

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B0715A270013 – Strojní inženýrství

Studijní specializace: Strojírenská technologie - technologie obrábění

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Koncept robotického manipulátoru pro strojírenskou praxi

Autor: Jakub FIALA

Vedoucí práce: Ing. Radek Teplý

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jakub FIALA**
Osobní číslo: **S21B0091P**
Studijní program: **B0715A270013 Strojní inženýrství**
Specializace: **Strojírenská technologie-technologie obrábění**
Téma práce: **Koncept robotického manipulátoru pro strojírenskou praxi a průmyslové využití**
Zadávající katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Uvedení do problematiky, rešerše dosavadních přístupů k řešení dané problematiky
2. Specifikace požadavků, komplexní analýza a hodnocení dosavadně užívaných řešení
3. Návrh alternativ koncepčního řešení, hodnocení a volba sub-optimální koncepce řešení
4. Zpracování konceptu vybrané varianty řešení, základní konstrukční návrh konceptu
5. Komplexní hodnocení koncepčního návrhu, shrnutí a závěr

Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**

Rozsah grafických prací: **dle potřeby**

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

Seznam doporučené literatury:

- HOSNEDL, Stanislav a KRÁTKÝ, Jaroslav. Příručka strojního inženýra: obecné strojní části. Praha: Computer Press, 1999. ISBN 80-7226-055-3.
- SICILIANO, B. Springer Handbook of Robotics. Springer Verlag, 2008.
- Podkladové materiály, výkresy, prospekty, katalogy, apod. poskytnuté zadavatelem úkolu.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Radek Teplý**
Katedra technologie
obrábění

Konzultant bakalářské práce: **Ing. Roman Čermák,
Ph.D.**
Katedra konstruování
strojů

Datum zadání bakalářské práce: **16. října 2023**

Termín odevzdání bakalářské
práce: **24. května 2024**

L.S.

Doc. Ing. Vladimír Duchek, Ph.D.
děkan vedoucí katedry

Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Jakub	Jméno Fiala	
STUDIJNÍ PROGRAM	B0715A270013 Strojní inženýrství		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Ing. Teplý	Jméno Radek	
PRACOVISŤE	ZČU - FST – KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Koncept robotického manipulátoru pro strojírenskou praxi		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KTO	ROK ODEVZD.	2024
----------------	---------	----------------	-----	--------------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	97	TEXTOVÁ ČÁST	49	GRAFICKÁ ČÁST	48
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Bakalářská práce obsahuje návrh robotického manipulátoru, který je navržen pro obsluhu 3D tiskárny za účelem nahrazení člověka v zdravotně rizikovém prostředí.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	robotický manipulátor, struktura, konstrukce, griper, automatizace

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Jakub	Name Fiala
STUDY PROGRAMME	B0715A270013 Mechanical Engineering	
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Ing. Teplý	Name Radek
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO	
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Concept of robotic manipulators for non-industrial applications	

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	KTO	SUBMITTED IN	2024
----------------	------------------------	-------------------	-----	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	97	TEXT PART	49	GRAPHICAL PART	48
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The bachelor's thesis includes the design of a robotic manipulator, which is intended for operating a 3D printer to replace humans in hazardous environments.
KEY WORDS	robotic manipulator, structure, construction, griper, automation

Obsah

1.	Úvod.....	1
2.	Cíle práce.....	2
3.	Současný stav robotizace pracovišť.....	2
3.1.	Rozdělení podle způsobu řízení a programování.....	2
3.2.	Rozdělení podle počtu stupňů volnosti.....	4
3.3.	Rozdělení podle kinematického řetězce.....	4
3.4.	Rozdělení podle použitého pohonu.....	5
3.1.	Klasifikace koncových efektorů pro specifickou manipulaci.....	5
3.2.	Souhrn zhodnocení současného stavu.....	6
4.	Specifikace požadavků daných obsluhou 3D tiskárny.....	6
4.1.	Analýza pracovního prostředí.....	7
4.2.	Analýza pracovních úkonů.....	8
4.3.	Analýza rizik.....	10
4.4.	Vyhodnocení analýzy.....	11
5.	Návrh automatizovaného pracoviště.....	12
5.1.	Souhrn těžko automatizovaných úkonů.....	12
5.2.	Definice pomocných prvků.....	12
5.3.	Návrh rozložení automatizovaného pracovního prostředí.....	13
5.4.	Určení požadovaného dosahu robota.....	15
6.	Potřebný typ robota pro automatizaci procesu.....	15
6.1.	Způsob řízení a programování robota.....	16
6.2.	Počet stupňů volnosti robota.....	16
6.3.	Kinematický řetězec robota.....	16
7.	Shrnutí požadovaných charakteristik voleného robota.....	16
8.	Průzkum trhu.....	17
9.	Návrh koncepce robota pro obsluhu 3D tiskárny EOS M 100.....	19
9.1.	Návrh velikosti ramen.....	19
9.2.	Funkční struktura robota.....	21
9.3.	Návrh variant zajištění hlavních funkcí robota.....	22
9.4.	Návrh variant zajištění asistujících funkcí.....	24
10.	Návrh alternativ navrhovaného robota.....	26
11.	Zpracování konceptu vybrané alternativy.....	29
11.1.	Strategie řešení.....	29
11.2.	Návrh konkrétní koncepce griperu.....	30

11.2.1.	Analýza manipulovaných objektů	30
11.2.2.	Návrh pohybového mechanismu griperu	32
11.3.	Zpracování konceptu griperu	33
11.3.1.	Návrh prstů.....	34
11.3.2.	Návrh hnacích pákové ústrojí.....	36
11.3.3.	Návrh bubnů pro Bowdenův převod.....	39
11.3.4.	Souhrn sestavy griperu.....	40
11.3.5.	Kontrolní FEM výpočet	41
12.	Finální sestava robotu	42
12.1.	Analýza deformací navrženého robotu.....	43
12.2.	Zhodnocení sestavy	44
13.	Celkový souhrn navrhovaného konceptu	44
14.	Závěr	45
	Seznam použitých zdrojů	46
	Seznam příloh.....	49

Poděkování

Rád bych poděkoval vedoucímu své práce panu Ing. Radku Teplému a svému konzultantovi panu Ing. Romanu Čermákovy, Ph. D. za jejich cenné rady a pomoc při vypracování této práce.

Přehled použitých zkratk a symbolů

FEM	Metoda konečných prvků
PEEK	Polyéteréterketon
PEEK 30 % CF	Polyéteréterketon s karbonovými vlákny
PLCP	Programovatelný logický automat
W_k	Modul průřezu v krutu
W_o	Modul průřezu v ohybu
M_o	Ohybový moment
M_k	Kroutící moment
I	Moment setrvačnosti
E	Youngův modul pružnosti
σ_o	Napětí v ohybu
τ_k	Napětí v krutu
p	Tlak
δ	Průhyb

Seznam obrázků

Obrázek 1 Operační robot [24].....	3
Obrázek 2 6 stupňů volnosti [25]	4
Obrázek 3 Otevřený kinematický řetězec [4].....	4
Obrázek 4 Uzavřený kinematický řetězec[4]	5
Obrázek 5 Mechanismy paralelních griperů[30]	6
Obrázek 6 Tiskárna EOS M 100	7
Obrázek 7 Vnitřní prostory tiskárny	7
Obrázek 8 Deska na výtisky.....	9
Obrázek 9 Ovládací panel tiskárny.....	9
Obrázek 10 Riziková analýza.....	10
Obrázek 11 Grafické znázornění výsledků analýzy	10
Obrázek 12 Automatizované pracovní prostředí	14
Obrázek 13 Automatizované pracovní prostředí přední pohled.....	14
Obrázek 14 Zjištění maximálního dosahu.....	15
Obrázek 15 Robot UR10e[8].....	17
Obrázek 16 CRX-5iA[9].....	18
Obrázek 17 Hrubá struktura navrhovaného robota.....	19
Obrázek 18 Ilustrace postupu návrhu délky ramen	20
Obrázek 19 Hrubá struktura a délky ramen	21
Obrázek 20 Funkční struktura [10].....	22
Obrázek 21 Uložení lan Bowdenova převodu [27]	24
Obrázek 22 Bowdenův kabel [26]	24
Obrázek 23 Alternativa A s Bowdenovými převody.....	27
Obrázek 24 Alternativa B pouze s elektromotory	28
Obrázek 25 Alternativa C kombinace Bowdenových převodů a elektromotoru.....	28
Obrázek 26 Hrubá orgánová struktura.....	30
Obrázek 27 Úchopné místo zásobníku	31
Obrázek 28 Mechanismus č. 1[28]	32
Obrázek 29 Mechanismus č.2[28]	32
Obrázek 30 Sestava griperu.....	34
Obrázek 31 Model prstu.....	35
Obrázek 32 Hnací páky.....	36
Obrázek 33 Přítlačná síla	37
Obrázek 34 Kontrola převodového ozubení.....	38

Obrázek 35 Deformace griperu	41
Obrázek 36 Robot	42
Obrázek 37 Deformace celého ramene	43
Obrázek 38 položky ze SWOT analýzy robota	44
Obrázek 39 Sestava ramene 3 v řezu	III
Obrázek 40 Sestava ramene v řezu	III
Obrázek 41 Buben ramene 3	IV
Obrázek 42 Deformace ramene 3	VI
Obrázek 43 Rameno 2	VII
Obrázek 44 Rameno 2 v řezu	VII
Obrázek 45 Nosník ramene 2	IX
Obrázek 46 Výsledná deformace nosníku ramene 2	X
Obrázek 47 Deformace ramene 2	XI
Obrázek 48 Rameno 1	XII
Obrázek 49 Kontrola ozubených kol	XIII
Obrázek 50 Nosník ramene 1	XIV
Obrázek 51 Deformace nosníku ramene 1	XIV
Obrázek 52 Deformace ramene 1	XV
Obrázek 53 Základna	XVI
Obrázek 54 Řez základnou	XVI
Obrázek 55 Výpočty oz. kol základny	XVII
Obrázek 56 Deformace základny	XIX
Obrázek 57 Rozměry motoru základny [22]	XXI
Obrázek 58 Převodní skříně	XXII
Obrázek 60 Parametry větších motorů [22]	XXIV
Obrázek 59 Parametry menších motorů [22]	XXIV
Obrázek 61 Měření úhlů natočení ramen pro výpočet bubnových komponent	XXV
Obrázek 62 Příruba enkodérů [23]	XXVII
Obrázek 63 Parametry enkodéru [23]	XXVII

Seznam tabulek

Tabulka 2 Pomocná prvky	12
Tabulka 3 Požadované charakteristiky robotu pro automatizaci procesu	17
Tabulka 4 Technické parametry UR10e[8]	17

Tabulka 5 Technické parametry CRX-5iA[9].....	18
Tabulka 6 Délky ramen navrhovaného robata	21
Tabulka 7 Morfologická matice pro zajištění hlavních funkcí.....	23
Tabulka 9 Morfologická matice variant zajištění asistujících funkcí.....	25
Tabulka 8 Morfologická matice navržených alternativ pro zajištění hlavních funkcí	26
Tabulka 9 Morfologická matice variant zajištění asistujících funkcí.....	27
Tabulka 12 Vyhodnocení analýzy	33
Tabulka 11 Stanovení kritérií volby mechanismu	33
Tabulka 12 Souhrn vlastností sestavy griperu.....	41
Tabulka 13 Parametry robotu	42
Tabulka 14 Souhrn vlastností sestavy ramene 3.....	V
Tabulka 15 Souhrn vlastností sestavy ramene 2.....	XI
Tabulka 16 Souhrn vlastností sestavy ramene 1.....	XV
Tabulka 17 Souhrn vlastností základny	XVIII
Tabulka 18 Momenty setrvačnosti pro maximální vyložení ramena.....	XIX
Tabulka 19 Hodnoty sil v lanech.....	XXII
Tabulka 20 Průměry hnacích bubnů a motory[22]	XXIII
Tabulka 21 Hodnoty otočení ramen	XXV
Tabulka 22 Hodnoty délek lan	XXVI
Tabulka 23 Počty navinutí	XXVI

1. Úvod

Automatizace je v dnešní době jak v průmyslu, tak i v běžném životě zjevným trendem. Jejím úkolem je přenést lidské činnosti na stroj za účelem zvýšení efektivity, produktivity, kvality výroby a snížení rizikovosti lidského faktoru. Automatizovány mohou být různé činnosti, například řízení obráběcích strojů, vysávání podlahy nebo řízení auta. V průmyslu se automatizace používá převážně ve výrobě a logistice. S vývojem techniky rostou také možnosti, jaké věci automatizovat lze, a proto lze předpokládat, že automatizace v budoucnosti bude přibývat. Tím bude docházet k úbytku nekvalifikované pracovní síly a růstu poptávky po odborně vzdělaných pracovnících, a to především v oboru automatizace a robotiky. Za účelem získání znalostí a dovedností v tomto oboru je také zvoleno téma této práce.

Roboti představují poměrně mladou technologii, protože se v průmyslu začali používat kolem 60. let 20. století, ale jejich vývoj byl natolik rychlý, že již v 80. letech jich bylo nasazeno ve výrobě několik tisíc. Dnes jsou robotické manipulátory v průmyslu používané běžně. Existuje mnoho výrobců, kteří poskytují roboty, kteří jsou kompaktní a dokážou unést lehká až středně těžká břemena. Cílem této práce je právě takový manipulátor navrhnout. Robotický manipulátor je navrhovaný pro automatizaci procesu obsluhy 3D tiskárny, která tiskne z kovového prášku. Jelikož jsou ale doby tisku na 3D tiskárně obecně dlouhé, je navrhovaný manipulátor umístěn na pojízdnou platformu, aby mezi dobami tisku mohl dělat i další činnosti. U této platformy se předpokládá, že bude navržena tak, aby odpovídala potřebám manipulátoru.

Tato práce se skládá z teoretická části, která se zabývá především seznámením se s druhy robotů a popisu automatizovaného procesu, podle kterého je proveden návrh automatizovaného pracoviště. Ten je stěžejní při určení potřebného charakteru robota a činností, které musí robot zajišťovat pro provedení obsluhy tiskárny. Dále je proveden průzkum trhu za účelem zjištění, jestli je vhodné provést vlastní návrh robotického manipulátoru. Tím je ukončena teoretická část a začíná část vlastního návrhu. Podle určených činností jsou následovně navrženy varianty způsobů jejich naplnění, ze kterých vyplývají potřebné prvky, které musí být zakomponovány do konstrukce robota. Poté je proveden návrh jednotlivých částí robota tak, aby odpovídaly daným zátěžím a struktuře robota. Podle navržených částí a zátěží jsou pak zvoleny specifické pohony. Na závěr je robot porovnán s prodávanými verzemi a je zhodnoceno, zda je nutné provést jeho úpravy. Výstupem práce jsou vytvořené modely a sestava robota.

2. Cíle práce

Návrh robotického manipulátoru je poměrně komplexní proces, proto je nutné před jeho začátkem přesně stanovit vstupní požadavky, podle kterých je možné určit řídicí charakteristiky robota a náplň jeho úkonů tak, aby následně navržený robot byl schopný správně plnit svou funkci. Z těchto vstupních požadavků a potřebných charakteristik také vyplývá, zda je daný proces možné nebo vhodné automatizovat a zda není lepší místo vlastního návrhu zakoupit nějakého dostupného robota. Za účelem stanovení popsaného je nutné provést určité kroky, které tvoří strukturu této práce. Tyto kroky jsou:

1. Seznámení se se současným stavem robotiky.
2. Definice procesu, který je automatizován.
3. Návrh automatizovaného pracoviště.
4. Stanovení toho, jakým robotem je daný proces možné automatizovat.
5. Průzkum trhu.
6. Vlastní návrh robota.

3. Současný stav robotizace pracovišť

Při návrhu robota pro automatizaci procesu je vhodné se nejprve seznámit s tím, jaké roboty existují a jakými způsoby je manipulace zajištěna, aby byl získán teoretický základ pro správné určení potřebného druhu navrhovaného robota a koncového efektoru a bylo možné navrhnout vhodnou manipulátor pro daný automatizovaný proces.

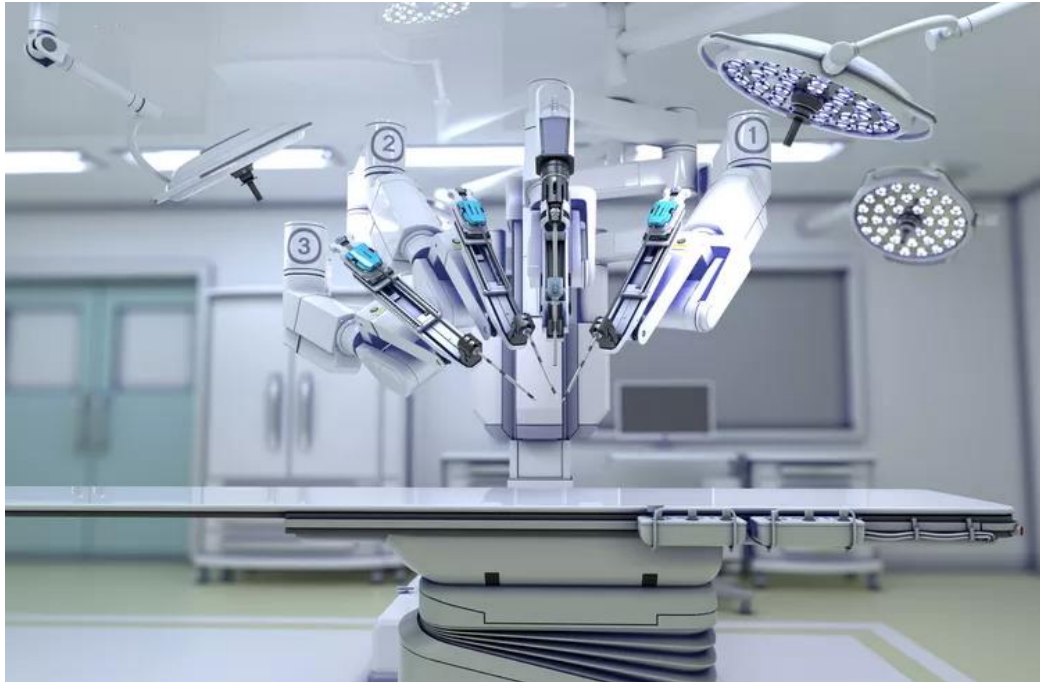
V průmyslu se používá mnoho druhů robotů a manipulátorů, které lze rozdělit podle několika kritérií, jako jsou počet stupňů volnosti, kinematický řetězec, použitý pohon, způsob řízení či způsob programování. Existuje více kritérií, podle kterých jsou členěni, avšak tato dělení neobsahují žádné technické specifikace, proto zde nejsou rozebírány. [1]

3.1. Rozdělení podle způsobu řízení a programování

Způsob řízení a programování robotického manipulátoru jednoznačně vyplývá z charakteristiky automatizovaného procesu. Z hlediska způsobu řízení a programování je možné navrhnout manipulátory s pevným programem, synchronní manipulátory, roboty neboli manipulátory s pružným programem, adaptivní roboty schopné reagovat na změny pracovního prostředí a na kognitivní roboty, které mají do určité míry integrovanou umělou inteligenci. [2]

Manipulátory s pevným programem mají řídicí systém a řídicí program, který se v průběhu manipulace nemění. Tudíž konají stále se opakující pohyby v zadané smyčce. [2]

Synchronní manipulátory jsou zařízení, která vykonávají synchronní pohyby a jsou přímo ovládána člověkem. Řídicím systémem těchto manipulátorů je tedy člověk, který pomocí ovládacích prvků ovládá pohyby manipulátoru. Ve světě je možné se s nimi setkat v lékařství, kde se používají pro vykonávání přesných a citlivých pohybů, nebo v mořském výzkumu, kde slouží k manipulaci s objekty v nehostinných podmínkách, jako jsou mořské hlubiny. Tyto manipulátory mají samozřejmě i využití v průmyslu, kde se nejčastěji používají pro manipulaci s těžkými břemeny. Ukázka lékařského synchronního manipulátoru je uvedena na obrázku 1: Operační robot.[1]



Obrázek 1 Operační robot [24]

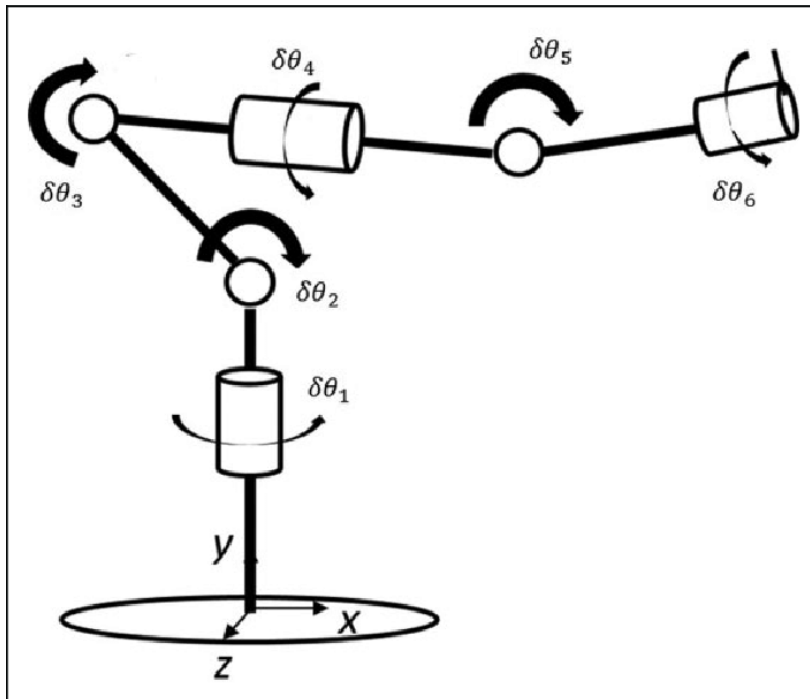
Roboty s pružným programem jsou zařízení s automatickými řídicími systémy. Tato verze manipulátorů je v průmyslu nejčastějším způsobem automatizace manipulace. Automatický řídicí systém je člověkem naprogramován tak, aby robot vykonával požadované úkony a je možné, aby byl snadno přeprogramován na vykonávání jiných úkonů. Díky tomu je robot schopný přizpůsobit se velké škále procesů a může provádět široké spektrum činností. Tyto roboty jsou velmi často používány k automatizaci výrobních nebo montážních linek, kde slouží k urychlení práce a snížení výrobních nákladů. Jejich nevýhodou je však neschopnost reagovat na své prostředí.[2]

Adaptivní průmysloví roboti už ale dokážou reagovat na změny prostředí. V nich se již objevuje náznak umělé inteligence ve formě algoritmu, který je schopný zpracovávat data o svém okolí pomocí různých senzorů a čidel a na základě těchto dat přizpůsobit svou činnost tak, jak je mu předem určeno. V průmyslu se tyto adaptivní roboti využívají v procesech, kde je nutná kontrola výrobků nebo přímo to, zda proces výroby probíhá správně.[2]

Kognitivní roboti jsou již o krok napřed před adaptivními. Jejich řídicí algoritmus je již natolik vyspělý, že si dokážou sami generovat program činností a jsou schopni se učit z předchozích zkušeností a tím zlepšovat svou činnost a odhadovat budoucí výsledky.[2]

3.2. Rozdělení podle počtu stupňů volnosti

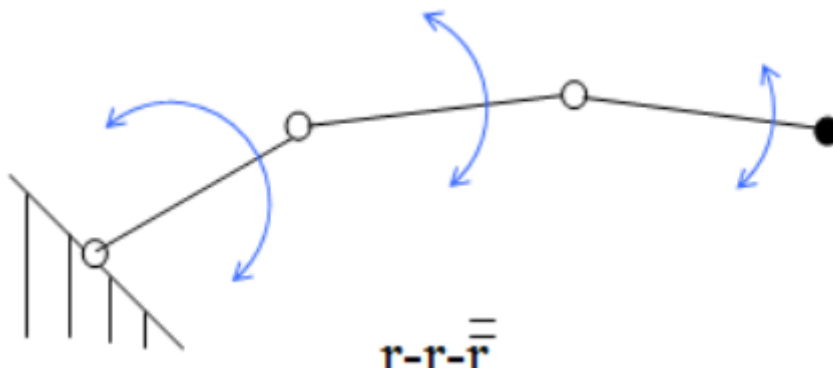
Stupně volnosti představují směry, ve kterých se může robot pohybovat. Tyto směry jsou podél os x , y a z a rotace kolem nich. Roboti mohou mít od 2 až do 6 stupňů volnosti, ovšem existují také redundantní, které mají „více“ než 6 stupňů volnosti. Robot se 6 stupni volnosti je schopný pohybovat svým griperem do takových poloh, jako by nebyl vůbec vázaný k zemi. Redundantní roboti využívají větší volnosti k obcházení překážek, nebo k pohybu ve stísněných prostorech pro montáže prvků k rovině. [3] Na obrázku č. 2 je vidět způsob zajištění šesti stupňů volnosti, pomocí šesti rotačních kloubů.



Obrázek 2 6 stupňů volnosti [25]

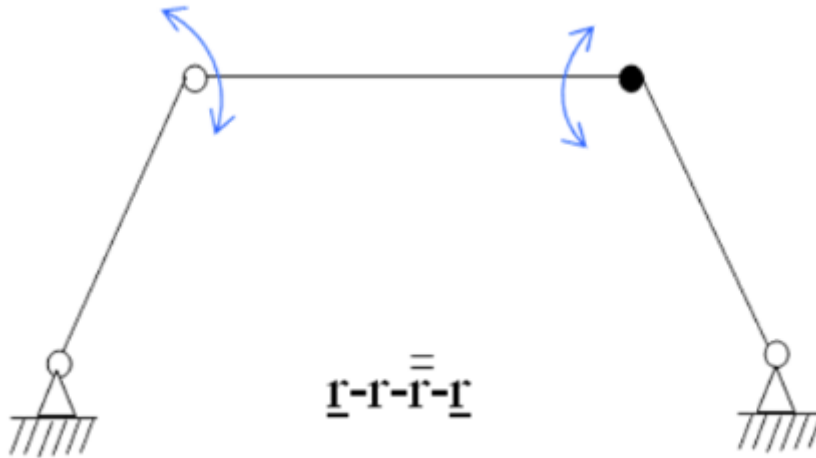
3.3. Rozdělení podle kinematického řetězce

Kinematické řetězce představují zapojení jednotlivých členů robotů a vazby mezi nimi. Rozlišují se na otevřené kinematické řetězce a uzavřené, v závislosti na tom, jak jsou jednotlivé členy spojeny s rámem. Otevřený kinematický řetězec je zobrazen na obrázku č. 3. [4]



Obrázek 3 Otevřený kinematický řetězec [4]

Ten je charakteristický tím že má poslední člen řetězce volný mezitím co uzavřený, zobrazený na obrázku č.4, ho má připojený krámu.



Obrázek 4 Uzavřený kinematický řetězec[4]

3.4. Rozdělení podle použitého pohonu

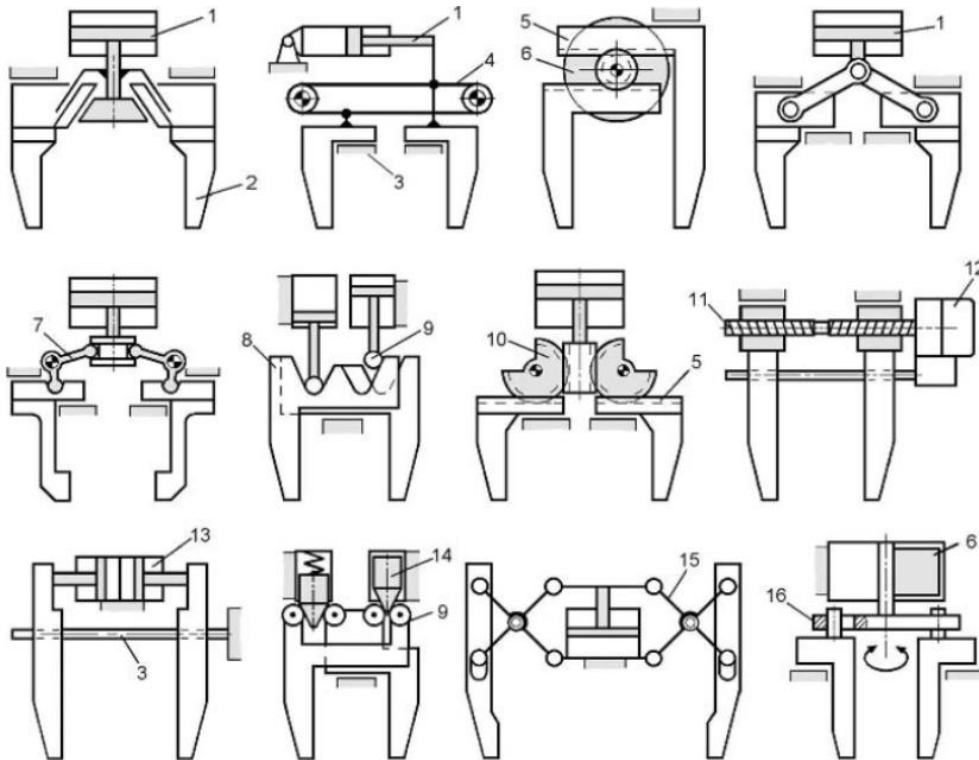
To, jaký pohon používá robot, má přímý vliv na jeho schopnost a způsob vykonávání práce. Nejčastěji se používají tři druhy pohonů - elektrický, hydraulický a pneumatický. V současné době jsou nejrozšířenější roboti s elektrickým pohonem, protože jsou méně složité než hydraulické a pneumatické pohony. Hydraulické pohony se používají především u robotů s vysokými požadavky na nosnost. Pneumatické pohony jsou zase vhodné pro roboty s vysokými požadavky na rychlost pohybu. [1]

3.1. Klasifikace koncových efektorů pro specifickou manipulaci

Protože je navrhovaný robot manipulační je jeho součástí i úchopová hlavice neboli gripery. Ty lze rozdělit na dva základní druhy, a to jednostranné a oboustranné. Jednostranné hlavice využívají působení gravitačních, magnetických a podtlakových sil. Oboustranné mechanismy zajišťují úchop pomocí působení protilehlých sil, mechanickými prostředky. Tyto dva základní druhy lze rozdělit na pasivní, u kterých nelze ovládat úchopovou sílu a aktivní u kterých to lze.

Dále je lze rozdělit podle principů na kterých fungují. Magnetické uchopovače, se používají na manipulaci s kovovými prvky. Podtlakové se využívají při manipulaci s objekty, kde je možné zajistit vysokou těsnost styku. Posledním podstatným druhem jsou mechanické, které fungují na stejném principu jako lidská ruka. Ty mohou mít dva i více prstů.[5]

Na obrázku č.5 jsou vidět příklady mechanických paralelních griperů.



Obrázek 5 Mechanismy paralelních griperů[30]

3.2. Souhrn zhodnocení současného stavu

Po seznámením se současným stavem robotizace pracovišť je získaný potřebný základ pro následovně řešení návrhu robota. Ovšem pro jeho správný návrh je také nutné seznámit se s procesem, který má automatizovat. Z tohoto důvodu je nutné se nejprve podrobně seznámit s daným procesem, abychom mohli určit, jaký robot je pro automatizaci vhodný.

4. Specifikace požadavků daných obsluhou 3D tiskárny

Jak již bylo zmíněno výše, k určení vhodného robota pro automatizaci procesu je nejprve nutné daný proces dostatečně definovat. Ovšem jeho definice slouží i k dalšímu účelu, který je v rámci této práce ještě podstatnější, a to posouzení, zda je tento proces vůbec vhodné automatizovat, a jestli ho lze automatizovat. To, zda je proces vhodné automatizovat, závisí na tom, jaké výhody jeho automatizace může přinést. Obvyklými důvody pro automatizaci procesů jsou úspora času, peněz a také eliminace chyb způsobených lidským faktorem. Automatizace však může přinášet také jiné výhody než jen zisk firmy. Díky ní je možné eliminovat lidskou práci v nebezpečném nebo zdraví ohrožujícím prostředí. To, jaké výhody může automatizace přinést, vyplývá z charakteru daného procesu, který je viditelný v jeho definici, pro kterou je nutné provést analýzu procesu.[5]

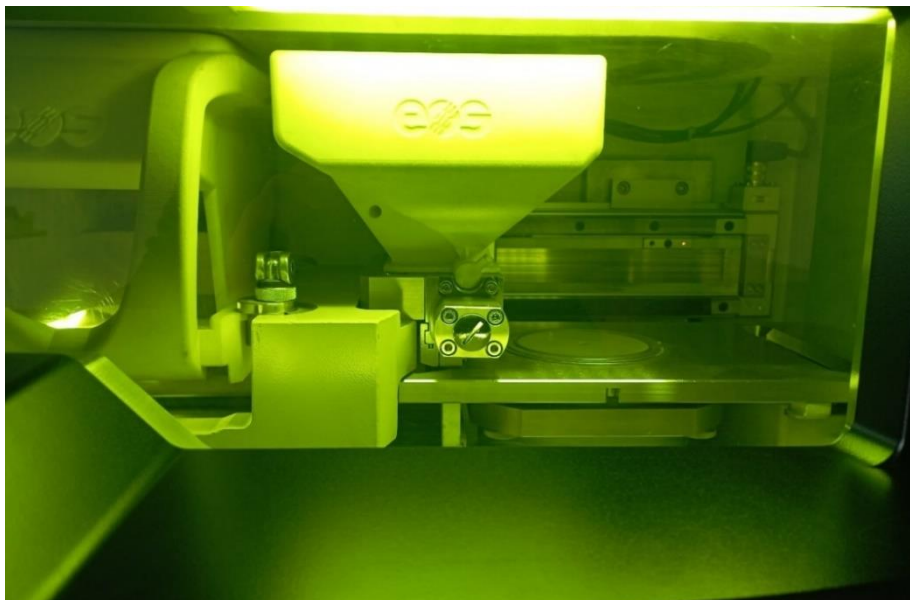
Pro správné určení požadavků na robotický manipulátor je nutné provést analýzu jednotlivých úkonů, ze kterých se obsluha tiskárny skládá, a také provést analýzu prostředí, ve kterém se odehrává. Ovšem za účelem stanovení toho, zda je tento proces vhodné automatizovat, je také na místě provést analýzu rizik, která nastávají při obsluze, jelikož jednou z výhod, které automatizace může přinést, je jejich eliminace nebo snížení. Proto je analýza procesu obsluhy tiskárny rozdělena na tři části-analýzu pracovního prostředí, analýzu pracovních úkonů a analýzu rizik.

4.1. Analýza pracovního prostředí

Pracovní prostředí, ve kterém se proces odehrává, má velký dopad na to, jak proces probíhá, a také má dopad na operátora vykonávajícího potřebné úkony, což je z hlediska této práce velmi podstatné. Automatizovaným procesem je obsluha 3D tiskárny EOS M 100 na obrázku č.6, jejíž vnitřní prostory je možné vidět na obrázku č.



Obrázek 6 Tiskárna EOS M 100



Obrázek 7 Vnitřní prostory tiskárny

Tato 3D tiskárna je nejpodstatnější součástí pracovního prostředí, jelikož její parametry definují pracovní prostory, ale také její obsluha vyžaduje manipulaci s kovovými prášky, které hrají velkou roli při analýze rizik.

