůči víku a rameni, zajišťuje dvojice středících prvků.

Poslední významnou částí ramene 1 je podpěra (modrá barva). Jak už název napovídá, jednou z funkcí je podepírat, a to konkrétně rameno 2. Rameno 2 je k rameni 1 připojeno pomocí servo páky (hnědá barva) a z druhé strany je rameno 2 podepíráno přes kluzné pouzdro (oranžová barva). Jak bylo psáno, podepírání je jednou z funkcí podpěry. Druhou funkcí je vedení kabelového svazku z ramene 2 do osy rotace ramene 1. Podpěra je vůči rameni usazena pomocí středících prvků a přichycena pomocí dvojice imbusových šroubů M3x60, kdy pro matice M3 jsou vytvořeny zapuštěné otvory v těle ramene. Šrouby jsou takto dlouhé ze stejného důvodu jako v případě uchycení ramene 1 k ložisku, a to z důvodu vyztužení.



Obrázek 44 - Rameno 1 - rozstřel + detaily

6.5.1 MKP analýza

Stejně jako základna, bylo rameno 1 upraveno pro účely MKP analýzy. Tyto úpravy opět spočívaly v odstranění většiny zaoblení, ve zjednodušení, například řemenice, a v nahrazení 3D šroubů 1D elementy. Jako okrajové podmínky lze zvolit dva stavy. Buď jakýsi provozní stav, kdy bude rameno zatíženo momentem od vlastní hmotnosti zbylého ramene a hmotnosti břemene, nebo stavem, kdy by došlo k blokaci zbylého ramene, a oba servomotory, které mají vazbu na rameno 1 by produkovaly maximální možný moment. Druhá zmíněná varianta je pro rameno kritičtější, proto bude rameno zkontrolováno právě na toto zatížení.

Opět byly všechny součásti, kromě křížového ložiska, zasíťovány čtyřstěnnými elementy s meziuzlem CTETRA(10). Křížové ložisko bylo zasíťované taženou sítí s meziuzlem CHEXA(20). Všem součástem byl přiřazen materiál, ze kterého jsou vyrobeny, kdy na obrázku 45 jsou modře znázorněny součásti vyrobeny pomocí 3D tisku, červeně servomotor a zeleně ložisko z ocele. Žlutě jsou pak 1D prvky, jako šroubová spojení nebo RBE2 a RBE3 elementy. Předpoklady ohledně materiálových vlastností, viz kapitola 6.1.

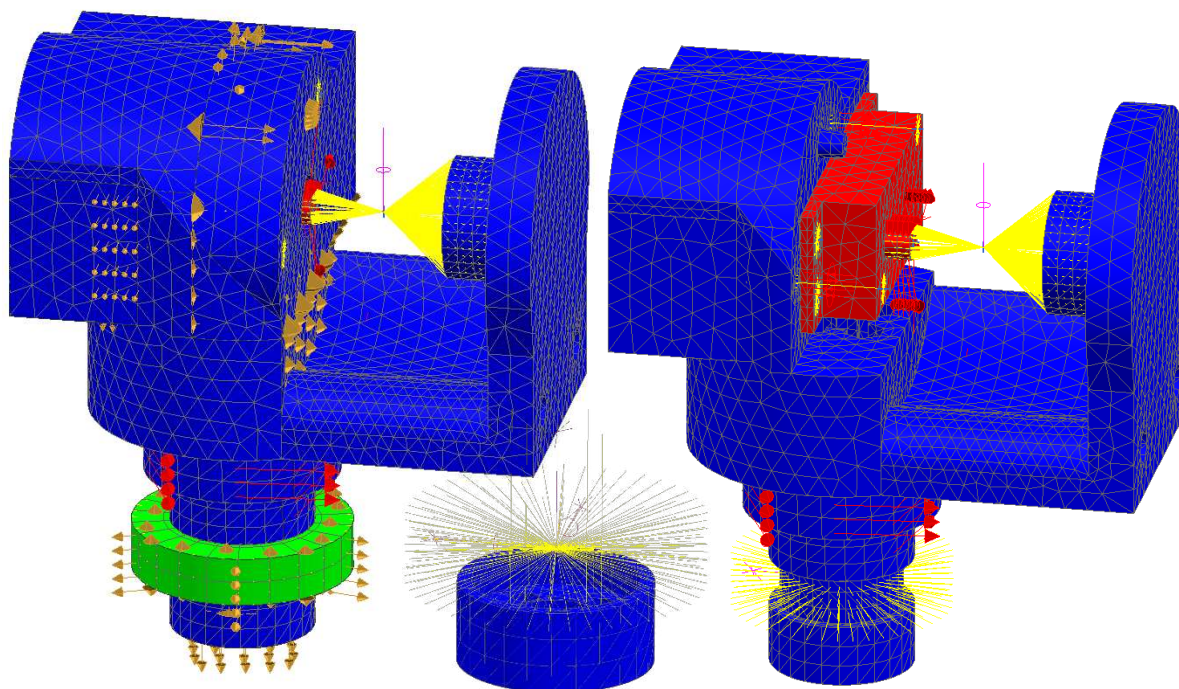
Mezi součástmi, které jsou spojeny pomocí šroubových spojů, je realizována vazba Surface-to-Surface Contact. Pro všechny třecí plochy je uvažován koeficient tření 0,3.

Zatížení je aplikováno na zjednodušenou řemenici a výstupní hřídel servomotoru. Obě tato zatížení jsou na obrázku 45 znázorněna červenými šipkami. Na řemenici byl aplikován moment o velikosti 3,79 Nm a na výstupní hřídel servomotoru moment o velikosti 4,69 Nm. Souhrn všech zatěžujících sil a momentů je v tabulce 8.

Zatížení	Hodnota
Moment od servomotoru J1	3,79 Nm
Moment od servomotoru J2	4,69 Nm
Předepnutí šroubového spoje M3	230 N
Předepnutí šroubového spoje M4	500 N

Tabulka 8 - Zatížení ramene 1

Všechny stupně volnosti, kromě rotace okolo svislé osy, byly odebrány ve středu RBE2 elementu, který nahrazuje uchycení křížového ložiska v základně ramene, viz detail na obrázku 45. Rotace okolo svislé osy byla odebrána v průsečíku RBE2 elementů, vedených z ploch výstupní hřídele servomotoru a osazení podpěry. Odebrání tohoto stupně volnosti právě v tomto místě nahrazuje situaci, kdy rameno bude zablokováno naražením na překážku při rotaci okolo svislé osy.

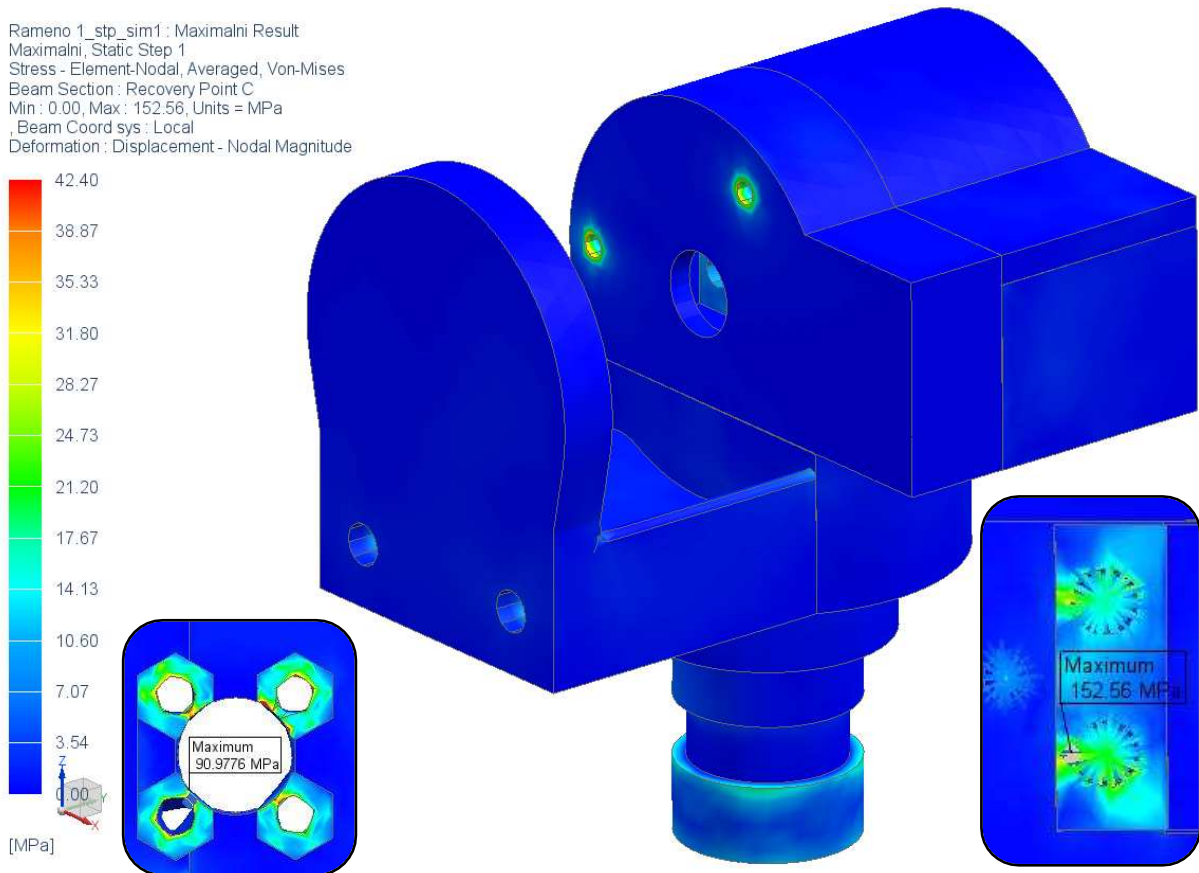


Obrázek 45 - Rameno 1 - síť + okrajové podmínky

Na obrázku 46 jsou vidět výsledky MKP analýzy ramene 1. Stejně jako v případě MKP analýzy základny ramene, i zde jsou maximální hodnoty napětí vysoko nad pevností materiálu 3D tisku. Ale stejně jako v předešlém případě, i zde se jedná o špičky v napojení RBE3 elementů šroubových spojů. Největší hodnotu napětí, 152 MPa, můžeme vidět na detailu obrázku 46, která se nachází právě v napojení RBE3 elementu k hraně otvoru v servomotoru. Jelikož v MKP analýzách této práce vyhodnocujeme pouze pevnost součástí vyráběných pomocí 3D tisku, byly všechny ostatní součásti skryty. Po zobrazení pouze tištěných komponent se zobrazilo jako největší napětí 91 MPa. I tato hodnota je příliš vysoká na materiál VisiJet M3 Crystal, avšak opět se jedná o napětí v napojení RBE3 elementu, tudíž tato hodnota je zavádějící. Mimo uchycení 1D elementů šroubových spojů hodnota napětí nepřesáhne 20 MPa. S ohledem na tento fakt a s ohledem na mez pevnosti v tahu materiálu VisiJet M3 Crystal (42,4 MPa) je rameno v tomto zatěžujícím stavu navrženo s bezpečností větší než 2 vůči mezi pevnosti.

Materiál	Maximální napětí (mimo 1D elementy) [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Bezpečnost
VisiJet M3 Crystal	20	42,4	2,1

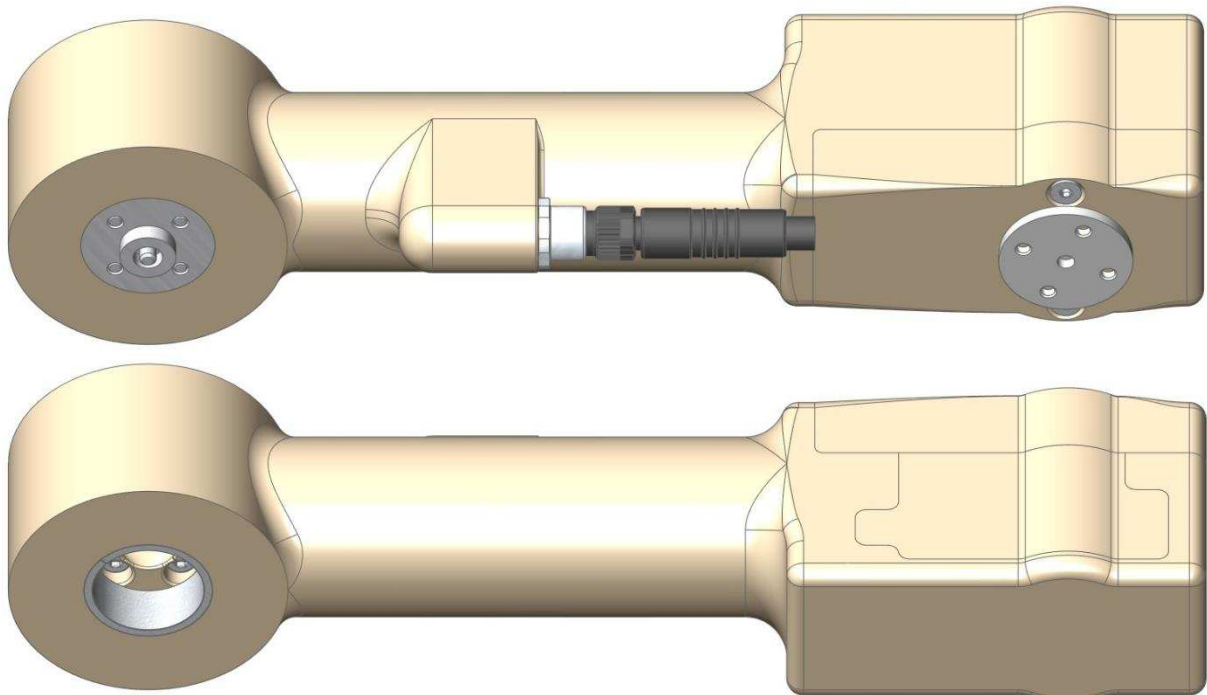
Tabulka 9 - Rameno 1 - výsledky MKP analýzy



Obrázek 46 - Rameno 1 - výsledky MKP analýzy

6.6 Rameno 2

Rameno 2 je nejdelším ramenem v celé sestavě. Při navrhování tohoto ramene musel být brán v potaz rozměr tiskového prostoru 3D tiskárny, kdy bylo nakonec rameno tištěno na úhlopříčku tiskového prostoru. Kompletní sestava ramene 2 je na obrázku 47.



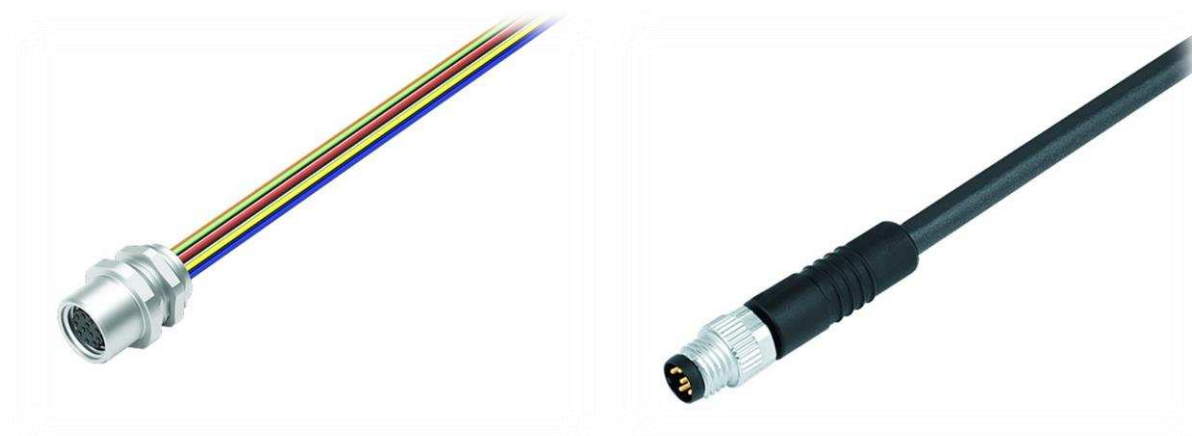
Obrázek 47 - Rameno 2

Na obrázku 49 je rameno 2 v rozstřelu. Krouticí moment ze servomotoru v rameni 1 je přenášen pomocí hliníkového servo kolečka (hnědá barva), které je k servomotoru přichyceno pomocí šroubu M3x6. K rameni (žlutá barva) je servo kolečko přišroubováno pomocí čtyř imbusových šroubů M3x16. Ze stejné strany jako šrouby pro přišroubování servo kolečka je do ramene vloženo kluzné pouzdro PCM 202310 E (oranžová barva), přes které je rameno podepíráno. [49]

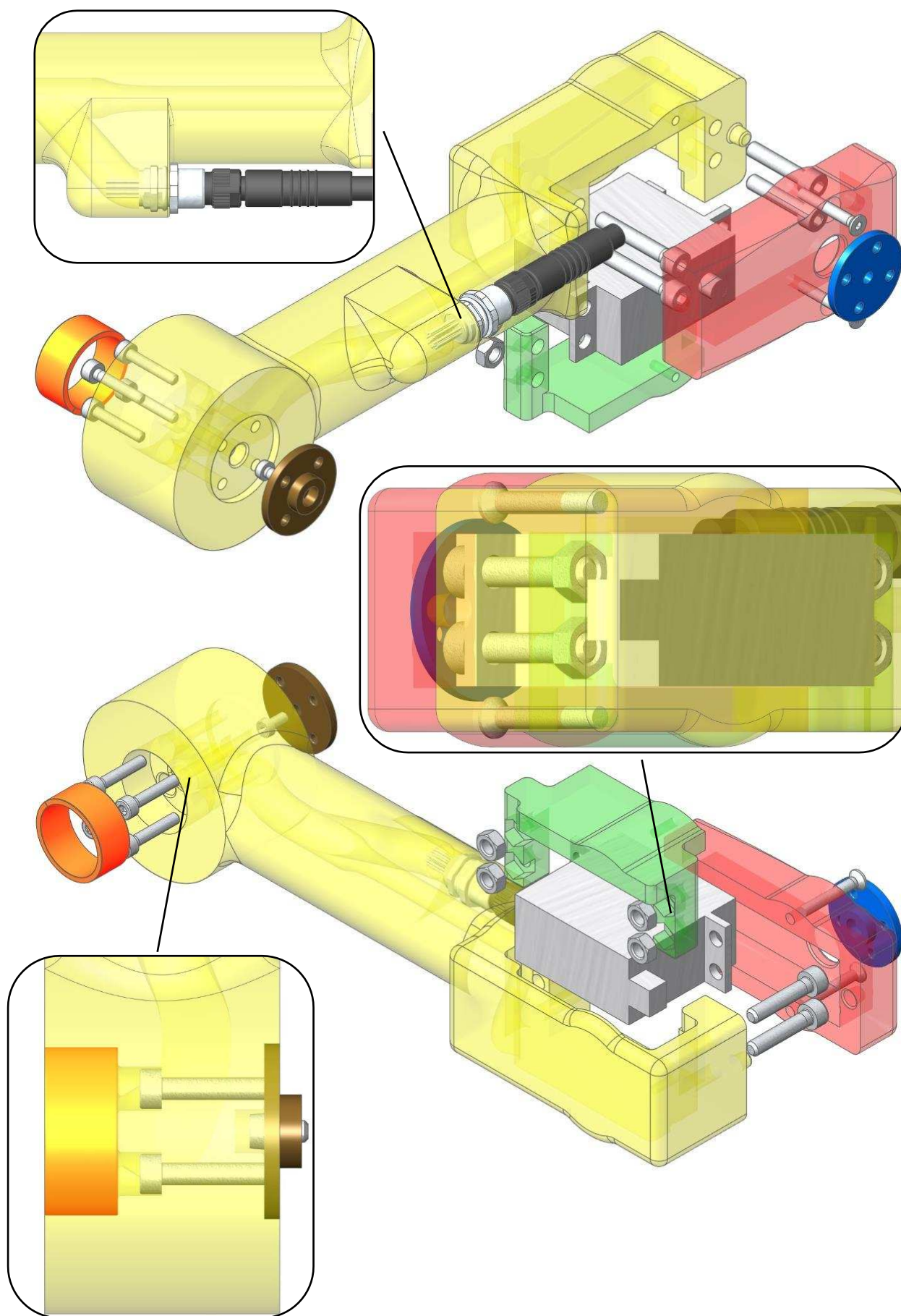
Do ramene je na druhém konci vložen servomotor JX PDI HV7232MG (stříbrná barva), které je zakryto víkem (zelená brava) a přišroubováno pomocí čtyř imbusových šroubů. Stejně jako v případě ramene 1, i zde jsou imbusové šrouby rozdílných délek. Dva šrouby jsou M4x20 a další dva M4x25. Matice M4 pro tyto šrouby jsou opět zapuštěny ve víku, kterým se servomotor zakrývá.

Přes servomotor je poté nasazen kryt (červená barva), který je vůči ramenu usazený pomocí středících prvků a k rameni a víku přišroubován pomocí dvojice imbusových šroubů M3x20 se zapuštěnou hlavou. Stejně jako v případě krytů u základny a ramene 1, i zde je závit pro tyto šrouby vyříznut přímo do těla ramene a víka. Na výstupní hřídel servomotoru, která prochází otvorem v krytu, je nasazeno hliníkové servo kolečko (modrá barva), přes které je přenášen krouticí moment na rameno 3.

Na úrovni ramene 2 vystupuje kabelový svazek ven z těla ramene. Je to z důvodu, že by bylo jinak obtížné překonávat rotační vazbu J3, jelikož v tomto případě není k dispozici žádná podpěra v ose rotace, jako to bylo v případě kloubu J2, a vedení kabelového svazku okolo servomotoru by bylo velice náročné a rizikové z pohledu mechanického namáhání kabelů. Díky tomu však mohlo dojít k osazení konektorem, což poskytuje možnost snadného odpojení zbytku ramene a případnému připojení jiného příslušenství. Konektor byl volen v závislosti na počtu kontaktů, rozměru a IP ochrany. Jako vyhovující byl vybrán konektor od firmy Binder série 718 v rozměru M8. Jedná se o šroubovací konektor s 12 kontakty a stupněm ochrany IP 67. Do ramene 2 bude namontována samice tohoto konektoru a samec bude součástí kabelového vedení zbytku ramene. [50] [51]



Obrázek 48 - Konektor Binder série 718 – samice (vlevo), samec (vpravo) [50] [51]



Obrázek 49 - Rameno 2 - rozstřel + detaily

6.6.1 MKP analýza

Rameno bylo opět upraveno pro účely MKP analýzy, a to tím způsobem, že byly odstraněny rádiusy a kanály vnitřního vedení kabelů a 3D šrouby nahrazeny 1D elementy. Stejně jako u ramene 1 máme na výběr dva zatěžující stavy. Jedním z nich je opět provozní stav, kdy by rameno bylo zatíženo momentem od hmotnosti zbytku ramene a hmotnosti břemene. Druhým, extrémním stavem je situace, kdy oba servomotory produkují maximální momenty, a přitom směry působení momentů jsou opačné. Právě na toto extrémní zatížení bude rameno kontrolováno.

Jediné kluzné pouzdro je zesíťované taženou sítí s meziuzlem CHEXA(20). Ostatní součásti jsou zesíťované čtyřstěnnými elementy s meziuzlem CTETRA(10). Všem součástí byl opět přiřazen reálný materiál. Modře jsou na obrázku 50 zobrazené součásti vytištěné na 3D tiskárně, červeně servomotor, zeleně ocel a hnědě hliník. Žlutě jsou opět 1D prvky, jako šroubová spojení nebo RBE2 a RBE3 elementy. Předpoklady ohledně materiálových vlastností, viz kapitola 6.1.

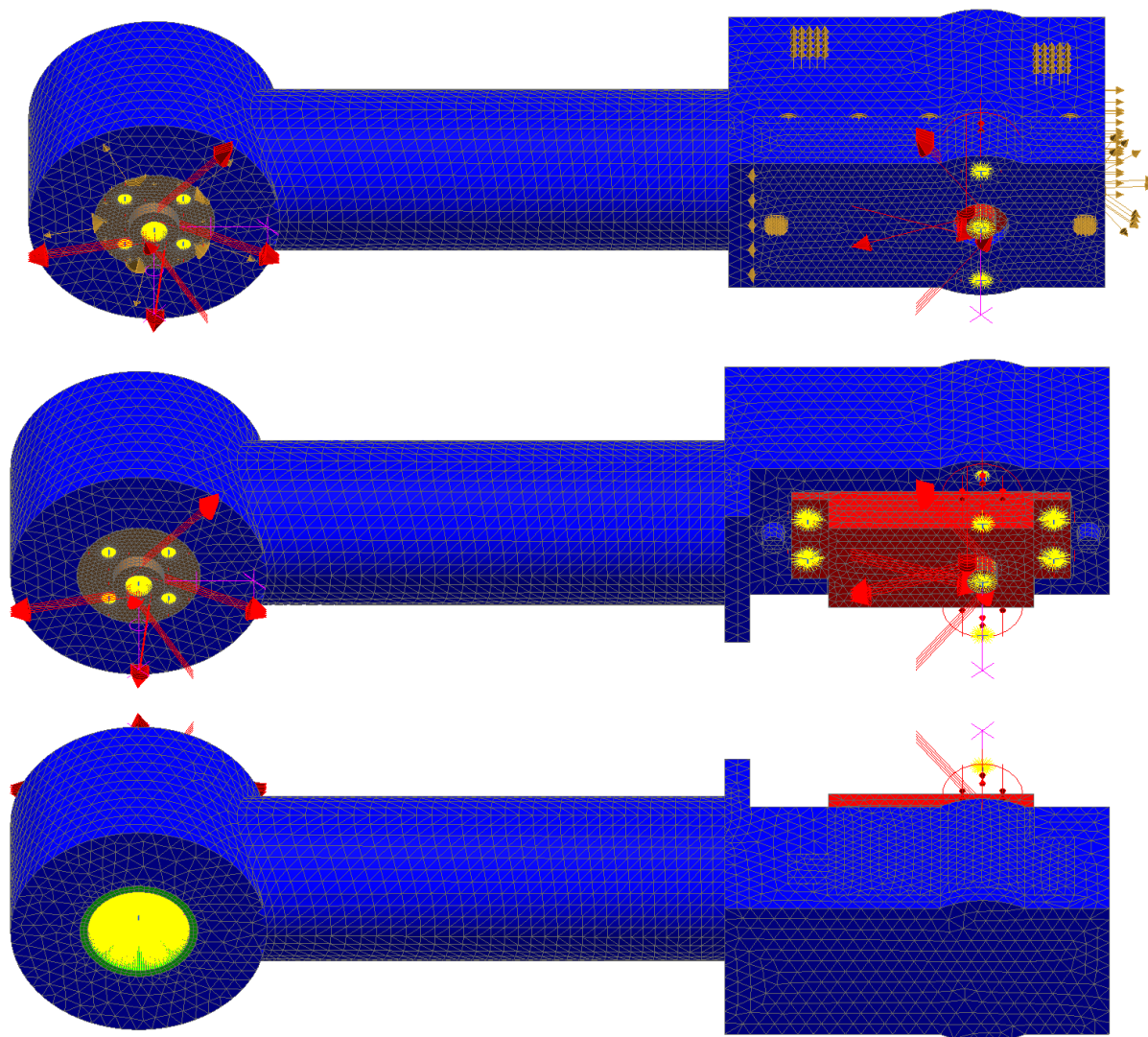
Mezi součástmi, které jsou spojeny pomocí šroubových spojů, je realizována vazba Surface-to-Surface Contact. Pro všechny třecí plochy je uvažován koeficient tření 0,3.

Jak bylo psáno výše, rameno bude zatíženo dvojicí momentů. Tyto momenty budou mít opačný směr působení, což zapříčiní nejhorší možnou situaci zatěžování. Jeden moment o velikosti 4,69 Nm je aplikován na vnitřní průměr osazení hliníkového servo kolečka. Druhý moment o velikosti 3,01 Nm je aplikován na výstupní hřídel servomotoru. Souhrn všech zatěžujících účinků je v tabulce 10.

Zatížení	Hodnota
Moment od servomotoru J2	4,69 Nm
Moment od servomotoru J3	3,01 Nm
Předepnutí šroubového spoje M3	230 N
Předepnutí šroubového spoje M4	500 N

Tabulka 10 - Zatížení ramene 2

Většina stupňů volnosti je odebrána ve středu RBE2 elementu vytvořeného ve vnitřním osazení hliníkového servo kolečka. V tomto místě jsou odebrány všechny stupně volnosti kromě rotace okolo osy rotace servomotoru, který je k tomuto servo kolečku připojen, což simuluje reálné připojení k výstupní hřídeli servomotoru. Z druhé strany ramene, ve středu RBE2 elementu vytvořeného z vnitřního průměru kluzného pouzdra, jsou odebrány posuvy ve svislém a v podélném směru. Toto omezení simuluje podpěru ramene bez omezení jakékoli rotace. Poslední omezení je aplikováno na výstupní hřídel servomotoru, a to ve svislém směru. Toto omezení simuluje situaci, kdy rameno narazí ve svislém směru na překážku.

