



Diplomová práce

Obráběcí vřeteno s axiální kompenzací polohy nástroje

Studijní program:

N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení

Autor práce:

Bc. Václav Musil

Vedoucí práce:

doc. Ing. Marcel Horák, Ph.D.

Katedra sklářských strojů a robotiky

Liberec 2024



Zadání diplomové práce

Obráběcí vřeteno s axiální kompenzací polohy nástroje

| | |
|--------------------------|---|
| <i>Jméno a příjmení:</i> | Bc. Václav Musil |
| <i>Osobní číslo:</i> | S21000241 |
| <i>Studijní program:</i> | N0715A270019 Konstrukce strojů a zařízení |
| <i>Zadávací katedra:</i> | Katedra sklářských strojů a robotiky |
| <i>Akademický rok:</i> | 2023/2024 |

Zásady pro vypracování:

Pro obrábění dílů nebo dokončovací operace s nižšími nároky na přesnost geometrie se dnes jako alternativa ke konvenčním strojům používají průmyslové roboty v kombinaci s obráběcími vřeteny. Cílem diplomové práce je navrhnout konstrukční řešení technologického efektoru, tj. vřetena se systémem osové kompenzace polohy nástroje pro robotické leštění tvarově složitých objektů ze skla (velkoformátové čočky, designové skleněné výrobky) s konstantním přtlakem nástroje oproti leštěné ploše. Předpokládá se, že na základě výsledků rešerše provedené v teoretické části budou specifikovány výchozí technické požadavky, bude zpracován finální 3D počítačový model efektoru a realizována výchozí analýza možností využití SW RoboDK pro off-line programování trajektorií průmyslového robotu.

Úkolem Vaší DP bude:

1. Provést podrobnou rešerši současného stavu techniky v oblasti robotického obrábění.
2. Ve variantách realizovat návrh principu řešení technologického efektoru pro leštění skleněných výrobků s axiální kompenzací polohy.
3. Pro zvolenou variantu provést dimenzování namáhaných konstrukčních celků, zpracovat 3D počítačový model, výkresovou dokumentaci a počítačovou simulaci lešticího procesu skleněné čočky v SW RoboDK.
4. Specifikovat aplikační přínos navrženého řešení.

Rozsah grafických prací: výkresová dokumentace
Rozsah pracovní zprávy: 40 – 50 stran textu
Forma zpracování práce: tištěná/elektronická
Jazyk práce: čeština

Seznam odborné literatury:

1. NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. *Konstrukce robotů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-216-7. Učebnice vysokých škol. Technická univerzita v Liberci.
2. NOVOTNÝ, František a Marcel HORÁK. *Efektory průmyslových robotů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-195-5. Učebnice vysokých škol. Technická univerzita v Liberci.
3. *Úvod do pneumatiky*, Učebnice FESTO Didactic. Praha: ČVUT, 2016.
4. *Pneumatické řídicí systémy*, Učebnice FESTO Didactic. Praha: ČVUT, 2016.
5. SCHMID, Dietmar. *Řízení a regulace pro strojírenství a mechatroniku*. Praha: Europa Sobotáles, 2005. 420 s. ISBN 80-86706-10-9.
6. Interní dokumenty, katalogy a internetové zdroje od renomovaných výrobců vřeten, pneumatických pohonů a kompenzačních modulů (Deprag, Schunk, Jäger, SMC, Festo).

Vedoucí práce: doc. Ing. Marcel Horák, Ph.D.
Katedra sklářských strojů a robotiky

Datum zadání práce: 14. listopadu 2023
Předpokládaný termín odevzdání: 14. května 2025

doc. Ing. Jaromír Moravec, Ph.D.
děkan

L.S.

doc. Ing. Martin Bílek, Ph.D.
garant studijního programu

V Liberci dne 14. listopadu 2023

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně jako původní dílo s použitím uvedené literatury a na základě konzultací s vedoucím mé diplomové práce a konzultantem.

Jsem si vědom toho, že na mou diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., o právu autorském, zejména § 60 – školní dílo.

Beru na vědomí, že Technická univerzita v Liberci nezasahuje do mých autorských práv užitím mé diplomové práce pro vnitřní potřebu Technické univerzity v Liberci.

Užiji-li diplomovou práci nebo poskytnu-li licenci k jejímu využití, jsem si vědom povinnosti informovat o této skutečnosti Technickou univerzitu v Liberci; v tomto případě má Technická univerzita v Liberci právo ode mne požadovat úhradu nákladů, které vynaložila na vytvoření díla, až do jejich skutečné výše.

Současně čestně prohlašuji, že text elektronické podoby práce vložený do IS/STAG se shoduje s textem tištěné podoby práce.

Beru na vědomí, že má diplomová práce bude zveřejněna Technickou univerzitou v Liberci v souladu s § 47b zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů.

Jsem si vědom následků, které podle zákona o vysokých školách mohou vyplývat z porušení tohoto prohlášení.

Obráběcí vřeteno s axiální kompenzací polohy nástroje

Anotace

Diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem technologického efektoru pro broušení a leštění složitých velkoformátových výrobků ze skla. Práce obsahuje podrobnou rešerši v oblasti obrábění skla, robotického obrábění a způsobů kompenzace polohových chyb robotu. Pomocí rozhodovací analýzy byla zvolena vhodná konstrukční varianta provedení efektoru a dané konstrukční řešení bylo navrženo, včetně 3D modelu a výkresové dokumentace vybraných komponent. Rovněž byly stanoveny vhodné technologické podmínky a trajektorie brousícího nástroje a byla vytvořena počítačová simulace brousícího procesu.

Klíčová slova

robotické obrábění, obrábění skla, koncový efektor robotu, kompenzace polohy, broušení, leštění

Machining spindle with axial compensation of tool position

Annotation

The thesis deals with the design of a technological effector for grinding and polishing of complex large-format glass products. The thesis contains a detailed research in the field of glass machining, robotic machining and methods of compensating for positional errors of the robot. Using decision analysis, a suitable effector design option was selected and the given design solution was proposed, including a 3D model and drawings of the selected components. Also, suitable technological conditions and trajectories of the grinding tool were determined and a computer simulation of the grinding process was created.

Key words

robotic machining, glass machining, robot end effector, position compensation, grinding, polishing

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat doc. Ing. Marcelu Horákovi, Ph.D. za odborné vedení, trpělivost a čas, který mi během zpracovávání diplomové práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat celé Katedře sklářských strojů a robotiky za přátelskou atmosféru, kterou zpříjemnili roky mého studia.

Obsah

| | | |
|-------|--|----|
| 1 | Úvod..... | 12 |
| 2 | Analýza současného stavu | 13 |
| 2.1 | Technologie broušení skla | 14 |
| 2.1.1 | Brusiva a nástroje..... | 16 |
| 2.1.2 | Brousící procesy a technologické podmínky | 17 |
| 2.2 | Technologie leštění skla..... | 18 |
| 2.2.1 | Leštiva a nástroje | 19 |
| 2.2.2 | Lešticí procesy a technologické podmínky | 20 |
| 2.3 | Využití robotů v obráběcích procesech | 21 |
| 2.3.1 | Využitelné typy robotů podle aplikace | 21 |
| 2.3.2 | Možnosti minimalizace chyb robotu..... | 23 |
| 2.3.3 | Obráběcí vřetena a kompenzátory polohy | 25 |
| 2.3.4 | Možnosti programování trajektorie robotu | 26 |
| 2.4 | Shrnutí zásadních východisek pro praktickou část | 28 |
| 3 | Návrh RTP a konstrukce efektoru | 30 |
| 3.1 | Definice procesních parametrů a východisek pro realizaci RTP | 30 |
| 3.1.1 | Stanovení procesních parametrů..... | 32 |
| 3.2 | Návrh konstrukce RTP..... | 34 |
| 3.2.1 | Robot..... | 34 |
| 3.2.2 | Pracovní stůl | 36 |
| 3.2.3 | Nástroj..... | 36 |
| 3.2.4 | Vřeteno..... | 36 |
| 3.3 | Návrh a konstrukce vřetena s axiální kompenzací polohy nástroje..... | 37 |
| 3.3.1 | Varianta 1 - Vřeteno s gravitační kompenzací polohy | 37 |
| 3.3.2 | Varianta 2 - Vřeteno s pneumatickou kompenzací polohy | 38 |
| 3.3.3 | Varianta 3 - Vřeteno s elektrickou kompenzací polohy | 39 |
| 3.4 | Výběr optimální varianty řešení vřetena..... | 39 |
| 4 | Konstrukce vřetena a tvorba experimentálního pracoviště..... | 42 |
| 4.1 | Návrh kompenzátoru polohy | 42 |
| 4.2 | Návrh vřetene..... | 43 |
| 4.2.1 | Výpočet potřebného kroutícího momentu | 43 |
| 4.2.2 | Výběr servopohonu..... | 45 |
| 4.2.3 | Výběr sklíčidla | 46 |
| 4.3 | Uspořádání jednotlivých komponent systému..... | 47 |
| 4.3.1 | Návrh řemenového převodu..... | 49 |
| 4.4 | Konstrukční provedení vřetene..... | 52 |
| 4.4.1 | Modul 1..... | 54 |

| | | |
|-------|---|----|
| 4.4.2 | Modul 2..... | 56 |
| 4.4.3 | Modul 3..... | 57 |
| 4.5 | Pevnostní kontrola navržených prvků..... | 57 |
| 4.5.1 | Pevnostní kontrola kolíkových spojů..... | 58 |
| 4.5.2 | Návrh ložisek | 59 |
| 5 | Programování robotu metodou OFF-LINE programování | 62 |
| 5.1 | Tvorba robotického pracoviště v RoboDK..... | 62 |
| 5.2 | Stanovení trajektorie | 63 |
| 5.3 | Programování trajektorie v RoboDK..... | 67 |
| 6 | Závěr | 68 |
| | Seznam použité literatury | 70 |

Seznam použitých zkratk a symbolů

| Zkratky použité v textu | |
|--------------------------------|------------------------------------|
| CNC | Computer Numerical Control |
| CAD | Computer-aided design |
| CAM | Computer-aided manufacturing |
| $\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$ | Leštící červeň |
| Fe_3O_4 | Oxid železnato-železitý |
| $\alpha\text{-FeOOH}$ | Hydroxid železitý |
| CeO_2 | Oxid ceričitý |
| TCP | Tool Center Point |
| API | Application Programming Interface |
| RTP | Robotické technologické pracoviště |

| Zkratky použité ve výpočtech | | |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------|
| Značka | Název | Jednotka |
| v | Posuvová rychlost | [mm/s] |
| $x1, x2,$ $y1, y2$ | Souřadnice polohy nástroje | [mm] |
| fps | Frames per second | [s ⁻¹] |
| M_k | Kroutící moment | [Nm] |
| M_t | Moment vzniklý smykovým třením | [Nm] |
| r | Rameno třecí síly | [mm] |
| f | Koeficient smykového tření | [-] |
| p_t | Tlak nástroje na plochu | [Pa] |
| F_t | Třecí síla | [N] |
| F_n | Normálová síla | [N] |
| S_n | Plocha nástroje | [mm ²] |
| R | Poloměr nástroje | [mm] |
| M_D | Dynamický moment | [Nm] |

| | | |
|---------------|---------------------------------|------------------------|
| J | Moment setrvačnosti | [kg·m ²] |
| ε | Úhlové zrychlení | [rad·s ⁻²] |
| n | Otáčky vřetena | [s ⁻¹] |
| ω | Úhlová rychlost | [rad·s ⁻¹] |
| L_v | Délka řemene | [mm] |
| d_1, d_2 | Průměry hnací a hnané řemenice | [mm] |
| a | Osová vzdálenost | [mm] |
| F_u | Periferní síla | [N] |
| M_n | Jmenovitý moment | [Nm] |
| p_1, p_2 | Tlaky na kolíku | [MPa] |
| p_d | Dovolený tlak | [MPa] |
| R_m | Mez pevnosti | [MPa] |
| k | Koeficient bezpečnosti | [-] |
| τ_{ds} | Dovolené smykové napětí | [MPa] |
| τ_s | Smykové napětí | [MPa] |
| C | Dynamická únosnost | [N] |
| C_0 | Statická únosnost | [N] |
| e | Poměrový součinitel ložiska | [-] |
| p | Exponent rovnice trvanlivosti | [-] |
| P | Ekvivalentní dynamické zatížení | [N] |
| L_{10h} | Trvanlivost ložiska | [h] |
| P_0 | Ekvivalentní statické zatížení | [N] |
| s_0 | Koeficient statické bezpečnosti | [-] |

1 Úvod

S rostoucími požadavky na efektivitu, přesnost a flexibilitu výroby, roste i počet průmyslových robotů ve všech průmyslových odvětvích. Roboty se používají nejen k jednoduchým opakujícím se úkolům, ale stále častěji také k složitějším procesům, které vyžadují vysokou míru přesnosti a adaptability, jako je například svařování či obrábění.

V oblasti obrábění, kde jsou kladeny vysoké nároky na přesnost geometrie, se robotické technologické pracoviště nemohou rovnat zavedeným CNC strojům, ale v aplikacích s nižšími požadavky na přesnost geometrie se jako alternativa používají průmyslové roboty v kombinaci s obráběcími vřeteny.

Cílem diplomové práce je navrhnout konstrukční řešení technologického efektoru, tj. vřetena se systémem osově kompenzace polohy nástroje pro robotické leštění tvarově složitých objektů ze skla (velkoformátové čočky, designové skleněné výrobky) s konstantním přitlakem nástroje oproti leštěné ploše a vytvořit počítačovou simulaci lešticího procesu.

S ohledem na řešenou problematiku diplomové práce byly v teoretické části nejprve rozebrány procesy probíhající během broušení a leštění skla, vhodné materiály nástrojů, technologické podmínky atd. Dále byla rozebrána problematika robotického obrábění a možnosti kompenzace polohových chyb robotu.

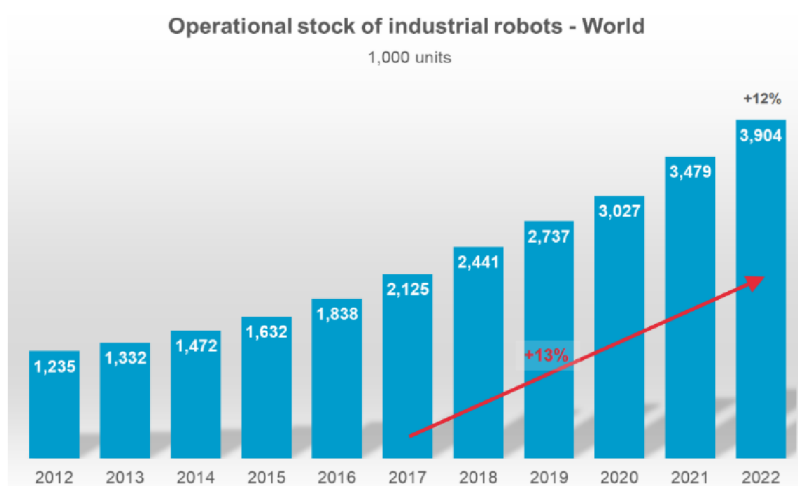
Praktická část se zabývá konstrukcí efektoru a tvorbou počítačové simulace. Uvedeno je několik variant řešení a pomocí rozhodovací analýzy byla vybrána varianta, která nejlépe splňovala stanovená kritéria. Konstrukční řešení bylo vytvořeno v softwaru Autodesk Inventor Professional 2023, byla vytvořena výkresová dokumentace a byla provedena pevnostní kontrola vybraných konstrukčních prvků. Dále jsou v praktické části stanoveny vhodné technologické podmínky a trajektorie brousícího nástroje na základě již existujícího způsobu broušení skleněné čočky. Dále je popsán postup tvorby počítačové simulace brousícího/lešticího procesu v softwaru RoboDK.

2 Analýza současného stavu

Obrábění je technologický proces, při kterém dochází ke zpracování polotovaru pomocí odebrání nadbytečného materiálu v podobě třísky. Mezi obrábění se řadí hrubovací operace jako je například soustružení, vrtání a frézování nebo dokončovací operace jako je například broušení či leštění. Jak hrubovací, tak dokončovací operace se nejčastěji provádějí na konvenčních nebo častěji CNC strojích.

CNC stroje nabízí velmi vysokou přesnost a tuhost, ale jejich cena je velmi vysoká. S rostoucím pracovním prostorem výrazně roste i celý stroj a jejich flexibilita je velmi omezená. Proto se užití poměrně levných robotů jeví jako potenciální alternativa CNC strojů [1].

Robotické obrábění je nejen levnější ale nabízí i lepší polohovatelnost. Například angulární robot má 6 stupňů volnosti oproti 3 nebo 4, které standardně nabízí běžná obráběcí CNC centra. Robotická centra o stejné velikosti nabízí i výrazně větší pracovní prostor, který lze poměrně snadno zvětšit pojezdovým ústrojím. Naopak zvětšení pracovního prostoru CNC stroje je velmi obtížné a ve většině případů i nemožné [2]. Roboty nabízí i mnohem větší flexibilitu, protože pouhou výměnou efektoru lze robot připravit pro různé technologie. Zdokonalování robotických systémů vede k nárůstu jejich aplikací v různých průmyslových odvětvích, jak je patrné z obr. 1 [3].



Obr. 1 Nárůst užití robotů v průmyslu [3]

Největší nevýhodou robotů je jejich nízká tuhost a s tím spojená přesnost. Pro představu; vrcholné CNC stroje mohou dosahovat přesností v rozsahu 20-50 mikronů

a robot 200 mikronů [2], avšak při zatížení řeznou silou o 500 N se přesnost robotu sníží na 1 mm a přesnost CNC stroje na méně než 0.01 mm [4].

Lze tedy konstatovat, že užití průmyslových robotů pro obrábění je vhodné především v aplikacích s nízkými řeznými silami, které vyžadují velký pracovní prostor a vysokou obratnost nebo komplexnost obráběného tvaru [5, 6]. Mezi takové aplikace patří především dokončovací operace jako je broušení a leštění. Je však možné užít roboty i při frézování, kde se robotické frézování hojně využívá například při výrobě pískových forem, které se formují podle modelu konečného výrobku. Tento model bývá nejčastěji zhotoven ze dřeva či pěnového polystyrenu obráběním na CNC strojích. Z důvodu vysokých nákladů na CNC stroje se však jeví využití levnějších a flexibilnějších angulárních robotů jako velice výhodné, protože nevýhody spojené s nízkou tuhostí robotických struktur se u obrábění materiálů jako je pěnový polystyren příliš neprojevují [7]. Avšak pro frézování tvrdých materiálů jako je sklo již použití angulárního robotu není vhodné. Proto se tato práce věnuje pouze broušení a leštění.

2.1 Technologie broušení skla

Broušení je jednou z nejdůležitějších technologických operací při zpracování skleněných výrobků. Provádí se za studena a skleněný výrobek získá broušením svůj konečný tvar. Při broušení se sledují zpravidla 2 parametry:

- Obrus skla, který vyjadřuje množství odebraného materiálu za jednotku času a určuje produktivitu procesu.
- Jakost výbrusu, která vyjadřuje celkovou kvalitu broušeného povrchu, zejména povrchovou drsnost.

Broušení lze rozdělit na dva procesy – broušení hrubé a jemné. Cílem hrubého broušení je zajistit co nejvyšší obrus skla a co nejrychleji se dostat k požadovanému tvaru obrobku bez ohledu na kvalitu povrchu. Posléze následuje broušení jemné, jehož cílem je odstranění hrubé struktury povrchu a předchází poslední operaci – leštění [8]. Ukázka povrchu po obrábění ve srovnání s povrchem po hrubém broušení je na obr. 2, který byl pořízen během předešlých pokusů o broušení skleněných čoček na TUL.



Obr. 2 Ukázka povrchu před a po broušení

Do současné doby byly vyvinuty různé stroje a techniky pro broušení, jako jsou ploché nebo profilové brusky, které jsou ideální pro broušení rovinných ploch. Avšak běžné metody nejsou často vhodné pro opracovávání různě zakřivených ploch. Automatizace broušení zakřivených ploch je velmi složitá úloha, která vyžaduje nejen vysokou přesnost pohybů, ale také schopnost aplikovat vhodnou přitlačnou sílu. Právě přitlačná síla má zásadní vliv na konečnou kvalitu povrchu. Dalším problémem broušení zakřivených ploch je udržování nástroje ve směru kolmém na povrch. Tato úloha je proto stále často prováděna ručně pomocí ručních pneumatických excentrických brusek. Ruční broušení však představuje zdravotní rizika pro obsluhu z důvodu nadměrného hluku, vibrací a prachu. Nutnost ručního broušení rovněž zvyšuje celkové náklady na výrobu [9, 10].