Pracovní prostory lze v případě této práce rozdělit na vnitřní a vnější, přičemž za vnitřní prostory jsou považované všechny prostory uvnitř 3D tiskárny a za vnější prostory vně tiskárny. Velikosti pracovních prostor mají přímý dopad na to, jak mohou být prováděny pracovní úkony, a tudíž i na výsledné rozměry robotického manipulátoru a jeho součástí. Ale lze předpokládat, že vnější pracovní prostory v okolí tiskárny nezůstanou při automatizaci procesu stejné a dojde k jejich změně. Proto je v této fázi zbytečné z pracovních prostor tiskárny vyvozovat požadavky na potřebný robot, jelikož i ty se mohou změnit.

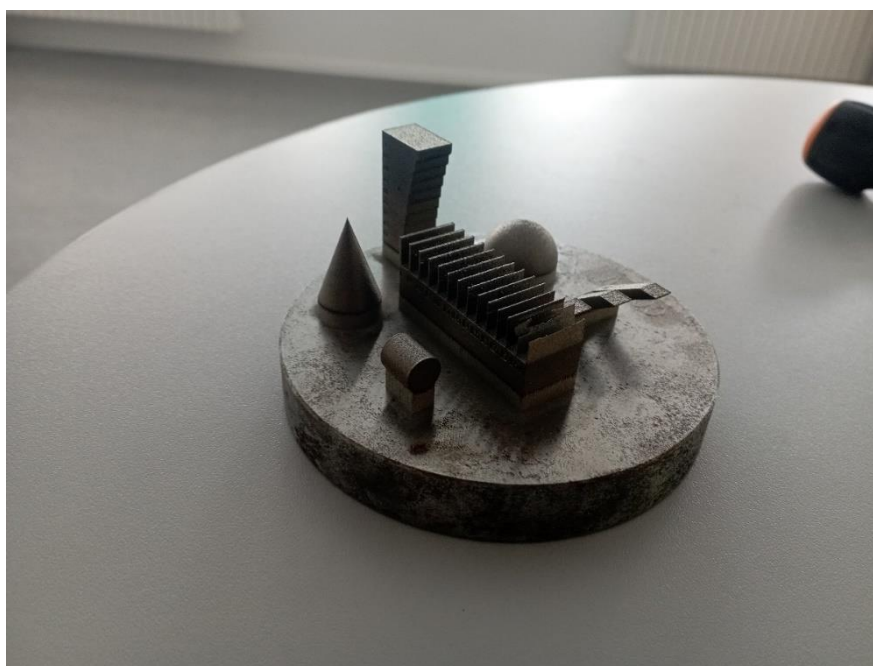
4.2. Analýza pracovních úkonů

Tato analýza je jednou z nejdůležitějších součástí návrhu robotického manipulátoru pro automatizaci procesů. Z této analýzy vyplývají jednotlivé požadavky na činnosti, které musí robotický manipulátor vykonat, a tudíž celý jeho návrh.

Obsluha 3D tiskárny probíhá tak, že po dokončení tisku je pomocí stisknutí bezpečnostního tlačítka odjištěn bezpečnostní kryt a je otevřen pomocí kliky na jeho boční straně. Následně je přebytečný kovový prášek z pracovního stolu tiskárny smetený do zbytkového zásobníku se zbytkovým práškem, deska s výtisky je vysunuta a je vypnutý pneumatický zámek, který ji upevňuje v pracovním stole. Zbytkový prášek vytlačený deskou na povrch je opět smetený do zbytkového zásobníku. Deska je přemístěna na vedlejší pracovní stůl a zbytkový prášek zbylý na pracovním stole a mimo pracovní stůl je nutné vysát. Poté je vyjmut zásobník s práškem a spodní zásobník pod ním, do kterého je hlavní zásobník zasunut po dobu průběhu manipulace s ním. Poté je vyndán zásobník se zbytkovým práškem a zbytkový prášek je z něj přes síto přesypán do hlavního zásobníku, od kterého je následně spodní zásobník odepnut a všechny jsou následně opět upnuty zpět do tiskárny. Poté se na dosedací část pracovního stolu tiskárny vloží nová deska nebo původní deska s odstraněnými výtisky. Nejprve je ale do kruhového vybrání ve spodní straně desky vložena gumička, která slouží jako izolace proti vniknutí vzduchu do prostoru mezi deskou a dosedací částí pracovního stolu. Následně je pomocí ovládací konzole spuštěn pneumatický zámek, který vyvolá podtlak na úchopné straně destičky, a tím zajistí její pozici. Poté je pomocí displeje tiskárny deska vtažena do pracovního stolu a pomocí úchylkoměru je zjištěno, zda je deska ve správné výšce. Pokud není, tak je její výška nastavena pomocí konzole. Po přípravě a vyrovnání desky je uzavřen kryt pracovního prostoru a opět pomocí konzole je spuštěn proces samotného tisku. Doba tisku může být až v řádech dnů, což závisí na velikosti tištěné součásti. Celý proces zabere přibližně kolem 10-15 minut a nejtěžším objektem, se kterým se manipuluje, je zásobník, jehož váha při maximálním naplnění je 5 kg. Na obrázku č.7 je zobrazen ovládací panel tiskárny a na obrázku č.8 ovládací panel tiskárny.



Obrázek 9 Ovládací panel tiskárny



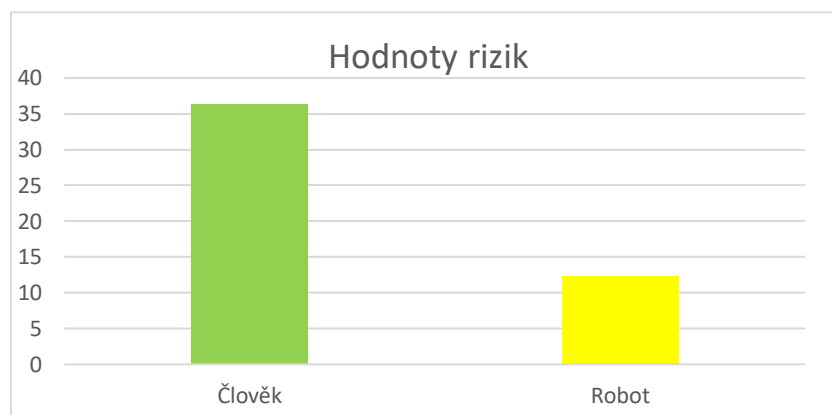
Obrázek 8 Deska na výtisky

4.3. Analýza rizik

Jelikož při automatizaci dochází k nahrazení lidského faktoru, dochází také k eliminaci nebo zmenšení rizik spojených s ním. Těmito riziky jsou jak rizika zranění obsluhujícího pracovníka, tak i poškození majetku. Pro posouzení toho, jak se hodnota rizik změní při automatizaci, je vypracována analýza rizik. Analýza rizik určuje hodnotu daného rizika. Tato hodnota je spočítána jako váha rizika krát pravděpodobnost nastání dané situace. Výsledné hodnoty daných rizik jsou zobrazeny v grafu rizikové analýzy na obrázku č.10 a jednotlivé hodnoty použité pro jejich výpočet jsou vypsány v tabulce na obrázku č.11.

	Člověk			Robot		
	Váha rizik	Hodnota pravděpodobnost	Hodnota rizika	Váha rizik	Hodnota pravděpodobnost	Hodnota rizika
Zranění operátora/poškození stroje při manipulaci	4	1,8216	7,2864	2	1,21	2,42
Poškození tiskárny při manipulaci	4	1,8216	7,2864	4	1,21	4,84
Újma vzniklá vystavením prášku	10	2,17074	21,7074	3	1,68	5,04
Suma			36,2802			12,3

Obrázek 10 Riziková analýza



Obrázek 11 Grafické znázornění výsledků analýzy

Při obsluze tiskárny je analýza rizik zaměřena na 3 možná rizika. Prvním rizikem je úraz člověka či poškození stroje konajícího obsluhu, chybou při jejím provádění. K nejzávažnějším úrazům či poškození může dojít upuštěním předmětu, se kterým se manipuluje. Ovšem jelikož je váha nejtěžšího objektu, se kterým se manipuluje 5 kg, tak při jeho pádu z výšky, ve které se s ním hýbe, nevznikne vážné zranění ani poškození, proto se tomuto riziku dává malá váha. Pravděpodobnost toho, zda k úrazu člověka při manipulaci dojde, závisí na více kritériích. U člověka jsou tyto kritéria možnost ztráty rovnováhy a pád s objektem, se kterým se manipuluje, špatné uchopení objektu, chyby z nepozornosti a vlivem únavy. U robotu jsou to zase porucha pohonu, výpadek energie, kolize způsobená chybou odměřování vzdáleností a riziko kolize způsobené výskytem cizích objektů na pracovišti. Těmto kritériím je na základě subjektivního ohodnocení přiřazena hodnota, která vyjadřuje pravděpodobnost, že nastane situace, kterou dané kritérium popisuje. Vynásobením přiřazených hodnot se získá celková hodnota pravděpodobnosti, že dojde k úrazu nebo poškození.

Dalším rizikem je poškození tiskárny. Tomuto riziku je dána větší váha, protože tiskárna a její případná oprava jsou drahé. Pravděpodobnost, že k takovému poškození dojde vyplývá ze stejných kritérií, jako riziko zranění obsluhy nebo poškození robotu, a proto je její celkové ohodnocení stejné.

Poslední zvažované riziko je poškození operátora či stroje způsobené vystavením kovovým práškům. Tyto kovové prášky ohrožují zdraví lidí, kteří s nimi přijdou do kontaktu, a to i v případě, že jejich chemické složení není nijak silně toxické. Tomu je z důvodu malé

velikosti jejich částic, které se pohybují v řádech mikrometrů. Malá velikost těchto částic způsobuje, že je člověk může snadno vdechnout nebo se mohou dostat do jeho těla skrz kůži nebo i oči. A jelikož lidské tělo nemůže tyto prášky snadno metabolizovat, snadno jejich množství v těle dosáhne kritických hodnot, což může vést k dlouhodobému poškození dýchacích cest nebo různým onemocněním. [6]Z toho důvodu je tomuto riziku přidělena velká váha. Kritéria, podle kterých je vytvořené celkové ohodnocení pravděpodobnosti poškození zdravý člověka při práci s těmito prášky, jsou nadměrné vystavení prášku chybou při manipulaci s ním, vada ochranných pomůcek, chybné použití ochranných pomůcek a nedostatečné ochranné pomůcky.

U strojů se vystavení těmto práškům může projevit zanášením spojů, čímž dochází k zhoršování jeho pohyblivosti a snižování celkové životnosti strojních částí, nebo zanesením elektrických rozvodů v robotu, které mohou způsobit zkraty. Ovšem poškozený stroj jde zpravit nebo koupit nový, proto je hodnota tohoto rizika výrazně menší než u člověka. Kritéria, podle kterých je vyhodnoceno celkové ohodnocení pravděpodobnosti poškození robotu jsou nedostatečná izolace, špatná filtrace větráků řídicí jednotky, tvorba nánosů prášku a zanesení práškem vznikem opotřebení izolace.

4.4. Vyhodnocení analýzy

Po prozkoumání jednotlivých aspektů procesu obsluhy je možné provedené analýzy vyhodnotit. Účelem vyhodnocení je stanovení, zda je tento proces vhodné automatizovat a určení jednotlivých potřebných úkonů pro provedení obsluhy.

Jelikož je pracovní doba stroje až v jednotkách dnů a čas, který stráví operátor obsluhou stroje, je několik minut, lze konstatovat, že by automatizace z časového a ekonomického hlediska nebyla vhodná a ekonomičtější by bylo, kdyby operátor v čase, kdy tiskárna tiskne, obsluhoval jiné stroje. Z ekonomického hlediska by mělo smysl tento proces automatizovat v případě, kdyby tisklo více stejných tiskáren zároveň s kratšími dobami tisku a pojízdný manipulátor by je mohl obsluhovat po dokončení tisku jedné z nich. V případě obsluhy jedné tiskárny se automatizace finančně nevyplatí. Ovšem z analýzy rizik vyplývá, že obsluha tiskárny je mnohokrát méně riziková, když je prováděna robotem. Proto z důvodu eliminace lidského faktoru v rizikovém pracovním prostředí dává automatizace obsluhy 3D tiskárny smysl.

Potřebné úkony, ze kterých se automatizovaný proces skládá, jsou uchopení a přenesení daných objektů, ovládání řídicí konzole, uchopení kliky a otevření krytu tiskárny. Dále musí obsluha vložit gumičku do vybrané desky a změřit výšku desky vůči stolu. Také musí zvládnout manipulaci s práškem, tedy jeho zametení, vysátí a přesýpaní, přičemž musí být chráněna před práškem.

Kvůli různorodým tvarům, materiálům a poměrně vysoké požadované nosnosti lze jednoznačně určit požadovaný griper jako mechanický. Specifické rozměry a parametry objektů jsou řešeny až v sekci návrhu robota, kde je pro ně také navrženo řešení.

Všechny úkony, které obsluha tiskárny zahrnuje, je možné automatizovat, i když u některých je nutné použít přípravky nebo pomocná zařízení pro jejich realizaci, jelikož by byly pro robotický manipulátor velmi složité. Z toho důvodu stále ještě není možné určit, jaký robot musí být a je třeba nejprve definovat, jak bude automatizované prostředí vypadat při použití pomocných prvků a jaké budou použité pomocné prvky.

5. Návrh automatizovaného pracoviště

Jak bylo předpokládáno a následovně potvrzeno vyhodnocením analýzy pracovních úkonů, pracovní prostředí, ve kterém může obsluhu vykonávat robot, se musí od původního lišit, jelikož musí být při obsluze použita určitá pomocná zařízení, které obsluhu robotu usnadní, aby navrhovaný robot nebyl zbytečně komplexní. Proto je pro navržení správného druhu robota nutné napřed stanovit, jaké tyto pomocné prvky jsou a následovně určit jejich polohy v automatizovaném pracovním prostředí, aby bylo možné určit potřebný dosah. Za účelem jejich určení jsou nejprve identifikovány pracovní úkony, které jsou pro automatizaci obtížné.

5.1. Souhrn těžko automatizovaných úkonů

Za těžko automatizované úkony jsou považované ty, které pro jejich naplnění vyžadují komplexní řešení charakteru griperu nebo konstrukce robota. Z úkonů, které tvoří obsluhu tiskárny, to jsou: přesypání prášku, vysávání a znamenání prášku, měření výšky dosedací plochy pro desku s výtisky, nasazení gumičky do desky a otevření krytu tiskárny.

Zametání a vysávání prášku sice nejsou složité činnosti, ale pro jejich zajištění robotem by musel robot mít vlastní kompresor, trubici a koště. Zakomponováním těchto prvků do jeho konstrukce by mohlo dojít ke zhoršení schopnosti manipulovat s ostatními věcmi. Přesypání prášku je považováno za těžko automatizované, protože by navrhovaný robot musel mít vlastní síto a musel by konat rychlé krouživé pohyby pro jeho použití, což opět zbytečně komplikuje jeho konstrukci.

Měření výšky dosedací plochy není ve své podstatě komplikovaný úkon, ale bylo by nutné zakomponovat měřicí zařízení do griperu. Toto měřidlo by mohlo být při konání jiných operací poškozené, a proto jeho zakomponování do griperu není vhodné. Dalším náročným úkonem je otevření krytu tiskárny kvůli uložení kliky krytu, který je ve vnitřku krytu, a proto je těžko dosažitelný. Tento problém lze opět řešit specifickou konstrukcí griperu, ale není to ideální řešení ze stejných důvodů jako u vysávání a zametání.

Posledním z těchto úkonů je manipulace s gumičkou. Je náročné ji uchopit kvůli jejím malým rozměrům a také je těžké ji nasadit kvůli její pružnosti a malé velikosti drážky na desce.

Ostatní úkony, které tvoří obsluhu tiskárny, jsou už jen manipulace se zásobníky a ovládání displeje tiskárny, které lze provést poměrně jednoduše a není pro ně nutné navrhovat pomocná zařízení.

5.2. Definice pomocných prvků

Pomocné prvky pro usnadnění úkonů nejsou součástí této práce, proto zde nebyl proveden jejich specifický návrh a jsou zde pouze stručně popsány. V tabulce č.2. jsou uvedena pomocná zařízení přiřazená k jednotlivým úkonům.

Tabulka 1 Pomocná prvky

Vysávání	Samostatný vysavač
Zametání	Samostatný koště
Přesypání prášku	Přesýpací stanice
Měření	Elektrický úchylkoměr
Otevření krytu	Pomocná klika

Sebrání gumičky	Věšák gumiček
Nasazení gumičky	Specializované zařízení

Pro vysátí a zametání jsou navrženy prvky, které lze pomocí griperu jednoduše uchopit a dané činnosti provést manipulací s nimi. Podobně je řešeno i měření, ale elektronický úchylkoměr musí být spojený s řídicí jednotkou, aby jí mohl předávat potřebné informace, na základě, kterých může robot rozhodovat o následujících požadovaných akcích.

Pomocný prvek pro zajištění přesypání prášku je přesýpací stanice, do které je možné pouze umístit jednotlivé zásobníky, zapnout ji a zbytkový prášek přesypat. Pro otevření krytu je využita pomocná klika, která je pevně nasazena na původní kliku tak, že v každé pozici vyčnívá do prostoru a tím je vyřešen problém s přístupností původní kliky.

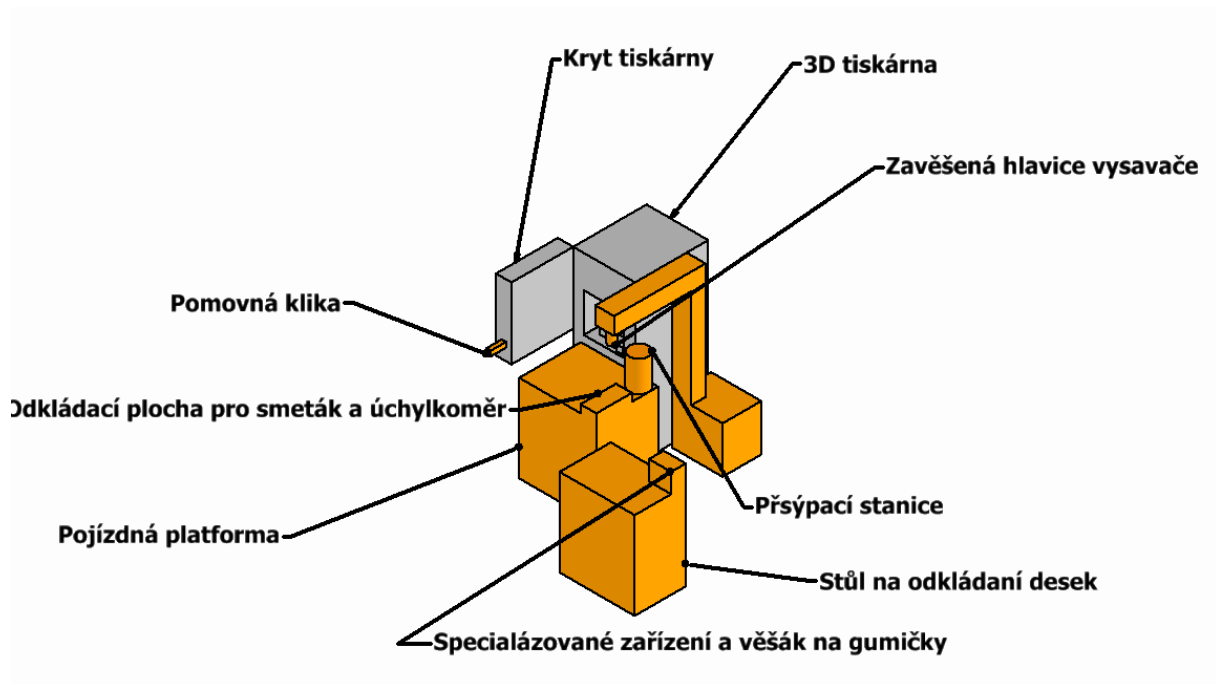
Poslední prvky jsou věšáky na gumičky, které jednoduše umožňují jejich zavěšení a sebrání z nich, a specializované zařízení pro navlékání gumičky. Toto zařízení musí být navrženo tak, aby na něj mohla být gumička nasazena jednoduše a mohla být přemístěna pomocí jednoduchého pohybu robota do drážky desky.

Když jsou stanoveny pomocné prvky, je možné na základě nich navrhnout rozložení automatizovaného pracoviště.

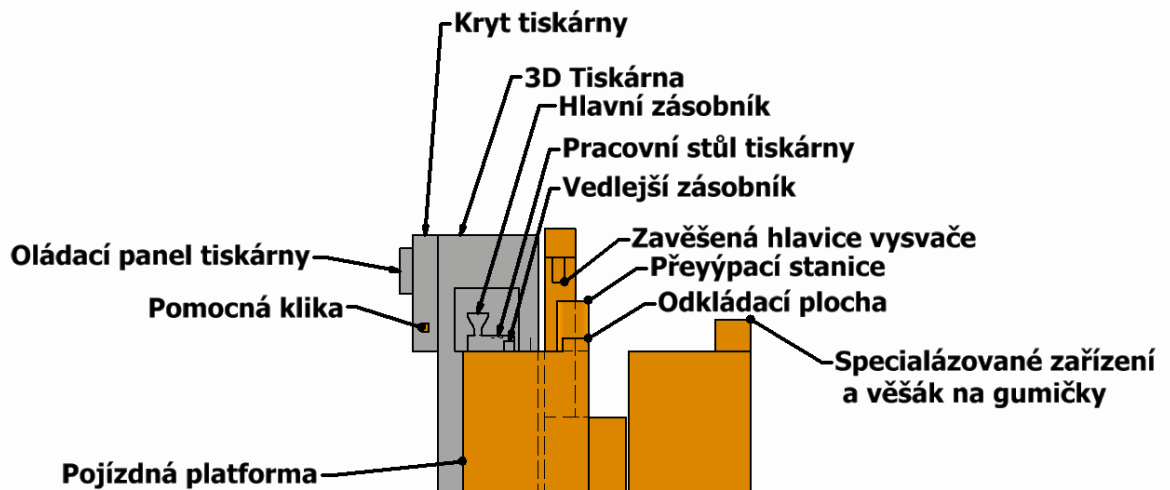
5.3.Návrh rozložení automatizovaného pracovního prostředí

Po určení pomocných prvků jsou známy všechny objekty, které se nacházejí v pracovním prostoru tiskárny. Těmito objekty jsou tiskárna, pojízdná platforma a jednotlivé pomocné prvky. Rozměry platformy a pomocných prvků jsou předběžně stanoveny a jejich polohy v pracovním prostředí jsou navrženy. Polohy objektů jsou navrženy tak, aby robotický manipulátor mohl provádět většinu pracovních úkonů před tiskárnou a nemusel mít zbytečně velký dosah.

Pro koště a měřicí zařízení je navrženo specifické odkládací místo na platformě, ze kterého mohou být snadno odebrány. Toto místo je označené jako odkládací plocha. Pro hubici vysavače je navrženo rameno, ze kterého visí, aby byla pro robota snadno přístupná. Dále je zde navrženy odkládací stůl pro desky s výtisky, odkud mohou být následně přebrány odpovědným pracovníkem. Zde jsou také brány nové desky a opatřeny gumičkami z věšáku pomocí specializovaného zařízení. Přesýpací stanice je uložena přímo na platformě a pomocná klika je nasazena na tu původní. Podle navržených poloh objektů je vytvořen model automatizovaného pracovního prostředí. Vypracovaný model je vidět na obrázku č.12 a 13.



Obrázek 12 Automatizované pracovní prostředí



Obrázek 13 Automatizované pracovní prostředí přední pohled

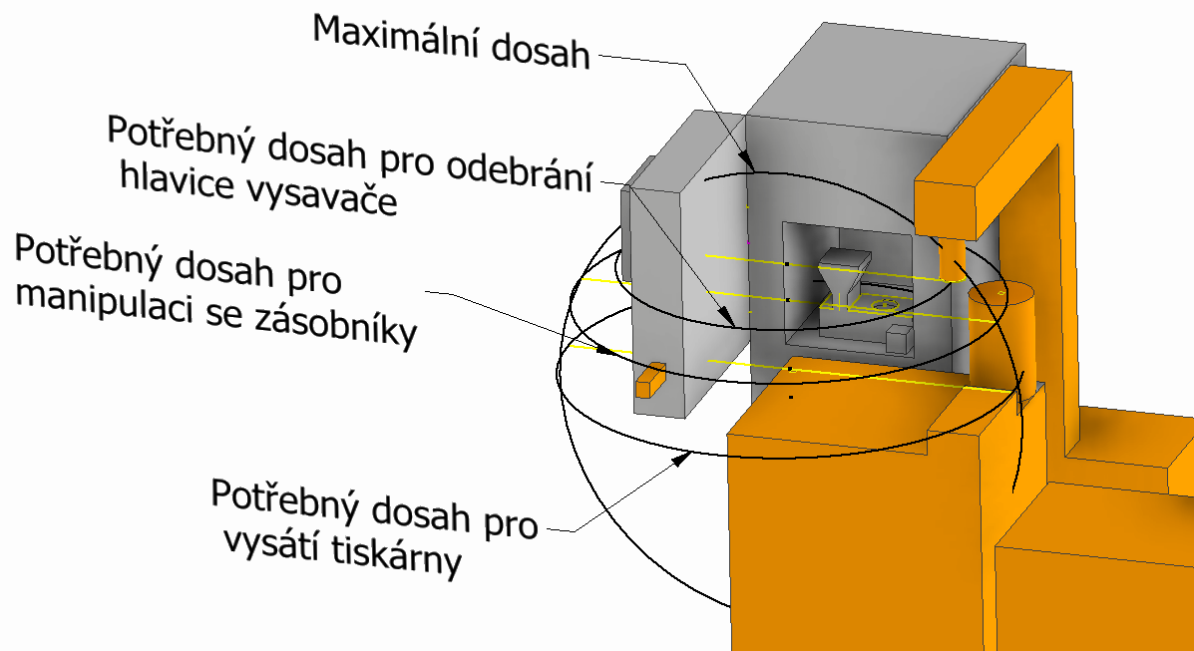
Na tomto modelu jsou prvky přidány na původní pracoviště zbarvené oranžově.

V tomto modelu pracovního prostředí je vidět robot na platformě v pozici, ze které provádí úkony přesýpání prášku, měření výšky desky na výtisky, vysávání tiskárny a manipulaci se zásobníky. Při otevírání a zavírání tiskárny a odkládání desky s hotovými výtisky provádí platforma přejezd do polohy od tiskárny směrem ke stolu na odkládání desky. Jelikož navrhovaný robot není kolaborativní, je nutné, aby toto prostředí bylo ohraničeno optickými závorami nebo klecí, a aby se v něm mimo případy, kdy je robot vypnutý, nepohyboval žádný personál.

Po dokončení návrhu automatizovaného pracoviště je známé pracovní prostředí a jeho rozměry. Z tohoto prostředí vyplívají požadavky na rozsahy pohybů robotyckého manipulátoru, které je nyní možné určit.

5.4. Určení požadovaného dosahu robota

S určenými pozicemi jednotlivých objektů je nyní možné určit požadovaný dosah robotu, který řídící charakteristikou při jeho návrhu a také je použitý jako rozhodující parametr, při průzkumu trhu. Při určení dosahu jsou do vytvořeného modelu nejprve vyneseny kružnice v několika vodorovných rovinách ve výškách uchopovaných objektů a se středy v bodě, který reprezentuje zvolenou pozici základny robota. Průměry těchto kružnic jsou zadány tak, aby se všechny body v dané rovině, na které musí robot dosáhnout, nacházely uvnitř kružnice. Následně jsou zobrazeny průměty těchto kružnic ve vertikální rovině. Do této roviny je poté vynesena další kružnice, která má opět střed v bodě reprezentujícím základnu a její průměr je daný podmínkou, že tato kružnice musí být schopná obsáhnout všechny průměty ve vertikální rovině. Výsledek tohoto procesu je možné vidět na obrázku č. 14. Potřebný dosah je zjištěn jako poloměr kružnice ve vertikální rovině, jehož hodnota je 912 mm.



Obrázek 14 Zjištění maximálního dosahu

Po definici pracovního prostředí a potřebného dosahu robota je možné stanovit, jaký druh robota je ideální pro automatizaci tohoto procesu.

6. Potřebný typ robota pro automatizaci procesu

S definovanými pracovními podmínkami a pracovními úkony je nyní možné z teoretického základu určit typ navrhovaného robota pro automatizaci tohoto procesu. Podle kterého je následně určena jeho struktura a podle čeho je proveden průzkum trhu.

6.1. Způsob řízení a programování robota

Způsob řízení a programování navrhovaného robotického manipulátoru, jednoznačně vyplývá z úkonů, ze kterých se automatizovaný proces skládá. Pro zajištění komplexních pohybů a možnosti robota reagovat na základě výsledků měření, je nejvhodnější robot řízený pružným programem, který je schopný vykonat všechny požadované manipulační úkony, a to plně automaticky. Lze pro automatizaci využít i adaptivní a kognitivní roboty, jelikož dokážou splnit potřebné úkony, ale na tento poměrně neměnný proces by byly zbytečné. Tudíž lze jednoznačně určit, že navrhovaný robotický manipulátor je s pružným programem.

6.2. Počet stupňů volnosti robota

Kvůli polohám jednotlivých prvků, se kterými se manipuluje, není možné obsluhu provést pomocí robota, který by měl méně než 6 stupňů volnosti. A jelikož vnitřní prostory 3D tiskárny neobsahují žádné překážky, které by bránily přístupu k prvkům, se kterými je manipulováno, není nutné, aby z tohoto ohledu měl robotický manipulátor „více“ jak 6 stupňů volnosti. Ovšem při otevírání krytu tiskárny, jak bylo uvedeno v analýze procesu, je nutné stisknout tlačítko na odemčení zámku krytu a zatáhnout páku, která kryt otevře, a to je náročné, protože tlačítko se nachází na přední straně tiskárny a páka na boční. Z toho důvodu není možné snadno splnit oba úkony nutné pro otevření krytu z jedné pozice. Tento problém je ale vyřešen tím, že se robot nachází na pojízdné základně a může svou pozici měnit. Z toho ohledu by bylo možné navrhovaný robot charakterizovat jako redundantní, ale jeho samotné rameno musí mít pouze 6 stupňů volnosti.

6.3. Kinematický řetězec robota

Pro obsluhu 3D tiskárny je robot s uzavřeným kinematickým řetězcem velice nevhodný, takové roboty mají větší zatavenou plochu pro dosažení potřebného rozsahu pohybu než roboty s otevřeným kinematickým řetězcem, a takový robot by nebyl schopný jednoduše splnit požadované úkony. Z toho důvodu je pro obsluhu jednoznačně nejlepší robot s otevřeným řetězcem.

7. Shrnutí požadovaných charakteristik voleného robota

Po provedení analýzy procesu obsluhy a určení potřebného dosahu, kinematického řetězce a počtu stupňů volnosti, jsou známy všechny požadavky na charakteristiku robota vyplývající z procesu. Existuje ovšem také jeden důležitý požadavek na charakteristiku, který zde z procesu nevyplývá, a to na rychlost robota. Obvykle jsou tyto rychlosti dány tím, jak dlouho má celý automatizovaný proces obsluhy trvat, ale v rámci této práce žádný takový požadavek na čas není stanovený, a proto je možné rychlosti zvolit.

Jelikož vysoké rychlosti mají za následek větší dynamická zatížení, kvůli kterým je následovně nutné, aby byla konstrukce robota na tyto zatížení dimenzována, a také zvětšují rizika poškození robota či tiskárny v případě, že dojde ke kolizi, tak je vhodné, aby zvolené rychlosti byly malé. Z toho důvodu je zvolená rychlost pohybu každého koncového bodu ramene 0,5 m/s. To je tzv. bezpečná rychlost kolaborativních robotů, kterou se pohybují roboti, když se v jejich blízkosti vyskytuje člověk. [7] Při pohybu takovou rychlostí by robot při kolizi neměl být schopný způsobit velké poškození jak tiskárny, tak ani sám sebe.

Po zvolení rychlosti je možné jednotlivé charakteristiky shrnout do následující tabulky č.3.
Tabulka 2 Požadované charakteristiky robotu pro automatizaci procesu

Nosnost	Dosah	Rychlost
5 kg	912 mm	0,5 m/s

Když je známa požadovaná rychlost, jsou známy všechny vstupní požadavky potřebné pro návrh robota. Před samotným návrhem je však vhodné zjistit, zda je možné zakoupit robotický manipulátor pro obsluhu, aby se ověřilo, zda má vlastní návrh smysl.

8. Průzkum trhu

Za účelem zjištění toho, zda není lepší robot jednoduše koupit, je proveden průzkum trhu pro roboty, které odpovídají požadovanému charakteru robotického manipulátoru pro automatizovaný proces. Při porovnání možností od jednotlivých výrobců byly nalezeny roboty od firmy Universal Robots a FANUC, které splňují dané požadavky a zároveň mají lepší technické parametry než ostatní produkty na trhu. Nejvhodnějším robotem od Universal Robots je model UR10e, který je na obrázku č.15.[8]



Obrázek 15 Robot UR10e[8]

Technické parametry tohoto robotu jsou v tabulce 4.

Tabulka 3 Technické parametry UR10e[8]

Maximální dosah	1300 mm
Dovolená manipulační zátěž	10 kg
Hmotnost	33,5 kg

Průměr půdorysu	190 mm
Rychlost	1 m/s

Od firmy FANUC je to model CRX-5iA na obrázku č.16. [9]



Obrázek 16 CRX-5iA[9]

Jeho technické parametry jsou v tabulce 5.

Tabulka 4 Technické parametry CRX-5iA[9]

Maximální dosah	994 mm
Dovolená manipulační zátěž	5 kg
Hmotnost	25 kg
Průměr půdorysu	148 mm
Rychlost	1 m/s

Jelikož menší modely od firmy Universal Robots nemají potřebný dosah, nebyl nalezen vhodnější model od této firmy. Proto je také vhodnější zvolit robota od firmy FANUC, jelikož není pro obsluhu zbytečně předimenzovaný. Model CRX-5iA je kompaktní a poměrně lehký a lze očekávat, že zvládne obsluhu tiskárny bez problémů. Ovšem kromě samotného robotického manipulátoru je pro obsluhu tiskárny také nutný specifický griper, kvůli různorodým tvarům objektů, které je nutné uchopit. Takový griper na trhu nebyl nalezen, proto musí být navržen vlastní.

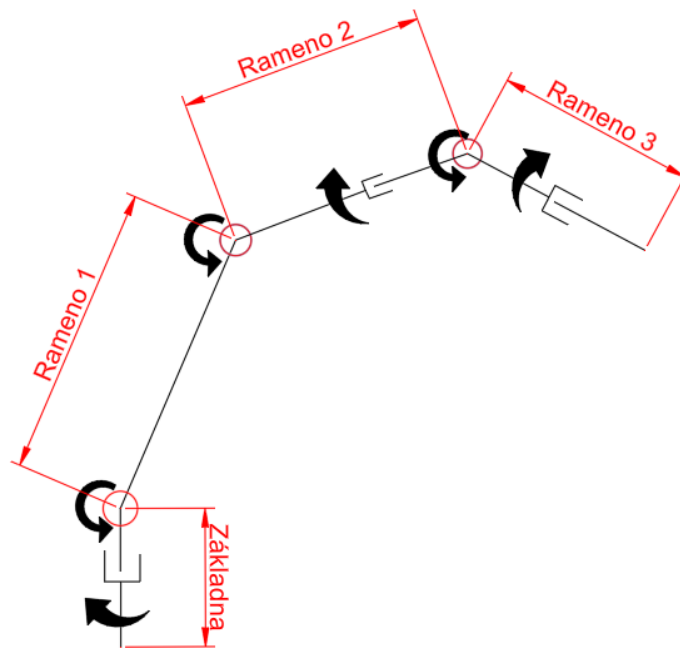
Vyhodnocení průzkumu trhu

I když je možné griper navrhnout a robota koupit, vlastní návrh je stále vhodný, protože nákupní ceny těchto robotů se pohybují od půl milionu do milionu korun. Zároveň vlastní návrh

poskytuje příležitost použít inovativní řešení, která nejsou komerčně dostupná, a možnost jeho dalšího vývoje a zlepšování. S tímto závěrem průzkumu trhu je možné začít s vlastním návrhem.