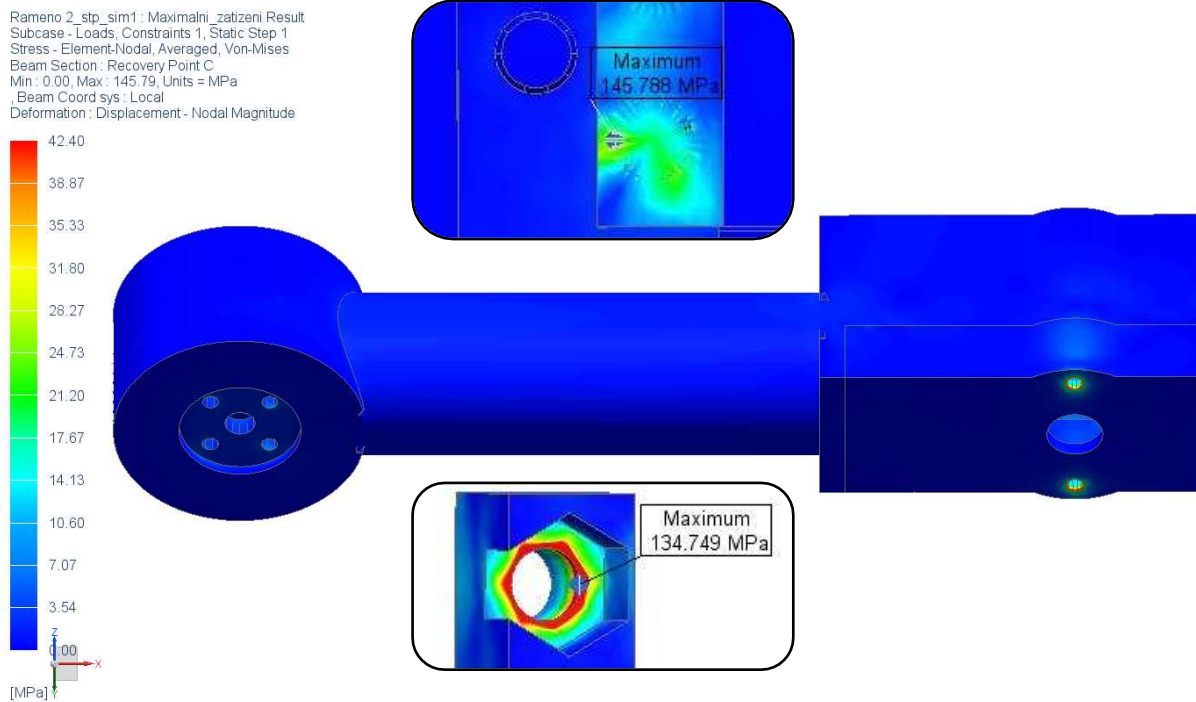


Obrázek 50 - Rameno 2 - síť + okrajové podmínky

Z výsledků MKP analýzy ramene 2 (obrázek 51) je patrné, že maximální napětí 145 MPa se opět vyskytuje v místě napojení dokonale tuhého RBE3 elementu k servomotoru. I v tomto případě se jedná o singularitu, která se ve skutečnosti vůbec nebude vyskytovat a mimo jiné bylo řečeno, že se budou vyhodnocovat pouze součásti tištěné na 3D tiskárně. Po skrytí všech ostatních součástí se jako maximální objevilo napětí 135 MPa na víku, opět v místě šroubového spoje, konkrétně v napojení RBE3 elementu nahrazující matici M4. Stejně jako v předchozích případech, toto napětí je špičkové a ve skutečnosti nereálné. Napětí zjištěné mimo šroubové spoje nepřesáhne 15 MPa, tudíž se jedná o bezpečnost přibližně 2,8 vůči mezi pevnosti materiálu VisiJet M3 Crystal.

Materiál	Maximální napětí (mimo 1D elementy) [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Bezpečnost
VisiJet M3 Crystal	15	42,4	2,8

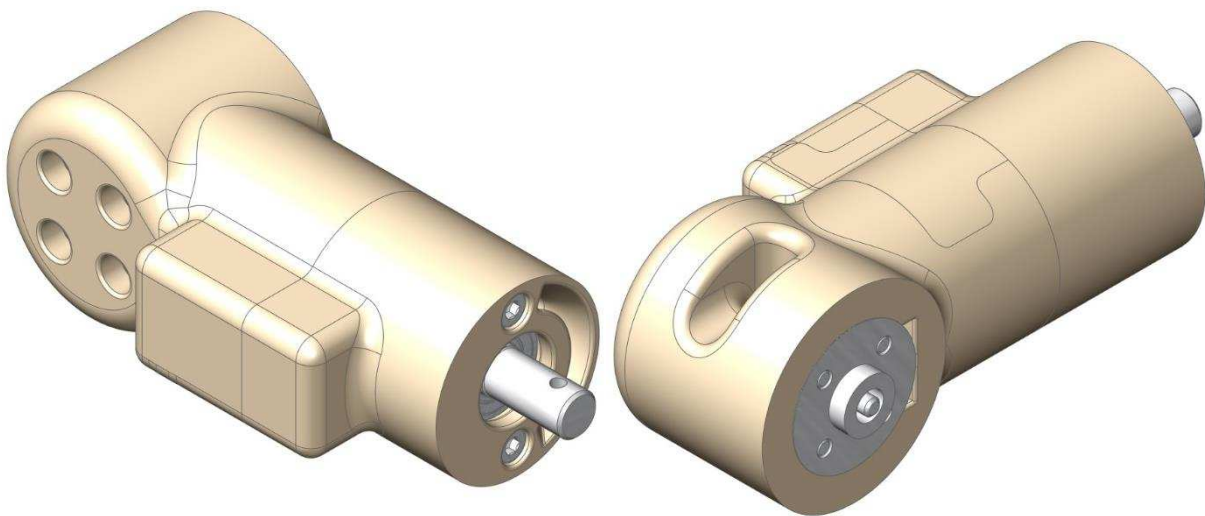
Tabulka 11 - Rameno 2 - výsledky MKP analýzy



Obrázek 51 - Rameno 2 - výsledky MKP analýzy

6.7 Rameno 3

Rameno 3, jež je ve složeném stavu na obrázku 52, je v celkové sestavě manipulačního ramene významné tím, že servomotor umístěný v tomto rameni obstarává, nepočítaje rameno 1, kdy je servomotor umístěn mimo osu rotace, první rotační vazbu okolo vlastní osy ramene. Dalším významným prvkem tohoto ramene je způsob přenosu krouticího momentu na následující rameno, kdy je, namísto přímé vazby mezi servo pákou a následujícím ramenem, využita hliníková hřídel uložena v kuličkovém ložisku. Další zajímavostí spojenou s tímto ramenem je způsob vedení kabelového svazku. Pro překonání kloubu J4 byla totiž zvolena varianta vedení kabelového svazku tělem ramene, na určitém rádiu od osy rotace. Tyto detaily budou však popsány v následujících odstavcích.



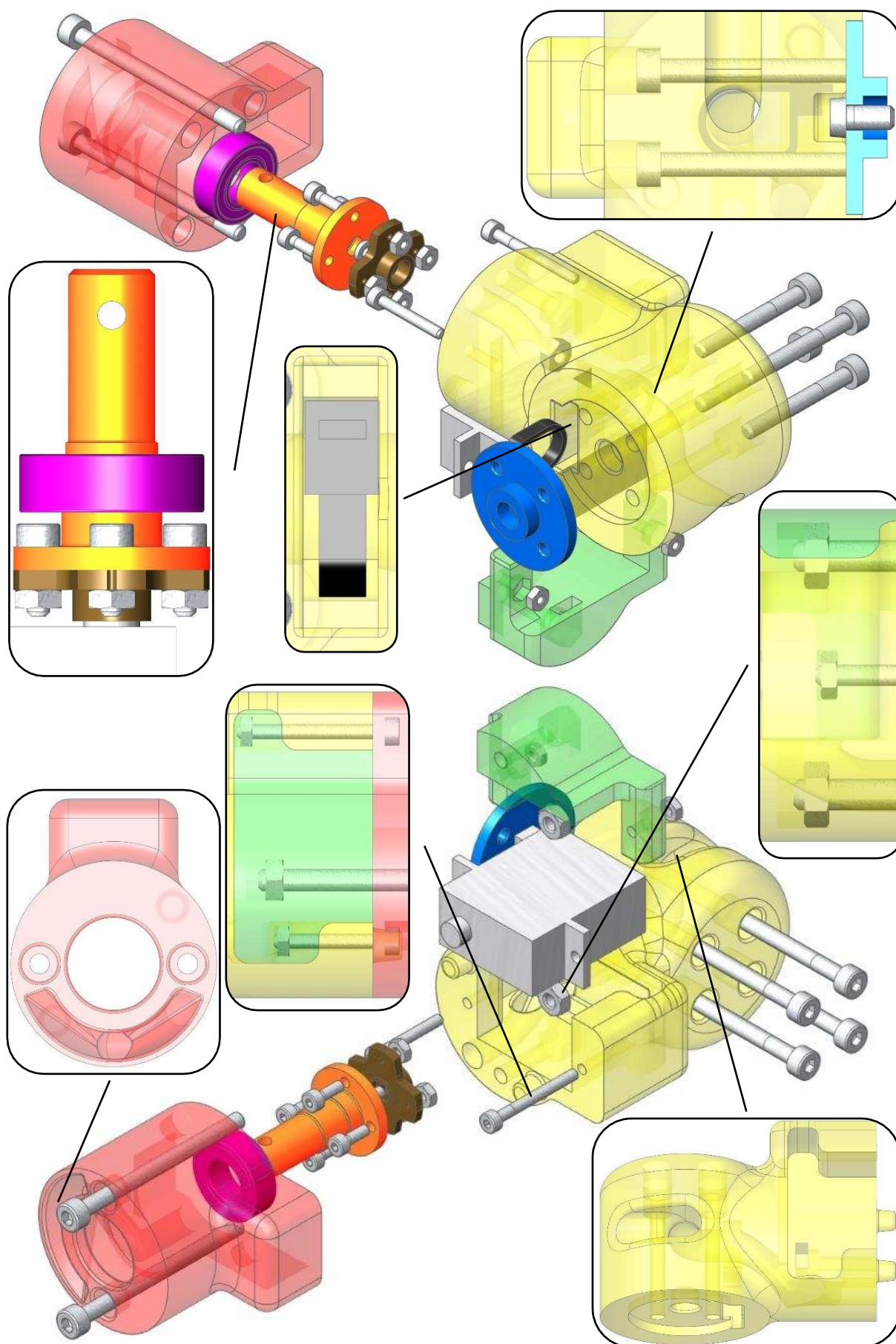
Obrázek 52 - Rameno 3

Na obrázku 53 je vidět rameno 3 v rozstřelu. Jak je psáno v popisu ramene 2, jsou rameno 2 a rameno 3 spojeny pomocí hliníkového servo kolečka (modrá barva), které je k servomotoru v rameni 2 přišroubováno pomocí šroubu M3x6. K rameni (žlutá barva) je servo kolečko přišroubováno pomocí čtyř imbusových šroubů M3x25. Avšak dříve, než je přišroubováno servo kolečko, je potřeba zajistit kabelový svazek, jež je přiveden z ramene 2, proti vysunutí. Toto zajištění je realizováno pomocí stahovací pásky (černá barva), pro kterou je v rameni vytvořena kapsa.

Do osazení v rameni je následně vložena matice M3, do které se později bude šroubovat imbusový šroub M3x40 sloužící pro přichycení krytu (červená barva). Poté je do ramene vložen servomotor Kingmax CLS2035HHV (stříbrná barva) a přes něj víko, ve kterém jsou osazení pro matice M2. Ve víku je ještě jedno osazení, a to pro matici M3, do které se bude šroubovat opět imbusový šroub M3x40 sloužící pro přichycení krytu. Servomotor je k rameni a víku přišroubován pomocí dvojice imbusových šroubů M2, kdy jeden je délky 20 mm a druhý 15 mm. Tento rozdíl v délkách šroubů je opět dán maximálním využitím nosného materiálu ramene v případě delšího šroubu a přítomností kabelového vedení ze servomotoru v případě šroubu kratšího.

K servomotoru je pomocí šroubu M2x4 přišroubovaná plastová servo hvězdice (hnědá barva). Hvězdice je seříznuta dle průměru hřídele (oranžová barva), která je k servo hvězdici přišroubována pomocí čtyř imbusových šroubů M2x6 a matic M2. Na hřídel je následně nasazeno nerezové kuličkové ložisko W 628/8-2RS1, které má za úkol přenášet zatížení od hmotnosti břemene a vlastní hmotnosti zbylého ramene do krytu, který je k rameni přišroubován již zmíněnými imbusovými šrouby M3x40. Kryt je vůči rameni polohovaný pomocí středících prvků. Krouticí moment je z hřídele na další rameno přenášeno pomocí šroubu, který je zašroubovaný do otvoru na konci hřídele.

Kabelový svazek je z konektoru na rameni 2 veden do ramene, kde se část kabelů odděluje pro napájení servomotoru a zbylý kabelový svazek pokračuje skrz rameno do krytu. Jelikož zde byla snaha o zachování kabelové svazku uvnitř ramene, byl zde vytvořen jakýsi trychtýř při povrchu krytu, kterým povede kabelový svazek, přičemž tento trychtýř je vytvořený i v následujícím rameni 4, což poskytne volnost pohybu v rozsahu minimálně 180°.



Obrázek 53 - Rameno 3 - rozstřel + detaily

6.7.1 MKP analýza

V této kapitole budou, stejně jako u předešlých ramen, zkontrolovány součásti tištěné pomocí 3D tiskárny. Kromě toho však bude provedena pevnostní kontrola výstupní hřídele vyrobené z hliníkové slitiny EN AW 6063 T66.

I v tomto případě byl model pro účely MKP upraven odstraněním zaoblení, náhradou 3D šroubů 1D elementy a odstraněním vnitřních kanálů pro vedení kabelového svazku. Jako okrajové podmínky byl opět zvolen stav, kdy oba servomotory, mající vazbu na rameno 3, produkují maximální krouticí moment.

Stejně jako v předchozích případech, i zde byly všechny součásti, kromě ložiska, zasíťovány čtyřstěnnými elementy s meziuzlem CTETRA(10), zatímco ložisko bylo zasíťované taženou sítí s meziuzlem CHEXA(20). Všechny součásti mají opět přiřazený vlastní materiál, přičemž modře jsou na obrázku 54 znázorněny součásti vyráběné 3D tiskem, červeně zbarvenou sítí má servomotor, světle zelená je ocel, tmavě zelená plast a hnědou barvou je znázorněn hliník. Žlutě jsou opět znázorněny 1D elementy, jako jsou šroubové spoje a RBE2 nebo RBE3 elementy. Předpoklady ohledně materiálových vlastností, viz kapitola 6.1.

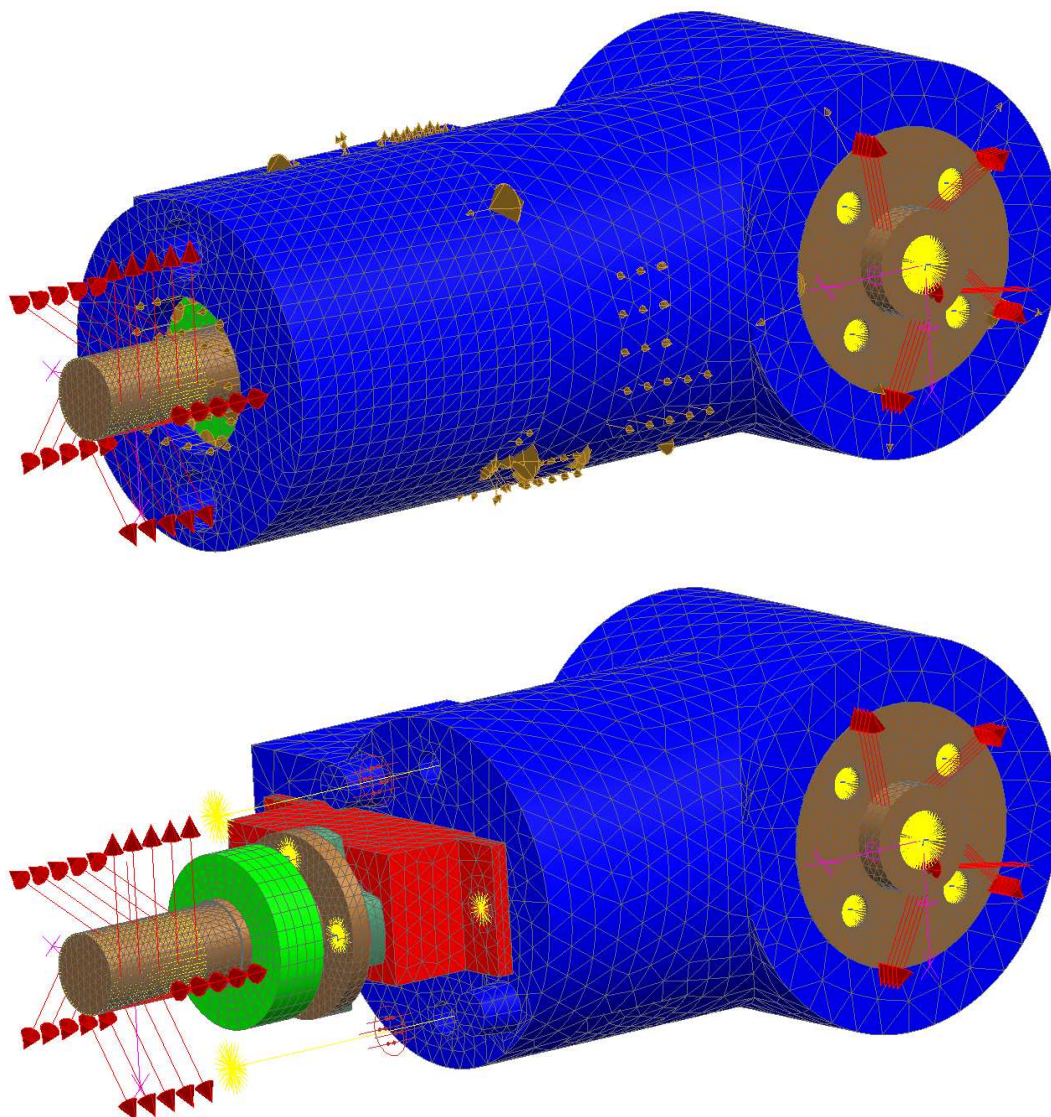
Mezi součástmi, které jsou spojeny pomocí šroubových spojů, je realizována vazba Surface-to-Surface Contact. Pro všechny třecí plochy je uvažován koeficient tření 0,3.

Zatížení je opět aplikováno na vstupní a výstupní prvek ramene, tedy na servo kolečko, pomocí kterého je rameno 3 napojeno na rameno 2 a na hřídel, která přenáší krouticí moment na rameno 4. Na servo kolečko je aplikován moment o velikosti 3,01 Nm, jelikož to je největší moment, který může produkovat servomotor v rameni 2 a na výstupní hřídel je aplikován moment 0,61 Nm, což je nejvyšší možný moment servomotoru, který je umístěný v rameni 3. Souhrn všech zatěžujících sil a momentů je v tabulce 12.

Zatížení	Hodnota
Moment od servomotoru J3	3,01 Nm
Moment od servomotoru J4	0,61 Nm
Předeptnutí šroubového spoje M2	110 N
Předeptnutí šroubového spoje M3	230 N

Tabulka 12 - Zatížení ramene 3

Stejně jako u ramene 2 je ve vnitřním osazení hliníkového servo kolečka, přes RBE2 element, odebrána většina stupňů volnosti. Jediný stupeň, který není odebrán, je rotace okolo osy rotace servomotoru v rameni 2. Dalším místem, kde byl odebrán stupeň volnosti, je hliníková výstupní hřídel. Ta byla naseknuta v místě, kde vystupuje skrze kryt z ramene 3 a následně spojena pomocí funkce Mesh Mating, tudíž vznikl válec, z jehož povrchu byl vytvořen RBE2 element a ve středu tohoto elementu odebrán stupeň volnosti v podobě posuvu ve svislém směru.



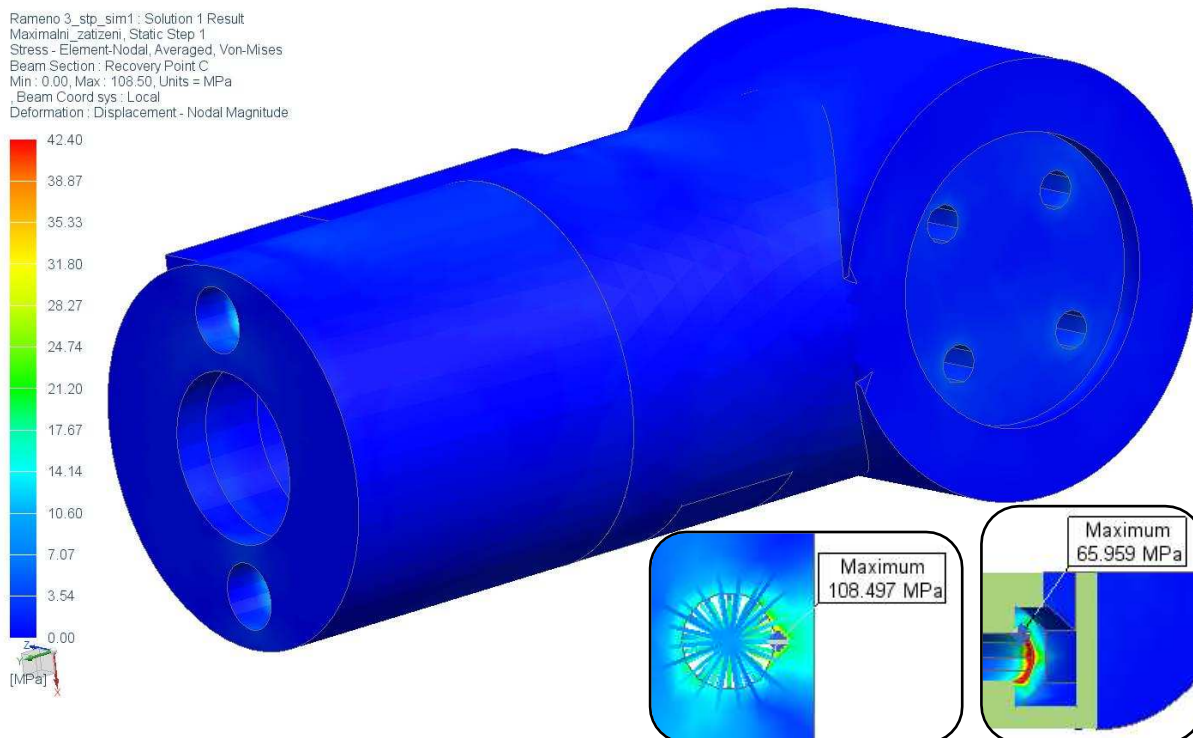
Obrázek 54 - Rameno 3 - síť + okrajové podmínky

6.7.1.1 Vyhodnocení součástí vyrobených pomocí 3D tisku

Jak je patrné z obrázku 55, maximální napětí 108,5 MPa je opět v napojení RBE3 elementu na servomotor. To však není místo, které nás zajímá z hlediska vyhodnocení pevnosti 3D tisku. Proto byly všechny součásti, které nejsou vyrobeny pomocí 3D tisku skryty. Maximální napětí na 3D tisku je opět v místě šroubového spoje, konkrétně v místě matice M3, která společně s imbusovým šroubem spojuje kryt s ramenem a víkem viz detail řezu na obrázku 55. Toto napětí je 66 MPa, avšak opět se jedná o špičku napětí způsobenou napojením RBE3 elementu. Napětí mimo šroubové spoje nepřekročí hodnotu 15 MPa. Opět se tedy jedná o bezpečnost přibližně 2,8 vůči mezi pevnosti materiálu VisiJet M3 Crystal.

Materiál	Maximální napětí (mimo 1D elementy) [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Bezpečnost
VisiJet M3 Crystal	15	42,4	2,8

Tabulka 13 - Rameno 3 - výsledky MKP analýzy - 3D tisk



Obrázek 55 - Rameno 3 - výsledky MKP analýzy - 3D tisk

6.7.1.2 Vyhodnocení hřídele

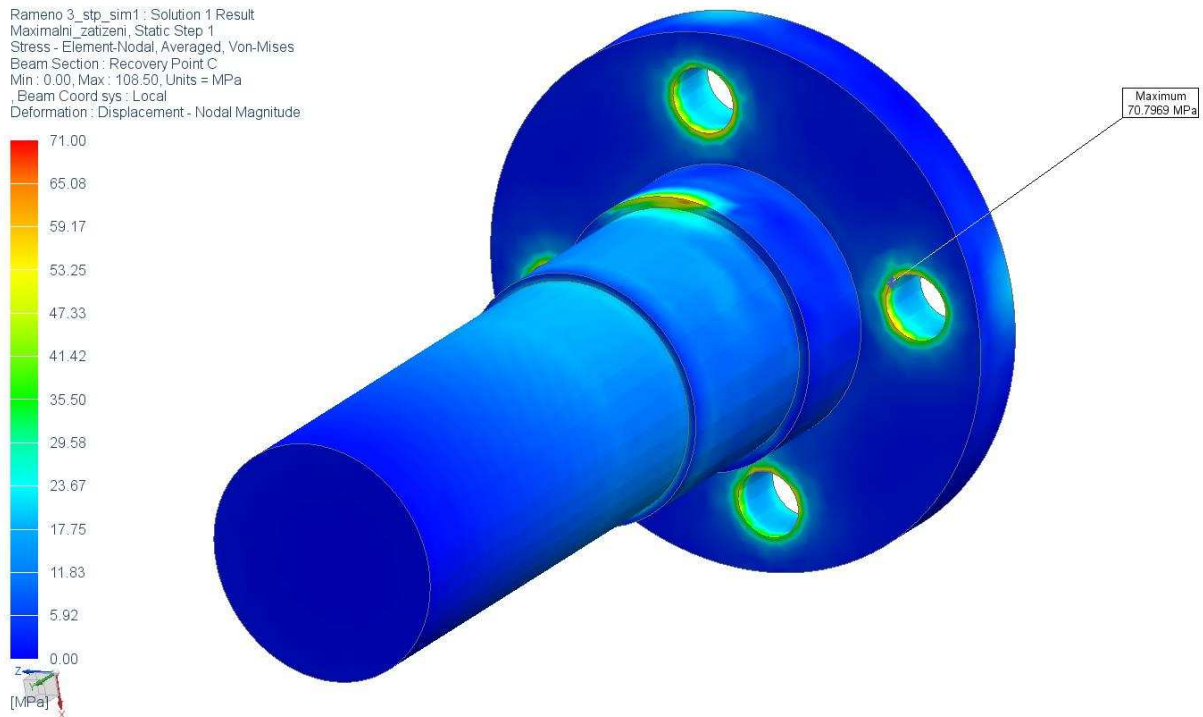
Hřídel je vyrobena z materiálu EN AW 6063 T66. Hliníkový materiál byl zvolen z důvodu nízké hmotnosti a dostatečné pevnosti, jelikož se nebude jednat o příliš velké namáhání. Konkrétně slitina EN AW 6063 T66 byla zvolena z důvodu dostupnosti. Výrobní výkres hřídele je součástí volně vložených příloh.

Mez kluzu hliníkové slitiny EN AW 6063 T66, ke které bude vztahována bezpečnost, je 230 MPa. [52]

Po skrytí všech ostatních součástí ramene 3 bylo zjištěné maximální napětí na hřídeli 71 MPa. Toto napětí je však opět v místě napojení RBE3 elementu 1D šroubového spoje, jedná se tedy opět o singularitu, kdy napětí ve skutečnosti nebude tak velké. Jako maximální napětí mimo šroubové spoje bylo zjištěno 60 MPa, a i toto napětí je na hraně, kde se dotýká ložisko a osazení na hřídeli. Jedná se tedy také o špičku napětí. Avšak i s tímto napětím vychází bezpečnost přibližně 3,8 vůči mezi kluzu. Takováto bezpečnost je až zbytečně vysoká, avšak hřídel bude zachována v těchto rozměrech z důvodu návaznosti na ostatní součásti, jako je servo hvězdice a ložisko.

Materiál	Maximální napětí (mimo 1D elementy) [MPa]	Mez kluzu [MPa]	Bezpečnost
EN AW 6063 T66	60	230	3,8

Tabulka 14 - Rameno 3 - výsledky MKP analýzy - hřídel



Obrázek 56 - Rameno 3 - výsledky MKP analýzy – hřídel

6.7.2 Kontrola ložiska

V této kapitole bude zkontrolováno ložisko W 628/8-2RS1, které je navrženo jako uložení výstupní hřídele z ramene 3 s vazbou na kryt ramene. Jako zatížení tohoto ložiska bude brána síla, která vznikne od působení momentu ze servomotoru J3. Velikost tohoto momentu je 3,01 Nm a vzdálenost ložiska od středu rotace je 62,5 mm \cong 0,0625 m. Radiální síla působící na ložisko se pak vypočte jako:

$$F = \frac{M}{r} = \frac{3,01}{0,0625} = 48,16 \text{ N}$$

Radiální síla je jediné zatížení, které na ložisko působí. Axiální síla je totiž pohlcována servomotorem, ke kterému je hřídel přes servo hvězdičky přišroubována. Pro výpočet trvanlivosti je potřeba znát otáčky. Ty se vypočítají následovně:

Servomotor se při napětí 8.4 V otočí o 60° za 0,04 sec.