Možné řešení bylo navrženo v Japonsku, kde bylo využito speciálního vřetene s tlakovým senzorem na angulárním robotu. Základní trajektorie nástroje byla definována pomocí CAD/CAM softwaru a skutečná trajektorie a orientace nástroje byla korigována pomocí ovladače propojeným s PC, který pomocí dat z tlakového senzoru přepočítával potřebné natočení jednotlivých kloubů robotu tak, aby byla na broušenou plochu vyvíjena konstantní síla [9].

2.1.1 Brusiva a nástroje

Základním prvkem každého brusného nástroje jsou brusiva. Brusiva jsou jemná a velmi ostrá zrna, jejichž hrany představují jednotlivé břity s nedefinovanou geometrií. Podle způsobu použití lze dále brusiva rozdělit na:

- Brusiva volná, kde je brusivo při broušení unášeno procesní kapalinou a přiváděno mezi obrušované sklo a brousící kotouč.
- Brusiva vázaná, kde je brusivo spojeno pomocí speciálních pojiv do formy kotoučů, pásů, kamenů, nebo jiných tělísek [8].

Pro charakterizování volného brusiva je dostačující znalost druhu brusiva a jeho zrnitosti, avšak u nástrojů z vázaného brusiva je potřeba znalosti dalších parametrů, zejména tvrdosti, struktury (neboli sloh) nástroje a užitého pojiva [8].

Druhy brusiv lze podle jejich původu rozdělit na dva typy: přírodní a syntetická. Mezi přírodní brusiva patří různé druhy hornin a minerálů, například křemen, břidlice, přírodní korund, granát, smírek a diamanty. V moderním broušení kovů se však přírodní brusiva používají méně často a jsou nahrazována umělými – syntetickými brusivy, která překonávají přírodní brusiva v mnoha ohledech, ale především v jejich tvrdosti. Mezi nejčastěji používaná umělá brusiva patří umělý korund, karbid křemíku, karbid boru, kubický nitrid boru a syntetický diamant. Při volbě materiálu brusiva je základním parametrem jeho tvrdost, přičemž tvrdost brusiva musí být vyšší než tvrdost obráběného materiálu. V potaz se však musí vzít i další parametry jako je například teplotní odolnost a stálost, houževnatost a odolnost vůči rázům. [8, 12]. Pro sklo je z přírodních brusiv vhodné užití diamantového brusiva či oxidu ceru [8, 12, 13].

Zrna brusiva jsou také charakteristická svou velikostí. Stanovuje se prosíváním přes síta, případně plavením. Zrnitost se značí číselně. Čím vyšší je údaj o zrnitosti, tím je zrno jemnější. Pro hrubé broušení se tedy používají brusiva s nižší zrnitostí a pro jemné broušení brusiva s vyšší zrnitostí [12].

Tvrdost brousícího nástroje vyjadřuje odpor zrna vůči vylomení nebo uvolnění z matrice nástroje. Tento údaj tedy není totožný s tvrdostí brusného materiálu. Tvrdost brousícího nástroje závisí na mnoha faktorech, ale těmi hlavními jsou: druh pojiva a brusného materiálu. Měkké kotouče dobře brousí, ale rychle se opotřebují. Tvrdé

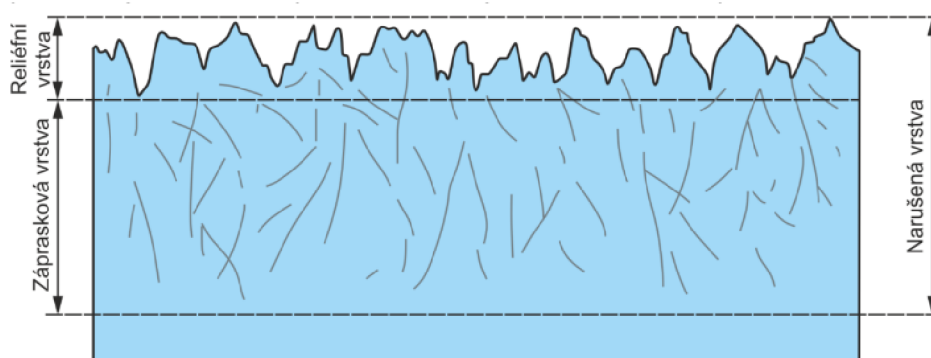
kotouče vydrží déle, ale rychleji se otupí, což vede k vyšším teplotám na broušené ploše a vyšším nárokům na sílu. Pro obrábění tvrdých materiálů jako je sklo se používají nástroje měkčí [8, 11].

Při procesu broušení vázaným nástrojem se mohou zrna z nástroje vylamovat čímž vzniká nový pracovní povrch a nástroj se tímto ostří nebo se zrna mohou lámat, přičemž dochází k zaoblování hran, povrch se zahlazuje a nástroj se otupuje. V tomto případě je nutné kotouče ostřit pomocí litinových nebo diamantových orovnávaček [14].

Při broušení volným brusivem je pro definování nástroje rozhodující jeho tvrdost. Pro tvrdé kotouče se používá nejčastěji litina, případně ocel a pro měkké kotouče se používají slitiny hliníku a plastické hmoty. Plastické hmoty mají však výrazně nižší otěruvzdornost, což vede k nižší životnosti nástroje [8].

2.1.2 Broušící procesy a technologické podmínky

Princip broušení spočívá ve vzájemném tření skla a brusiva za přítomnosti řezné kapaliny. Brusná zrna (volná i vázaná) vytvářejí ve skle trhlinky a vylamují velmi drobné úlomky skla. Působení brusiva neovlivňuje pouze vnější povrch, tzv. reliéfní vrstvu, ale ovlivňuje i vrstvu podpovrchovou, tzv. zápraskovou vrstvu, kterou nelze přímo pozorovat. Obě vrstvy mají oslabenou soudržnost skla, a proto jsou společně označovány jako "narušená vrstva" viz. obr. 3 [8, 14].



Obr. 3 Povrchový reliéf a podpovrchové narušení broušeného skla [14]

Z technologických parametrů ovlivňující obrus skla a jakost výbrusu mají největší význam tlak a rychlost broušení. Při používání volného brusiva jsou také důležité faktory, jako je koncentrace, množství broušící suspenze a materiál podkladového nástroje [8].

Zvýšení brusného tlaku při broušení vázanými nástroji vede ke zvýšení rychlosti úběru materiálu, přičemž závislost tlaku a obrusu je lineární [8]. Zhoršuje však drsnost povrchu a zvyšuje brusnou sílu a teplotu broušení. Zvýšení brusného tlaku také snižuje životnost nástroje [15]. S rostoucí rychlostí posuvu se zvyšují řezné síly, což má za následek zhoršení drsnosti povrchu a snížení životnosti brusného nástroje. Zvýšení rychlosti otáčení nástroje má opačný efekt a síly se snižují [16]. Avšak pro maximalizaci obrusu, existuje určitá optimální rychlost broušení, která je závislá na druhu kotouče, složení obráběného skla a teplotě přiváděné procesní kapaliny. Důležité je v místě broušení nepřesáhnout teplotu, při které začíná sklo měknout [8].

Při broušení volným brusivem je závislost obrusu a tlaku opět lineární, ale pouze v případě, že přivádíme do místa řezu optimální množství brousící suspenze, které se zvyšováním tlaku a rychlosti také zvyšuje. Na optimalizaci brousícího procesu má vliv i koncentrace přiváděné suspenze. Suspenze s vyšším obsahem vody, než je optimální, neobsahuje dostatek zrn pro broušení a v nadměrně koncentrované suspenzi se zase zrna nemohou volně pohybovat. Brousící efekt se v obou případech zhoršuje [8].

Obrusnost i jakost povrchu při volném broušení závisí i na materiálu brousícího kotouče. Tvrdé kotouče z litiny nebo oceli se nepřizpůsobují tvaru zrna a opírají se tak o menší počet zrn než kotouče z měkkých materiálů. Použitím měkkých kotoučů se tlak vlivem deformace kotouče rozloží na větší počet zrn, což vede k vyšší jakosti povrchu, ale nižšímu obrusu [8].

2.2 Technologie leštění skla

Leštění se stejně jako broušení řadí mezi dokončovací operace. Účelem leštění již není měnění rozměrů dílu, ale pouze zlepšení povrchu. Leštění skla lze provádět třemi základními způsoby:

- mechanicky,
- chemicky,
- a teplem [8].

Chemické leštění probíhá ponorem leštěného povrchu do kyseliny sírové a následným opláchnutím ve vodě. Tento postup se opakuje až do dosažení požadované kvality povrchu [14]. Tímto způsobem lze leštit velmi komplexní povrchy, které by nebylo možné jinak vyleštit. Avšak kvalita chemického leštění oproti mechanickému leštění je nižší [17].

Leštění teplem probíhá zahřátím povrchu skleněného výrobku nad teplotu měknutí a vlivem povrchového pnutí se vytvoří hladký a lesklý povrch [14]. Leštěním teplem se ale rovněž nedosáhne takové kvality jako mechanickým leštěním [18].

Princip mechanického leštění skla je podobný broušení, ale používají se jiné nástroje a technologické podmínky. Přestože má tento způsob leštění jisté nevýhody, jako je vysoká pracnost nebo možnost opracování pouze relativně jednoduchých výrobků, tak je mechanické leštění dominantní technologií v aplikacích leštění optických a okrasných skel, kde je jakost povrchu hlavní prioritou [14, 17].

2.2.1 Leštiva a nástroje

Stejně jako u broušení je základním prvkem nástroje brusivo tak u leštění to jsou leštící prášky (leštiva). Leštiva mohou být ve formě obyčejného prášku pro leštění volným leštivem nebo ve formě vázaného nástroje, kde je leštivo spojeno pomocí vhodného pojiva nebo napuštěno do nástroje, který je nejčastěji z plastu (polyuretanu). Jako procesní kapalina se používá nejčastěji voda, jejímž účelem je chlazení nástroje a případná distribuce a odvod leštícího prášku [8, 14].

Leštiva lze opět rozdělit podle jejich původu na prášky přírodního původu a prášky syntetické. Hlavními zástupci přírodních leštiv je pemza a tripol (též tripl) [8, 14], přičemž při užití tripolu je doporučováno jeho smísení s pemzou pro zlepšení vlastností leštící suspenze [19]. Mezi nejvýznamnější zástupce syntetických leštiv patří leštící červeň ($\alpha\text{-Fe}_2\text{O}_3$), leštící čern (směs Fe_3O_4 a $\alpha\text{-FeOOH}$) a oxid ceričitý (CeO_2) [8, 14].

Kotouče pro leštění volným leštivem jsou většinou z velmi měkkých materiálů. Tyto materiály mají zajistit uchycení a rovnoměrné rozložení leštících prášků po povrchu nástroje. Nejčastěji se používají plstěné, polyuretanové, dřevěné a korkové kotouče. Výhodné je užití pružných kotoučů, protože je jejich pracovní povrch větší, čímž se zvýší

účinnost procesu. Pružnější kotouč se totiž nedotýká pouze vrcholků reliéfní vrstvy, ale zasahuje i do prohlubní.

2.2.2 Leštící procesy a technologické podmínky

Výchozí broušený povrch je tvořen jamkami a reliéfní vrstvou, která je postupně snímána suspenzí leštiva a leštícího nástroje. Postupným odstraněním povrchového reliéfu a podpovrchových záprasků dochází k zahlazení a zjemnění původně hrubého a matného povrchu skla, který se následně stává lesklým a průhledným [8].

Během leštění dochází i k chemickým a tepelným procesům, které mají vliv na výsledek leštění. Tepelné procesy mají největší význam při intenzivním leštění pomocí tvrdých vázaných nástrojů. Při takovémto způsobu leštění je mechanické ubírání materiálu částečně nahrazováno zahlazováním povrchového reliéfu změkklým sklem. Leštění vázaným nástrojem je rychlejší než leštění volným leštivem, ale jakost povrchu je nižší [8].

Tím nejvýznamnějším chemickým procesem je vyluhování alkálií z povrchu skla a tvorba velmi tenké vrstvičky gelu kyseliny křemičité vlivem působení vody. Tato vrstvička je molekulárně snímána leštícím nástrojem a zvyšuje tak účinnost leštění [8].

Z technologických parametrů ovlivňuje proces leštění především:

- rychlost otáčení nástroje,
- pracovní tlak,
- koncentrace a spotřeba leštící suspenze.

Účinnost leštění roste s rostoucím specifickým tlakem na sklo a zvyšující se rychlostí otáčení leštícího nástroje. Zvýšením rychlosti otáčení se dostává nástroj častěji do styku s leštěným sklem, což vede ke zrychlení procesu. Zvýšený tlak způsobuje větší deformaci leštícího nástroje, což umožňuje snadnější přizpůsobení jeho tvaru opracovávanému sklu. Tím dochází ke zvýšení počtu leštících částic působících na sklo. Zároveň dochází k intenzivnějšímu drcení částic leštiva čímž se zvětší počet aktivních plošek. Zvýšení styčné plochy vede i k vyššímu tření a zvýšení teploty. Zvýšením teploty se navíc urychlí proces hydrolyzy a tvorby povrchového gelu kyseliny křemičité [8].

Stejně jako u broušení je koncentrace leštící suspenze vyjádřena jako poměr váhového množství kapaliny ku váhovému množství leštiva. Nejlepší účinnost nastává při poměru 4 až 8. Při zředěnější suspenzi dochází k vyplavování leštiva, které se nemůže uchytit v nástroji, snižuje se teplota skla a na povrchu skla mohou vznikat korozivní jamky. Při příliš husté suspenzi se účinnost snižuje z důvodu zpomalení fyzikálně chemických procesů při leštění a částice se nerozdělují rovnoměrně po povrchu nástroje. Může docházet i k přehřívání skla, pálení jeho povrchu a v extrémních případech i k praskání [8].

Optimální spotřeba leštící suspenze závisí na specifických technologických parametrech, především na rozměrech a otáčkách nástroje, materiálu nástroje, tlaku při leštění a na charakteristikách leštícího prášku. Je tedy doporučeno stanovit spotřebu leštiva pro každou konkrétní technologii zvlášť pro dosažení nejlepších výsledků [8].

2.3 Využití robotů v obráběcích procesech

Tato kapitola se zabývá hlavními úskalími robotického obrábění, přičemž hlavní nevýhodou je nízká tuhost robotů. Nízká tuhost je důsledkem několika faktorů. Jedním faktorem je vysoký počet kloubů robotu. Každý kloub umožňuje pohyb a tímto pohybem vnáší do soustavy chybu, která se umocňuje délkou jednotlivých členů kinematického řetězce – zejména u angulárních robotů. Dlouhé členy kinematického řetězce jsou také náchylné k elastické deformaci [5].

Další chyby vznikají při sestavení robotu a dalších výrobních nepřesnostech. Tyto chyby nemají vliv na opakovatelnou přesnost systému, ale negativně ovlivňují přesnost trajektorie [20].

Dalším problémem je naprogramování robotu, protože programování robotu pro obráběcí aplikace má mnohem vyšší nároky než běžné manipulační “pick and place” úlohy.

2.3.1 Využitelné typy robotů podle aplikace

Existují různé typy robotů, včetně kartézských, cylindrických, sférických, angulárních a paralelních. Jednotlivé typy robotů se liší především svou kinematickou

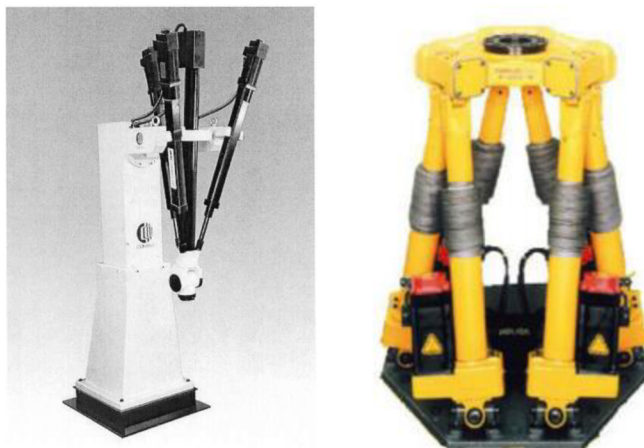
strukturou [5, 21], ale v obráběcích procesech se užívají především poslední dva zmíněné – roboty angulární a roboty paralelní [4, 22].

Paralelní roboty mají uzavřenou kinematickou strukturu a mohou být poháněny elektrickými a pneumatickými pohony. Vyznačují se vysokou rychlostí pohybu, přesností a tuhostí [23]. Jejich největší nevýhodou je malý pracovní prostor, který však lze zvětšit použitím pohybového ústrojí [24]. V průmyslové praxi se nejčastěji používají tři varianty těchto robotů – Delta, Tricept a Hexapod [25].

Delta robot vyniká svou rychlostí, ale z důvodu jejich nízké nosnosti a tuhosti se tento typ robotu používá nejčastěji v rychlých manipulačních úlohách drobných objektů. Pro obráběcí aplikace není příliš vhodný [25].

Tricept robot (obr. 4) byl původně navržen pro přesné montážní linky, ale díky jejich vysoké tuhosti a flexibilitě se využívají i pro obrábění [25]. Robot se skládá ze tří paralelních ramen a zápěstí se třemi stupni volnosti [26].

Hexapod robot (obr. 4), též Stewartova plošina se skládá ze šesti paralelních ramen, což nabízí 6 stupňů volnosti, stejně jako Tricept robot. Tento typ robotu rovněž nabízí vysokou tuhost, ale malý pracovní objem [27, 28].



Obr. 4 Tricept robot [26] vlevo a Hexapod robot [28] vpravo

Angulární roboty jsou velmi rozšířené napříč většiny průmyslových aplikací. Tyto roboty mají otevřenou kinematickou strukturu, proto mají oproti paralelním robotům nižší tuhost ale výrazně větší pracovní prostor. Obvykle se skládají ze šesti sériově propojených článků, což jim poskytuje 6 stupňů volnosti – proto se někdy nazývají jako sériové [20].

Podle použití lze strukturu těchto robotů modifikovat na tzv. kvazi – sériovou. Toho se docílí zavedením paralelního kinematického řetězce tzv. paralelogramu do běžné struktury angulárního robotu, čímž se zvyšuje tuhost systému. Kvazi – sériové roboty jsou vhodnější pro velkorozměrné obráběcí operace a běžné angulární roboty jsou vhodné pro obrábění malých a středně velkých obrobků [29].



Obr. 5 Kvazi – sériový robot Fanuc M-900iB/700 [30]

2.3.2 Možnosti minimalizace chyb robotu

Prvotní možností minimalizace chyb robotů v důsledku jejich nízké tuhosti je tuhost robotu zvýšit. Například pro robotické frézování tvrdších materiálů se často zvyšuje tuhost systému upnutím efektoru do pátého kloubu na konci kinematického řetězce robotu (obr. 6). Tímto způsobem se odebere jeden stupeň volnosti a dojde tak ke snížení pohyblivosti. Nicméně 5 stupňů volnosti je stále dostačující pro obrábění i velmi komplexních 3D tvarů [20].



Obr. 6 Upnutí koncového efektoru v 6 kloubu (vlevo) a upnutí v 5 kloubu (vpravo) [20].

Při zachování všech šesti stupňů volnosti je další možností minimalizace chyb v důsledku nízké tuhosti optimalizace polohování. Pro obráběcí operace jako je například vrtání nebo frézování stačí pouze 5 stupňů volnosti; 3 stupně volnosti pro navigování nástroje v prostoru a 2 pro správné natočení nástroje. To znamená, že jeden stupeň volnosti přebývá a vzniká tak nekonečně mnoho způsobů jak požadované polohy a natočení nástroje dosáhnout, přičemž každá poloha robotu má jinou tuhost. Proto byly vytvořeny různé metody, jak určit optimální polohu [31]. V návaznosti na tuto problematiku má vliv na polohu – tuhost robotu i umístění obráběného dílu [32].

Další možností kompenzace chyb je užití optických senzorů, které využívá laserový senzor a odrazku (reflektor) pro zjištění skutečné polohy nástroje v prostoru. Při porovnání změřené polohy a dat z robotu lze spočítat odchylka skutečné trajektorie od nominální. Pro zvýšení přesnosti tohoto systému lze místo odrazky použít 6-D sondu, pomocí níž lze měřit i skutečnou orientaci nástroje. [20]. Tento způsob nevyžaduje přímý zásah do řídicího systému robotu, ale vyžaduje externí vybavení a kvůli omezené viditelnosti laserového senzoru zmenšuje pracovní prostor [33].