9. Návrh koncepce robota pro obsluhu 3D tiskárny EOS M 100

Jelikož bylo nutné určit počet stupňů volnosti a kinematický řetězec pro průzkum trhu, tak je koncepce robotického manipulátoru již částečně vytvořena. Z této části je pro koncept známo, že nejvhodnější robot má 6 stupňů volnosti a otevřený kinematický řetězec. Na základě druhu jeho řetězce a počtu stupňů volnosti je zvolena hrubá struktura robota, která se skládá ze tří ramen, základny a šesti rotačních kloubů. Zvolená hrubá struktura je na obrázku číslo 17.



Obrázek 17 Hrubá struktura navrhovaného robota

Po určení počtu ramen robota je navržena jejich délka v závislosti na rozměrech pracovního prostředí, tak aby byl robot způsobilý konat potřebné úkony.

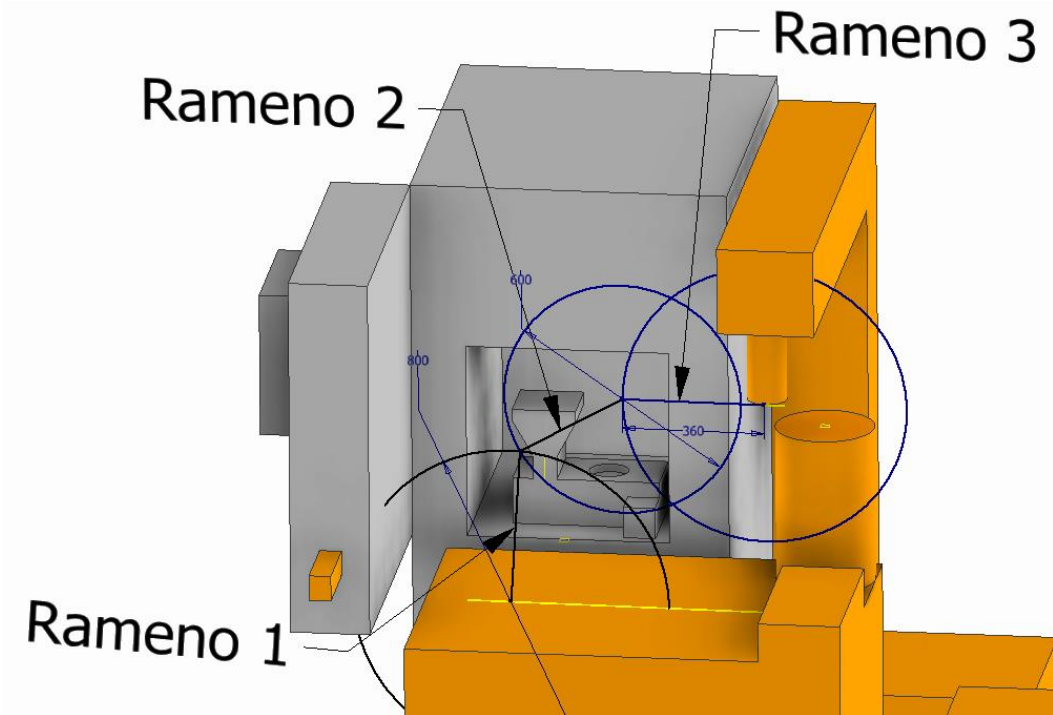
9.1. Návrh velikosti ramen

To, jaká je vhodná délka ramen, závisí především na požadovaném dosahu, který musí být vždy splněn. Ale kromě toho je délka ramen také dána velikostmi pracovního prostoru, ve kterém se robot pohybuje, protože robot nesmí při sahání do vnitřních prostor tiskárny do ní narazit. Další podmínkou pro návrh vhodné délky je ta, aby ramena nikdy nemusela být plně vyložena při obsluze. Tato podmínka je zvolena na základě subjektivního uvážení a slouží jako bezpečnostní prvek, protože robot je navržen tak, aby unesl nejtěžší zátěž právě při úplném vyložení ramen.

Určení velikosti ramen je prováděno pomocí metody řezů modelu pracovního prostředí, který byl vytvořen v sekci návrhu automatizovaného pracovního prostředí. Při této metodě je postupováno tak, že jsou určeny body dotyku, které reprezentují body v pracovním prostoru, na

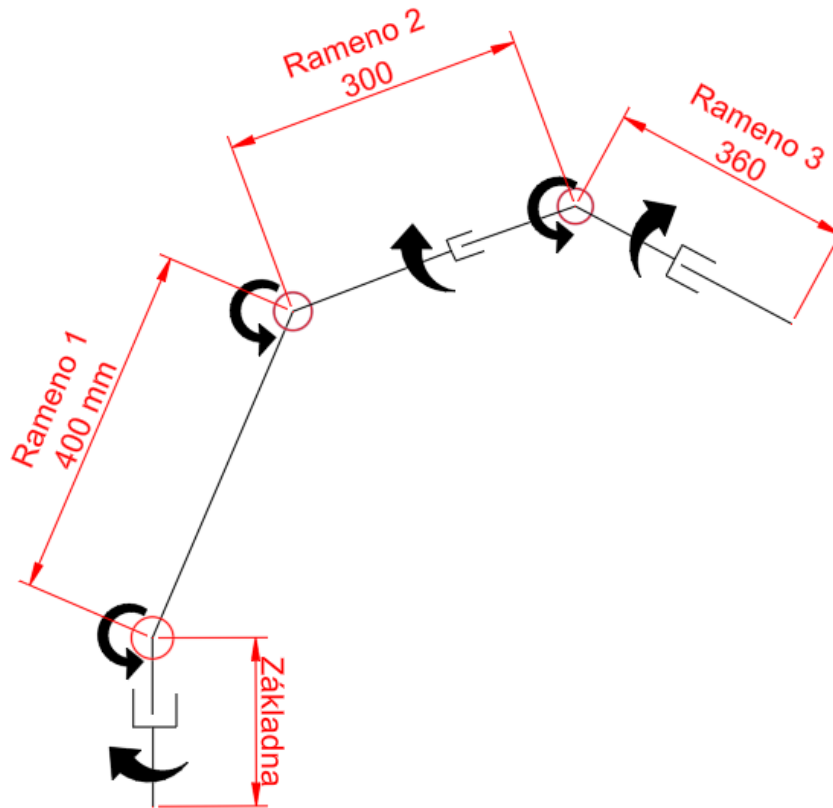
které musí robot dosáhnout. Následovně jsou spojením bodu základny a bodů dotyku vytvořeny jednotlivé roviny kolmé k zemi. Tyto roviny představují konkrétní natočení základny robotu při konání jednotlivých úkonů jako odběr nebo usazování zásobníků.

V těchto rovinách jsou následovně tvořeny čárové konstrukce robota, jejichž rozměry jsou průběžně upravovány tak, aby byla nalezena jedna kontrakce, která umožňuje dosáhnout na všechny dotykové body, bez rizika kolize konstrukce s objekty pracovního prostoru a také splňuje všechny ostatní podmínky stanovené na začátku této sekce. Příklad jedné čárové konstrukce je vidět na obrázku 18, kde je robot v pozici, ve které manipuluje hlavicí vysavače.



Obrázek 18 Ilustrace postupu návrhu délky ramen

Hodnoty navržených velikostí jednotlivých ramen jsou zobrazeny v tabulce 6 a jsou také zaznamenané do hrubé struktury na obrázku č.19.



Obrázek 19 Hrubá struktura a délky ramen

Tabulka 5 Délky ramen navrhovaného robota

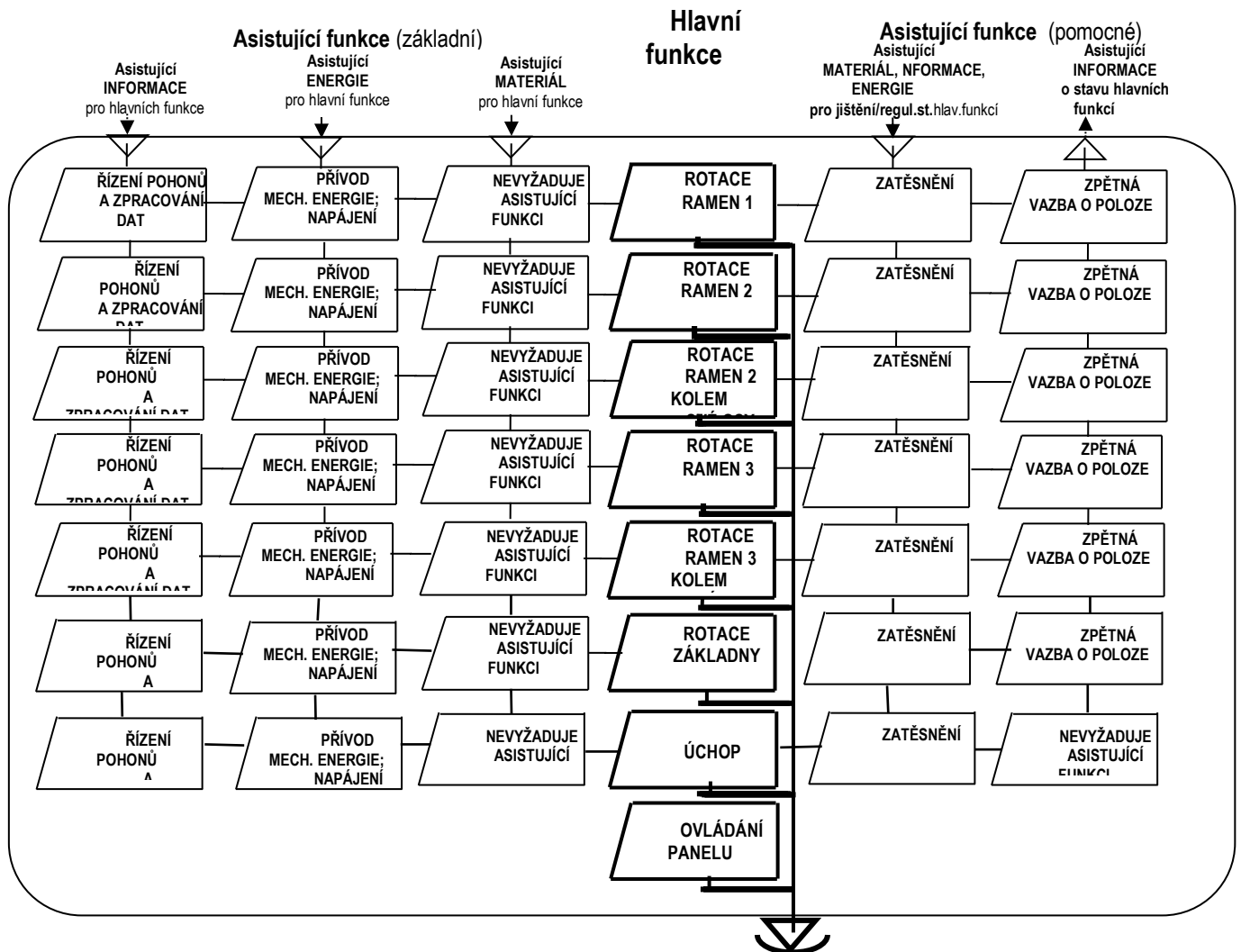
Rameno 1	Rameno 2	Rameno 3 (i s griperem)
400 mm	300 mm	360 mm

S navrženou délkou ramen jsou určeny všechny vnější charakteristiky navrhovaného robota a následuje řešení jeho vnitřních charakteristik. Po jejich návrhu je jako první vytvořena funkční struktura robota.

9.2. Funkční struktura robota

Tato struktura vyplývá z jednotlivých činností, které musí robot provádět, aby vykonal obsluhu tiskárny. Návrhem vhodného automatizovaného pracoviště byly tyto činnosti zredukovány na manipulaci a ovládání displeje tiskárny. Tyto činnosti lze rozdělit na hlavní funkce, kterými je manipulace a ovládání prováděno, a na asistující funkce, které umožňují hlavním funkcím naplnit požadované úkony a zajistit jejich správný průběh.

Podle naražené hrubé struktury robota je manipulace zajištěna hlavními funkcemi rotace šesti kloubů a úchopem. Jednotlivé hlavní a asistující funkce jsou zaznamenány ve funkční struktuře na obrázku č. 20. [10]



Obrázek 20 Funkční struktura [10]

V této funkční struktuře jsou všechny asistující funkce, které vyplývají z potřebných hlavních funkcí a také z pracovního prostředí, ve kterém se odehrávají. Na základě funkční struktury je vytvořený návrh variant realizace potřebných funkcí.

9.3. Návrh variant zajištění hlavních funkcí robota

Jako první jsou navrženy varianty pro zajištění hlavních funkcí, protože na jejich základě se rozhoduje o volbě variant asistujících funkcí. Pro zajištění rotací jednotlivých ramen a úchopu jsou navrženy varianty, které umožňují transformaci energie z aktuátoru přímým spojením a přenosem pomocí pohonného mechanismu. Druhy navržených pohonných mechanismů jsou hydraulické, pneumatické a mechanické pomocí Bowdenova převodu. Pro tyto varianty je vytvořena morfologická matice v tabulce č.7. [10]

Tabulka 6 Morfologická matice pro zajištění hlavních funkcí

Hlavní funkce robota	Navržené varianty realizace			
	1	2	3	4
Ovládání řídicího panelu tiskárny	Sjednocení řídicí jednotky s panelem	Špička z dotykového pera		
Uchopení objektu	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace základny	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace ramen 1	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace ramen 2 kolem vlastní osy	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace ramen 2	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace ramen 3	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace ramen 3 kolem vlastní osy	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem

Proto aby mohli být následně navrženy vhodné asistující funkce a také alternativy robota, je nutné nejprve definovat charaktery jednotlivých variant a možné výhody pro danou aplikaci.

Přímé spojení s aktuátorem má tu výhodu, že jeho realizace je konstrukčně jednodušší než návrh převodového mechanismu. Ovšem zajištění přívodu energie tímto způsobem také přidává váhu na jednotlivá ramena, na kterých je využít, v závislosti na daném aktuátoru.

Hydraulický mechanismus využívá práci kapaliny, kterou převádí na jiné komponenty. Jeho velkou výhodou je, že dokáže vyvíjet velké síly, ale při použití takového mechanismu je nutné zajistit přívod kapaliny. Proto je nutné mít čerpadlo. Jejich nevýhodou je možnost úniku pracovní kapaliny kvůli netěsnostem spojů a poměrně velká váha těchto mechanismů. [11]

Pneumatické mechanismy jako médium používají stlačený vzduch a fungují na podobném principu jako hydraulické mechanismy. Jejich výhodou je, že pomocí těchto mechanismů je možné uchopovat věci s členitým tvarem integrací pneumatiky do pružného griperu, a také mohou vykonávat rychlé pohyby. Ovšem pro jejich použití je potřeba kompresor a nejsou vhodné pro velké zátěže. Zároveň při jejich použití pro vyvinutí velké síly dochází ke znatelným vychýlkám.[12]

Bowdenovy převody převádí sílu z hnacího členu na hnaný pomocí lan v pružných kabelech.[13] Přenos rotačního pohybu na kloub pomocí lan, je zajištěn dvěma bubny s

drážkami, na kterých jsou navinuta lana protichůdně a jejichž konce jsou v bubnech zachycena pomocí šroubů. Tím je dosaženo toho, že při rotaci bubnu jedním směrem je vyvolána síla v laně a buben začne navíjet jedno z lan, což způsobí odvíjení lana z druhého bubnu a vyvolá jeho rotaci. Protichůdným navinutím lan je zajištěna možnost rotace v obou směrech. Jeden z těchto bubnů je spojen s hřídelí elektromotoru a druhý s hnanou hřídelí. Aby nedocházelo k prověšení lan a bylo možné vyvíjet sílu i v průběhu změny pozic bubnů vůči sobě, využívá tento převod kabely, ve kterých se lana pohybují. Jelikož délka lana v kabelu je vždy stejná, upevněním konců těchto kabelů v pozicích, které jsou neměnné vůči bubnům, je zajištěna konstantní délka lana mezi nimi i v průběhu změny jejich vzájemných poloh. Pro upevnění konců těchto kabelů jsou využity opěrné součástky s dírami, skrz které mohou procházet lana, ale ne kabely.

Jejich výhodou je malá váha a možnost využití libovolného zdroje energie. Jejich nevýhodou je, že při zkroucení trubice s lany dochází k vyvinutí síly na hnaný člen a tím dochází k výchylkám pohybu hnaného kloubu. K výchylkám také dochází při přenosu velkých sil deformací lan a kabelů, ve kterých jsou. To, jak je lano uložené v kabelu, je zobrazeno na obrázku 19 a jeho uložení v bubnu na obrázku 20.



Obrázek 22 Bowdenův kabel [26]



Obrázek 21 Uložení lan Bowdenova převodu [27]

Poslední varianty jsou navrženy pro zajištění ovládání panelu tiskárny. První možností je připojení řídicí jednotky robota přímo k tiskárně. Tím by ovšem mohlo dojít k jejímu poškození. Vhodnější volbou je opatřit griper součástkou, napodobující konec dotykového pera, které dokáže interagovat s dotykovými displeji.

Na základě těchto charakteristik jsou navrženy možnosti realizace asistujících funkcí.

9.4. Návrh variant zajištění asistujících funkcí

Kvůli charakteru Bowdenova převodu a pneumatického mechanismu jsou zde navrženy varianty, které umožňují přímé sledování poloh jednotlivých ramen pro zajištění zpětné vazby o poloze. Pro transformaci mechanické energie na hlavní funkce přímým spojením s aktuátorem a její přenos pomocí Bowdenova převodu jsou také navrženy různé varianty motorů. Všechny možnosti zajištění asistenčních funkcí jsou opět zaznamenány v morfologické matici v tabulce 9.

Tabulka 7 Morfologická matice variant zajištění asistujících funkcí

Asistující funkce robota	Navržené varianty realizace			
	1	2	3	4
Zpětná vazba o poloze	Kamera na griperu	Absolutní enkodéry na ramenou	Relativní enkodéry na ramenou	Enkodér pouze na motoru
Přívod mech. energie	Hydromotor	Pneumatický motor	Elektromotor	
Napájení	Baterie	Kabel		
Zatěsnění	Řešní vhodnou konstrukci	Plastový plášť		
Řízení pohonů a zpracování informací	PC	PLC	Notebook	

Charaktery zvolených variant jsou opět definovány za účelem následovného výběru nejvhodnějších alternativ.

Elektromotory jsou v praxi nejčastěji používaným způsobem přívodu mechanické energie kvůli jejich jednoduchému použití a vysokému výkonu. Tyto motory jsou také lehké, ale nejsou vhodné pro prostředí, kde se vyskytují hořlavé prachy. V takových prostředích musí být použity specializované motory s ochranou proti prachu.[14]

Dále je možné zabývat se zajištěním zpětné vazby. Pro možné způsoby zajištění zpětné vazby o poloze jsou navrženy tři možnosti. Jednou z nich jsou relativní enkodéry, které dokáží určit odchylku od polohy, ovšem ne samotnou polohu. Při použití těchto enkodérů by musela být manuálně zadána výchozí poloha robota po každém jeho vypnutí a zapnutí. Absolutní enkodéry tuto nevýhodu nemají, protože dokážou určit jak odchylku, tak i počáteční polohu. [16] Posledním navrženým způsobem určení polohy je kamera. Pro její použití je nutné, aby pracoviště bylo opatřeno štítky, podle kterých dokáže kamera rozpoznat polohu robota.

Jako další je nutné zajistit izolaci pohyblivých částí robota před práškem. Pro zajištění zatěsnění je možné konstrukci robota řešit tak, aby se nedostával prach mezi ložiska použitím stěrných kroužků a dalších izolačních komponent. Nebo je možné použít plastové pláště na jednotlivých kloubech a kolem griperu.

Pro řízení pohonů a zpracování dat jsou navrženy varianty použití PC, PLC nebo Notebooku. Zde o vhodnosti dané varianty rozhoduje především její dostupnost. Lze předpokládat, že zde bude použit Notebook, ale to se může v průběhu realizace automatizace obsluhy změnit.

Poslední důležitou činností je napájení vlastních pohonů. Zvažovanými možnostmi jsou použití kabelu pro zapojení pohonů do sítě a napájení pomocí baterie. Napájení bateriemi se většinou používá u manipulátorů zajišťujících logistické činnosti a u ostatních robotů, kteří se pohybují na velké vzdálenosti či venku, pro které není možné zajistit napájení ze sítě. U těch,

kteřé mohou být ze sítě napájeny, je to téměř vždy lepší volba, jelikož baterie je nutné dobíjet a také jsou velice těžké a drahé.

Po určení variant všech funkcí jsou na základě jejich charakteru navrženy alternativy robota vhodné pro obsluhu, které využívají jednotlivé varianty a jejich kombinace.

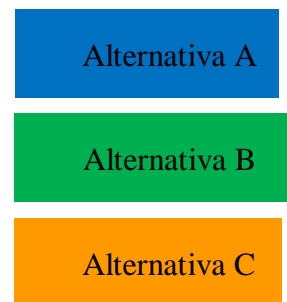
10. Návrh alternativ navrhovaného robota

Pro návrhy alternativ jsou jednotlivé varianty zajištění funkcí robota porovnány mezi sebou. Z důvodu jednoduchého použití elektromotorů byly navrženy tři varianty, které je využívají jako zdroj mechanické energie.

Vybrané alternativy jsou zaznamenány do výsledných morfologických matic v tabulce č.8 a č. 9.

Tabulka 8 Morfologická matice navržených alternativ pro zajištění hlavních funkcí

Hlavní funkce robota	Navržené varianty realizace			
	1	2	3	4
Ovládání řídicího panelu tiskárny	Sjednocení řídicí jednotky s panelem	Špička z dotykového pera		
Uchopení objektu	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace základny	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace ramen 1	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace ramen 2 kolem vlastní osy	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace ramen 2	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace ramen 3	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem
Rotace ramen 3 kolem vlastní osy	Hydraulický mechanismus	Pneumatický mechanismus	Bowdenovy převody	Přímé spojení s aktuátorem



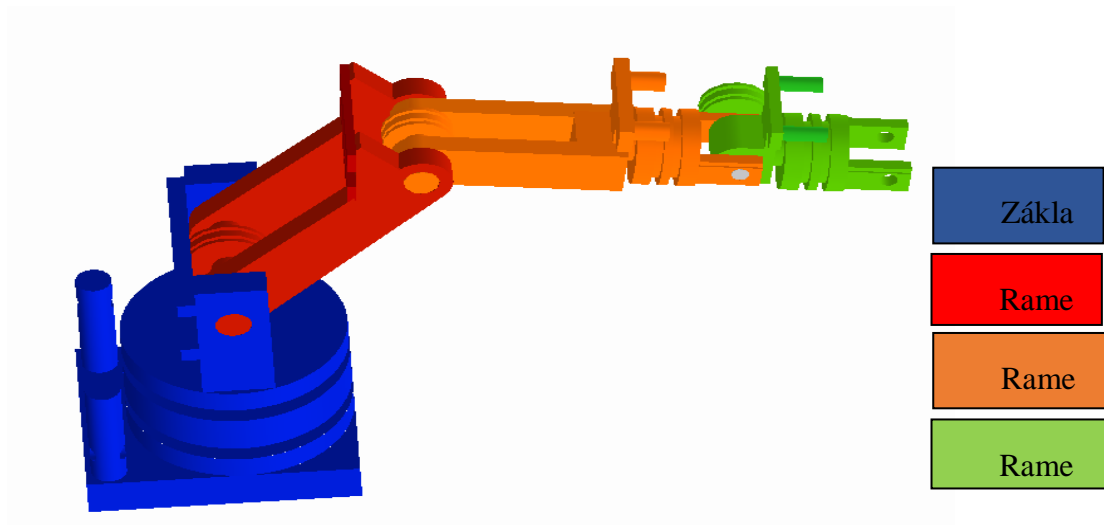
Tabulka 9 Morfologická matice variant zajištění asistujících funkcí

Asistující funkce robota	Navržené varianty realizace			
	1	2	3	4
Zpětná vazba o poloze	Kamera na griperu	Absolutní enkodéry na ramenou	Relativní enkodéry na ramenou	Enkodér pouze na motoru
Prívod mech. energie	Hydromotor	Pneumatický motor	Elektromotor	
Napájení	Baterie	Kabel		
Izolace	Řešení vhodnou konstrukci	Plastový plášť		
Řízení pohonů a zpracování informací	PC	LCP	Notebook	

Po navržení alternativ je možné se provést výběr té nejvhodnější.

Alternativa A

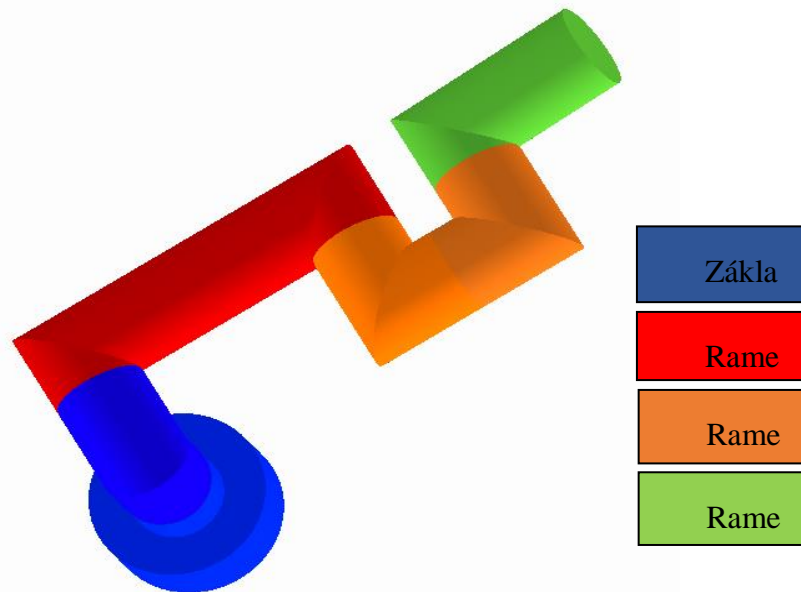
Alternativa A, která využívá k pohonu kloubů ramen výhradně Bowdenovy převody, má výhodu v tom, že přidává minimální váhu konstrukci a také zajišťuje jeden převodový poměr navíc na každém kloubu. Také má možnost díky přenosu energie uložit pohonné ústrojí s elektromotory do pojízdné platformy, kde jsou dostatečně chráněni před práškem. Její nevýhodou je potřeba zajištění zpětné vazby na každém kloubu pomocí absolutního enkodéru. Její hrubá konstrukce je na obrázku č.23.



Obrázek 23 Alternativa A s Bowdenovými převody

Alternativa B

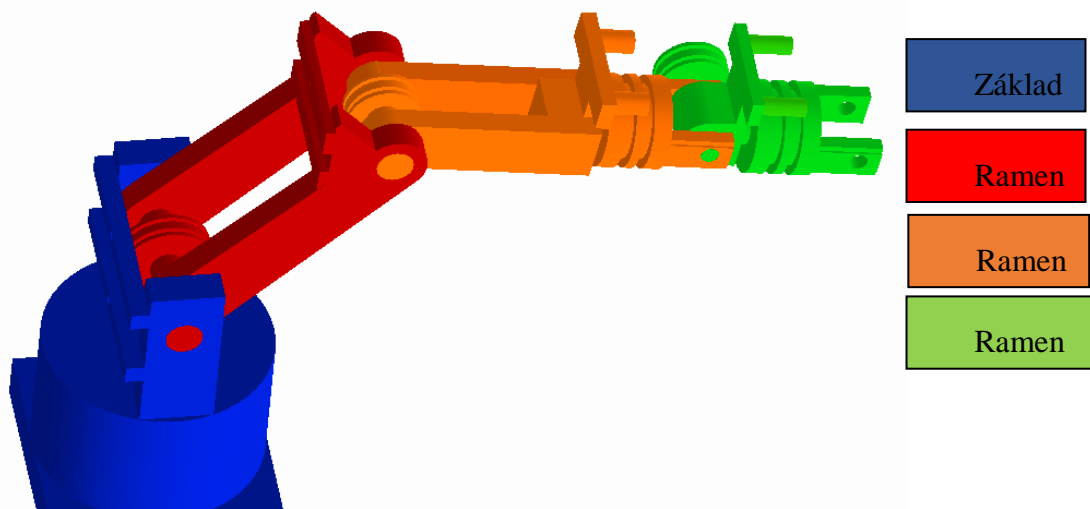
Tato alternativa pro pohon kloubů používá pouze elektromotory, uložené ve svých ramenech. Její výhodou je že nevyžaduje zpětnou vazbu o natočení jednotlivých ramen. Ale má větší hmotnost ramen v závislosti na jejich uložení. Její hrubá konstrukce je na obrázku č. 24.



Obrázek 24 Alternativa B pouze s elektromotory

Alternativa C

Alternativa C používá kombinaci Bowdenových převodů a elektromotorů. Bowdenovy převody dodávají převodový poměr pohonu pohybu ramen a přidávají ramenům malou váhu. Nicméně je stále nutné zajistit zpětnou vazbu ohledně natočení ramen. Rotace základny je zajištěna elektromotorem, který nepřidává žádný další převodový poměr, ale zvyšuje její váhu. Nicméně není zde nutné zajistit zpětnou vazbu ohledně natočení základny navíc. Alternativa C je na obrázku 25.



Obrázek 25 Alternativa C kombinace Bowdenových převodů a elektromotoru

Vybraná alternativa

Zvolenou alternativou je **alternativa C**. Tato alternativa je zvolena proto, že zajistí nižší váhu ramen a díky přidanému převodovému poměru bude na jejich pohon potřeba menší točivý moment. Pro pohon její základny je použitý elektromotor, který zde není nevýhodou, protože váha v základně nehraje roli na namáhání ramen a také lze očekávat, že moment potřebný pro její otáčení nebude příliš velký, proto není potřeba dodávat jejímu pohybu další převodový poměr.

11. Zpracování konceptu vybrané alternativy

Po dokončení návrhu konceptu robotického manipulátoru jsou známy všechny vstupní požadavky pro vypracování zvolené alternativy. Pro jasný přehled o požadavcích na jeho zhotovení, vyplývajících z jeho konceptu, je proveden jeho souhrn.

Předpoklady pro návrh jemné stavební struktury robota

Protože pohyby ramen a griperu robota jsou zajištěny Bowdenovými převody, je nutné zkonstruovat kromě samotného robota také převodovou skříň pro uložení jeho motorů. Když je toto určeno, jsou známy všechny části konceptu robota.

Výsledný robot se skládá ze tří ramen, základny a griperu a provádí rotaci ve šesti kloubech. Je poháněn pomocí Bowdenových převodů a elektromotorů uložených v převodní skříni. Motory jsou napájeny ze sítě a řízeny notebookem. Jeho klouby a griper jsou chráněny proti prašnému prostředí pomocí plastových plášťů. Obsluhu tiskárny zajišťuje manipulace s pomocnými prvky a komponenty tiskárny a také pomocí špičky dotykového pera.

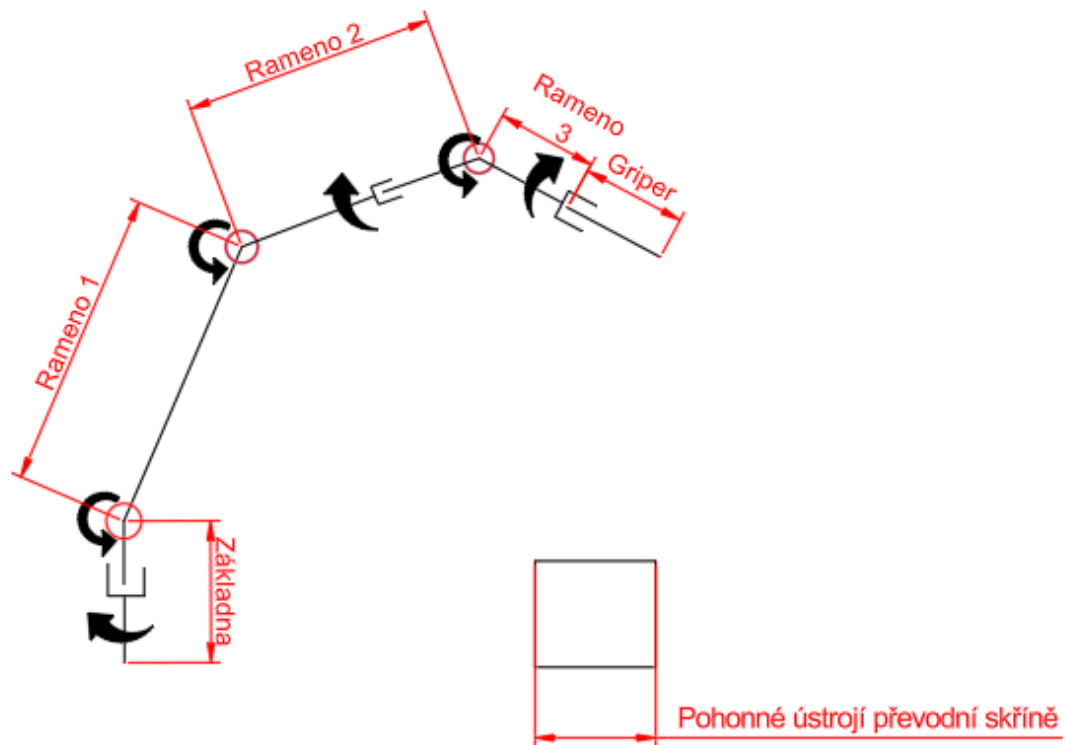
Podle nerežné koncepce robotického manipulátoru jsou navrženy komponenty pro zajištění potřebných funkcí robota. Specifické komponenty vlastní konstrukce robota a griperu jsou navrženy a vymodelovány v programu Inventor. Z těchto komponent je následně vytvořena celá sestava robota. Celý postup návrhu probíhá podle předem zvolené strategie.

11.1. Strategie řešení

Před návrhem specifických komponent je zvolena strategie, podle které jsou řešeny jednotlivé části robota. Při návrhu je zvolen postup od griperu, který je navržen jako první a následně jsou zjištěny jeho hodnoty parametrů, které určují velikost zatížení následujícího ramene, se kterou se počítá při jeho dimenzování. Tímto způsobem se postupuje u návrhu všech částí až do návrhu základny. Tento postup je zvolen proto, že ramena mají poměrně velkou délku a nejtěžší břemeno má poměrně velkou váhu, čímž jsou vyvolány velké zátěže jednotlivých článků robota, a lze předpokládat, že články dimenzované na tyto zátěže budou mít hmotnost, kterou nelze při výpočtech zátěží zanedbat. Podle této strategie na sebe navazují jednotlivé kroky návrhu částí následovně:

1. Návrh griperu;
2. Návrh ramene 3;
3. Návrh ramene 2;
4. Návrh ramene 1;
5. Návrh základny;
6. Návrh pohonného ústrojí převodní skříně;

Na obrázku 26 jsou zobrazeny jednotlivé řešené části.



