

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program:

**N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a
zabezpečování kvality**

Studijní specializace: Bez specializace

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Systém automatického broušení

Autor: Bc. Jan TRUHLÁŘ

Vedoucí práce: Prof. Dr. Ing. František HOLEŠOVSKÝ

Akademický rok 2023/2024

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta strojní
Akademický rok: 2023/2024

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Jan TRUHLÁŘ**
Osobní číslo: **S22N0076P**
Studijní program: **N0715A270011 Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality**
Téma práce: **Systém automatického broušení**
Zadávací katedra: **Katedra technologie obrábění**

Zásady pro vypracování

1. Analýza současného stavu
2. Studium literatury
3. Vytvoření alternativních návrhů řešení pracoviště
4. Rozpracování návrhu pro realizaci a jeho ověření
5. Ekonomické hodnocení

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**
Rozsah grafických prací: **dle potřeby**
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- Malkin, S. Grinding Technology – Theory and Applications of Machining with Abrasives. SME, Dearborn, Michigan 1989.
- Gazda, J., Jersák, J. Příspěvek k procesu broušení kovů. UJEP, Ústí nad Labem, 2012.
- Kolíbal Z. a kol. Roboty a robotizované výrobní technologie. VUTIUM Brno, 2016.

Vedoucí diplomové práce: **Prof. Dr. Ing. František Holešovský**
Katedra technologie obrábění

Konzultant diplomové práce: **Václav Lída**
Workpress Aviation s.r.o.

Datum zadání diplomové práce: **16. října 2023**
Termín odevzdání diplomové práce: **24. května 2024**

L.S.

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

Doc. Ing. Miroslav Zetek, Ph.D.
vedoucí katedry

Prohlášení o autorství

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

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

V Plzni dne:

.....

podpis autora

ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Truhlář	Jméno Jan	
STUDIJNÍ PROGRAM	N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
VEDOUcí PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Dr. Ing. Holešovský	Jméno František	
PRACOVISŤE	ZČU - FST - KTO		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Systém automatického broušení		

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

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	82	TEXTOVÁ ČÁST	67	GRAFICKÁ ČÁST	15
---------------	----	---------------------	----	----------------------	----

STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY	Diplomová práce obsahuje popis návrhu, konstrukce a realizace projektu systému pro automatické broušení dílů tyčového charakteru z hliníkových extrudovaných profilů. Pro výrobní systém byl navržen vlastní mechatronický systém řízení přítlaku. Bylo provedeno technicko ekonomické vyhodnocení výhodnosti použití systému.
KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE	Automatizace, automatický systém, broušení, povrchová úprava, řízení přítlaku, force control, robot, automatizované pracoviště.

SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

AUTHOR	Surname Truhlář	Name Jan	
STUDY PROGRAMME	N0715A270011 - Obrábění, aditivní technologie a zabezpečování kvality		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Dr. Ing. Holešovský	Name František	
INSTITUTION	ZČU - FST - KTO		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF THE WORK	Automated grinding system		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Machining Technology	SUBMITTED IN	2024
----------------	------------------------	-------------------	----------------------	---------------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	82	TEXT PART	67	GRAPHICAL PART	15
----------------	----	------------------	----	-----------------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	The thesis disserts on design, construction, and implementation of a system for the automatic grinding of parts from aluminum extruded profiles. A custom mechatronic force control system was designed for the manufacturing system. A technical-economic evaluation was conducted to assess the feasibility of implementing the system.
KEY WORDS	Automation, automated production system, grinding, surface finishing, force control, robot, automated workcell, compliance device.

Poděkování

Tímto děkuji vedoucímu mé diplomové práce, prof. Dr. Ing. Františku Holešovskému, za vedení, pomoc a odborné rady při jejím vypracování. Firmě Workpress Aviation, s.r.o. a jejím zaměstnancům, jmenovitě Václavovi Lísovi za umožnění realizace práce a možnost zapojit výsledek projektu do reálného prostředí výroby ve strojírenském podniku. Vojtěchovi Blechtovi za odbornou pomoc při programování řídicího programu mechatronického systému. Děkuji také Ing. Janu Blažkovi za pomoc a věcné připomínky k stylistické a gramatické stránce textu a také všem svým blízkým, zejména rodičům, za podporu v průběhu psaní diplomové práce a celého studia.

Obsah

Přehled zkratk a symbolů.....	10
Seznam obrázků.....	11
Seznam tabulek.....	13
1 Úvod.....	14
2 Úvod do robotiky	14
2.1 Souřadné systémy	17
2.1.1 Transformace souřadných systémů.....	22
3 Robotické broušení	22
3.1 Typy zařízení pro robotické broušení	25
3.1.1 Regulace otevřenou smyčkou	26
3.1.2 Regulace s uzavřenou smyčkou	26
3.1.3 Řízení přitlaku skrze robotické rameno	27
3.1.4 Řízení přitlaku externím způsobem	29
3.1.5 Pozice nástroje vůči předmětu pracovní operace.....	30
3.2 Aktuální stav trhu (průzkum trhu)	31
4 Návrh robotického pracoviště	36
4.1 Zadání úkolu	37
4.2 Popis robotu FANUC Cr-15iA	38
4.3 Návrh pracoviště.....	39
4.3.1 Jednotka řízení přitlaku při broušení	41
5 Realizace projektu automatizovaného pracoviště	48
5.1 Instalace zařízení na robot, nastavení zařízení	48
5.2 Testovací provoz.....	49
5.2.1 Upínání dílů na stůl pracoviště	49
5.2.2 Výběr brusného nástroje	51
5.2.3 Program robotu a nastavení přitlaku	54
6 Technicko ekonomické vyhodnocení	55
6.1 Chronometráž na manuálním pracovišti	55
6.2 Pracovní výkon automatizovaného pracoviště	58
6.3 Porovnání ekonomické efektivity pracovišť z hlediska času	61
6.4 Další možné využití automatického systému broušení.....	63
7 Závěr	64
8 Seznam použité literatury.....	65

Příloha č. 1	i
Příloha č. 2	ii
Příloha č. 3	iii
Příloha č. 4	iv
Příloha č. 5	v

Přehled zkratk a symbolů

ISO	.....	Mezinárodní organizace pro standardizaci
FDM	.....	Fused deposition modeling
SNOP	.....	Stroj - Nástroj - Obrobek- Přípravek
NQ	.....	Norton Quantum (abrazivní systém)
PID	.....	Proporcionální- integrační- derivační
PLC	.....	Pogramovatelný logický automat
CNC	.....	Počítačové číslicové řízení
MTM	.....	Methods-Time Measurement
WPA	.....	Workpress Aviation, s.r.o.
LCD	.....	Liquid crystal display
DCS	.....	Dual Check Safety (FANUC)

Seznam obrázků

Obrázek 1: Robot výrobce Mitsubishi Electric se sériovou kinematickou strukturou	15
Obrázek 2: Robot výrobce Kuka typ KR DELTA s paralelní kinematickou strukturou	15
Obrázek 3: Mobilní průmyslový robot Boston Dynamics Stretch s kolovým podvozkem, určený pro vykládání krabic z nákladních automobilů	16
Obrázek 4: Pásový robot s rekonfigurovatelnou strukturou mění svůj tvar pro překonání překážky	17
Obrázek 5: Kartézský robot	18
Obrázek 6: Pracovní oblast cylindrického robotu	18
Obrázek 7: Pracovní oblast sférického robotu	19
Obrázek 8: Pracovní oblast robotu SCARA	19
Obrázek 9: Robot Fanuc SR-6iA	19
Obrázek 10: Svařovací průmyslový robot FANUC ARC Mate 100iD/10L	20
Obrázek 11: Pracovní prostor robotu FANUC ARC Mate 100iD/10L	21
Obrázek 12: Opakovatelnost, rozsahy úhlů pohybu, úhlové rychlosti a momenty setrvačnosti robotu FANUC ARC Mate 100iD/10L	21
Obrázek 13: Postupná rotace okolo os y a z o úhly ϕ a θ	22
Obrázek 14: Pracovní režimy brusného zrna při úběru materiálu	23
Obrázek 15: Podíly tepla odcházejícího z místa řezu	24
Obrázek 16: Přestup tepla při obrábění	24
Obrázek 17: Porovnání konvenčního pojivového systému a systému Vitrium3	25
Obrázek 18: Regulace s otevřenou smyčkou	26
Obrázek 19: Regulace s uzavřenou smyčkou	27
Obrázek 20: Řízení přítlaku skrze robotické rameno	28
Obrázek 21: Řízení přítlaku externím způsobem	29
Obrázek 22: Aplikace tool in hand: ACME- leštění okrasných lišt pro automobily	30
Obrázek 23: Aplikace part in hand: Arcos- obvodové broušení vnější válcové plochy hlavně brokovnice, vnitřní chlazení obrobku kapalinou	31
Obrázek 24: PushCorp: (zleva) active compliance zařízení s vřetenem a jednotka řízení přítlaku FCUFLEX	32
Obrázek 25: Zleva: úhlová a excentrická bruska , odjehlovací vřetena s řízením přítlaku ve více osách s pneumatickým pohonem	32
Obrázek 26: Zásobník s koncovými efekty	33
Obrázek 27: Arcos USA: Buňka pro automatické broušení a leštění madel.	34
Obrázek 28: Brusná hlava Mirka airos na kolaborativním robotu Universal Robots	35
Obrázek 29: Harmonogram projektu	36
Obrázek 30: Příklady typických výrobků firmy WPA.	37

Obrázek 31: Povrchová úprava „brush“- detailní pohled	38
Obrázek 32: Robot FANUC Cr-15iA	39
Obrázek 33: Schéma principu funkce jednotky řízení přitlaku	44
Obrázek 34: 3D vizualizace jednotky pro řízení přitlaku s popisy hlavních komponent	45
Obrázek 35: 3D vizualizace koncového efektoru s bruskou	46
Obrázek 36: Schéma principu funkce „TARE“	47
Obrázek 37: Testování jednotky řízení přitlaku na robotickém pracovišti	48
Obrázek 38: Testování funkce systému řízení přitlaku s vypnutou bruskou	49
Obrázek 39: Vícenásobný upínací přípravek- 3D vizualizace	50
Obrázek 40: Upínání obrobku pomocí strojních svěráků GERARDI 1-3X200	50
Obrázek 41: Výkres L profilu- detail	55
Obrázek 42: Výkres U profilu- detail	55
Obrázek 43: Graf závislosti času broušení na délce obráběné plochy v dávce šesti kusů	62
Obrázek 44: Graf závislosti času broušení na délce obráběné plochy v dávce šesti kusů - detail	62

Seznam tabulek

Tabulka 1: Volba parametrů projektového řešení pracoviště pro robotické broušení	40
Tabulka 2: Rozpis elektronických součástí	42
Tabulka 3: Rozpis nakupovaných součástí	42
Tabulka 4: Rozpis vyráběných součástí	43
Tabulka 5: Výběr brusného nástroje	52
Tabulka 6: Měření času broušení L profilu	56
Tabulka 7: Měření času broušení U profilu	51
Tabulka 8: Měření času zpracování výrobní dávky	56
Tabulka 9: Odhad času zakládání obrobků	59
Tabulka 10: Odhad času otáčení obrobků	60
Tabulka 11: Odhad času vyjmutí obrobků z přípravku a jejich přípravy k transportu	60
Tabulka 12: Vstupní hodnoty pro technicko ekonomického hodnocení	61

1 Úvod

Nahrazování lidské pracovní síly pomocí robotů a jiných způsobů automatizace je v posledních letech silícím trendem. Zejména z důvodu nutnosti snižovat výrobní náklady a nedostatku pracovní síly na trhu práce se roboty stále více uplatňují v nejrůznějších výrobních i manipulačních operacích. Roboty rovněž nahrazují lidskou pracovní sílu v nebezpečných a zdraví škodlivých prostředích. Brousíací pracoviště mezi tato nebezpečná prostředí bezesporu spadají, ruční broušení pohledových ploch dílů z hliníkových slitin před anodizací je zároveň repetitivní činností, kterou lze automatizovat poměrně snadno, a proto je o nahrazení lidské pracovní síly při této výrobní operaci vhodné uvažovat.