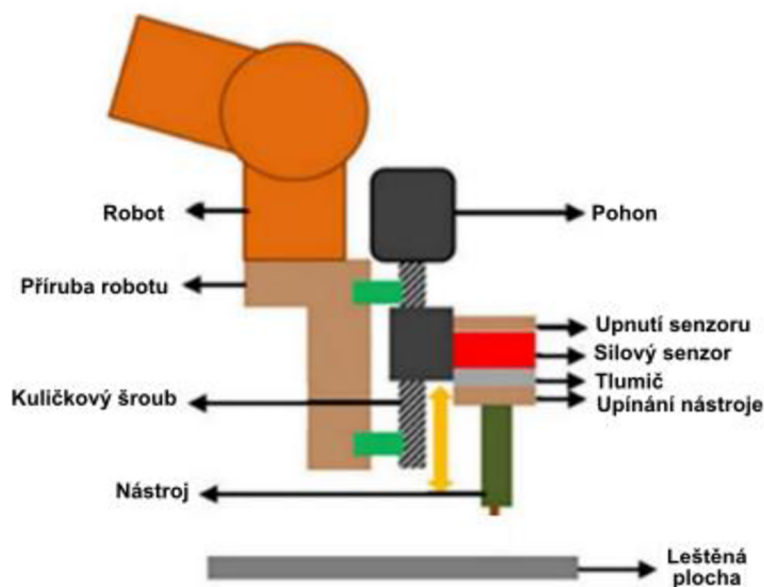
Zmíněné metody však nejsou schopny dostatečně rychle reagovat na změnu polohy nástroje či změnu působící síly při obrábění. Proto je vhodné patřičně upravit koncový efektor robotu, což výrazně zrychlí reakce na vibrace a náhlé změny obráběcích sil [34].

2.3.3 Obráběcí vřetena a kompenzátory polohy

Robotická obráběcí vřetena se liší podle způsobu obrábění a podle obráběného materiálu. Kvůli omezeným nosnostem robotů jsou navrhována tak, aby byla co nejlehčí [35]. Základními parametry robotických vřeten jsou provozní otáčky, výkon, maximální kroutící moment, vstupní napětí, způsob upínání nástroje a způsob upínání vřetena na přírubu robotu [36].

Pro dosažení nejlepších možných výsledků je také důležité zvážit užití vhodných kompenzátorů polohy/síly. Hlavními a nejrozšířenějšími způsoby jsou elektrické a pneumatické. Existují ale i další možnosti – například hybridní (elektropneumatické) [22] a piezoelektrické [37, 38].

Elektrické kompenzátory se mohou skládat z elektromotoru, převodového mechanismu, který rotační pohyb motoru převede na přímočarý a silového senzoru (viz. obr. 7). Je však možné využít i lineárních pohonných jednotek. Výhodami elektrických kompenzátorů je snadnost propojení, snadnost ovládání a vysoká tuhost. Nevýhodami je jejich vysoká hmotnost a náchylnost na vibrace [22].



Obr. 7 Elektrický kompenzátor polohy [22]

Pneumatické kompenzátory vykazují větší poddajnost (díky vlastnostem stlačitelnosti vzduchu). To umožňuje těmto kompenzátorům se lépe přizpůsobit různým

podmínkám a pohybům, což je činí flexibilnější pro různé aplikace. Díky tomu jsou rozšířenější než kompenzátory elektrické [22].

2.3.4 Možnosti programování trajektorie robotu

Programování představuje metodiku řízení operací a pohybů robotu. Základním cílem programování robotu je stanovení trajektorie robotu. Trajektorie je dráha, po které se nástroj pohybuje. Bod nástroje, který danou trajektorii sleduje se nazývá “Tool Center Point” (TCP). Vhodné nastavení TCP zjednodušuje programování robotu a umožňuje snadný převod trajektorie na jiný nástroj či robot. TCP se nastavuje na referenční bod nástroje, který je klíčový pro danou technologickou operaci, nejčastěji se jedná o středový koncový bod nástroje a je definován posunem a natočením od předdefinovaného referenčního bodu, který je výrobcem nejčastěji definován ve středu příruby robotu pro efektor [39].

Trajektorie je definována pomocí jednotlivých bodů, jejich souřadnic v kartézském souřadném systému a orientace. Kromě jednotlivých bodů je pro správné nadefinování trajektorie také důležitý způsob, jakým se TCP bude pohybovat z bodu A do bodu B. Existují 3 typy těchto pohybů:

- Lineární pohyb, označován jako “Move L”, kdy pohyb z bodu A do bodu B sleduje přímku.
- Kloubový pohyb (Joint Movement), označován jako “Move J”. Tento pohyb sleduje nejrychlejší možnou trajektorii z bodu A do bodu B, která nemusí být nutně ta nejkratší, což může být v některých případech velmi nepředvídatelné.
- Kruhový pohyb, označován jako “Move C”. V tomto případě je pohyb veden po kružnici. Pro definování tohoto pohybu jsou nutné 3 body. Výchozí bod (bod A), cílový bod (bod B) a dodatečný bod, který leží na kružnici žádaného pohybu a slouží pro výpočet poloměru kružnice [40].

Programování lze rozdělit na dva způsoby, online a off-line programování. Online programování probíhá přímo na robotu pomocí “teach-pendantu”. Programátor zde může snadno tvořit či upravovat programy přímo v jazyku robotu. Programování trajektorie může probíhat postupným najížděním cílových bodů a jejich ukládáním, ale je možné

vypisovat cílové souřadnice ručně. Výhodou online programování je, že není nutné pořizování dalšího softwaru. Nevýhodou však je odstavení robotu z provozu a vysoká obtížnost programování komplexních úloh. Tento způsob je vhodný pro jednoduché aplikace [41].

Off-line programování probíhá na počítači mimo robotické pracoviště. Používá se k němu speciálních simulačních softwarů, které bývají často dodávány výrobcem robotů, ale existují i univerzální simulační softwary (např. RoboDK). Takto vytvořené programy jsou následně pomocí postprocesoru pro daný robot převedeny do jazyku robotu. Cena simulačních softwarů může být poměrně vysoká, ale protože není nutné zastavovat výrobu pro tvorbu nových programů je jejich návratnost velmi rychlá. Tento způsob rovněž usnadňuje tvořit velmi složité programy, které by online programováním bylo prakticky nemožné vytvořit [41].

Software RoboDK nabízí 4 možnosti naprogramování trajektorie. Trajektorie může být vytvořena přímo v uživatelském rozhraní pomocí jednotlivých bodů (tzv. targetů), nebo mohou být body nadefinovány pomocí programovacího rozhraní (application programming interface – API). RoboDK podporuje Python, C# a Matlab. Další možností je nahrát trajektorii z CAD softwaru a oficiálního RoboDK pluginu. Nahrání trajektorie tímto způsobem vyžaduje vytvoření skici a modelu obráběného dílu v podporovaném CAD softwaru. Plugin následně automaticky sám vytvoří potřebnou trajektorii. Tímto způsobem je možné definovat i orientaci nástroje s ohledem na libovolnou plochu. Dalším způsobem je vytvoření trajektorie ve formátu textového nebo csv dokumentu v libovolném programovacím jazyku. Poslední možností je užití G-codu vygenerovaného pomocí libovolného sliceru nebo CAM softwaru [42].

Při programování trajektorie se vyskytují další problémy. Například výskyt tzv. singularit. To jsou body uvnitř pracovního objemu robotu, kde se robot nemůže plynule pohybovat nebo jich není vůbec možné dosáhnout. Singularitám se lze vyhnout správně zvolenou konfigurací robotu a vhodným umístěním obráběného dílu v prostoru [44]. Důležité je také umístění tzv. framů, což jsou lokální souřadné systémy, ke kterým se vztahují souřadnice dané trajektorie. Jejich vhodné umístění může výrazně zjednodušit proces tvorby a úpravy programů [42].

2.4 Shrnutí zásadních východisek pro praktickou část

V kapitole 2 byl podrobně rozebrán současný stav v oblasti robotického obrábění, broušení a leštění. Byly popsány vlivy jednotlivých technologických parametrů, užitých nástrojů na rychlost a kvalitu broušení a leštění a byly rozebrány i procesy, které se na broušení a leštění podílí. Byli rovněž prozkoumány vhodné typy robotických struktur pro obrábění, možnosti jejich programování a možnosti optimalizace sledování trajektorie. V této kapitole jsou stručně shrnuty základní východiska pro praktickou část, která se zabývá konstrukcí včetně s axiální kompenzací polohy nástroje pro dokončovací operace a programování vhodné trajektorie robotu pro broušení zvoleného objektu se zakřiveným povrchem.

Robotické obrábění neslouží jako náhrada konvenčních CNC strojů, ale pouze jako jejich alternativa, z důvodu nižší tuhosti. Jejich užití je výhodné zejména ve velkoformátových aplikacích, protože robot nabízí výrazně větší pracovní prostor. Proto v obráběcích aplikacích převažuje použití angulárních robotů oproti paralelním.

Snahou je vzniklé nepřesnosti během obrábění kompenzovat pomocí různých metod. Běžným způsobem je kompenzace pomocí řízení jednotlivých kloubů robotu, pomocí externích senzorů nebo úpravou řídicího systému, který přizpůsobuje aktuální polohu individuálních pohonů robotu. Tyto způsoby však nejsou schopny dostatečně rychle kompenzovat polohu při operacích jako je sledování trajektorie při obrábění, u kterých dochází k velmi rychlým odchýlkám. Proto je vhodné umístit kompenzační mechanismus přímo ke koncovému efektoru, což odezvu na změnu polohy výrazně urychlí.

Pro broušení nejen skleněných výrobků jak volným, tak vázaným nástrojem je nejdůležitějším parametrem druh brusiva, jehož tvrdost musí být vyšší než tvrdost obráběného materiálu. Pro opracovávání skla je vhodné užití brusiva z oxidu ceričitého či syntetického diamantu.

Součástí praktické části je i programování robotu. Jelikož je při obrábění důležité přesné sledování trajektorie i natočení koncového efektoru v celém průběhu obrábění, tak je vhodné robot naprogramovat pomocí off-line programování v simulačním softwaru,

jako je například RoboDK, který umožňuje simulovat celý proces mimo RTP a předcházet možným kolizím či jiným technologickým nedostatkům.

3 Návrh RTP a konstrukce efektoru

Tato kapitola se zabývá stanovením technologických procesních parametrů, které jsou zásadní pro konstrukci efektoru pro broušení a leštění tvarově složitých objektů ze skla s konstantním přtlakem nástroje oproti leštěné ploše. Je zde popsán současný způsob broušení těchto objektů firmou Polpur. Jejich současný způsob broušení skleněných sférických čoček sloužil jako výchozí bod pro stanovení procesních parametrů a byla snaha tento způsob do určité míry replikovat.

Na základě provedené rešerše byly navrženy 3 varianty možných řešení, které by bylo možné využít pro danou problematiku. Jednotlivé způsoby řešení se odlišují především způsobem axiální kompenzace přtláčné síly.

Byla rovněž provedena rozhodovací analýza, pomocí níž byla každá z variant ohodnocena dle daných kritérií s odpovídající vahou a byla vybrána nejvhodnější z nich pro danou problematiku. Pro zvolenou variantu řešení byly vybrány vhodné komponenty a byla navržena konstrukce systému společně s výkresovou dokumentací.

3.1 Definice procesních parametrů a východisek pro realizaci RTP

Současný proces broušení skleněných čoček probíhá na konvenčním stroji LOH HLP-500 firmy Polpur. Tento stroj je zobrazen na obr. 8.



Obr. 8 Konvenční stroj LOH HLP-500

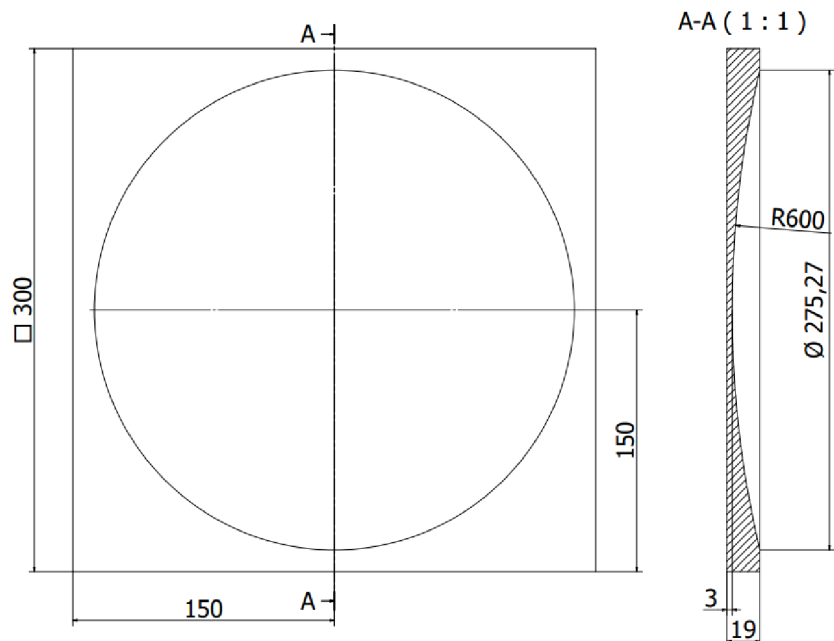
Tento způsob broušení čoček je ovlivňován několika procesními parametry, které mají zásadní vliv na konstrukci efektoru robotu a dalších periférií robotického technologického pracoviště. Je to především rychlost otáčení nástroje, rychlost posuvu nástroje, přitlačná síla, materiál a geometrie nástroje, druh leštící/brousící suspenze a tvar obráběného dílu.

Při broušení čoček tímto způsobem dochází ke dvěma simultánním pohybům současně, které jsou implementovány různými metodami. Jedná se o tyto pohyby:

- Otáčení obrobku na pracovním stole stroje
- Posuv nástroje, který realizuje svou trajektorii pomocí dvou excentrických kloubových mechanismů, které jsou navzájem propojeny.

Nástroj je při tomto způsobu broušení uložen volně. K jeho otáčení dochází vlivem tření mezi nástrojem a obrobkem rotujícím na pracovním stole. Nástrojem je zaoblený litinový kotouč, jehož poloměr zaoblení odpovídá poloměru broušeného povrchu.

Obrobkem, který byl vybrán jako vhodný pro prvotní testování prototypového robotického technologického pracoviště, byla skleněná konkávní sférická čočka o poloměru 600 mm viz obr 9. Tento tvar čočky byl vybrán z důvodu výrazně jednodušší aplikace brousící suspenze. Přivedená suspenze z konkávní čočky totiž neodtéká, ale shromažďuje se v nejnižším bodě čočky, odkud je při vhodném stanovení trajektorie nástroje opětovně přiváděna do místa řezu.

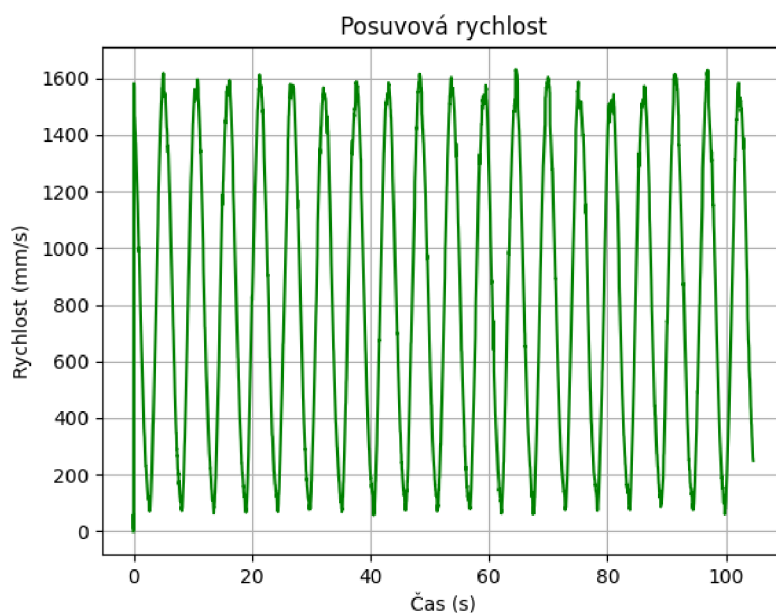


Obr. 9 Výkres broušeného dílu

3.1.1 Stanovení procesních parametrů

Z poznatků o současném stavu broušení konkávních čoček bylo stanoveno, že většina procesních parametrů zůstane na robotickém pracovišti nepozměněná. Bude využito stejné brousící suspenze, nástroje i rychlosti jeho otáčení. Pohyb nástroje však nebude realizován otáčením obrobku na pracovním stole a dodatečným pohybem nástroje, ale bude realizován plně robotem.

Vzhledem k tomu, že v současné technologii je hlavní složkou pohybu nástroje otáčení obrobku dochází ke fluktuaci posuvové rychlosti nástroje – na vnějším okraji čočky se nástroj pohybuje rychleji než v jejím středu. Průběh posuvové rychlosti je zobrazen na obr. 10 a byl vypočten z analýzy videozáznamu, který je blíže přiblížen v kapitole 4.3.2.



Obr. 10 Průběh posuvové rychlosti nástroje

Výpočet probíhal pomocí následujícího vzorce:

$$v = \frac{\sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2}}{\frac{1}{fps}} \quad (1)$$

Kde x_2 , x_1 , y_2 a y_1 značí souřadnice sousedních bodů a fps značí snímkovou frekvenci videozáznamu, který sloužil k analýze současného technologického procesu. Videozáznam i způsob získání souřadnic bodů je přiblížen v kap. 5.2. Nutné je však poznamenat, že výpočet byl pouze orientační, protože užitím Pythagorovy věty pro výpočet vzdálenosti mezi jednotlivými body dochází k zanedbání zaoblení trajektorie.

Posuvová rychlost je v současné technologii dána mechanismem realizujícím posuvný pohyb, ale pro dosažení lepších technologických podmínek bude posuvová rychlost na robotickém pracovišti konstantní. Pro prvotní testování byla rychlost stanovena na průměrnou hodnotu rychlosti posuvu z naměřených hodnot (832 mm/s) a z provedených pokusů bude rychlost posuvu upravena.

Rychlost otáčení nástroje byla rovněž odečtena z pořízeného videozáznamu.

Přítlačná síla je v současné technologii vyvíjena gravitací. Nástroj o průměru 200 mm, poloměru zaoblení 600 mm a hmotnosti 3,5 kg je zatížen dodatečným závažím o hmotnosti 3 kg a celková přítlačná síla tak odpovídá 64 N.

Souhrn stanovených procesních parametrů je uveden v tabulce 1.

Tab. 1 Přehled procesních parametrů

| | |
|-----------------------------------|-----------|
| Otáčky nástroje | 36 ot/min |
| Průměrná rychlost posuvu nástroje | 832 mm/s |
| Přítlačná síla | 64 N |

3.2 Návrh konstrukce RTP

V této kapitole budou rozebrány jednotlivé prvky robotického technologického pracoviště (RTP). Bude zde popsán vybraný robot, pracovní stůl a nástroj. Obrobek pro experimentální pokusy již byl popsán v kapitole 3.1 a efektoru jsou věnovány kapitoly 3.3, 3.4 a 4.3.

3.2.1 Robot

Jako robot byl pro RTP zvolen robot firmy KUKA, konkrétně model KUKA KR 90 R2700 pro (obr. 11). Jedná se o robustní angulární robot, jehož jmenovitá nosnost je 90 kg a maximální dosah je 2696 mm. Jeho další parametry jsou uvedeny v tab. 2. Pro dosažení příznivější polohy robotu vůči pracovnímu stolu byl robot umístěn na ocelový podstavec o hmotnosti 540 kg. Tento podstavec je zobrazen na obr. 12. Pro zamezení znečištění či poškození robotu vlivem vznikajících nečistot a dalších částic během broušení byly citlivé části robotu zakrytovány speciálními obaly.

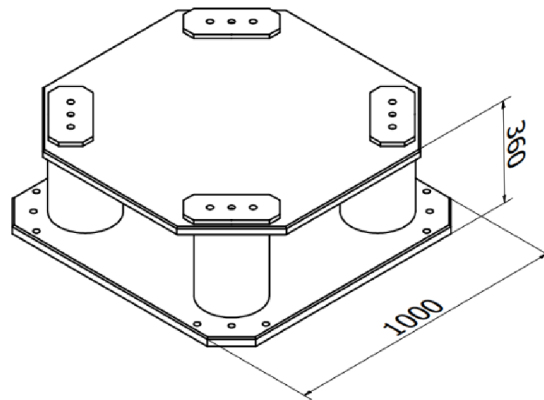
Důležité je také zmínit rozměry montážní příruby robotu, která hraje klíčovou roli při navrhování uchycení efektoru k robotu. Výkres montážní příruby je na obr. 13.