Obrázek 26 Hrubá orgánová struktura

11.2. Návrh konkrétní koncepce griperu

Dle určené strategie je jako první proveden návrh griperu. Jeho charakter byl předběžně zmíněn v sekci analýzy procesu, kde byla zohledněna různorodost tvarů a materiálů jednotlivých objektů, přičemž bylo stanoveno, že požadovaný charakter griperu je mechanický. Ovšem proto aby byl navržen optimální mechanismus gripperu pro danou aplikaci, je potřeba přesně určit všechny vstupní požadavky.

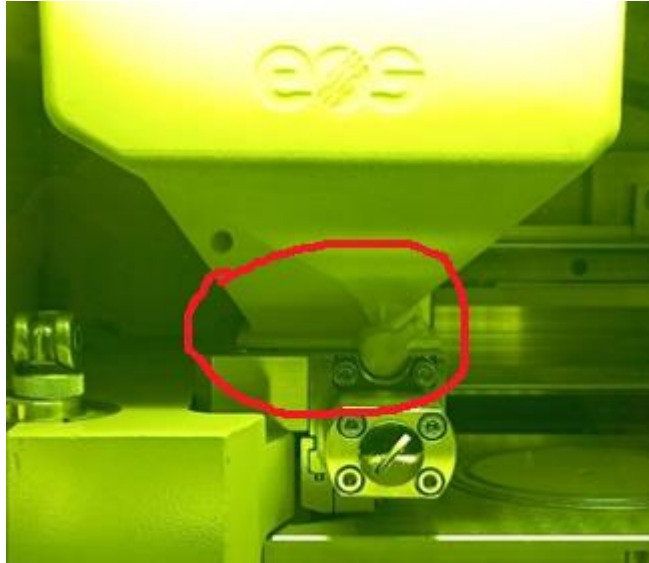
Za účelem stanovení těchto požadavků je provedena analýza manipulovaných objektů. Parametry pomocných prvků navržených pro usnadnění automatizace nejsou brány v potaz na základě již stanoveného předpokladu, že jsou navrženy tak, aby vyhovovaly výslednému robotu.

11.2.1. Analýza manipulovaných objektů

S jakými objekty se manipuluje bylo zjištěno v rámci analýzy procesu, jsou to: deska na výtisky, hlavní zásobník, zbytkový zásobník, spodní zásobník a gumička.

Na zbytkovém a spodním zásobníku jsou paralelní plochy, a tudíž jsou snadno uchopitelné vyvinutím dostatečné přitlačné síly pomocí dvou paralelních prstů. Ovšem je nutné, aby tyto plochy byly dostatečně dlouhé ve vodorovné ose k zamezení rizika překlopení zásobníků. Vzdálenosti těchto úchopných ploch na zásobnících jsou 12 cm a 5 cm, což jsou parametry udávající potřebná rozpětí griperu. U zbytkového zásobníku je ovšem důležitý i další parametr, který souvisí s jeho uložením v tiskárně. Jelikož je úchopná plocha tohoto zásobníku vzdálená 4 cm od okraje tiskárny, musí být šířka prstů griperu menší než tato hodnota. Z toho, jak je manipulace s těmito zásobníky provedena, vyplývá další požadavek na prsty. Protože uchopení těchto zásobníků je zajištěno vyvíjením tlaku na jejich stranu, je nutné, aby prsty měly

dostatečně velký součinitel tření. Na hlavním zásobníku jsou také rovnoběžné plochy, za které ho lze uchopit, ovšem tyto plochy jsou od sebe příliš daleko, což by mělo za následek obrovské rozpětí griperu. Proto je vhodnější tento zásobník uchopit v místě jeho zúžení, které je vyznačené na [obrázku 27](#).



Obrázek 27 Úchopné místo zásobníku

V tomto místě je možné úchop opět provést pomocí dvou paralelních ploch. Prsty se opřou o spodek vodorovnou plochou na konci zásobníku a jejich vrchní části podepřou zásobník z boků. Způsob, jakým je plánováno tento úchop realizovat, vyžaduje určitou výšku prstů a jejich tvar. Kvůli zkosení spodní části zásobníku musí být prsty nízké, aby se mohly dostatečně opřít o jeho spodek a také musí mít skosené plochy pod stejným úhlem jako zásobník.

Deska na výtisky má kruhovou geometrii a přímé uchopení pomocí dvou rovnoběžných ploch by zvyšovalo riziko toho, že by se deska při manipulaci převrátila, pokud na ni nebyl vyvíjen dostatečný tlak v místě dotyků. Z tohoto důvodu je lepší zajistit úchop tím, že plochy dosedající na obvod desky budou mít kruhovou geometrii se stejným rádiusem jako deska. Jelikož deska má poloměr 6 cm, musí mít tento průměr i zaoblení válcové plochy na prstech.

Posledním objektem je gumička. Jediným podstatným parametrem je její průměr, který je 2–3 mm.

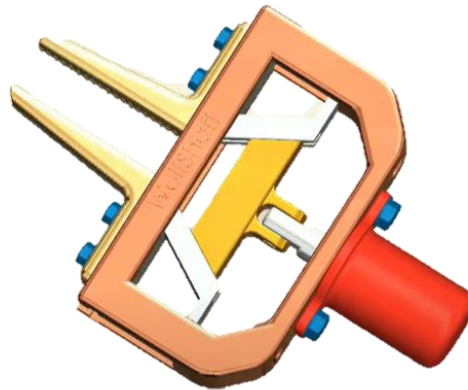
Po prozkoumání parametrů a ploch jednotlivých objektů je možné určit požadavky na navrhovaný mechanismus. Pro uchopení požadovaných součástí musí mít mechanismus dva prsty, jejichž úchopné plochy musí být vůči sobě paralelní v několika pozicích. Mimo to je také možné určit, jak musí tyto úchopné plochy vypadat. Po zjištění tvarů jednotlivých objektů je vidět, že prsty musí mít přímé i válcové plochy.

Kromě tvaru ploch lze také určit požadovaný rozsah pohybu prstů griperu. Ten závisí na nejvyšším potřebném rozpětí, které je 12 cm, a nejmenším, které je dáno průměrem gumičky. Jelikož je hodnota poměru gumičky podstatně malá, požadované minimum rozpětí je 0 mm. Při stanovení maxima rozsahu je nutné počítat s tím, že pro uchopení součástí se prsty griperu musí otevřít o něco více než je velikost uchopovaného objektu, proto je jako maximum rozsahu zvoleno 14 cm. A tudíž celkový rozsah prstů je stanoven jako 0-14 cm. Po stanovení požadavků na mechanismus je možné pokračovat v jeho návrhu.

11.2.2. Návrh pohybového mechanismu griperu

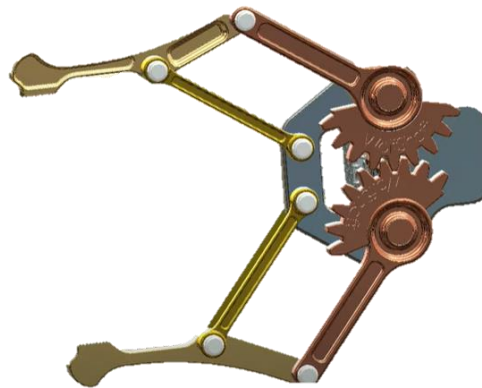
Z analýzy manipulovaných objektů jsou známy požadavky na rozsah 14-0 cm a paralelní pohyb prstů griperu. Kromě těchto požadavků je také podle vybrané alternativy robota znám způsob přívodu jeho mechanické energie pomocí točivého momentu. Podle těchto vstupních podmínek jsou vybrány dva mechanismy, které je splňují a zároveň jsou co nejnadnější realizovatelné.

První z těchto mechanismů pracuje na základě převodu přímočarého posuvného pohybu na posuvný v jiném směru, pomocí tvarového styku. Pohyb úchopných částí griperu je způsoben pohybem klínu, který má po stranách výčnělky, které se pohybují ve drážkách součástek, na které jsou přímo připojeny prsty. Tento mechanismus je vidět na obrázku 28.



Obrázek 28 Mechanismus č. 1[28]

Druhý mechanismus převádí rotační pohyb na posuvný. U tohoto mechanismu je vzájemná rovnoběžnost úchopných částí zajištěna tím, že jsou ke griperu upevněny pomocí dvou stejně dlouhých ramen, která mohou konat rotační pohyb, což vytváří dva body na prstech, které se navzájem pohybují po dvou kružnicích o stejném průměru, čímž je zajištěna jejich vzájemná rovnoběžnost v každé poloze. Tento mechanismus je zobrazen na obrázku 29.



Obrázek 29 Mechanismus č.2[28]

Oba tyto mechanismy plní potřebnou funkci a zároveň jsou jednoduše realizovatelné. Použití každého nese nějaké výhody a nevýhody a pro volbu toho nejlepšího je použita metoda vícekritériální analýzy variant.

V této analýze je proveden výběr nejvhodnějšího mechanismu na základě hodnot určitých kritérií a jejich vah vůči sobě, které jsou určeny subjektivně. Prvním zvažovaným kritériem K1 je obtížnost zakrytí plastovým pláštěm. Jelikož mechanismus číslo 2 využívá převodového ozubení pro zajištění úchopu, je potřeba eliminovat riziko zachytání pláště mezi zuby. U mechanismu číslo 1 tento problém nevzniká a je u něj toto kritérium ohodnoceno lépe.

Hodnota kritéria K2 vyjadřuje to, jak velký daný mechanismus musí být, aby bylo možné dosáhnout potřebného rozsahu prstů, kde je samozřejmě menší velikost hodnocena lépe. Kritérium K3 popisuje druh pohybu, který daný mechanismus pohání. U mechanismu č. 1 je tento pohyb lineární a je mu přiřazena nižší hodnota než u mechanismu č. 2 s rotačním pohybem, jelikož zajištění rotačního pohybu je pomocí Bowdenova převodu jednodušší.

Dalším důležitým kritériem K4 je tuhost. Tuhost je vyšší u mechanismu č. 1, což vyplývá z jeho více robustní konstrukce. Jednotlivé kroky provedení analýzy a její výsledek je vidět na v [tabulkách 11 a 12](#).

Tabulka 11 Stanovení kritérií volby mechanismu

Rozhodovací analýza volby mechanismu					Hodnocení parametrů			
	Parametr	mech. 1	mech. 2.		Parametr	mech. 1	mech. 2	
obtížnost izolace	K1	žádná	vyšší		K1	100	0	
rozměry	K2	velmi vysoké	vysoké		K2	10	70	
hnací pohyb	K3	lineární	rotační		K3	30	70	
tuhost	K4	vysoká	malá		K4	70	30	

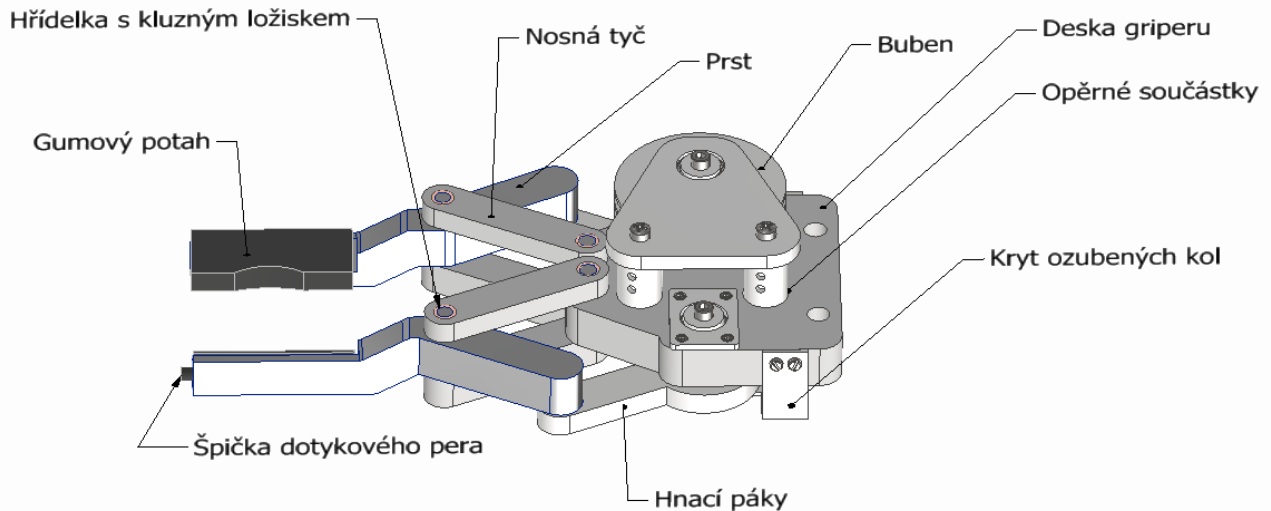
Tabulka 10 Vyhodnocení analýzy

kritérium		K ₁	K ₂	K ₃	K ₄	geomean	váhy		váha	mech. 1	mech. 2
obtížnost izolace	K ₁	1	1/5	1/8	1/7	0,244462	0,05	K ₁	0,05	4,559624	0
rozměry	K ₂	5	1	1/3	1/2	0,955443	0,18	K ₂	0,18	1,782064	12,47444
hnací pohyb	K ₃	8	3	1	1/2	1,86121	0,35	K ₃	0,35	10,41442	24,30031
tuhost	K ₄	7	2	2	1	2,300327	0,43	K ₄	0,43	30,03351	12,8715
					suma	5,361441	1,00	Suma	1	46,78961	49,64626

Jak je vidět z vyhodnocení analýzy, tak lepší možností je použití mechanismu č. 2. Po zvolení mechanismu, je zakončen návrh konceptu griperu a je provedeno zpracování konceptu vybrané varianty.

11.3. Zpracování konceptu griperu

Podle všech vstupních požadavků jsou vymodelovány jednotlivé komponenty tak aby byla zajištěna potřebná funkce a jejich malá váha. Protože se navrhovaný griper skládá z velkého množství komponent, není zde popsán návrh všech, ale jsou vybrány ty, které jsou považované za zásadní, kvůli jejich funkci, velikost namáhání, nebo protože hodnoty zjištěné z nich jsou použité v dalších výpočtech. Těmito komponenty jsou u griperu prsty, hanící páky a bubny Bowdenova převodu, které pohání hnací páku pomocí pera. Celá sestava je na [obrázku č.30](#).



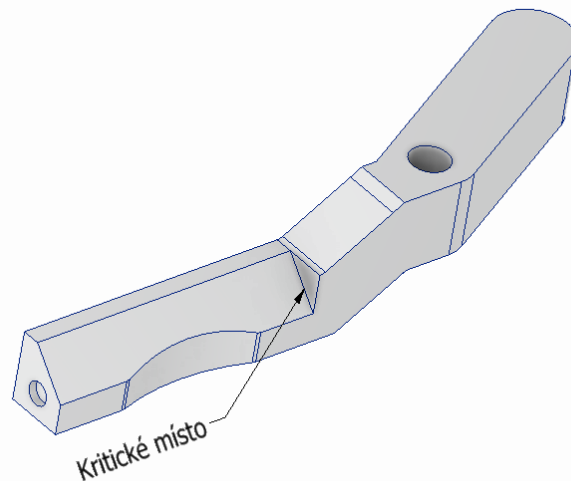
Obrázek 30 Sestava griperu

11.3.1. Návrh prstů

Prsty jsou považovány za zásadní, jelikož splňují úchopnou funkci a jsou v přímém kontaktu s objekty, se kterými se manipuluje. Na to, jaký musí mít prsty tvar, mají vliv především objekty, se kterými se manipuluje a charakter pohybového mechanismu. Požadavky na tvar jsou již určeny v analýze manipulovaných objektů, a tudíž je možné na jejich základě v Inventuru prsty vymodelovat.

Po navržení jejich rozměrů je nutné zvolit materiál, ze kterého mají být zhotoveny. Proto, aby bylo tento materiál možné navrhnout, je nutné zjistit, jak jsou prsty staticky a dynamicky namáhány. Dynamické namáhání závisí na rychlostech a zrychleních, kterými se pohybuje manipulovaný objekt. V rámci této práce byla již zvolena rychlost 0,5 m/s, jakou se musí jednotlivá ramena robota pohybovat. Což je poměrně malá hodnota, která způsobuje malé dynamické účinky. Z toho důvodu je dynamické namáhání zanedbáno.

Statické namáhání už ale zanedbat nelze. Statické namáhání prstů je způsobené tíhou hlavního zásobníku, která je 50 N. Ovšem tato tíha je nesena dvěma prsty, tudíž při dimenzování jednoho je brána její půlka, která je 25 N. Působením této tíhy je vyvolán ohybový moment, který prst ohýbá. Velikost tohoto momentu je nutné zjistit. Ale pro výpočet velikosti momentu je taky nutné znát délku ramena, na kterém působí. Za účelem zjištění této délky je potřeba určit kritické místo, ve kterém bude vznikat nejvyšší napětí. Při pohledu na model prstu je vidět, že toto místo je na úchopné ploše, jelikož zde má prst nejmenší výšku průřezu, a protože se vzdáleností od působiště síly roste moment, nachází se kritické místo těsně před zahájením stoupání prstů. Toto místo je znázorněno na [obrázku 31](#).



Obrázek 31 Model prstu

Po určení tohoto místa je nyní možné určit velikost ramene. Tato velikost je dána vzdáleností těžiště zásobníku od kritického místa. Předpokládaná poloha těžiště zásobníku je v jeho středu, který je při úchopu zásobníku požadovaným způsobem, vzdálený 8 cm od kritického místa. S touto zjištěnou hodnotou by bylo možné již vypočítat napětí v ohybu, ale kvůli komplexnímu tvaru kritického místa prstu není nalezení jeho středu tíhy ani vypočítání jeho kvadratického momentu jednoduché. Proto je zde využito funkcí programu Inventor pro dohledání těchto hodnot. Po jejich zjištění je možné provést výpočet ohybového momentu, modulu průřezu v ohybu a napětí v kritickém místě pomocí následujících vzorců.

Použité vzorce:

$$[15]M_o = F \times l = 25 \times 80 = 2000 \text{ Nmm}$$

$$[15]W_o = \frac{I_x}{e_x} = \frac{6956,945}{11,895} = 584,86 \text{ mm}^3$$

$$[15]\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{2000}{584,86} = 3,41 \text{ MPa}$$

Díky malému výslednému ohybovému napětí není nutné volit materiál s velkou pevností v ohybu. Ale je nutné brát ohled na to, že při zvolení materiálu s malou tuhostí dochází k poměrně velkým průhybům prstů, kvůli jejich délce. Proto je materiál navržený podle průhybu součásti.

Kvůli malému kvadratickému momentu prstu je pro něj navržen materiál s velkým modulem pružnosti. Tímto materiálem je hliník 6061, který má modul pružnosti 68,9 GPa.[16] Použití tohoto materiálu umožní kromě dosažení malých deformací prstů zajistí také jejich nízkou váhu. Po navržení materiálu je proveden výpočet průhybu je proveden pomocí Euler-Bernoulliho rovnice.

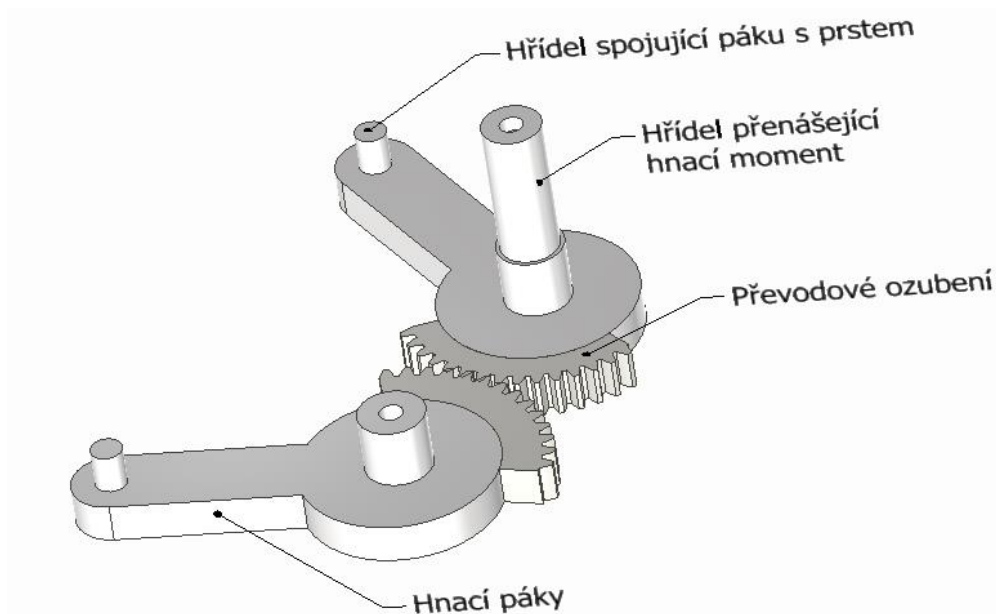
Použitý vzorec:

$$[15]\delta = \frac{F \times l^3}{3 \times E \times I_x} = \frac{25 \times 80^3}{3 \times 68900 \times 6957} = 0,0089 \text{ mm}$$

Z této hodnoty je vidět, že úchopné plochy prstů griperu se při manipulaci s hlavním zásobníkem prohnu o jednu setinu milimetru. Tento průhyb je pro prsty přijatelný, a tudíž navržený materiál vyhovuje.

11.3.2. Návrh hnacích pákové ústrojí

Dalšími součástmi, které jsou považované za zásadní, jsou hnací páky s převodovým ozubením, jelikož z jejich rozměrů vyplývá potřebný hnací moment. Na tvary těchto pák nejsou předem stanoveny žádné požadavky, ale osová vzdálenost jejich uložení v griperu a jejich délky jsou klíčové pro dosažení požadovaného rozsahu griperu. Další věcí, kterou je nutné při návrhu zvážit, jsou velikosti roztečných kružnic převodového ozubení. Ty jsou podstatné, protože velikost převodového ozubení vymezují na griperu prostor, kde se nemohou nacházet další komponenty, což omezuje možnosti uložení nosných tyčí. Z toho důvodu je navržen stejný průměr roztečných kružnic u obou převodových ozubení, aby byly možnosti stejné uložení pro každou nosnou tyč. Pro dosažení požadovaného rozsahu je navržena délka pák 70 mm a osová vzdálenost jejich uložení také 70 mm. Výsledné modely hnacího pákového ústrojí jsou vidět na obrázku 32.



Obrázek 32 Hnací páky

S navrženými modely je možné opět přejít k návrhu materiálu. Jelikož je největší část ohybového momentu způsobeného tíhou zásobníku zachycena pomocí čtyř nosných tyčí, tak není nutné brát efekt tohoto momentu v potaz. Statický efekt, který ale je nutné vzít v potaz, je síla, kterou páky musí přenést na prsty.

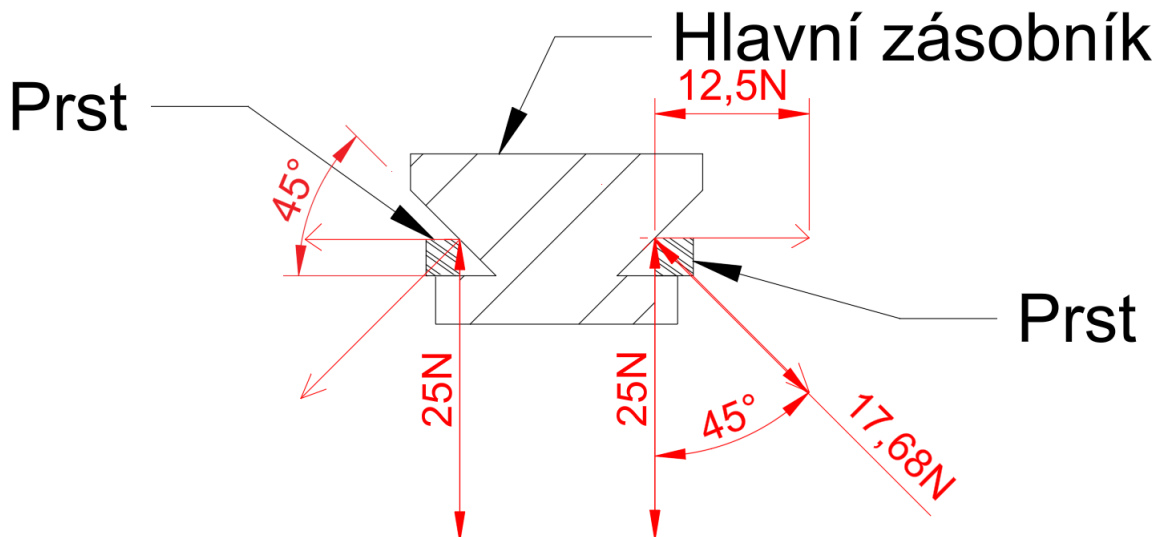
Síly, které musí páky přenést závisí na tom, s jakým objektem právě robot manipuluje. Proto je nutné určit, která z těchto sil je největší. Za tím účelem jsou vypočteny síly potřebné pro manipulaci s hlavním zásobníkem, jelikož je to nejtěžší objekt, a síly potřebné pro manipulaci s deskou, jelikož je to druhý nejtěžší objekt, který je ovšem držen pomocí tření, tudíž přítlačná síla na manipulaci s ním závisí na součiniteli tření prstů.

Jako první je spočítána přítlačná síla potřebná na manipulaci se zásobníkem. Tato přítlačná síla závisí na tíze zásobníku. Přítlačná síla je, mimo tíhu zásobníku, závislá ještě na úhlu, který svírá hrana zásobníku s vektorem tíhové síly, protože tento úhel způsobuje vznik silové složky v horizontálním směru, která odtlačuje prsty zásobníku od sebe. Pro výpočet

přítlačné síly je opět použita poloviční hodnota tíhy, jelikož je cílem zjistit přítlačnou sílu jednoho prstu. Samotná přítlačná síla je zjištěná pomocí rozkladu síly působící na prst do vertikální a horizontální složky. Vzorec pro výpočet je uveden dole a ilustrace zobrazující princip výpočtu je zobrazena na obrázku 33.

Použité vzorec:

$$[16]F_p = (25 \times \cos 45^\circ) \times \cos 45^\circ = 12,5 \text{ N}$$



Obrázek 33 Přítlačná síla

Nyní je možné přejít k výpočtu potřebné síly pro zvednutí desky s výtisky. Tato síla vychází z tíhy desky, která může dosáhnout až 15 N, a součinitele tření prstů. Jelikož materiál navržený pro zhotovení prstů nedisponuje vysokým součinitelem tření, je pro uskutečnění tohoto úkonu pro prsty navrhnutý potah z gumy, jehož hodnota součinitele tření je 0,3. Pro výpočet přítlačné síly je použit standardní vzorec pro výpočet třecích sil uvedený pod textem.

Použitý vzorec:

$$F_p = \frac{15}{0,3} = 50 \text{ N}$$

Přítlačná síla je vyvolávána působením obou prstů, a proto je jí nutné opět podělit dvěma. Tudiž přítlačná síla na jeden prst je 25 N. Jelikož tato síla vyšla větší než ta předchozí, je brána jako požadovaná přítlačná síla 25 N. Velikost síly, kterou musí přenést tyč pro zajištění této přítlačené síly na prstu závisí na velikosti rozevření prstů. Tuto sílu lze pro jednotlivé hodnoty rozevření zjistit ale pro větší bezpečnost jsou komponenty griperu navrženy podle její maximální hodnoty, která je 25 N.

Z této zjištěné hodnoty je nyní možné vypočítat otláčení a ohyb hřídele na páce, která jí spojuje s prstem. Pro výpočty těchto hodnot je nutné znát délku hřídele, která je 10 mm a její průměr, který je 8 mm. Působíště síly je při výpočtu uvažované v půlce hřídele. Výpočty napětí v ohybu a otláčení jsou provedeny těmito vzorci.

Použité vzorce:

$$M_o = F \times l/2 = 25 \times 5 = 125 \text{ Nmm}$$

$$W_o = \frac{I_x}{e_x} = \frac{7854}{10} = 785,4 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{125}{785,4} = 0,15 \text{ MPa}$$

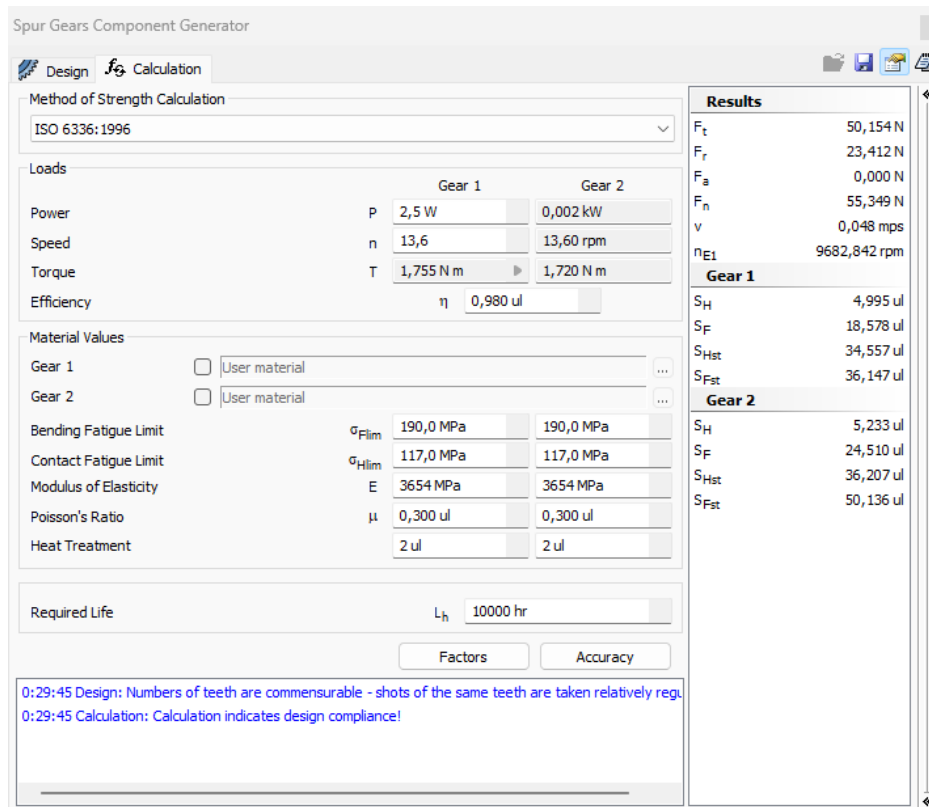
$$[15]p = \frac{F}{S} = \frac{25}{80} = 0,3 \text{ MPa}$$

Výsledné hodnoty napětí jsou malé a není nutné se pomocí nich řídit při výběru materiálu. Ovšem, kromě hřídele je při přenosu síly namáháno i převodové ozubení. Ozubení musí přenášet moment, jehož velikost vyplývá z přenášené síly a délky hnací páky. Vzorec jeho výpočtu vypadá následovně.

Použitý vzorec:

$$[15]M_{k1} = 25 \times 70 = 1\,750 \text{ Nmm} = 1,750 \text{ Nm}$$

Po zjištění přenášeného momentu je možné navrhnout materiál hnacích pák s převodovým ozubením. Navrženým materiálem je plast PEEK, kvůli své relativně nízké hustotě a dobrým mechanickým vlastnostem. Po zvolení materiálu je provedena kontrola, zda pro dané převodové ozubení materiál vyhovuje, zadáním mechanických vlastností materiálu a přenášeného momentu do kalkulačky ozubených kol v programu Inventoru. Výsledné hodnoty jsou vidět na obrázku 34.



Obrázek 34 Kontrola převodového ozubení

Z výsledků vypočítaných kalkulačkou vyplývá, že bezpečnost proti pittingu S_H je podstatně vyšší než minimální požadovaná hodnota, za kterou se považuje 1,2. Zároveň hodnota bezpečnosti proti únavovému lomu S_F je několikanásobně vyšší než požadovaná

minimální hodnota, která je 1,7. Z tohoto důvodu lze konstatovat, že navržený materiál pro ozubení vyhovuje.

Poslední část páky, kterou je nutné zkontrolovat, je hřídel, která přenáší hnací kroutící moment obou pák. Proto je nejprve nutné přenášení hnacího momentu vypočítat. Tento výpočet je jednoduchý díky tomu, že roztečné kružnice ozubených kol jsou stejně velké, což znamená, že převodový poměr mezi nimi je 1:1. Proto je hnací moment, který musí hřídel přenést rovný dvojnásobku momentu M_{k1} .

Použitý vzorec:

$$M_{k2} = 2 \times 1750 = 3500 \text{ Nm} = 3,500 \text{ Nm}$$

Se známým momentem je možné spočítat napětí v krutu hřídele hnací páky. Jelikož je navržený způsob přenosu kroutícího momentu pomocí pera, je nutné při výpočtu modulu průřezu v krutu brát průměr hřídele zmenšený o hloubku uložení navrženého pera. Tento průměr je 12,1 mm. Výpočet napětí v krutu je proveden následujícími vzorci.

Použité vzorce:

$$[15]W_k = \frac{\pi d^3}{16} = \frac{\pi \times 12,1^3}{16} = 347,845 \text{ mm}^3$$

$$[15]\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{3500}{347,845} = 10 \text{ MPa}$$

Pro toto napětí naražený plast PEEK vyhovuje.

11.3.3. Návrh bubnu pro Bowdenův převod

Poslední součástky, které jsou považovány za zásadní, jsou součásti Bowdenova převodu, jelikož z rozměrů bubnu vyplývá potřebná síla přenesená lanem. Pro zajištění tohoto převodu je nutné navrhnout buben s drážkami, ve kterém jsou dvě lana zajištěna šrouby, která se působením hnací síly na buben navíjí a odvíjí, čímž způsobují otáčení bubnu. Kromě bubnu je ale také do griperu potřeba zakomponovat součástky, o které se opírají kabely a zároveň jimi prochází lana.

U návrhu bubnu je snaha o to, aby měl co největší průměr, jelikož tím je snížena potřebná velikost hnací síly. Výška bubnu je navržena tak, aby se na něj mohl navinout dostatek lana pro vykonání potřebného otočení bubnu, ovšem tato hodnota závisí na hloubce jeho drážek a průměru použitých lan, tudíž je potřeba tyto rozměry navrhnout jako první.

Navržený průměr drážek bubnu je 70 mm a největší průměr bubnu je 75 mm. Z průměru drážek bubnu lze zjistit hnací sílu, podle které jsou zvolena použitá lana. Tato síla je zjištěna následujícím vzorcem.

Použitý vzorec:

$$[15]F = \frac{M_k}{\frac{d}{2}} = \frac{3500}{35} = 100 \text{ N}$$

Jelikož z bubnu jdou lana, která převádí tuto sílu, je na stránkách prodejců nalezeno lano s pravým vinutím, nosností 20 kg a průměrem 1 mm, se značením DIN 3055, A4. [17] Po navržení tohoto lana je možné zjistit, jak velká délka se ho musí navinout, aby se buben dostatečně otočil, jelikož z toho plyne podmínka na výšku jeho drážek. Protože je mechanismus

griperu navržen tak, že pro zajištění potřebného rozsahu se musí hnací páky pohybovat v rozmezí 0-90°, musí se být buben schopný otočit o stejný úhel. Z toho vyplývá, že na bubnu může být navinuté lano pouze jednou a nemusí být navinuté po celém jeho obvodu.

Při daném průměru lana je možné navrhnout šířku drážky, která je zvolená jako 2 mm a výsledná navržená výška bubnu je 16 mm. Pro buben je opět potřeba navrhnout požadovaný materiál, který je zjištěn z výpočtu jeho napětí v krutu. Tento výpočet je proveden těmito vzorci.