360° (2 π rad) zvládne za 6 * 0,04 = 0,24 sec.

$$\omega = \frac{2\pi}{0,24} = 26,2 \text{ rad/s}$$

$$n = \frac{\omega * 60}{2\pi} = \frac{26,2 * 60}{2\pi} = 250,2 \text{ ot/min}$$

Parametry pro výpočet

Radiální síla	$F_r = 48,16 \text{ N}$
Rozměry ložiska	8 x 16 x 5mm
Základní dynamická únosnost	$C = 715 \text{ N}$
Otáčky	$n = 250,2 \text{ ot/min}$

Trvanlivost kuličkového ložiska se vypočítá jako:

$$L_h = \frac{16667}{n} * \left(\frac{C}{F_e}\right)^3$$

- kde: L_h - trvanlivost ložiska [hod]
 n - otáčky hřídele [ot/min]
 C - základní dynamická únosnost [N]
 F_e - ekvivalentní dynamické zatížení [N]

Ekvivalentní dynamické zatížení

$$F_e = X * F_r + Y * F_a$$

- kde: X - součinitel radiálního zatížení ložiska [-]
 Y - součinitel axiálního zatížení ložiska [-]
 F_r - radiální síla [N]
 F_a - axiální síla [N]

Jedinou silou působící na ložisko je síla radiální, tudíž $F_a = 0$ a součinitel radiálního zatížení ložiska je v tomto případě vždy roven 1. Z toho plyne, že ekvivalentní dynamické zatížení se rovná:

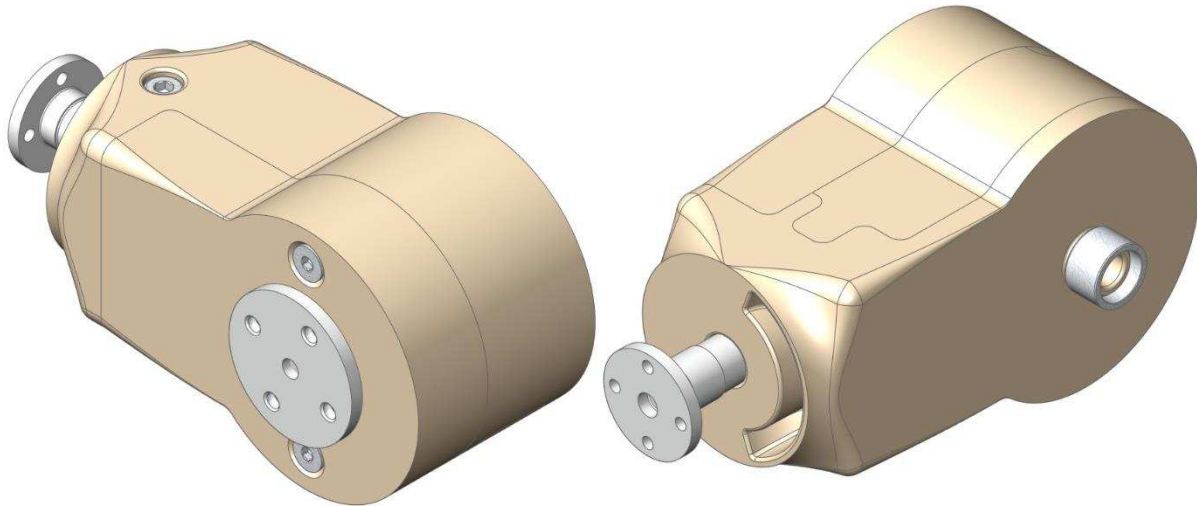
$$F_e = X * F_r = 1 * F_r = F_r$$

$$L_h = \frac{16667}{n} * \left(\frac{C}{F_r}\right)^3 = \frac{16667}{250,2} * \left(\frac{715}{48,16}\right)^3 = 217986,1 \text{ hod}$$

Trvanlivost ložiska přes 200 000 hodin je opravdu hodně. Z vypočítaného vyplývá, že je ložisko zbytečně předimenzované, avšak i v tomto případě se ložisko měnit nebude z důvodů vyhovujících zástavbových rozměrů.

6.8 Rameno 4

Rameno 4, jež je na obrázku 57, je významné především ve způsobu vedení kabelového svazku. Jelikož je napojeno na rameno 3, je zde vstup kabelového svazku řešen stejným způsobem jako výstup z ramene 3, tedy jakýmsi trychtýřem, který společně s trychtýřem v rameni 3 dovolí rotaci o přibližně 180°. Druhou zajímavostí tohoto ramene je způsob, jakým kabelový svazek rameno opouští. To je totiž realizováno podobným způsobem jako u ramene 1. Kabelový svazek je z ramene vyveden opačným směrem, než je vyvedena výstupní hřídel servomotoru. V místě vyvedení kabelového svazku je kluzné pouzdro a na kluzné pouzdro nasunuta podpěra ramene 5.



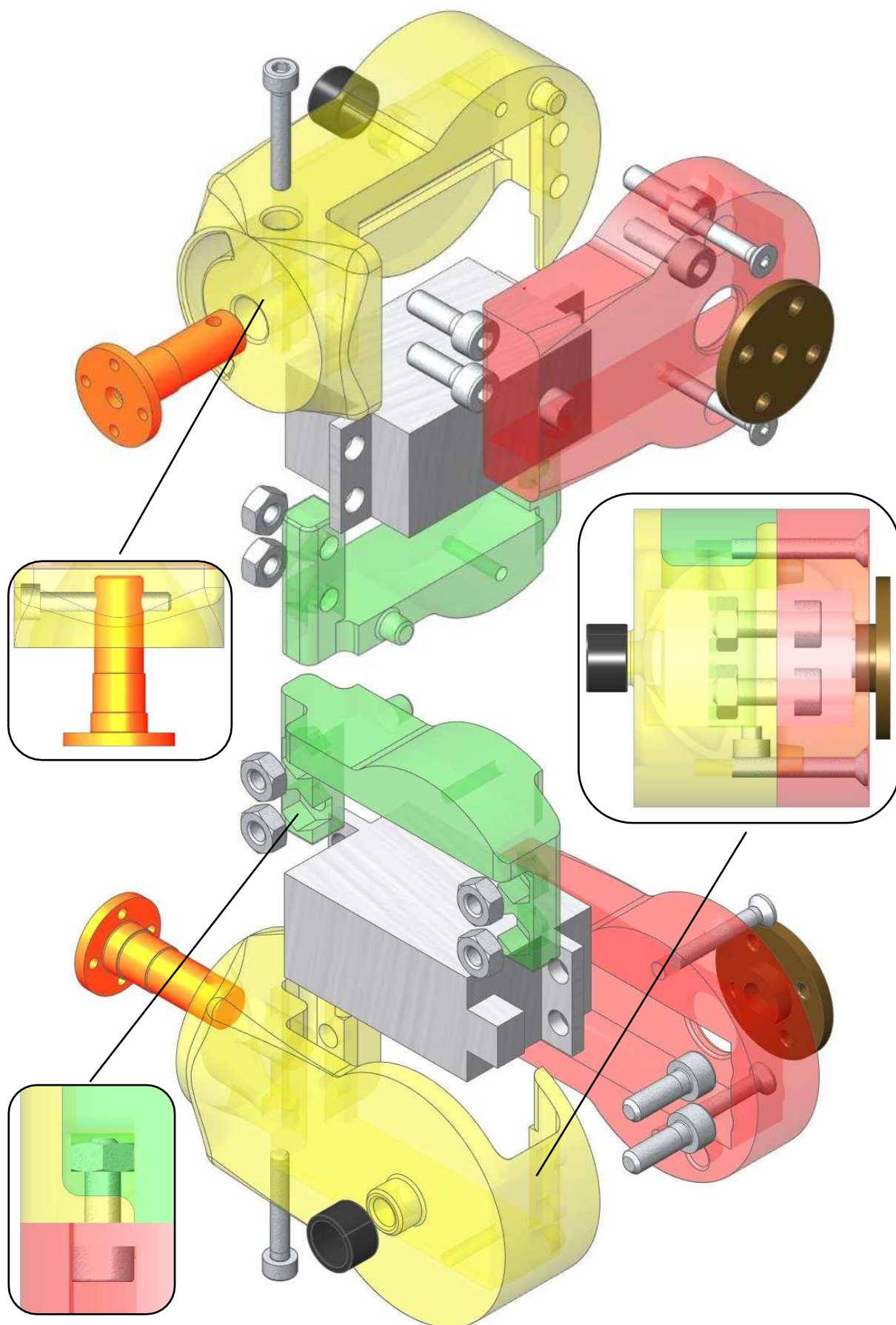
Obrázek 57 - Rameno 4

Na obrázku 58 je vidět rameno 4 v rozstřelu. Rameno 4 je k rameni 3 přichyceno pomocí hřídele (oranžová barva), která je v rameni (žlutá barva) zajištěna pomocí imbusové šrouby M3x20. Do ramene je vsunut servomotor JX PDI HV5212MG (stříbrná barva), přes který je opět nasunuto víko (zelená barva). Ve víku jsou vytvořena osazení pro matice M4, pomocí kterých, společně s imbusovými šrouby M4x12, je servomotor přišroubován k rameni a víku.

Přes servomotor je nasazený kryt (červená barva), který je vůči rameni a víku polohován pomocí středících prvků a přišroubován pomocí dvojice imbusových šroubů M3x20 se zapuštěnou hlavou. Závity pro tyto šrouby jsou vyříznuty přímo do těla ramene a víka.

Následující rameno je k rameni 4 přichyceno pomocí hliníkového servo kolečka (hnědá barva), které přenáší krouticí moment ze servomotoru a z druhé strany je následující rameno podepřeno pomocí osazení a kluzného pouzdra PCM 081006 E. [53]

Jak již bylo zmíněno výše, rameno 4 je zajímavé svým kabelovým vedením. Do ramene vstupuje kabelový svazek z ramene 3 jakýmsi trychtýřem, vytvořeným v jisté vzdálenosti od středu rotace. Společně s trychtýřem vytvořeným v rameni 3 tvoří tato dvojice prostor, kde se může pohybovat kabelový svazek při rotaci těchto dvou ramen vůči sobě. Z trychtýře pokračuje kabelový svazek za servomotor, kde je vytvořený prostor, ve kterém dojde ke spojení kabelů následujících servomotorů s kabelovým vedením z konektoru na rameni 2.



Obrázek 58 - Rameno 4 - rozstřel + details

6.8.1 MKP analýza

Opět bylo rameno upraveno pro účely MKP analýzy. Úpravy spočívaly v odstranění rádiusů, kanálů kabelového vedení a nahrazení 3D šroubových spojů 1D elementy. Jako zátěžný stav byla zvolena varianta, kdy na rameno působí maximální možné momenty od servomotorů majících vazbu na rameno 4.

V tomto případě jsou všechny součásti zasíťované čtyřstěnnými elementy s meziuzlem CTETRA(10), kdy modře jsou na obrázku 59 zobrazeny součásti vyrobené pomocí 3D tisku, červeně servomotor a žlutě jsou opět 1D elementy jako jsou šroubové spoje a RBE2 nebo RBE3 elementy. Předpoklady ohledně materiálových vlastností, viz kapitola 6.1.

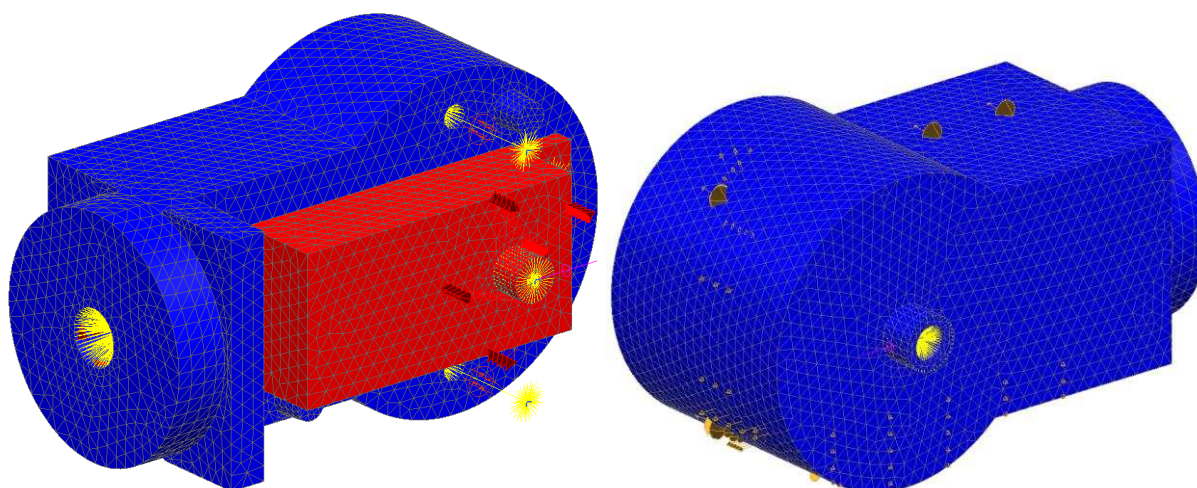
Mezi součástmi, které jsou spojeny pomocí šroubových spojů, je realizována vazba Surface-to-Surface Contact. Pro všechny třecí plochy je uvažován koeficient tření 0,3.

Zatížení je aplikováno na vstupní a výstupní prvek ramene, tedy na vnitřní osazení pro vstupující hřídel a na výstupní hřídel servomotoru. Na vnitřní osazení je aplikován moment o velikosti 0,61 Nm a na výstupní hřídel servomotoru moment o velikosti 1,16 Nm. Kompletní seznam zatěžujících účinků je v tabulce

Zatížení	Hodnota
Moment od servomotoru J4	0,61 Nm
Moment od servomotoru J5	1,16 Nm
Předepnutí šroubového spoje M3	230 N
Předepnutí šroubového spoje M4	500 N

Tabulka 15 - Zatížení ramene 4

Ve středu RBE2 elementu, vytvořeného z plochy vnitřního osazení pro vstupní hřídel, jsou odebrány všechny stupně volnosti, kromě rotace okolo podélné osy. Tato rotace je odebrána ve středu RBE2 elementů, vytvořených z plochy výstupní hřídele servomotoru a vnější plochy osazení pro kluzné pouzdro. Tento stav simuluje situaci, kdy dojde k blokaci, vlivem zaseknutí následujícího ramene 5.



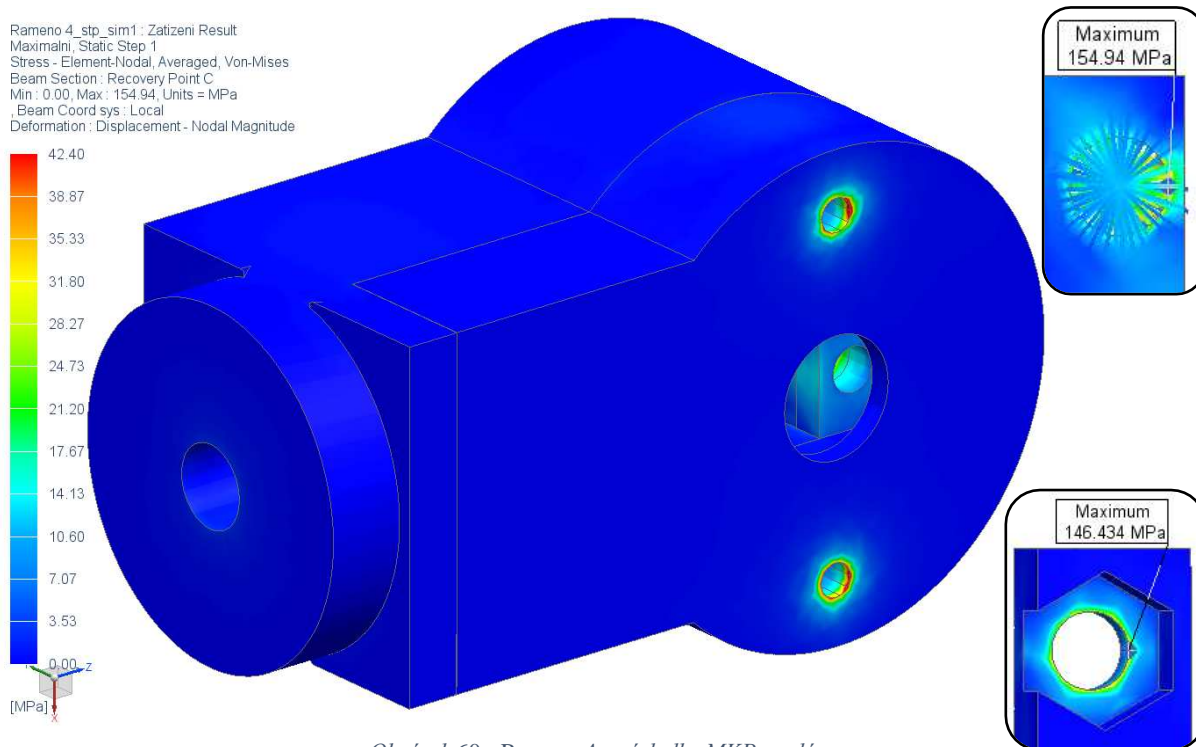
Obrázek 59 - Rameno 4 - síť + okrajové podmínky

Jak je patrné z obrázku 60, maximální napětí celé MKP analýzy ramene 4 je 155 MPa. Toto napětí je však v otvoru servomotoru, v místě napojení RBE3 elementu. Takže opět se jedná o singularitu, jež je ke všemu na součásti, která z pohledu vyhodnocení pevnosti není důležitá. Maximální napětí na součástech tištěných pomocí 3D tiskárny je 146 MPa. Toto napětí

se vyskytuje ve víku, v místě osazení pro matici M4. I v tomto případě je to špičkové napětí, které vzniká napojením RBE3 elementu k hraně otvoru pro šroub. Maximální zjištěné napětí mimo šroubové spoje je 17 MPa. Při takovémto napětí vychází bezpečnost vůči mezi pevnosti materiálu VisiJet M3 Crystal přibližně 2,5.

Materiál	Maximální napětí (mimo 1D elementy) [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Bezpečnost
VisiJet M3 Crystal	17	42,4	2,5

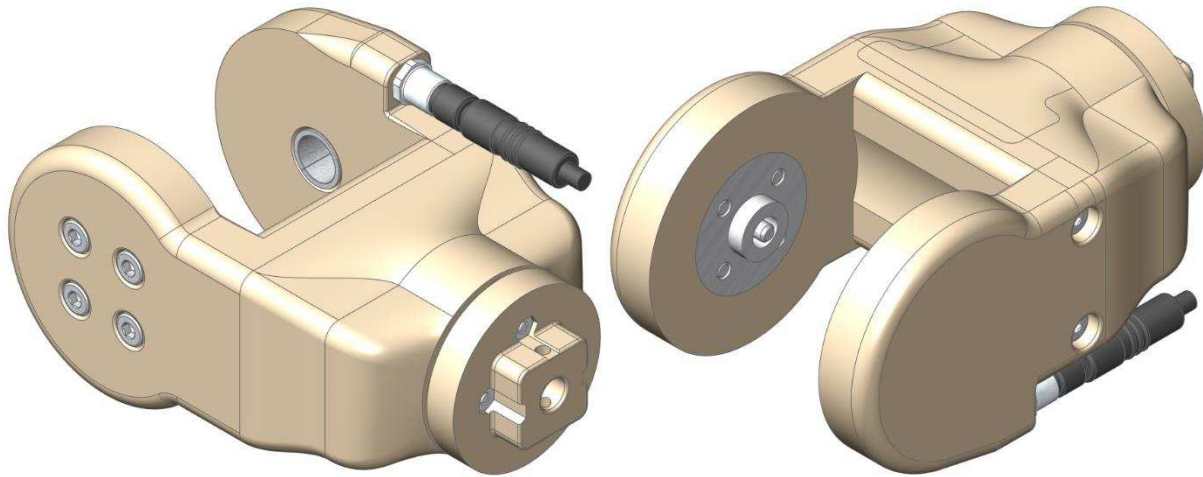
Tabulka 16 - Rameno 4 - výsledky MKP analýzy



Obrázek 60 - Rameno 4 - výsledky MKP analýzy

6.9 Rameno 5

Rameno 5, jež je na obrázku 61, obepíná rameno 4. K rameni 4 je přichyceno pomocí hliníkového servo kolečka, které přenáší krouticí moment ze servomotoru v rameni 4 na rameno 5 a z druhé strany je toto spojení doplněno podpěrou prostřednictvím kluzného pouzdra. Středem kluzného pouzdra je mimo jiné veden kabelový svazek k posledním dvěma servomotorům. V rameni 5 je umístěn jeden ze dvou servomotorů, který obstarává rotaci okolo vlastní osy ramene a jedná se také o poslední rotaci z šesti stupňů volnosti. Z ramene 5 pak vystupuje zbylé kabelové vedení, které vede do koncového efektoru, kde napájí servomotor, jež se stará o pohyb čelistí.



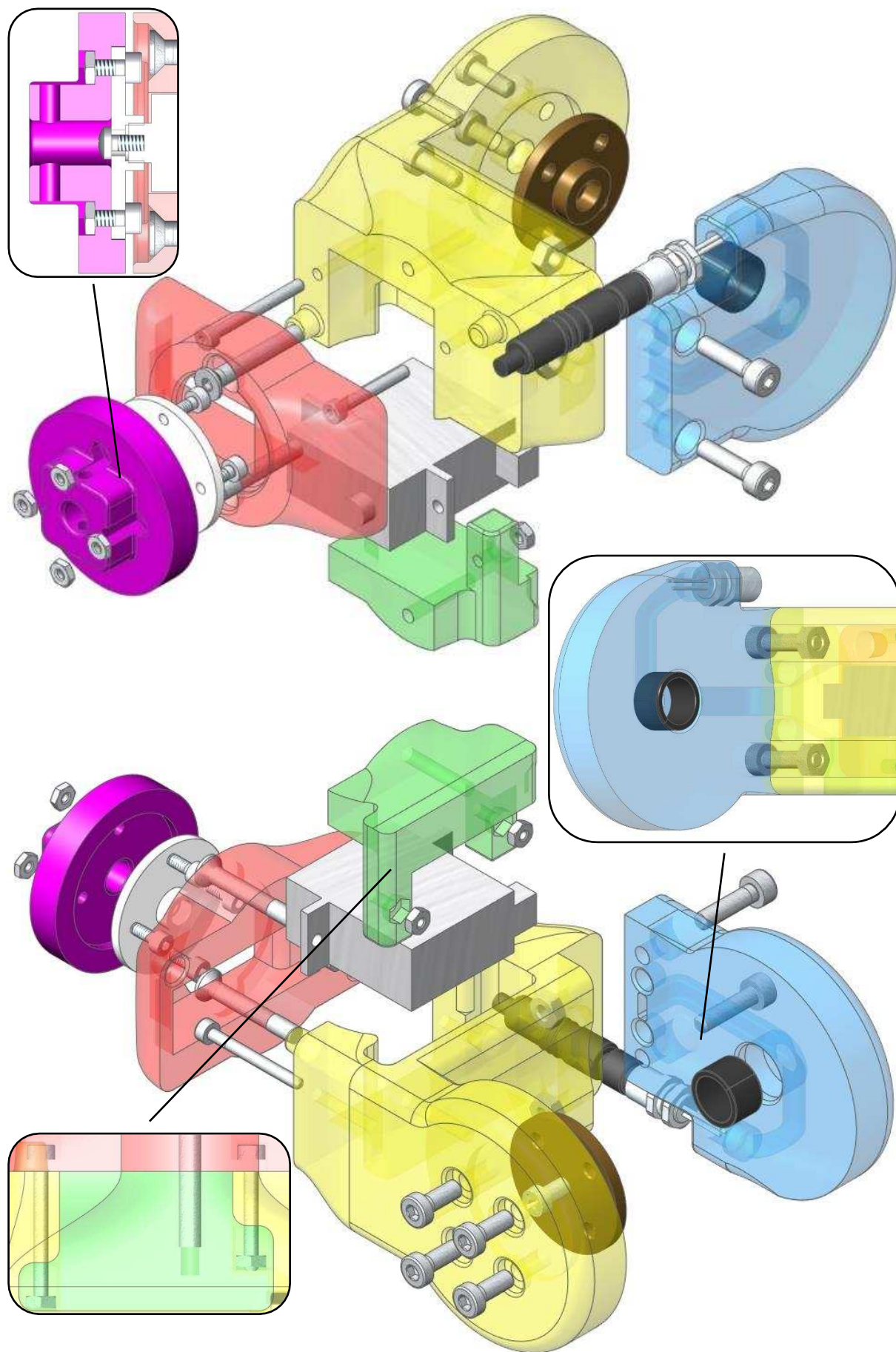
Obrázek 61 - Rameno 5

Na obrázku 62 je zobrazeno rameno 5 v rozstřelu. Jak již bylo psáno, toto rameno je k rameni 4 připojeno pomocí hliníkového servo kolečka (hnědá barva), které přenáší kroučící moment ze servomotoru ramene 4, a pomocí kluzného pouzdra, které je uloženo v podpěře (modrá barva). Servo kolečko je k servomotoru přišroubováno pomocí šroubu M3x6 a k rameni (žlutá barva) pomocí čtyř imbusových šroubů M3x8 se sníženou hlavou.

Podpěra je vůči rameni polohována pomocí středících prvků a přišroubována dvojicí imbusových šroubů M3x12 společně s maticemi M3, které jsou umístěny v otvorech v těle ramene. Do ramene je vložen servomotor (stříbrná barva), přes který je opět nasunuto víko (zelená barva). Ve víku jsou vytvořena osazení pro matice M2, pomocí kterých je, společně s imbusovými šrouby M2x20 a M2x15, servomotor přichycen k rameni a víku. Rozdílné délky šroubů jsou zde opět z důvodu maximálního využití nosného materiálu ramene v případě delšího šroubu a z důvodu výskytu kabelového vedení servomotoru v případě kratšího šroubu. Přes servomotor je opět nasazen kryt (červená barva), který je k víku a rameni přišroubován dvojicí imbusových šroubů M3x20 se zapuštěnou hlavou, přičemž závity pro tyto šrouby jsou opět vyříznuty přímo do těla ramene a víka. Víko je opět vůči rameni polohováno pomocí středících prvků.

Jelikož ramenem 5 je realizována poslední rotace z šesti stupňů volnosti, je již na výstupní hřídel servomotoru tohoto ramene připojen koncový efektor. Jak plyne z požadavků zadavatele této diplomové práce, bylo třeba navrhnout takový mechanismus, který zajistí jednoduchou montáž a demontáž koncového efektoru, popřípadě příslušenství pro NDT inspekce. Pro tento účel byla navržena propojka (fialová barva), která je k rameni přichycena prostřednictvím plastového servo kolečka (bílá barva). Propojka je k servo kolečku přišroubována pomocí čtyř imbusových šroubů M2x5 a matic M2, pro které je v propojce vytvořeno přesné osazení. Servo kolečko je poté k servomotoru přišroubováno pomocí šroubu M2x4.

Co se kabelového vedení týče, tak do ramene 5 vstupuje kabelový svazek osou rotace kluzného pouzdra, kde to vytvořený otvor. Tento otvor se následně rozvětví na dva kanály. Jeden kanál vede k servomotoru v rameni 5 a druhý kanál vede ven z ramene. V tomto místě totiž kabelový svazek opět vystupuje z ramene, a to z toho důvodu, že koncový efektor má být odpojitelý od ramene, tudíž i kabelové vedení k servomotoru, které ho napájí, musí být rozpojitelé. Jako vyhovující byl opět zvolen konektor firmy Binder série 718, akorát v rozměru M5. Jedná se o šroubovací konektor se 3 kontakty a stupněm ochrany IP 67. Do ramene 5 bude namontována samice tohoto konektoru a samec bude součástí kabelového vedení koncového efektoru. [54] [55]



Obrázek 62 - Rameno 5 - rozstřel + details

6.9.1 MKP analýza

Při úpravě modelu pro MKP analýzu došlo, stejně jako v předešlých případech, ke zjednodušení. Byly nahrazeny 3D šroubové spoje 1D elementy, byly odstraněny kanály vnitřního vedení kabelového svazku a některé rádiusy. Velká část rádiusů však byla zachována, a to z toho důvodu, že ne všechny rádiusy je možno odstranit, jelikož se jedná o komplikované tvary, především na krytu servomotoru. Navazující rádiusy na rameni a podpěře byly zachovány z důvodu návaznosti. Rameno bude opět zatěžováno maximálními možnými momenty, které jsou servomotory mající vazbu na rameno 5 schopny produkovat.

Pouze kluzné pouzdro bylo zasítované taženou sítí s meziuzlem CHEXA(20), zatímco zbytek ramene čtyřstěnnými elementy s meziuzlem CTETRA(10). Modře jsou na obrázku 63 znázorněny součásti vyrobené na 3D tiskárně, červeně servomotor, hnědě hliníkové servo kolečko a zeleně kluzné pouzdro. Žlutě jsou na obrázku 63 znázorněny 1D elementy jako jsou šroubové spoje nebo RBE2 a RBE3 elementy. Plastové servo kolečko a propojka jsou počítány v MKP analýze koncového efektoru, viz následující kapitola. Předpoklady ohledně materiálových vlastností, viz kapitola 6.1.