Tab. 2 Přehled vybraných parametrů robotu KUKA KR 90 R2700 [44]

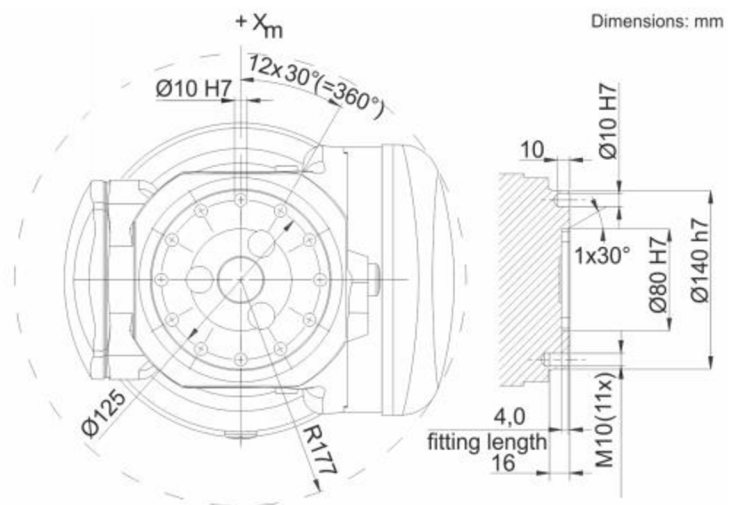
| | |
|--------------------------------------|---------------|
| Maximální dosah | 2696 mm |
| Jmenovitá nosnost | 90 kg |
| Jmenovité celkové zatížení | 140 kg |
| Přesnost opakování polohy (ISO 9283) | ± 0.06 mm |
| Počet os | 6 |
| Hmotnost | 1058 kg |
| Řídicí systém | KR C4 |



Obr. 11 Robot KUKA KR 90 R2700



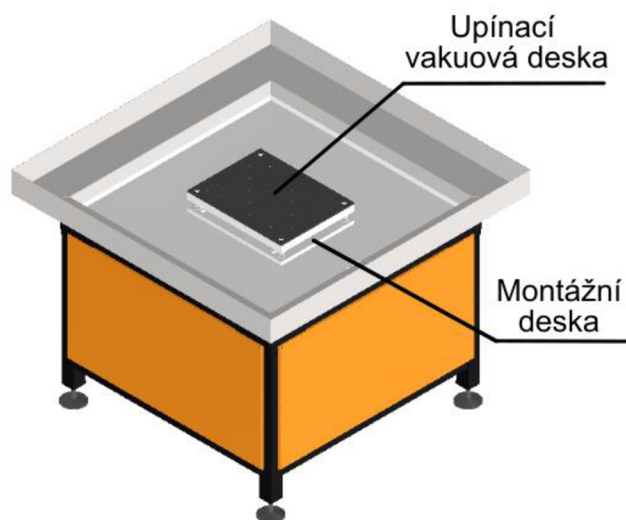
Obr. 12 Podstavec pro instalaci robotu



Obr. 13 Montážní příruba robotu [44]

3.2.2 Pracovní stůl

Pro upínání obrobků byl použit pracovní stůl opatřený montážní deskou se čtyřmi závitovými dírami M10. Na montážní desku je možné umístit upínací přípravek o maximálních rozměrech 900 x 900 mm a pomocí nivelačních elementů na montážní desce lze upínací přípravek vyrovnat. Jako upínací přípravek byla použita upínací vakuová deska. Pracovní stůl vybavený montážní a upínací vakuovou deskou je zobrazen na obr. 14.



Obr. 14 Technologický stůl

3.2.3 Nástroj

Geometrie nástroje zůstala zachována dle současné technologie. Změnil se však způsob jeho otáčení. V tomto laboratorním RTP se obrobek nebude otáčet, tudíž ani nemůže uvést do rotace nástroj. Proto byl litinový kotouč i osa nástroje opatřeny kolíkem, který bude přenášet kroutící moment otáčejícího se vřetene. Dle současné technologie byla jako leštící/brousící suspenze vybrána směs prášku oxidu ceru (CeO_2) s demineralizovanou vodou v poměru 1:20.

3.2.4 Vřeteno

Při výběru vhodného vřetena byly brány ohledy na požadované procesní parametry. Rychlost otáčení nástroje by měla odpovídat 36 ot/min. Takové otáčky jsou extrémně

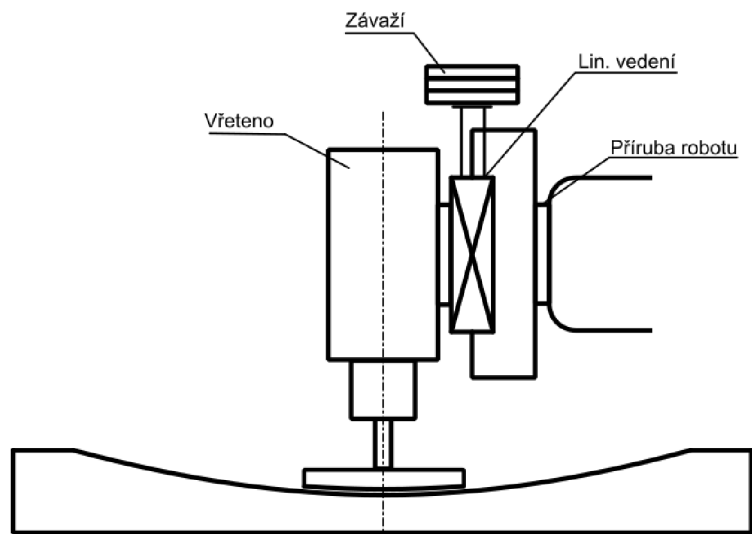
nízké a po důkladném průzkumu trhu nebylo nalezeno žádné vřeteno, které by splňovalo dané požadavky. Proto byl navržen vlastní systém pohánění a upínání nástroje.

3.3 Návrh a konstrukce vřetena s axiální kompenzací polohy nástroje

Tato kapitola je zaměřena na shrnutí možností axiální kompenzace polohy a regulace procesního tlaku a navazuje na provedenou rešerši v kap. 2.3.3.

3.3.1 Varianta 1 - Vřeteno s gravitační kompenzací polohy

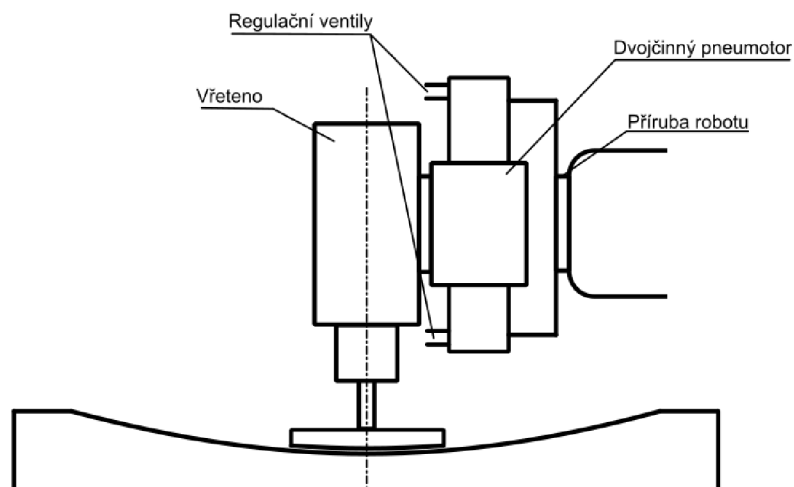
Využití gravitace je nejjednodušší způsob kompenzace polohy a stanovení tlaku na obráběnou plochu. Spočívá v rozvolnění robotického ramene ve svislé ose robotu tzn. že, robot nebude klást odpor vůči silám působících v daném směru. V tomto případě by byl tlak, který je vyvíjen na obráběnou plochu, definován pomocí závaží o přesně stanovené hmotnosti, podobně jak je tomu v současné konvenční technologii. Tento systém vyniká svou jednoduchostí, ale má i poměrně výrazné nevýhody. Jednou z těchto nevýhod je, že není možné měnit procesní tlak v průběhu obrábění, pouze před začátkem daného procesu, případně by bylo nutné zavést technologické pozastavení procesu pro změnu hmotnosti závaží, což by především ve větších výrobních sériích mohlo představovat výrazné snížení efektivity procesu. Rovněž by bylo nutné lidského operátora. Další nevýhodou je, že tento systém, představuje ryze axiální systém pouze v případě, když je osa vřetena a nástroje orientována svisle dolů. V případě natočení vřetena se síla vyvíjená závažím rozkládá na více složek a tím pádem síla v axiálním směru klesá. Proto není řešení s gravitačním kompenzátozem použitelné pro leštění designových ploch v odklonu od působení gravitační síly.



Obr. 15 Schéma gravitačního kompenzátoru polohy

3.3.2 Varianta 2 - Vřeteno s pneumatickou kompenzací polohy

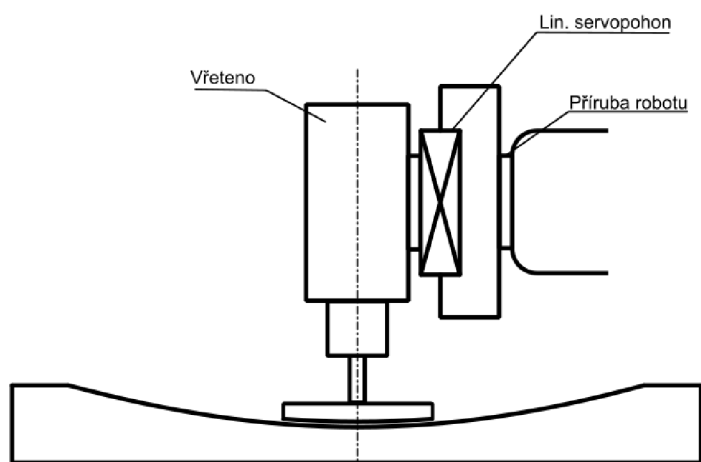
Pneumatické kompenzační jednotky jsou na trhu nejrozšířenější. Jsou ovládány nejčastěji dvojčinným pneumatickým válcem s regulačními ventily na obou stranách. Kompenzační síla je regulována pomocí provozního tlaku, což umožňuje snížení, či zvýšení kompenzační síly během procesu obrábění. Výhodou tohoto systému je i poddajnost tlakového vzduchu.



Obr. 16 Schéma pneumatického kompenzátoru polohy

3.3.3 Varianta 3 - Vřeteno s elektrickou kompenzací polohy

Elektrické kompenzátory nejsou na trhu příliš rozšířené. Jejich hlavním prvkem je servopohon, který umožňuje plynule regulovat pracovní tlak na obráběnou plochu. V případě užití rotačního servopohonu je nutné zavést mezi pohon a přírubu transformační blok. Výhodným řešením je použití lineárního servopohonu řízeného pomocí zpětnovazebního proudového řízení, což by snížilo složitost konstrukce systému, ale zvýšilo by cenu systému z důvodu vysokých nákladů na lineární servopohony. Schéma možného řešení s lineárním servopohonem je zobrazeno na obr. 17.



Obr. 17 Schéma elektrického kompenzátoru polohy

3.4 Výběr optimální varianty řešení vřetena

Cílem hledání optimální varianty řešení je identifikovat řešení, které nejlépe vyhovuje zvoleným kritériím. Kritéria lze definovat jako kvantitativní, kvalitativní, maximalizační nebo minimalizační, přičemž každé hodnotící kritérium musí být v souladu se zvolenými systémovými požadavky a procesními parametry stanovenými v kap. 3.1. Aplikací zvolených kritérií lze každou z variant vyhodnotit z hlediska dosažitelnosti daného kritéria vůči ostatním variantám.

Zvolená rozhodovací analýza zahrnuje použití normovaných vah. Všechny varianty byly následně porovnány a ohodnoceny/seřazeny dle každého kritéria. Dílčích výsledků se dosáhne vynásobením normované váhy daného kritéria s odpovídajícím pořadím. Po sečtení každého dílčího výsledku se vybere verze s nejnižším dosaženým

součtem pořadí. Hodnotící kritéria, jednotlivé váhy a normované váhy jsou zobrazeny v tab. 3.

Tab. 3 Hodnotící kritéria

| Kritéria | Váha v_j | Normovaná váha w_j |
|-------------------------|------------|----------------------|
| Flexibilita K1 | 4 | 0,4 |
| Nároky na konstrukci K2 | 3 | 0,3 |
| Úroveň řízení K3 | 2 | 0,2 |
| Cena K4 | 1 | 0,1 |
| Celkem | 10 | 1,00 |

Za nejdůležitější hodnotící kritérium byla vybrána flexibilita. Systém vřetena s kompenzačním systémem musí umožňovat obrábění různě zakřivených povrchů z různých stran obráběného objektu. Dalším kritériem byly nároky na konstrukci kompenzačního systému a byla mu přidělena druhá nejvyšší váha.

Úrovní řízení se rozumí schopnost systému regulovat sílu nástroje na povrch. Na zřetel byl brán především silový rozsah kompenzátoru, rychlost regulace a případná poddajnost kompenzátoru, které je důležitá při velmi náhlých změnách kompenzačních sil. Úrovní řízení byla přidělena třetí nejvyšší váha.

Z pohledu ceny byl proveden odhad a byly porovnány především ceny jednotlivých akčních členů podílejících se na axiální kompenzaci síly nástroje na povrch obráběného dílu. Protože je však cena akčních členů oproti robotu výrazně nižší byla ceně přidělena nejnižší váha.

Tab. 4 Vyhodnocovací tabulka

| | K1 | K2 | K3 | K4 | $\sum K_j \cdot w_j$ | Celkové pořadí |
|------------|-----|-----|-----|-----|----------------------|----------------|
| Varianta 1 | 3 | 3 | 3 | 1 | 2,8 | 3 |
| Varianta 2 | 1 | 1 | 1 | 2 | 0,9 | 1 |
| Varianta 3 | 2 | 2 | 2 | 3 | 2,1 | 2 |
| w_j | 0,4 | 0,3 | 0,2 | 0,1 | | |

Z provedené analýzy vyplynulo, že jako nejvhodnější se jednoznačně jeví varianta č.2 - pneumatický kompenzátor polohy, který poskytuje nejlepší flexibilitu, úroveň řízení i nároky na konstrukci.

4 Konstrukce vřetena a tvorba experimentálního pracoviště

Tato kapitola je zaměřena na konstrukci vřetena a kompenzátoru polohy, což jsou klíčové prvky RTP pro broušení a leštění skleněných desek. Vřeteno a kompenzátor polohy musí splňovat procesní parametry stanovené v kap. 3.1.

4.1 Návrh kompenzátoru polohy

Základním požadavkem na kompenzátor polohy bylo, aby kompenzátor byl schopný vyvinout dostatečnou sílu na broušenou plochu. Další požadavek byl, aby kompenzátor poskytoval dostatečný rozsah pohybu (± 10 mm).

Po důkladné analýze trhu byl vybrán pneumatický kompenzátor DAS od firmy DEPRAG, který je vhodný i pro stacionární aplikace. Disponuje aktivním odměřováním polohy vřetene, piezoelektrickou regulací sil, silovým rozsahem -200 až $+250$ N a rozsahem pohybu $0-45$ mm. Pro komunikaci slouží rozhraní Ethercat P. Jeho celková hmotnost je $10,5$ kg a provozní tlak $6,3$ bar [45]. Zvolený kompenzátor je zobrazen na obr. 18.



Obr. 18 Pneumatický kompenzátor polohy DAS

4.2 Návrh vřetene

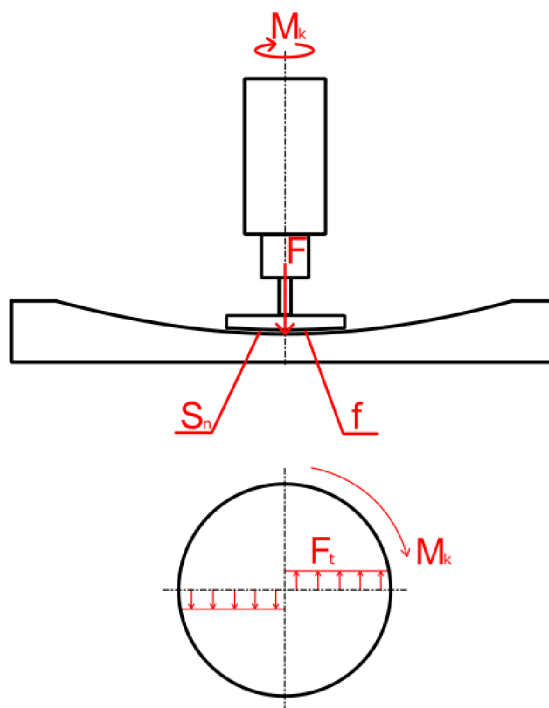
Jelikož žádný výrobce nenabízí nízko otáčková vřetena splňující požadavky stanovené v kap. 3.1, bylo nutné buď vybrat některé z dostupných vřeten, jejichž minimální otáčky se pohybovaly kolem 3000 ot/min a redukovat je pomocí převodovky, nebo pohon nástroje realizovat pomocí servopohonu s již zabudovanou převodovkou. Jelikož by implementace převodovky do existujícího vřetena vedla ke zbytečné komplexitě systému byl zvolen druhý postup.

Při návrhu vřetene je nutné brát v úvahu způsob upnutí nástroje, jehož volba je popsána v kap. 4.2.3.

Při výběru vhodného servopohonu bylo nutné brát v úvahu nejen jeho výstupní otáčky ale i další jeho parametry, zejména potřebný kroutící moment, viz kap. 4.2.1.

4.2.1 Výpočet potřebného kroutícího momentu

Na základě stanovených procesních parametrů v kap. 3.1.1, byl vypočítán potřebný minimální kroutící moment motoru pro překonání pasivních odporů – smykového tření mezi nástrojem a obrobkem. Schéma pro výpočet je na obr. 19.



Obr. 19 Schéma pro výpočet kroutícího momentu

Základní podmínkou pro výpočet bylo

$$M_k > M_t + M_D \quad (2)$$

kde M_k značí potřebný minimální kroutící moment motoru, M_d značí dynamický moment a M_t značí moment vzniklý smykovým třením mezi nástrojem a obrobkem. Celkový třecí moment byl spočítán pomocí součtu elementárních momentů po celé ploše nástroje.

$$M_t = \int p_t \cdot f \cdot r \cdot dS \quad (3)$$

V rovnici 3 značí f koeficient smykového tření. V případě litina – sklo je koeficient tření roven 0,2 – 0,3 [46]. Rameno třecí síly je označeno jako r a normálová tlaková síla je označena jako p_t , která je stejně jako koeficient tření konstantní po celé ploše a lze vypočítat jako podíl normálové síly působící na nástroj F_n ku ploše nástroje S_n . Jelikož by vřeteno mělo být schopno pracovat v plném rozsahu zvoleného kompenzátoru byla za F_n dosazena maximální síla kompenzátoru. Za dS bylo následně dosazeno, přičemž jako elementární povrch byla zvolena kružnice o poloměru r . Po dosazení vypadal a zavedení mezi integrálu od 0 do R vypadal vztah pro výpočet třecího momentu následovně:

$$M_t = \frac{F_n \cdot f}{S_n} \int_0^R r \cdot 2 \cdot \pi \cdot r \cdot dr \quad (4)$$

Ve vztahu 4 je součin F_n a f roven třecí síle F_t , která je znázorněna obr. 19. Z tohoto vztahu byli již všechny hodnoty známé a jsou uvedeny v tab. 5.