Použité vzorce:

$$W_k = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{16 \times D} = \frac{\pi \times (70^4 - 17,1^4)}{16 \times 70} = 67108 \text{ mm}^3$$
$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{3500}{67108} = 0,05 \text{ MPa}$$

Z těchto výsledků je vidět, že napětí bubnu v krutu je malé, a proto z tohoto hlediska je volba materiálu málo omezená. Ale protože buben je navržený tak, aby přenášel krouticí moment na hřídel hančí páky pomocí pera, je ho před návrhem materiálu ještě nutné zkontrolovat na otlačení. Pro určení otlačení je nutné navrhnout pouze délku pera a vypočítat působící sílu, protože hloubka drážky je zjištěná z tabulek v závislosti na průměru díry. Navržená délka pera je 15 mm a postup výpočtu je zobrazen níže.

Použitý vzorec:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\frac{2 \times M_k}{d}}{a \times b} = \frac{100}{15 \times 2,1} = 3,2 \text{ MPa}$$

Výsledné hodnoty napětí bubnu jsou malé a je pro něj navržený materiál plast ABS, který má mez pevnosti v tlaku 20 MPa. [18]

Po návrhu rozměrů bubnu je ovšem nutné ještě zkontrolovat hnanou hřídel na napětí v ohybu, který je vyvolaný silou působící v lanech. Pro jeho výpočet je nutné určit největší vzdálenost drážky bubnu od uložení hřídele, která je 17,5 mm. S touto hodnotou je možné provést výpočet napětí.

Použitý vzorec:

$$M_o = F \times l = 100 \times 17,5 = 1750 \text{ Nmm} = 1,8 \text{ Nm}$$
$$W_o = \frac{\pi \times d^3}{32} = \frac{\pi \times 12,1^3}{32} = 173,9 \text{ mm}^3$$
$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{1750}{173,9} = 10 \text{ MPa}$$

Z tohoto napětí je vidět že původně naražený materiál vyhovuje. S navrženými bubny a lany jsou navrženy všechny součásti, které jsou považovány za zásadní.

11.3.4. Souhrn sestavy griperu

Prsty griperu jsou navrženy z hliníku 6061. Deska a nosné tyče, spojující ji s prsty, jsou navrženy z PEEK 30% CF plastu s karbonovými vlákny, který má modul pružnosti 13 GPa, pro dosažení co nejmenší váhy griperu a udržení potřebných mechanických vlastností.[19] Za

účelem dosažení co nejmenší váhy jsou také navrženy zákrytné destičky a distanční kroužky, využité pro uložení hnacích páky, z PEEK plastu. Pro zajištění rotačního uložení prstů a nosných tyčí jsou využita kluzná ložiska na hřídelkách ze slitiny mědi, pro její malý součinitel tření. Posledními prvky, jejichž materiál nebyl zmíněn, jsou jednotlivé šrouby a radiální ložiska použitá pro uložení hnacích pák v nosné desce. Materiálem, ze kterého jsou tyto prvky, je ocel.

Podstatné vlastnosti celé sestavy, které jsou důležité pro návrh dalších částí robota jsou potřebný moment pro pohon bubnu, síla vyvíjená lanem, váha a délka griperu bez úchopné části prstu. Délka griperu navíc hraje roli při návrhu délky ramene 3, jelikož požadovaná délka tohoto ramene při spojení s gripem je již určena. Hmotnost sestavy je zjištěna pomocí programu Inventor. Hledaná délka je 216 mm a váha je 1,141 kg. Tyto hodnoty jsou zaznamenány tabulky č.12.

Tabulka 12 Souhrn vlastností sestavy griperu

Délka	1,1 kg
Váha	216 mm
Síla vyvíjená lanem	100 N

11.3.5. Kontrolní FEM výpočet

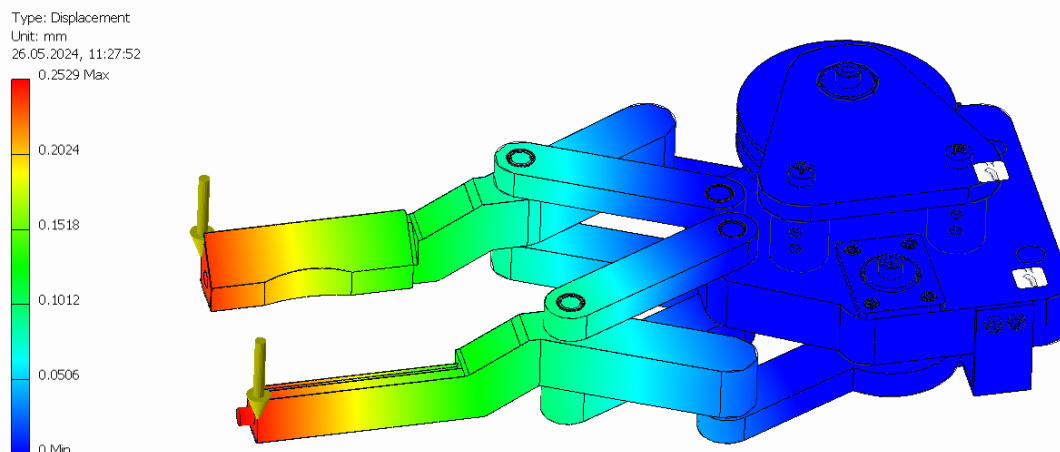
Pro zjištění průhybu celé sestavy griperu je proveden FEM výpočet v programu Inventor. Vstupní podmínkou tohoto výpočtu je síla vyplývající z momentu působícího na konci griperu. Tento moment je spočítán z tíhy zásobníku a vlastní tíhy griperu po nalezení jeho těžiště v programu Inventor. Hledaná síla je poté vypočítána vydělením momentu vzdáleností konců prstů v rozpětí, ve kterém drží zásobník, od konců desky. Výpočet probíhá takto.

Použité vzorce:

$$M = F_1 \times l_1 + F_2 \times l_2 = 296 \times 50 + 11,41 + 97 = 15\,906 \text{ Nmm} = 1,6 \text{ Nm}$$

$$F = \frac{M}{l_{\text{ke konci prstů}}} = \frac{15906}{283} = 56 \text{ N}$$

Výsledky této simulace jsou vidět na obrázku 35.



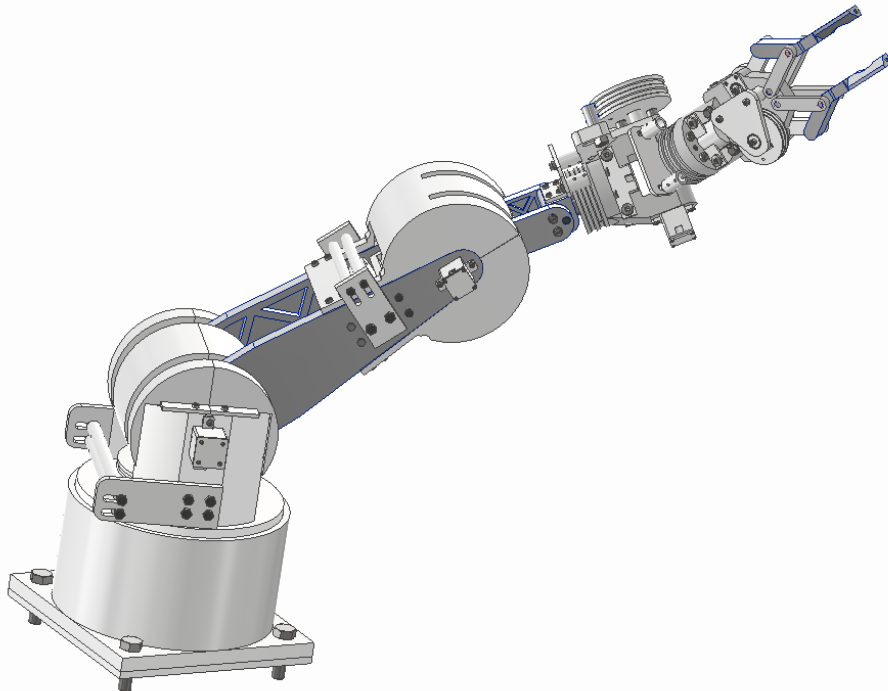
Obrázek 35 Deformace griperu

Z této simulace je vidět že konce špiček prstů griperu se při manipulaci s hlavním zásobníkem prohnu o 0,25 mm. Po stanovení těchto hodnot jsou zjištěny všechny potřebné informace a je možné začít návrh ramene 3, které je přímo spojeno s griperem.

Zpracování konceptu zbylých částí robota je uvedeno v Příloze 1. Návrh zbývajících částí robotického manipulátoru.

12. Finální sestava robota

Po navržení všech součástí robota je možné vytvořit jeho sestavu a zjistit jeho váhu. Ta i s jeho ostatními technickými parametry je zapsána do tabulky č.13. Výslednou sestavu robota je možné vidět na obrázku č. 36, kde je zobrazen s kryty. Tyto kryty jsou navrženy pro eliminaci rizika zachycení plastových plášťů, navržených pro izolaci kloubů a griperu robota, mezi ozubená kola.



Obrázek 36 Robot

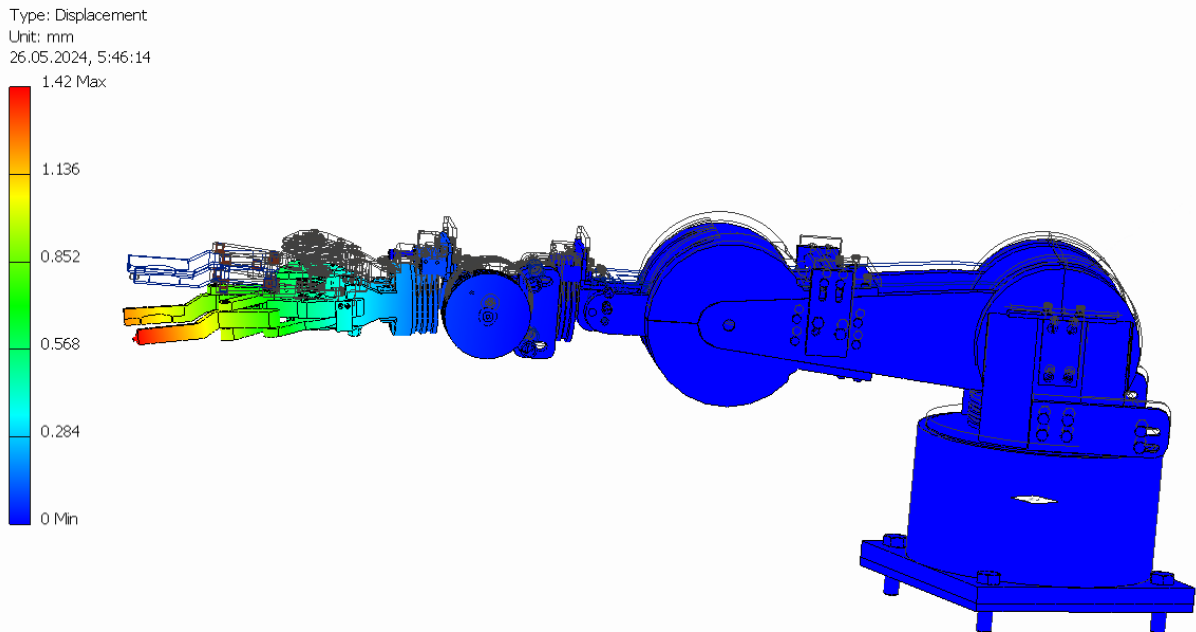
Tabulka 13 Parametry robota

Dosah	912 mm
Dovolená manipulační zátěž	5 kg
Hmotnost	34 kg (bez motorů)
Rozměr půdorysu	300x300 mm
Rychlost	0,5 m/s

Navržený robot má při maximálním napětí ramen těžiště ve vzdálenosti 173 mm od osy základny, a při jeho daném místě uložení na platformě nehrozí riziko překlopení platformy.

12.1. Analýza deformací navrženého robotu

Nyní je také možné určit celkové deformace robota. Sečtením deformací z jednotlivých částí návrhu je zjištěna celková hodnota předpokládaného průhybu dílčích částí, která činí 0,9 mm. Pro ověření této hodnoty je opět provedena simulace zatížení, tentokrát celého robotického manipulátoru. Její výsledek je zobrazen na obrázku č. 37.



Obrázek 37 Deformace celého ramene

Výsledná hodnota deformace z této simulace je 1,42 mm. Tato hodnota se od zjištěného součtu liší o 0,52 mm. Tento rozdíl může být způsoben nepřesnými výpočty zátěží nebo velkou tolerancí výpočtu v programu, ale jelikož se tyto hodnoty příliš neliší, je možné důvěřovat hodnotě celkového průhybu získaného ze simulace zátěže celého robota. Na základě toho je určena hodnota celkového průhybu robota při zátěži pěti kilogramy a při úplném vyložení ramene 1,42 mm.

12.2. Zhodnocení sestavy

Po zjištění celkového průhybu jsou známy všechny potřebné informace pro provedení celkového hodnocení navrženého robota. To je provedené pomocí SWOT analýzy. Na obrázku č.38 jsou vidět její jednotlivé položky.

SILNÉ STÁNKY	SLABÉ STRÁNKY
Konstrukce vyhovuje zátěžím a prostředí	Nutnost kompenzovat deformace
Griper dokáže manipulovat s potřebnými objekty	Náročnější výroba součástí z kompozitů
Malé riziko poškození práškem	Pro automatizaci vyžaduje pomocné prvky
Jednoduché pohonné ústrojí	
Malé riziko poškození tiskárny	
Zajištěná zpětná vazba	
HROZBY	PŘÍLEŽITOSTI
Selhání elektroniky	Odlehčení nosníků
Výskyt člověka v pracovním prostředí	Tužší konstrukce
	Použití planetových převodovek

Obrázek 38 položky ze SWOT analýzy robota

Při pohledu na jednotlivé aspekty robota je zřejmé, že charakter robota splňuje všechny funkční požadavky a jeho slabé stránky naplnění potřebných úkonů neznemožňují. Na základě toho lze zpracování konceptu robotického manipulátoru pro strojírenskou praxi považovat za splněné.

13. Celkový souhrn navrhovaného konceptu

Navržený robot má 6 stupňů volnosti a otevřený kinematický řetězec. Pohyby jeho ramen a griperu jsou zajištěny pomocí elektromotorů uložených v pojízdné platformě a Bowdenových převodů, čímž jsou efektivně snížena rizika vystavení pohonných zařízení kovovému prášku. Jeho konstrukce je před práškem chráněna plastovými plášti, které snižují riziko zanášení a poškození kloubů. Robot má pro zajištění ovládní displeje tiskárny do svého griperu zakomponovanou špičku dotykového pera a pro zajištění zpětné vazby o své poloze má na každém kloubu absolutní enkodér. Jeho konstrukce má požadovanou nosnost, dosah a uchopné plochy griperu odpovídají geometrii uchopovaných ploch objektů, se kterými je nutné manipulovat. Rozměry jeho ramen mu umožňují pohybovat se v pracovním prostředí bez rizika kolize a dosáhnout na všechny potřebné objekty. Jeho půdorys není příliš velký, aby způsoboval problémy při montáži na platformu a jeho váha také není příliš velká, aby pojízdná platforma musela být příliš výkonná nebo byly vysoké nároky na její dimenzování.

Mimo běžně používaných materiálů je pro zhotovení robota také navržen materiál PEEK 30% CF, což může komplikovat jeho výrobu, jelikož výroba z kompozitu není jednoduchá. Další nevýhodou konstrukce robota jsou velikosti jeho průhybů, které mají negativní vliv při změně hmotnosti břemene, a je nutné je řešit při řízení jeho pohybů. Z toho vyplývá, že existují i příležitosti pro zlepšení konstrukce robota, jako je její odlehčení a zpevnění. Tyto nevýhody ale neznemožňují provádět obsluhu tiskárny.

Protože výsledný robot odpovídá všem potřebným charakteristikám daným procesem obsluhy a jsou zajištěny všechny jeho hlavní a podpůrné funkce, je tento robotický manipulátor vhodný pro automatizaci obsluhy 3D tiskárny.

14. Závěr

Koncept robotického manipulátoru pro strojírenskou praxi byl zaměřen na automatizaci obsluhy 3D tiskárny. Při návrhu byly definovány činnosti obsluhy, ze kterých se obsluha skládá, a zvoleny možnosti pro automatizaci tohoto procesu. Po zvážení byly navrženy prvky umožňující robotickému manipulátoru vykonávat určité činnosti, které jsou náročné na automatizaci. Na základě těchto prvků a rozměrů tiskárny byl vypracován návrh automatizovaného pracoviště.

Podle polohy jednotlivých objektů a rozměrů automatizovaného pracoviště byla nalezena vhodná struktura robota. Na základě této struktury byly navrženy délky článků manipulátoru. Poté byli naraženy způsoby zajištění hlavních a asistujících funkcí robota, podle kterých byli navrženy alternativy robota pro zajištění obsluhy. Z nich byla vybrána nejvhodnější alternativa. Poté byla určena strategie návrhu podle, které se postupovalo.

Prvním krokem zvolené strategie byl návrh griperu. Nejprve byly definovány úchopné rozměry objektů, se kterými je nutné manipulovat. V závislosti na nich a zvolenému způsobu zajištění úchopné funkce byl vybrán vhodný mechanismus griperu. Následně byli naraženy jeho specifické komponenty.

Poté byla navržena jednotlivá ramena a základna robota. V průběhu návrhu byli zjištěny potřebné hnací síly lan Bowdenova převodu a podle nich byla navržena rozhodová skříň a elektromotory pro pohon robota. Nakonec byla vytvořena konečná sestava a bylo zhodnoceno její provedení a vhodnost pro automatizaci obsluhy procesu.

Navržený robot byl shledán jako vhodný pro obsluhu tiskárny s použitím pomocných prvků. Návrh a řešení těchto prvků mohou být tématem pro další práce.

Seznam použitých zdrojů

- [1] MIEKISCH, Ing. Jirí. *Robotika* [online]. Střední škola průmyslová a umělecká, Opava, příspěvková organizace, Praskova 399/8, Opava, 746 01, 2012 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/AUT_IV/VY_32_INOVACE_E-15-20.pdf. Střední škola průmyslová a umělecká, Opava.
- [2] FORMÁNEK, Doc. Ing. Josef , Ph.D. *Podklady k uspořádání řídicím systémům i řízení manipulátorů a robotů* [online]. ZČU [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://home.zcu.cz/~formanek/mmvvyuka-amzt/Data/ivk-arvt-soubory/14-F.pdf>. Výukový text. ZČU.
- [3] SKAŘUPA, Jirí. *Průmyslové roboty a manipulátory* [online]. Ediční středisko VŠB – TUO, 2007 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf. Výukový text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [4] KOCHANÍČEK, Bc. Ludvík. *Robotika – kinematika robotů, stupně volnosti* [online]. COPtel, 2012 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://coptel.cz/pluginfile.php/14663/mod_resource/content/1/kinematika_robotu-stupne_volnosti-a.pdf. Výukový text. SPŠ Uherský hrad.
- [5] ATWEL INTERNATIONAL A.S. Co je automatizace a jaký je její význam? *Umimeweby.cz* [online]. 2020, 29. 10. 2020 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.umimeweby.cz/blog/jaky-je-vyznam-automatizace-a-proc-je-dobre-ji-vyuzivat/>
- [6] SHEN, Shirley, Shichuan TANG, Ivan S. COLE, Rui CHEN, Hong YIN a Xingfan ZHOU. Exposure, assessment and health hazards of particulate matter in metal additive manufacturing: A review. *Chemosphere* [online]. 2020, **2020**(127452), 1 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: doi:127452
- [7] BLÜMELOVÁ, Kristina Kadlas. TECHNICKÝ TÝDENÍK. *Technickýportál.cz*. TECHNICKÝ TÝDENÍK. *Technickýportál.cz* [online]. 2021, 16. červen 2021 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: www.technickytydenik.cz
- [8] UNIVERSAL ROBOTS A/S, O.Z. *Www.universal-robots.com* [online]. 2008 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/products/ur10-robot/>
- [9] CRX-5iA. In: FANUC. *Crx.fanuc.eu* [online]. 2020 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://crx.fanuc.eu/cs/new-crx-cobots/>
- [10] HOSNEDL, S., J. DVOŘÁK a M. KOPECKÝ. *KONSTRUKČNÍ A DESIGNÉRSKÝ NÁVRH NEMOCNIČNÍHO LŮŽKA PRO INTENZIVNÍ PÉČI*. ZČU, FST, KKS, 2022. Case Example. Západočeská univerzita v Plzni.
- [11] *Hydraulické mechanismy* [online]. ČVUT, Neznámí [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://users.fs.cvut.cz/~beckajan/predn_design_KON_I_12.pdf. Výukový text. ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE.

- [12] PALÁT, Ing. Hynek. *Tekutinové mechanismy* [online]. Střední škola průmyslová a umělecká, Opava, příspěvková organizace, Praskova 399/8, Opava, 746 01, 2012 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.sspu-opava.cz/static/UserFiles/File/_sablony/SPS_III/VY_32_INOVACE_C-08-17.pdf. Výukový text. Střední škola průmyslová a umělecká, Opava, příspěvková organizace, Praskova 399/8, Opava, 746 01.
- [13] Bowdenův kabel. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 11. 6. 2023 v 18:52 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Bowden%C5%AFv_kabel
- [14] *Elektromotory* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.elektromotory.cz/elektromotory-proc-a-jak>
- [15] HALAMA PH.D., doc. Ing. Radim. *Pružnost a pevnost - interaktivní studijní materiál* [online]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava Západočeská univerzita v Plzni, 2012 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://mi21.vsb.cz/sites/mi21.vsb.cz/files/unit/pruznost_pevnost_obraz.pdf. Výukový text. Vysoká škola báňská.
- [16] KŘEN. CSC., Ing. Jiří. *Řešené příklady ze statiky* [online]. Ediční středisko VŠSE, 1985 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: <file:///C:/Users/jakub/Downloads/skripta-ze-statiky-od-prof-krena-resene-priklady-ze-statiky-i.pdf>. Skripta. Vysoká škola strojní a elektrotechnická v Plzni.
- [17] OBCHODPRODÍLNU.CZ. *ObchodProDílnu.cz. ObchodProDílnu.cz* [online]. Neznámí [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://www.obchodprodilnu.cz/>
- [18] E-konstruktor. *Vlastnosti látek a materiálů* [online]. 2013 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/>
- [19] LPM S.R.O. *Technicky-datovy-list-plasty*. LPM S.R.O. *Www.lpm.cz* [online]. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://www.lpm.cz/cs/technicky-datovy-list-plasty/polyetereterketon-peek-cf30?n=1706_5
- [20] AK PLAST S.R.O. *AK plast s.r.o. AK PLAST S.R.O. TechData/PEEK_mat_list* [online]. 2020 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <http://www.akplast.cz/>
- [21] Moment setrvačnosti. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001-, 25. 3. 2024 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Moment_setrva%C4%8Dnosti
- [22] *Fastech_ezi-servo_plus-r_catalog_2020*. In: RAVEO. *Www.raveo.cz* [online]. 2020 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.raveo.cz/productmanager/wp-content/uploads/2023/02/fastech_ezi-servo_plus-r_catalog_2020_en_v20-08.pdf
- [23] ACM36-K1K0-K0. In: MEGATRON, S.R.O. *Www.megatron.cz* [online]. 2018, 17.05.2018 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.megatron.de/fileadmin/user_upload/Datenblaetter/Winkelsensoren/Halleffekt_Singelturm/DS_MAB22A_en.pdf
- [24] Operační robot. In: <https://www.verywellhealth.com/> [online]. 2022 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z:

[https://www.verywellhealth.com/thmb/haSXMnYf4oirkEw0mppc85YVUBE=/750x0/filters:no_upscale\(\):max_bytes\(150000\):strip_icc\(\):format\(webp\)/GettyImages-511732538-1b53195d99af43ce838c3e73dbd77d04.jpg](https://www.verywellhealth.com/thmb/haSXMnYf4oirkEw0mppc85YVUBE=/750x0/filters:no_upscale():max_bytes(150000):strip_icc():format(webp)/GettyImages-511732538-1b53195d99af43ce838c3e73dbd77d04.jpg)

- [25] MAYYAS, Mohammad a Rochelle MELLISH. A method for the automatic generation of inverse kinematic maps in modular robotic systems. *International Journal of Advanced Robotic Systems* [online]. 2016, 2016-09-01, **13**(5), 1 [cit. 2024-05-19]. ISSN 1729-8814. Dostupné z: doi:10.1177/1729881416662790
- [26] Bowdenův kabel. In: <https://a.allegroimg.com/original/038f1e/4037d5d94317a6f07bd9b2c9f6be/AL-KO-BRZDOVE-LANKO-BOWDENOVA-SLACHA-770-1620> [online]. Neznámí [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: <https://allegro.cz/nabidka/al-ko-brzdove-lanko-bowdenova-slacha-770-1620-7855369823>
- [27] *Zapojení lan* [online]. 2020 [cit. 2024-05-20]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=0hGy4AxUOnk&t=223s&ab_channel=RoTechnic
- [28] , WolfShaft. Robot griper 7. In: *Youtube.com* [online]. 2020 [cit. 2024-05-19]. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=YM2O3TufUIY&t=187s&ab_channel=WolfShaft
- Obrázky bez citace pocházejí ze zdrojů autora

Seznam příloh

Příloha č.1: Návrh zbývajících částí robotického manipulátoru.....	49
Příloha č.2: Výkres sestavy robota.....	49
Příloha č.3: Výkres sestavy griperu.....	XXIX
Příloha č.4: Výrobní výkresy komponent griperu a nosníku.....	XXXI

PŘÍLOHA č. 1

Návrh zbývajících částí robotického manipulátoru

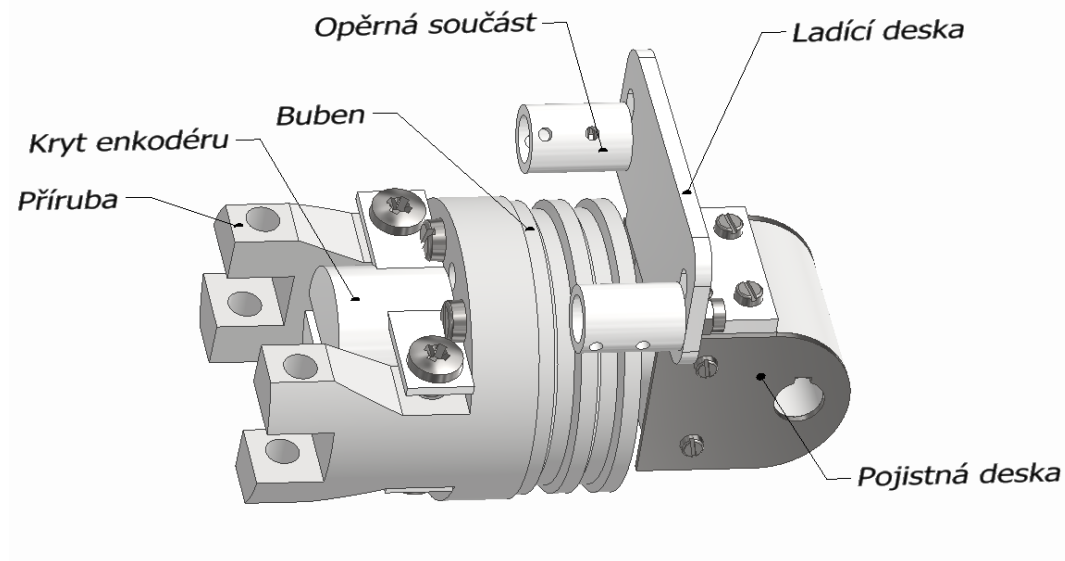
Obsah

1.	Návrh navazujícího rotačního ramene 3.....	III
1.1.	Návrh bubnu ramene 3	IV
1.2.	Souhrn sestavy ramene 3	V
1.3.	Kontrolní FEM výpočet.....	VI
2.	Návrh navazujícího rotačního ramene 2.....	VII
2.1.	Návrh bubnu 1 ramene 2	VIII
2.2.	Návrh bubnu 2 ramene 2	VIII
2.3.	Návrh nosníků ramene 2.....	IX
2.4.	Souhrn sestavy ramene 2	XI
2.5.	Kontrolní FEM výpočet.....	XI
3.	Návrh navazujícího ramene 1	XII
3.1.	Návrh ozubených kol ramene 1	XII
3.2.	Návrh bubnu ramene 1	XIII
3.3.	Návrh nosníků ramene 1	XIII
3.4.	Souhrn sestavy ramene 1	XV
3.5.	Kontrolní FEM výpočet.....	XV
4.	Návrh základny	XVI
4.1.	Návrh ozubených kol základny.....	XVII
4.2.	Návrh bubnu základny.....	XVIII
4.3.	Souhrn sestavy základny	XVIII
4.4.	Kontrolní FEM výpočet.....	XIX
4.5.	Návrh elektromotoru základny	XIX
5.	Návrh pohonného ústrojí převodní skříňě	XXII

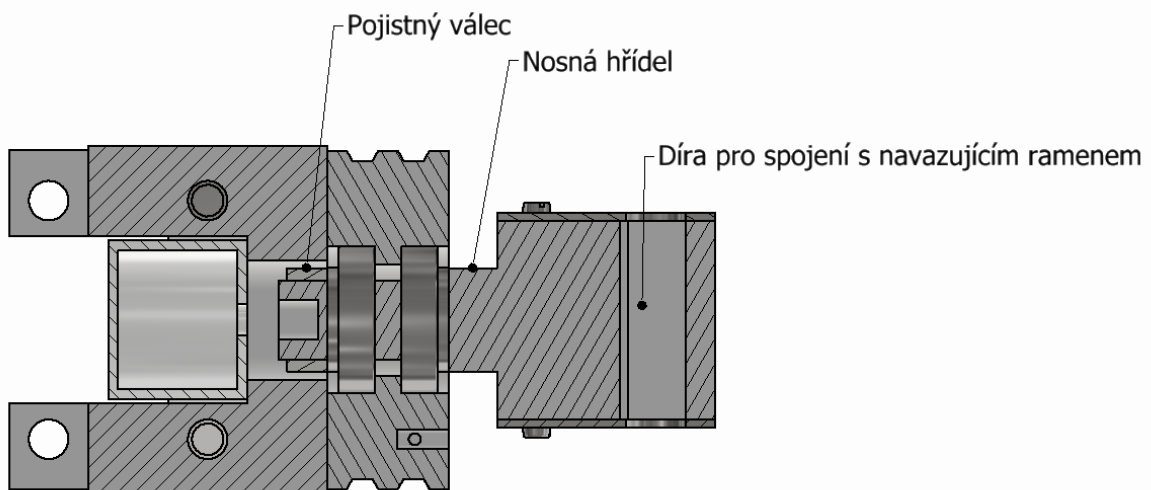
1. Návrh navazujícího rotačního ramene 3

Pro návrh součástek tohoto ramene jsou všechny řídicí podmínky známé. Tyto zahrnují váhu zásobníku a griperu a také požadavek na délku ramene, která je 360 mm. Nicméně tento požadavek se vztahuje na délku ramene s griperem. Proto je nutné od požadované délky odečíst délku griperu, která je určena v předchozí sekci, a činí 216 mm. Z toho vyplývá že navrhované rameno by mělo být dlouhé 144 mm.

Pro lepší pochopení jednotlivých vazeb těchto komponent a fungování ramene jsou vloženy obrázky 39 a 40 celé sestavy a jejího řezu.



Obrázek 39 Sestava ramene 3 v řezu



Obrázek 40 Sestava ramene v řezu

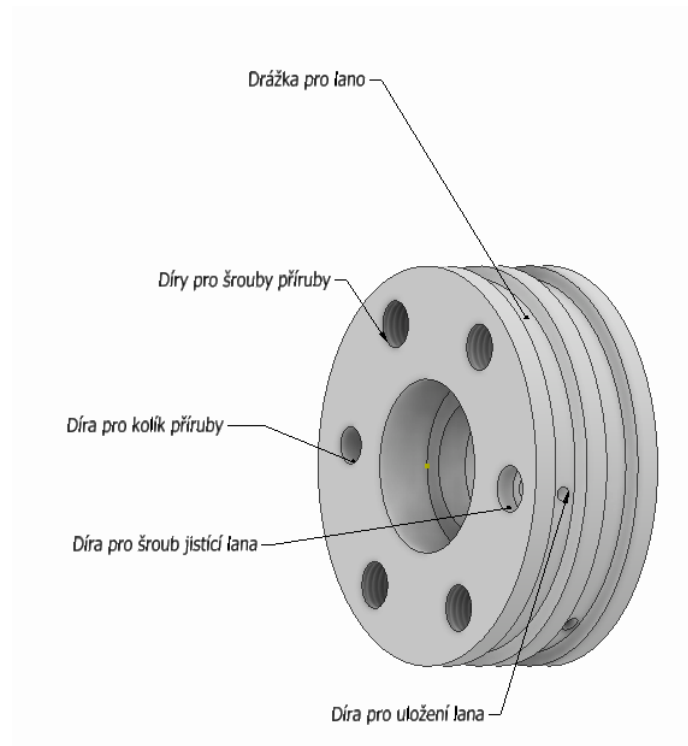
Rameno funguje tak, že na nosné hřídeli je uložen na ložiskách buben, který se otáčí vlivem odvíjení lana pomocí Bowdenova převodu. K tomuto bubnu je připevněna příruba, která

drží griper a rotaci bubnu na něj přenáší, čímž je zajištěn jeden stupeň volnosti. Příruba má na sobě také kryt, ve kterém je uložen enkodér. Nosná hřídel má na svém konci díru pro spojení s navazujícím ramenem. Tato díra je přikrytá pojistnými deskami, které zabraňují posunutí ramene na hřídeli. Rameno 3 má také opěrné součástky uložené na ladící desce, která umožňuje nastavení jejich pozice pro zajištění těsného opření kabelů o opěrné součástky.

Součástí, jejíž návrh je zde podrobně popsán je pouze buben pro Bowdenův protože z něj vyplívá síla přenášená síla v lanech.

1.1.Návrh bubnu ramene 3

Poslední součástí hodnou pozornosti je buben Bowdenova převodu, který je vidět na obrázku č.41.



Obrázek 41 Buben ramene 3

Na tomto bubnu je upevněna příruba pomocí kolíku a šroubů, kterou otáčí. Za kroutící moment, jaký musí buben přenést, je považován ten, který by vznikl naklopením hlavního zásobníku do horizontální polohy, aby byla jistota, že ho robot při manipulaci udrží. Pro výpočet kroutícího momentu je opět nutné odhadnout polohu středu hmotnosti zásobníku při jeho úplném naplnění. Tato poloha s ohledem na jeho tvar je odhadnuta ve výšce 5 cm od nosné desky griperu při uchopení zásobníku prsty. Výpočet momentu je proveden pomocí tohoto vzorce

Použitý vzorec:

$$M_K = F \times l = 50 \times 50 = 2500 \text{ Nmm} = 2,5 \text{ Nm}$$

Jelikož tento moment není příliš velký, je největší průměr bubnu navržený stejný jako průměr příruby, aby nezabíral zbytečně moc prostoru. Navržený průměr jeho drážek je 80 mm. Tudíž lana v ní uložená musí přenášet sílu, která je spočtená následovně.