Tato diplomová práce si klade za cíl uvést čtenáře do problematiky robotů, metod a aplikací robotického broušení a následně představit konkrétní případ operace, která bude automatizována pomocí robotu FANUC Cr-15Ia a dalších zařízení. V Praktické části bude popsán technický návrh automatického systému, který bude následně realizován a uveden do provozu. Na závěr bude provedeno ekonomické porovnání stávajícího stavu proti automatizovanému pracovišti s vyjádřením ekonomické efektivity.

2 Úvod do robotiky

ISO definice: průmyslový robot

Průmyslovým robotem se rozumí automaticky řízený, reprogramovatelný, víceúčelový manipulační stroj, stacionární, nebo umístěný na pojezdu, určený k použití v průmyslové automatizaci.[1] Definice se týká pouze zařízení, která mají více než tři reprogramovatelné pohybové osy.[2]

Definice: manipulátor

„Manipulátor je mechanické zařízení určené k manipulaci s předměty s méně než třemi pohybovými osami, nebo více než třemi osami, které ale nejsou reprogramovatelné.“ [Čermák, 2018] [2]

Manipulátor tedy lze označit za zařízení s nižší mírou automatizace vhodné k použití k jednodušším manipulačním operacím, které jsou prováděny zpravidla cyklicky.

Roboty lze rozdělit do dvou hlavních kategorií, a to na průmyslové a servisní. Průmyslové roboty jsou navrženy pro výkon zejména repetitivních a náročných úkolů v průmyslových provozech. Tyto stroje jsou obvykle pevně integrovány do výrobních linek, nebo pracovišť a provádějí úkony, jakými jsou například manipulace, montáž, svařování, lepení, broušení, nebo lakování.

Servisní roboty jsou oproti průmyslovým zpravidla uzpůsobeny pro usnadňování života lidí ve specifických situacích či úkolech mimo průmyslový provoz. Jsou proto navrhovány s ohledem na interakci s lidmi a prostředím. Typické aplikace servisních robotů zahrnují úklid, zdravotní péči, inspekci infrastruktury, nebo pomoc osobám s omezenou schopností pohybu. Do této skupiny lze rovněž zařadit roboty vojenské, či policejní. Oproti průmyslovým robotům jsou servisní roboty obvykle flexibilnější a adaptabilnější, tedy jsou schopny reagovat na různé a proměnlivé podmínky, které vyplývají z potřeby pohybu a výkonu činností v různých prostředích.

Roboty lze dále dělit podle následujících kritérií: [1][2]

Podle užití

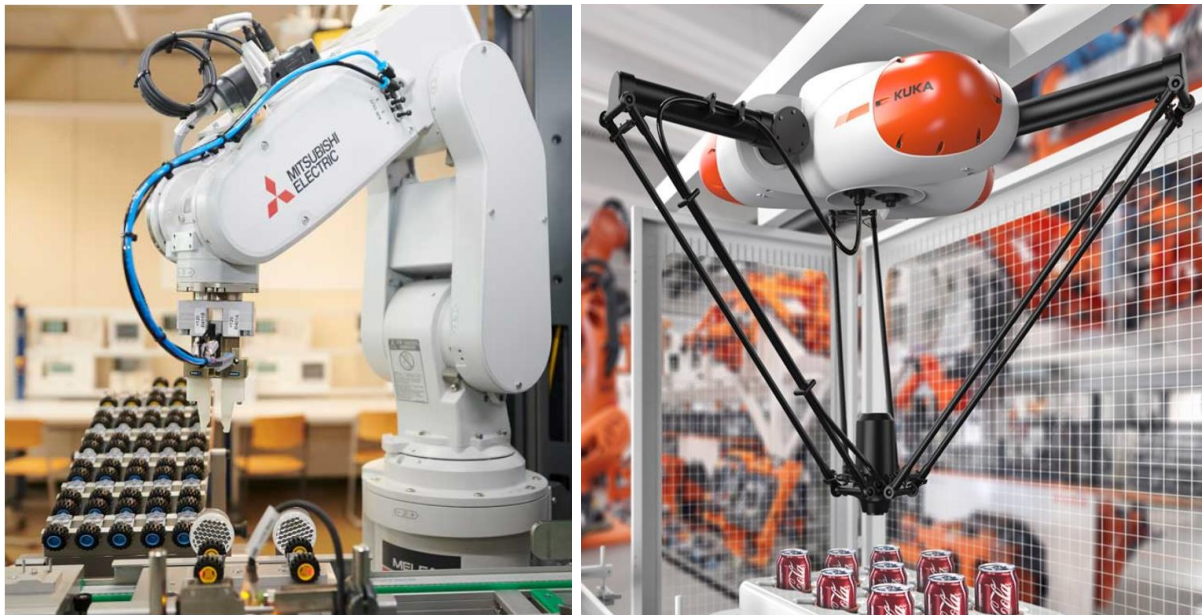
- Technologické operace (lakování, svařování)
- Lékařství
- Vojenské aplikace, atd.

Podle počtu stupňů volnosti

- Universální- se šesti stupni volnosti, tedy šesti řízenými pohybovými osami
- Redundantní- s více než šesti stupni volnosti, které jsou využity například k obcházení překážek v pracovním prostoru
- Deficitní- S méně než šesti stupni volnosti, které se používají například pro manipulaci s předměty v rovině

Podle kinematické struktury

- Sériové
- Paralelní
- Hybridní



Obrázek 1: (vlevo) Robot výrobce Mitsubishi Electric se sériovou kinematickou strukturou[3]

Obrázek 2: (vpravo) Robot výrobce Kuka typ KR DELTA s paralelní kinematickou strukturou[4]

Podle míry mobility

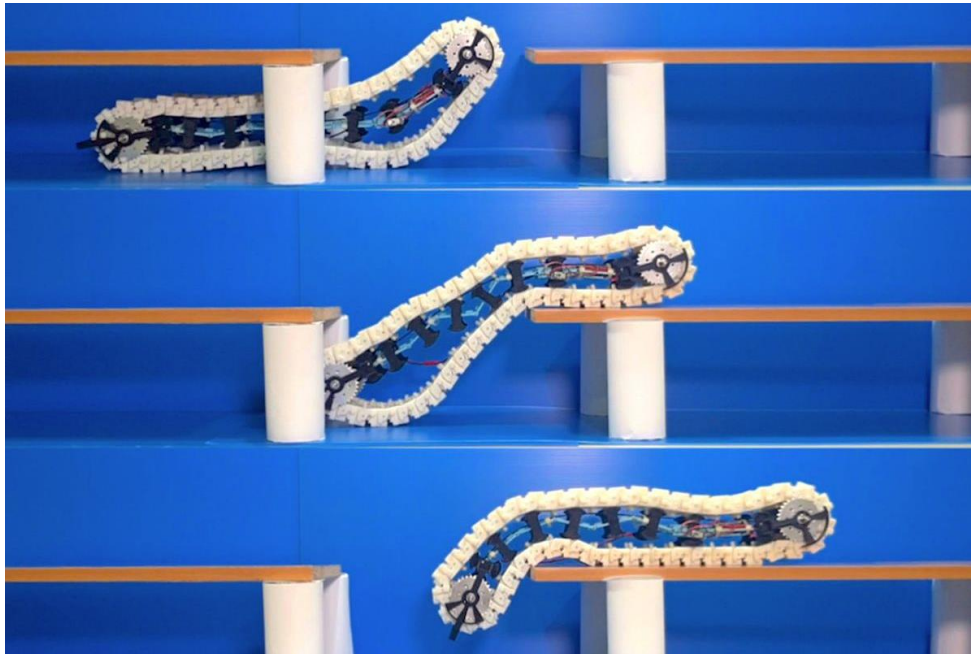
- Imobilní, nebo stacionární- průmyslové roboty bez podvozku
- Mobilní- děleny podle typu podvozku- kolové , pásové, kráčející. Týká se zejména servisních robotů. Průmyslové roboty pro mobilitu využívají zpravidla kolejeový podvozek.



Obrázek 3: Mobilní průmyslový robot Boston Dynamics Stretch s kolovým podvozkem, určený pro vykládání krabic z nákladních automobilů[5]

Podle schopnosti měnit strukturu

- S pevnou strukturou
- (samo)rekonfigurovatelné



Obrázek 4: Pásový robot s rekonfigurovatelnou strukturou mění svůj tvar pro překonání překážky[6]

Podle druhu pohonu

- Elektrické
- Hydraulické
- Pneumatické

Podle geometrie pracovního prostoru

- Kartézské
- Cylindrické
- Sférické
- Angulární
- SCARA

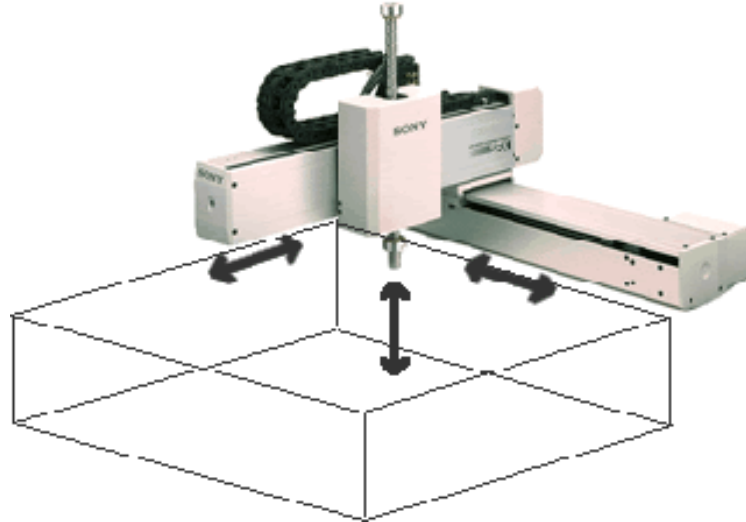
2.1 Souřadné systémy

Poloha částí výrobních zařízení a předmětů výroby, nebo manipulace je v prostoru definována pomocí souřadnic v souřadném systému. Souřadné systémy se volí podle konstrukce robotu, tedy geometrie jeho pracovního prostoru. Geometrii pracovního prostoru lze popsat jako obalovou plochu prostorového tělesa, uvnitř kterého je robot schopen pohybovat koncovým efektem. Polohy na okrajových částech této plochy však někdy nemusí být dosažitelné požadovaným způsobem- robot je například zcela natažen.