Tab. 5 Parametry pro výpočet třecího momentu

| | |
|-------|-----------------------|
| F_n | 250 N |
| f | 0,3 |
| S_n | 31637 mm ² |
| R | 100 mm |

Po integraci a dosazení hodnot se třecí moment rovnal:

$$M_t = 2 \cdot \pi \cdot \frac{250 \cdot 0,3}{0,031637} \cdot \frac{0,1^3}{3} = 4,97 \text{ Nm} \quad (5)$$

Po zjištění potřebného kroutícího momentu od pasivních odporů, bylo pro zajištění rozběhu motoru také nutné stanovit dynamický moment. Dynamický moment byl vypočítán z rovnice 6

$$M_D = J_Z \cdot \varepsilon \quad (6)$$

kde je

J_Z – moment setrvačnosti zátěže [$\text{kg} \cdot \text{m}^2$]

ε – úhlové zrychlení [$\text{rad} \cdot \text{s}^{-2}$]

Moment setrvačnosti zátěže byl spočítán jako součet dílčích momentů setrvačnosti – řemenic a nástroje. Momenty setrvačnosti řemenic byly odečteny s CAD softwaru. Moment setrvačnosti hnané řemenice J_2 se rovnal $0,000682 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ a moment setrvačnosti hnací řemenice J_1 se rovnal $0,000963 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$. Moment setrvačnosti nástroje byl vypočten ze vztahu 7.

$$J_N = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2 = \frac{1}{2} \cdot 3,5 \cdot 0,1^2 = 0,0175 \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \quad (7)$$

Pro stanovení úhlového zrychlení byla stanovena doba rozběhu na 0,2 s. Úhlové zrychlení bylo následně vypočteno jako podíl úhlové rychlosti ku době rozběhu.

$$\varepsilon = \frac{\omega}{t_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60 \cdot t_1} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 36}{60 \cdot 0,2} = 18,84 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-2} \quad (8)$$

Dynamický moment byl následně stanoven dosazením do vztahu 6.

$$M_D = (J_N + J_1 + J_2) \cdot \varepsilon = (0,0175 + 0,000963 + 0,000682) \cdot 18,84 = 0,4 \text{ Nm} \quad (9)$$

Z uvedených výpočtů vychází, že celkový potřebný kroutící moment je 5 Nm a že hlavní složkou pro potřebný kroutící moment jsou pasivní odpory. Nicméně je potřeba počítat s určitou rezervou, protože v případě, že se nástroj bude roztáčet za plného přítlaku na broušenou plochu, tak bude potřeba překonat i počáteční odpor adhezních sil.

4.2.2 Výběr servopohonu

Jako servopohon vřetene pro obrábění skleněných desek splňující požadavky stanovené v kap. 3.1.1 a 4.2.1 byl vybrán servopohon DS 70 od firmy TG Drives. Jedná

se o kompaktní synchronní servopohon s permanentními magnety s cykloidní převodovkou. Tento typ pohonu se používá v oblasti robotiky manipulátorů, CNC strojů atd. Mimo jiné se vyznačuje nízkou hmotností a bezúdržbovým provozem. Jeho stupeň krytí IP67 zajišťuje plnou ochranu proti vnikání prachu a odolnost proti dočasnému ponoření do vody, což činí tento servopohon vhodný i pro průmyslové aplikace nebo prostředí, kde hrozí kontakt s vodou či jinými procesními kapalinami. Jmenovité vstupní otáčky motoru jsou 2000 ot/min a maximální otáčky motoru jsou 5000 ot/min. Rozsah vstupních otáček s převodovým poměrem 57 nabízí rozsah výstupních otáček od 35 ot/min do 87,7 ot/min, což je pro tuto aplikace optimální. Jmenovitý moment tohoto servopohonu je 50 Nm, což je výrazně vyšší, než je potřebné pro tuto konkrétní aplikaci, ale z důvodu testování a hledání optimálních technologických podmínek by mělo být navrhované vřeteno flexibilní a mělo by být schopno dosáhnout i vyšších otáček. Vyšších otáček by bylo možné dosáhnout převodem do rychla, čímž by se ale snížil moment na výstupu vřetene. Jelikož není nutné držet přesnou polohu servopohonu tak byla vybrána verze bez brzdy s resolverem.

Tab. 6 Parametry servopohonu DS 50 [47]

| | |
|---------------------------|-------------|
| Převodový poměr | 57 |
| Jmenovité výstupní otáčky | 35 ot/min |
| Maximální výstupní otáčky | 87,7 ot/min |
| Dovolená axiální síla | 4,1 kN |
| Jmenovitý moment | 50 Nm |
| Hmotnost | 2.35 kg |
| Jmenovitý výkon | 270 W |

4.2.3 Výběr sklíčidla

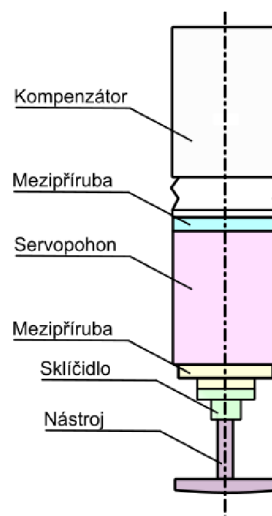
Po výběru vhodného pohonu vřetene bylo nutné vyřešit upnutí nástroje. Nástrojem je litinový kotouč se stopkou jejíž průměr je 8 mm. Pro upnutí tohoto nástroje bylo zvoleno kleštinového sklíčidla (viz obr. 20) o průměru 80 mm, které je navrženo pro upnutí kleštin ER 32. Tyto kleštiny dle normy DIN 6499 umožňují upnutí průměrů stopky od 1 do 21 mm.



Obr. 20 Kleštinové sklíčidlo

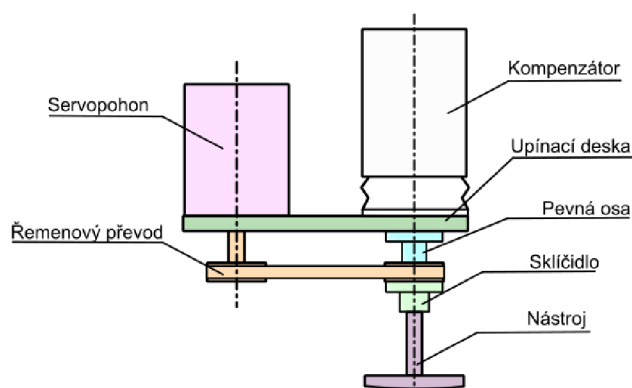
4.3 Uspořádání jednotlivých komponent systému

Pro návrh kompletního systému robotického vřetena, skládajícího se z kompenzační jednotky, rotačního aktuátoru a kleštinového sklíčidla, je nezbytné navrhnout i optimální způsob propojení jednotlivých komponent. První možností je lineární uspořádání komponent pomocí přírub a spojek. Lineární uspořádání by zavádělo do konstrukce minimální množství vedlejších prvků a zajišťovalo by jednoduchou montáž a servis. Jak je ale patrné z obr. 21 tak varianta lineárního uspořádání s sebou nese nevýhodu nadměrné délky systému vřetene, což může omezovat jeho využití v prostorově omezených aplikacích a zvyšovat náchylnost na vibrace.

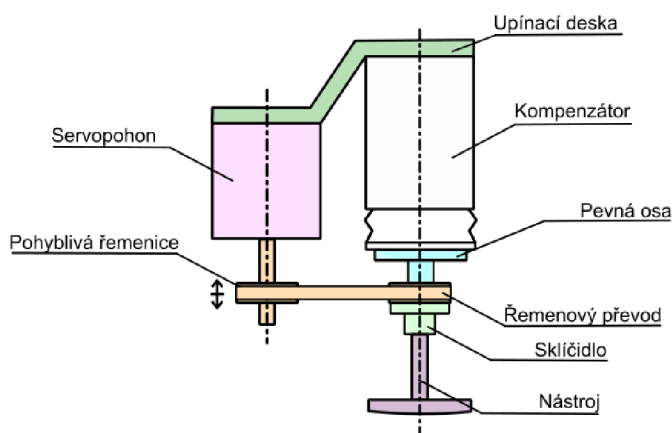


Obr. 21 Sériová konstrukce vřetene

Vhodnější variantou je umístění servopohonu mimo osu kompenzátoru a otáčení nástroje realizovat pomocí řemenového převodu. Umístěním servopohonu mimo osu kompenzátoru se eliminuje problém nadměrné délky systému a zavedením řemenového převodu se umožní regulovat otáčení nástroje. Umístění servopohonu mimo osu kompenzátoru je možné jejich umístěním na společnou upínací desku. Dva možné způsoby umístění jsou znázorněny na obr. 22 a obr. 23. Na obr. 22 je upínací deska umístěna na pohyblivou přírubu kompenzátoru a na obr. 23 je upínací deska umístěna mezi kompenzátor a přírubu robotu.



Obr. 22 Konstrukce vřetene s pohonem mimo osu kompenzátoru



Obr. 23 Konstrukce vřetene s pohonem mimo osu kompenzátoru s pohyblivou řemenicí

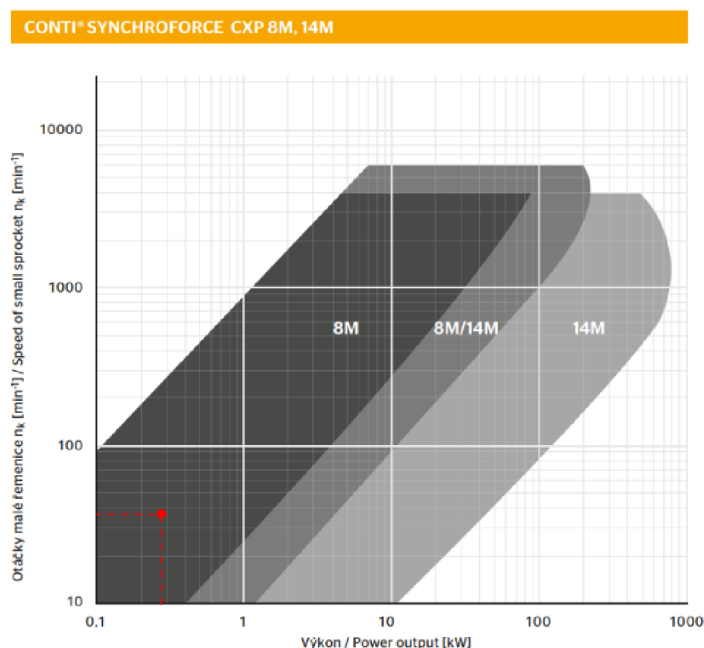
Umístěním upínací desky mezi kompenzátor a přírubu robotu se sníží dynamické zatěžování kompenzátoru a zvýší se tak jeho citlivost. Nevýhodou tohoto řešení je zvýšení složitosti z důvodu nutnosti zavedení pohyblivé řemenice, jejíž poloha by musela reagovat na pohyby kompenzátoru.

Umístěním upínací desky na pohyblivou přírubu kompenzátoru se sníží jeho citlivost, ale za předpokladu, že pohon bude pracovat v nízkých otáčkách by dynamika neměla být zásadní problém a snížení citlivosti by nemělo být výrazné. Umístěním desky na pohyblivou přírubu kompenzátoru se rovněž odstraní problém pohyblivé řemenice a nároky na konstrukci se sníží. Jelikož jsou pro návrh prototypového efektoru jedním z hlavních požadavků nízké nároky na konstrukci (viz kap. 3.4), tak byla vybrána tato varianta s řemenovým převodem a upínací deskou na pohyblivé přírubě kompenzátoru.

4.3.1 Návrh řemenového převodu

Jelikož byla vybrána konstrukce systému s řemenovým převodem, tak je nutné zvolit vhodný typ řemenu, navrhnout optimální osovou vzdálenost a velikost řemenic, vypočítat potřebnou délku řemene společně s dalšími parametry jako je například síla pro napnutí řemene.

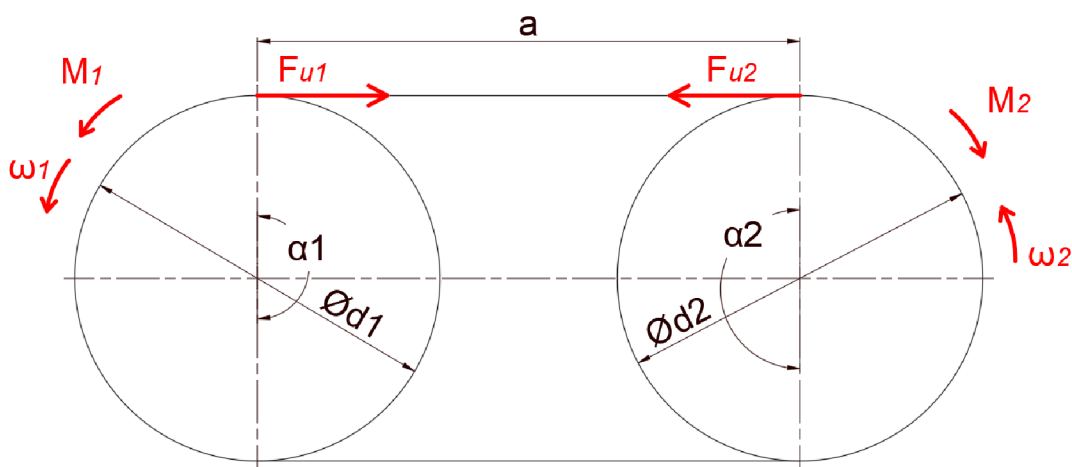
Pro dosažení konstantního převodového poměru, minimálního skluzu a přesných stabilních otáček je vhodné užít převodu s ozubeným řemenem. Proto byl vybrán typ řemenu Conti Synchroforce CXP s HTD profilem zubu. Z katalogu výrobce dle známých parametrů motoru (výkon 270 W a otáčky 36 ot/min) byl jako vhodný shledán profil řemene HTD 8M (viz. obr. 24) kde číslo 8 značí rozteč řemenových zubů v milimetrech.



Obr. 24 Diagram pro výběr řemenového profilu [48]

Pro výpočet ostatních nutných parametrů pro návrh řemenového převodu bylo nutné nejprve nadefinovat výchozí parametry. Z geometrických požadavků (velikost motoru, velikost kompenzátoru atd.) byla stanovena předběžná osová vzdálenost a_0 na 150 mm, která ale bude přepočtena dle dostupných délek výrobce. V závislosti na geometrické požadavky byla také z katalogu výrobce vybrána vhodná velikost řemenice s odpovídajícím profilem zubu. Jako vhodná byla shledána řemenice se 40 zuby a roztečným průměrem 101,86 mm. Jelikož jsou požadované otáčky již dosaženy samotným pohonem je potřebný převodový poměr 1:1 a druhá řemenice bude totožná.

Nejprve byla stanovena výpočtová délka řemene dle předběžné osové vzdálenosti a průměrů řemenic. Následně byla osová vzdálenost přepočtena dle dostupných délek řemenů z katalogu výrobce pomocí softwaru od výrobce "Conti Professional". Tento software byl použit i pro výpočet silových poměrů řemenového převodu. Výsledky ze softwaru byli následně validovány pomocí analytických výpočtů. Výpočty probíhaly dle schématu zobrazeného na obr. 25.



Obr. 25 Schéma pro výpočet řemenového převodu

Dosazením do rovnice 10 byla stanovena výpočtová délka řemene:

$$L_V = \frac{d_1}{2} \cdot \alpha_1 + \frac{d_2}{2} \cdot \alpha_2 + 2 \cdot a_0 \cdot \cos \left(\arcsin \left(\frac{d_2 - d_1}{2 \cdot a} \right) \right) = \quad (10)$$

$$= \frac{101,86}{2} \cdot \pi + \frac{101,86}{2} \cdot \pi + 2 \cdot 150 \cdot \cos(\arcsin(0)) = 620 \text{ mm}$$

Vypočtená délka 620 mm není u výrobce tohoto řemenu dostupná, proto byl z katalogu vybrán řemen o délce 624 mm a skutečná osová vzdálenost přepočtena.

Pro přepočtení osové vzdálenosti, výpočtu minimální šířky řemenu i silových poměrů byl použit online software od výrobce. Použití softwaru je zaznamenáno na obr. 26–27, přičemž zadávané parametry jsou na obrázcích zvýrazněny červeně.

Obr. 26 Definice vstupních parametrů

Obr. 27 Výsledky ze softwaru Conti Professional

Z uvedených výsledků je patrné, že skutečná osová vzdálenost je rovna 152 mm, vypočtená šířka řemene je 23,53 což vede ke zvolení řemenu s označením HTD 8M-640-30 CONTI SYNCHROBELT a řemenicím s označením 40-8M-30.

Kontrola výpočtu softwaru byla provedena analytickými výpočty viz rovnice 11-13. Pomocí rovnice 11 byla provedena kontrola skutečné osové vzdálenosti a rovnice 13 ověřovala periferní sílu v řemenu, přičemž bylo nutné přepočítat otáčky pohonu na úhlovou rychlost pomocí rovnice 12.

$$a = a_0 + \frac{L - L_v}{2} = 150 + \frac{624 - 620}{2} = 152 \text{ mm} \quad (11)$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 36}{60} = 3,77 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \quad (12)$$

$$F_{u1} = F_{u2} = F_u = \frac{P}{\omega \cdot r} = \frac{270}{3,77 \cdot 0,051} = 1404 \text{ N} \quad (13)$$

Z kontrolních výpočtů bylo ověřeno, že výpočty provedené softwarem byly správné.

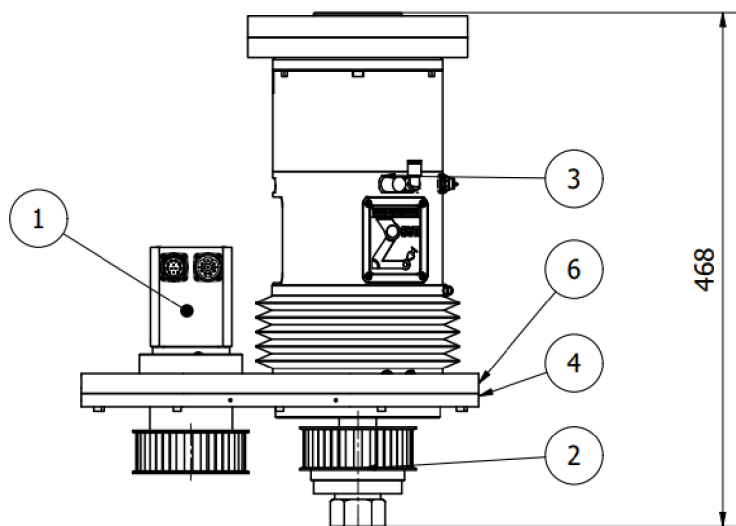
4.4 Konstrukční provedení vřetene

Po zvolení veškerých základních komponent vřetene a stanovení způsobu jejich uspořádání bylo nutné tyto komponenty vhodně propojit, aby vytvořily funkční celek, který umožňuje snadnou a přesnou montáž, demontáž a údržbu, a zajišťuje efektivní a rychlé přizpůsobení se potřebám v průběhu provozu. Pro návrh vhodných spojovacích prvků bylo využito katalogových a výkresových dokumentací poskytnutých výrobcí pohonu a kompenzátoru.

Pro snadnou montáž a demontáž bylo k problému propojení jednotlivých komponent přistupováno modulárně. Celá konstrukce vřetene byla rozdělena na menší celky, které budou sestaveny zvlášť a následně připevněny ke společné upevňovací desce.

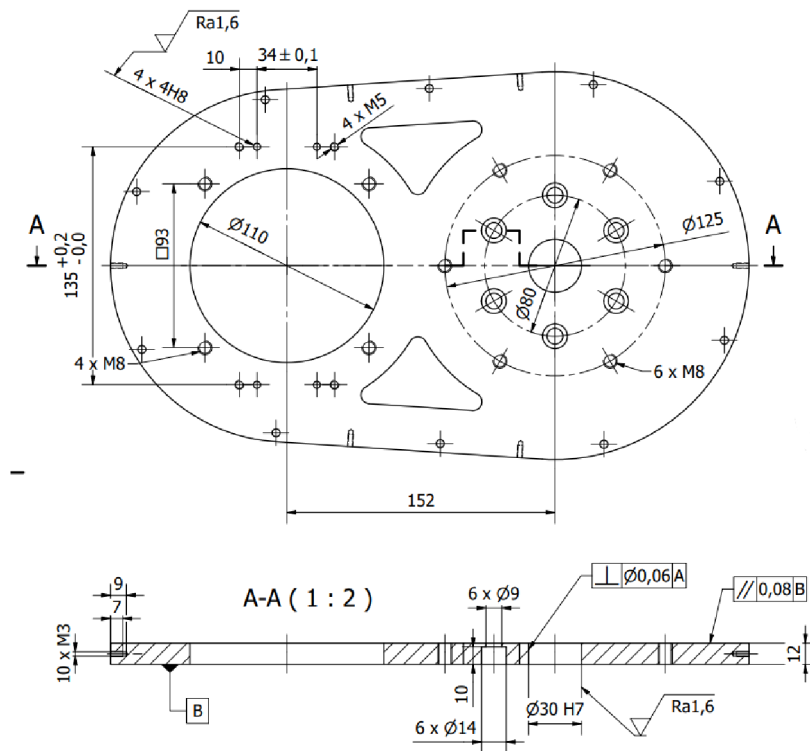
- Modul 1: Pohon, uchycení pohonu, hnací řemenice
- Modul 2: Pevná osa, hnaná řemenice, kleštinové sklíčidlo
- Modul 3: Kompenzátor, příruba ke kompenzátoru, příruba k robotu
- Zakrytování převodového mechanismu

System provedení technologického efektoru bez zakrytování je obr. 28. Kompletní sestavný výkres efektoru lze nalézt ve výkresové dokumentaci (3-DP S21000241-00-00).