Použitý vzorec:

$$F = \frac{2 \times M_k}{d} = \frac{5000}{80} = 62,5 \text{ N}$$

Pro zajištění přenosu této síly je zvoleno lano o průměru 1 mm a s nosností 20 kg. Značení tohoto lana je stejné jako značení lana zvoleného u návrhu griperu. Pro uložení lana tohoto průměru je navržena šířka drážek opět 5 mm. Aby mohl být navržen materiál bubnu, je nutné zjistit jeho napětí v krutu. Ale než je možné provést tento výpočet, je potřeba určit velikost jeho vnitřní díry. Ta je dána vnějšími průměry kuželíkových ložisek, které jsou 37 mm. S touto hodnotou je možné provést následující výpočet.

Použití vzorce:

$$W_k = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{16 \times D} = \frac{\pi \times (80^4 - 37^4)}{16 \times 80} = 95931 \text{ mm}^3$$

$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{2500}{95931} = 0,026 \text{ MPa}$$

Z výpočtu je vidět, že napětí v krutu je minimální a při volbě materiálu nebude hrát roli. Dalším způsobem, jakým je buben namáhaný, je ohyb, který vyplývá z ohybových momentů způsobených zásobníkem a griperem. Místo, které je těmito napětími namáháno nejvíc, je část bubnu přímo na prvním ložisku. Délky ramen ohybových momentů jsou zjištěny pomocí programu Inventor a výpočet napětí v ohybu probíhá takto.

Použití vzorce:

$$M_o = F_1 \times l_1 + F_2 \times l_2 = 50 \times 358 + 11,41 \times 169 = 19830 \text{ Nmm} = 20 \text{ Nm}$$

$$W_o = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32 \times D} = \frac{\pi \times (80^4 - 37^4)}{32 \times 80} = 47965,5 \text{ mm}^3$$

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} = \frac{19830}{47965,5} = 0,41 \text{ MPa}$$

Všechna zjištěná napětí jsou malá a buben lze tudíž zhotovit z méně kvalitních plastů. Ale protože je buben nejen hnací, ale i nosný, je od něj požadováno, aby jeho deformace byly minimální. Proto je zde opět jako materiál navrhnutý plast PEEK 30% CF, jelikož jeho modul pružnosti v tahu, zajišťuje jeho dobrou tuhost.

1.2. Souhrn sestavy ramene 3

Všechny nosné části sestavy ramene 3 jsou navrženy z plastu PEEK 30% CF, čímž je dosaženo jejich malé váhy a menších deformací. Pro ladící desku a opěrné součástky je použit plast PEEK. Kryt navržený pro upevnění enkodéru není nutné nijak namáhat, a pro jeho výrobu stačí použít materiál ABS plast. Zbylé součástky ramene, jako jednotlivé šrouby a ložiska, jsou opět ocelové.

Jednotlivé podstatné vlastnosti sestavy jsou opět sepsány do tabulky číslo 14.

Tabulka 14 Souhrn vlastností sestavy ramene 3

Délka	144 mm
Váha	0,973 kg

Síla vyvinutá lanem	62,5 N
---------------------	--------

1.3. Kontrolní FEM výpočet

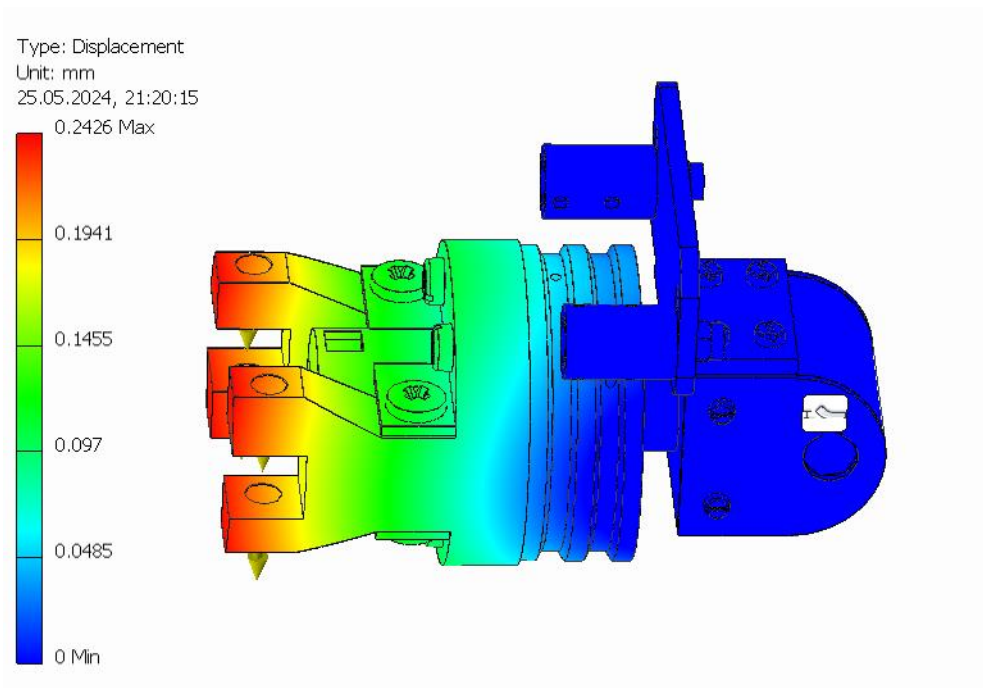
Nakonec je provedena simulace a jsou zjištěny deformace ramene. Postup zjištění vstupní podmínky je stejný jak při předchozím FEM výpočtu. V tomto výpočtu se pouze změnila hodnota vzdáleností a přibyl tlak ramene 3. Následovný výpočet síly vypadá takto.

Použité vzorce:

$$M = F_1 \times l_1 + F_2 \times l_2 + F_3 \times l_3 = 50 \times 440 + 11,41 \times 231 + 9,73 \times 63$$
$$= 25333 \text{ Nmm} = 25 \text{ Nm}$$

$$F = \frac{M}{l_{\text{ramene 3}}} = \frac{25333}{144} = 176 \text{ N}$$

Na obrázku 42 je zobrazený výsledek simulace.

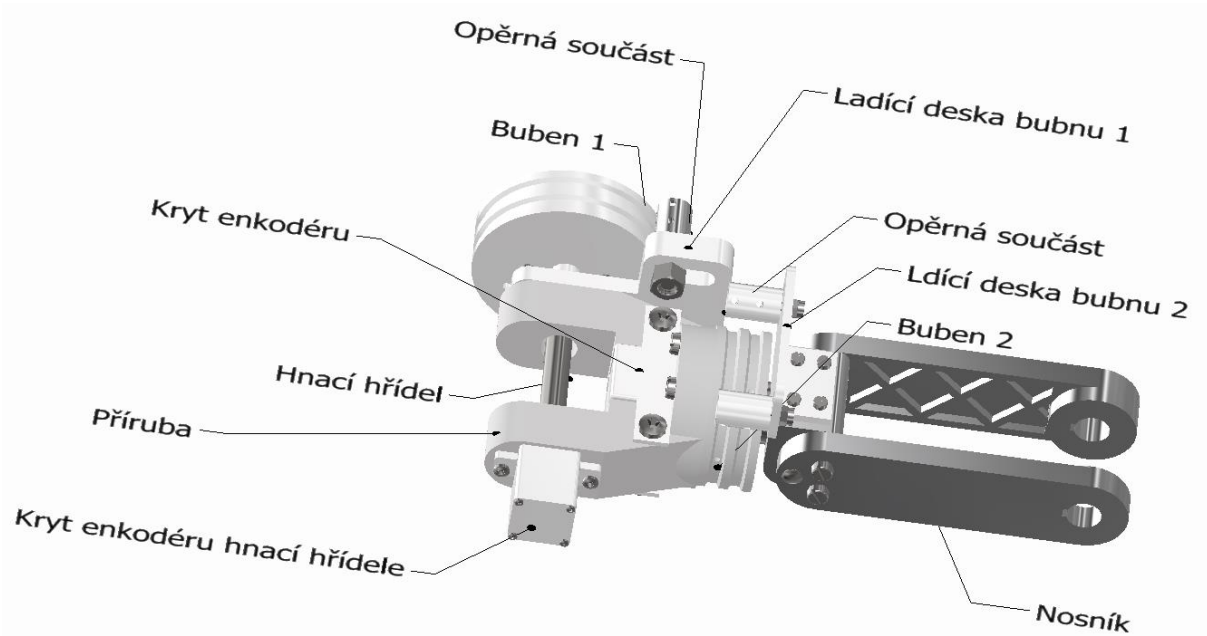


Obrázek 42 Deformace ramene 3

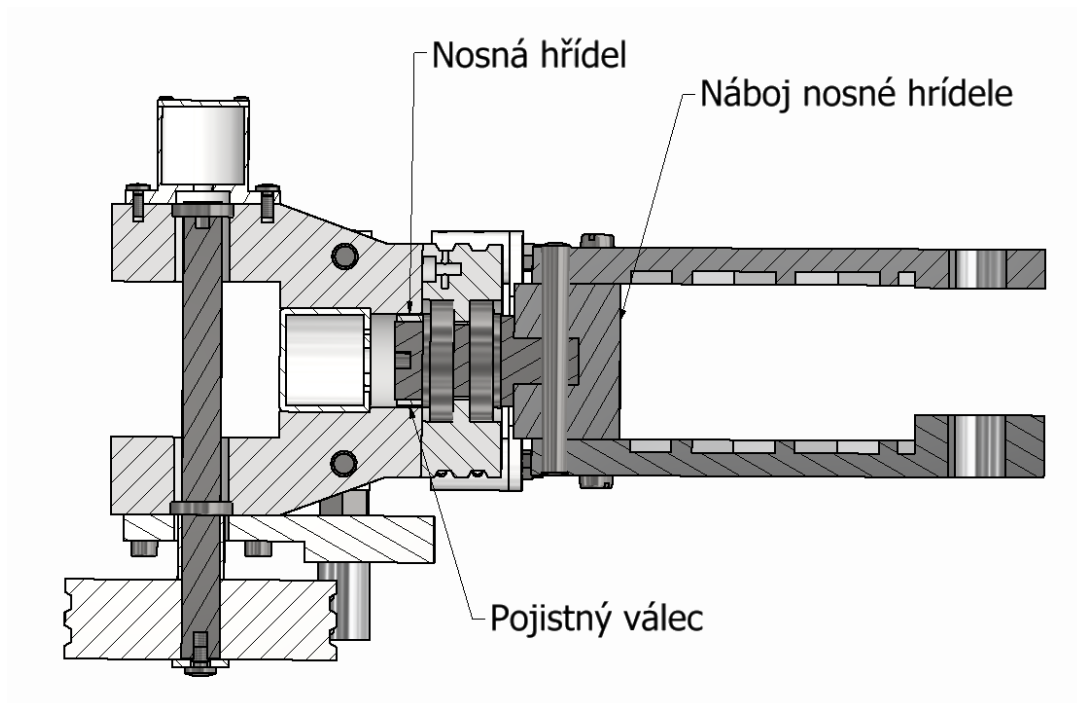
Z analýzy je vidět, že se konce příruby prohnu o 0,2426 mm. Po dokončení simulace je návrh ramene 3 hotový a je možné pokračovat v návrhu ramene 2.

2. Návrh navazujícího rotačního ramene 2

Rameno 2 na rozdíl od ostatních ramen zajišťuje 2 stupně volnosti robota. Jeden stupeň je zajištěn tím, že rameno 2 otáčí ramenem 3, a druhý stupeň je zajištěn jeho rotací kolem vlastní osy. Podle toho je také navržena jeho konstrukce, kterou lze vidět na obrázku 43 a v řezu na obrázku 44.



Obrázek 43 Rameno 2



Obrázek 44 Rameno 2 v řezu

Jak je vidět na obrázcích 39 a 40 buben 1 přenáší perem kroutící moment na rotační hřídel, která tento moment perem přenáší na rameno 3. Rotační hřídel je uložena ve vidlici, která je pevně spojena s bubnem 2, který s ní otáčí. Buben 2 je zde uložena na nosné hřídeli stejným způsobem jako na rameni 3. Tato celé sestava je následovně spojena pomocí pera se hřídelí následujícího ramene. Z těchto součástí jsou za hodné pozornosti považované bubny a nosníky.

2.1. Návrh bubnu 1 ramene 2

První zásadní součástí je buben 1. Ten je opět navržený tak, s co největším průměrem v místě jeho drážek, ale také tak, aby jeho průměr nezpůsoboval problémy se zakomponováním ostatních součástí do ramene. Proto je navržený průměr drážek bubnu 100 mm. Moment, který buben přenáší, je stejný jako moment zjištěný pro určení vstupní podmínky FEM výpočtu ramene 3, jehož zjištěná hodnota je 25333 Nmm. Podle tohoto momentu je vypočítána síla přenášená lany následovně,

Použitý vzorec:

$$F = \frac{2 \times M_o}{d} = \frac{2 \times 25333}{100} = 506 \text{ N}$$

Podle hodnoty síly je možné určit potřebná lana. Ty jsou opět DIN 3055, A4 s nosností 70 kg a průměrem drátu 2 mm. Podle tohoto průměru je navržena šířka drážky opět 5 mm. Tudíž jeho celková výška je 30 mm. Po navržení jeho rozměrů je možné řešit jeho namáhání. Buben je namáhán na otláčení a na krut, pro což jsou příslušné hodnoty známé. Pro výpočet otláčení je nutné určit hloubku jeho drážky, která je 2,1 mm. Napětí v tlaku je spočteno následujícími vzorci.

Použitý vzorec:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\frac{2 \times M_k}{d}}{a \times b} = \frac{\frac{2 \times 25333}{15}}{25 \times 2,9} = 47 \text{ MPa}$$

Výsledná hodnota je poměrně vysoká, proto je pro buben zvolený materiál plast PEEK, který má pevnost v tlaku 117 MPa.[20] Pro výpočet napětí v krutu jsou všechny potřebné veličiny také známé. Samotný výpočet je proveden následovně

Použitý vzorec:

$$W_k = \frac{\pi(D^4 - d^4)}{16 \times D} = \frac{\pi \times (100^4 - 15^4)}{16 \times 100} = 194858,5 \text{ mm}^3$$
$$\tau_k = \frac{M_k}{W_k} = \frac{25333}{194858,5} = 0,1 \text{ MPa}$$

Jak je vidět, krut na buben téměř ani nepůsobí a na jeho vliv není proto nutné brát ohled.

2.2. Návrh bubnu 2 ramene 2

Nyní je možné navrhnout buben 2. Ten je naražený tak, aby na něj bylo možné dobře připevnit vidlice. Proto je navržený průměr jeho drážek 85 mm. Tento buben je uložena stejně, jako buben na rameni 3 a plní stejnou funkci, proto také přenáší stejný kroutící moment o hodnotě 2500 Nmm, a jelikož je průměr bubnu 2 o několik milimetrů větší než na rameni 3,

je pro něj možné použít stejná lana a není nutné počítat jeho napětí v krutu. Vypočítaná síla v lanech je 58,8 N.

V čem se tento buben ale liší, je jeho napětí v ohybu. Jelikož na něj působí jiný ohybový moment. Tento moment je opět daný vzdáleností těžišť zásobníku, ramene 3 a griperu. Tyto vzdálenosti jsou ale závislé na úhlu natočení ramenem 3 vůči ramenu 2. Proto, aby byl robot schopný s objekty manipulovat při jakémkoliv natočení ramen bez rizika jeho poškození, je počítáno s tím, že ramena svírají úhel 180° a vzdálenosti těžišť budou vždy ty maximální. Na základě toho je možné vzdálenosti jednotlivých těžišť určit v programu Inventor a provést výpočet momentu.

Použitý vzorec:

$$\begin{aligned}M_O &= F_1 \times l_1 + F_2 \times l_2 + F_3 \times l_3 \\&= 50 \times 540 + 11,41 \times 331 + 9,71 \times 163 \\&= 32357 \text{ Nmm} = 32 \text{ Nm}\end{aligned}$$

Vnitřní rozměry bubnu jsou navrženy totožně s bubnem na rameni 3. Proto lze rovnou provést výpočet napětí.

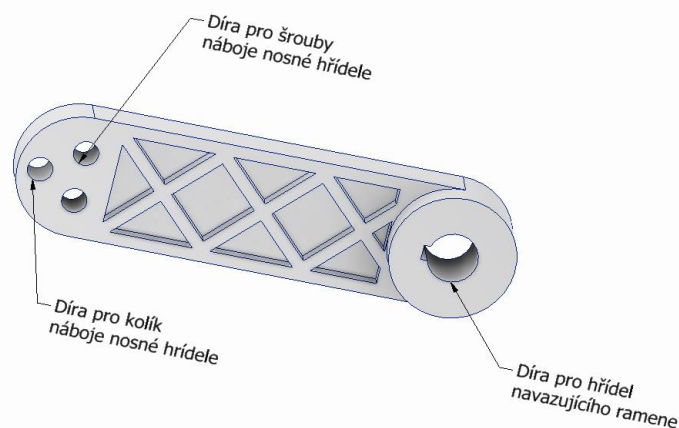
Použité vzorce:

$$\begin{aligned}W_O &= \frac{\pi(D^4 - d^4)}{32 \times D} = \frac{\pi \times (85^4 - 37^4)}{32 \times 80} = 61760 \text{ mm}^3 \\ \sigma_o &= \frac{M_O}{W_O} = \frac{32357}{61760} = 0,5 \text{ MPa}\end{aligned}$$

Tato namáhání jsou malá, tudíž je možné použít běžný plast, ale protože je buben nosný stejně jako buben na rameni 3, je pro něj navržen stejný materiál PEEK 30% CF.

2.3.Návrh nosníků ramene 2

Poslední zásadní součástí jsou nosníky. Nosníky jsou navrženy tak, aby byla zajištěna požadovaná délka celého ramene, a aby byly robustní. Jejich vnitřky jsou žebrované pro snížení jejich hmotnosti. Kvůli tomu, že jsou spojené s hřídelí následujícího ramene perem, jsou namáhány na tlak, ale také jsou především namáhány na ohyb. Popisovaný nosník je vidět na obrázku č.45.



Obrázek 45 Nosník ramene 2

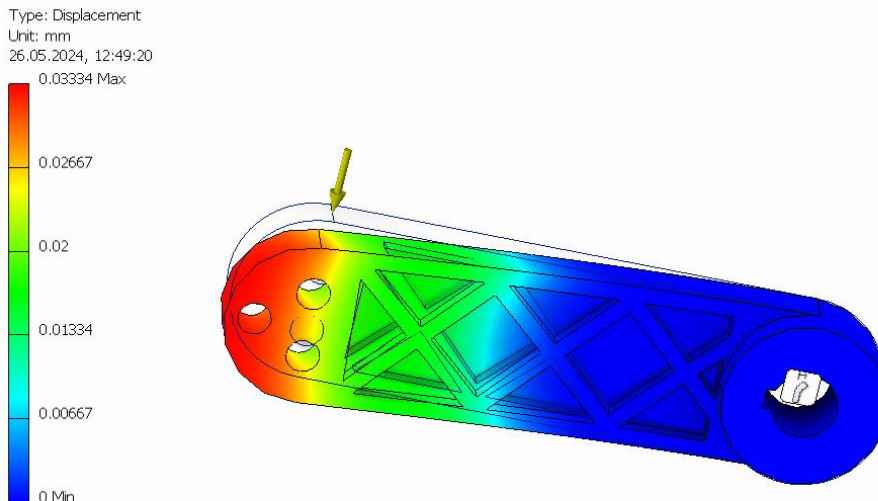
Protože je tento nosník dlouhý, lze očekávat, že bude mít velké průhyby. Proto se návrh jeho materiálu řídí podle hodnoty tohoto průhybu. Z toho důvodu je navrženým materiálem hliník 6061. Kvůli jeho žebrování je jeho průhyb zjištěn pomocí FEM výpočtu v programu Inventor. Vstupní podmínka tohoto výpočtu je síla působící na konci vyvolaná momentem působícím na jeden nosník, jehož délka je 148 mm. Postup výpočtu je stejný jako u předchozích simulací. Výsledná síla na konci jednoho nosníku vypadá následovně.

Použitý vzorec:

$$\begin{aligned} M &= F_1 \times l_1 + F_2 \times l_2 + F_3 \times l_3 + F_4 \times l_4 \\ &= 50 \times 740 + 11,41 \times 531 + 9,73 \times 363 + 30 \times 216 \\ &= 53077 \text{ Nmm} = 53 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$F = \frac{M}{2 \times l_{\text{nosníku}}} = \frac{53077}{2 \times 148} = 179 \text{ N}$$

Na základě této hodnoty je provede FEM výpočet, který lze vidět na obrázku číslo 46.



Obrázek 46 Výsledná deformace nosníku ramene 2

Podle výsledné hodnoty průhybu 0,03334 mm je stanoveno, že materiál vyhovuje.

Jelikož je již zjištěno, že navržený nosník vyhovuje ohybovému zatížení, není nutné počítat jeho napětí v ohybu a stačí zkontrolovat jeho otláčení v drážce pro pero. Pro kontrolu otláčení je nutné znát průměr díry, délky pera a hloubku drážky. Navržený průměr díry je 20 mm a z toho vyplývá hloubka drážky 2,5 mm. Délka drážky nosníku s menší šířkou je 11,6 mm. Výpočet otláčení je proveden takto.

Použité vzorce:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\frac{2 \times M_k}{d}}{a \times b} = \frac{\frac{2 \times 26538}{20}}{15 \times 2,5} = 71 \text{ MPa}$$

Zjištěná hodnota napětí je poměrně vysoká, ale při použití hliníku 6061, který má pevnost v tlaku 150 MPa, je dosažena dostatečná bezpečnost, a proto ho je stále možné použít. Po kontrole otláčení nosníků je návrh všech důležitých částí ramene 3 dokončen.

2.4. Souhrn sestavy ramene 2

Příruba a buben 2 jsou z plastu PEEK 30% CF. Nosná hřídel je navržena z oceli a její náboj z hliníku 6061. Zbylé součástky, které jsou modelované s výjimkou opěrných součástí pro kabely a ladicích desek a pojistného válce, jsou navrženy z ABS plastů. Opěrné součástky a ladicí desky pro buben 2 jsou navrženy z běžného plastu PEEK, který má poměrně vysoký modul pružnosti 4,2 GPa, aby nedocházelo k jejich velkým deformacím působením kabelů.[20] Stejný materiál je využitý i pro pojistný válec. Zbylé dvě opěrné součásti, kterými prochází lana přenášejí sílu 425 N, jsou ze stejného důvodu z hliníku. Komponenty, jako jsou šrouby a ložiska, jsou ocelové. Důležité vlastnosti sestavy jsou v [tabulce č.15](#).

Tabulka 15 Souhrn vlastností sestavy ramene 2

Délka	300 mm
Váha	3 kg
Síla přenašená lanem na bubnu 1	506 N
Síla přenašená lanem na bubnu 2	58,8 N

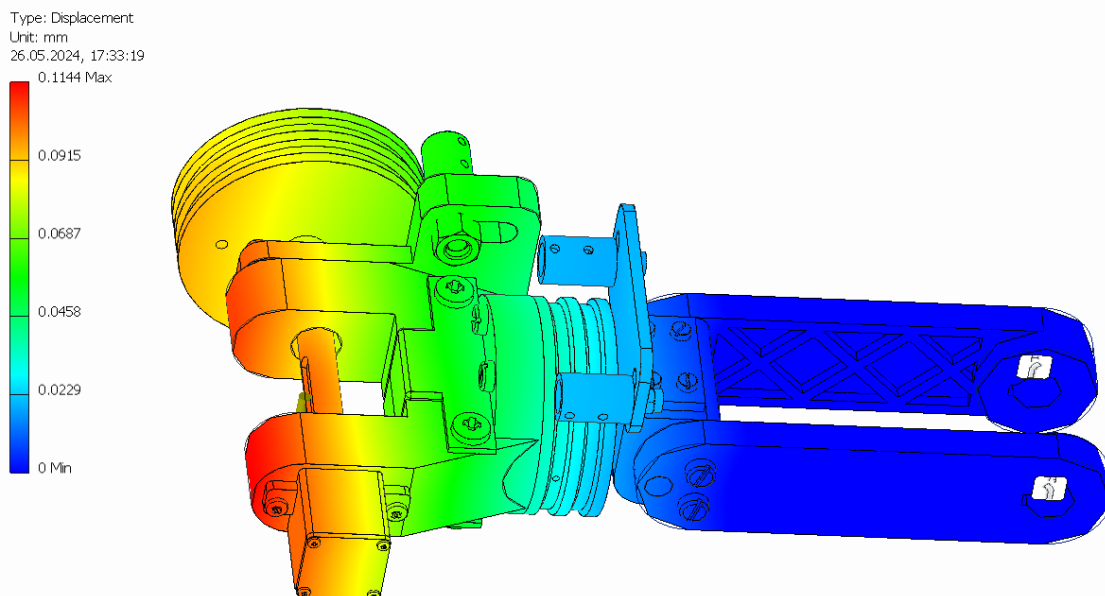
2.5. Kontrolní FEM výpočet

Pro zjištění deformací ramene 2 je opět v programu Inventor vytvořena simulace, ve které je simulováno maximální zatížení sestavy. Moment, který rameno 2 přenáší, byl již zjištěn při návrhu jeho nosníku, a proto je možné vypočítat sílu, která působí na hřídeli ramene. Výpočet je následující.

Použitý vzorec:

$$F = \frac{M}{l_{\text{nosniku}}} = \frac{53077}{300} = 177 \text{ N}$$

Výsledek výpočtu FEM na základě této vstupní podmínky je vidět na [obrázku č.47](#).

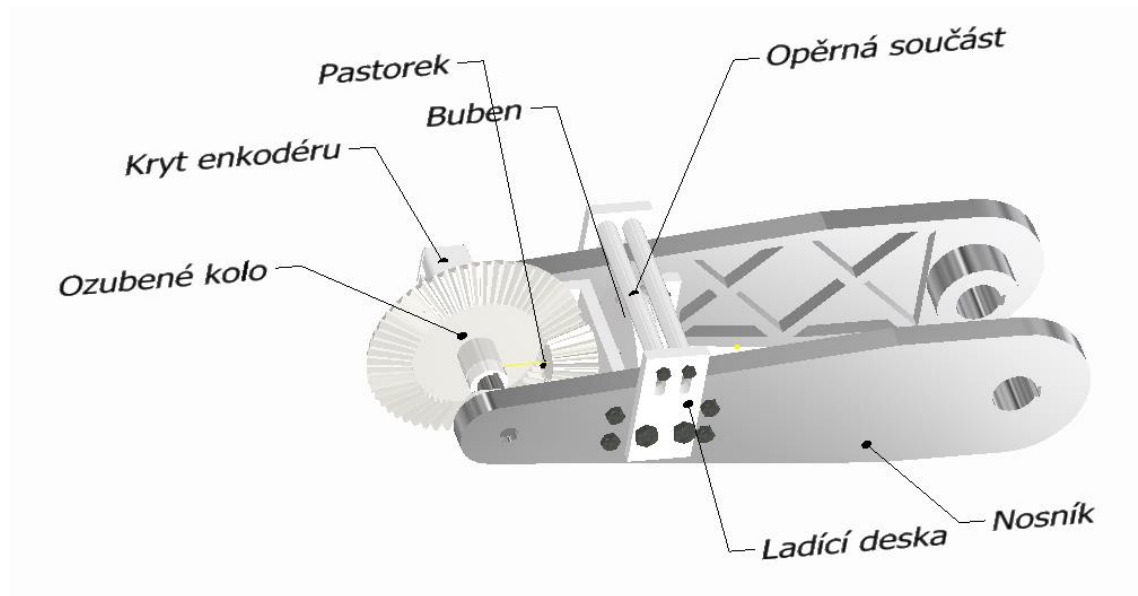


Obrázek 47 Deformace ramene 2

Z těchto simulací je vidět, že při maximálním zatížení se rameno 2 zdeformuje o 0,1144 mm.

3. Návrh navazujícího ramene 1

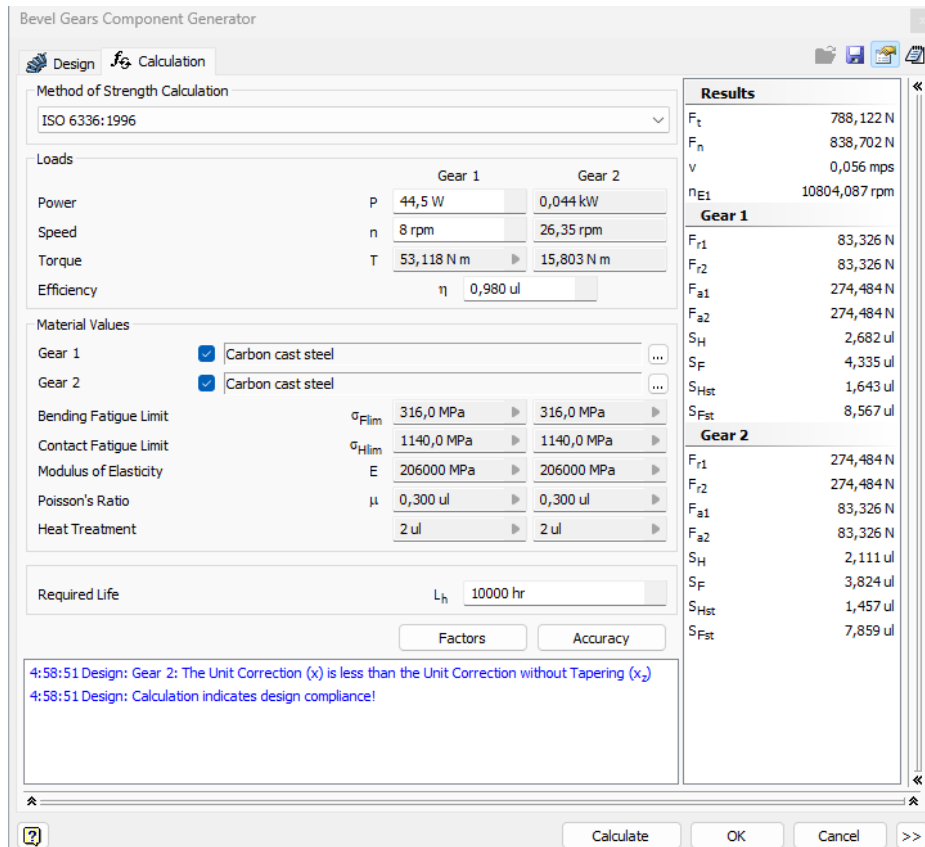
Rameno 1 je navrženo tak, že kroutící moment na hnací hřídel je přenesen pomocí pera, které na něj kroutící moment přenáší z ozubeného kola se šikmým ozubením. Toto kolo je poháněno pastorkem, který je na hřídeli a je uložen ve skříni mezi rameny. Hřídel pastorku je spojena s bubnem opět pomocí pera. Z této konstrukce jsou za nejdůležitější považovány nosníky, buben a ozubená kola. Celá sestava je vidět na obrázku 48.



Obrázek 48 Rameno 1

3.1. Návrh ozubených kol ramene 1

Ozubená kola přenášejí moment o hodnotě 53077 Nmm. Hnané ozubené kolo je navrženo s velkým roztečným průměrem, aby byla zajištěna co nejmenší potřebná hnací síla. Za stejným účelem je pastorek navrženo co nejmenší. Pro tato kola je kvůli velkému převáděnému momentu navržena uhlíková ocel se zakalenými zuby. Tato kola jsou vygenerována pomocí programu Inventor, který zároveň provádí i jejich kontrolu. Kontrola ozubení a výsledný potřebný hnací moment je možné vidět na obrázku 49.



Obrázek 49 Kontrola ozubených kol

Jediná věc, na kterou nejsou kola programem Inventor již zkontrolována, je otláčení v drážce pro pero velkého ozubeného kola. Tento výpočet ale není nutné provádět, jelikož je navržený materiál kol stejný jako hřídele a hodnoty pro výpočet jsou téměř stejné.

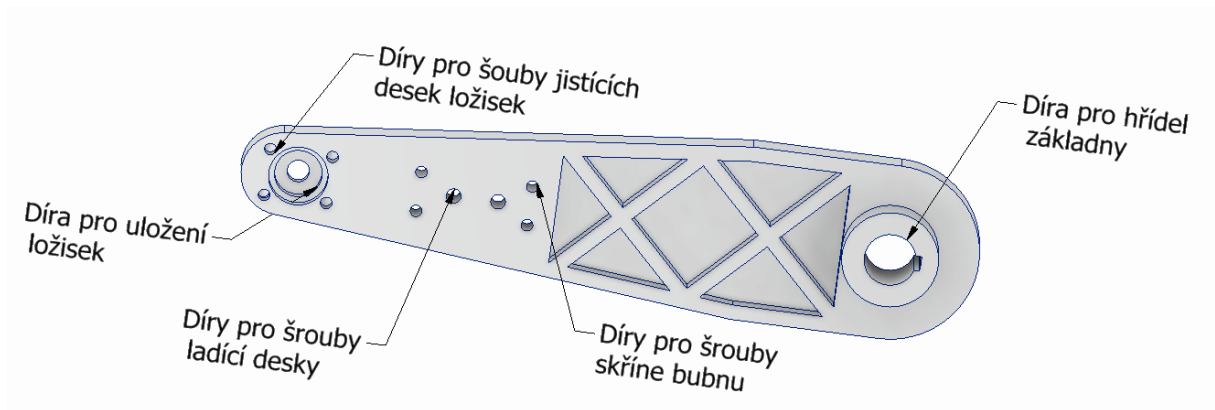
3.2. Návrh bubnu ramene 1

Navržený průměr bubnu je 100 mm, a protože je moment vyvíjený na pastorek 15803 Nmm, tak je výsledná síla na obvodu bubnu 316 N. Pro její přenos jsou opět navržena lana DIN 3055, A4 o průměru 2 mm a nosnosti 70 kg. K zajištění navinutí těchto lan opět stačí šířka drážky 5 mm a výsledná výška bubnu tedy je 31 mm.

Přenos kroutícího momentu bubnu namáhá na krut a také na otláčení, jelikož je převod na hřídel pastorku zase zajištěn perem. Ale jelikož je bubnu rozměrově stejný jako bubnu 1 navrhovaný pro rameno 2 a hodnota kroutícího momentu je u bubnu navrhovaného zde menší, není nutné počítat tato napětí a je možné rovnou navrhnout materiál, kterým je plast PEEK.

3.3. Návrh nosníků ramene 1

Poslední zásadní součástí jsou nosníky. Tyto nosníky jsou nejdelší ze celé sestavy robota a na ně je vyvíjena největší zátěž. Proto jsou navrženy tak, aby byly robustní a zajišťovaly požadovanou délku tohoto ramene. Na obrázku č. 50 je zobrazen jeden z těchto nosníků.



Obrázek 50 Nosník ramene 1

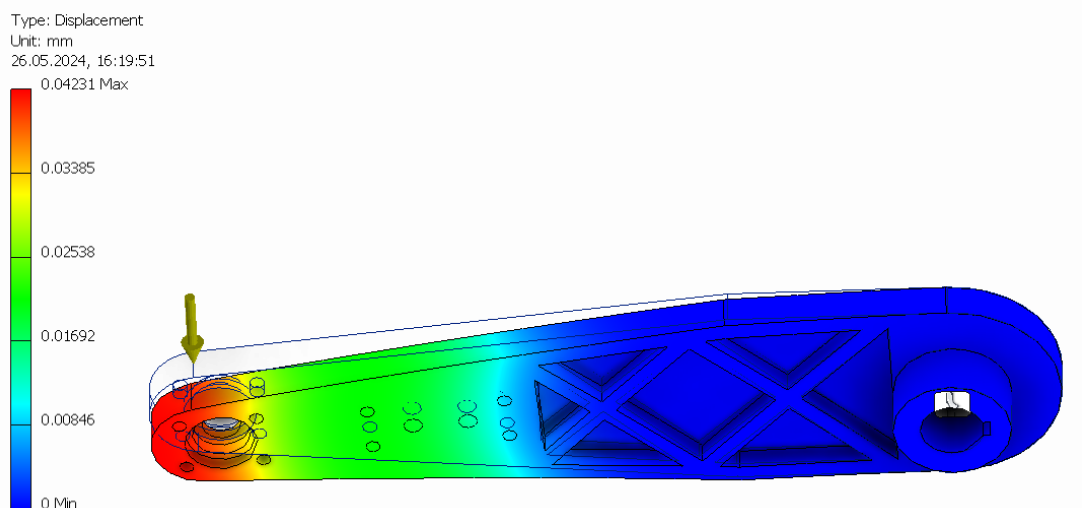
Jako jejich naražený materiál je hliník 6061. Pro jejich menší váhu jsou opět vybrán jejich vnitřek a jsou v něm vytvořeny žebra. Síla, která je vyvíjena na konci jednoho nosníku je zjištěna z váhy předešlých břemen a jeho vlastní, následujícími výpočty.