Základních pět geometrií pracovního prostoru robotů a manipulátorů bylo vyjmenováno v předešlé kapitole. Zde budou popsány.

- Kartézský robot, neboli robot TTT

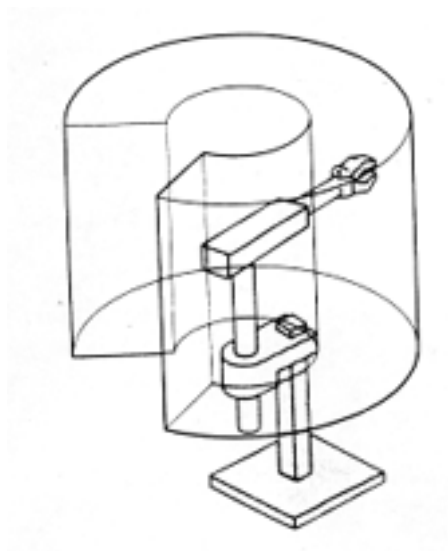
Robot se třemi translačními osami, pracuje v prostoru, který lze popsat kvádrem. Hrany kvádrů představují osy pohybu (x, y, z) kde rovina xy je vodorovná a osa z svislá. Typickým příkladem strojů s tímto pracovním prostorem jsou tříosé frézky, routery, vodní paprsek a FDM 3D tiskárny.



Obrázek 5: Kartézský robot [7]

- Cylindrický robot, neboli robot RTT

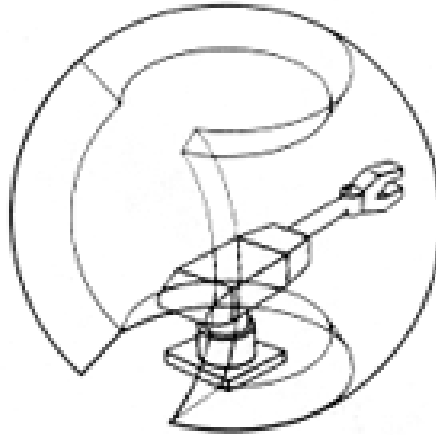
Robot s jednou rotační a dvěma translačními osami- RTT pracuje v prostoru, který lze popsat válcem, nebo jeho částí v závislosti na limitech pohybu os zařízení. Válcový pracovní prostor tvoří vhodné podmínky pro užití tzv. cylindrických souřadnic (z, r, θ). Cylindrické souřadnice jsou prostorovým rozšířením polárních souřadnic (r, θ).



Obrázek 6: Pracovní oblast cylindrického robotu[8]

- Sférický robot, neboli robot RRT

Robot se dvěma navzájem kolmými rotačními vazbami a jednou translační vazbou lze popsat pracovní obálkou tvaru koule, nebo její části. Kinematická struktura robotu RRT je vhodná pro použití sférických souřadnic.

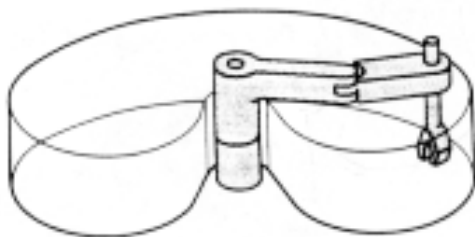


Obrázek 7: Pracovní oblast sférického robotu[8]

(r, θ, φ)

- Robot SCARA (Selective Compliance Assembly Robot Arm)

Konfigurace os SCARA je tvořena dvěma navzájem rovnoběžnými rotačními vazbami a jednou translační. Vytváří tak velkou svobodu v pohybu ve vodorovné rovině. Vertikální pohyb zajišťovaný translační vazbou je zpravidla poměrně omezený, ale dostačující pro rychlou manipulaci se součástmi v rovině.[8]



Obrázek 8: Pracovní oblast robotu SCARA[8]



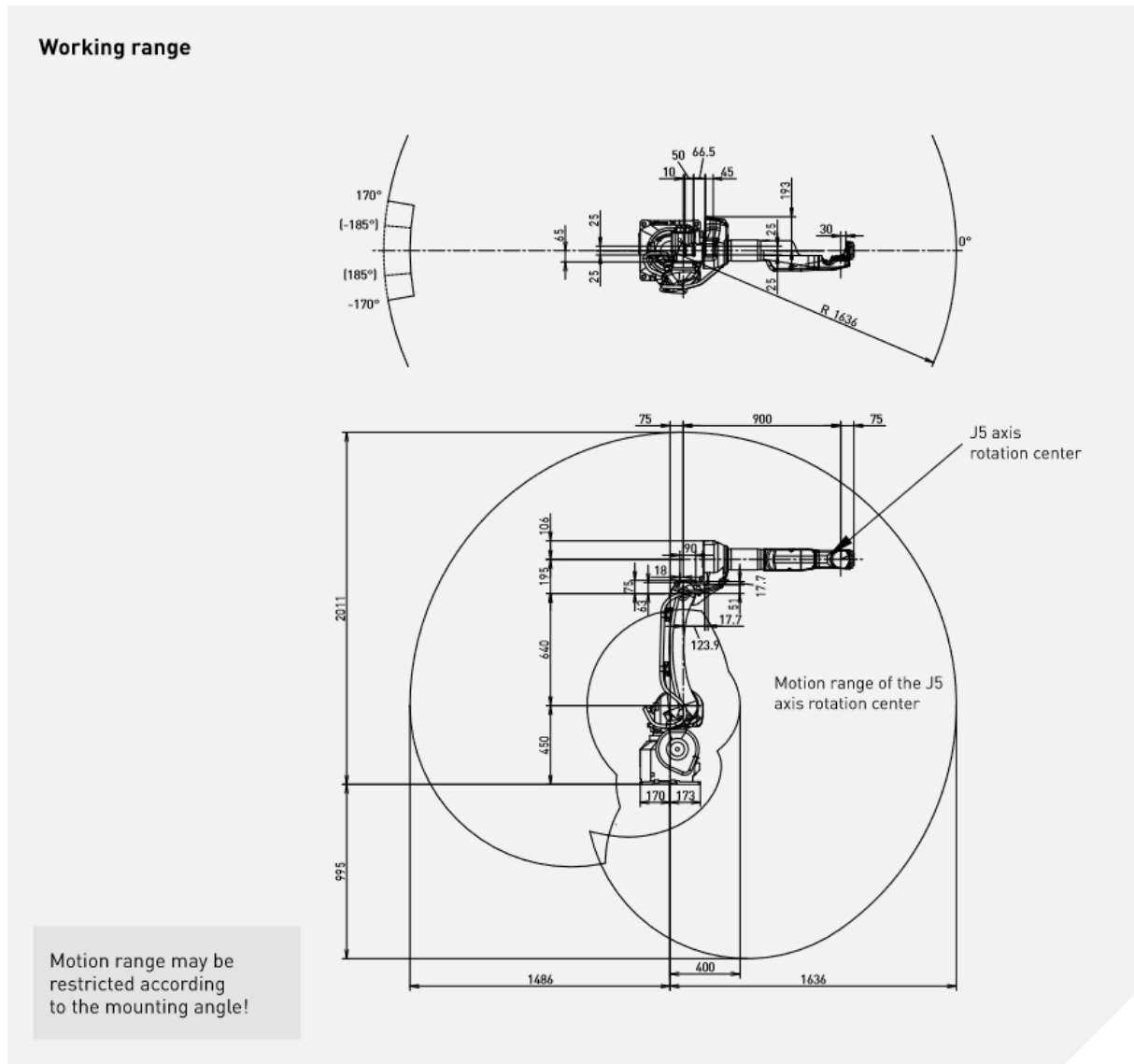
Obrázek 9: Robot Fanuc SR-6iA[9]

- Robot RRR, angulární robot

Roboty se třemi a více rotačními vazbami se nazývají angulárními roboty, protože pohyb v jednotlivých osách lze popsat pouze pomocí úhlu natočení ramene o známé délce. Jedná se o velmi běžnou kinematickou konfiguraci využívanou pro většinu univerzálních průmyslových robotů. Pro usnadnění práce programátora pracují tyto roboty zpravidla v kartézském souřadném systému, který je pro člověka snadno „uchopitelný“ a je snadné se v něm zorientovat. Roboty je možné přepnout i do režimu polárních souřadnic, kdy se jejich poloha nastavuje určením úhlu natočení v jednotlivých rotačních vazbách, což je výhodné, pokud na poloze jednotlivých segmentů záleží, například z důvodu nutnosti obejít překážku v pracovním prostoru.



Obrázek 10: Svařovací průmyslový robot FANUC ARC Mate 100iD/10L [10]



Obrázek 11: Pracovní prostor robotu FANUC ARC Mate 100iD/10L [10]

Ke každému průmyslovému robotu je vydáván technický list, který obsahuje náčrty obálky pracovního prostoru se zakótovanými dosahovými vzdálenostmi. Pohybové možnosti jsou rovněž omezeny rozsahy úhlů otáčení v jednotlivých osách, úhlovými rychlostmi a limity momentů síly a setrvačnosti v jednotlivých osách a maximální hmotností břemene, se kterým je zařízení schopno manipulovat.

ARC Mate 100iD/10L (Hollow wrist)			Motion range [°]						Maximum speed [°/s]						J4 Moment/ Inertia [Nm/kgm ²]	J5 Moment/ Inertia [Nm/kgm ²]	J6 Moment/ Inertia [Nm/kgm ²]
Controlled axes	Repeatability (mm)	Mechanical weight (kg)	J1	J2	J3	J4	J5	J6	J1	J2	J3	J4	J5	J6	22.0/0.65	22.0/0.65	9.8/0.17
			6	± 0.03*	150	340 (370)	235	455	380	360	900	260	240	260				430	450	720

Obrázek 12: Opakovatelnost, rozsahy úhlů pohybu, úhlové rychlosti a momenty setrvačnosti robotu FANUC ARC Mate 100iD/10L [10]

2.1.1 Transformace souřadných systémů

Polohu a natočení koncového efektoru robotu, nástrojů a předmětů v hlavním souřadném systému robotu popisují jejich vlastní souřadné systémy, anglicky označované jako frame. Tyto „vnořené“ souřadné systémy umožňují snáze přizpůsobovat pohyb robotu požadavkům operace i okolí, protože, na rozdíl od pouhých bodů v základním souřadném systému robotu, určují i orientaci os.