Obr. 28 Modulární konstrukce vřetena

Modul 1 je zobrazen na pozici 1, modul 2 na pozici 2 a modul 3 na pozici 3. Na pozici 4 je upínací deska, která slouží pro propojení jednotlivých modulů. Pro zajištění snadné montáže a demontáže byly moduly k desce připevněny šrouby. Tloušťka upínací desky je 12 mm a byla opatřena otvory pro odlehčení konstrukce. Výkres upínací desky po obrobení je zobrazen na obr. 29 a detailní informace je možné nalézt ve výkresové dokumentaci (3-DP S21000241-00-01). Základní tvar této desky byl zhotoven řezáním vodním paprskem. Pro řezání vodním paprskem by musel být zhotoven výkres zvlášť, který by obsahoval díry bez zahloubení, malé průměry pro závit a neobsahoval by tolerované díry. Pro zvýšení tuhosti desky bylo navrženo žebro, které kopíruje obrys desky a rovněž bude sloužit pro uchycení šroubu pro napnutí řemene. Žebro je zobrazeno na obr. 28 na pozici 6.



Obr. 29 Upínací deska

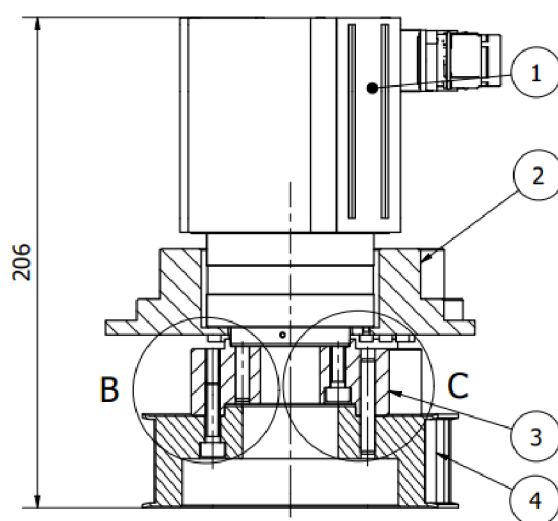
Pro zamezení vniku procesních kapalin a pevných částic byl navržen kryt z plechu o tloušťce 1,5 mm. Kryt byl navržen tak, aby ho bylo možné uchytit na upínací desku pomocí šesti šroubů a byla tak zajištěna jeho snadná montáž a demontáž. Detailní informace o zakrytování lze nalézt ve výkresové dokumentaci:

- 3-DP S21000241-04-00 (sestavný výkres krytu – svařence)
- 4-DP S21000241-00-01 (výrobní výkres malé strany krytu)
- 4-DP S21000241-00-01 (výrobní výkres velké strany krytu)
- 4-DP S21000241-00-01 (výrobní výkres základny krytu)

4.4.1 Modul 1

Modul 1 představující hnací ústrojí technologického efektoru je zobrazen v lomeném řezu na obr. 30. Pohon (kap. 4.2.2.) (pozice 1) byl nejprve umístěn do upínacího přípravku (pozice 2), který umožňuje upnutí modulu na upínací desku. Upínací

přípravek rovněž slouží pro napnutí řemene, proto byl opatřen drážkami a boční závitovou dírou pro napínací šroub. Propojení pohonu s hnací řemenicí (pozice 4) bylo navrženo pomocí duté hřídele (pozice 3), která byla připevněna k čelu pohonu pomocí šroubů a přenos kroutícího momentu byl zajištěn pomocí kolíku z nerezové oceli. Pro zajištění bezpečného provozu byla provedena pevnostní kontrola kolíku na smyk viz kap. 4.5.1. Dutá hřídel byla na svém vnějším, čelním průměru opatřena dírami se závity a dírou pro kolík pro montáž hnací řemenice, jejíž vnitřní průměr byl z důvodu snížení hmotnosti vysoustružen.



Obr. 30 Modul 1

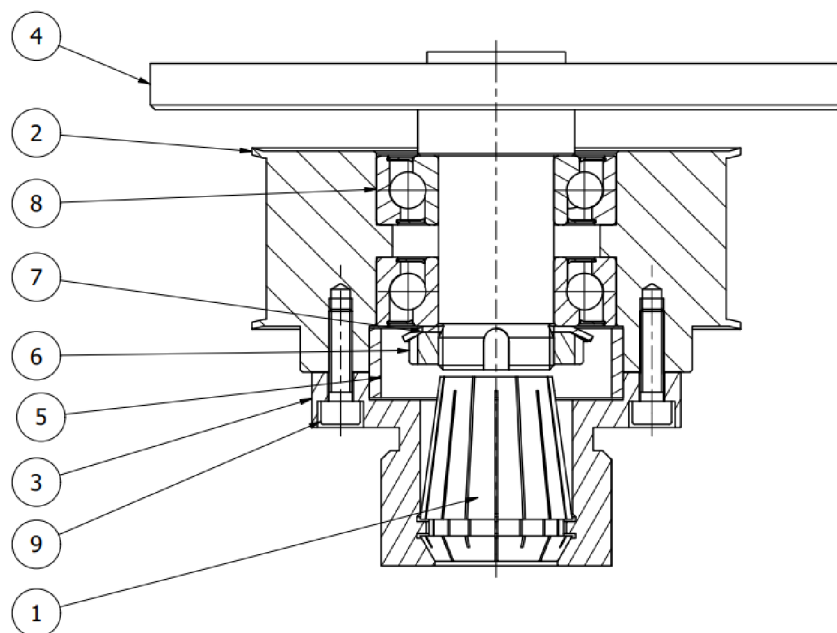
Aby nedocházelo k natáčení, či posouvání modulu v upínací desce vlivem vůle mezi šrouby a drážkami v upínacím přípravku byli rovněž navrženy dva vodící bloky, které nežádoucím pohybům zabrání. Vodící bloky byly přimontovány k upínací desce rovněž šroubovými spoji a jejich přesná poloha byla zajištěna dvěma kolíky.

Detailní informace o tomto modulu lze nalézt ve výkresové dokumentaci:

- 3-DP S21000241-01-00 (sestavňý výkres modulu 1)
- 3-DP S21000241-01-01 (výrobní výkres upínacího přípravku)
- 4-DP S21000241-01-02 (výrobní výkres hřídele)
- 4-DP S21000241-01-03 (výrobní výkres hnací řemenice)

4.4.2 Modul 2

Modul 2 (obr. 31) sloužil k převodu otáček a kroutícího momentu na nástroj. Toho bylo docíleno umístěním hnané řemenice (pozice 2) uložené na dvojici kuličkových ložisek s kosoúhlým stykem (pozice 8) uspořádaných do X na pevné hřídeli (pozice 4), která bude připevněna k upínací desce v ose kompenzační jednotky. Pro zajištění sousosty byla hřídel opatřena osazením. Poloha ložisek byla zajištěna osazením na hřídeli, osazením uvnitř řemenice a KM maticí (pozice 6) s pojistnou podložkou (pozice 7). Do čela řemenice byly vyvrtány závitové díry pro přišroubování kleštinového sklíčidla (pozice 3) a jeho vystředění bylo zajištěno středícím kroužkem. Kroutící moment z řemenice na sklíčidlo přenáší kolík z nerezové oceli.



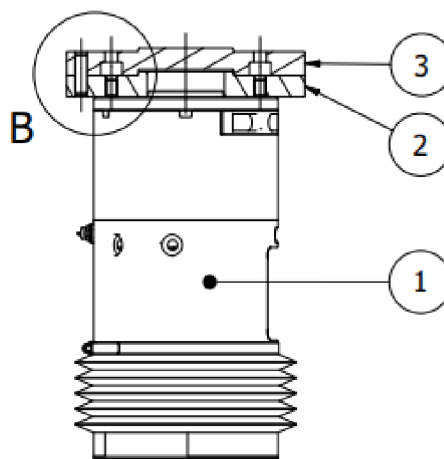
Obr. 31 Modul 2

Detailní informace lze nalézt na výkresové dokumentaci:

- 3-DP S21000241-02-00 (sestavný výkres modulu 2)
- 4-DP S21000241-02-01 (výrobní výkres hnané řemenice)
- 4-DP S21000241-02-02 (výrobní výkres pevné osy)

4.4.3 Modul 3

Jelikož jsou díry v kompenzátoru i v přírubě robotu pro upnutí na stejném průměru, tak nebylo možné použít pro upnutí jedné mezipříruby. Byly proto navrženy 2 příruby, jedna pro kompenzátor (blíže popsán v kap. 4.1.) a jedna pro robota, které byly následně spojeny šrouby po jejich obvodu. Pro zajištění vycentrování při sestavování byly obě příruby opatřeny tolerovanou dírou, resp. osazením. Pro zajištění nízké hmotnosti byly obě příruby zhotoveny z duralu (Al 6082). Řez tímto modulem je zobrazen na obr. 32, kde je kompenzátor označen jako poloha 1 a příruby jako poloha 2 a 3.



Obr. 32 Modul 3

Detailní informace lze nalézt na výkresové dokumentaci:

- 3-DP S21000241-03-00 (sestavný výkres modulu 3)
- 4-DP S21000241-03-01 (výrobní výkres příruby k robotu)
- 4-DP S21000241-03-02 (výrobní výkres příruby ke kompenzátoru)

4.5 Pevnostní kontrola navržených prvků

Po návrhu jednotlivých komponent a spojovacích prvků bylo nutné ověřit jejich volbu. Byla provedena pevnostní kontrola kolíků a byl vypočten součinitel statické bezpečnosti ložisek a jejich trvanlivost.

4.5.1 Pevnostní kontrola kolíkových spojů

Kolíky jsou lícovány bez vůle, proto se počítají na stříh a otláčení. Jsou vyrobeny z nerezové oceli A1 třídy 50 dle normy ČSN EN ISO 2338 a materiálové vlastnosti kolíků byly stanoveny dle normy ČSN EN ISO 3506-1 [49].

Jelikož je namáhání kolíků způsobeno kroutícím momentem od servopohonu, převodový poměr mezi hnací a hnanou řemenicí je 1 a průměry všech navržených spojovacích kolíků byly stejné (6 mm), tak byla provedena pevnostní kontrola pouze kolíku na nejmenším průměru, kde vzniká největší síla F působící kolmo na osu kolíku. Nejmenší průměr, na kterém byl kolík umístěn byl 40 mm a pevnostní kontrola byla provedena s ohledem na jmenovitý moment pohonu M_n motoru 50 Nm.

Nejprve bylo nutné stanovit sílu F , která se spočítala z kroutícího momentu a ramene působení (poloměru r).

$$F = \frac{M_n}{r} = \frac{50}{0,02} = 2500 \text{ N} \quad (14)$$

Následně byla provedena kontrola otláčení kolíku, přičemž podmínkou bylo, že musí být tlaky nižší než tlak dovolený, který je u zvolené oceli 125 MPa [50]. Tlak na kolík byl vypočítán dle následujících vzorců 15 a 16

$$p_1 = \frac{F}{s_1 \cdot d} = \frac{2500}{5,8 \cdot 6} = 71,84 \text{ MPa} \quad (15)$$

$$p_2 = \frac{F}{s_2 \cdot d} = \frac{2500}{20,2 \cdot 6} = 20,62 \text{ MPa} \quad (16)$$

kde s_1 a s_2 značí délku kolíku v dané součásti. Z výsledků je patrné, že tlaky na kolíku jsou nižší než tlak dovolený a kolík na otláčení vyhovuje. Následně byla provedena pevnostní kontrola na smyk, přičemž dovolené smykové napětí bylo stanoveno ze vztahu 17

$$\tau_{ds} = \frac{R_m \cdot 0,6}{k} = \frac{500 \cdot 0,6}{2} = 150 \text{ MPa} \quad (17)$$

kde je:

τ_{ds} – dovolené smykové napětí [MPa]

R_m – mez pevnosti v tahu [MPa]

k – koeficient bezpečnosti [-]

Následně byla vypočtena síla ve střihu jako poměr síly ku ploše průřezu kolíků dle rovnice 18.

$$\tau_s = \frac{F}{S} = \frac{4 \cdot F}{\pi \cdot d^2} = \frac{4 \cdot 2500}{\pi \cdot 6^2} = 88,42 \text{ MPa} \quad (18)$$

Smykové napětí na kolík je menší než dovolené smykové napětí, takže tento i všechny ostatní kolíky jsou navrženy správně.

4.5.2 Návrh ložisek

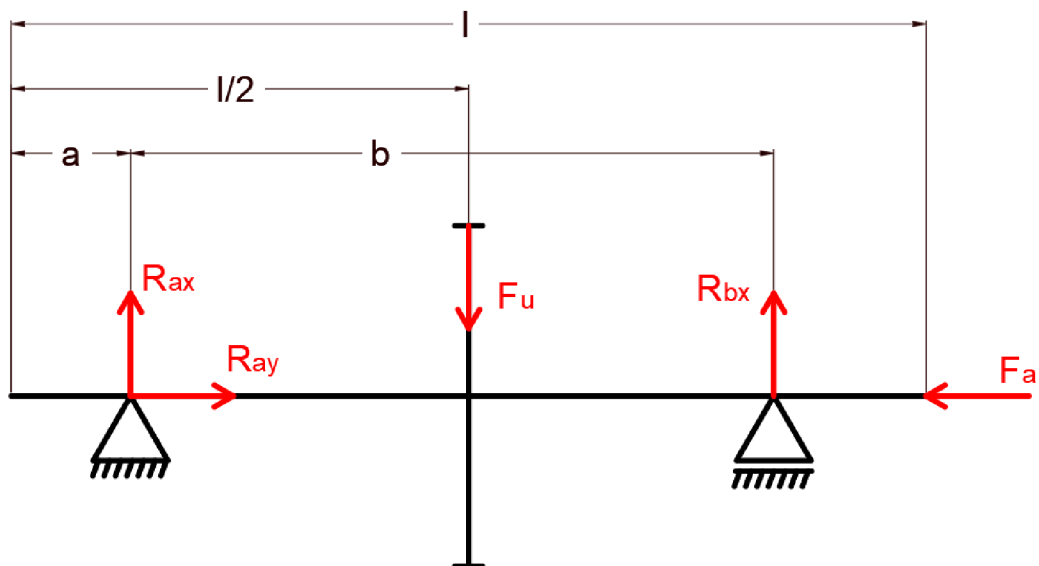
Ložiska byla vybrána od firmy SKF. Použita byla kuličková ložiska s kosoúhlým stykem s označením 7205 BE-2RZP a jejich parametry jsou v tab. 7. Zvolená ložiska obsahují těsnění.

Tab. 7 Parametry ložiska 7205 BE-2RZP [51]

| | |
|-------------------------------|------------------------|
| Dynamická únosnost | $C = 14,8 \text{ kN}$ |
| Statická únosnost | $C_0 = 9,3 \text{ kN}$ |
| Vnitřní průměr | $d = 25 \text{ mm}$ |
| Úhel styku | $\alpha = 40^\circ$ |
| Poměrový součinitel | $e = 1,14$ |
| Exponent rovnice trvanlivosti | $p = 3$ |

Pro ložiskové uložení byl spočítán součinitel statické bezpečnosti s_0 a základní trvanlivost ložisek L_{10h} . Pro tyto výpočty bylo nutné nejprve určit síly působící na ložiska v radiální a axiální směru. Jak je patrné z obr. 33, tak je axiální síla během leštění přenášena horním ložiskem. Pro navrhovanou aplikaci je axiální síla 64 N, ale vřetenem by

mělo být schopno pracovat v celém rozsahu kompenzátoru, proto byla pro výpočet použita maximální přítláčná síla kompenzátoru. Schéma pro výpočet reakcí je na obrázku 33 a délkové rozměry a velikost vnějších sil z obrázku jsou v tab. 8.



Obr. 33 Schéma pro výpočet reakcí ložisek

Tab. 8 Rozměry a velikost vnějších sil pro výpočet reakcí v ložiskách

| | |
|------------------|-----------------------|
| Vnější síly: | $F_a = 250 \text{ N}$ |
| | $F_u = 1406$ |
| Délkové rozměry: | $a = 7,5 \text{ mm}$ |
| | $b = 23 \text{ mm}$ |
| | $l = 38 \text{ mm}$ |

Reakce byly vypočítány pomocí metod statiky a výsledky jsou uvedeny v tab. 9.

Tab. 9 Výsledné reakce v ložiskách

| | |
|---------------------|--------------------------|
| Reakce v ložisku A: | $R_{AX} = 735 \text{ N}$ |
| | $R_{AY} = 250 \text{ N}$ |
| Reakce v ložisku B: | $R_{BX} = 671 \text{ N}$ |

Protože je poměr axiální síly ku radiální síle menší než poměrový součinitel ložiska e , tak se koeficient X_A rovná 1 a koeficient Y_A se rovná 0 [50]. Po stanovení koeficientů radiálního a axiálního zatížení již lze vypočítat ekvivalentní dynamické zatížení dle vztahu:

$$P_A = X_A \cdot F_R + Y_A \cdot F_a = 1 \cdot 735 + 0 \cdot 250 = 735 \text{ N} \quad (19)$$

$$P_B = X_B \cdot F_R + Y_B \cdot F_a = 671 \text{ N} \quad (20)$$

A následně se vypočítá trvanlivost ložiska dle vztahu:

$$L_{10h} = \frac{10^6}{60 \cdot n_1} \cdot \left(\frac{C}{P_B}\right)^p = \frac{10^6}{60 \cdot 36} \cdot \left(\frac{14800}{735}\right)^3 = 3\,779\,804 \text{ h} \quad (21)$$

Pro stanovení součinitele statické bezpečnosti ložisek je nutné znát ekvivalentní statické zatížení ložiska P_0 . Pro výpočet byly použity rovnice 22 a 23, kde F_r značí radiální sílu působící na ložisko, F_a značí axiální sílu působící na ložisko a X_0 a Y_0 značí koeficienty radiálního, resp. axiálního zatížení. Pro jednořadá kuličková ložiska s kosouhlým stykem o 40° je koeficient X_0 roven 0,5 a koeficient Y_0 0,26 [50]. Nejprve bylo spočítáno P_0 pro obě ložiska a následně bylo počítáno s ložiskem které bylo více namáháno.

$$P_{A0} = X_0 \cdot F_R + Y_0 \cdot F_a = 0,5 \cdot 735 + 0,26 \cdot 250 = 433 \text{ N} \quad (22)$$

$$P_{B0} = X_0 \cdot F_R + Y_0 \cdot F_a = 0,5 \cdot 367 + 0,26 \cdot 0 = 184 \text{ N} \quad (23)$$

Koeficient statické bezpečnosti byl následně spočítán dle vztahu:

$$s_0 = \frac{C_0}{P_{A0}} = \frac{9300}{433} = 21,47 \quad (24)$$

Z uvedených výsledků je zřejmé, že zvolená ložiska jsou předdimenzovaná, což je způsobeno především velmi nízkými pracovními otáčkami vřetena. Navzdory předdimenzování byla tato ložiska použita, protože výrobce nenabízí alternativu ložisek s kosouhlým stykem pro daný průměr hřídele.