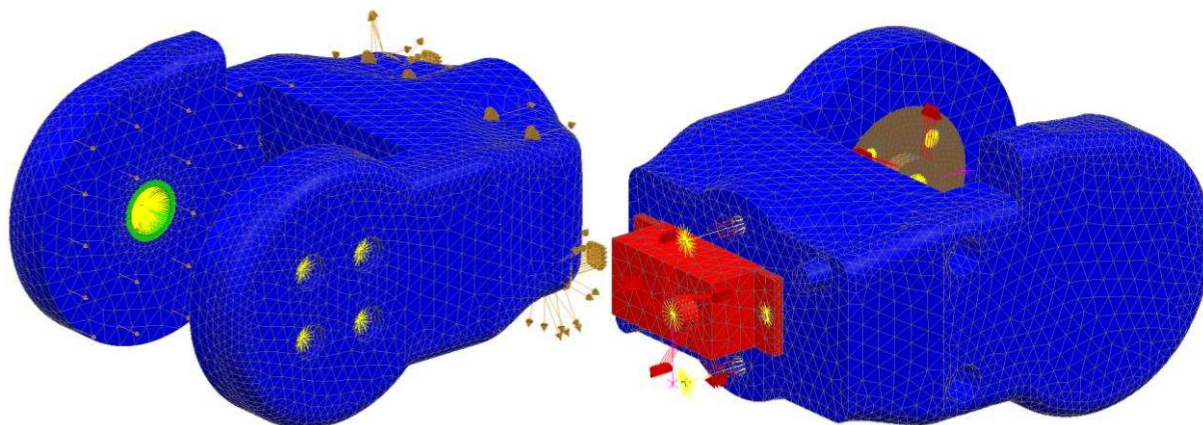
Mezi součástmi, které jsou spojeny pomocí šroubových spojů, je realizována vazba Surface-to-Surface Contact. Pro všechny třecí plochy je uvažován koeficient tření 0,3.

Jako zátěžné stavy jsou u tohoto ramene, mimo jiné, aplikovány dva momenty. Jeden o velikosti 1,16 Nm je aplikován na vnitřní osazení vstupního hliníkového servo kolečka. Druhý moment o velikosti 0,61 Nm je aplikován na výstupní hřídel servomotoru, viz červené šipky na obrázku 63. Souhrn všech zatěžujících účinků je v tabulce 17.

Zatížení	Hodnota
Moment od servomotoru J5	1,16 Nm
Moment od servomotoru J6	0,61 Nm
Předepnutí šroubového spoje M2	110 N
Předepnutí šroubového spoje M3	230 N

Tabulka 17 - Zatížení ramene 5

Všechny stupně volnosti, kromě rotace okolo osy rotace hřídele servomotoru v rameni 4, jsou odebrány ve středu RBE2 elementu vytvořeného z plochy vnitřního osazení hliníkového servo kolečka. Posuv ve svislém a podélném směru je odebrán ve středu RBE2 elementu vytvořeného z vnitřní plochy kluzného pouzdra. Poslední omezení, které je při této MKP analýze aplikováno je odebrání možnosti svislého posuvu výstupní hřídele servomotoru. Tato omezení simulují situaci, kdy je koncový efektor znehybněn a oba servomotory mající vazbu na rameno 5 produkují maximální krouticí moment.

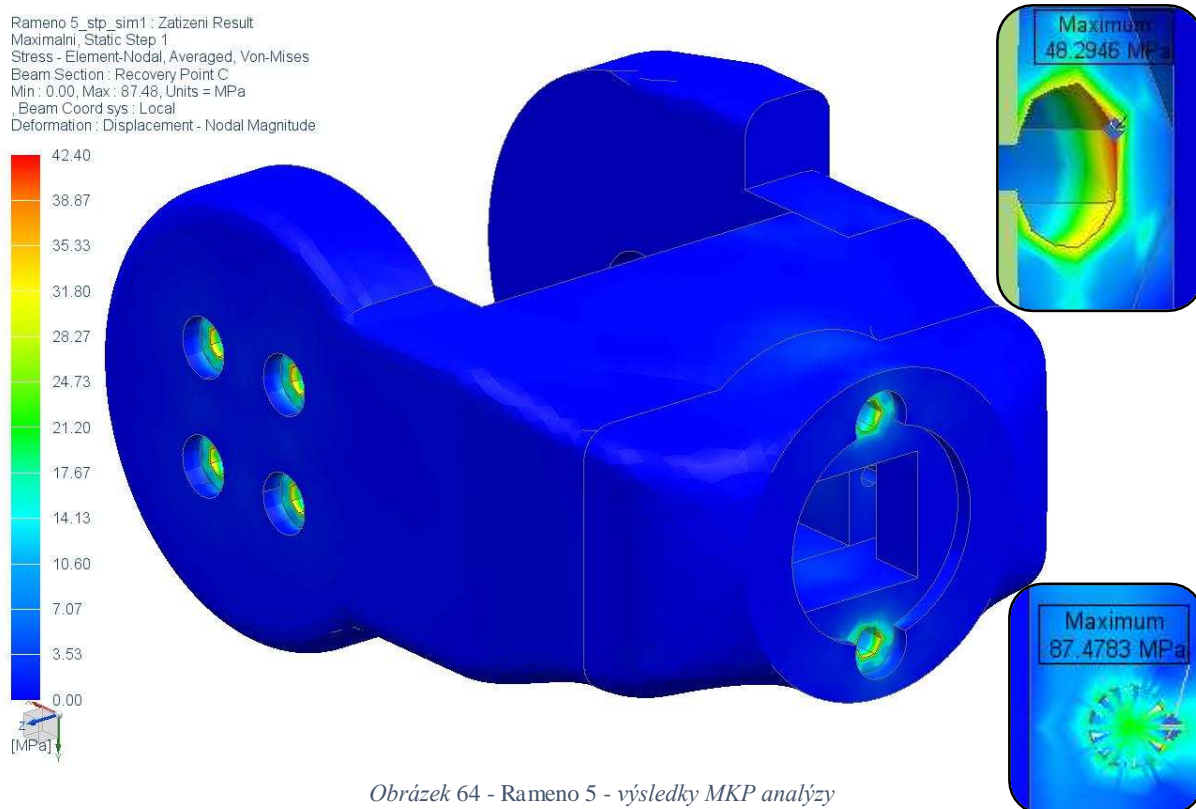


Obrázek 63 - Rameno 5 - síť + okrajové podmínky

Z obrázku 64 je patrné, že maximální napětí, 87,5 MPa, vypočítané pomocí MKP analýzy se opět nachází v napojení RBE3 elementu k otvoru v servomotoru. Toto napětí pro vyhodnocení pevnosti součástí tištěných na 3D tiskárně není důležité. Proto byly všechny součásti, které se nevyrábí pomocí 3D tisku skryty. Maximální napětí na součástech vyrobených pomocí 3D tiskárny má hodnotu 48,3 MPa. Toto napětí bylo zjištěno v místě napojení RBE3 elementu nahrazující matici M3 v osazení, uvnitř ramene. Opět se jedná o špičku napětí, která vznikla napojením dokonale tuhého elementu RBE3 k hraně otvoru pro šroub. Takto velké napětí se zde ve skutečnosti vyskytovat nebude. Maximální napětí naměřené mimo šroubové spoje nepřesáhne hodnotu 10 MPa. V tomto případě se jedná o bezpečnost přibližně 4,2 vůči mezi pevnosti materiálu VisiJet M3 Crystal.

Materiál	Maximální napětí (mimo 1D elementy) [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Bezpečnost
VisiJet M3 Crystal	10	42,4	4,2

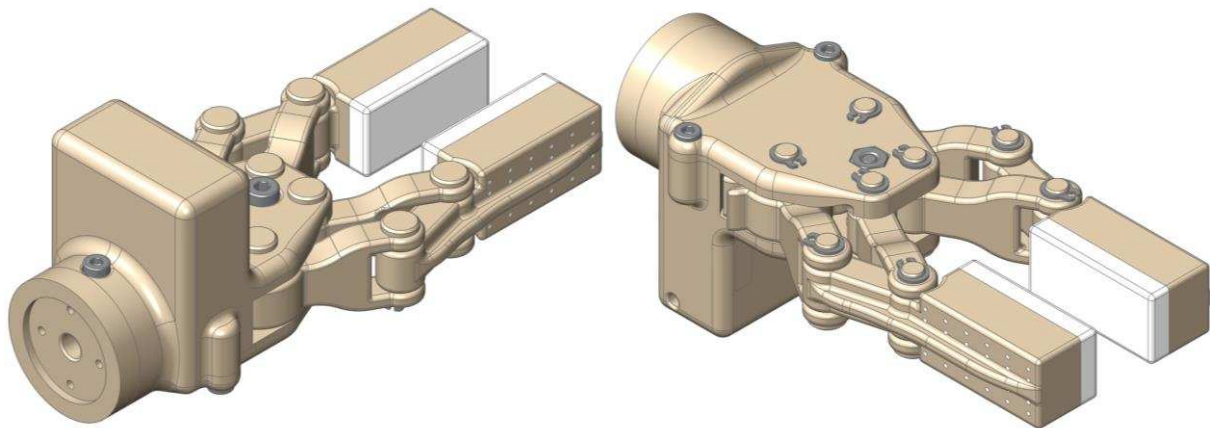
Tabulka 18 - Rameno 5 - výsledky MKP analýzy



Obrázek 64 - Rameno 5 - výsledky MKP analýzy

6.10 Koncový efektor

Koncový efektor je poslední částí robotického ramene. Ve složeném stavu ho můžeme vidět na obrázku 65. Koncový efektor je navržený jako dvoučelistový, paralelní s využitím paralelogramu a je poháněn servomotorem. Koncový efektor je navržený tak, aby ho bylo možné snadno vyměnit za jiný koncový efektor. Připojení ke zbytku ramene je realizováno pomocí přípojky, viz předchozí kapitola. Maximální vzdálenost mezi rozevřenými čelistmi je 46 mm.

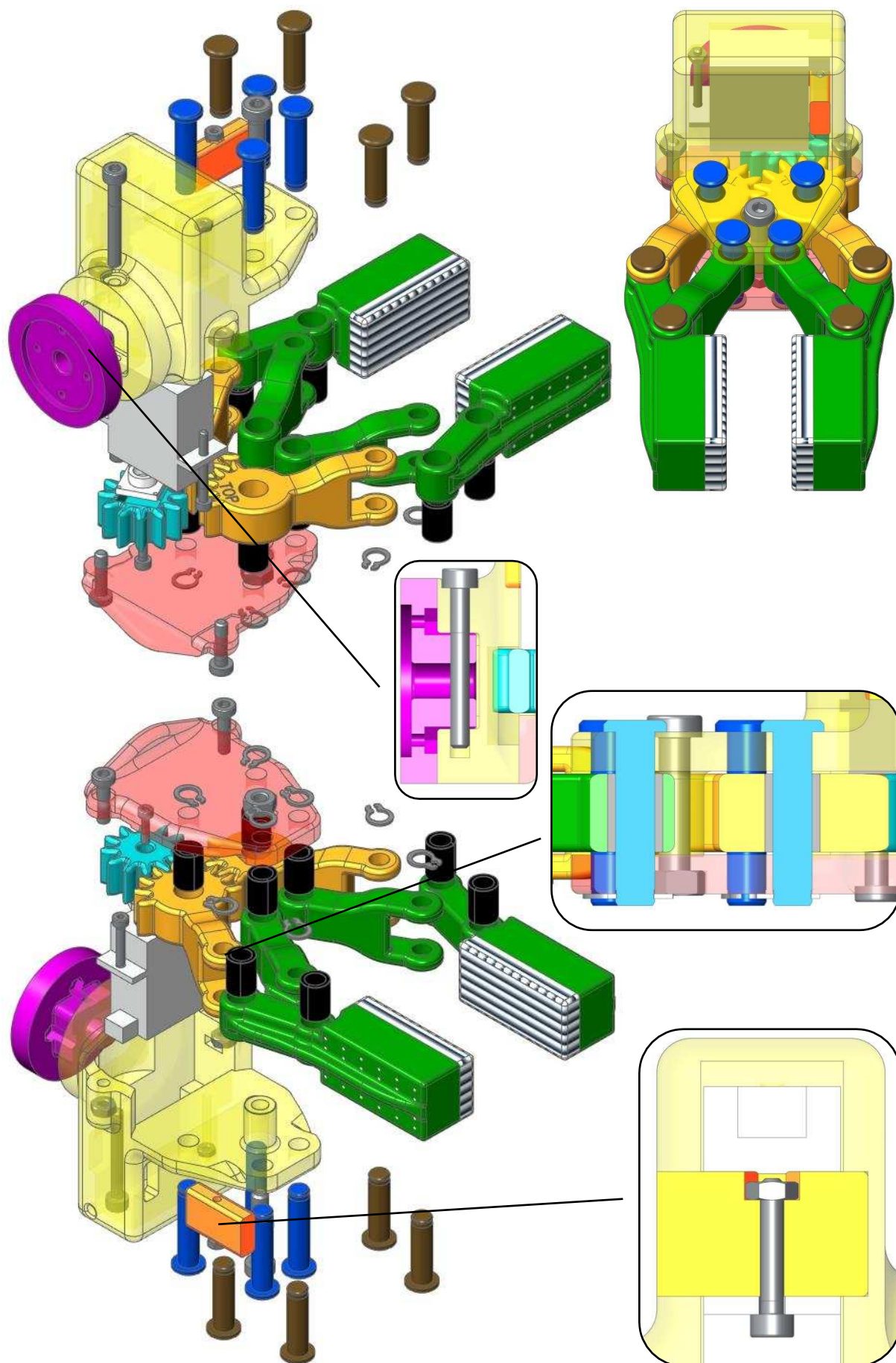


Obrázek 65 - Koncový efektor

Na obrázku 66 je vidět koncový efektor v rozstřelu. K rameni 5 je koncový efektor přichycen pomocí přípojky (fialová barva), která je v základně koncového efektoru (žlutá barva) zajištěna imbusovým šroubem M3x25. Jelikož koncové čelisti mají být poháněny servomotorem, bylo zapotřebí vytvořit v základně přichycení tohoto servomotoru (stříbrná barva). V základně je proto vytvořena kapsa, do které bude servomotor uložen. Nejprve se však vloží matice M2 do osazení vytvořeného na boku této kapsy, pomocí které dojde k přichycení servomotoru k základně. Poté je servomotor vložen do kapsy v základně a na jedné straně přišroubován pomocí imbusového šroubu M2x20. Na druhé straně je z čela základny zasunuta přepážka (oranžová barva), ve které je vložena druhá matice M2. Tato přepážka je realizována z důvodu výskytu kabelového vedení na boku servomotoru, tudíž v případě pevné přepážky v těle základny by byla zamezena snadná montáž servomotoru do základny. Do matice umístěné v přepážce je následně zašroubován imbusový šroub M2x12.

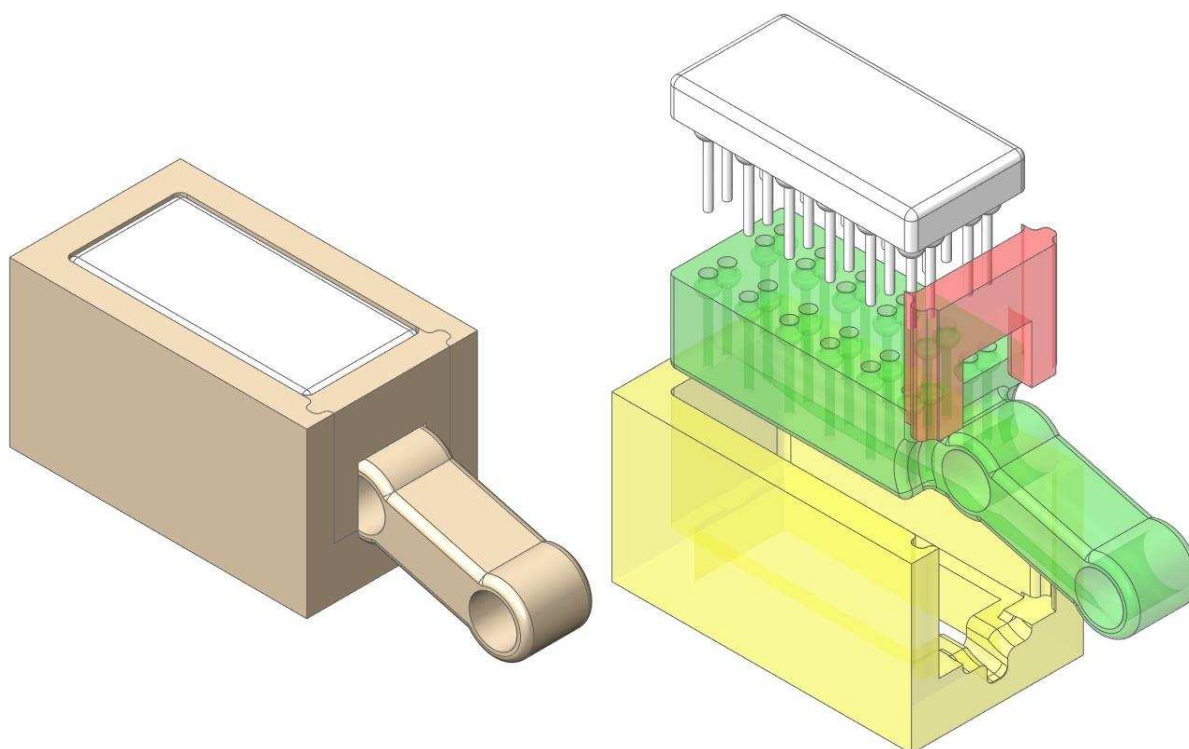
Krouticí moment ze servomotoru je na koncové čelisti (zelená barva s pruhovanými konci) přenášen přes ozubené kolo (tyrkysová barva) a ramena s ozubením (zlatá barva). Mezi ozubeným kolem a ramenem s ozubením je realizovaný převodový poměr 1,25. Mezi jednotlivými rameny s ozubením je převodový poměr 1. Aby byl paralelogram kompletní, je doplněn o podpěrná ramena (zelená barva). Na ozubené kolo je krouticí moment přenášen přes servo páku (bílá barva), která je seříznuta do čtvercového tvaru a vložena do ozubeného kola. K servomotoru je ozubené kolo se servo pákou přišroubováno pomocí imbusového šroubu M2x8.

Všechny pohyblivé klouby paralelogramu jsou realizovány pomocí kluzných pouzder PCM 050710 E (černá barva) a čepů o průměru 5 mm různých délek zajištěných pomocí vnějšího pojistného kroužku. Delší, 20 mm dlouhé čepy (modrá barva), jsou použity pro přichycení paralelogramu k základně a krytu (červená barva). Kratší, 17 mm dlouhé čepy (hnědá barva), pak spojují jednotlivá ramena paralelogramu. Přes hnací mechanismus paralelogramu je nasazen kryt, který je k základně koncového efektoru přišroubován pomocí tří šroubů. Jedním imbusovým šroubem M4x20 se sníženou hlavou společně s maticí M4 a dvojicí imbusových šroubů M3x12 se sníženou hlavou, pro jejichž matice M3 jsou v základně vytvořena osazení. [56]



Obrázek 66 - Koncový efektor - rozstřel + detaily

Na koncových čelistích je nanášeno lepidlo MAMUT GLUE High Tack (černobílé pruhy na obrázku 66), které má, ze zkušeností zaměstnanců Centra výzkumu Řež, příznivé třecí vlastnosti. V koncových čelistech jsou vytvořeny otvory s vnitřním zahloubením, do kterých se lepidlo natlačí, čímž dojde ke kvalitnímu silovému spojení. Pro nanášení lepidla na čelist koncového efektoru byla navržena forma viz obrázek 67. Vlevo na obrázku je forma ve složeném stavu společně s čelistí a nanášeným lepidlem. Vpravo je pak rozstřel této sestavy. Tato forma, stejně jako čelist, je tištěná na 3D tiskárně. Při nanášení lepidla je do základny formy (žlutá barva) vsunuta čelist (zelená barva) a z čela je forma uzavřena přepážkou (červená barva). Poté je na čelist nanášeno lepidlo a vtlačeno do vnitřních otvorů čelisti. Po zarovnání lepidla podle vrchní hrany formy je čelist z formy vysunuta a odstraněna přepážka. Po vytvrzení lepidla je na čelisti 5 mm vysoká vrstva lepidla zvyšující koeficient tření mezi čelistí a přemísťovaným objektem. [57]



Obrázek 67 - Koncový efektor - forma na lepidlo

6.10.1 MKP analýza

V této kapitole budou provedeny a vyhodnoceny dvě MKP analýzy. Jedna se bude týkat zatížení koncového efektoru momentem od servomotoru umístěného v rameni 5 a hmotností přemísťovaného břemene a druhá MKP analýza bude věnována kontrole únosnosti paralelogramu a čelistí na zatížení od krouticího momentu servomotoru, umístěného v základně koncového efektoru.

6.10.1.1 Kompletní koncový efektor

I model koncového efektoru byl zjednodušen pro účely MKP analýzy. Zjednodušení opět spočívalo v odstranění rádiusů a nahrazení 3D šroubů 1D elementy. Jako zatěžující stav je volena kombinace maximálního momentu působícího od servomotoru z ramene 5 a síly vyvolané hmotností přemísťovaného břemene.

Všechny součásti, kromě kluzných pouzder, jsou zasítované čtyřstěnnými elementy s meziuzlem CTETRA(10). Kluzná pouzdra jsou zasítované taženou sítí s meziuzlem CHEXA(20). Na obrázku 68 jsou modře zasítované součásti tištěné na 3D tiskárně, červeně

servomotor, zeleně ocel a hnědě hliník. Žlutě jsou zobrazené 1D elementy, jako jsou šroubové spoje a RBE2 nebo RBE3 elementy. Předpoklady ohledně materiálových vlastností, viz kapitola 6.1.

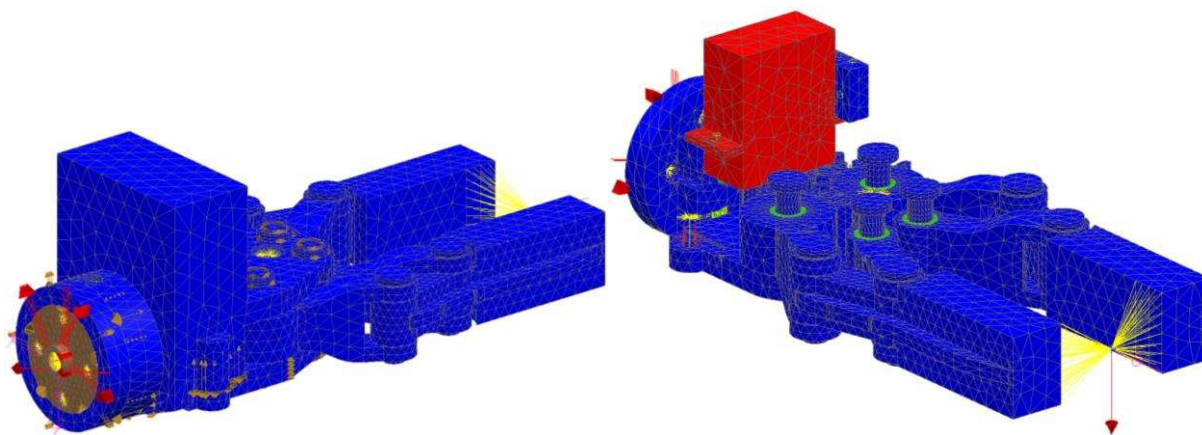
Mezi součástmi, které jsou spojeny pomocí šroubových spojů, je realizována vazba Surface-to-Surface Contact. Pro všechny třecí plochy je uvažován koeficient tření 0,3.

Jak bylo psáno výše, koncový efektor je zatížen momentem od servomotoru z ramene 5 a silou, kterou vyvolává hmotnost břemene. Moment o velikosti 0,61 Nm je aplikován na vnitřní osazení hliníkového servo kolečka. Síla o velikosti 2 N je aplikována do středu RBE2 elementu vytvořeného z koncových plošek čelistí. Souhrn všech zatěžujících sil a momentů je v tabulce 19.

Zatížení	Hodnota
Moment od servomotoru J6	0,61 Nm
Síla od hmotnosti břemene	2 N
Předeptnutí šroubového spoje M2	110 N
Předeptnutí šroubového spoje M3	230 N
Předeptnutí šroubového spoje M4	500 N

Tabulka 19 - Zatížení koncového efektoru

Ve středu RBE2 elementu vytvořeného z plochy vnitřního osazení hliníkového servo kolečka jsou odebrány všechny stupně volnosti kromě rotace okolo podélné osy. Tato rotace je odebrána v místě, kde je aplikována zatěžující síla od hmotnosti břemene, tedy ve středu RBE2 elementu vytvořeného z koncových plošek čelistí. Tyto okrajové podmínky simulují situaci, kdy dojde k blokaci přemísťovaného břemene, přičemž bude snaha o rotaci působením krouticího momentu ze servomotoru v rameni 5.

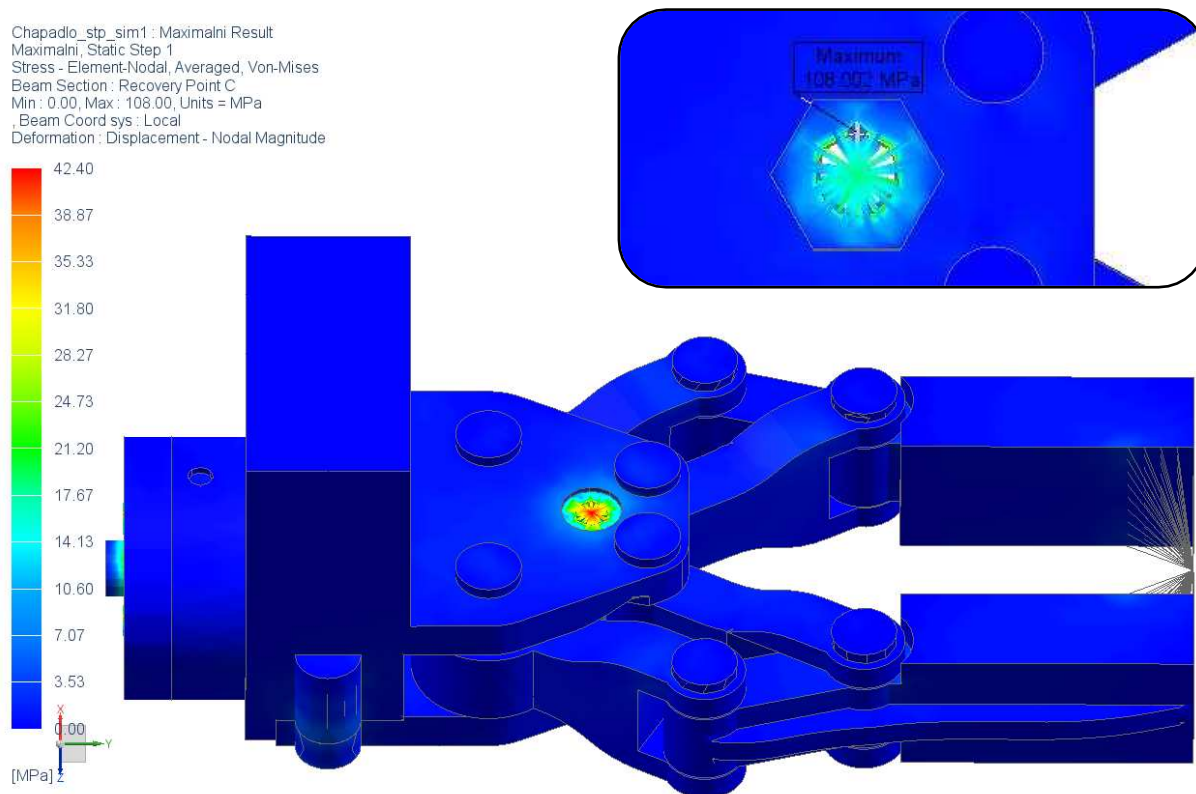


Obrázek 68 - Koncový efektor - síť + okrajové podmínky

Jak je patrné z obrázku 69, maximální napětí 108 MPa je opět v napojení RBE3 elementu 1D šroubového spoje, který v tomto případě nahrazuje matici M4. Toto maximální napětí je sice na součásti vyrobené pomocí 3D tisku, avšak jedná se opět pouze o špičkové napětí vzniklé napojením RBE3 elementu, tudíž ve skutečnosti se zde takovéto napětí vyskytovat nebude. Maximální napětí mimo šroubové spoje opět nepřekročí hodnotu 15 MPa. Opět se tedy jedná o bezpečnost přibližně 2,8 vůči mezi pevnosti materiálu VisiJet M3 Crystal.

Materiál	Maximální napětí (mimo 1D elementy) [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Bezpečnost
VisiJet M3 Crystal	15	42,4	2,8

Tabulka 20 - Koncový efektor - výsledky MKP analýzy



Obrázek 69 - Koncový efektor - výsledky MKP analýzy

6.10.1.2 Paralelogram

V případě paralelogramu došlo také ke zjednodušení modelu. Akorát v tomto případě byly úpravy trochu odlišné od předchozích MKP analýz. Jedno ze zjednodušení spočívá v použití pouze jedné poloviny z celého koncového efektoru, jelikož tyto poloviny jsou identické a výsledky na nich budou stejné. Druhé zjednodušení spočívá v řezu koncového efektoru podle roviny XY, viz obrázek 70, a využití tedy pouze jedné čtvrtiny koncového efektoru. Tento řez je možné provést z důvodu symetrie koncového efektoru podle této roviny, čímž dojde ke zrychlení výpočtu a ke snazšímu odebrání stupňů volnosti v prostoru. Ke zjednodušení došlo i v případě ozubeného kola, kdy bylo toto ozubené kolo nahrazeno válcem o průměru rovném průměru roztečné kružnice ozubeného kola.