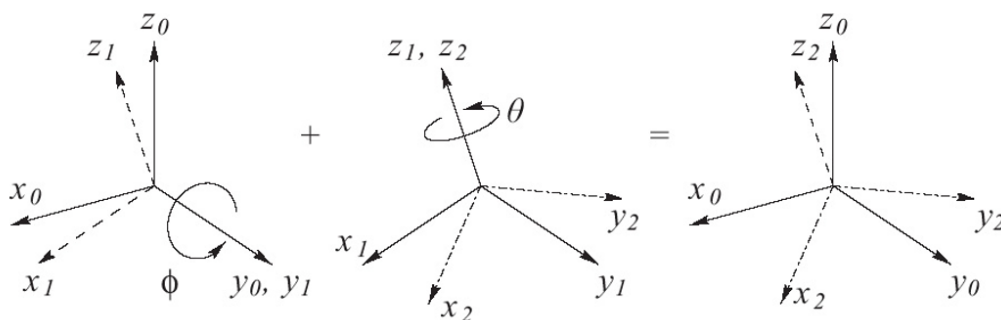
Pokud je tedy například nutné, aby robot z určitého směru uchopil předmět, je vhodné tento předmět opatřit vlastním souřadným systémem a při přiblížení efektoru robotu k předmětu přepnout do souřadného systému předmětu. To umožní oba souřadné systémy zarovnat a robot bude předmět uchopovat vždy stejným způsobem.

„Přepnutí“ mezi souřadnými systémy je možné díky tzv. transformaci. Tu lze rozdělit do dvou kroků na translaci a rotaci. Translace probíhá vyjádřením polohy v prostoru pomocí sčítání hodnot souřadnic v polohových vektorech, které jsou zapisovány v podobě sloupcové matice.[2]

Rotace se provádí pomocí tzv. rotačních matic. Typickým případem je tzv. postupná rotace okolo 2 os. Počátek souřadného systému se při rotaci neposouvá.

$$R = R_{y,\phi} R_{z,\theta}$$

$$= \begin{bmatrix} \cos \phi & 0 & \sin \phi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \phi & 0 & \cos \phi \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \theta & -\sin \theta & 0 \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \phi \cos \theta & -\cos \phi \sin \theta & \sin \phi \\ \sin \theta & \cos \theta & 0 \\ -\sin \phi \cos \theta & \sin \phi \sin \theta & \cos \phi \end{bmatrix}$$



Obrázek 13: Postupná rotace okolo os y a z o úhly ϕ a θ [11]

3 Robotické broušení

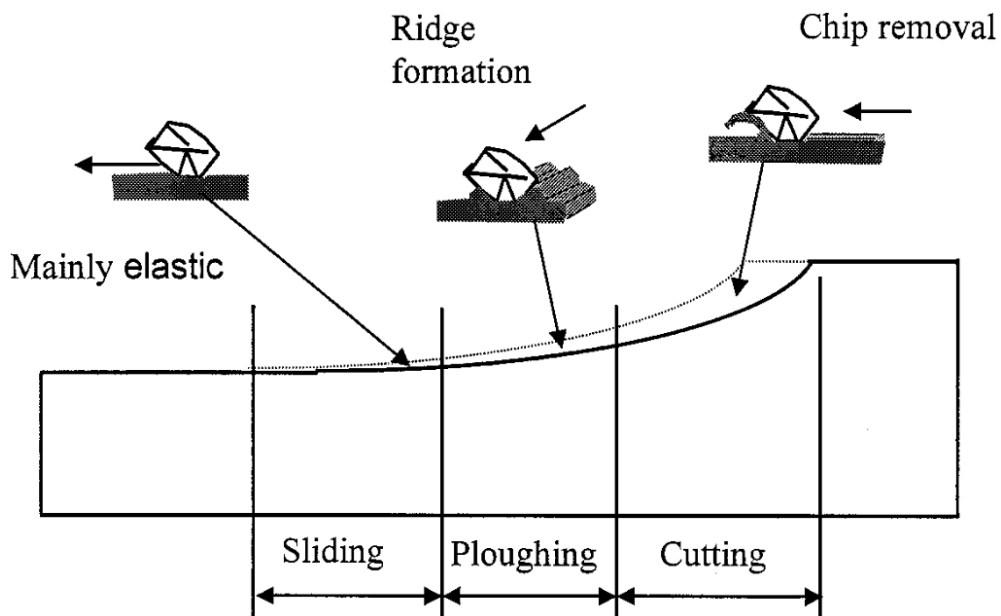
Aplikace broušení pomocí robotů se do značné míry omezují na dvě hlavní oblasti. První z nich je broušení povrchů s cílem ubírat velké množství materiálu, typicky broušení svarů, odlitků, nebo odhroťování výpalků. Druhou z nich je broušení jako příprava před dalšími povrchovými úpravami, jakými může být například anodická oxidace slitin hliníku, či lakování.

Při těchto aplikacích je zpravidla kladen větší důraz na přesnost, respektive stejnorodost vytvářeného povrchu, než při aplikacích vysokouběrových, protože se jedná o přípravnou dokončovací operaci.

Standartní broušení je velmi přesná metoda obrábění, jejímž cílem je dosahování vysoce jakostních povrchů a přesných rozměrů. Jsou proto kladeny značně vysoké požadavky na přesnost polohování stroje a na celkovou tuhost soustavy SNOB. Běžné průmyslové roboty však zdaleka nedosahují parametrů tuhosti a přesnosti polohování nutných pro přesné broušení.

Faktorem, který významně ovlivňuje výsledky obrábění, jsou řezné síly. V případě broušení má na rychlost úběru materiálu velký vliv síla přitlaku, která působí mezi brusným nástrojem a obrobkem. Řízením síly přitlaku lze eliminovat vady vytvářeného povrchu a zajistit předvídatelné a opakovatelné výsledky při broušení dílů s různými rozměry, či tvrdostí. Ovlivňujícím faktorem, který lze tímto způsobem kompenzovat je i opotřebení brusného nástroje, respektive postupná změna jeho rozměrů při broušení. Řízením síly lze rovněž zajistit konstantní rychlost úběru materiálu.[12]

Významným nežádoucím faktorem při broušení je vznikající teplo. Teplo vzniká při broušení podobným způsobem, jako při běžném třískovém obrábění, tedy působením vlivů tření mezi nástrojem a obrobkem a deformací obráběného materiálu. Rozdílem mezi obráběním nástroji s definovanou geometrií a abrazivním obráběním je zejména v geometrii řezného klínu. Každé individuální brusné zrno má velké množství řezných hran a tedy i řezných klínů, které mají nejrůznější úhly. Zrna, mají rovněž zpravidla negativní úhel nastavení vůči obráběnému povrchu. Při obrábění s negativním úhlem nastavení je tření vyšší, protože dochází k hrnutí materiálu obrobku. Viz (obr. 14).

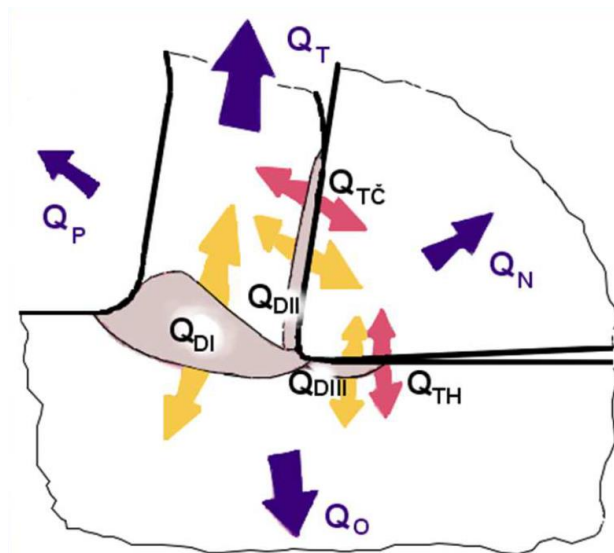


Obrázek 14: Pracovní režimy brusného zrna při úběru materiálu [33]

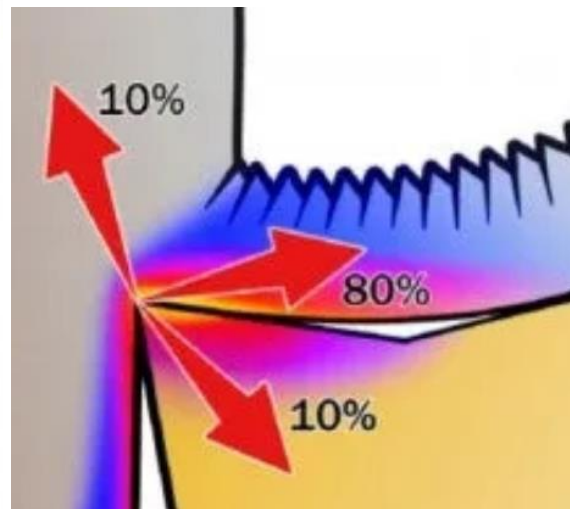
Rovněž je vhodné poznamenat, že většina brusných nástrojů je vyráběna z odlišných materiálů, než nástroje pro třískové obrábění. V případě abraziv se nejčastěji jedná o oxidické, nebo neoxidické keramické materiály modifikované příměsemi, či legurami. Keramické materiály jsou obecně považovány za tepelné izolanty. Teplo generované řezným procesem proto přechází do nástroje v menší míře (téměř zanedbatelné), než při třískovém obrábění nástroji s definovanou geometrií. A naopak ve větší míře přechází do povrchu broušeného

dílu.[33] Přejít tepla do povrchu dílu je rovněž výrazně závislý na tepelné vodivosti, tvrdosti a pevnosti materiálu obrobku a řezné rychlosti. U tvrdých materiálů dochází se zvyšující se řeznou rychlostí k nárůstu teploty v místě řezu, která však po překročení určité meze opět klesá. Při broušení velmi tvrdého obrobku z karbidu křemíku dochází k poklesu teploty přibližně při překročení řezné rychlosti $90 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, v závislosti na brusném nástroji. Naopak při broušení obrobku ze slitiny titanu TC4 (TiGr5) s výrazně vyšší plasticitou a nižší tvrdostí k poklesu teploty při řezných rychlostech v rozsahu 30 až $120 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nedochází. Slitina titanu TC4 má rovněž přibližně 12x nižší tepelnou vodivost $6.8 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$, oproti $83.6 \text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{K})^{-1}$ pro SiC, což vede k výraznému zpomalení odvodu tepla z místa řezu zkrze obrobek.[35]