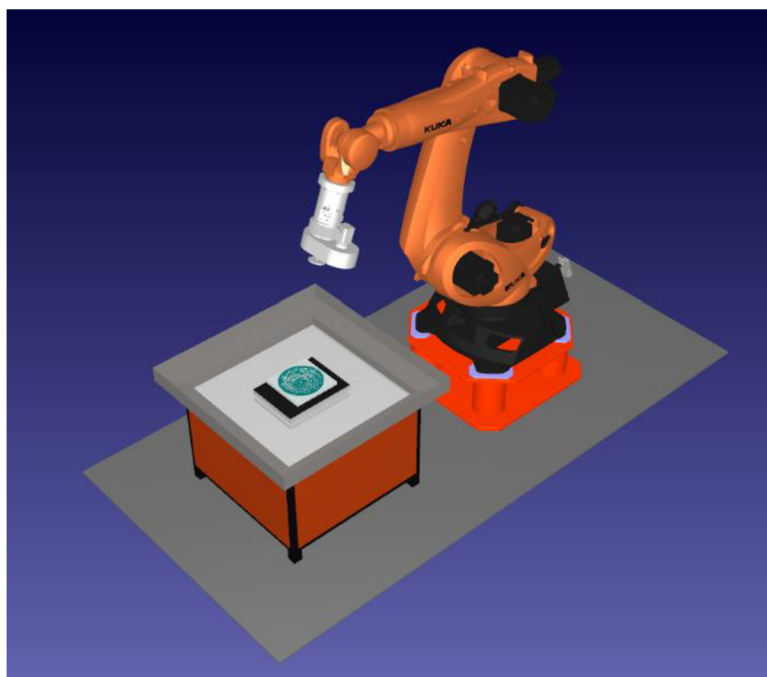
5 Programování robotu metodou OFF-LINE programování

Během manipulačních úloh stačí nadefinovat pouze několik klíčových bodů, ale při obráběcích úlohách musí nástroj kopírovat přesnou trajektorii a mít i správnou orientaci během celého procesu. Proto byl k programování robotu použit software pro off-line programování, RoboDK, blíže popsany v kap. 2.3.4.

5.1 Tvorba robotického pracoviště v RoboDK

Pro naprogramování robotu bylo nejprve nutné vytvořit virtuální robotické pracoviště v pracovním prostředí RoboDK. Toto pracoviště by mělo být identické s pracovištěm skutečným, aby bylo možné vyhnout se případným kolizím.

Tvorba tohoto pracoviště probíhala pomocí postupného importování jednotlivých součástí pracoviště (robot, efektor, nástroj, upínací stůl, obrobek) do pracovního prostředí RoboDK a následným definováním jejich polohy v prostoru, přičemž bylo nutné důkladně zvážit vhodné užití tzv. “framů” (viz. kap. 2.3.4) pro zjednodušení procesu samotného programování robotu. Jednotlivé součásti byly importovány ve formátu STEP, přičemž bylo nutné modely zjednodušit, pro zajištění rychlého chodu softwaru. Zjednodušení spočívalo v odstranění “bezvýznamných” částí pro programování robotu - např. šrouby a matice. Geometrie jednotlivých prvků pracoviště bylo však nutné zachovat nepozměněnou z důvodu kontroly kolizí. Virtuální RTP sestavené v RoboDK je na obr. 34.



Obr. 34 Virtuální RTP

Nezbytné bylo také stanovení TCP. To bylo v RoboDK provedeno posunutím TCP z příruby robotu na koncový bod nástroje. Jelikož je osa příruby robotu totožná s osou vřetene a nástroje, tak nebylo nutné měnit souřadnice TCP v ose X ani Y. Natočení souřadného systému TCP bylo rovněž zachováno. Bylo dostačující změnit souřadnice TCP pouze v ose Z dle délky efektoru a vysunutí nástroje.

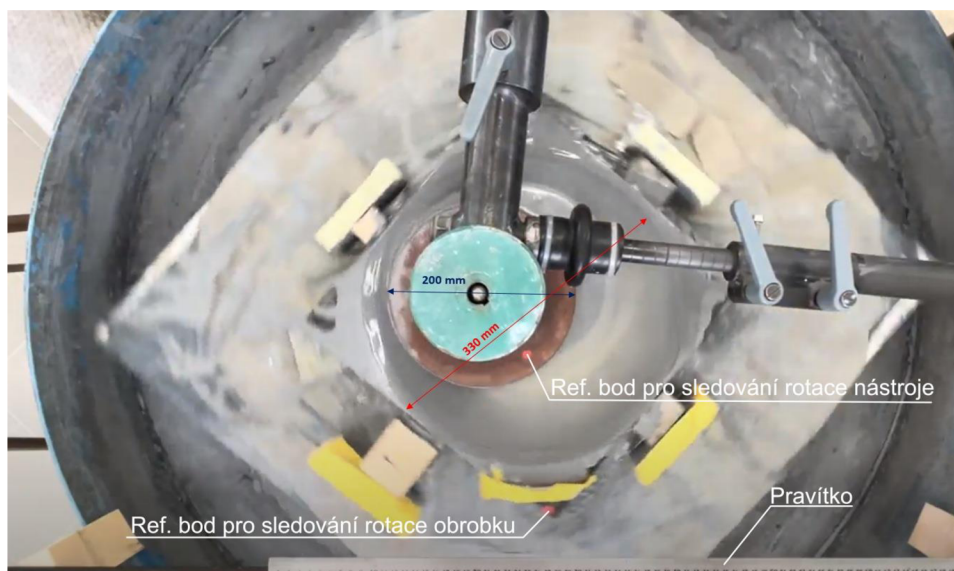
5.2 Stanovení trajektorie

Pro naprogramování pohybů robotu bylo nejdříve nutné stanovit trajektorii, kterou bude robot sledovat.

Optimální trajektorie nástroje pro broušení, či leštění je taková, která nezanechává na opracovávaném dílu stopy. Pro stanovení takové trajektorie nástroje, byla analyzována současná trajektorie broušení skleněných broušení konvexních sférických čoček na konvenčním stroji LOH HLP-500. Při tomto způsobu broušení konvexních sférických čoček probíhá několik pohybů zároveň, které jsou realizovány různými způsoby viz. kap. 3.1, přičemž všechny tyto pohyby musí být nahrazeny robotem.

Pro zanalyzování trajektorie byl proces broušení čoček volným brusivem na tomto stroji zaznamenán na video. Video záznam byl pořízen ze svrchního pohledu o snímkové

frekvenci 30 fps. Pro zanalyzování dané trajektorie byl použit software Blender, který se převážně používá pro 3D modelování a CGI (Computer-generated imagery), ale je vhodný i pro úpravu videa a motion tracking. Technologické pracoviště připravené pro nahrání videa je zobrazeno na obr. 35.



Obr. 35 Technologické pracoviště stroje LOH HLP-500

Protože při současné metodě broušení čočky obrobek rotuje na pracovním stole, ale v robotickém pracovišti rotovat nebude, bylo prvním krokem k dosažení požadované trajektorie upravit video záznam tak, aby se rotace obrobku vyrušila. To bylo provedeno rotováním videa kolem středu otáčení obrobku v opačném směru a stejnou rychlostí. Jelikož byla však rychlost otáčení neznámá, byla rotace videa definována ručně pomocí tzv. “keyframů”, přičemž byly keyframy vloženy ručně na vhodných snímcích tak aby se referenční bod umístěný na obrobek (obr. 35) vždy nacházel v jedné rovině. Takto se rotace obrobku vyrušila a byla již viditelná trajektorie nástroje.

Druhým krokem bylo sledování trajektorie nástroje na “zastaveném” obrobku. K tomu byl použit tzv. motion tracking. Průběh tohoto procesu je následující: Nahrání videa, zvolení druhu trackování (v tomto případě to byl objekt) a přidání markeru (sledovaného referenčního bodu). Jelikož nebyl při nahrávání videa přidán referenční bod na střed hřídele nástroje byla jako referenční bod zvolena celá hřídel. Následně již bylo možné spustit automatické trackování. Na několika snímcích se však automatické trackování zastavilo z důvodu nedostatečného kontrastu zvoleného referenčního bodu a bylo nutné na těchto snímcích nastavit pozici referenčního bodu manuálně. Výsledek

tohoto trackování byly souřadnice sledovaného referenčního bodu (hřídele) v každém snímku videa. Výběr referenčního bodu a průběh trackování je zobrazen na obr. 36.



Obr. 36 Proces trackování trajektorie

Blender však neumožňuje exportovat výsledky ve vhodném formátu pro programování robotu. Proto bylo nutné použít Blender-Python API (Application programming interface), což umožňuje rozšířit základní možnosti Blenderu.

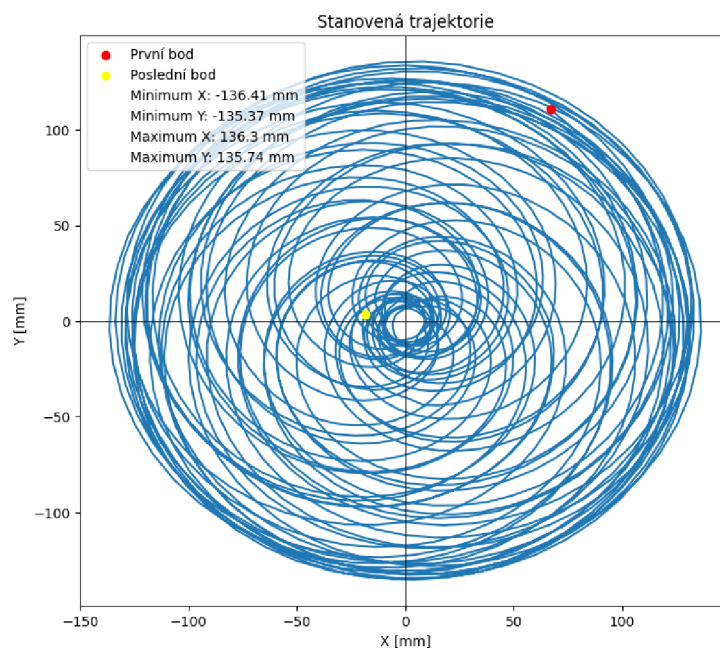
Problémem bylo také to, že jednotky souřadnice získaného tímto způsobem byli v pixelech, což je základní jednotka popisující digitální obraz, ale v programování robotu je nepoužitelná. Dalším problémem byl nulový bod, který je umístěn v levém horním rohu obrazu, ale pro programování robotu by bylo vhodnější jeho umístění ve středu kulové plochy.

K přepočtu pixelů na milimetry bylo využito pravítka umístěného na technologickém pracovišti (obr. 35) při nahrávání video záznamu. Rozlišení původního videa i videa se “zastaveným” obrobkem bylo 1920 x 1080 px. Přičemž při vhodném zarovnání pravítka s šířkou videa (obr. 37) odpovídala šířka videa 1920 px 610 mm. Výška videa byla následně dopočítána a 1080 px odpovídalo 343,125 mm. Podělením skutečné šířky či výšky horizontálním, resp. vertikálním počtem pixelů vyšlo, že jeden pixel se rovná 0,3177 mm. Pro posun souřadného systému stačilo odečíst od získaných souřadnic pozici středu otáčení obrobku. Střed byl na souřadnicích (984 px, 528 px).



Obr. 37 Snímek videa pro přepočet jednotek

Takto přepočítané souřadnice byly použity pro zrekonstruování optimální trajektorie používané při současném způsobu broušení a leštění. Získaná trajektorie je zobrazena na obr. 38.

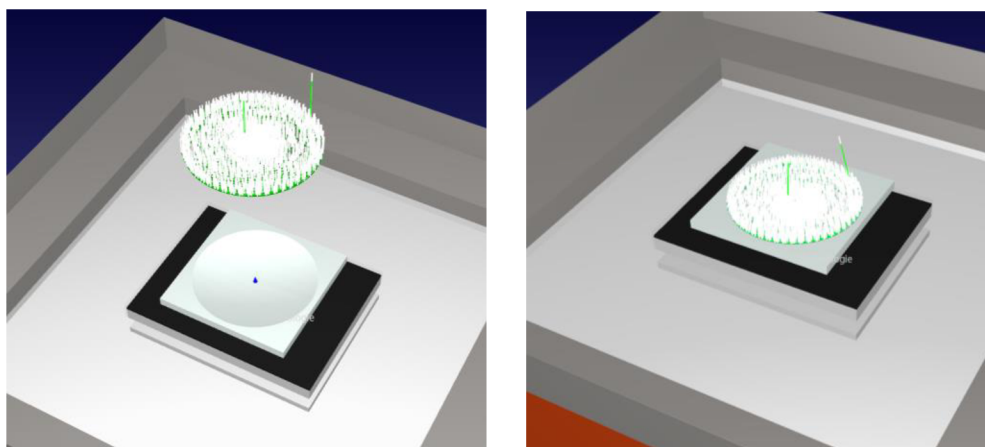


Obr. 38 Zrekonstruovaná trajektorie

Takto získaná trajektorie však obsahovala pouze souřadnice v jedné rovině (X, Y), což ale není dostatečné pro broušení prostorových dílů. Dalším nedostatkem byla také absence normál trajektorie, které jsou pro proces broušení zásadní. V tomto kroku byly tyto parametry „z“, „i“ a „j“ nastaveny nulové a parametr „k“ byl nastaven na hodnotu -1. Zavedením i těchto parametrů bylo již možné trajektorii exportovat pro programování robotu v RoboDK.

5.3 Programování trajektorie v RoboDK

Tímto způsobem stanovená trajektorie byla nahrána do softwaru RoboDK, kde bylo nutné tuto trajektorii promítnout na broušený díl. Přičemž normály (i, j, k) určovaly směr promítání. Po promítnutí trajektorie bylo také, pro zaručení správné orientace nástroje, nutné normály přepočítat, aby směřovaly kolmo na broušený povrch. RoboDK však neobsahuje vestavěnou funkci pro tyto požadavky, proto bylo použito API RoboDK – Python. Script byl převzat z jejich oficiální dokumentace a upraven podle zmíněných požadavků. Zobrazení trajektorie, včetně normál, před a po předefinování je na obr 39.



Obr. 39 Předefinování trajektorie

Tímto byla příprava trajektorie robotu kompletní a pomocí funkce “Curve follow project” byly nastaveny technologické parametry stanovené v kap. 3.1.1. V programu RoboDK lze ovládat otáčení vřetena nastavením digitálních či analogových výstupů. V rámci experimentálního pracoviště bylo ale ovládání prováděno manuálně dle potřeb, protože manuální ovládání umožňuje rychlou změnu procesních parametrů při experimentování s různými nastaveními vřetena.

6 Závěr

V souladu s provedenou rešerší v oblasti obrábění skla, robotického obrábění a možností kompenzace polohových chyb robotu. Byly vytvořeny tři konstrukční varianty vřetena pro broušení a leštění skleněných dílů s axiální kompenzací polohy a přítláčné síly. Byla stanovena požadovaná kritéria (flexibilita, úroveň řízení, nároky na konstrukci, cena) a pomocí rozhodovací analýzy byla vybrána varianta, která tato kritéria nejlépe splňovala – varianta kombinující elektrický servopohon a pneumatický kompenzátor polohy. Jelikož byly požadované otáčky vřetena velice nízké, byl zvolen servopohon DS 70 od firmy TG Drives s cykloidní převodovkou, který se vyznačuje nízkou hmotností a bezúdržbovým provozem. Pro minimalizaci délky vřetena byl servopohon umístěn mimo osu kompenzátoru a pohon nástroje byl realizován pomocí řemenového převodu, přičemž nástroj byl pro minimalizaci klopného momentu vůči kompenzátoru umístěn do jeho osy. Byly vybrány další komponenty konstrukčního řešení vřetene a pomocí výpočtů byla ověřena trvanlivost zvolených ložisek a byla provedena pevnostní kontrola kolíků. Za účelem snadné údržby, montáže a demontáže byla celková konstrukce vřetene rozdělena na menší celky, které budou sestaveny zvlášť a následně připevněny ke společné upevňovací desce. Pro návrh efektoru byl vytvořen 3d model v softwaru Autodesk Inventor 2023 a byla vytvořena výkresová dokumentace vybraných komponent.

Technologické parametry byly stanoveny na základě již existujícího procesu broušení. Byla stanovena rychlost otáčení nástroje, rychlost posuvu nástroje a přítláčná síla. Jako prvotní objekt pro broušení byla z důvodu výrazně jednodušší aplikace brousící suspenze zvolena skleněná konkávní sférická čočka. Nástrojem byl litinový kotouč o stejném poloměru jako byl poloměr konkávní čočky a jako brusivo byla zvolena směs prášku oxidu ceru (CeO_2) s demineralizovanou vodou v poměru 1:20.

Na základě předlohového procesu byla pomocí “motion trackingu” a pythonu stanovena trajektorie nástroje. Pomocí softwaru RoboDK a jeho python API, byl následně vytvořen virtuální klon robotického technologického pracoviště a byla naprogramována počítačová simulace brousícího procesu. Simulace byla následně pomocí postprocesoru v RoboDK převedena do jazyku robotu a byla ověřena funkčnost programu na skutečném

RTP. Trajektorie robotu odpovídala simulaci, ale z důvodu vysokých třecích a adhezních sil a nízkého kroutící momentu stávajícího vřetene se nástroj nepodařilo roztočit.

Tato práce se zabývala problematikou broušení a leštění s užitím volného brusiva, přičemž broušeným dílem byla konkávní čočka, z které brousící suspenze neodtéká, ale shromažďuje se v nejnižším bodě čočky, odkud je při vhodném stanovení trajektorie nástroje opětovně přiváděna do místa řezu. Ale v aplikacích pro broušení a leštění designových ploch v odklonu, u kterých by bylo obtížné udržení brousící suspenze v místě řezu bude vyžadován přechod na nové nástroje s vázaným brusivem. Proto bych pro následující výzkum doporučil řešení problematiky broušení a leštění s vázanými nástroji.

Seznam použité literatury

- [1] JI, Wei. a WANG, Lihui. *Industrial robotic machining: a review* [online]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2019 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-019-03403-z>
- [2] OWEN-HILL, Alex. *Can a Robot Outperform a CNC Machine for Robot Machining?* [online]. In: RoboDK blog, 2018 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://robodk.com/blog/robot-machining-vs-cnc/>
- [3] IFR. *World Robotics Sales Flyer 2023* [online]. 2023 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: https://ifr.org/img/worldrobotics/Digitalsheet_A4_World_Robotics_2023_low.pdf
- [4] WU, Kai; LI, Jiaquan; ZHAO, Huan a ZHONG, Yong. *Review of Industrial Robot Stiffness Identification and Modelling* [online]. Applied Sciences. 2022 [cit. 2024-02-17]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app12178719>
- [5] APPLETON, E. a WILLIAMS, D. J. *Industrial Robot Applications* [online]. Dordrecht: Springer Netherlands, 1987 [cit. 2023-11-05]. ISBN 978-94-010-7905-1. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/978-94-009-3125-1>
- [6] *CNC obrábění pomocí robotů - Skutečně mohou roboti nahradit CNC obráběcí centra?* [online]. MM Průmyslové spektrum. 2019 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/cnc-obrabeni-pomoci-robotu-skutecne-mohou-roboti-nahradit-cnc-obrabeci-centra>
- [7] NAGATA, Fusaomi; OTSUKA, Akimasa; WATANABE, Keigo a HABIB, Maki K. *Fuzzy feed rate controller for a machining robot* [online]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. 2014 [cit. 2024-02-17]. ISBN 978-1-4799-3979-4. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/ICMA.2014.6885695>
- [8] GÖTZ, Jiří (ed.). *Broušení a leštění skla*. Řada sklářské literatury. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1963.
- [9] NAGATA, Fusaomi; KUSUMOTO, Yukihiko; FUJIMOTO, Yoshihiro a WATANABE, Keigo. *Robotic sanding system for new designed furniture with free-formed surface* [online]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2007 [cit. 2024-03-02]. ISSN 07365845. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2006.04.004>
- [10] SYDOR, Maciej; MIRSKI, Radosław; STUPER-SZABLEWSKA, Kinga a ROGOZIŃSKI, Tomasz. *Efficiency of Machine Sanding of Wood* [online]. Applied Sciences. 2021, roč. 11, č. 6 [cit. 2024-03-02]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app11062860>
- [11] *Základní rozdělení brusných kotoučů k ostření nástrojů* [online]. TumliKOVO. 2010 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <http://www.tumlikovo.cz/zakladni-rozdeleni-brusnych-kotoucu-k-ostreni-nastroju/>
- [12] ŘASA, Jaroslav a GABRIEL, Vladimír. *Strojírenská technologie 3*. 2. vyd. Praha: Scientia, 2005. ISBN 80-7183-337-1.
- [13] *Brusné kotouče: druhy, vlastnosti a značení* [online]. Strefa. 2022. [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.stefa.cz/brusne-kotouce-druhy-vlastnosti-a-znaceni-p104352/>