Jediný zatěžující účinek působící na paralelogram je krouticí moment od servomotoru. Tento moment působí na válcové ploše, která vznikla zjednodušením ozubeného kola. V kapitole 6.3.2 Výpočet krouticího momentu servomotoru koncového efektoru byl vypočítán minimální potřebný krouticí moment servomotoru 0,23 Nm. Následně však byl vybrán servomotor produkující krouticí moment v rozmezí 0,37 – 0,61 Nm v závislosti na napětí. Proto bude servomotor napájen pouze 5 V, jelikož při tomto napětí produkuje servomotor nejnižší krouticí moment 0,37 Nm, který je pro udržení břemene dostačující. Velikost krouticího momentu ze servomotoru je však navýšen převodovým poměrem 1,25 ozubených kol přenášejších moment ze servomotoru na paralelogram. Krouticí moment působící na rameno paralelogramu s ozubeným kolem se vypočítá jako:

$$M_R = M_S * i = 0,37 * 1,25 = 0,463 \text{ Nm}$$

Kde: M_R - krouticí moment na rameni [Nm]

M_S - krouticí moment servomotoru [Nm]

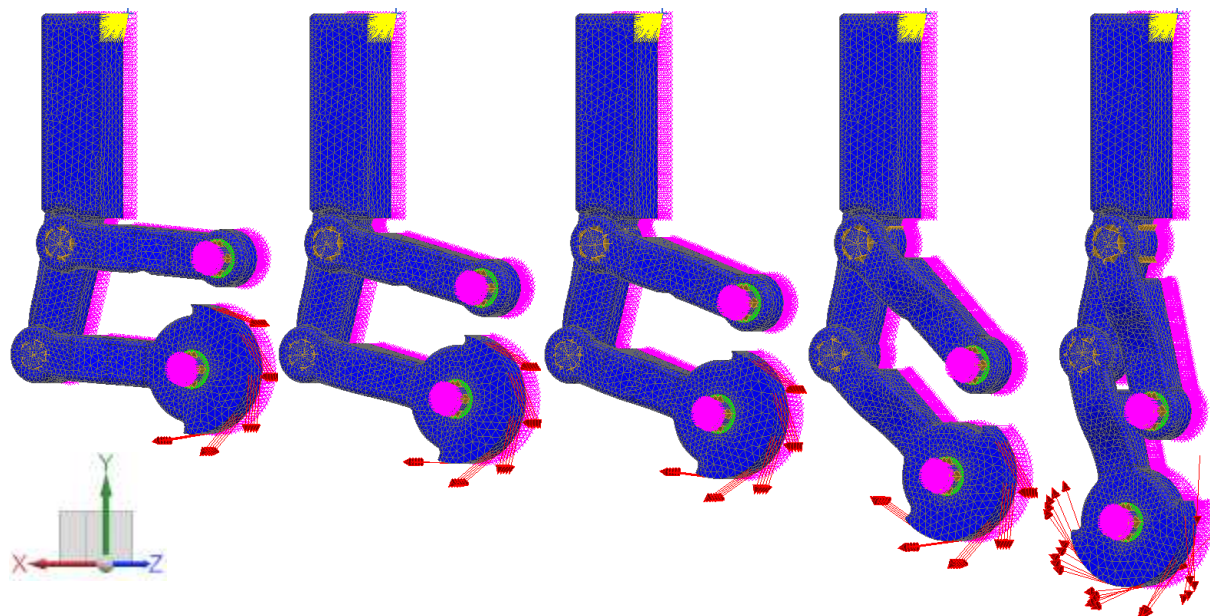
i - převodový poměr [-]

Toto je však kroučící moment, který působí na kompletní rameno paralelogramu. V našem případě došlo k řezu podle osy symetrie, kroučící moment tudíž bude poloviční. Velikost kroučícího momentu zadaného do MKP analýzy je proto 0,2315 Nm. V tabulce 21 je uveden zatěžující moment použitý v MKP a skutečná hodnota, působící na rameno paralelogramu.

Zatížení	Hodnota v MKP	Skutečná hodnota
Moment od servomotoru	0,2315 Nm	0,463 Nm

Tabulka 21 - Zatížení paralelogramu

Mechanismus koncového efektoru je namáhán pouze jedním momentem, avšak tento moment způsobuje různá namáhání v různých polohách paralelogramu. Proto je na obrázku 70 zobrazeno pět různých poloh paralelogramu. Poloha paralelogramu je dána úhlem mezi ramenem s ozubeným kolem a čelistí viz úhel α v kinematickém schématu vpravo na obrázku 71. Mechanismus koncového efektoru byl kontrolován v polohách daných právě tímto úhlem α , a to konkrétně v hodnotách (zleva na obrázku): 80°, 90°, 95°, 120°, 152°. Maximální rozevření čelistí nastává při 75° tohoto úhlu, avšak při tomto úhlu jsou ramena paralelogramu v nepříznivé poloze vůči čelisti a nositelce síly od sevření břemene, přičemž by při zatížení kroučícím momentem od servomotoru docházelo k nadměrnému namáhání. Proto pro výpočet bude brána jako nejmenší hodnota tohoto úhlu 80°. Hodnota 152° odpovídá maximálnímu sevření koncového efektoru, tedy dosednutí čelistí na sebe.

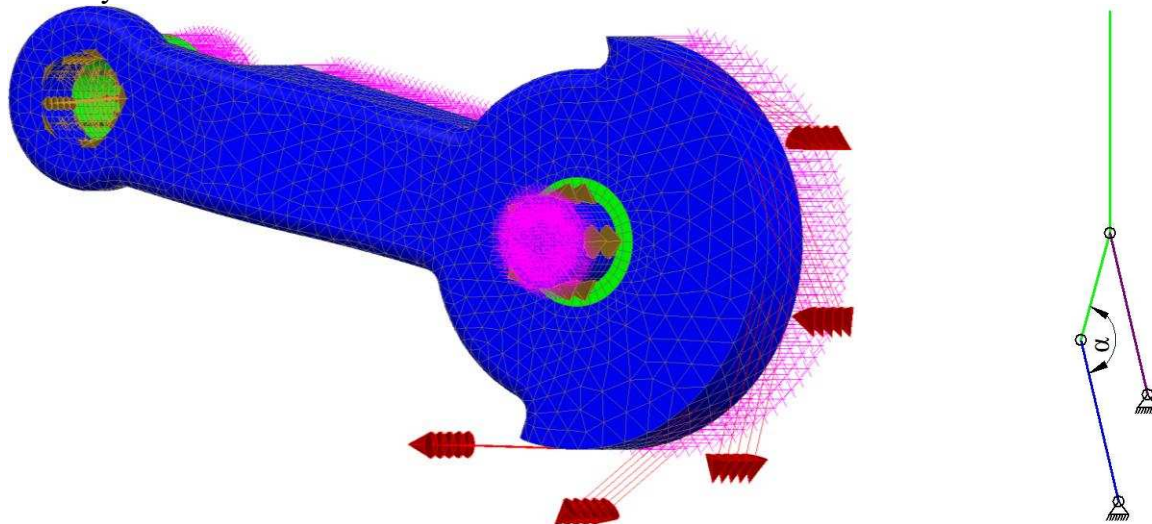


Obrázek 70 - Paralelogram - síť + okrajové podmínky + zkoumané polohy

Všechna ramena jsou zasítovaná čtyřstěnnými elementy s meziuzlem CTETRA(10). Čepy a kluzná pouzdra jsou zasítované taženou sítí s meziuzlem CHEXA(20), viz detail na obrázku 71. Na obrázku 70 a 71 jsou modře zasítované součásti vyrobené pomocí 3D tisku a zeleně jsou zasítovaná ocelová kluzná pouzdra. Žlutě je znázorněn RBE2 element, který bude sloužit pro odebrání stupně volnosti. Předpoklady ohledně materiálových vlastností, viz kapitola 6.1.

Kluzná pouzdra jsou s rameny pevně spojena pomocí funkce Mesh Mating. Mezi čepy a kluznými pouzdry je realizována vazba Surface-to-Surface Contact se součinitelem tření 0,03, jelikož to je minimální hodnota součinitele tření kluzných pouzder, a právě při tomto nejnižším součiniteli tření bude docházet k největšímu namáhání paralelogramu.

Při odebrání stupňů volnosti se s výhodou využije symetrické konstrukce mechanismu koncového efektoru, kdy se na plochách vzniklých řezem mechanismu odebere možnost posuvu ve směru osy Z viz obrázek 70 a 71. Všechny stupně volnosti jsou odebrány na vrchních plochách čepů, jež se starají o vazbu mechanismu se základnou a krytem koncového efektoru. Ve vrcholu RBE2 elementu, vytvořeného z koncové plochy čelisti, je zamezeno posuvu ve směru osy X.



Obrázek 71 - Paralelogram - detail ramene (vlevo) a kinematické schéma (vpravo)

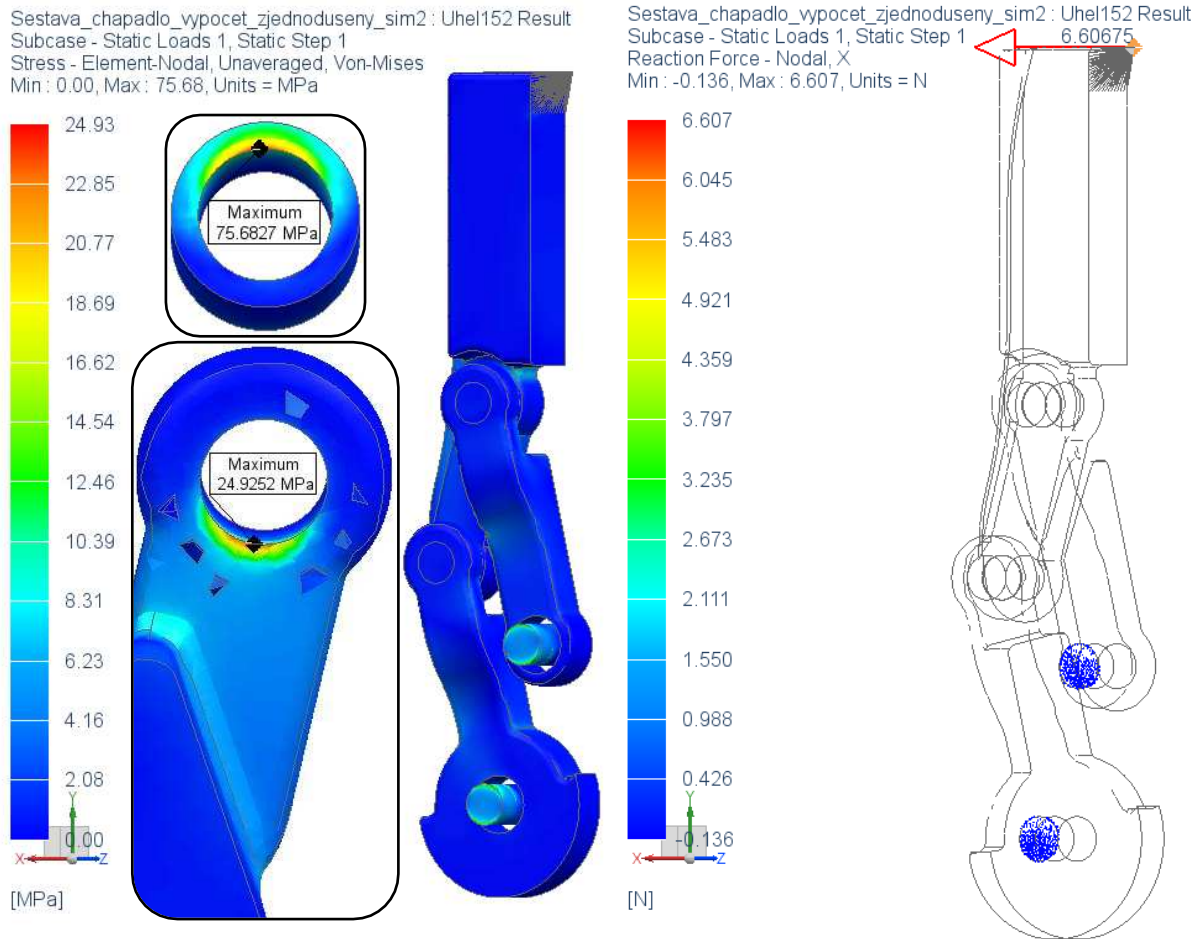
Na obrázku 72 je vidět příklad výsledků MKP analýzy. Maximální napětí této analýzy je bezmála 76 MPa. Tato hodnota je však zjištěna na kluzném pouzdra, nehledě na to, že se jedná o napětí na hraně, kde dochází ke kontaktu kluzného pouzdra s čepem. Jedná se tedy o špičku napětí, které ve skutečnosti nabude tak vysoké. Po skrytí všech součástí, které nejsou tištěny na 3D tiskárně, je zjištěno maximální napětí 25 MPa. Toto napětí je na hraně otvoru v rameni, kde dochází ke kontaktu s čepem. Jelikož se jedná o špičku napětí vzniklou kontaktem hrany na plochu, dá se předpokládat, že takto velké napětí se zde ve skutečnosti vyskytovat nebude. Jako maximální napětí, které nelze označit za singularitu, byla zjištěna hodnota 12 MPa. V porovnání s mezí pevností materiálu VisiJet M3 Crystal se jedná o bezpečnost přibližně 3,5.

Na obrázku 72 vpravo je vidět výsledek MKP analýzy z pohledu reakčních sil v ose X. Tento údaj udává, jakou silou působí čelist na přemísťované břemeno. Jako minimální potřebná síla pro udržení břemene o hmotnosti 200 g byla v kapitole 6.3.2 vypočítaná hodnota 9,8 N. Pomocí MKP analýzy byla zjištěna hodnota 6,6 N. Nutno si však uvědomit, že se opět jedná o polovinu ramene, které bylo rozděleno podle roviny symetrie XY. Tato hodnota je tedy také poloviční. Ve skutečnosti bude tato síla 13,2 N.

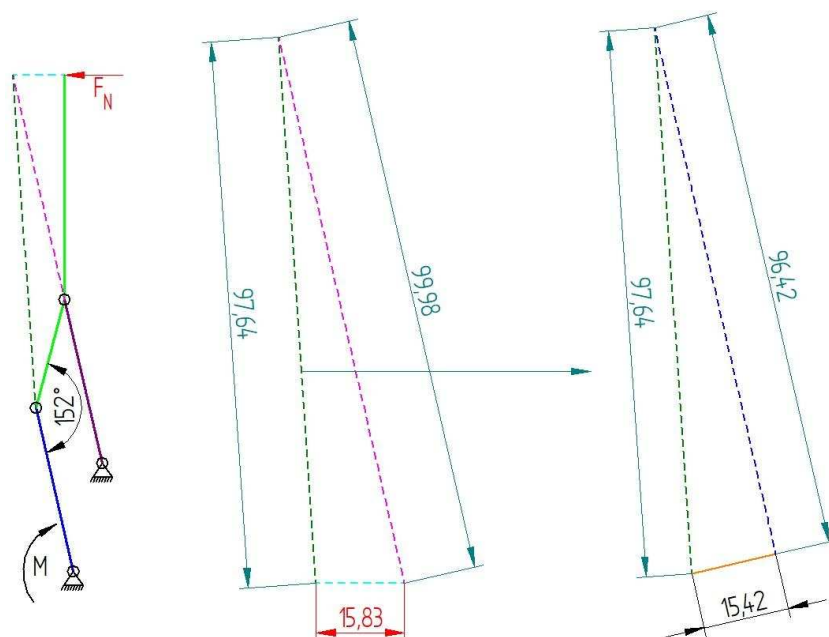
Kontrolu správnosti MKP výpočtů lze provést pomocí grafického řešení, viz kapitola 6.3.2. Na obrázku 73 je vidět grafické vyšetření síly působící na čelist od přemísťovaného břemene při uchopení. Černou barvou jsou opět znázorněné známé silové účinky a červeně je zobrazena síla, která je neznámá. Postup vyšetřování je identický s postupem v kapitole 6.3.2, akorát se postupuje opačným směrem. Zde stojí za zmínění pouze výpočet síly kolmé k modrému rameni, tedy síly, kterou produkuje moment 0,463 od servomotoru a převodu ozubenými koly na rameni 30 mm.

$$F = \frac{M}{r} = \frac{0,4625}{0,03} = 15,42 \text{ N}$$

Výsledná síla, zjištěná na tyrkysové nositelce, má velikost, při respektování měřítka $1 \text{ mm} = 1 \text{ N}$, $15,83 \text{ N}$. Pomocí MKP analýzy vyšla síla $13,2 \text{ N}$. Rozdíl mezi těmito hodnotami způsobuje zadané tření mezi kluznými pouzdry a čepy. Grafická metoda totiž s tímto třením nepočítá, zatímco MKP analýza ano. Pro kontrolu byl součinitel tření mezi kluznými pouzdry a čepy nastaven na nulu, přičemž se hodnoty naprosto shodovaly.



Obrázek 72 - Paralelogram - výsledky MKP analýzy - 152°



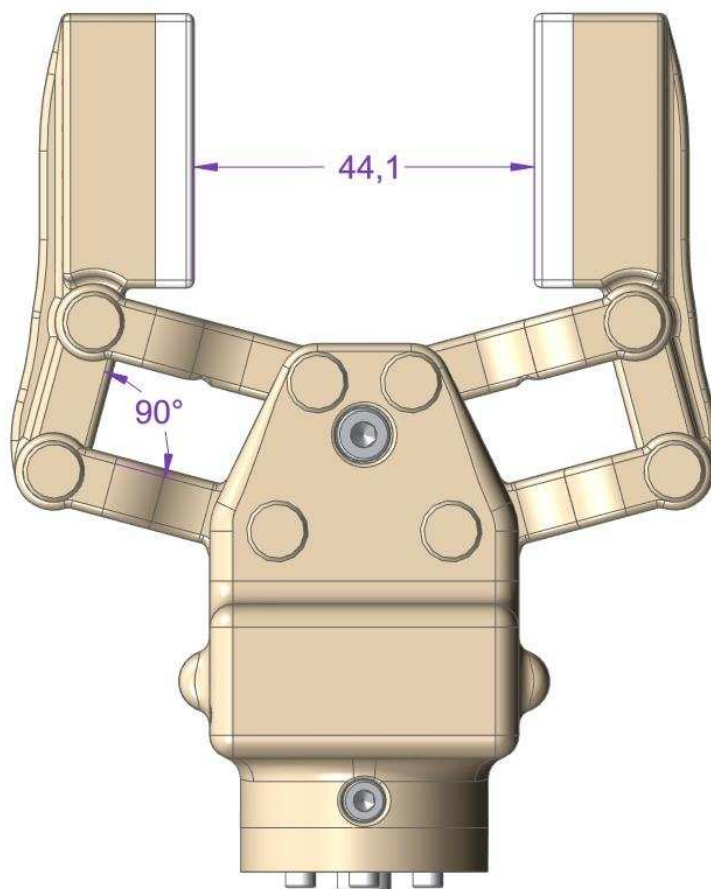
Obrázek 73 - Grafická metoda zjištění působící síly - 152°

Takto podrobné vyhodnocení výsledků při této poloze mechanismu koncového efektoru bylo pouze vzorové, přičemž výsledky ostatních poloh mechanismu jsou v tabulce 22.

Úhel α [°]	Maximální napětí [MPa]	Mez pevnosti [MPa]	Bezpečnost	Síla dle MKP [N]	Síla dle graf. řež. [N]
80	300	42,4	-	-	176,9
90	21	42,4	2,1	48,4	59,6
95	17	42,4	2,5	36,7	45,1
120	14	42,4	3	19,2	21,8
152	12	42,4	3,5	13,2	15,8

Tabulka 22 - Výsledky výpočtů paralelogramu

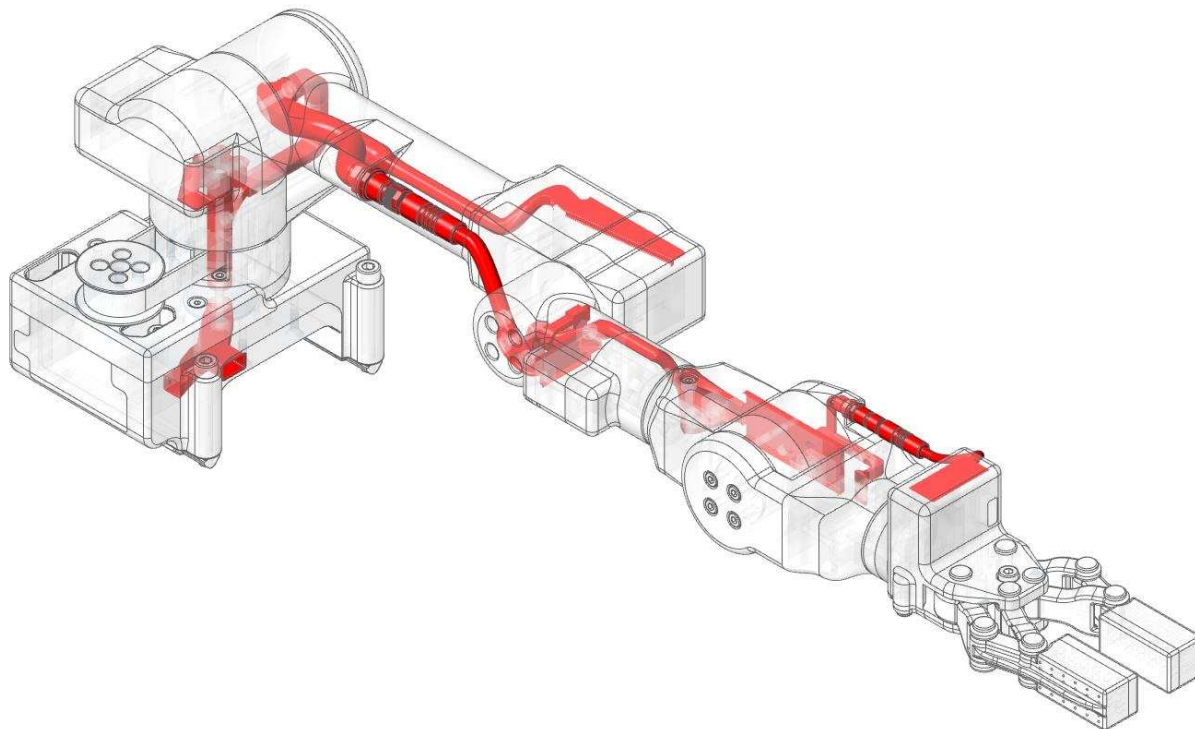
Z tabulky je patrné, že nejméně je mechanismus koncového efektoru zatížený krouticím momentem ze servomotoru a při zablokovaných čelistech namáhán při maximálním sevření. Naopak nejvíce je mechanismus namáhán při maximálním rozevření. Maximální rozevření čelistí, jak již bylo psáno výše, nastává při hodnotě úhlu $\alpha = 75^\circ$. Tato hodnota je z pohledu namáhání mechanismu krouticím momentem nepříznivá, proto byla jako nejnižší hodnota úhlu α zvoleno 80° . Jak je patrné z tabulky a z výsledků výpočtů, i tato hodnota je z pohledu namáhání mechanismu krouticím momentem nepříznivá. Proto je potřeba například elektronicky zajistit to, aby servomotor zabíral svým maximálním krouticím momentem až po překonání 90° hodnoty úhlu α . Koncový efektor tak bude schopen uchopit pouze předměty o velikosti 44 mm, viz obrázek 74.



Obrázek 74 - Maximální rozměr přemísťovaného břemene

6.11 Kabelové vedení

Kabelové vedení bylo v průběhu práce zmiňováno pouze okrajově, proto v této kapitole bude celý kabelový svazek popsán. Ke každému servomotoru je potřeba vést tři kabely. Dva kabely napájecí (kladný a záporný pól stejnosměrného napětí) a jeden kabel sloužící pro vedení řídicího signálu. Na obrázku 75 je pohled na kompletní kabelové vedení, kde červenou barvou jsou znázorněny kanály a prostory, kudy vede kabelový svazek. V tabulce 23 jsou uvedeny maximální hodnoty napětí, kterými lze servomotory napájet.



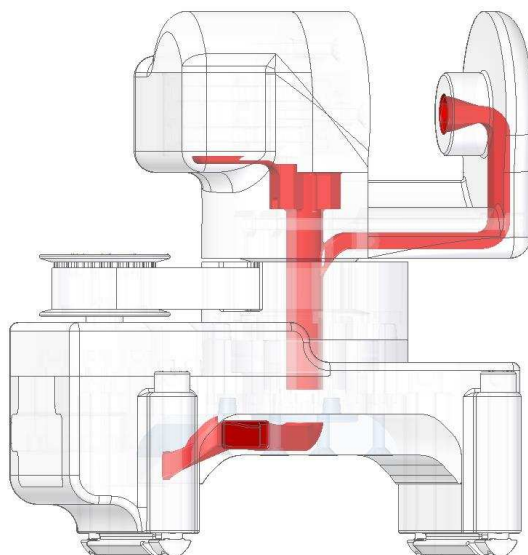
Obrázek 75 - Celkový pohled na kabelové vedení

Servomotor	Maximální napětí [V]
J1	6
J2	8,4
J3	8,4
J4	8,4
J5	8,4
J6	8,4
Koncový efektor	5

Tabulka 23 - Maximální napětí servomotorů

6.11.1 Základna a rameno 1

Jelikož kompletní rameno obsahuje celkem sedm servomotorů a ke každému je potřeba vést tři kabely, do základny robotického ramene tudíž vede 21 kabelů. Ihned za vstupem do ramene je vytvořena odbočka pro tři kabely sloužící pro napájení a řízení servomotoru obstarávajícího pohyb v kloubu J1, viz obrázek 76. Zbylé kabely jsou taženy kabelovým vedením základny do středu rotace ramene 1. Ramenem 1 jsou vedeny vzhůru, kde se přibližně v půlce opět rozdělují. V tomto místě totiž dochází k oddělení opět tří kabelů, vedoucích k servomotoru obstarávajícímu pohyb kloubu J2. Ostatní kabely jsou vedeny do podpěry, která je směřuje do středu rotace kloubu J2 a kde pokračují do ramene 2.

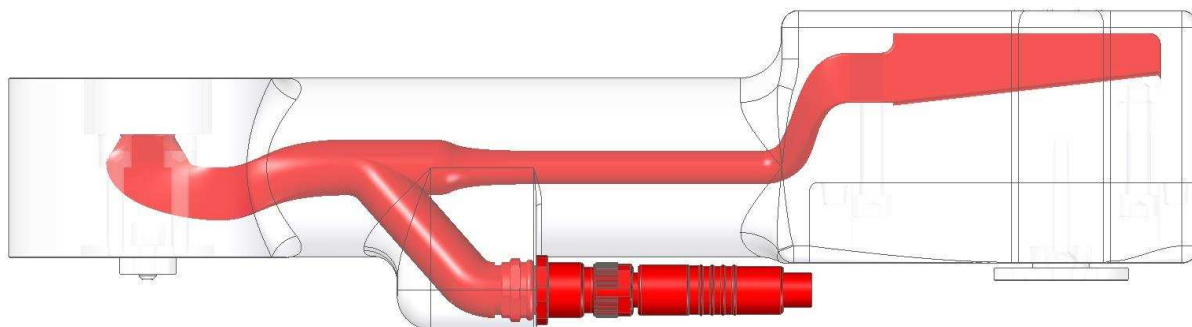


Obrázek 76 - Kabelové vedení - základna a rameno 1

6.11.2 Rameno 2

Jak již bylo psáno, kabelový svazek vstupuje do ramene 2 středem rotace kloubu J2 viz obrázek 77. Kabelový svazek pokračuje kanálem vytvořeným uvnitř ramene 2, kde se následně opět rozděluje. Tři kabely pokračují ramenem k servomotoru obstarávajícímu rotaci kloubu J3. Jelikož kabely dodávané společně se servomotorem jsou příliš krátké, je nad servomotorem vytvořena kapsa pro možnost napojení těchto kabelů. Kabely jsou vodotěsně spojeny pájecí spojkou se smršťovací bužirkou, viz kapitola 5.4.2.

Zbýlý kabelový svazek je veden odbočujícím kanálem ke konektoru firmy Binder série 718 v rozměru M8, kde kabely vystupují ven z ramene.