Při běžném třískovém obrábění nástrojem s definovanou geometrií břitu může skrze třísky, v závislosti na geometrii nástroje, způsobu obrábění a zvolených řezných podmínkách odcházet i 80% vznikajícího tepla. Pokud tomu tak je, lze hovořit o vhodném nastavení řezných podmínek. Zbylé teplo odchází do obrobku, nástroje a prostředí.[14]



Obrázek 16: Přestup tepla při obrábění [13]



Obrázek 15: Podíly tepla odcházejícího z místa řezu [14]

Obecná rovnice tepelné bilance při obrábění[13]

$$Q_{DI} + Q_{DII} + Q_{DIII} + Q_{TC} + Q_{TH} = Q_T + Q_O + Q_N + Q_P \quad (1)$$

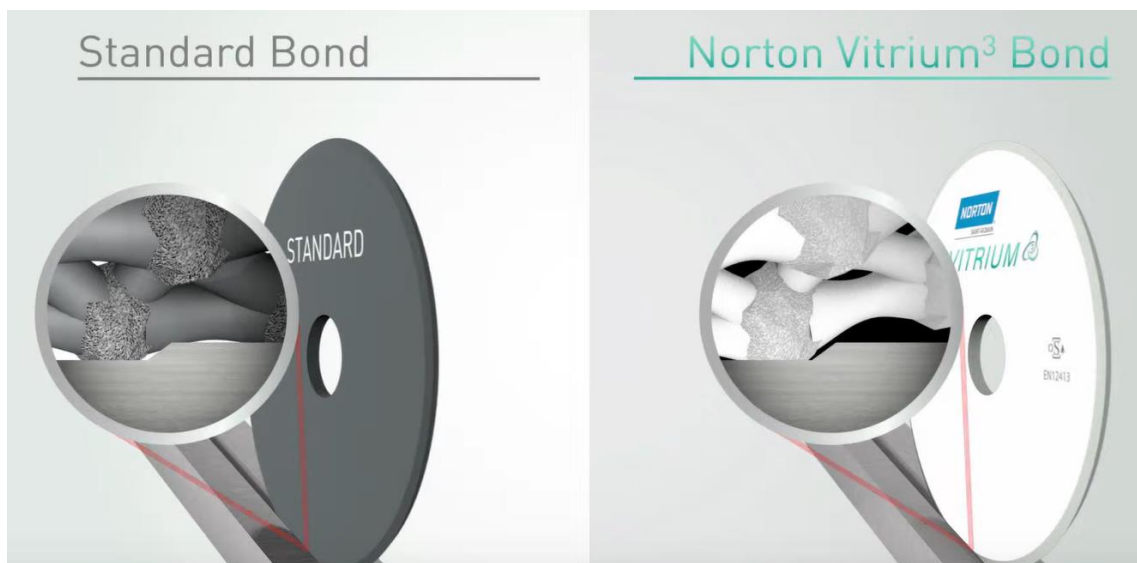
- Q_{DI} teplo vzniklé v oblasti primárních plastických deformací
- Q_{DII} teplo vzniklé v oblasti sekundárních plastických deformací
- Q_{DIII} teplo vzniklé v oblasti terciálních plastických deformací
- Q_{TC} teplo vzniklé třením třísky na čele nástroje
- Q_{TH} teplo vzniklé třením třísky na hřbetu nástroje

- Q_T - teplo odvedené třískou
- Q_O - teplo odvedené obrobkem
- Q_N - teplo odvedené nástrojem
- Q_P - teplo odvedené prostředím

Při broušení používáme nástroje s nedefinovanou geometrií. Vlastnosti brusných nástrojů nejvíce ovlivňuje obecný tvar zrn, členitost povrchu, velikost zrn, mechanické vlastnosti zrn a pojivový systém, respektive jeho porozita, tvrdost a další vlastnosti vyplývající například z chemických přísad podporujících řízený rozpad abrazivních zrn (tzv. aktivátor mletí).[15]

Různé brusné nástroje se skládají z brusných zrn odlišných charakterů. Tvar brusných zrn, zejména jejich ostrost a členitost, tedy množství a tvar ostrých hran, ovlivňují velikost tření a tedy i množství při broušení vznikajícího tepla. Při použití nástroje s ostrými zrny, jakými jsou například zrna 3M Cubitron II s řízenou geometrií, vzniká vlivem snížení tření podstatně méně tepla, než při broušení konvenčním abrazivem, jakým je například karbid křemíku. Ostrá zrna snáze oddělují třísky, což vede k snížení množství tepla vznikajícího vlivem plastických deformací materiálu. Moderní abraziva se rovněž při dodržení limitu minimálního nutného zatížení zrna samoostří, což prodlužuje životnost brusných nástrojů. Samoostřením rozumíme odlamování opotřeбенých částí jednotlivých zrn způsobem, který vytváří nové rezné hrany.[15]

Brusné nástroje se dále liší porozitou. Póry v brusném nástroji slouží k podobnému účelu jako zubová mezera na protahovacím trnu, tedy k ukládání a transportu třísky z místa řezu. Póry brusných nástrojů snižují tření, protože vlivem nepřítomnosti zrna a pojiva nedochází v tomto místě ke kontaktu s povrchem obrobku. Existují brusné nástroje s pojivovým systémem, který zrna obklopuje v menší míře. Jedním z takových systémů je Vitrium3 výrobce Norton.[16] Pojivový systém Vitrium3 je uplatňován v kombinaci s moderním mikrokrytalickým abrazivem Norton Quantum (NQ).[15]



Obrázek 17: Porovnání konvenčního pojivového systému a systému Vitrium3[16]

3.1 Typy zařízení pro robotické broušení

Existuje řada firem, které nabízí řešení pro robotické broušení. Patří mezi ně například PushCorp, Acme, Teqram a další. Výrobci těchto zařízení dosahují stejného cíle, konzistentních výsledků broušení, pomocí různých řešení. Ta budou popsána v této kapitole.

Nejprve je však nutné přiblížit několik pojmů, které jsou pro popis konstrukčních řešení robotických brusných systémů zásadní.

3.1.1 Regulace otevřenou smyčkou

Regulátor s otevřenou smyčkou, nebo také regulátor bez zpětné vazby vytváří regulační zásahy na základě vstupních dat, která s řízeným procesem souvisí nepřímou. V tomto způsobu regulace není vstupním parametrem pro vytvoření regulačního zásahu výstupní veličina (regulovaná), ale hodnota veličiny externí, na základě které lze změnu hodnoty kontrolované veličiny předpokládat. Je proto vhodné tento typ regulátoru aplikovat na jednoduché systémy, kterých matematický popis je znám.[18][37]

Příkladem může být ohřívač vody spínaný časovačem. Namísto sledování okamžité teploty vody, která nejlépe popisuje aktuální nebo cílový stav, je sledován čas, po který je voda ohřívána. Za předpokladu, že vstupní teplota vody se příliš nemění lze s dostatečnou přesností její teplotu odhadovat na základě doby ohřevu.

Regulace s otevřenou smyčkou není schopna reagovat na změnu v systému způsobenou vnějšími vlivy. Například změna vstupní teploty vody uvnitř výše zmíněného ohřívače.[37]



Obrázek 18: Regulace s otevřenou smyčkou [37]

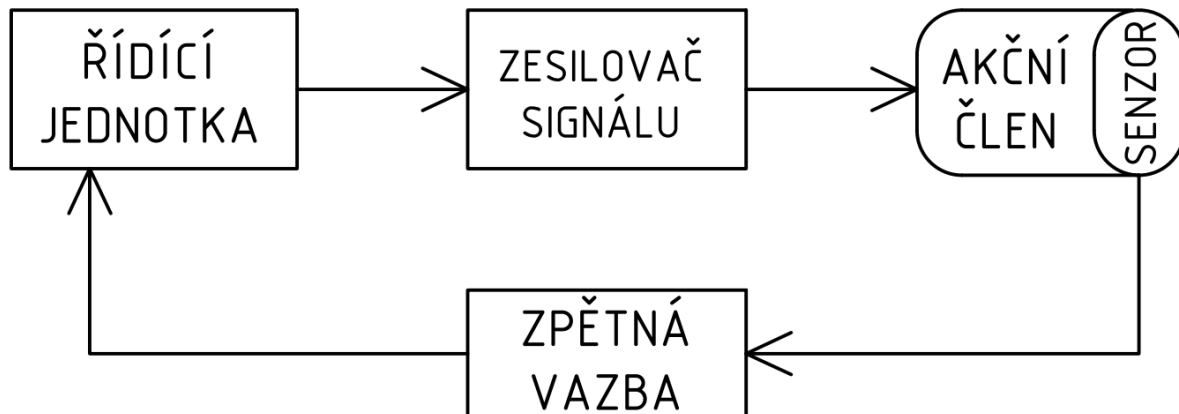
3.1.2 Regulace s uzavřenou smyčkou

Regulátor s uzavřenou smyčkou, nebo také zpětnovazebný (feedback) regulátor vytváří regulační zásah na základě rozdílu hodnoty sledované veličiny, která přímo popisuje okamžitý stav regulovaného systému, a hodnotě cílové v praxi často označované jako tzv. setpoint. Tento způsob řízení umožňuje regulátoru se adaptovat na změny dynamiky regulovaného systému, což vede ke zvýšení spolehlivosti v širším pásmu podmínek. Zpětnovazebný regulátor rovněž dokáže na základě měření plynule upravovat velikost a rychlost regulačního zásahu.

Výhodou zpětnovazebného řízení je, že není nutné znát matematický popis regulovaného systému pro jeho úspěšnou regulaci. Regulátor totiž pomocí senzorů reaguje na jeho okamžitý stav a regulační zásah mu přizpůsobuje.[17][37]

Regulační zásahy je nutné vhodným způsobem počítat tak, aby byly vždy přiměřené velikosti regulační odchylky. Zároveň je důležité, aby se regulační zásah v systému projevil dostatečně rychle. Pokud je regulační zásah příliš agresivní, může dojít v systému k oscilaci. Jedním z regulátorů vhodných pro zpětnovazebné řízení je tzv. PID regulátor.