Použité vzorce:

$$\begin{aligned} M &= F_1 \times l_1 + F_2 \times l_2 + F_3 \times l_3 + F_4 \times l_4 + F_5 \times l_5 \\ &= 50 \times 1140 + 11,41 \times 931 + 9,74 \times 763 + 30 \times 616 + 100 \times 217 \\ &= 115250 \text{ Nmm} = 115 \text{ Nm} \end{aligned}$$

$$F = \frac{M}{2 \times l_{\text{ramene } 1}} = \frac{115250}{2 \times 400} = 144 \text{ N}$$

Na základě této hodnoty je opět proveden FEM výpočet, jehož výsledek je na obrázku č.51. 51.



Obrázek 51 Deformace nosníku ramene 1

Podle vypočítané hodnoty průhybu, která je 0,04231, je možné určit, že materiál vyhovuje.

Po návrhu materiálu je ještě provedena kontrola na otláčení. Průměr díry je 35 mm, a tudíž výška drážky je 3,3 mm. Délka drážky je 21 mm. Výpočet otláčení vypadá následovně.

Použitý vzorec:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{2 \times M_k}{a \times b} = \frac{2 \times 57625}{21 \times 3,3} = 48 \text{ MPa}$$

Navržený materiál pro dané namáhání v tlaku vyhovuje.

3.4. Souhrn sestavy ramene 1

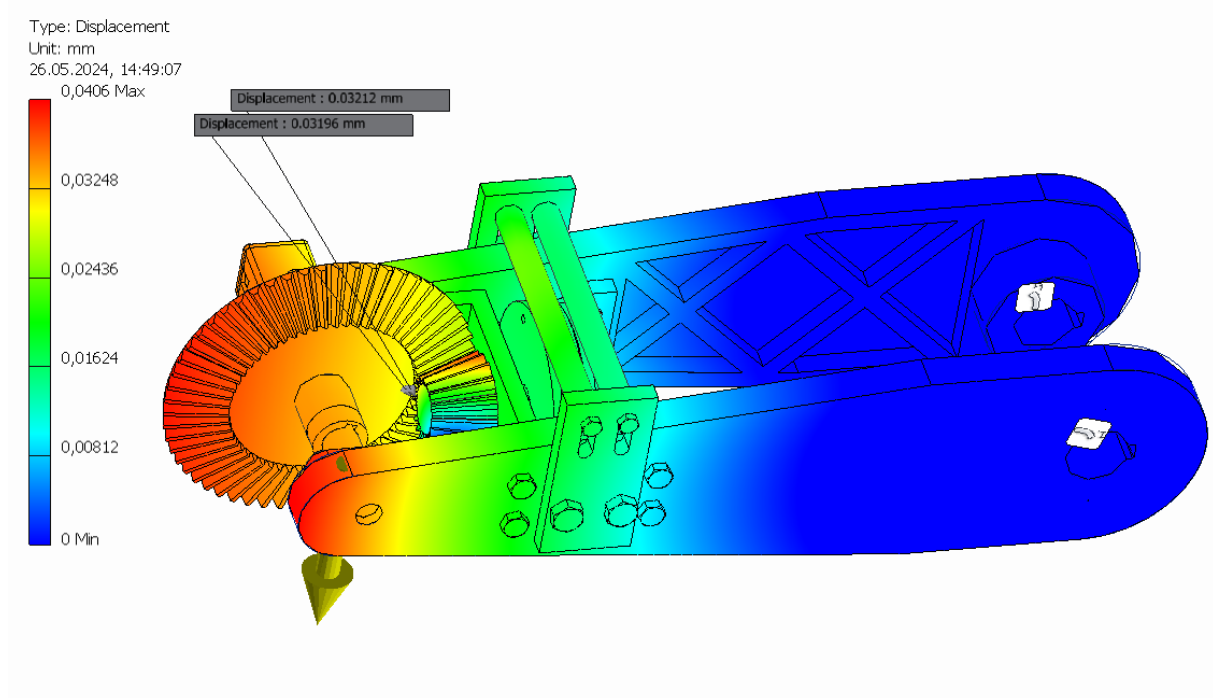
Většina ostatních součástí až na ladící desky a opěrné válce je ocelová. Ladící desky a opěrné součástky jsou navrženy z PEEK plastu. Opěrné součástky jsou v případě ramene 1 uloženy pomocí dvou ladících desek, aby bylo zabráněno jejich průhybu. Podstatné vlastnosti jako hmotnost, délka a moment pro pohon bubnu jsou v tabulce č.16.

Tabulka 16 Souhrn vlastností sestavy ramene 1

Délka	400 mm
Váha	10 kg
Síla přenašená lanem	316 N

3.5. Kontrolní FEM výpočet

Pro zjištění, jak se celá sestava ramene zdeformuje je opět provedena simulace v programu Inventor. Na obrázku 52 jsou vidět výsledky simulace.



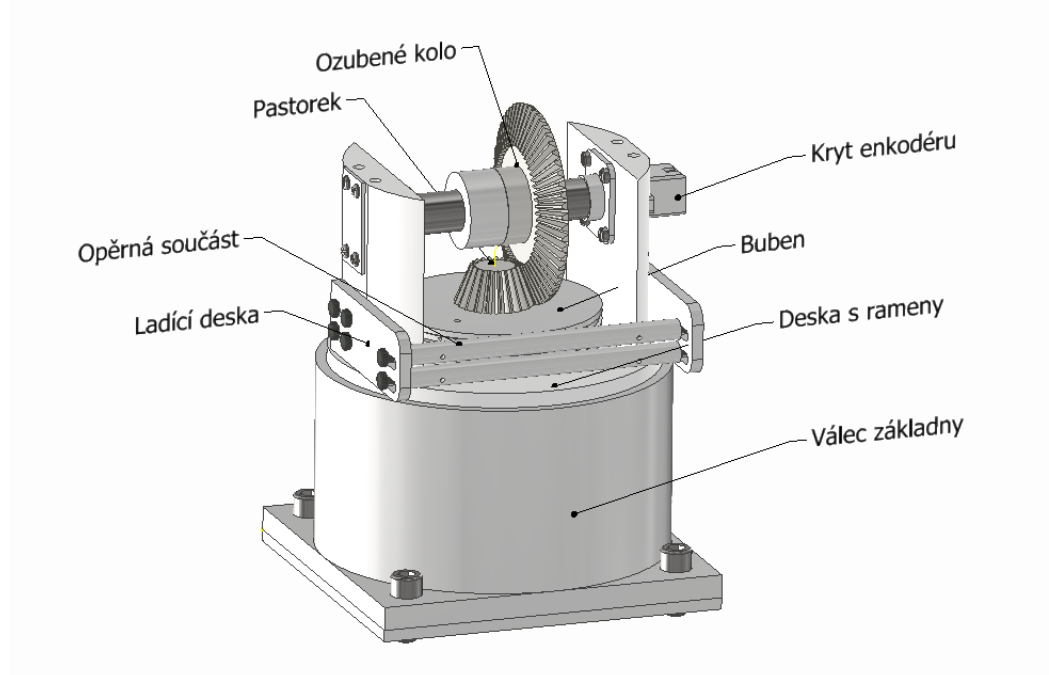
Obrázek 52 Deformace ramene 1

Jak je vidět ze simulace, maximální deformace ramene je 0,0406 mm. Ovšem zde je také podstatná deformace zubu v záběru, která může narušit funkčnost převodu. Zde je pomocí

sondy zjištěno, že zuby v záběru se vůči sobě posunou o 0,00006 mm, což je přijatelná hodnota. Určením velikostí deformace je návrh ramene 1 ukončen a je možné provést návrh základny.

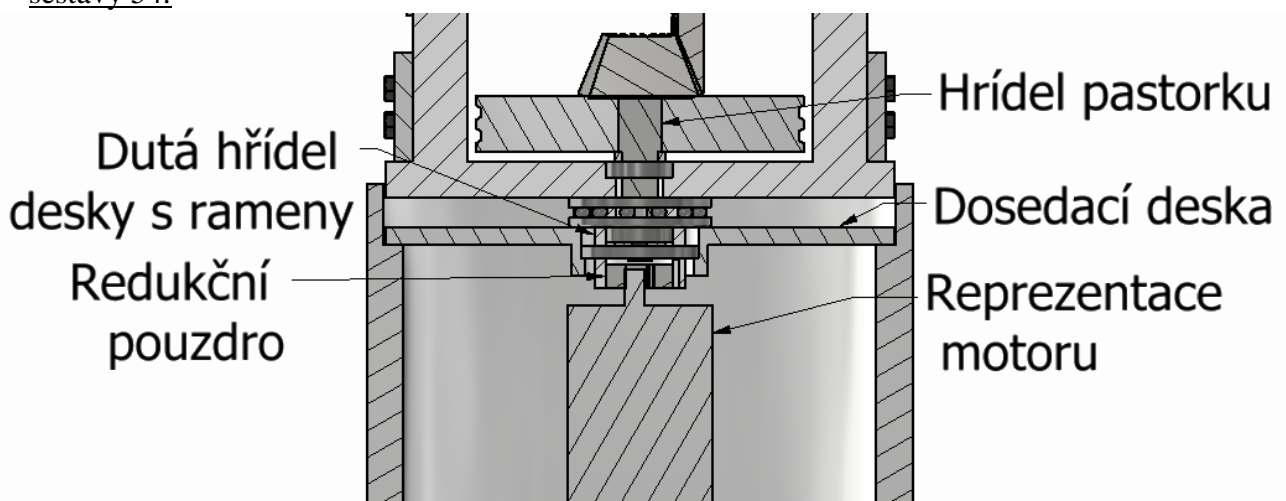
4. Návrh základny

Základna je navržena tak, že buben převádí perem kroučící moment na pastorek s kuželovým ozubením, který pohání druhé ozubené kolo spojené perem s hřídelí, zajišťující rotaci ramene 1. Z komponent základny jsou za zásadní považovány ozubená kola a buben. Tyto komponenty jsou vidět na obrázku 53.



Obrázek 53 Základna

To, jak je navrženy převod momentu z motoru na desku základny, je vidět na obrázku řezu sestavy 54.

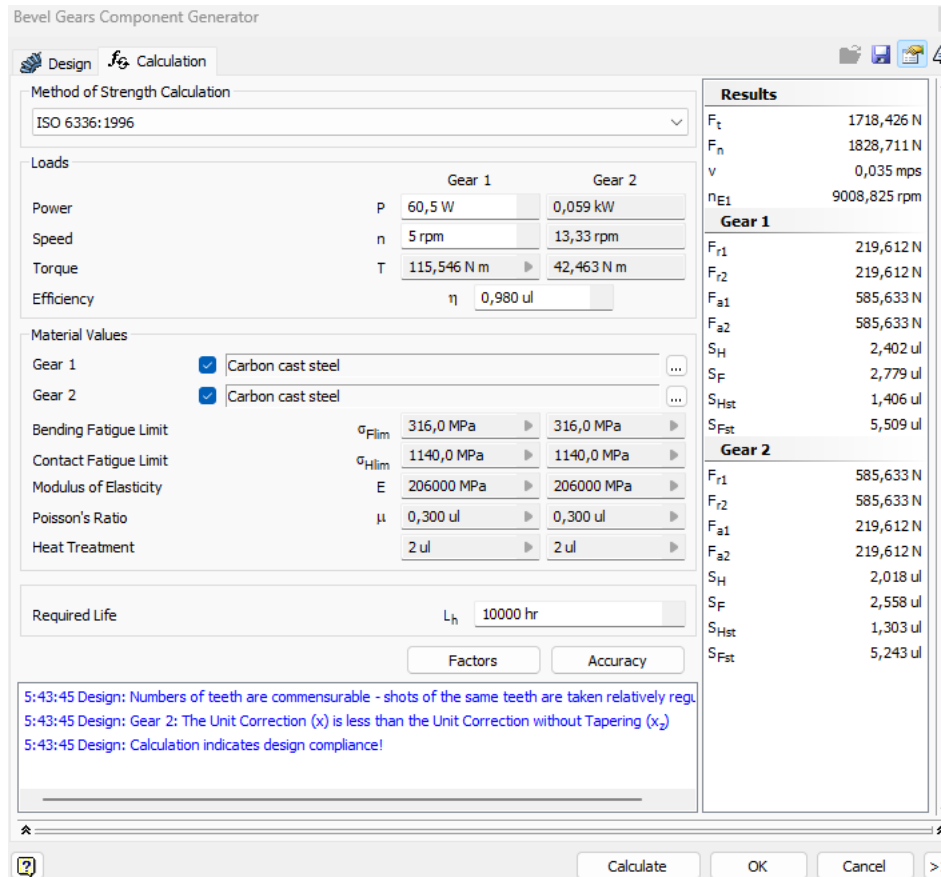


Obrázek 54 Řez základnou

Rotace základny je zajištěna tím, že hnací kroutící moment je z motoru pomocí pera a redukčního pouzdra přenášén na dutou hřídel desky s rameny, ve které je také rotačně uložena hřídel pastorku. Ze součástí základny jsou považovány za nejvíce zásadní buben, ozubená kola a hnací hřídel ramene 1.

4.1. Návrh ozubených kol základny

Jako první je popsán návrh ozubených kol. Jejich rozměry jsou navrženy tak, aby byl na buben vyvíjen co nejmenší moment a zároveň se při jeho přenosu nezničila. Ozubená kola jsou opět vygenerována pomocí programu Inventor a taky je jím zkontrolován navržený materiál. Tím je uhlíková ocel se zakalenými zuby. Výsledky jsou vidět na obrázku 55.



Obrázek 55 Výpočty oz. kol základny

Z hodnot vzešlých z analýzy z programu Inventorem je vidět, že kroutící moment na pastorku je 42,463 Nm. Velké ozubené kolo je kromě napětí v ozubení namáháno ještě na otláčení v kontaktu s perem. Pro toto napětí je třeba znát délku pera v jeho drážce a vnitřní průměr díry. Navržená délka pera je 21 mm a průměr hřídele je 35 mm. Z toho vyplývá hloubka drážky, která je 3,3 mm. Kontrola ozubených kol je provedena následovně

Použitý vzorec:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{2 \times M_k}{d} = \frac{2 \times 115250}{21 \times 3,3} = 95 \text{ MPa}$$

Protože je navržených materiálem uhlíková ocel s pevností v tlaku 720 MPa, materiál vyhovuje.

4.2. Návrh bubnu základny

Nyní zbývá navrhnout pouze buben. Ten je znovu navržen tak, aby měl co největší průměr, který může mít, aby byla co nejvíce redukována síla, kterou musí přenést lana. Navržený průměr bubnu v místě jeho drážek je 175 mm. Což při přenášeném kroutícím momentu o velikosti 42463 Nmm znamená, že obvodová síla, kterou musí přenést lana, je 486 N. Pro přenos této síly jsou zvolena lana DIN 3055, A4, o průměru 2 mm a nosnosti 70 kg. Tudiž jeho výška je navržena opět 31 mm.

Po navržení jeho rozměrů je možné spočítat jeho otláčení a zkrut. Pero jde v drážce po celé výšce bubnu a je proto 31 mm dlouhé. Průměr díry bubnu je 24 mm, a proto je hloubka drážky 2,9 mm. Otáčení je spočítáno následovně.

Použitý vzorec:

$$p = \frac{F}{S} = \frac{\frac{2 \times M_k}{d}}{a \times b} = \frac{\frac{2 \times 42463}{24}}{31 \times 2,9} = 40 \text{ MPa}$$

Po zjištění tohoto napětí je navržen materiál PEEK.

Kvůli velkému vnějšímu průměru bubnu a malému průměru díry, bude jeho namáhání krutem minimální, a proto je možné tuto kontrolu vynechat.

4.3. Souhrn sestavy základny

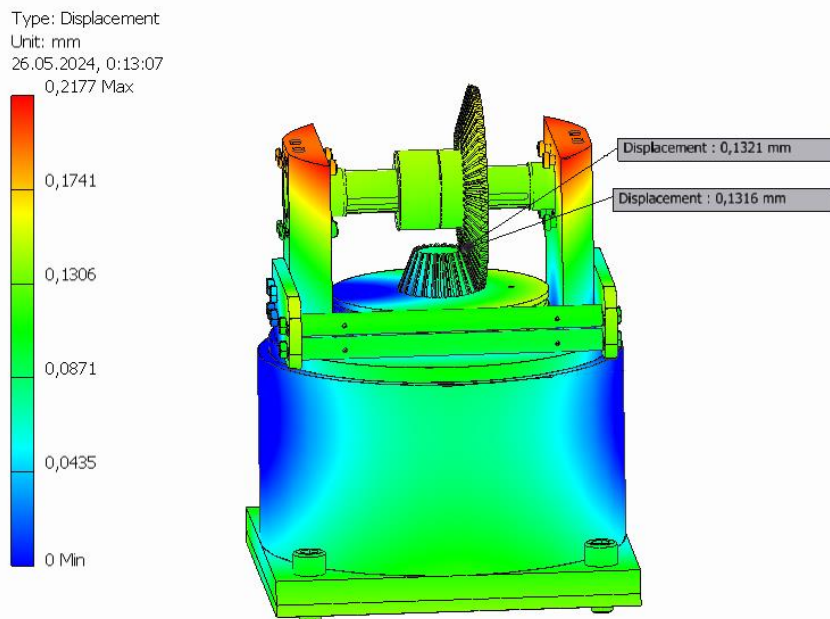
Deska základny je naražena z PEEK 30% CF a válec základny s nosnou deskou jsou navrženy z plastu PEEK. Zbylé součástky, s výjimkou šroubů a ložisek, je možné zhotovit z běžných plastů. Podstatné vlastnosti základny jsou v [tabulce č.17](#).

Tabulka 17 Souhrn vlastností základny

Váha	17 kg
Síla přenášená lanem	486 N

4.4. Kontrolní FEM výpočet

Po návrhu základny je opět možné zjistit její deformace pomocí simulace v programu Inventor. Její výsledky jsou vidět na obrázku 56.



Zde je vidět, že ruce vidlice základní desky se vychýlí o 0,23 mm, a že zuby v záběru se vůči sobě posunou o 0,0008 mm, tudíž zatížením dojde k porušení funkčnosti převodu. Po

Obrázek 56 Deformace základny

dokončení návrhu základny je pro ni ještě nutné navrhnout motor.

4.5. Návrh elektromotoru základny

Pro zajištění rotace základny kolem vlastní osy byl zvolený elektromotor. Jeho návrh závisí na potřebném kroutícím momentu a otáčkách které musí vyvinout. Ale jelikož na tuto osu není vyvíjeno žádné statické namáhání, je nutné navrhnout elektromotor z dynamických účinků, které byly doposud zanedbávány. Dynamické účinky určující požadovaný kroutící moment vyplývající z momentu setrvačnosti ramen s nejtěžším objektem. Pro výpočet tohoto momentu je nutné zjistit momenty setrvačnosti všech ramen a zásobníku a vynásobit je úhlovým zrychlením. Momenty setrvačnosti jsou zjištěné z jejich délek, vzdáleností jejich těžišť od osy rotace a jejich hmotností, které jsou známé. Pro jejich výpočet je použita Steinerova věta, která je vidět na následujícím vzorovém výpočtu, a jednotlivé vypočtené hodnoty jsou zaznamenány v tabulce 18.

Použitý vzorec:

$$[21]I_{z\acute{a}sobn\acute{i}ku} = \frac{1}{12}mL^2 + md^2 = \frac{1}{12} \times 5 \times 0,16^2 + 5 \times 1,14^2 = 6,54067\text{kg}\cdot\text{m}^2$$

Tabulka 18 Momenty setrvačnosti pro maximální vyložení ramena

Moment setrvačnosti zásobníku	6,541 kg·m ²
-------------------------------	-------------------------

Moment setrvačnosti griperu	1 kg·m ²
Moment setrvačnosti ramene 3	0,568 kg·m ²
Moment setrvačnosti ramene 2	1,2 kg·m ²
Moment setrvačnosti ramene 1	1,8 kg·m ²

Sečtením jednotlivých momentů lze získat hodnoty výsledného momentu setrvačnosti, která je 11,109 kg·m². Nyní pro výpočet potřebného momentu zbývá určit pouze úhlové zrychlení.

Jelikož to, jak rychle dokáží elektromotory dosáhnout své maximální rychlosti, je závislé na použitém motoru, který je zatím neznámý, je rychlost určena na základě předpokladu, že při maximálním napnutí ramen je požadované rychlosti na jejím konci dosaženo za jednu sekundu. Tudíž zrychlení ve vzdálenosti 1060 mm od osy základny je 0,5 m/s². Z tohoto předpokladu lze vypočítat úhlové zrychlení robota a z něj poté hledaný moment. Výpočet vypadá takto.

Použité vzorce:

$$\alpha = \frac{a}{r} = \frac{0,5}{1,06} = 0,471 \text{ rad/s}^2$$

$$M = I \times \alpha = 11,109 \times 0,471 = 5,23 \text{ Nm}$$

Jelikož je vypočítaný moment poměrně malý, není pro realizaci zajištění rotace elektromotorem nutné použít převod a je možné rovnou navrhnout motor. Pro jeho určení je ještě nutné vypočítat otáčky. Otáčky jsou opět zjištěny z požadavku na rychlost pohybu koncového bodu robota pomocí vzorce.

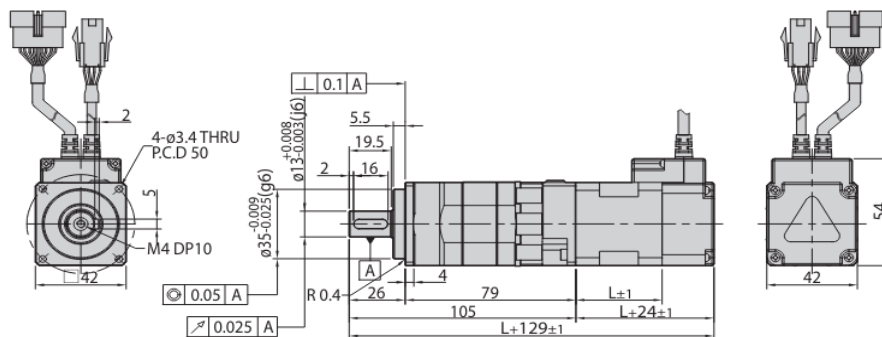
Použité vzorce:

$$n_z = \frac{60 \times v_z}{2 \times \pi \times r_{robotu}} = \frac{60 \times 0,5}{2 \times \pi \times 1,060} = 4,5 \text{ ot/min}$$

Nyní jsou známy všechny řídicí podmínky a je možné motor navrhnout. Při volbě vhodného motoru, kromě požadavku na potřebný kroučící moment a otáček, je také brán ohled na jeho rozměry, aby nevznikaly konstrukční problémy při řešení jeho uložení. Na jeho váhu už není nutné brát tak velký ohled, ale menší váha je výhodnější. Navrženým elektromotorem je motor s planetovou převodovkou Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN40. Tento motor v sestavě s převodovkou dokáže vyvinout kroučící moment o velikosti 7,36 Nm a rychlost otáček 75 ot/m a váží 0,92 kg. Jeho specifické rozměry, kterými je nutné se řídit při řešení jeho uložení, jsou vidět na obrázku 57.

Unit Part Number	Motor	Stage	□ Reduction Gear Ratio	L Length [mm]
Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN□	EzM-42S-■-PN□	Double Stage	15, 25, 40, 50	34
Ezi-SERVO-PR-42M-■-PN□	EzM-42M-■-PN□		15, 25, 40, 50	40
Ezi-SERVO-PR-42L-■-PN□	EzM-42L-■-PN□		15, 25, 40, 50	48
Ezi-SERVO-PR-42XL-■-PN□	EzM-42XL-■-PN□		15, 25, 40, 50	60

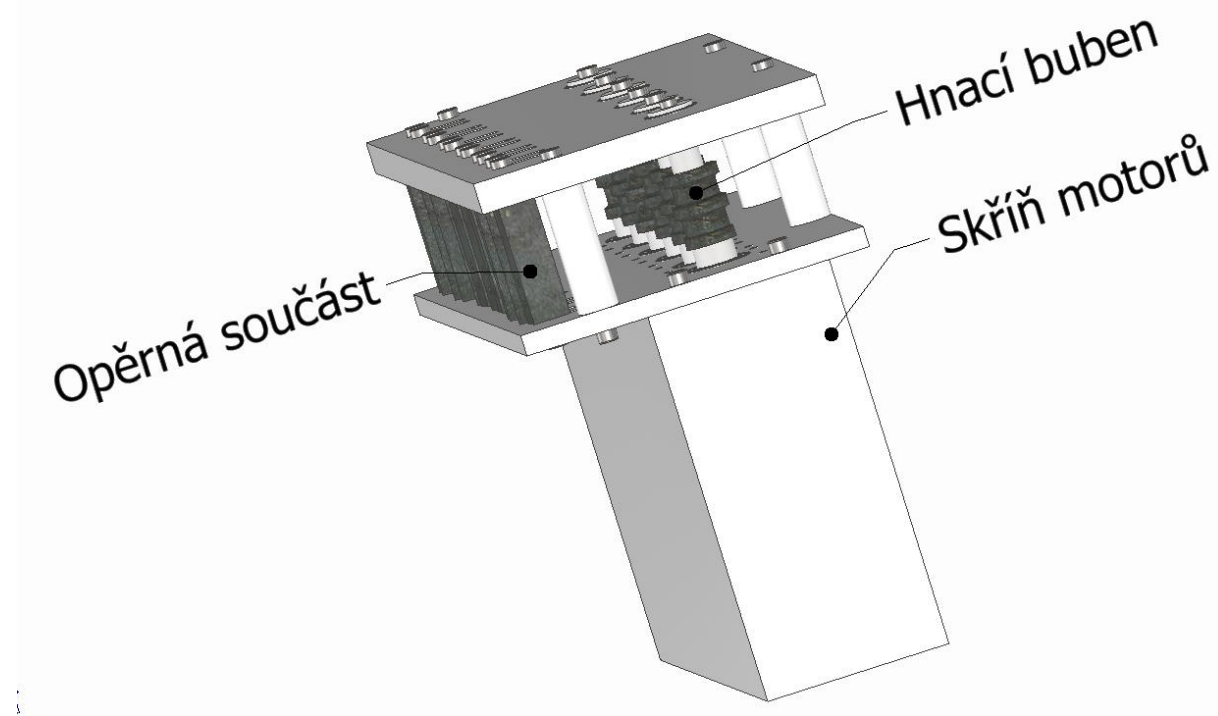
* The code of encoder resolution will be marked in "■"



Obrázek 57 Rozměry motoru základny [22]

5. Návrh pohonného ústrojí převodní skříně

Po dokončení návrhu samotného robota je ještě nutné zajistit Bowdenovy převody na jeho motorech. Pro uložení motorů je navržena skříň, kde jsou upevněny a jejich hřídele jsou spojeny pomocí redukčních hřídelů, na kterých jsou bubny. Z této sestavy jsou za zásadní považovány bubny. Sestava je vidět na obrázku 58.



Obrázek 58 Převodní skříň

Návrh průměrů bubnů závisí na požadovaných silách a rychlostech, které musí lana vyvíjet, a na krouticím momentu a otáčkách motorů, které bubny pohání. Jelikož je snaha o to, aby celá pohonná sestava nebyla příliš velká a bylo ji možné snadno uložit na pojízdnou platformu, jsou průměry bubnů navrhovány tak, aby byly co nejmenší, stejně jako motory, které je pohání. Proto je nutné nejprve určit potřebné otáčky hnaných bubnů a síly v příslušných lanech, aby bylo možné provést návrh těchto průměrů. Síly v lanech jsou vyčteny z již předchozích návrhů a zapsány do tabulky č. 19, kde jsou přiřazeny k jednotlivým částem, jejichž pohyb zajišťují.

Tabulka 19 Hodnoty sil v lanech

Lano ramene 1	486 N
Lano ramene 2	316 N
Lano ramene 2, rotace kolem své osy	58,8 N
Lano ramene 3	506 N
Lano ramene 3 rotace kolem své osy	62,5 N
Lano griperu	100 N

Pro zjištění otáček hnaných bubnů je nutné provést jejich výpočet z požadavku na rychlost jejich pohybu a délky ramen se kterými hýbou. Hodnota požadavku na rychlost pohybu konců ramen je 0,5 m/s. Pro rychlost pohybů griperu se bere, že je požadavek na rychlost

pohybu konců hnacích pák 0,1 m/s. U ramen, které konají rotační pohyb se zase bere, že požadavek na rychlost je vztažen na obvody jejich bubnů. Na základě těchto hodnot lze provést výpočty otáček všech bubnů kromě bubnů ramen 1 a 2, jelikož jsou otáčky bubnů a ramene převáděny ozubenými koly. Proto je nutné zjištěné otáčky ramen vydělit převodovým poměrem jednotlivých kol. Tyto poměry jsou zjištěné z tabulek parametrů kol v programu Inventor. Převodový poměr pro rameno 1 je 0,375 a pro rameno 2 0,3036. Nyní je možné provést hodnot je možné provést následující výpočty.

Použité vzorce:

$$n_{r1} = \frac{60 \times v}{2 \times \pi \times l_{r1}} \times \frac{1}{0,375} = \frac{60 \times 0,5}{2 \times \pi \times 0,4} \times \frac{1}{0,375} = 31,8 \text{ ot/min}$$

$$n_{r2} = \frac{60 \times v}{2 \times \pi \times l_{r1}} \times \frac{1}{0,3036} = \frac{60 \times 0,5}{2 \times \pi \times 0,3} \times \frac{1}{0,3036} = 39,3 \text{ ot/min}$$

$$n_{r2osa} = \frac{60 \times v}{2 \times \pi \times r_{bubnu \ v \ ose \ r2}} = \frac{60 \times 0,5}{2 \times \pi \times 0,045} = 106 \text{ ot/min}$$

$$n_3 = \frac{60 \times v}{2 \times \pi \times l_{r3}} = \frac{60 \times 0,5}{2 \times \pi \times 0,36} = 13,26 \text{ ot/min}$$

$$n_{r3osa} = \frac{60 \times v}{2 \times \pi \times r_{bubnu \ v \ ose \ r3}} = \frac{60 \times 0,5}{2 \times \pi \times 0,04} = 119 \text{ ot/min}$$

$$n_g = \frac{60 \times v}{2 \times \pi \times l_{tyčí}} = \frac{60 \times 0,1}{2 \times \pi \times 0,07} = 13,6 \text{ ot/min}$$

S určenými hodnotami otáček je možné přejít ke katalogům a zjistit parametry motorů. Z katalogů jsou zjištěny hodnoty momentů a otáček. Z otáček motorů jsou počítány minimální průměry hnacích bubnů, které dokážou vyvolat potřebné otáčky na hnaných bubnech. Z momentů jsou zase zjišťovány maximální průměry hnacích bubnů, při kterých je možné dosáhnout požadované síly v lanech na jejich obvodech. Tímto způsobem je hledán konstrukčně realizovatelný průměr bubnu pro co nejmenší motory. Vzorec pro hledání průměru bubnů z otáček vychází z toho, že poměr průměrů hnacího a hnaného bubnu je jejich převodový poměr. Postup tohoto výpočtu vypadá takto.

Použité vzorce:

$$d_{r1hnací \ min} = \frac{n_{r1} \times d_{r1hnaný}}{n_{motoru}} = \frac{31,8 \times 175}{375} = 14,84 \text{ mm}$$

$$d_{r1hnací \ max} = \frac{2 \times M_{motoru}}{F_{lana \ r1}} = \frac{2 \times 5400}{486} = 22 \text{ mm}$$

Z toho vyplývá že je při návržení bubnu o velikosti 22 mm je možné použít servomotor Ezi-SERVO-PR-56M-■-PN8. Jelikož může být buben i menší je jeho navržený průměr 22 mm.

Postup pro návrh ostatních motorů je stejný a v [tabulce č.20](#) jsou vypsané navržené průměry a motory. Hodnoty momentů a otáček motorů jsou na obrázcích [č.59](#) a [60](#).