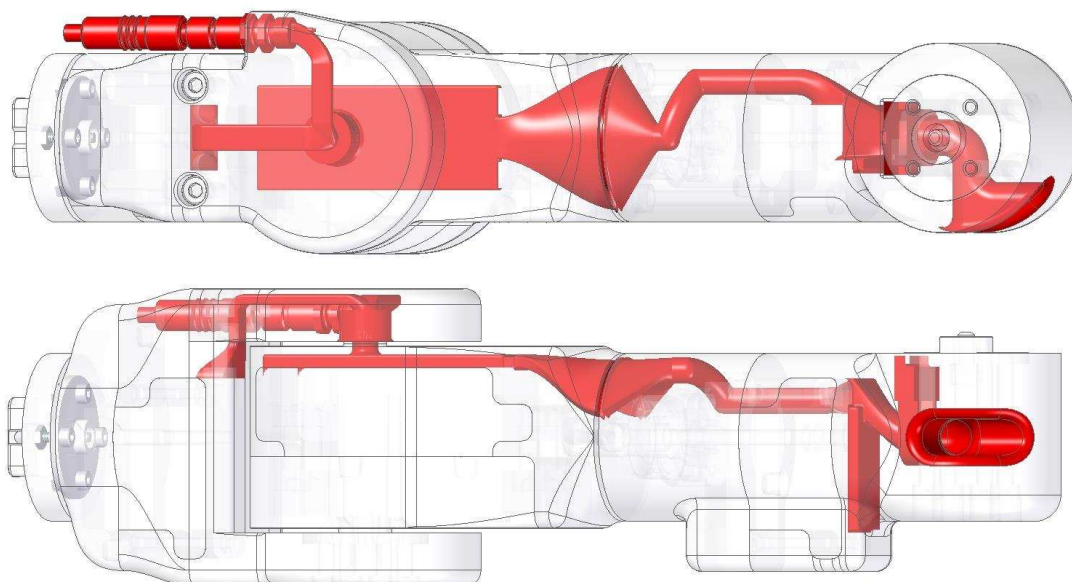
Obrázek 77 - Kabelové vedení - rameno 2

6.11.3 Rameno 3, 4 a 5

Kabelový svazek pokračuje z konektoru do ramene 3, viz obrázek 78. V rameni 3 je pro kabelový svazek vytvořeno vyříznutí, díky kterému se kabelový svazek může volně pohybovat při rotaci ramene okolo kloubu J3. Po vstupu do ramene 3 je kabelový svazek zajištěn pomocí stahovacího pásku, pro který je v rameni vytvořena kapsa. Kabelový svazek je vedený ramenem 3 až za servomotor obstarávající rotaci kloubu J4, kde se opět oddělují tři kabely, které slouží k napájení a řízení tohoto servomotoru. Za servomotorem je opět vytvořena kapsa, kde dochází ke spojení kabelového vedení s kabely servomotoru.

Od servomotoru obstarávajícího rotaci kloubu J4 je kabelový svazek veden zbytkem ramene do krytu ramene 3. V tomto krytu a v rameni 4 jsou vytvořeny jakýsi trychtýře, díky kterým je umožněna rotace těchto dvou ramen vůči sobě v rozsahu více jak 180°. Z těchto trychtýřů je kabelový svazek veden za servomotor obstarávající rotaci kloubu J5. Za tímto

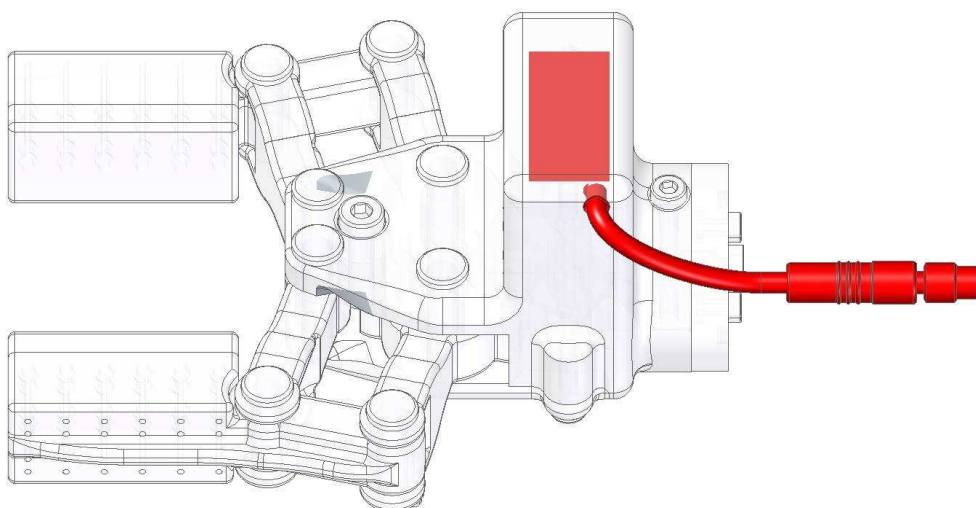
servomotorem je vytvořena velká kapsa, kde jsou spojeny zbylé kabely vedoucí od servomotorů obstarávajících rotace kloubů J5 a J6 a kabely vedoucí od konektoru firmy Binder série 718 velikosti M5, jež slouží k připojení koncového efektoru. Kabely vedoucí k servomotoru kloubu J6 a kabely konektoru vychází z prostoru za servomotorem středem rotace kloubu J5 a vstupují do podpěry. V podpěře se kabelové vedení dělí, kdy tři kabely vedou k servomotoru kloubu J6 a tři kabely ke konektoru.



Obrázek 78 - Kabelové vedení - rameno 3, 4 a 5

6.11.4 Koncový efektor

Z konektoru na rameni 5 pokračuje kabelový svazek do koncového efektoru, viz obrázek 79. Do toho vstupuje otvorem na boku ve vrchní části koncového efektoru. Nad servomotorem obstarávajícím pohyb čelistí je vytvořený prostor, kde dochází ke spojení kabelů z konektoru a kabelů servomotoru.

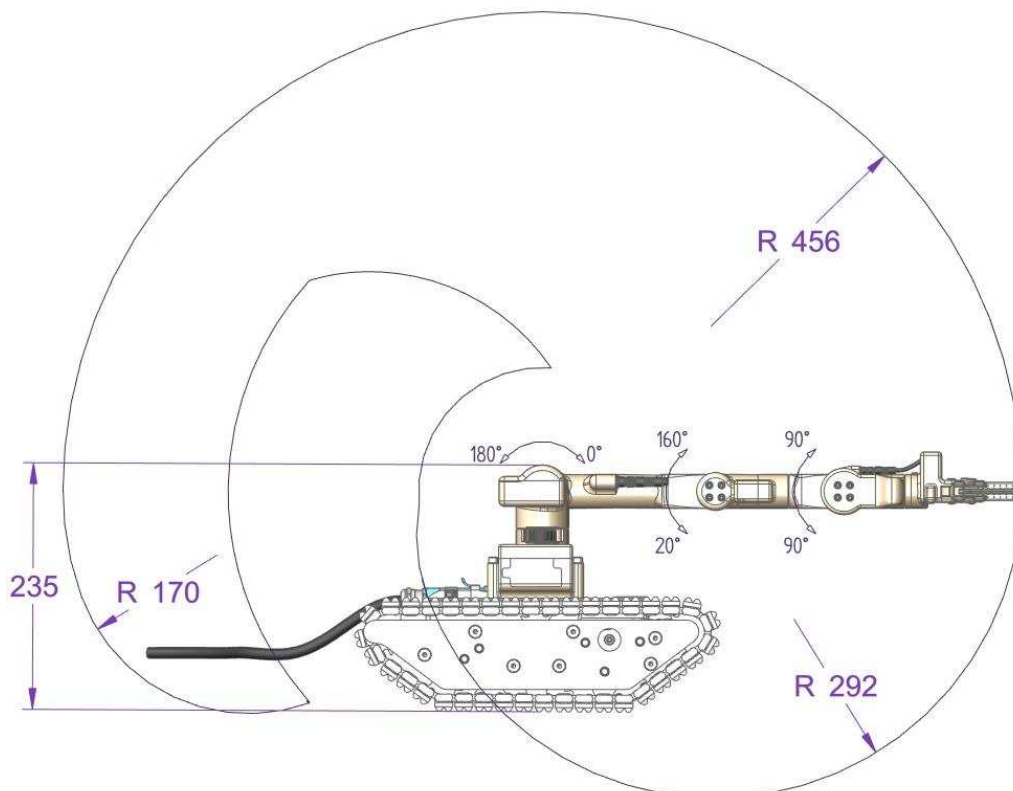


Obrázek 79 - Kabelové vedení - koncový efektor

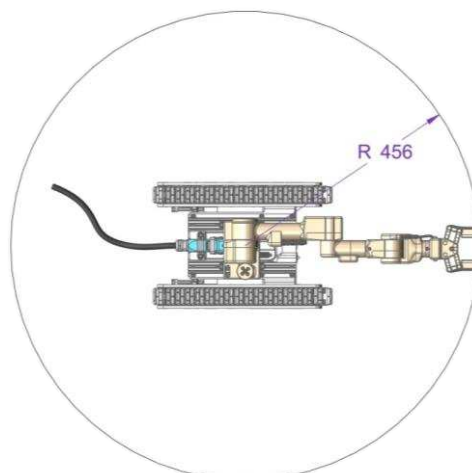
7 Manipulační prostor

Maximální manipulační prostor, který lze teoreticky robotickým ramenem obsloužit je na obrázku 80. Tento prostor je dán maximálními rozsahy servomotorů, které jsou naznačeny na obrázku 80. Rozsahy jsou uvažovány od polohy zobrazené na obrázku. Rozsahy kloubů, které nejsou na obrázku zakótovány, jsou 90° na obě strany, tedy celkový rozsah 180° . Jedná se pouze o teoretický dosah koncového efektoru, jelikož tento dosah může být omezen samotným ramenem, především v prostoru okolo základny a ramene 1.

Půdorysný rozsah je teoreticky 360° (obrázek 81), což je dáno možností otočení ramene okolo kloubu J2. Za manipulátorem Ilja je však pohyb ramene značně omezen, a to především nepříznivým rozsahem kloubu J3. Nicméně požadavkem zadavatele této diplomové práce byla schopnost manipulace s předměty před manipulátorem, což je, dle naznačeného manipulačního prostoru na obrázcích 80 a 81, splněno. Maximální dosah ramene je 456 mm.



Obrázek 80 - Manipulační prostor - bokorys



Obrázek 81 - Manipulační prostor - půdorys

8 Prototyp

Jedním z bodů zadání je ověřit navrženou konstrukci na vyrobeném prototypu. Proto bylo potřeba všechny součásti vyráběné na 3D tiskárně zadat do tisku, hřídel ramene 3 vyrobit z hliníkové slitiny EN AW 6063 T66 a ostatní součásti nakoupit.

K výrobě tištěných součástí byla využita 3D tiskárna od firmy 3D Systems model ProJet MJP 3600, kterou vlastní firma Centrum výzkumu Řež s.r.o.. Součásti byly vtištěny z materiálu VisiJet M3 Crystal s vlastnostmi, viz volně vložené přílohy této diplomové práce.

Hřídel ramene 3 byla vyrobena autorem práce na soustruhu SU 50 a sloupové vrtače dle výrobního výkresu, viz volně vložené přílohy této diplomové práce.

8.1 Sestavení prototypu

Po vyrobení a nakoupení všech potřebných součástí mohlo být rameno sestaveno. Při sestavování robotického ramene nenastal žádný zásadní problém. Všechny součásti na sebe pasovaly a sestavování tak bylo poměrně snadné. Největší obtíže byly s kabelovým vedením, kdy se ukázalo, že některé vnitřní kanály nebo vybrání za servomotory pro uložení spojení jednotlivých drátů kabelového vedení s dráty servomotorů by mohly být o něco větší. I tak se ale vše vešlo, kam mělo, a kabelový svazek byl úspěšně protažen. Součástí vevázaných příloh je fotodokumentace ze sestavování prototypu.

8.2 Odzkoušení prototypu

Po sestavení prototypu mohlo dojít k jeho otestování. Rameno tak bylo namontováno na robotický manipulátor Ilja a servomotory připojeny k provizorně vytvořenému řídicímu systému. Řídicí systém byl zaměstnancem Centra výzkumu Řež s.r.o. vytvořen pouze pro účely otestování funkčnosti vyrobeného prototypu a princip ovládání spočíval v zadávání přesné hodnoty natočení daného servomotoru a potvrzení zvolené hodnoty, přičemž se daný servomotor skokově otočil do zvolené polohy. Tento způsob řízení pohybů robotického ramene je velice zdoluhavý a uživatelsky nepřívětivý. Do budoucna je však plánováno vytvořit propracovaný řídicí systém. Tvorba řídicího systému však není součástí této diplomové práce.

Odzkoušení prototypu bylo prováděno především z důvodu ověření pevnosti a funkčnosti navrženého ramene. Z tohoto pohledu rameno vyhovuje. Při testování prototypu docházelo i k dynamickým účinkům, kdy ke změně polohy docházelo maximální možnou rychlostí servomotorů. S takovými dynamickými účinky není do budoucna počítáno, jelikož v budoucnu navržený řídicí systém by měl zajistit plynulost pohybu. Robotické rameno však vydrželo i tyto dynamické účinky, a to jak v případě zatížení pouze vlastní hmotností, tak i v případě zatížení 200 g břemenem v podobě štípacích kleští, viz vevázané přílohy.

Při testování prototypu se ukázalo, že rameno je schopno pohybu ve všech kloubech v navržených rozsazích a v těchto rozsazích je schopno uchopit a manipulovat s 200 g břemenem. Prototyp je tedy funkční a splňuje požadavky dané Centrem výzkumu Řež s.r.o..

9 Závěr

Cílem této diplomové práce bylo vypracovat rešerši na téma robotická manipulační ramena, vypracovat konstrukční návrh robotického ramene určeného k montáži na robotický manipulátor Ilja a ověřit funkčnost vyrobeného prototypu.

Úvodní část práce je věnována již zmíněné rešerši, kde jsou stručně popsány pojmy jako robotika a 3D tisk. Poté následuje popis tří open source robotických ramen vyráběných pomocí 3D tiskárny. Každé rameno je stručně popsáno a v případě využití nějakého zajímavého technického řešení, je tento prvek detailněji specifikován.

Práce pokračuje praktickou částí, na začátku které jsou specifikovány veškeré požadavky zadavatele práce. V závislosti na těchto požadavcích byl vypracován návrh koncepce robotického ramene, kde jsou rozepsané varianty provedení jednotlivých prvků a na konci každé podkapitoly vybrána nejvhodnější varianta.

V závislosti na vybraných konstrukčních provedeních jednotlivých prvků byl vypracován konstrukční návrh ramene, který popisuje stejně pojmenovaná kapitola. Na začátku této kapitoly jsou uvedeny obecné předpoklady k MKP analýzám, se kterými se následně pracuje. Pro lepší orientaci čtenáře následuje zobrazení konečné podoby robotického ramene, které je v následujících podkapitolách popisováno. Práce pokračuje výpočtem krouticích momentů a volbou servomotorů potřebných pro zaručenou manipulaci s břemenem o hmotnosti 200 g. V následujících podkapitolách jsou podrobně popsána jednotlivá ramena. U každého dílčího ramene je uveden popis částí, ze kterých se skládá a je provedena kontrola pevnosti součástí vyráběných pomocí 3D tiskárny a jedná hliníkové hřídele. Na závěr kapitoly Konstrukční návrh ramene je popsáno kabelové vedení jednotlivými rameny od základny až po koncový efektor.

Po popsání konstrukčního návrhu robotického ramene následuje kapitola vyhodnocení manipulačního prostoru. V této kapitole je zobrazen robotický manipulátor Ilja osazený robotickým ramenem a vyhodnocen manipulační prostor, který je zobrazen křivkou reprezentující maximální dosah koncového efektoru robotického ramene v závislosti na úhlech možného pohybu v jednotlivých kloubech.

Poslední část diplomové práce je věnována prototypu, kde je stručně popsána výroba jednotlivých částí a následné sestavování robotického ramene a celou práci uzavírá kapitola, která je věnována ozkoušení prototypu.

Výsledkem této diplomové práce je kompletní konstrukční návrh robotického ramene a funkční prototyp sloužící k manipulaci s drobnými předměty v prostoru okolo robotického manipulátoru Ilja. Tímto výsledkem byly naplněny všechny požadavky Centra výzkumu Řež s.r.o. na robotické rameno.

Do budoucna je plánován návrh a výroba sofistikovanějšího řídicího systému, sloužícího k řízení plynulých pohybů robotického ramene. Kromě řídicího systému je plánováno v budoucnu navržení držáků příslušenství sloužících pro různé technologické operace, jako jsou broušení, vysávání, vrtání atd., a držáky příslušenství pro NDT inspekce.

10 Seznam použité literatury

- [1] F. Šolc a L. Žalud, „Robotika,“ 1 Říjen 2002. [Online]. Available: <http://media1.wgz.cz/files/media1:5100dca52f8f1.pdf.upl/Robotika.pdf>. [Přístup získán 20 Listopad 2019].
- [2] M. Žáček, „Historie robotů? Sahá až do řecké mytologie!“, 9 Listopad 2014. [Online]. Available: <https://factoryautomation.cz/historie-robotu-saha-az-do-recke-mytologie/>. [Přístup získán 20 Listopad 2019].
- [3] R. časopisu, „Robotika od historie po současnost,“ 23 Srpen 2012. [Online]. Available: <https://www.elektroprumysl.cz/automatizace/robotika-od-historie-po-soucasnost>. [Přístup získán 20 Listopad 2019].
- [4] A. Fritscher, „Robotický systém da Vinci zachraňuje životy a také jim pomáhá na svět,“ 15 Srpen 2018. [Online]. Available: <http://marketing.fnol.cz/tiskove-zpravy/roboticky-system-da-vinci-zachranuje-zivoty-a-take-jim-pomaha-na-svet-fakultni-nemocnice-olomouc-poridila-jeho-nejnovejsi-verzi-2/>. [Přístup získán 21 Listopad 2019].
- [5] M. Grigar, „Roboti a robotika,“ [Online]. Available: <https://www.acelita.cz/03-2017/page09/>. [Přístup získán 22 Listopad 2019].
- [6] „Robotika a roboti,“ 6 Srpen 2013. [Online]. Available: <http://robotika.spsnome.cz/kurzy>. [Přístup získán 24 Listopad 2019].
- [7] A. neznámý, „Robotics ASIMO Future High tech, Walking Robot, standing white Honda Asimo robot PNG clipart,“ [Online]. Available: <https://www.uihere.com/free-cliparts/robotics-asimo-future-high-tech-walking-robot-1359816>. [Přístup získán 24 Listopad 2019].
- [8] Učební text, „Automatizace a robotizace I,“ [Online]. Available: http://www.sps-ko.cz/documents/ARO_prorok/Pr%C5%AFmyslov%C3%A9%20roboty.pdf. [Přístup získán 24 Listopad 2019].
- [9] Fanuc, „LR Mate 200 iD/7L,“ [Online]. Available: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/%C5%99ada-lrmate/lrmate-200id-7l>. [Přístup získán 28 Listopad 2019].
- [10] Svět hardware, „3D tisk: jak funguje a kde začít?,“ 16 Leden 2019. [Online]. Available: <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-a-kde-zacit/48403>. [Přístup získán 30 Listopad 2019].
- [11] Axiom Tech, „Aditivní výroba - moderní způsob obrábění,“ 4 Zář 2017. [Online]. Available: <https://www.axiomtech.cz/25836n-aditivni-vyroba-moderni-zpusob-obrabeni>. [Přístup získán 1 Prosinec 2019].
- [12] ABC 3D, „3D TISK, PRINCIPY, TECHNOLOGIE,“ [Online]. Available: <https://www.abc3d.cz/o-3d-tisku-neprehlednete/115-3d-tisk-principy-technologie>. [Přístup získán 30 Listopad 2019].
- [13] Tanerxun, „Principle of 3d printing-Stereolithography(SLA),“ 10 Prosinec 2018. [Online]. Available: <https://www.tanerxun.com/principle-of-3d-printing-stereolithography/.html>. [Přístup získán 28 Březen 2020].

- [14] Tanerxun, „Principle of 3d printing-Selective laser sintering(SLS),“ 10 Červen 2019. [Online]. Available: <https://www.tanerxun.com/principle-of-3d-printing-sls/.html>. [Přístup získán 28 Březen 2020].
- [15] 3D Printing from scratch, „Types of 3D printers or 3D printing technologies overview,“ [Online]. Available: <http://3dprintingfromscratch.com/common/types-of-3d-printers-or-3d-printing-technologies-overview/#dlp>. [Přístup získán 18 Březen 2020].
- [16] 3D SYSTEMS, „MultiJet Plastic Printers,“ 2018. [Online]. Available: <https://www.3dsystems.com/sites/default/files/2018-11/3d-systems-proJet-mjp-3600-plastic-tech-specs-usen-2018-11-08-web.pdf>. [Přístup získán 1 Prosinec 2019].
- [17] Prototypa, „3D Systems – ProJet MJP 3600W Series,“ [Online]. Available: <https://prototypa.gr/en/products/3d-systems/3d-systems-projet-mjp-3600w-max/>. [Přístup získán 1 Prosinec 2019].
- [18] Adaptic, s.r.o., „Open source,“ [Online]. Available: <https://www.adaptic.cz/znalosti/slovnicek/open-source/>. [Přístup získán 7 Prosinec 2019].
- [19] Niryo, „Niryo One,“ [Online]. Available: <https://niryo.com/product/niryo-one/>. [Přístup získán 7 Prosinec 2019].
- [20] Niryo ONE, „Niryo One mechanical specifications,“ 11 Září 2018. [Online]. Available: http://www.mediafire.com/file/mnwe3ow14ixxcav/Mechanical_Specifications_%252811-09-2018%2529.pdf/file. [Přístup získán 8 Prosinec 2019].
- [21] Niryo One, „Vacuum Pump,“ [Online]. Available: <https://niryo.com/product/niryo-one-vacuum-pump/>. [Přístup získán 8 Prosinec 2019].
- [22] Niryo One, „Electromagnet,“ [Online]. Available: <https://niryo.com/product/niryo-one-electromagnet/>. [Přístup získán 8 Prosinec 2019].
- [23] Á. LM, „HACKADAY,“ 3 Srpen 2016. [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/12989-thor>. [Přístup získán 8 Prosinec 2019].
- [24] BCN3D, „BCN3D MOVEO,“ 28 Červenec 2016. [Online]. Available: <https://www.bcn3d.com/bcn3d-moveo-the-future-of-learning/>. [Přístup získán 12 Prosinec 2019].
- [25] BCN3D, „BCN3D Moveo - User manual,“ [Online]. Available: <https://github.com/BCN3D/BCN3D-Moveo/raw/master/USER%20MANUAL/User%20Manual%20BCN3D%20Moveo.pdf>. [Přístup získán 31 Prosinec 2019].
- [26] BCN3D, „BCN3D MOVEO,“ 28 Červenec 2016. [Online]. Available: <https://www.thingiverse.com/thing:1693444/makes>. [Přístup získán 31 Prosinec 2019].
- [27] D. D-Flo, „6-Axis 3D Printed Robotic Arm - Playtime - (Part 4),“ 20 Duben 2017. [Online]. Available: <https://www.youtube.com/watch?v=JMVMX1ax7W4>. [Přístup získán 31 Prosinec 2019].
- [28] J. Cvejn, „Paralelní kinematické struktury výrobních strojů,“ 2011. [Online]. Available: <https://core.ac.uk/download/pdf/30291828.pdf>. [Přístup získán 1 Březen 2020].
- [29] VOŠ a SPŠ Kutná Hora, „Roboty a manipulátory,“ [Online]. Available: http://www.edumat.cz/texty/Roboty_manipulatory.pdf. [Přístup získán 1 Březen 2020].
- [30] Automatika Online, „Manipulator Tripod EXPT,“ 29 Září 2015. [Online]. Available: <https://automatykaonline.pl/Artykuly/Robotyka/Manipulator-Tripod-EXPT>. [Přístup získán 1 Březen 2020].

- [31] Mecademic, „Meca500 - Ultracompact six-axis industrial robot arm,“ [Online]. Available: <https://www.mecademic.com/products/Meca500-small-robot-arm#Precision>. [Přístup získán 24 Březen 2020].
- [32] Škola Hellebrand, „Kinematika robotů,“ [Online]. Available: <http://skola.hellebrand.cz/text1011/mch/robotika-kinematika.pdf>. [Přístup získán 3 Březen 2020].
- [33] V. Smutný, „Robotika,“ [Online]. Available: <http://cmp.felk.cvut.cz/cmp/courses/ROB/roblec/kinematika-notecz.pdf>. [Přístup získán 4 Březen 2020].
- [34] M. Konečný, „Návrh robotického ramene,“ 2017. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=150046. [Přístup získán 8 Březen 2020].
- [35] M. Gouběj, M. Švejda a M. Schlegel, „Úvod do mechatroniky, robotiky a systémů řízení pohybu,“ 2012. [Online]. [Přístup získán 8 Březen 2020].
- [36] Elektronika a modelářství online, „SST-100 U,“ [Online]. Available: <https://www.emo.cz/z110886-sst-100-u>. [Přístup získán 15 Březen 2020].
- [37] T. Kratochvíl, „Koncové efekторы průmyslových robotů pro manipulaci,“ 2013. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=66998. [Přístup získán 13 Březen 2020].
- [38] Smalljun, „Pince de robot,“ [Online]. Available: <https://www.amazon.fr/SMALLJUN-Pince-m%C3%A9canique-manipulateur-Mg996R/dp/B07PNZNXX6>. [Přístup získán 15 Březen 2020].
- [39] R. Jašíček, „Manipulační operace s průmyslovými roboty,“ 2013. [Online]. Available: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=65134. [Přístup získán 15 Březen 2020].
- [40] Hom Cart, [Online]. Available: <http://www.peremecistime.cz/R%C5%AFzn%C3%A9-styly-Robotick%C3%A9-chapadlo-Arexx-ARXRS26-mg0NAHZp-p-959.html>. [Přístup získán 15 Březen 2020].
- [41] C. Jiang a Z. Gaofeng, „A preliminary study of 3D printing on rock mechanics,“ 12 Srpen 2015. [Online]. Available: https://www.researchgate.net/publication/271923683_A_Preliminary_Study_of_3D_Printing_on_Rock_Mechanics/download. [Přístup získán 17 Březen 2020].
- [42] Big Hobby, „JX servo PDI-HV7246MG,“ [Online]. Available: <https://www.bighobby.cz/JX-servo-PDI-HV7246MG-180-digital-72g-0-1sec-48kg-d2276.htm>. [Přístup získán 16 Březen 2020].
- [43] Big Hobby, „JX servo PDI HV5212MG -nízké,“ [Online]. Available: <https://www.bighobby.cz/JX-servo-PDI-HV5212MG-nizke-digital-52g-0-07sec-11-85kg-d1503.htm>. [Přístup získán 16 Březen 2020].
- [44] Big Hobby, „<https://www.bighobby.cz/Kingmax-servo-CLS2035HHV-digital-20g-0-04sec-6-2kg-d2806.htm>,“ [Online]. Available: <https://www.bighobby.cz/Kingmax-servo-CLS2035HHV-digital-20g-0-04sec-6-2kg-d2806.htm>. [Přístup získán 16 Březen 2020].
- [45] Big Hobby, „JX servo PDI-HV7232MG,“ [Online]. Available: <https://www.bighobby.cz/JX-servo-PDI-HV7232MG-180-digital-72g-0-09sec-31-5kg-d2275.htm>. [Přístup získán 18 Březen 2020].

- [46] ContiTech, „Polyuretanové ozubené řemeny CONTI SYNCHROFLEX,“ [Online]. Available: <https://www.tyma.cz/files/katalogy/conti-synchroflex-cz-en.pdf?fbclid=IwAR3TJ0fWXPOGYEOWaCK0B9nseDEIHWbv39FsAuL2VBmEQO8rupK-SScozs>. [Přístup získán 20 Březen 2020].
- [47] THK, „Křížová válečková ložiska Cross-Roler Ring,“ THK CO., LTD., TOKYO.
- [48] THK, „Cross-Roller ring,“ [Online]. Available: https://tech.thk.com/en/sub_login_en.php?li=aHR0cHM6Ly90ZWNoLnRoay5jb20vZW4vcHJvZHVjdHMvcGRmX2Rvd25sb2FkLnBocD9maWxlPTUxMkV+XzE4Q3Jvc3NSb2xsZXJSaW5nLnBkZg==. [Přístup získán 20 Březen 2020].
- [49] SKF, „PCM 202310 E,“ [Online]. Available: <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCM%20202310%20E>. [Přístup získán 21 Březen 2020].
- [50] Binder, „M8 female panel mount connector, Contacts: 12, not shielded, single wires, IP67, M10x0.75,“ [Online]. Available: <https://www.binder-connector.com/en/products/automation-technology/m8/female-panel-mount-connector-with-single-wires-fixing-thread-m10-x-075-contacts-12#7662181118000120200>. [Přístup získán 21 Březen 2020].
- [51] Binder, „M8 cable connector, Contacts: 12, not shielded, moulded on cable, IP67, UL listed, PUR black, 12 x 0.09 mm²,“ [Online]. Available: <https://www.binder-connector.com/en/products/automation-technology/m8/cable-plug-connector-overmoulded-screw-type-m8x1-with-hexagonal-die-cast-threaded-ring-pur#7734050000500120200>. [Přístup získán 21 Březen 2020].
- [52] Make It From, „6063-T66 Aluminum,“ [Online]. Available: <https://www.makeitfrom.com/material-properties/6063-T66-Aluminum>. [Přístup získán 23 Březen 2020].
- [53] SKF, „PCM 081006 E,“ [Online]. Available: <https://www.skf.com/africa/en/products/bearings-units-housings/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/table-bushings/index.html?designation=PCM%20081006%20E>. [Přístup získán 24 Březen 2020].
- [54] Binder, „M5 cable connector, Contacts: 3, not shielded, moulded on cable, IP67, M5x0.5, PUR black, 3 x 0.14 mm²,“ [Online]. Available: <https://www.binder-connector.com/en/products/automation-technology/m5/cable-plug-connector-overmoulded-m5-x-05?fbclid=IwAR3E0pyHE78wk43FGbsnTnEu9nxW472DxD2E72QITO9IEG1IHUmVZtRPsOw#7931015203>. [Přístup získán 29 Březen 2020].
- [55] Binder, „M5 female panel mount connector, Contacts: 3, not shielded, single wires, IP67,“ [Online]. Available: https://www.binder-connector.com/en/products/automation-technology/m5/female-panel-mount-connector-with-single-wires-2?fbclid=IwAR1hN2wckTjBslAh3pt_R2BsrGQciQ_2ddOVPA3IWMRhEAnAATVeS T-XhxM#0931060003. [Přístup získán 29 Březen 2020].
- [56] SKF, „PCM 050710 E,“ [Online]. Available: <https://www.skf.com/group/products/plain-bearings/bushings-thrust-washers-strips/bushings/productid-PCM%20050710%20E?system=metric>. [Přístup získán 3 Duben 2020].