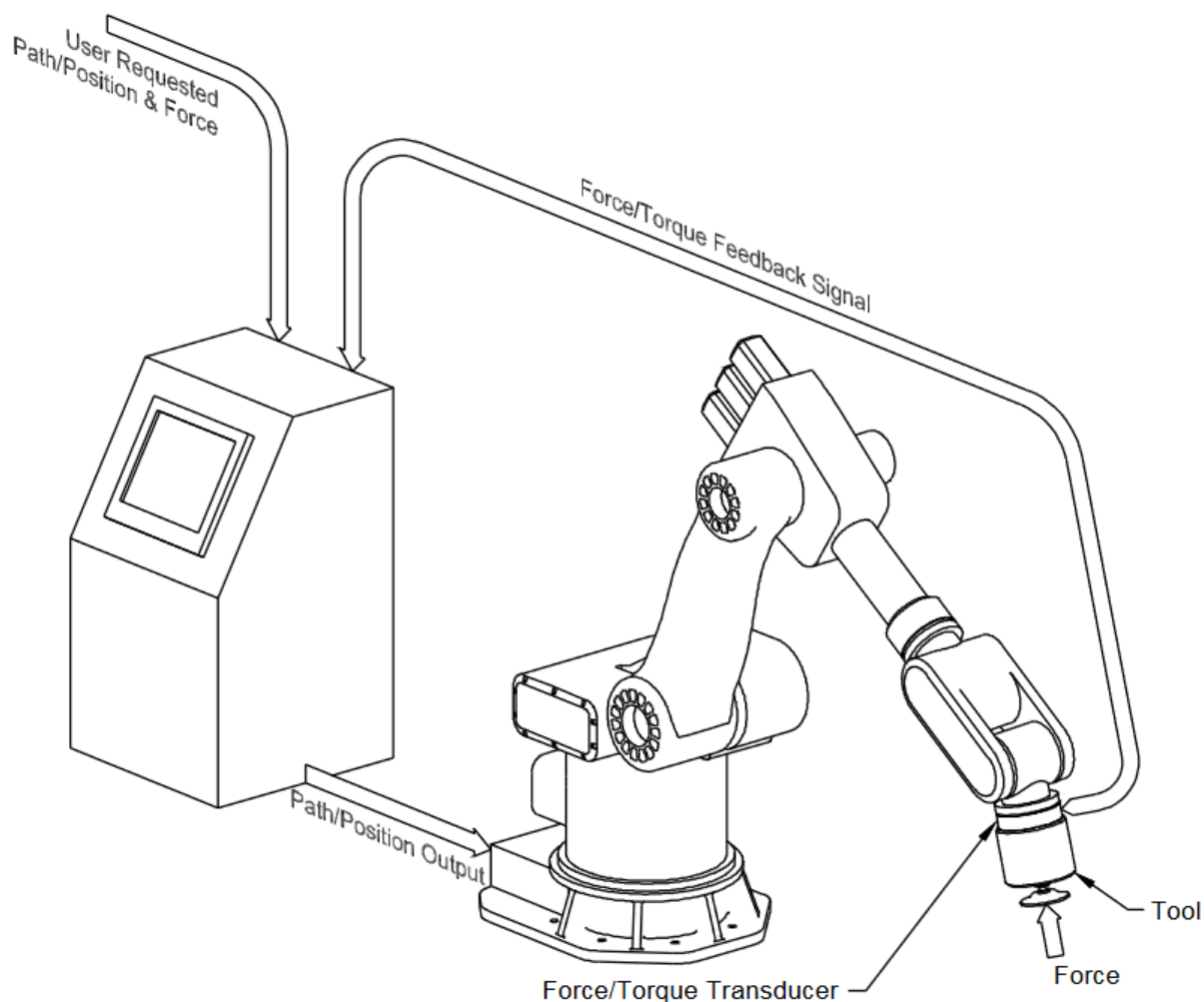
REGULACE S UZAVŘENOU SMYČKOU



Obrázek 19: Regulace s uzavřenou smyčkou [37]

3.1.3 Řízení přítlaku skrze robotické rameno

V anglické literatuře označované jako „through the arm compliance“, spočívá v řízení přítlaku síly dynamickými změnami trasy robotu, které jsou počítány řídicí jednotkou robotu na základě měření sil a momentů na zápěstí robotu. K silově-momentovému snímači je připevněn koncový efektor, kterým robot působí silou proti povrchu obrobku. [20]



Obrázek 20: Řízení přítlaku skrze robotické rameno [19]

Odchylka od požadované síly přítlaku vyvolá v systému pohybovou reakci, která vede ke změně polohy koncového efektoru nad obrobkem, respektive ke změně polohy oproti naprogramované trase robotu. Použitím silově-momentového snímače, který podává zpětnou vazbu řídicí jednotce, na základě které robotické rameno reaguje změnou polohy, vzniká spřažený systém, respektive systém řízení přítlaku se stává součástí systému řízení robotu.[19][18]

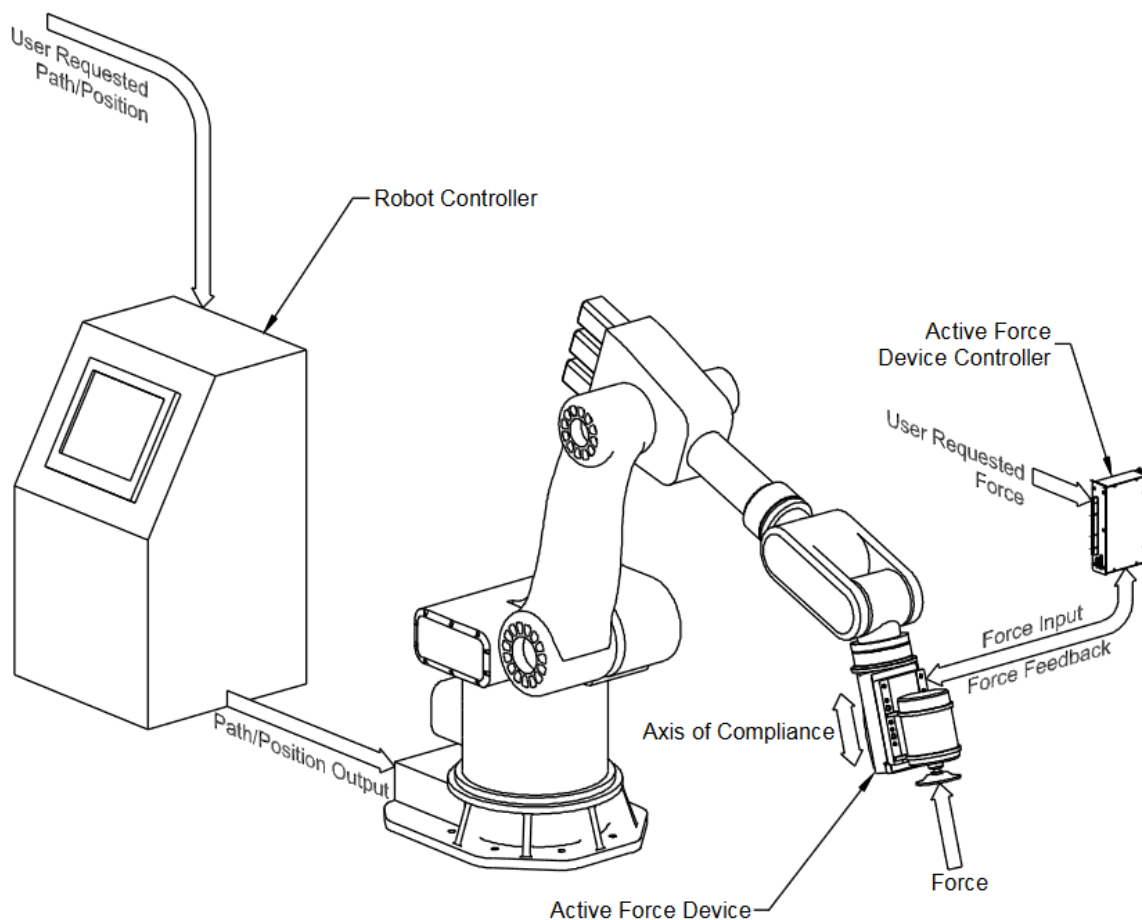
Pro zajištění dostatečné přesnosti je u robotických ramen kladen důraz na vysokou tuhost. Pohony uvnitř robotů jsou konstruovány pro změnu polohy robotického ramena a ne pro statické vyvíjení síly. Postavením koncového efektoru robotu proti tuhému povrchu a zadání příkazu k pohybu kolmo proti němu, dojde v momentu vzniku fyzického kontaktu koncového efektoru s povrchem k téměř okamžitému skokovému nárůstu síly působící mezi koncovým efektoem a povrchem. Za předpokladu teoreticky absolutní tuhosti robotu a povrchu by nárůst síly byl nekonečně rychlý, teoreticky omezený maximální silou, kterou jsou pohony robotu schopny vyvinout. Z toho vyplývá, že řízení přítlaku skrze robotické rameno je pro soustavu tuhý robot – tuhý obrobek prakticky neproveditelným úkolem.

Řízení přítlaku změnou polohy koncového efektoru výrazně usnadňuje implementace pružného členu mezi obrobek a nástroj. Tento člen svou poddajností umožní robotu vyvinout

proti obrobku sílu změnou polohy, respektive svým stlačením. Z tohoto důvodu jsou zejména pro tento způsob řízení přítlaku vhodné flexibilní abrazivní nástroje, mezi které patří například brusná rouna, nebo brusiva na podložce připevněná k deformovatelnému nosiči, např. expanznímu válci.

3.1.4 Řízení přítlaku externím způsobem

V anglické literatuře označováno jako „around the arm compliance“ spočívá v připojení zařízení, které po připevnění k zápěstí robotu rozšiřuje jeho pohybové možnosti o jednu osu, která je řízena nezávisle na robotickém rameni. Rameno v tomto případě slouží pouze k nastavování polohy koncového efektoru a síla je vyvíjena nezávisle na robotu rozšiřující řízenou osou.



Obrázek 21: Řízení přítlaku externím způsobem [19]

Pro možnosti regulovat přítlak musí být externí jednotka řízení přítlaku vybavena aktuátorem. O vhodnosti použití aktuátorů dle principu jejich funkce se názory odborné veřejnosti shodují v tom, že by měla být v systému vhodným způsobem zajištěna elasticita, aby nedocházelo ke stejným potížím, které byly popsány v posledních dvou odstavcích předchozí podkapitoly. Vhodným médiem pro vyvíjení síly je proto například stlačený vzduch. [19]

Řízení přítlaku externím způsobem je možné řešit pomocí regulace s otevřenou, nebo uzavřenou smyčkou.