- [14] HOTAŘ, Vlastimil; KLEBSA, Vladimír a MATOUŠEK, Ivo. *Technologie automatické výroby skla*. V Liberci: Technická univerzita, 2015. ISBN 978-80-7494-237-2.
- [15] LIU, Peng-Zhan; ZOU, Wen-Jun; PENG, Jin; SONG, Xu-Dong a XIAO, Fu-Ren. *Study on the Effect of Grinding Pressure on Material Removal Behavior Performed on a Self-Designed Passive Grinding Simulator* [online]. *Applied Sciences*. 2021, roč. 11, č. 9 [cit. 2024-03-02]. ISSN 2076-3417. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/app11094128>
- [16] KAMENSKÝ, Tomáš. *Pracovní podmínky a silové účinky při broušení*. Praha, 2021. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze, Fakulta strojní, Ústav technologie obrábění, projektování a metrologie. Vedoucí práce Ing. Pavel Zeman, Ph.D.
- [17] *Types of Polishing Process: Advantages, Disadvantages, Uses & Working Principle* [online]. CNCLATHING. 2021 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.cnclathing.com/guide/types-of-polishing-process-advantages-disadvantages-uses-working-principle-cnclathing>
- [18] *GLASS WORKING : MECHANICAL POLISHING, FIRE POLISHING, WHICH DIFFERENCE?* [online]. Sinoptix. 2022 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://sinoptix.eu/2022/01/24/glass-fire-mechanical-polishing/>
- [19] *Tripol* [online]. Polpur [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.polpur.cz/polpur/eshop/9-1-RYTI-SKLA/29-1-Abraziva/5/37-Tripol>
- [20] Kim, S.H., Nam, E., Ha, T.I. *Robotic Machining: A Review of Recent Progress* [online]. *Int. J. Precis. Eng. Manuf.* 2019 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12541-019-00187-w>
- [21] NOVOTNÝ, František a HORÁK, Marcel. *Konstrukce robotů*. Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2015. ISBN 978-80-7494-216-7.
- [22] ZENG, Xi; ZHU, Guangyi; GAO, Zhuohan; JI, Renquan; ANSARI, Juwer et al. *Surface polishing by industrial robots: a review* [online]. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2023 [cit. 2024-03-02]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-023-10887-3>
- [23] BERNIER, Catherine. *Parallel Robots: The High-Speed Robotics Platform* [online]. *HowToRobot*. 2022 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://howtorobot.com/expert-insight/parallel-robots>
- [24] TAO, Bo; ZHAO, XingWei a DING, Han. *Mobile-robotic machining for large complex components: A review study* [online]. *Science China Technological Sciences*. 2019 [cit. 2024-03-02]. ISSN 1674-7321. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s11431-019-9510-1>
- [25] BRUMSON, Bennet. *Parallel Kinematic Robots* [online]. *A3Robotics*. 2002 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://www.automate.org/robotics/industry-insights/parallel-kinematic-robots>
- [26] CACCAVALE, F.; SICILIANO, B. a VILLANI, L. *The Tricept robot: dynamics and impedance control* [online]. *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2003 [cit. 2024-03-02]. ISSN 1083-4435. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2003.812839>
- [27] TUNC, Lutfi Taner a SHAW, Jay. *Experimental study on investigation of dynamics of hexapod robot for mobile machining* [online]. *The International Journal of Advanced*

- Manufacturing Technology. 2015 [cit. 2024-03-02]. ISSN 0268-3768. Dostupné z: <https://doi.org/10.1007/s00170-015-7600-6>
- [28] *F-200iB™* [online]. FANUC Robotics America. 2005 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: https://www.fanucamerica.com/docs/default-source/robotics-product-information-sheets/f-200ib-series_9.pdf
- [29] KLIMCHIK, A.; MAGID, E. a PASHKEVICH, A. *Machining with serial and quasi-serial industrial robots: Comparison analysis and architecture limitations* [online]. In: 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016, s. 252-259 [cit. 2024-03-02]. ISBN 978-1-5090-3762-9. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/IROS.2016.7759063>
- [30] *M-900iB/700* [online]. FANUC Robotics America. 2019 [cit. 2024-03-02]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%c3%a1nka-filtru-robot%c5%af/%c5%99ada-m-900/m-900ib-700>
- [31] GUO, Yingjie; DONG, Huiyue a KE, Yinglin. *Stiffness-oriented posture optimization in robotic machining applications* [online]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2015 [cit. 2024-03-02]. ISSN 07365845. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2015.02.006>
- [32] LIAO, ZhaoYang; WANG, Qing-Hui; XIE, HaiLong; LI, Jing-Rong; ZHOU, XueFeng et al. *Optimization of Robot Posture and Workpiece Setup in Robotic Milling With Stiffness Threshold* [online]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics. 2022 [cit. 2024-03-02]. ISSN 1083-4435. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/TMECH.2021.3068599>
- [33] SHIRINZADEH, B.; TEOH, P.L.; TIAN, Y.; DALVAND, M.M.; ZHONG, Y. et al. *Laser interferometry-based guidance methodology for high precision positioning of mechanisms and robots* [online]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 2010 [cit. 2024-03-02]. ISSN 07365845. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.rcim.2009.04.002>
- [34] PAN, Zengxi; ZHANG, Hui; ZHU, Zhenqi a WANG, Jianjun. *Chatter analysis of robotic machining process* [online]. Journal of Materials Processing Technology. 2006 [cit. 2024-03-02]. ISSN 09240136. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2005.11.033>
- [35] *Industrial robot spindles* [online]. Robots Done Right. 2024 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://robotsdoneright.com/Articles/industrial-robot-spindles.html>
- [36] *Machine Tool Spindles Information* [online]. GlobalSpec. [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: https://www.globalspec.com/learnmore/manufacturing_process_equipment/machine_tool_components_accessories/spindles
- [37] PUZIK, Arnold; MEYER, Christian; VERL, Alexander. *Robot Machining with additional 3-D-Piezo-Actuation-Mechanism for Error Compensation* [online]. VDE. 2010 [cit. 2024-03-02]. ISBN 978-3-8007-3273-9. Dostupné z: <https://ieeexplore.ieee.org/document/5756826>
- [38] SORNMO, Olof; OLOFSSON, Bjorn; SCHNEIDER, Ulrich; ROBERTSSON, Anders a JOHANSSON, Rolf. *Increasing the milling accuracy for industrial robots using a piezo-actuated high-dynamic micro manipulator* [online]. In: 2012 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics (AIM). IEEE, 2012[cit. 2024-03-02]. ISBN 978-1-4673-2575-2. Dostupné z: <https://doi.org/10.1109/AIM.2012.6265942>

- [39] GOODWIN, Damond. *How to Define the Tool Center Point (TCP) on a Robot* [online]. Control Automation. 2022 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://control.com/technical-articles/how-to-define-the-tool-center-point-tcp-on-a-robot/>
- [40] DIETRICH, Shawn. *Robot Motion Command Types: Understanding Linear, Joint, and Arc Movement* [online]. Control Automation. 2022 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://control.com/technical-articles/robot-motion-command-typesexplained/>
- [41] *Online Robot Programming vs Offline Robot Programming* [online]. Robots Done Right. 2024 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://robotsoneright.com/Articles/online-robot-programming-vs-offline-robot-programming.html>
- [42] ROBODK. *Robo DK Documentation* [online]. RoboDK [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://robodk.com/doc/en>
- [43] OWEN-HILL, Alex. *What's the Difference Between Robots and CNC Machines?* [online]. In: RoboDK blog. 2019 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://robodk.com/blog/difference-robots-cnc-machines/>
- [44] KUKA. *KUKA KR 90 R2700 pro* [online]. 2022 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: https://www.kuka.com/media/kukadownloads/imported/8350ff3ca11642998dbdc81dcc2ed44c/0000182738_cs.pdf
- [45] DEPRAG CZ. *DAS adaptivní příruba na robota* [online]. DEPRAG CZ [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.deprag.cz/pneumaticke-naradi/das-adaptivni-priuba-na-robota-18220.html>
- [46] KRATINA, Jakub. *Součinitel tření* [online]. E-konstruktor. 2013 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://e-konstruktor.cz/prakticka-informace/soucinitel-treni>
- [47] DriveSpin. *TG drives* [online]. Brno: TG drives, © 2006–2023 [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.tgdrives.cz/prevodovky-a-linearni-jednotky/rotacni-aktuatory-drivespin/>
- [48] *Nekonečné ozubené řemeny* [online]. Continental. 2019 [cit. 2024-01-05]. <https://www.tyma.cz/pdf/contitech-endless-timing-belts.pdf>
- [49] ČSN EN ISO 2338:1997. *Válcové kolíky z nekalené oceli a austenitické korozivzdorné oceli*
- [50] ŘASA, Jaroslav a ŠVERCL, Josef. *Strojnické tabulky pro školu a praxi*. Praha: Scientia, 2004. ISBN isbn80-7183-312-6.
- [51] *7205 BE-2RZP* [online]. SKF [cit. 2024-01-05]. Dostupné z: <https://www.skf.com/group/products/rolling-bearings/ball-bearings/angular-contact-ball-bearings/single-row-angular-contact-ball-bearings/productid-7205-BE-2RZP>

Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Nárůst užití robotů v průmyslu [3]..... | 13 |
| Obr. 2 Ukázka povrchu před a po broušení..... | 15 |
| Obr. 3 Povrchový reliéf a podpovrchové narušení broušeného skla [14] | 17 |
| Obr. 4 Tricept robot [26] vlevo a Hexapod robot [28] vpravo..... | 22 |
| Obr. 5 Kvazi – sériový robot Fanuc M-900iB/700 [30]..... | 23 |
| Obr. 6 Upnutí koncového efektoru v 6 kloubu (vlevo) a upnutí v 5 kloubu (vpravo) [20]..... | 24 |
| Obr. 7 Elektrický kompenzátor polohy [22] | 25 |
| Obr. 8 Konvenční stroj LOH HLP-500..... | 30 |
| Obr. 9 Výkres broušeného dílu | 32 |
| Obr. 10 Průběh posuvové rychlosti nástroje | 33 |
| Obr. 11 Robot KUKA KR 90 R2700..... | 35 |
| Obr. 12 Podstavec pro instalaci robotu | 35 |
| Obr. 13 Montážní příruba robotu [44]..... | 35 |
| Obr. 14 Technologický stůl..... | 36 |
| Obr. 15 Schéma gravitačního kompenzátoru polohy | 38 |
| Obr. 16 Schéma pneumatického kompenzátoru polohy..... | 38 |
| Obr. 17 Schéma elektrického kompenzátoru polohy | 39 |
| Obr. 18 Pneumatický kompenzátor polohy DAS..... | 42 |
| Obr. 19 Schéma pro výpočet kroutícího momentu | 43 |
| Obr. 20 Kleštinové sklíčidlo | 47 |
| Obr. 21 Sériová konstrukce vřetene | 47 |
| Obr. 22 Konstrukce vřetene s pohonem mimo osu kompenzátoru | 48 |
| Obr. 23 Konstrukce vřetene s pohonem mimo osu kompenzátoru s pohyblivou řemenicí..... | 48 |
| Obr. 24 Diagram pro výběr řemenového profilu [48]..... | 49 |
| Obr. 25 Schéma pro výpočet řemenového převodu | 50 |
| Obr. 26 Definice vstupních parametrů..... | 51 |
| Obr. 27 Výsledky ze softwaru Conti Professional | 51 |
| Obr. 28 Modulární konstrukce vřetena | 53 |
| Obr. 29 Upínací deska..... | 54 |
| Obr. 30 Modul 1..... | 55 |
| Obr. 31 Modul 2..... | 56 |
| Obr. 32 Modul 3..... | 57 |
| Obr. 33 Schéma pro výpočet reakcí ložisek..... | 60 |

| | |
|---|----|
| Obr. 34 Virtuální RTP..... | 63 |
| Obr. 35 Technologické pracoviště stroje LOH HLP-500 | 64 |
| Obr. 36 Proces trackování trajektorie..... | 65 |
| Obr. 37 Snímek videa pro přepočet jednotek..... | 66 |
| Obr. 38 Zrekonstruovaná trajektorie | 66 |
| Obr. 39 Předefinování trajektorie..... | 67 |

Seznam tabulek

| | |
|--|----|
| Tab. 1 Přehled procesních parametrů..... | 34 |
| Tab. 2 Přehled vybraných parametrů robotu KUKA KR 90 R2700 [44]..... | 34 |
| Tab. 3 Hodnotící kritéria..... | 40 |
| Tab. 4 Vyhodnocovací tabulka | 40 |
| Tab. 5 Parametry pro výpočet třecího momentu | 44 |
| Tab. 6 Parametry servopohonu DS 50 [47]..... | 46 |
| Tab. 7 Parametry ložiska 7205 BE-2RZP [51] | 59 |
| Tab. 8 Rozměry a velikost vnějších sil pro výpočet reakcí v ložiskách..... | 60 |
| Tab. 9 Výsledné reakce v ložiskách..... | 60 |

Seznam příloh

Příloha 1: Blender_to_csv.py - Script pro export dat získaných motion trackingem

Příloha 2: Px_to_mm.py - Script pro přepočítání jednotek trajektorie, další úpravy a zobrazení

Příloha 3: RoboDKPath.py – Script pro projekci 2D trajektorie na obráběnou plochu a přepočítání normál v RoboDK

Příloha 4: Výkresová dokumentace

- 3-DP S21000241-00-00 Sestavný výkres technologického efektoru
- 3-DP S21000241-00-01 Výrobní výkres upínací desky
- 3-DP S21000241-01-00 Sestavný výkres modulu 1
- 3-DP S21000241-01-01 Výrobní výkres uchycení pohonu
- 4-DP S21000241-01-02 Výrobní výkres hnací hřídele
- 4-DP S21000241-01-03 Výrobní výkres hnací řemenice
- 3-DP S21000241-02-00 Sestavný výkres modulu 2
- 4-DP S21000241-02-01 Výrobní výkres hnané řemenice
- 4-DP S21000241-02-02 Výrobní výkres pevné osy
- 3-DP S21000241-03-00 Sestavný výkres modulu 3
- 4-DP S21000241-03-01 Výrobní výkres příruby k robotu
- 4-DP S21000241-03-02 Výrobní výkres příruby ke kompenzátoru
- 3-DP S21000241-04-00 Sestavný výkres krytu
- 4-DP S21000241-04-01 Výrobní malé strany krytu
- 4-DP S21000241-04-02 Výrobní velké strany krytu
- 4-DP S21000241-04-03 Výrobní základny krytu

Příloha 5: 3D model vřetene

Příloha 6: Počítačová simulace technologického procesu v RoboDK

Příloha 1: Blender_to_csv.py - Script pro export dat získaných motion trackingem

```
from __future__ import print_function
import bpy
D = bpy.data
printFrameNums = False # include frame numbers in the csv file
relativeCoords = False # marker coords will be relative to the dimensions of the clip
f2=open('export-markers.log', 'w')
print('First line test', file=f2)
for clip in D.movieclips:
    print('clip {0} found\n'.format(clip.name), file=f2)
    width=clip.size[0]
    height=clip.size[1]
    for ob in clip.tracking.objects:
        print('object {0} found\n'.format(ob.name), file=f2)
        for track in ob.tracks:
            print('track {0} found\n'.format(track.name), file=f2)
            fn = 'data/{0}_{1}_tr_{2}.csv'.format(clip.name.split('.')[0],ob.name, track.name)
            with open(fn, 'w') as f:
                framenum = 0
                while framenum < clip.frame_duration:
                    markerAtFrame = track.markers.find_frame(framenum)
                    if markerAtFrame:
                        coords = markerAtFrame.co.xy
                        if relativeCoords:
                            if printFrameNums:
                                print('{0},{1},{2}'.format(framenum, coords[0], coords[1]), file=f)
                            else:
                                print('{0},{1}'.format(coords[0], coords[1]), file=f)
                        else:
                            if printFrameNums:
                                print('{0},{1},{2}'.format(framenum,coords[0]*width,coords[1]*height), file=f)
                            else:
                                print('{0},{1}'.format(coords[0]*width, coords[1]*height), file=f)
                    framenum += 1
f2.close()
```

Příloha 2: Px_to_mm.py - Script pro přepočítání jednotek trajektorie, další úpravy a zobrazení

```
import csv
import matplotlib.pyplot as plt
# Cesta k souboru získaného pomocí motion trackingu
csv_file_path = 'C:/tmp/New folder/data/track.csv'
# Zavedení listů pro uložení souřadnic jednotlivých bodů
souradnice_x = []
souradnice_y = []
souradnice_z = []
normal_vektor_i = []
normal_vektor_j = []
normal_vektor_k = []
speed = [] # pro případ proměnné posuvové rychlosti
# Hodnoty pro korekce souřadnic
stred_x = 984
stred_y = 528
pixel_to_mm = 610/1920
# Čtení a přepočítání hodnot do mm
with open(csv_file_path, 'r') as file:
    csv_reader = csv.reader(file)
    for i, row in enumerate(csv_reader):
        pixel_x = float(row[0]) - stred_x
        pixel_y = float(row[1]) - stred_y
        position_x = round(pixel_x * pixel_to_mm, 2)
        position_y = round(pixel_y * pixel_to_mm, 2)
        souradnice_x.append(position_x)
        souradnice_y.append(position_y)
        souradnice_z.append(500)
        normal_vektor_i.append(0)
        normal_vektor_j.append(0)
        normal_vektor_k.append(-1)
        speed.append(5)
# Zobrazení přepočítaných hodnot do grafu
plt.plot(souradnice_x, souradnice_y, linestyle='-', zorder=1)
plt.scatter(souradnice_x[0], souradnice_y[0], color='red', marker='o', label='První bod', zorder=2)
plt.scatter(souradnice_x[-1], souradnice_y[-1], color='yellow', marker='o', label='Poslední bod',
zorder=3)
legenda_1, = plt.plot([], [], ' ', label=f'Minimum X: {min(souradnice_x)} mm')
```

```
legenda_2, = plt.plot([], [], ' ', label=f'Minimum Y: {min(souradnice_y)} mm')
legenda_3, = plt.plot([], [], ' ', label=f'Maximum X: {max(souradnice_x)} mm')
legenda_4, = plt.plot([], [], ' ', label=f'Maximum Y: {max(souradnice_y)} mm')
plt.axhline(0, color='black',linewidth=0.5)
plt.axvline(0, color='black',linewidth=0.5)
plt.xlabel('X [mm]')
plt.ylabel('Y [mm]')
plt.title('Stanovená trajektorie')
plt.legend()
plt.show()
# Exportování hodnot pro programování robotu
coordinates = list(zip(souradnice_x, souradnice_y, souradnice_z, normal_vektor_i,
normal_vektor_j, normal_vektor_k))
csv_file_path = 'souradnicexyzijk.csv'
with open(csv_file_path, 'w', newline=") as csv_file:
    csv_writer = csv.writer(csv_file)
    csv_writer.writerows(coordinates)
```


Příloha 3: RoboDKPath.py – Script pro projekci 2D trajektorie na obráběnou plochu a přepočítání normál v RoboDK

```
from robodk.robodialogs import *
from robodk.robofileio import *
from robodk.robolink import *
# Globální proměnné:
LOAD_AS_PROGRAM = True
# Jméno referenčního framu:
REFERENCE_NAME = 'Test'
TARGET_NAME = 'Home'
# Start RoboDK API
RDK = Robolink()
# Vybídnutí uživatele pro výběr souboru:
rdk_file_path = RDK.getParam("PATH_OPENSTATION")
path_file = getOpenFileName(rdk_file_path + "/")
if not path_file:
    print("Nothing selected")
    quit()
program_name = getFileName(path_file)
# Nahrání CSV souboru jako listu [[x,y,z,speed],[x,y,z,speed],...]
data = LoadList(path_file)
# Výběr robotu
robot = RDK.ItemUserPick('Select a robot', ITEM_TYPE_ROBOT)
if not robot.Valid():
    raise Exception("Robot not selected or not valid")
    quit()
# Výběr framu pro generaci trajektorie
frame = robot.getLink(ITEM_TYPE_FRAME)
if not frame.Valid():
    frame = robot.Parent()
if not frame.Valid():
    raise Exception("Reference frame not found")
pose_ref = robot.Pose()
if LOAD_AS_PROGRAM:
    # Tvorba nového programu
    program = RDK.AddProgram(program_name, robot)
    current_speed = None
```

```
target = None
program.setPoseFrame(frame)
program.setPoseTool(robot.PoseTool())
# Výpočet pro každý bod v CSV souboru
for i in range(len(data)):
    x, y, z, _ = data[i]
    if type(x) is str or type(y) is str or type(z) is str:
        print("Ignored data row: " + str(data[i]))
        continue
    pi = pose_ref
    pi.setPos(data[i])
    target = RDK.AddTarget('T%i' % i, frame)
    target.setPose(pi)
    pi = target
    # První pohyb bude MoveJ ostatní MoveL
    if i == 0:
        program.MoveJ(pi)
    else:
        program.MoveL(pi)
RDK.ShowMessage("Done", False)
print("Done")
```