- [57] Den Braven, „MAMUT GLUE High Tack,“ [Online]. Available:
<https://www.denbraven.cz/produkt/mamut-glue-high-tack/>. [Přístup získán 3 Duben
2020].

Seznam příloh

Vevázaných

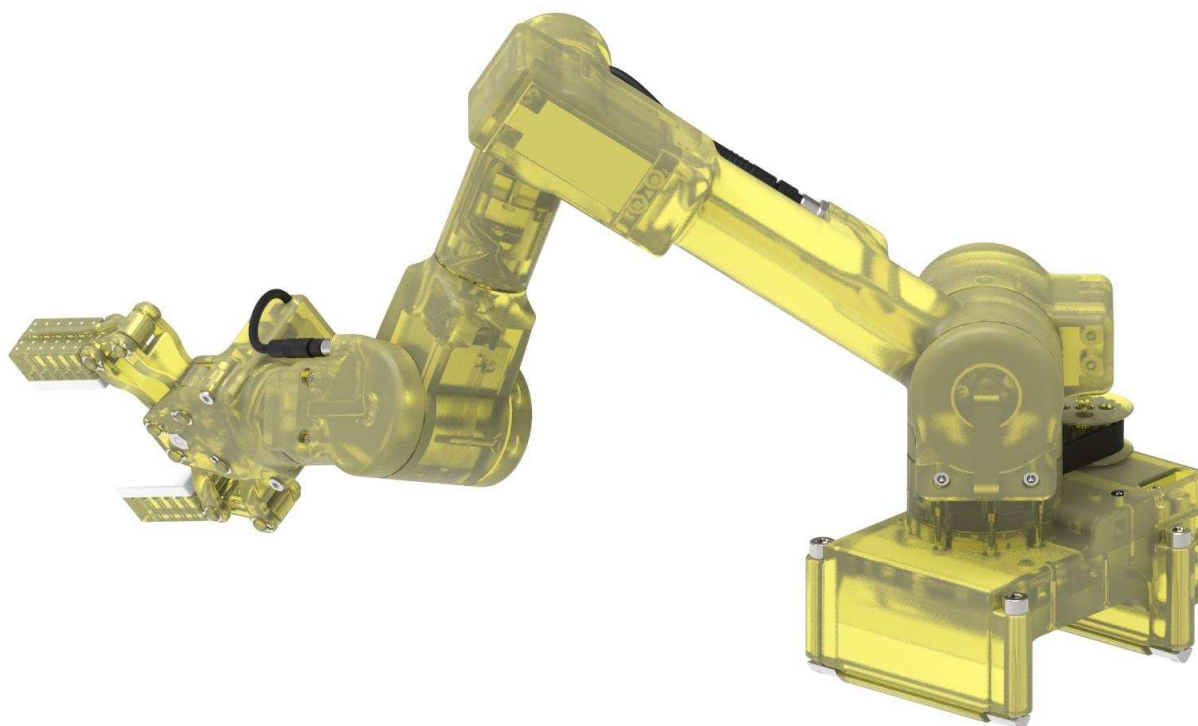
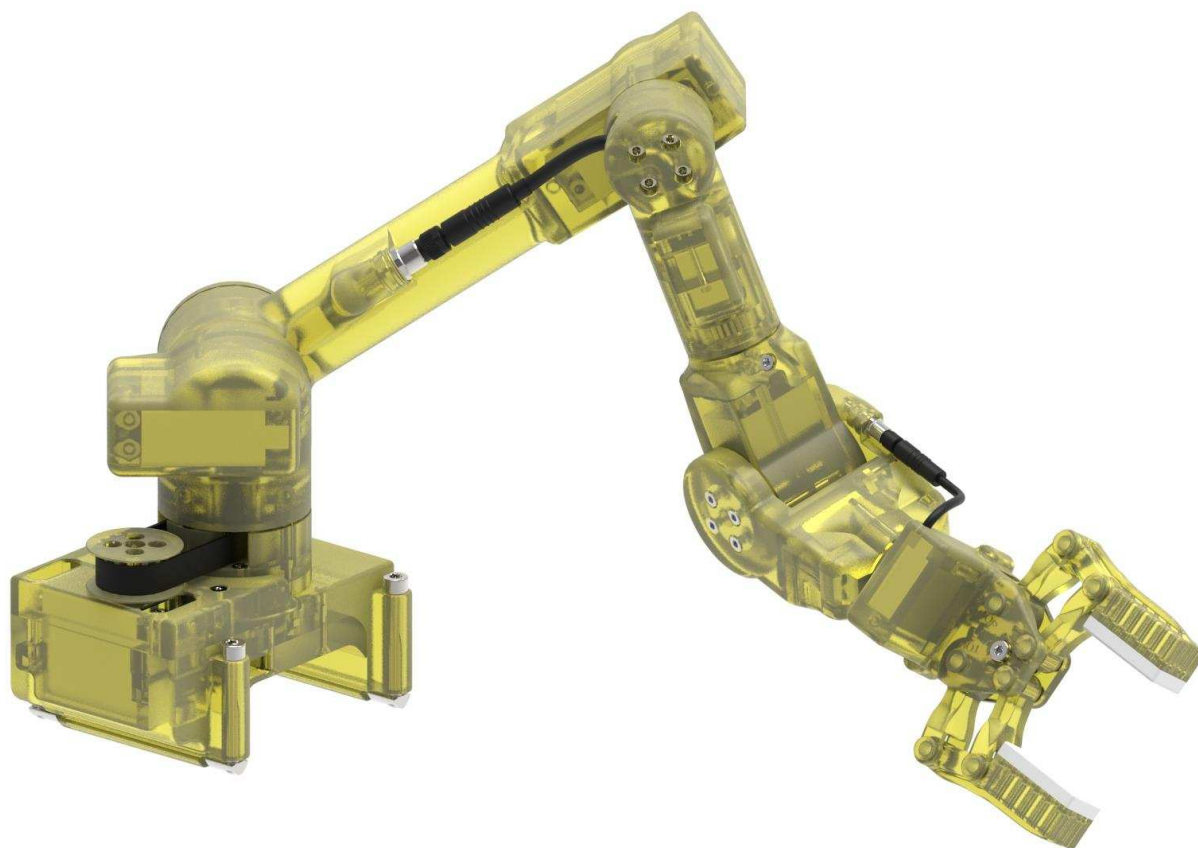
Příloha č. 1: Vizualizace manipulátoru.....	I
Příloha č. 2: Fotodokumentace výroby/sestavování prototypu.....	IV
Příloha č. 3: Fotodokumentace prototypu.....	VII

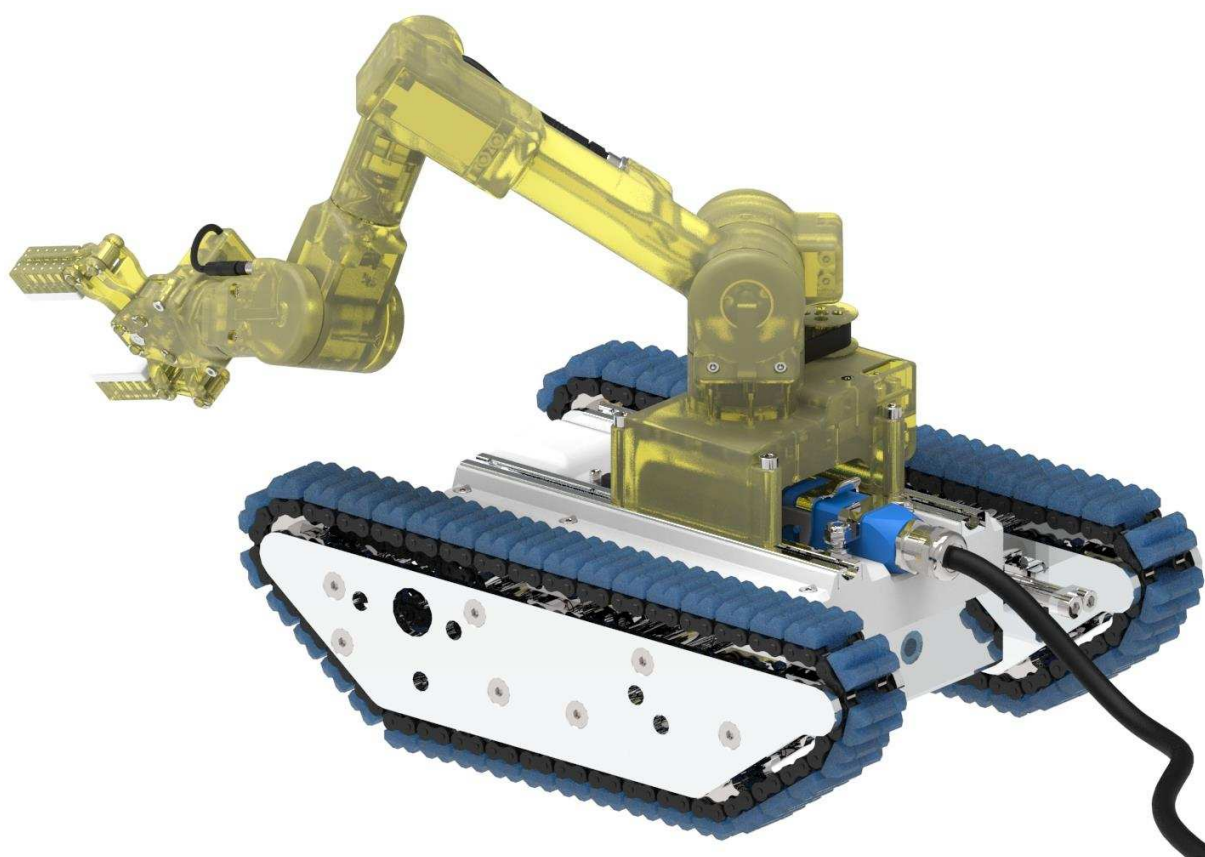
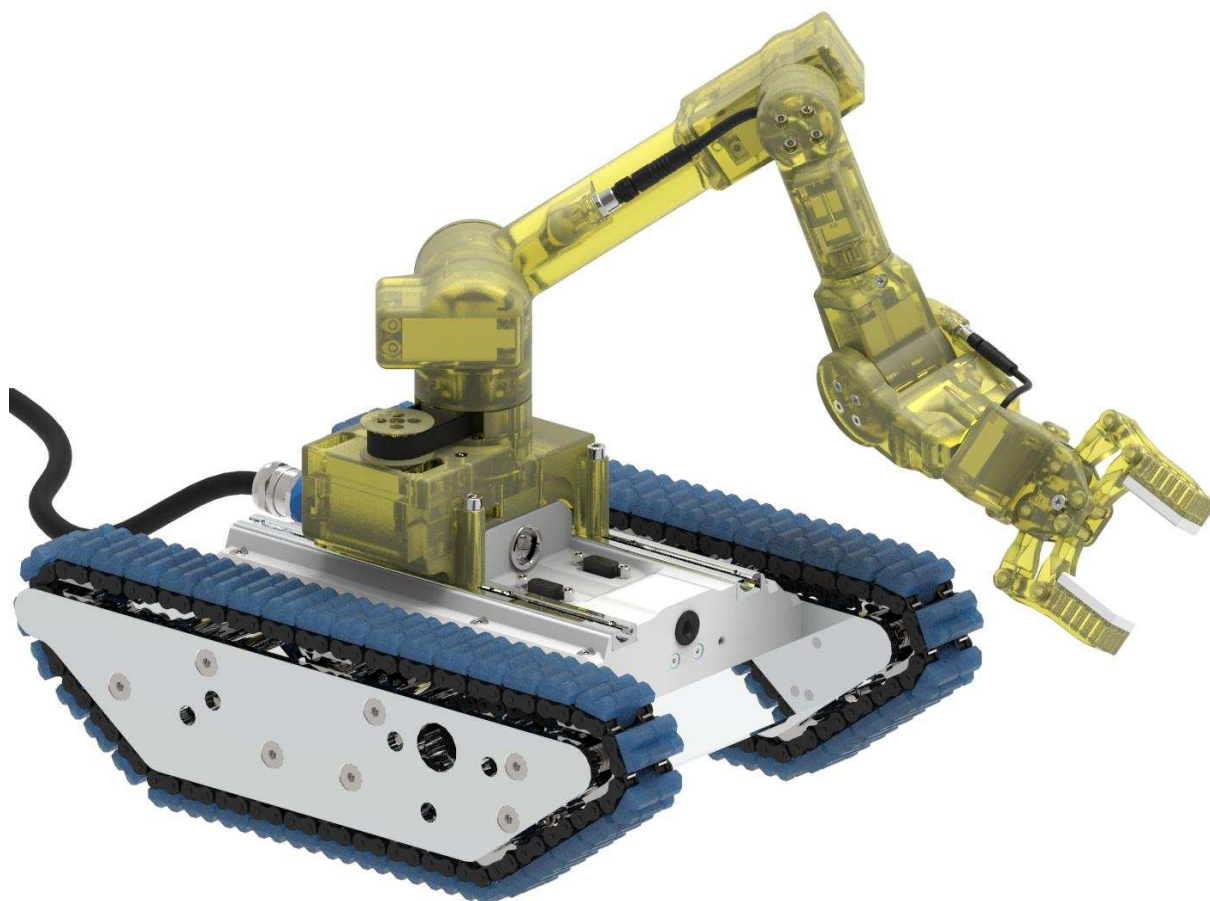
Volně vložených

Příloha č. 4: Katalogový list 3D tiskárny Projet MJP 3600 firmy 3D SYSTEMS	
Příloha č. 5: Výrobní výkres: Hřídél_rameno3	
Příloha č. 6: Výkres sestavy: Robotické rameno	

Příloha č. 1

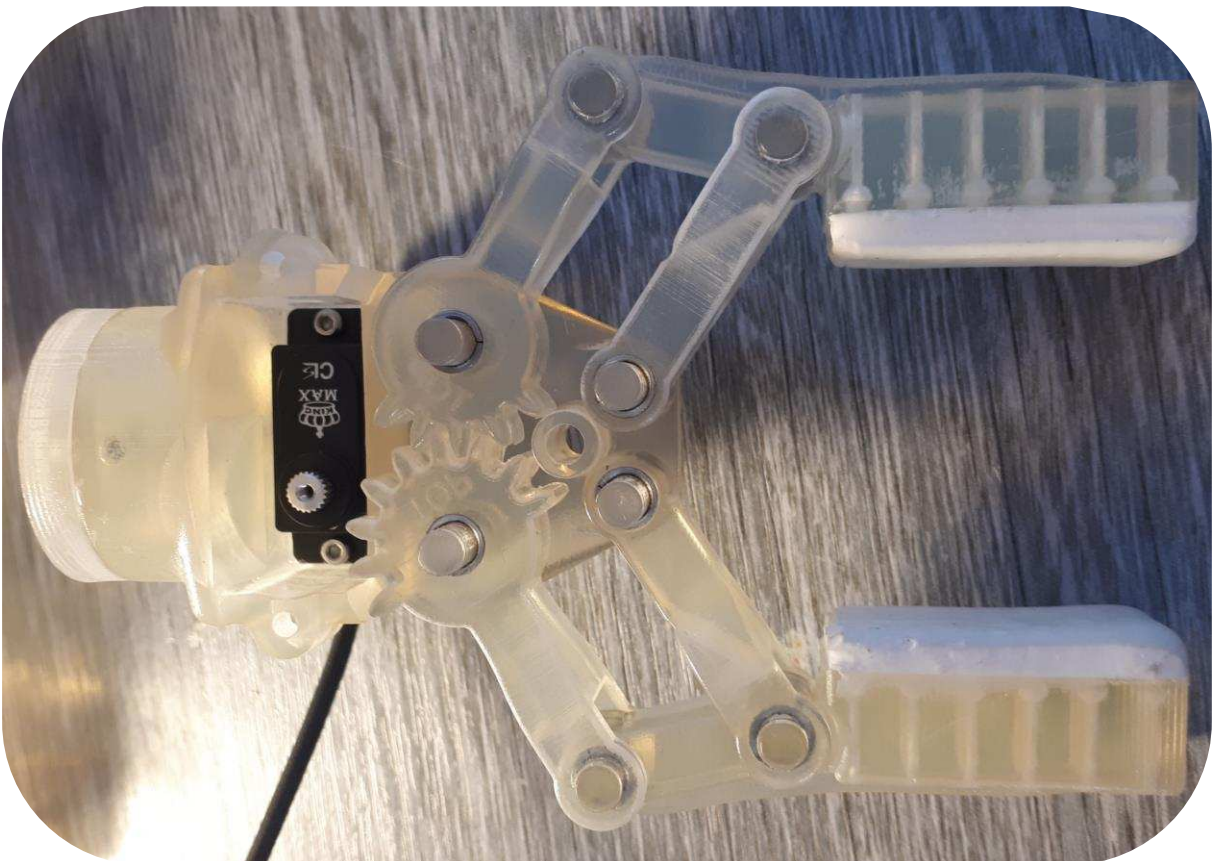
Vizualizace manipulátoru

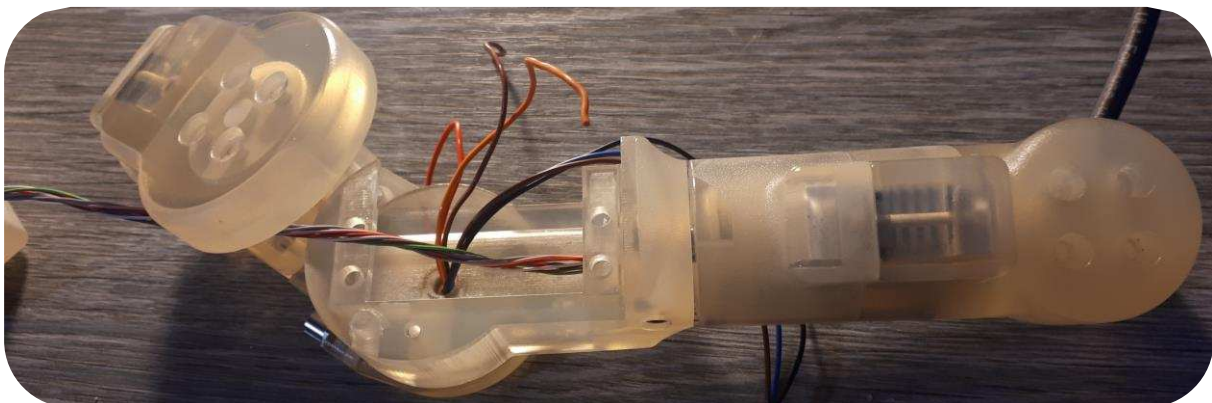
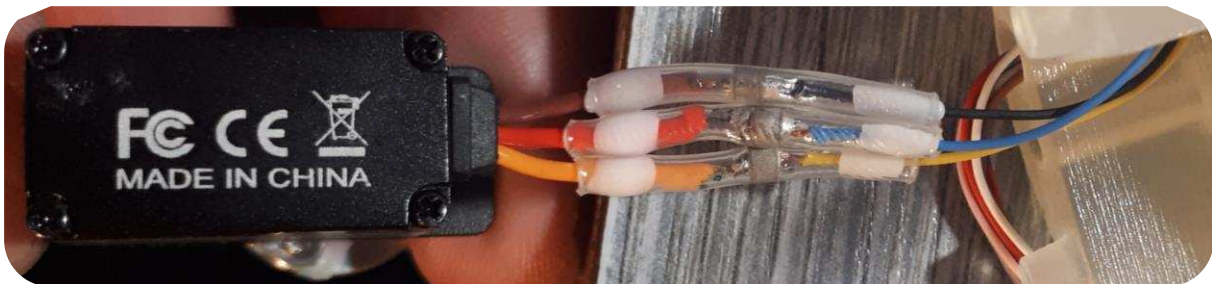




Příloha č. 2

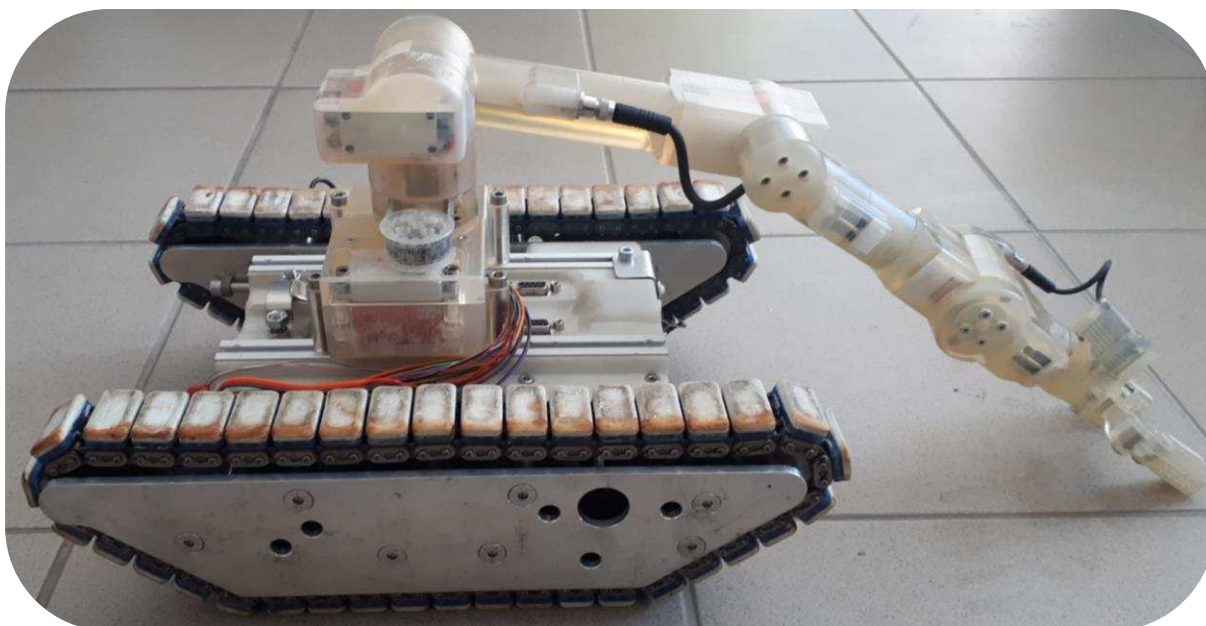
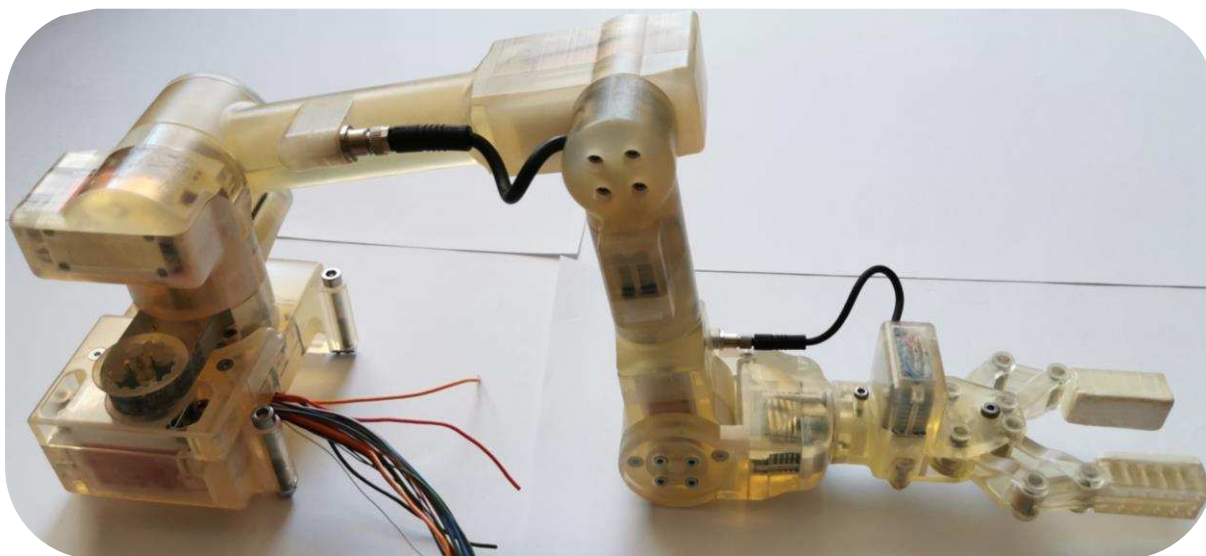
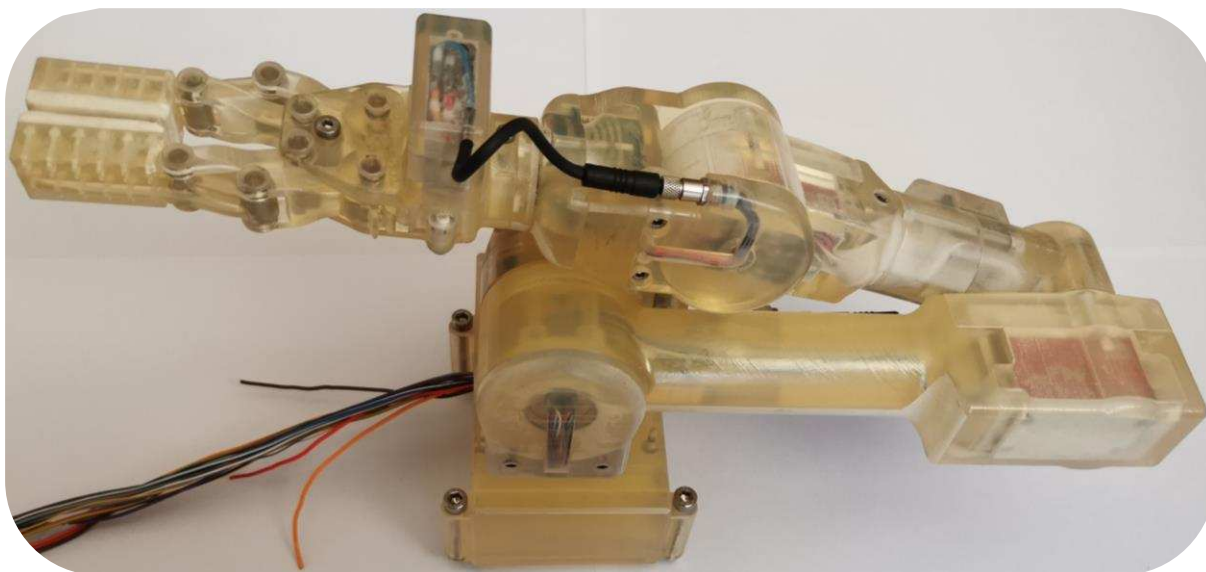
Fotodokumentace výroby/sestavování prototypu