3.1.5 Pozice nástroje vůči předmětu pracovní operace

Návrh robotických pracovišť se systémy řízení přítlaku, respektive robotických pracovišť obecně, lze dělit na dva typy, v anglické literatuře označované jako „part in hand application“ a „tool in hand application“, tedy aplikace s obrobkem nebo dílem v ruce a aplikace s nástrojem v ruce, kde rukou je myšleno robotické rameno.[21] Hlavními faktory, které ovlivňují rozhodování mezi part-in-hand a tool-in-hand aplikací jsou:

- Rozměry obrobku
- Hmotnost obrobku
- Požadovaný výkon brusky
- Požadovaná síla přítlaku
- Zvláštní požadavky na výrobní proces:
 - Vnitřní chlazení obrobků
 - Obvodové broušení
 - Možnost brousit více dílů zároveň
 - Zástavbová plocha výrobního systému



Obrázek 22: Aplikace tool in hand: ACME- leštění okrasných lišt pro automobily [22]



Obrázek 23: Aplikace part in hand: Arcos- obvodové broušení vnější válcové plochy hlavně brokovnice, vnitřní chlazení obrobku kapalinou [23]

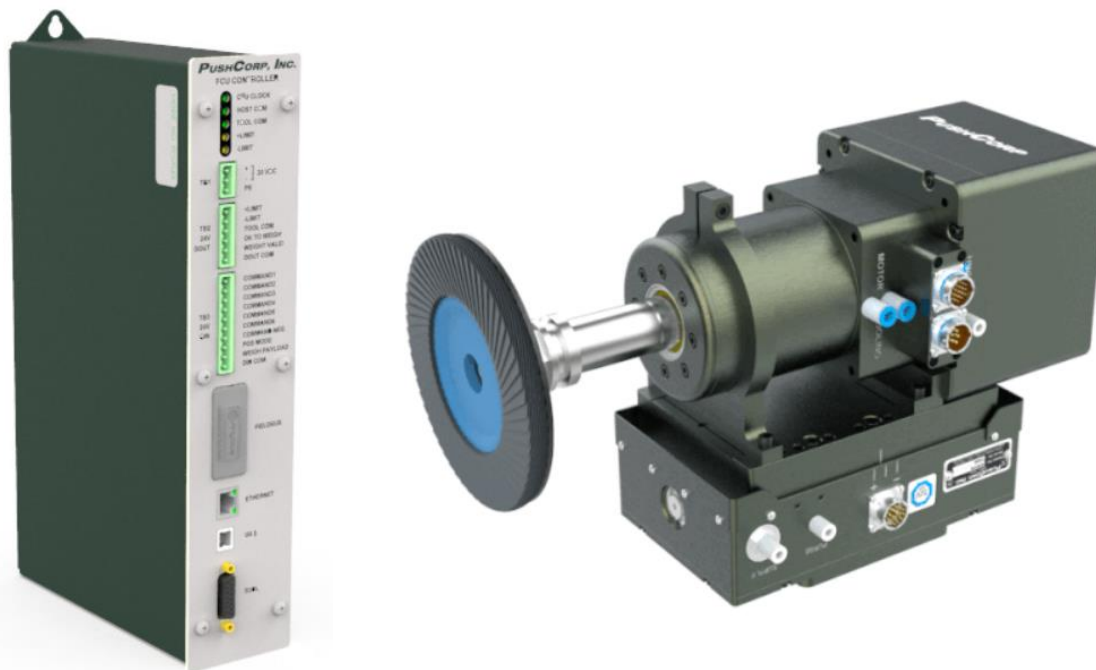
3.2 Aktuální stav trhu (průzkum trhu)

Pro realizaci cíle diplomové práce byl proveden průzkum trhu, podařilo se mi najít následující výrobce robotických brousících systémů. V další části stručně popíši jejich portfolia. Údaje o nákupní ceně zpravidla výrobci uváděny nejsou a odvíjí se od konkrétních požadavků zákazníka.

- PushCorp nabízí 2 druhy zařízení pro robotické broušení. Prvním jsou tzv. active compliance zařízení, která jsou regulována zpětnovazebně.

Jejich výhodou je, že stačí pouze nastavit sílu přítlaku broušení a zařízení bude touto silou působit proti obrobku v libovolném směru zcela automaticky, včetně kompenzace vlivu působení gravitace. To je možné díky sensorům síly a akcelerometrům. Zařízení pracuje na pneumaticko-elektronickém principu a pro jeho provoz je nutný přívod stlačeného vzduchu. Jedná se o platformu připevněnou k zápěstí robotu, vybavenou jednou pohybovou osou, která slouží pro silovou kompenzaci. Na tuto platformu je následně připevněno vřeteno, nebo obrobek. Pro provoz je vyžadována jednotka řízení přítlaku, která řídí funkci zařízení a umožňuje jeho synchronizaci s dalšími zařízeními, například pomocí PLC.[18]

Dále nabízí tzv. passive compliance variantu zařízení, které pracuje na čistě pneumatickém principu a vyžaduje přívod stlačeného vzduchu s regulovaným tlakem, který ovlivňuje sílu, kterou bude zařízení vyvíjet. Jedná se o dopředně regulovaný systém, který nedokáže kompenzovat vliv gravitace při změnách orientace kompenzační osy zařízení vůči směru jejího působení. Tento nedostatek předurčuje tento typ zařízení k použití v aplikacích part in hand, kdy se jeho orientace nemění.[18]



Obrázek 24: PushCorp: (zleva) active compliance zařízení s vřetenem a jednotka řízení přítlaku FCUFLEX [18]

- ATI Industrial Automation má v nabídce řadu zařízení pro automatizaci robotických pracovišť. Jsou mezi nimi například zařízení pro automatickou rychlou výměnu nástrojů a koncových efektorů, silově momentové sensory a vřetena s integrovaným systémem řízení přítlaku ve více osách zároveň. Tato vřetena jsou zejména vhodná pro robotické odjehlování a srážení hran výpalků. V nabídce jsou i excentrické a úhlové robotické brusky s integrovaným řízením přítlaku. [24] Dále nabízí pasivní systém řízení přítlaku, který je modulární a je možné na něj připevnit takřka libovolný nástroj, nebo upínač obrobků.[24]



Obrázek 25: Zleva: úhlová a excentrická bruska, odjehlovací vřetena s řízením přítlaku ve více osách s pneumatickým pohonem [24]

- Teqram se specializuje na automatizační řešení pomocí robotických ramen vybavených strojovým viděním. Dle sortimentu, který se skládá z koncových efektorů umožňujících rychlou výměnu pomocí zásobníku, obrabečů výpalků z plechu i desek a magnetických gripperů (chapadel) různých rozměrů, lze usoudit, že se společnost zaměřuje zejména na automatizaci výrobních a manipulačních operací při výrobě výpalků a plošně tvářených součástí. [25]

Pro robotické broušení používá systém modulárních závěsů, na které jsou připevňovány běžné ruční nástroje. O systému řízení přítlaku se na webových stránkách nepíše, z pozorování obrázků (obr.25), kterými se společnost prezentuje lze usoudit, že koncové efekторы systémem řízení přítlaku vybaveny nejsou. Na bruskách jsou osazeny poddajné brusné nástroje, kromě čtvrté zleva. Ta je namísto poddajného nástroje osazena pevným lamelovým diskem a závažím, které pravděpodobně slouží k vyvíjení přítlaku a kompenzaci tvarových odchylek. Pro začišťování hran výpalků je takovéto řešení dostačující, pro dokončovací operace však není dostatečně precizní.



Obrázek 26: Zásobník s koncovými efektory[25]

Roboty lze díky strojovému vidění snáze programovat pro jednoduché manipulační operace, kde se poloha dílů, se kterými je manipulováno často liší. Strojové vidění umožňuje robotu rozlišit jednotlivé díly na paletě a určit jejich pozici v prostoru pro jejich uchopení, například pomocí magnetu. Robot například může být zásobován rozdílnými obrobky zároveň a pomocí strojového vidění mohou být vyvolávány programy pro broušení příslušného dílu.

- Arcos se zabývá konstrukcí robotických pracovišť, která jsou zpravidla plně integrována do samostatně odvětrávaných a odhlučněných pracovních buněk.[26] Tyto buňky lze v podstatě považovat za speciální CNC výrobní stroje a hodí se zejména do velkosériových výrobních provozů, protože nejsou příliš flexibilní. Změna výrobního programu pro takovéto zařízení vyžaduje kromě přeprogramování také konstrukci nových poměrně složitých přípravků, na kterých je funkce systému závislá. (Vozíky pro zavážení polotovarů, speciální koncové efekторы, držáky dílů apod. viz Obr.23 a obr.27)

Brousící zařízení pro robotické buňky jsou vybavena patentovaným silově kompenzačním systémem. Princip jeho funkce na webu společnosti popsán není.[27]



Obrázek 27: Arcos USA: buňka pro automatické broušení a leštění model. Zakládání pomocí otočného stolu s přípravkem, robot je vybaven koncovým efektem s rozšiřující rotační pohybovou osou pro otáčení obrobků.[28]

- Acme manufacturing vyvíjí automatizovaná pracoviště se zaměřením na dokončovací operace. Zejména zajímavým produktem společnosti je software, který monitoruje stav brusných nástrojů a přizpůsobuje procesní podmínky (řezná rychlost, přítlak) jejich stavu. Tento software pro kontrolu opotřebení brusných nástrojů je dle slov uvedených na webu společnosti schopen až 5x prodloužit životnost brusných pásů.[29] Společnost Acme je zaměřena na projektování a realizaci robotických pracovišť, k čemu často využívá vhodná zařízení od jiných dodavatelů. Například kompenzační zařízení od PushCorp, nebo ATI automation.[29]
- Servind je česká firma, specializující se mimo jiné na automatizaci procesů pomocí kolaborativních robotů. Mezi tyto procesy patří i broušení, pro které využívají robotické excentrické brusné hlavy výrobce Mirka, zejména s kolaborativními roboty výrobce

Universal Robots, brusné hlavy však mohou být instalovány i na roboty jiných výrobců.[30] Přítlak při broušení je zajišťován pomocí senzorů síly a momentu v kloubech robotu, nebo pomocí externího zařízení montovaného mezi brusnou hlavu a zápěstí robotu. Brusné hlavy Mirka řady AIROS, AIROP a AIOS nedisponují integrovaným senzorem síly a řízení přítlaku ani kompenzační osou, proto musí být přítlak zajišťován pomocí řízení skrze robotické rameno.[31] Na stránkách firmy je uváděn jako jeden z parametrů brusných hlav zdvih.[30] V tomto případě se nejedná o zdvih kompenzační osy, ale o výchytku středu brusné hlavy při jejím excentrickém pohybu.

Excentrické brusky jsou vhodné pro broušení velkých ploch, kde není vyžadován velký úběr materiálu. Jedná se například o operace přípravy povrchu před nanášením další vrstvy laku, broušení ploch v dřevozpracovatelském průmyslu a broušení a leštění povrchů dílů z kompozitních materiálů.