Tabulka 20 Průměry hnacích bubnů a motory[22]

Hnací buben ramene 1	22 mm	Ezi-SERVO-PR-56M-■-PN8.
Hnací buben ramene 2	22 mm	Ezi-SERVO-PR-56M-■-PN8
Hnací buben ramene 2, rotace kolem své osy	19 mm	Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN3

Hnací buben ramene 3	22 mm	Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN25
Hnací buben ramene 3 rotace kolem své osy	22 mm	Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN5
Hnací buben griperu	19 mm	Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN5

42mm

Unit Part Number	Maximum Holding Torque [N·m]	Rotor Inertia Moment [kg·m ²]	Back-lash [min]	Angle Trans-mission Error [min]	Re-duction Gear Ratio	Resolution (10,000 [ppr] Standard)	Permitted Torque [N·m]	Maximum Torque [N·m]	Permitted Speed Range [rpm]	Unit Weight [kg]	Permitted Overhung Load [N] Axis Center Standard	Permitted Thrust Load [N]
Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN3	0,57	35x10 ⁻⁷	3	5	3	0,012°	6	12	0~1000	0,76	240	270
Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN5	0,95				5	0,0072°	9	18	0~600		290	330
Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN8	1,52				8	0,0045°	9	18	0~375		340	410
Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN10	1,90				10	0,0036°	6	12	0~300		360	450
Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN15	2,76	5	7	7	15	0,0024°	6	12	0~200	0,92	410	540
Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN25	4,60				25	0,00144°	9	18	0~120		490	640
Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN40	7,36				40	0,0009°	9	18	0~75		570	640
Ezi-SERVO-PR-42S-■-PN50	9,00				50	0,00072°	9	18	0~60		620	640

Obrázek 60 Parametry menších motorů [22]

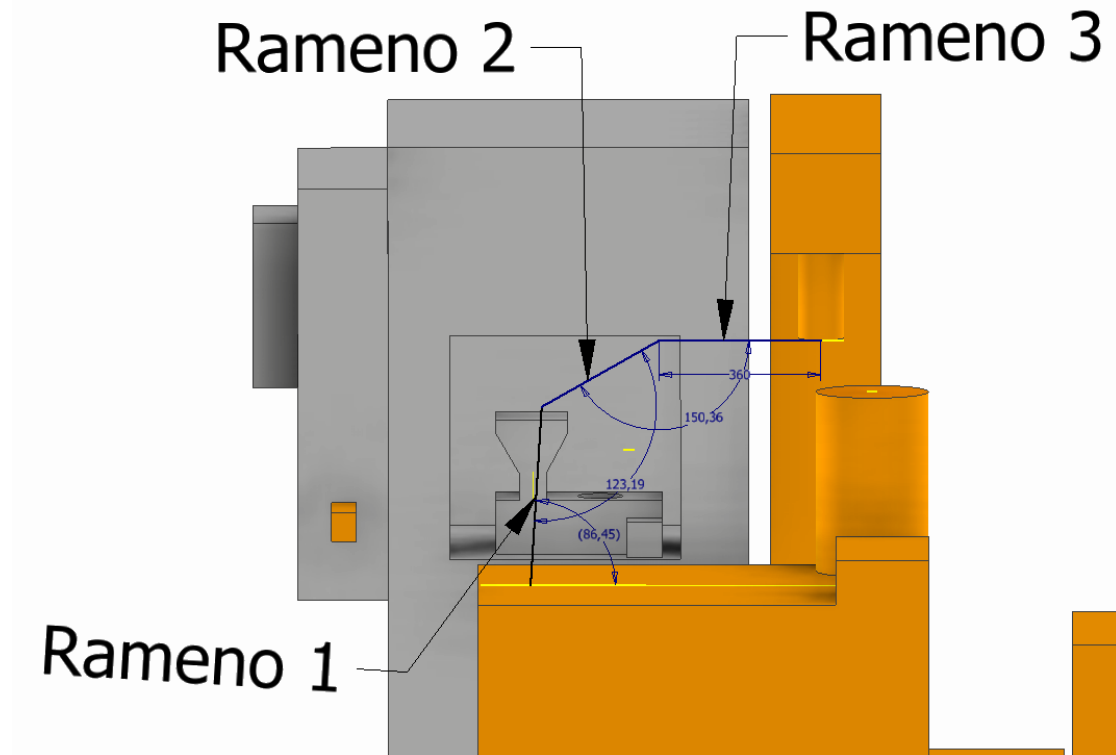
56mm

Unit Part Number	Maximum Holding Torque [N·m]	Rotor Inertia Moment [kg·m ²]	Back-lash [min]	Angle Trans-mission Error [min]	Re-duction Gear Ratio	Resolution (10,000 [ppr] Standard)	Permitted Torque [N·m]	Maximum Torque [N·m]	Permitted Speed Range [rpm]	Unit Weight [kg]	Permitted Overhung Load [N] Axis Center Standard	Permitted Thrust Load [N]		
Ezi-SERVO-PR-56S-■-PN3	1,1	180x10 ⁻⁷	3	5	3	0,012°	18	35	0~1000	1,75	430	310		
Ezi-SERVO-PR-56S-■-PN5	1,9				5	0,0072°	27	50	0~600		510	390		
Ezi-SERVO-PR-56S-■-PN8	3,0				8	0,0045°	27	50	0~375		600	480		
Ezi-SERVO-PR-56S-■-PN10	3,8				10	0,0036°	18	35	0~300		640	530		
Ezi-SERVO-PR-56S-■-PN15	5,5				2,06	7	7	15	0,0024°	18	35	0~200	740	630
Ezi-SERVO-PR-56S-■-PN25	9,3							25	0,00144°	27	50	0~120	870	790
Ezi-SERVO-PR-56S-■-PN40	14,9							40	0,0009°	27	50	0~75	1000	970
Ezi-SERVO-PR-56S-■-PN50	18,6							50	0,00072°	27	50	0~60	1100	1100
Ezi-SERVO-PR-56M-■-PN3	2,0	280x10 ⁻⁷	3	5	3	0,012°	18	35	0~1000	1,93	430	310		
Ezi-SERVO-PR-56M-■-PN5	3,4				5	0,0072°	27	50	0~600		510	390		
Ezi-SERVO-PR-56M-■-PN8	5,4				8	0,0045°	27	50	0~375		600	480		
Ezi-SERVO-PR-56M-■-PN10	6,8				10	0,0036°	18	35	0~300		640	530		
Ezi-SERVO-PR-56M-■-PN15	9,9				15	0,0024°	18	35	0~200		740	630		

Obrázek 59 Parametry větších motorů [22]

Po stanovení průměru bubnu je možné navrhnout jejich ostatní rozměry. Pro návržení šířky a hloubky drážek bubnů je nejprve nutné zjistit jaká délka lana se na ně musí navinout. K zjištění toho je použito modelu pracoviště, kde byly vytvořeny drátové kostry, při hledání ideální délky ramen robotu v určitých pozicích. V jednotlivých pozicích jsou změřeny vzájemné úhly natočení ramen a jsou zjištěny minima a maxima těchto úhlů, které jsou od sebe

odečteny. Čímž je stanoven potřebný rozsah natočení ramen. Podle tohoto rozsahu jsou následovně zjištěny délky lana, které se musí na bubny v ramenech navinout a odvinou pomocí výpočtu velikosti oblouku obvodu bubnu daného potřebným úhlem natočení. Na obrázku č.61 je vidět jedno z těchto měření. Pro ramena, která konají rotaci kolem svých os, je jako potřebný úhel otočení bráno 360°. A pro griper je bráno jako potřebné natočení 90°.



Obrázek 61 Měření úhlů natočení ramen pro výpočet bubnových komponent

Zjištěné rozsahy pohybů jsou zaznamenané v tabulce č.21.

Tabulka 21 Hodnoty otočení ramen

Rotace ramena 1	44°
Rotace ramena 2	109°
Rotace ramene 2 kolem vlastní osy	360°
Rotace ramena 3	62°
Rotace ramene 3 kolem vlastní osy	360°
Rotace na griperu	90°

Jelikož jsou ale na zajištění rotace ramena 1 a ramena 2. Použity převody je nutné otočení jejich bubnů převést. Převodový poměr mezi koly ramene 1 je 0,375 a ramene 2 0,3036. Natočení jejich bubnů je zjištěno následovně.

Použité vzorce:

$$\beta_1 = \frac{\beta}{i_1} = \frac{62}{0,375} = 165,3^\circ$$

$$\beta_2 = \frac{\beta}{i_2} = \frac{109}{0,3036} = 359^\circ$$

Po převodu jsou známy úhly otočení všech bubnů a je možné vypočítat příslušné délky lan. Zde je uvedený vzorový výpočet a jednotlivé délky jsou v tabulce č.22.

Použitý vzorec:

$$l_1 = \frac{\pi}{360} \times \beta_1 \times d_1 = \frac{\pi}{360} \times 165,3 \times 175 = 252,4 \text{ mm}$$

Tabulka 22 Hodnoty délek lan

Lano ramena 1	252 mm
Lano ramena 2	95 mm
Lano ramene 2 kolem vlastní osy	267 mm
Lano ramena 3	54 mm
Lano ramene 3 kolem vlastní osy	251 mm
Lano na griperu	54 mm

Po zjištění potřebné navinuté délky lana je možné vypočítat kolikrát se musí na buben navinout, výpočtem délky jeho obvodu a vydělením požadované hodnoty lana výsledkem. Výpočet vypadá následovně.

Použité vzorce:

$$l_{r1} = \pi \times d_{r1} = \pi \times 22 = 69,1 \text{ mm}$$

$$\text{počet navinutí} = \frac{l_1}{l_{r1}} = \frac{252}{69,1} = 3,6 = 4$$

Počty navinutí na jednotlivé bubny jsou vypsány do tabulky č.23.

Tabulka 23 Počty navinutí

Hnací buben ramene 1	4
Hnací buben ramene 2	2
Hnací buben ramene 2, rotace kolem své osy	5
Hnací buben ramene 3	1
Hnací buben ramene 3 rotace kolem své osy	4
Hnací buben griperu	1

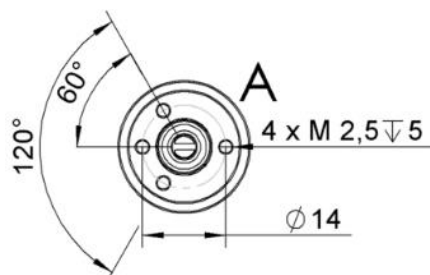
Pro zjištění délky drážky, kterou tento počet navinutí zabere, je počet navinutí vynásoben průměrem lana. Průměry lan jsou pro bubny, které rotují kolem své osy 1 mm, pro griper 1,5 mm a pro zbytek 2 mm. Největší hodnota délky drážky je 8 mm a je zvolena pro všechny bubny.

Jako poslední zbývá navrhnout materiál bubnů. Pro ně je navržen materiál ocel, aby se minimalizovaly jejich deformace a tím i výchyly v pohybu. A protože jsou namáhány malými momenty, není nutná kontrola.

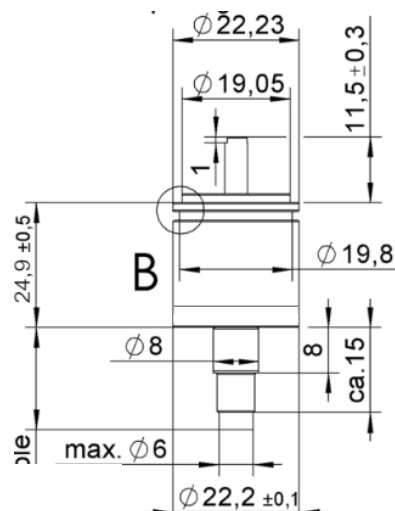
Po návrhu bubnů a motoru z katalogů jsou známy všechny rozměry a dutý kvádr pro uložení motorů je navržen tak, aby se do něj vešly motory. Jelikož zde už není váha součástí, tak podstatné opěrné součástky u bubnů jsou navrženy z kovu, aby výchyly pohybů způsobené jejich případnou deformací byly minimální. Protože tato pohonná sestava zajišťuje rozvody sil lany v kabelech, je nutné také navrhnout tyto kabely. Jelikož jsou síly v lanech velké, lze předpokládat, že bude docházet k poměrné deformaci kabelů, ve kterých vedou. Z toho důvodu jsou zde navrženy kabely z mědi, která má vyšší tuhost než běžné Bowdenovy kabely z plastu.

Celá sestava převodní skříně je umístěna v pojízdné platformě. Koncem návrhu převodní skříně motorů je celý návrh konstrukce robota hotový.

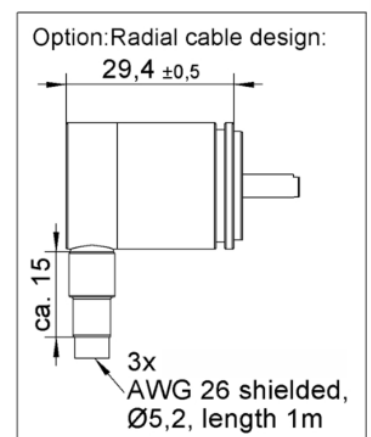
Pro tuto sestavu jsou také navrženy absolutní enkodéry. Při volbě vhodného enkodéru je nutné řídit se podle počtu otočení součásti a podle otáček. Jelikož počet otáček, které musí vykonat jednotlivá ramena robota nikdy nepřesáhne jednu a kvůli jeho malým rychlostem je možné zvolit co nejmenší enkodér, aby nebyly vysoké nároky na jeho zastavěnou plochu a neměl vysokou hmotnost. Na tomto základu je zvolený absolutní rotační enkodér ACM36-K1K0-K0. Váha tohoto enkodéru je 0,1 kg. [23] Jeho rozměry podle, kterých byly řešeny kryty enkodérů jsou obrázcích č. 62 a č.63.



Obrázek 62 Příruba enkodérů [23]

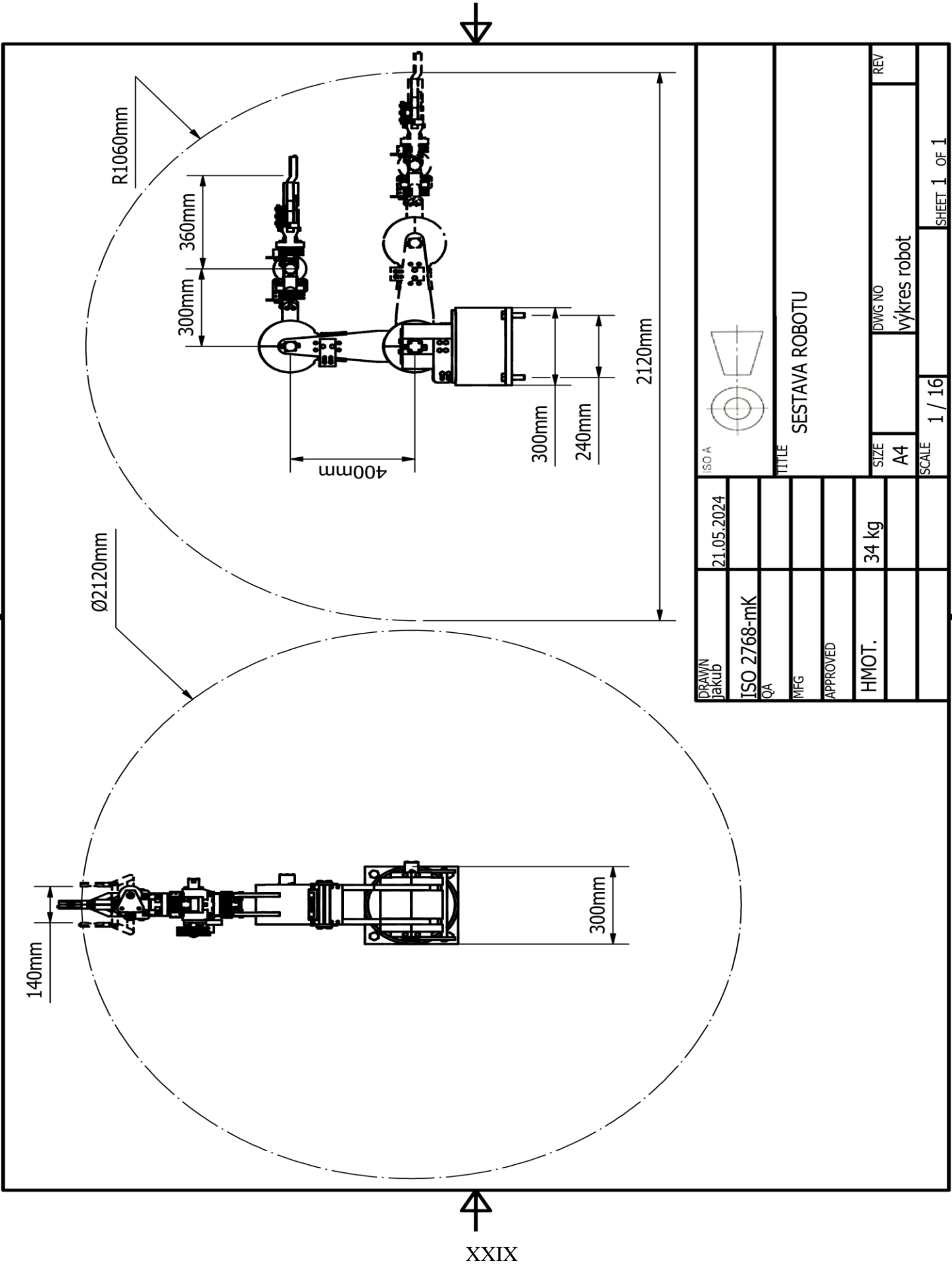


Obrázek 63 Parametry enkodéru [23]



PŘÍLOHA č. 2

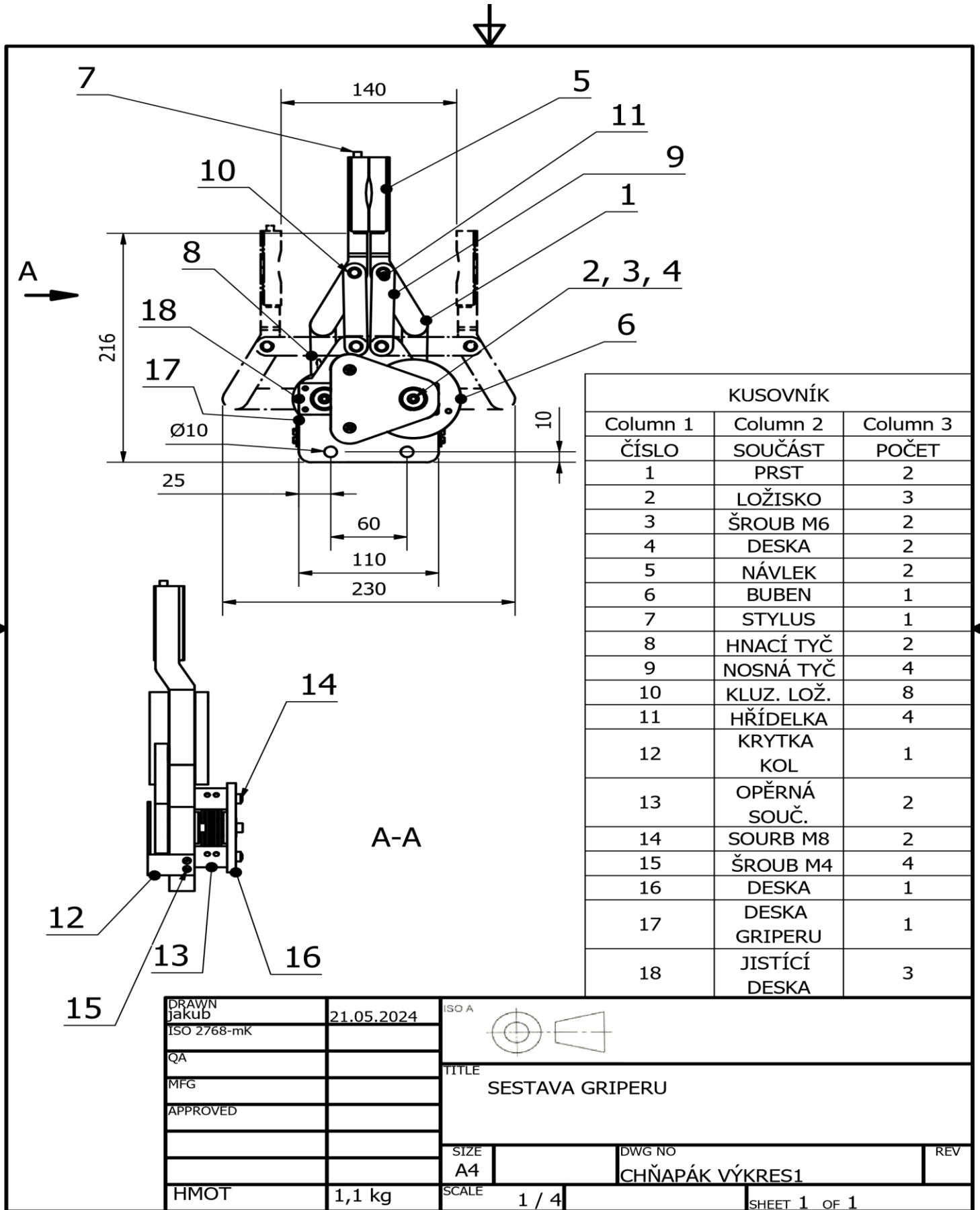
Výkres sestavy robota



ISO A	ISO 2768-mK		21.05.2024	DRAWN jakub	
TITLE	SESTAVA ROBOTU				
SIZE	A4	DWG NO	výkres robot		
SCALE	1 / 16	REV			
HMOT.	34 kg	APPROVED			
		MFG			
		QA			
		SHEET 1		OF 1	

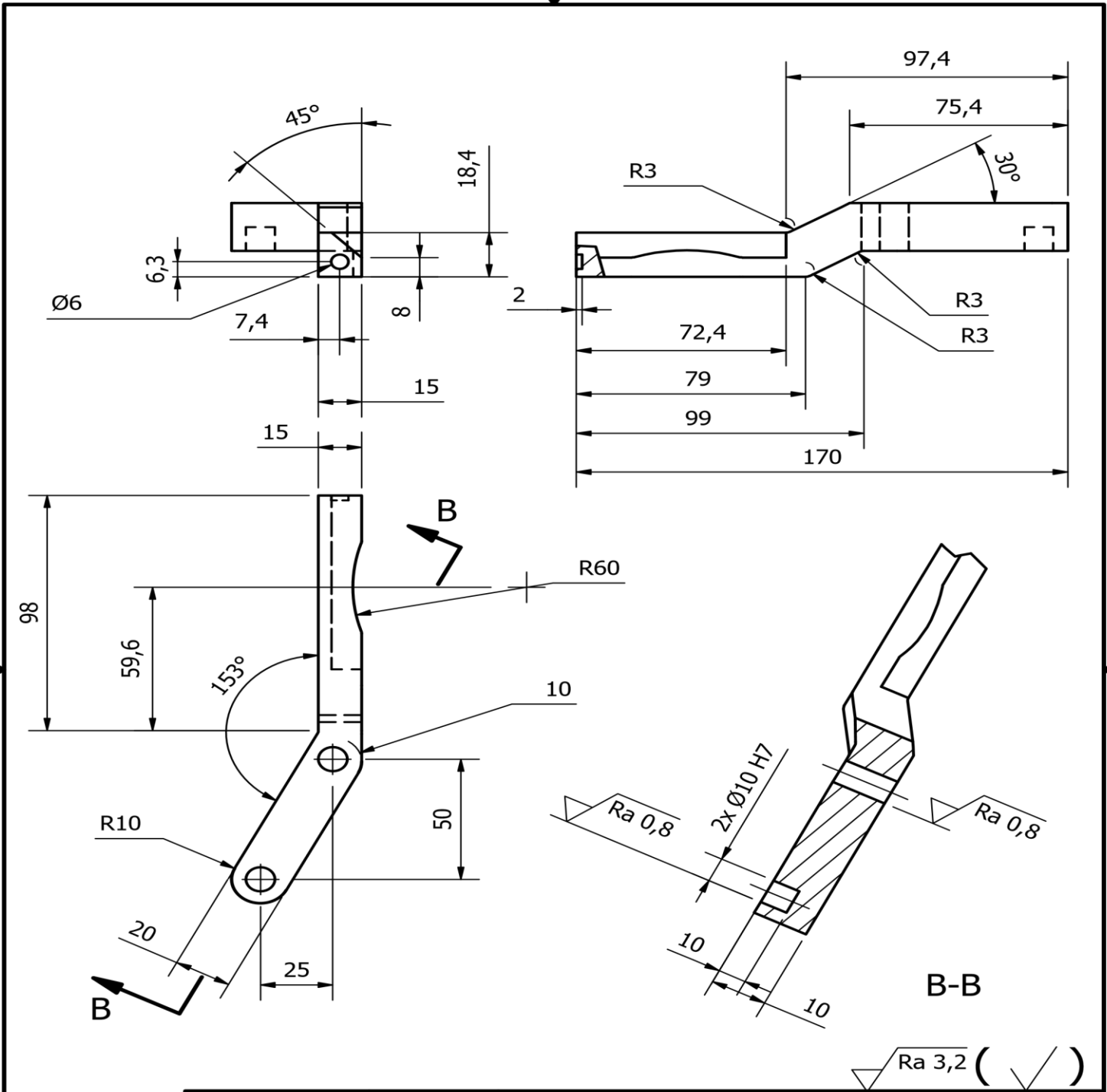
PŘÍLOHA č. 3

Výkres sestavy griperu



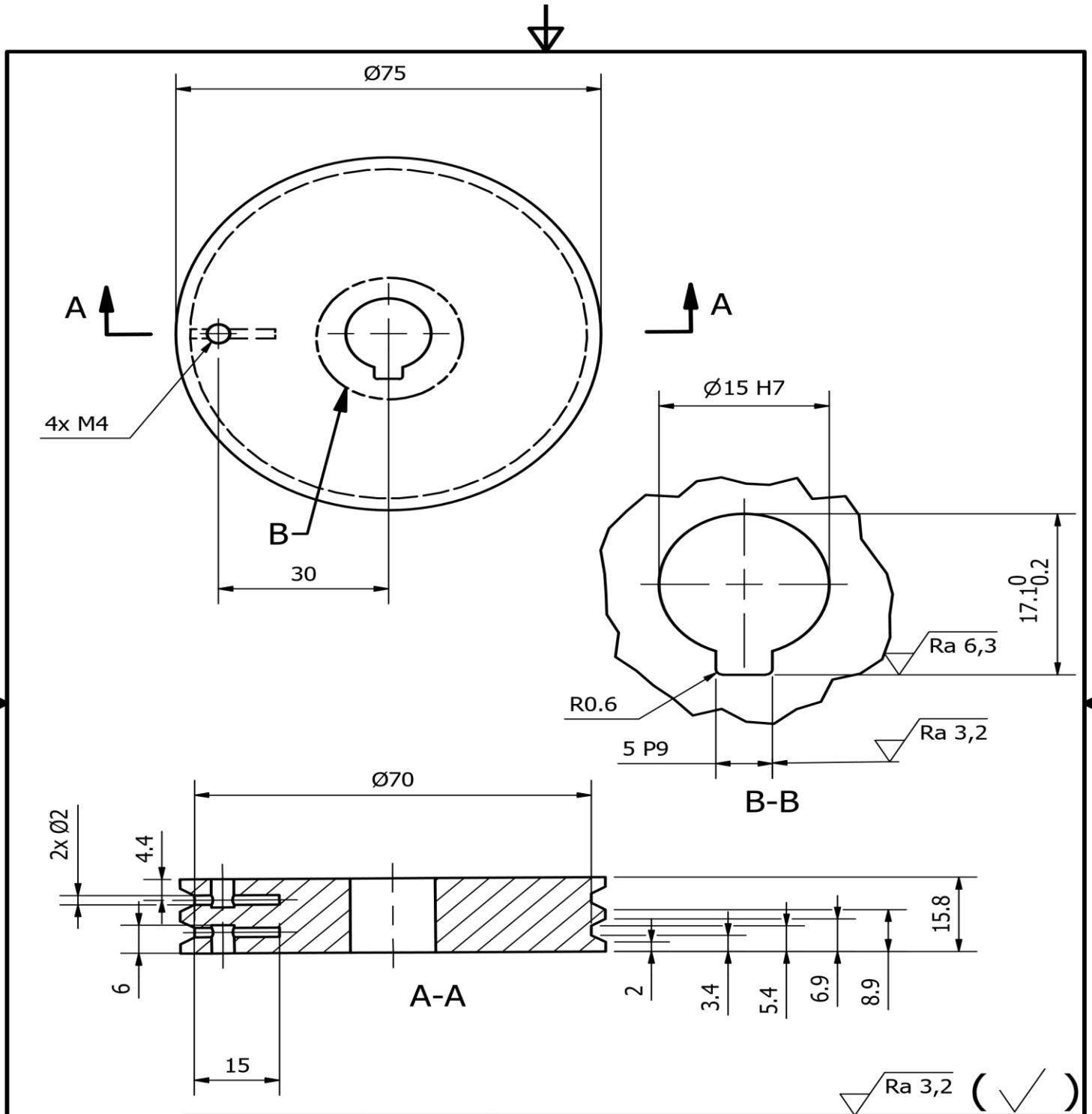
PŘÍLOHA č. 4

Výkresy komponent griperu a nosníku

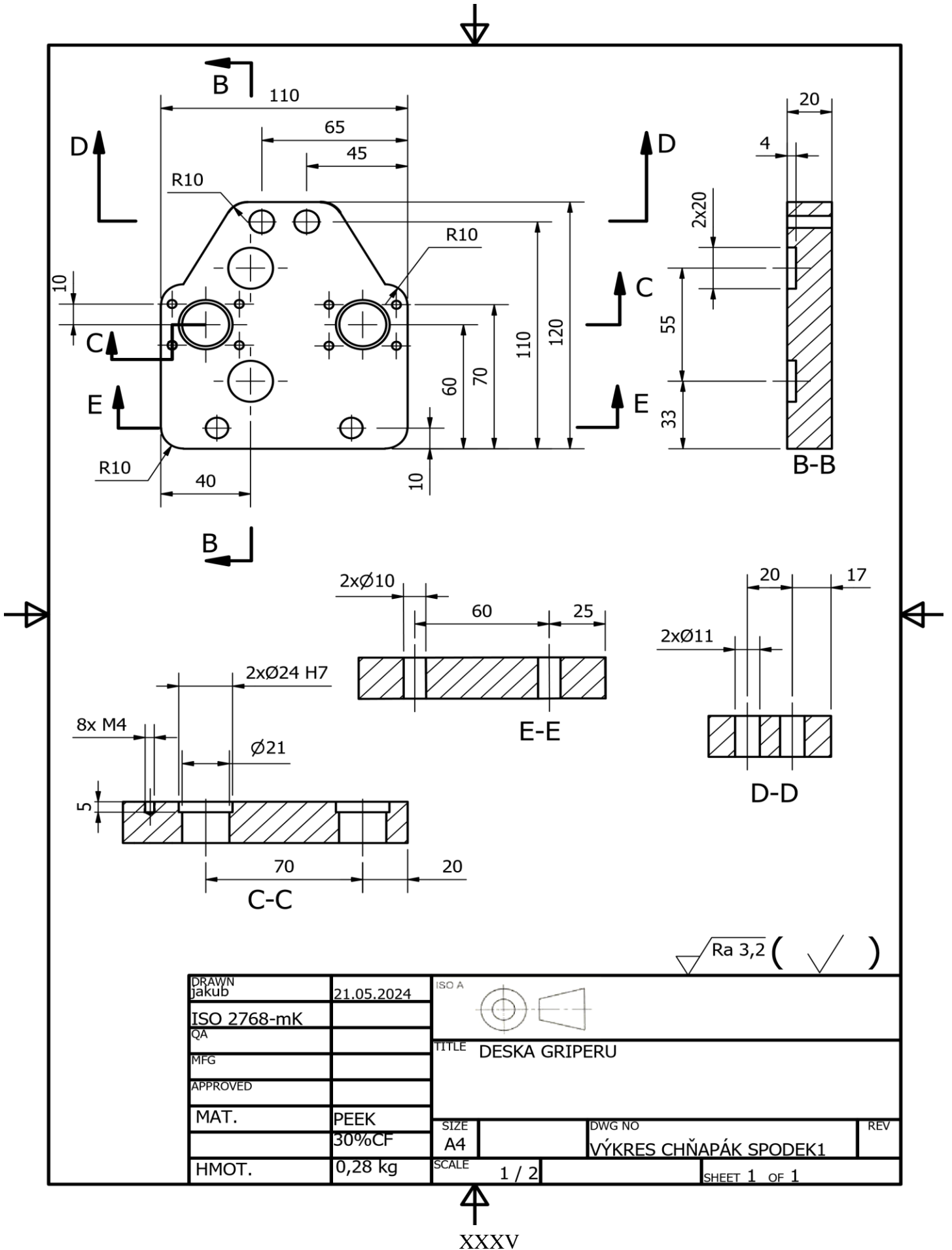



DRAWN jakub	21.05.2024	ISO A		
ISO 2768-mK		TITLE	PRST GRIPERU	
QA				
MFG				
APPROVED				
MAT.	HLINÍK 6061	SIZE	A4	DWG NO
HOMT.	0.3 kg	SCALE	1 / 2	VÝKRES PRSTU
				REV
				SHEET 1 OF 1

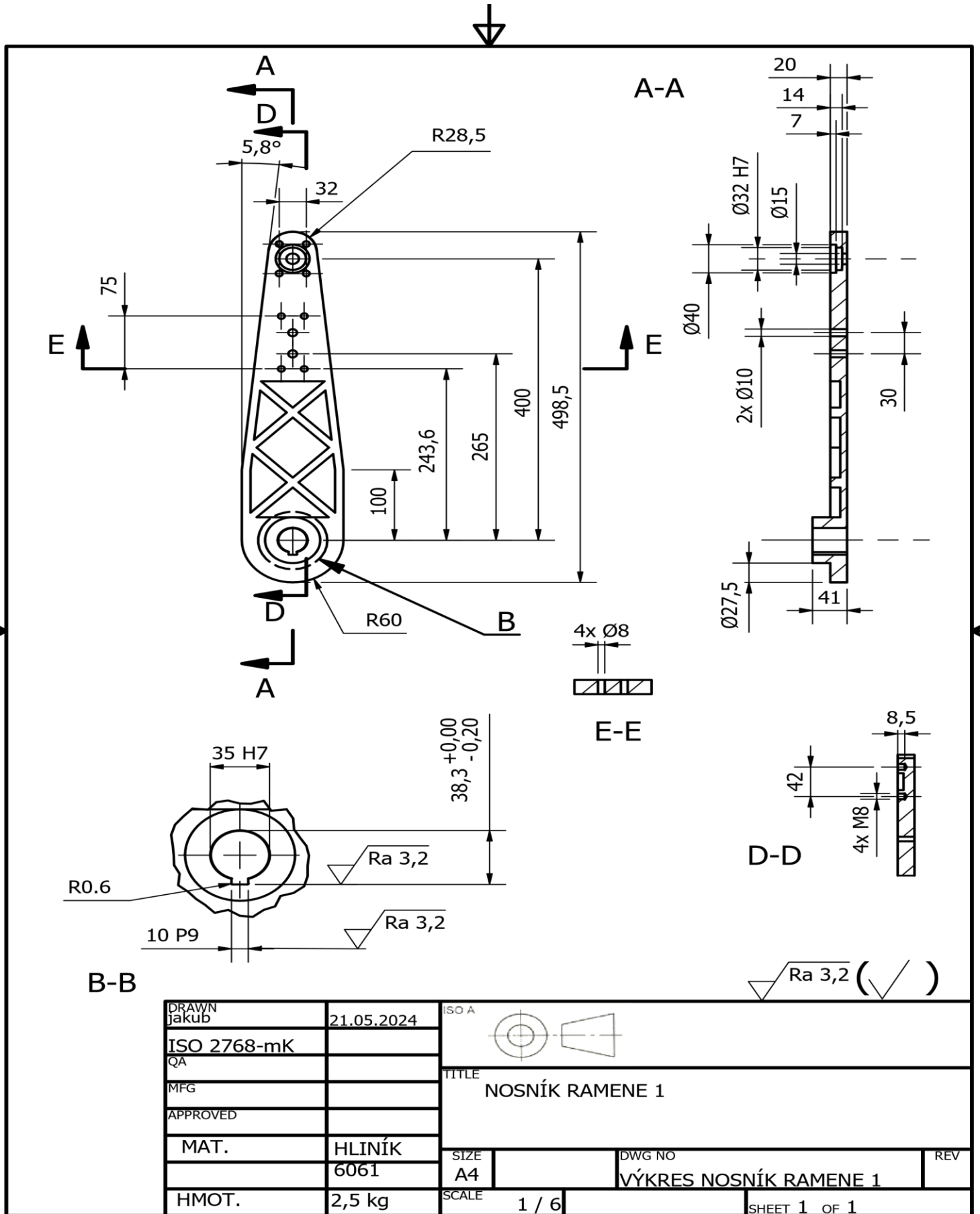




DRAWN jakub	21.05.2024	ISO A	
ISO 2768-mK		TITLE	BUBEN GRIPERU
QA			
MFG			
APPROVED			
MAT.	PEEK plast	SIZE	A4
		DWG NO	VÝKRES BUBEN1
HMOT.	0,1 kg	SCALE	1 : 1
			SHEET 1 OF 1



DRAWN jakub	21.05.2024	ISO A		
ISO 2768-mK				
QA		TITLE DESKA GRIPERU		
MFG				
APPROVED				
MAT.	PEEK 30%CF	SIZE A4	DWG NO VÝKRES CHŇAPÁK SPODEK1	REV
HMOT.	0,28 kg	SCALE 1 / 2	SHEET 1 OF 1	



DRAWN jakub	21.05.2024	ISO A		
ISO 2768-mK		TITLE	NOSNÍK RAMENE 1	
QA				
MFG				
APPROVED				
MAT.	HLINÍK 6061	SIZE	A4	DWG NO
HMOT.	2,5 kg	SCALE	1 / 6	VÝKRES NOSNÍK RAMENE 1
				REV
				SHEET 1 OF 1