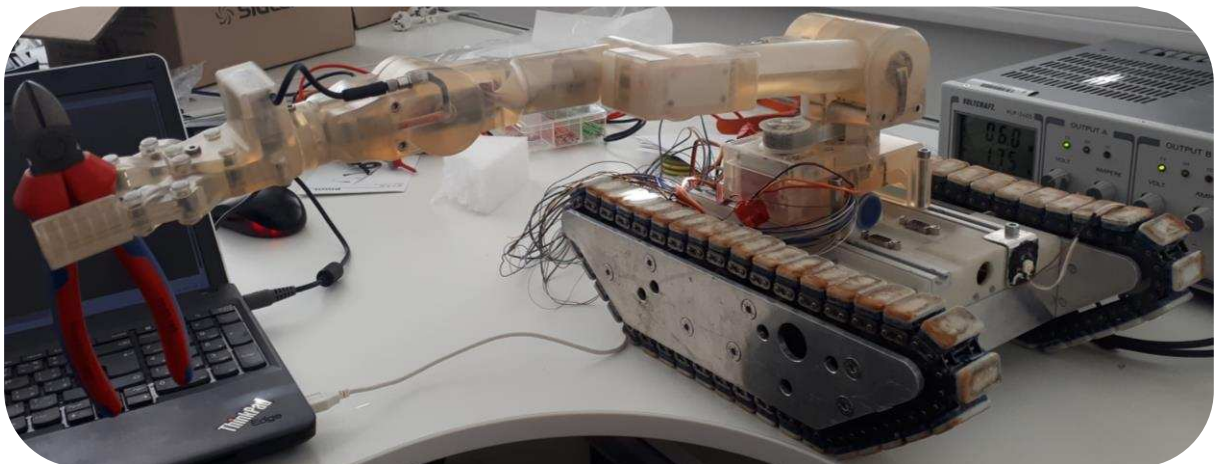
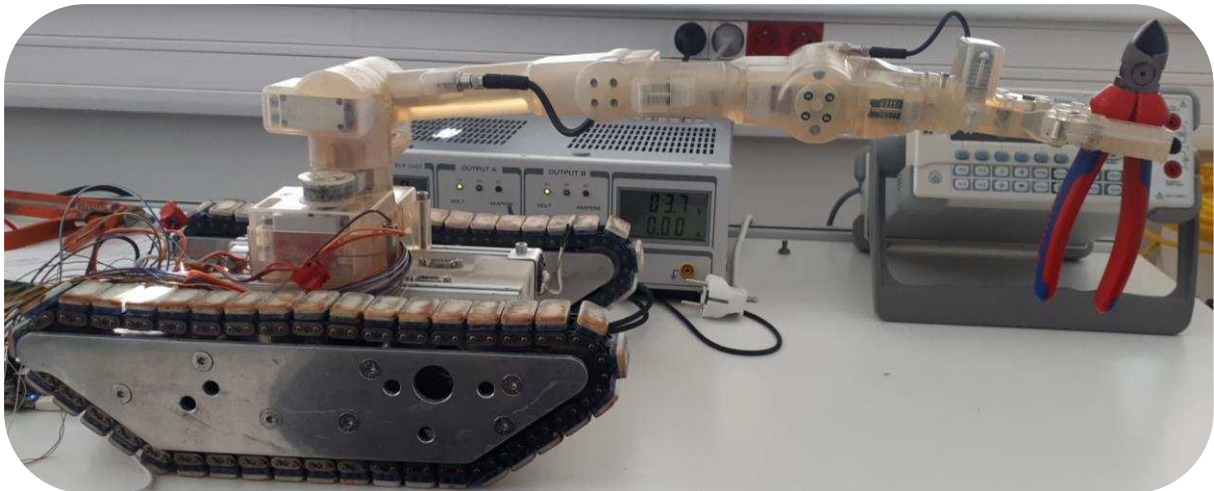
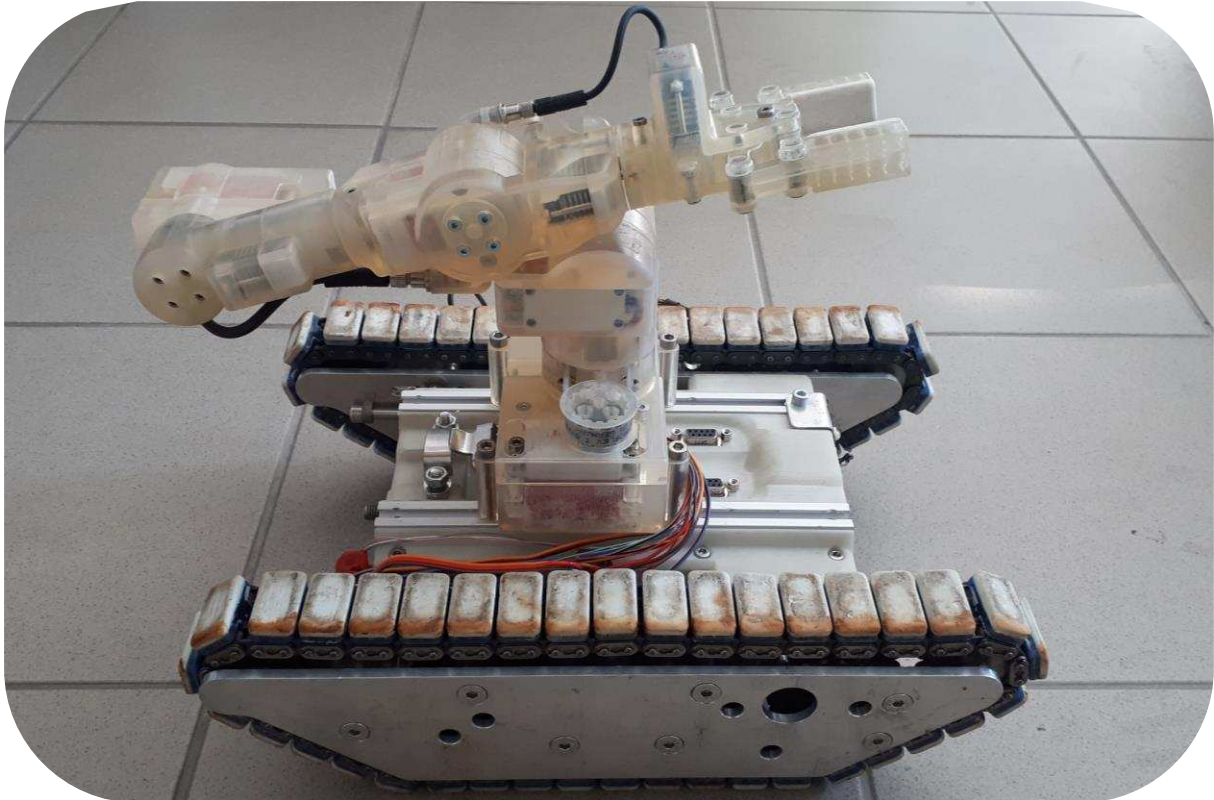




Příloha č. 3

Fotodokumentace prototypu





Multijet Plastic Printers

Functional precision plastic parts with **Projet® MJP 3D** printers



Projet MJP 3600



Projet MJP 3600 Max

Printing Modes	HD - High Definition UHD - Ultra High Definition XHD - Xtreme High Definition	HD - High Definition UHD - Ultra High Definition XHD - Xtreme High Definition
Net Build Volume (xyz)* HD Mode UHD Mode XHD Mode	11.75 x 7.3 x 8 in (298 x 185 x 203 mm) 8 x 7.3 x 8 in (203 x 185 x 203 mm) 8 x 7.3 x 8 in (203 x 185 x 203 mm)	11.75 x 7.3 x 8 in (298 x 185 x 203 mm) 11.2 x 7.3 x 8 in (284 x 185 x 203 mm) 11.2 x 7.3 x 8 in (284 x 185 x 203 mm)
Resolution (xyz) HD Mode UHD Mode XHD Mode	375 x 450 x 790 DPI; 32 µ layers 750 x 750 x 890 DPI; 29 µ layers 750 x 750 x 1600 DPI; 16 µ layers	375 x 450 x 790 DPI; 32 µ layers 750 x 750 x 890 DPI; 29 µ layers 750 x 750 x 1600 DPI; 16 µ layers
Accuracy (typical)	±0.001-0.002 inch per inch (0.025-0.05 mm per 25.4 mm) of part dimension. Accuracy may vary depending on build parameters, part geometry and size, part orientation, and post-processing.	
Build Materials	Visijet M3-X – Rigid White Visijet M3 Crystal – Rigid Clear Visijet M3 Black – Rigid Black Visijet M3 Propplast – Rigid Natural Visijet M3 Navy – Rigid Blue Visijet M3 Techplast – Rigid Gray Visijet M3 Procast – Castable	Visijet M3-X – Rigid White Visijet M3 Crystal – Rigid Clear Visijet M3 Black – Rigid Black Visijet M3 Propplast – Rigid Natural Visijet M3 Navy – Rigid Blue Visijet M3 Techplast – Rigid Gray Visijet M3 Procast – Castable
Support Material	Visijet S300	Visijet S300
Material Packaging	Build and support materials in clean 4.41 lbs (2 kg) bottles (printer holds up to 2 of each with auto-switching)	
Electrical	100-127 VAC, 50/60 Hz, single-phase, 15A 200-240** VAC, 50 Hz, single-phase, 10A	
Dimensions (WxDxH) 3D Printer Crated 3D Printer Uncrated	32.5 x 56.3 x 68.5 in (826 x 1430 x 1740 mm) 29.5 x 47 x 59.5 in (749 x 1194 x 1511 mm)	32.5 x 56.3 x 68.5 in (826 x 1430 x 1740 mm) 29.5 x 47 x 59.5 in (749 x 1194 x 1511 mm)
Weight 3D Printer Crated 3D Printer Uncrated	955 lbs (433 kg) 659 lb (299 kg)	955 lbs (433 kg) 659 lb (299 kg)
3D Sprint™ Software	Easy build job set-up, submission and job queue management; Automatic part placement and build optimization tools; Part stacking and nesting capability; Extensive part editing tools; Automatic support generation; Job statistics reporting tools	
E-mail Notice Capability	Yes	Yes
Internal Hard Drive Capacity	500 Gb minimum	500 Gb minimum
Connectivity	Network ready with 10/100 Ethernet interface Front panel USB Port	
Client Hardware Recommendation	CPU: Multiple core processor. Hyper-threading and clock speeds above 3GHz can be beneficial but should be paired with a good balance of cores. RAM: 8 GB of more. HARD DISK: SSD. Multiple core processor. OTHER: Google Chrome or Internet Explorer	
Client Operating System	Windows® 7, 8 and 8.1 (service pack)	
Input Data File Formats Supported	STL, CTL, OBJ, PLY, ZPR, ZBD, AMF, WRL, 3DS, FBX, IGES, IGS, STEP, STP, MJPDDD	
Post-Processing	Projet Finisher for easy removal of eco-friendly wax supports (optional)	
Operating Temperature Range	64-82 °F (18-28 °C)	64-82 °F (18-28 °C)
Operating Humidity	30-70 % relative humidity	30-70 % relative humidity
Noise	< 65 dBa estimated (at medium fan setting)	
Certifications	CE	CE

* Maximum part size is dependent on geometry, among other factors.

** Requires small external transformer supplied by 3D Systems in the provided country kit.

Visijet® M3 Advanced Plastics

Functional precision plastic parts with ProJet® MJP 3D printers



Properties	Condition	Visijet M3-X	Visijet M3 Black	Visijet M3 Crystal	Visijet M3 Proplast	Visijet M3 Navy	Visijet M3 Techplast	Visijet M3 Procast	Visijet S300	
Composition			UV Curable Plastic							Wax Support Material
Color		White	Black	Natural	Natural	Blue	Gray	Dark Blue	White	
Bottle Quantity		2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	2 kg	
Density @ 80 °C (liquid)		1.04 g/cm ³	1.02 g/cm ³	1.02 g/cm ³	1.02 g/cm ³	1.02 g/cm ³	1.02 g/cm ³	1.02 g/cm ³	N/A	
Tensile Strength	ASTM D638	49 MPa	35.2 MPa	42.4 MPa	26.2 MPa	20.5 MPa	22.1 MPa	32 MPa	N/A	
Tensile Modulus	ASTM D638	2168 MPa	1594 MPa	1463 MPa	1108 MPa	735 MPa	866 MPa	1724 MPa	N/A	
Elongation at Break	ASTM D638	8.3 %	19.7 %	6.83 %	8.97 %	8 %	6.1 %	12.3 %	N/A	
Flexural Strength	ASTM D790	65 MPa	44.5 MPa	49 MPa	26.6 MPa	28.1 MPa	28.1 MPa	45 MPa	N/A	
Heat Distortion Temperature	ASTM D648 @ 0.45 MPa	88 °C	57 °C	56 °C	46 °C	46 °C	46 °C	N/A	N/A	
Ash Content		N/A	N/A	N/A	0.01 %	0.01 %	0.01 %	0.01 %	N/A	
Melting Point		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	60 °C	
Softening Point		N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	N/A	40 °C	
USP Class VI Certified*		No	No	Yes	No	No	No	No	N/A	
Description		ABS-like Plastic	High strength and flexibility plastic	Tough Plastic, Translucent	Plastic, Natural	Plastic, Blue	Plastic, Gray	Castable Plastic	Non-toxic wax material for hands-free melt-away supports	

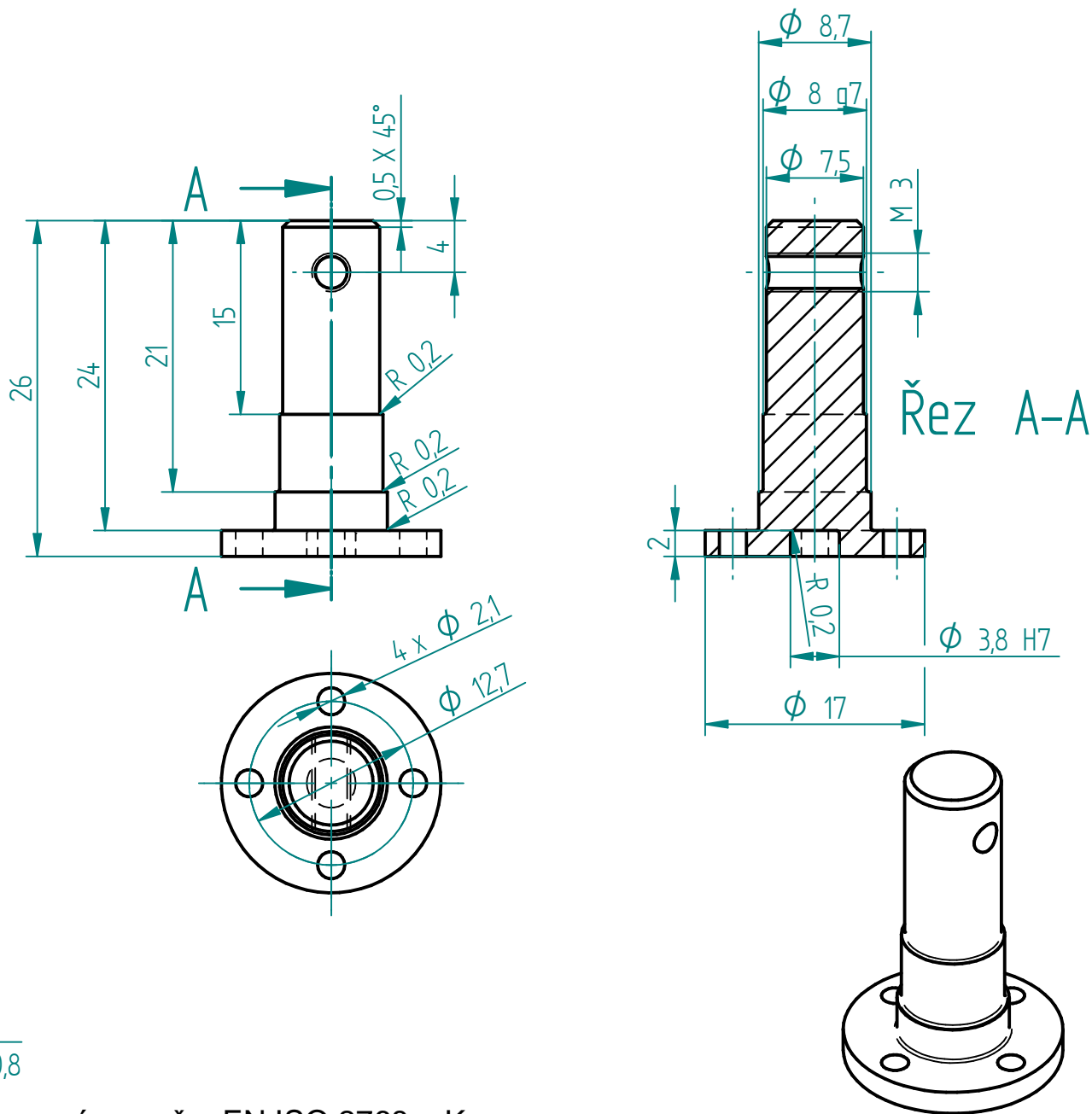
* DISCLAIMER: Material is capable of meeting the requirements of USP Class VI testing. It is the responsibility of each customer to determine that its use of any Visijet material is safe, lawful and technically suitable to the customer's intended applications. The values presented here are for reference only and may vary. Customers should conduct their own testing to ensure suitability for their intended application.

www.3dsystems.com



Warranty/Disclaimer: The performance characteristics of these products may vary according to product application, operating conditions, material combined with, or with end use. 3D Systems makes no warranties of any type, express or implied, including, but not limited to, the warranties of merchantability or fitness for a particular use.

© 2018 by 3D Systems, Inc. All rights reserved. Specifications subject to change without notice. 3D Systems, the 3D Systems logo, ProJet and Visijet are registered trademarks of 3D Systems, Inc.





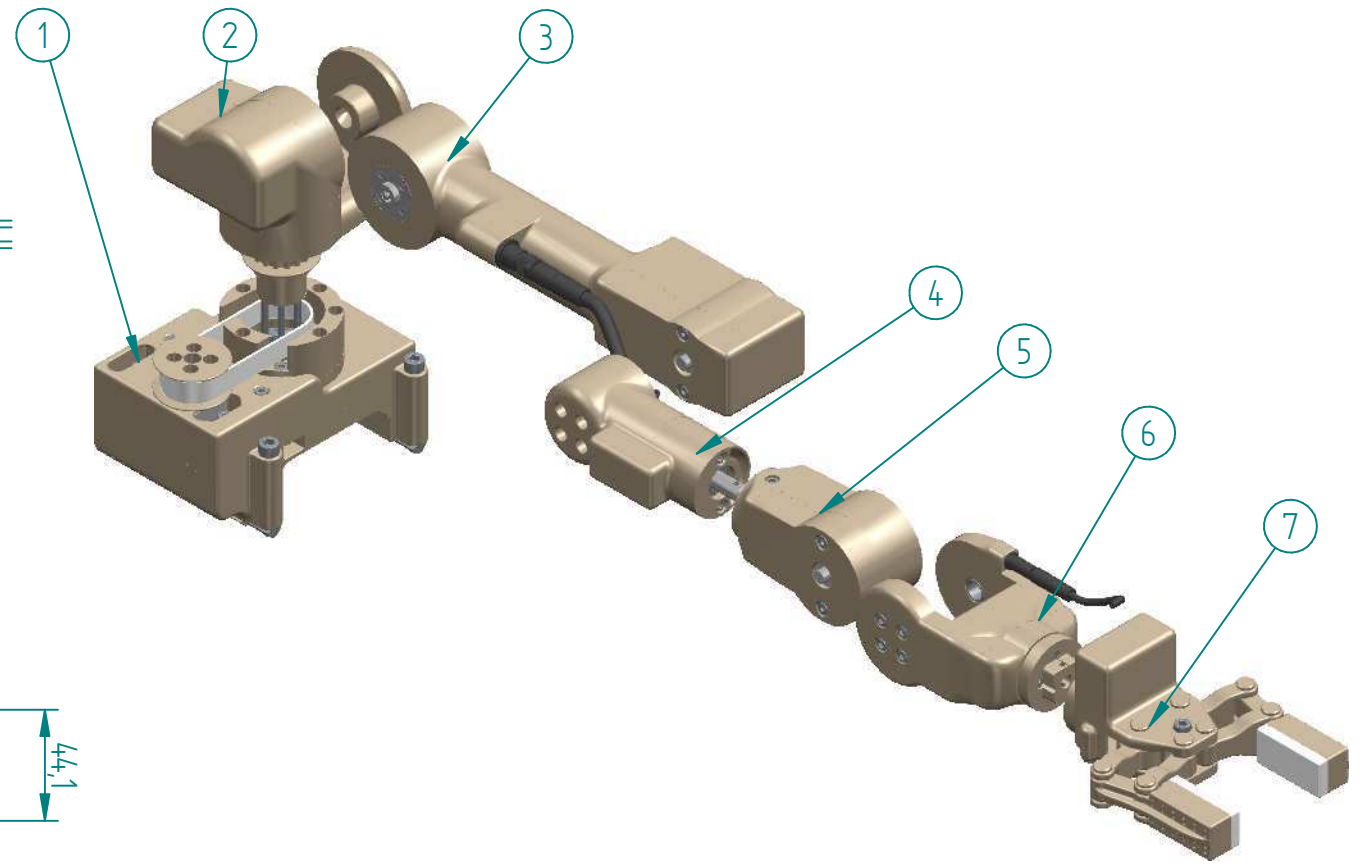
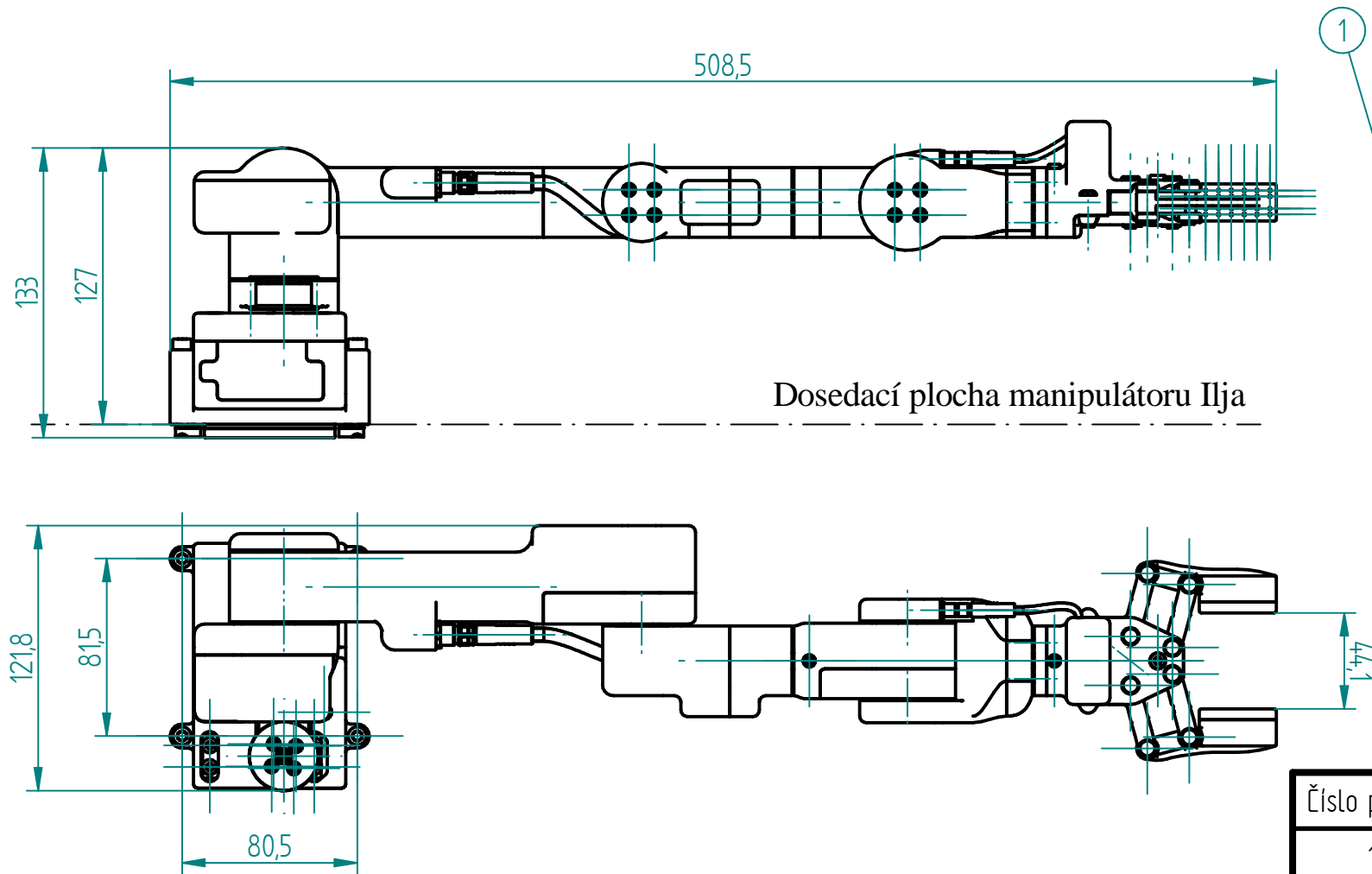
√ Ra 0,8

Netolerované rozměry EN ISO 2768 mK

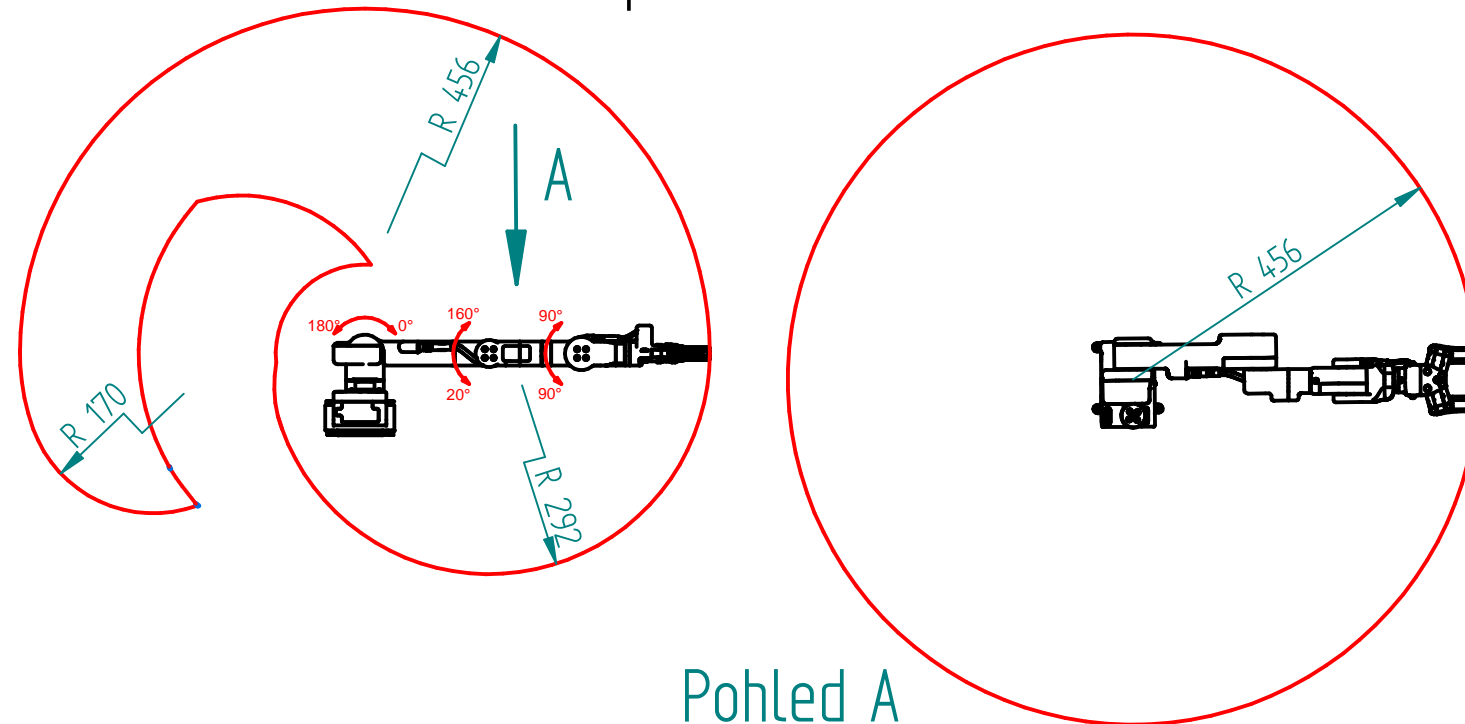
Revize	Vypracoval	Přezkoušel	Schválil	Popis změny	Datum
Název: Hřídel_rameno3				Polotovár, rozměr, norma: KR20 - 35	
Vypracoval: Jiří Kanta		Datum: 06.05.2020		Materiál/Norma: EN AW 6063 T66	
Přezkoušel:		Svař. technolog:		Atest:	
Schválil:		Výpočtář:		Hmotnost čistá: 0,004 kg	

Tento dokument je majetkem společnosti Centrum výzkumu Řež, s.r.o. Veškeré úpravy, kopírování a další šíření jsou možné pouze se svolením pověřené osoby.

	Číslo dokumentu 2D: 0026-01.04.01	Revize:	List:	Z:
		0	1	1
Adresa: Centrum výzkumu Řež, s.r.o., Husinec-Řež č.p. 130, 250 68 Husinec-Řež, Czech Republic	Kusovník: NE	Tabulka svarů: NE		
	Formát: A4	Měřítko: 2:1		



Manipulační rozsah 1:10



Číslo pozice	Název	Číslo dokumentu	Číslo revize	Materiál	Množství	Hmotnost
1	Základna	0026-01.01	0	-	1	0,537 kg
2	Rameno 1	0026-01.02	0	-	1	0,425 kg
3	Rameno 2	0026-01.03	0	-	1	0,521 kg
4	Rameno 3	0026-01.04	0	-	1	0,164 kg
5	Rameno 4	0026-01.05	0	-	1	0,263 kg
6	Rameno 5	0026-01.06	0	-	1	0,174 kg
7	Koncový efektor	0026-01.07	0	-	1	0,133 kg

Revize	Vypracoval	Přezkoušel	Schválil	Popis změny	Datum
Název:				Polotovár, rozměr, norma:	
Robotické rameno					
Vypracoval: Jiří Kanta		Datum: 11.05.2020		Materiál/Norma:	
Přezkoušel:		Svař. technolog:		Atest:	
Schválil:		Výpočtář:		Hmotnost čistá: 2,341 kg	

Tento dokument je majetkem společnosti Centrum výzkumu Řež, s.r.o. Veškeré úpravy, kopírování a další šíření jsou možné pouze se svolením pověřené osoby.

<p>Adresa: Centrum výzkumu Řež, s.r.o., Husinec-Řež č.p. 130, 250 68 Husinec-Řež, Czech Republic</p>	Číslo dokumentu 2D: 0026-01	Revize:	List:	Z:
		0	1	1
		Kusovník: NE	Tabulka svarů: NE	
		Formát: A3	Měřítko: 1:3	