Obrázek 28: [32] Brusná hlava Mirka airos na kolaborativním robotu Universal Robots

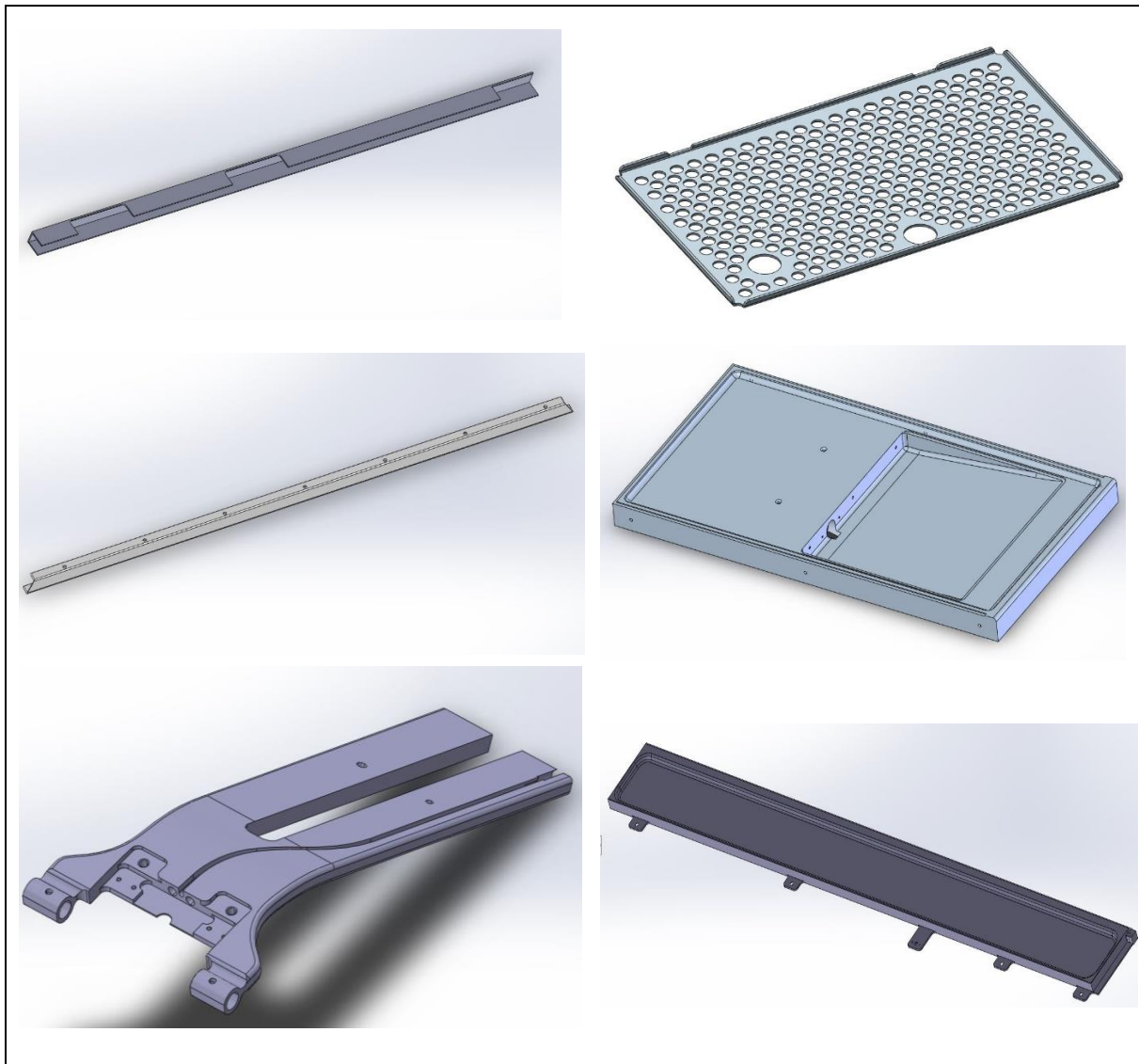
4 Návrh robotického pracoviště



Obrázek 29: Harmonogram projektu

4.1 Zadání úkolu

Firma Workpress Aviation, s.r.o. se zabývá výrobou dílů zejména pro letecký průmysl. Díly jsou různého charakteru i rozměrů. Jedná se o obrobky, plechové výpalky a ohýbané dílce a jejich sestavy. Díly se vyrábí z polotovarů ve formě desek, tyčí, trubek, plechů z nejrůznějších materiálů včetně plastů a speciálních slitin niklu a titanu, dále také z hliníkových extrudovaných profilů. Většina hliníkových výrobků následně prochází povrchovými úpravami.



Obrázek 30: Příklady typických výrobků firmy WPA.

Výrobní program firmy má tedy velmi široký záběr. Řada dílů, zejména těch ze slitin hliníku, podléhá přísným kosmetickým standardům, protože se často jedná o viditelné interiérové prvky kabin letadel. Uvedené díly jsou proto pro odstranění kosmetických vad před anodizací broušeny, nebo pískovány a na některých z nich je následně vytvářena estetická povrchová úprava „brush“. Vytváření povrchové úpravy brush zatím není předmětem automatizace.



Obrázek 31: Povrchová úprava „brush“ - detailní pohled

S cílem zvýšení produktivity práce byl proto vznesen požadavek na vytvoření automatizovaného robotického pracoviště broušení. Pro první fázi automatizace byly zvoleny geometricky jednoduché díly, na kterých je nutné provádět pouze rovinné broušení. Jedná se zpravidla o díly z hliníkových extrudovaných profilů.

Firma disponuje několika kolaborativními roboty FANUC, které sloužily k automatizaci operací lepení sestav, které byly vyráběny ve velkosériovém režimu. Po přerušení výroby byly roboty odstaveny. Cílem je tyto roboty postupně opět zapojit do výrobního procesu, což se jeví výhodným k použití pro můj záměr.

4.2 Popis robotu FANUC Cr-15iA

Jedná se o kolaborativní robot s nosností 15Kg a maximálním dosahem 1441mm. Rameno je vybaveno snímači síly a momentu, které zajišťují zastavení stroje při neočekávaném kontaktu s cizími tělesy, nebo lidmi. Není proto nutné okolo něj stavět bezpečnostní bariéry. Technický list robotu je k dispozici v příloze.



Obrázek 32: Robot FANUC Cr-15iA [34]

4.3 Návrh pracoviště

U vyráběných dílů je operací broušení nutné odstranit veškeré stopy po obrábění a předchozích výrobních a manipulačních operacích. Jedná se o časově i fyzicky náročnou repetitivní pracovní operaci, která vytváří a probíhá v prašném a tedy i zdraví škodlivém prostředí. Operace je proto k automatizaci vhodná. Automatizaci operace broušení je možné označit za inovaci třetího řádu, tedy tzv. kvalitativní adaptační změnu, protože dochází k změně pracovního prostředí.[36]

Nástrojem pro broušení hliníkových dílů byla zvolena tzv. satinovací bruska. Jedná se o ruční brusku, kterou lze vybavit různými typy obvodových brusných nástrojů. Nástroje mohou být lamelové, nebo prstencové. Pro použití brusných prstenců je nutný tzv. expanzní válec, na který je prstenec nasunut a následnou expanzí válce upnut.

Pro řešení pracoviště byl použit robot připevněný k podlaze a pracovní stůl z hliníkových drážkových profilů. Ke stolu lze díky univerzálnímu drážkovému systému IM připevňovat další příslušenství, například přípravky.

Tabulka 1: Volba parametrů projektového řešení pracoviště pro robotické broušení

Parametr/ vlastnost	Hlavní ovlivňující faktory	Možnosti	Požadavek/vstupní faktor	Zvolená možnost
Pozice obrobku vůči nástroji	Rozměry obrobku, výrobní program pracoviště (množství typů obrobků)	Part in hand	Obrobky jsou tvarově podobné, ale jejich rozměry se liší délkou od 30 do 1000mm (přibližně)	Tool in hand
		Tool in hand		
Způsob řízení přítlaku	Požadavek na velikost silově kompenzovaného zdvihu a jeho změnu v průběhu operace.	Skrze robotické rameno	Obrobky charakteru ploché tyče fixované k pracovnímu stolu nevyžadují velký zdvih ani jeho změnu v průběhu operace.	Nezávisle na robotickém rameni
		Nezávisle na robotickém rameni		
Počet silově kompenzovaných os	Změna orientace nástroje vůči obrobku, požadovaná přesnost a preciznost výsledku broušení, změna směru působení síly v průběhu operace	0 až 3	Obrobky charakteru ploché tyče fixované k pracovnímu stolu nevyžadují změnu orientace nástroje vůči obrobku. Přísný kosmetický standard.	1
Typ brusky	Technologický požadavek na výsledek práce ovlivněný technickou specifikací výrobku	Čelní rotační	Za stávajícího stavu je dobrých výsledků dosahováno obvodovým broušením. Broušení čelními bruskami vyžaduje časté výměny brusných nástrojů, které trpí zanášením broušeným materiálem. Excentrické broušení zanechává na povrchu dílů nežádoucí stopy a charakteristické artefakty.	Obvodová
		Čelní excentrická		
		Obvodová		

4.3.1 Jednotka řízení přítlaku při broušení

Ze vstupního studia literatury a konstrukčních řešení vyplývá, že pro realizaci automatizace pracoviště broušení je nutné robot vybavit systémem řízení přítlaku. Jako nejvýhodnější varianta byla po průzkumu trhu zvolena konstrukce vlastního zařízení, které bude přizpůsobeno konkrétním požadavkům pracoviště, protože žádný z produktů výše jmenovaných firem není pro požadovanou aplikaci vhodný, a pokud ano, tak pouze částečně a nakupované řešení by vyžadovalo úpravy.

Řešení problému bylo poptáno u firmy Servind. Dle jejich vyjádření by bylo možné brusku Mirka na robot Fanuc Cr-15iA instalovat, což je však podmíněno několikadenní prací technika, která je velmi nákladná (přesnou cenovou nabídku firmy Servind je firma Workpress Aviation zavázána nesdělovat třetím stranám). Pro vysoké náklady bylo rozhodnuto technologii od firmy Servind nenakoupit. Brusky Mirka rovněž nevyhovují požadavku na obvodové broušení vyjádřeného v tabulce výše.

Pro řešení zadané úlohy tedy vyplynula nutnost zkonstruovat vlastní zařízení, které bude schopné udržovat konstantní přítlak v jedné ose, bude fungovat nezávisle na robotickém rameni, bude ho možné osadit satinovací obvodovou ruční brusku a nebude příliš zvyšovat nároky na kvalifikaci obsluhy automatizovaného pracoviště ve smyslu komplikace ovládání pracoviště.

Po zvážení všech okolností jsem proto navrhl vlastní řešení mechatronického systému, který zajistí řízení přítlaku při broušení.

System se skládá z následujících komponent:

Tabulka 2: Rozpis elektronických součástí

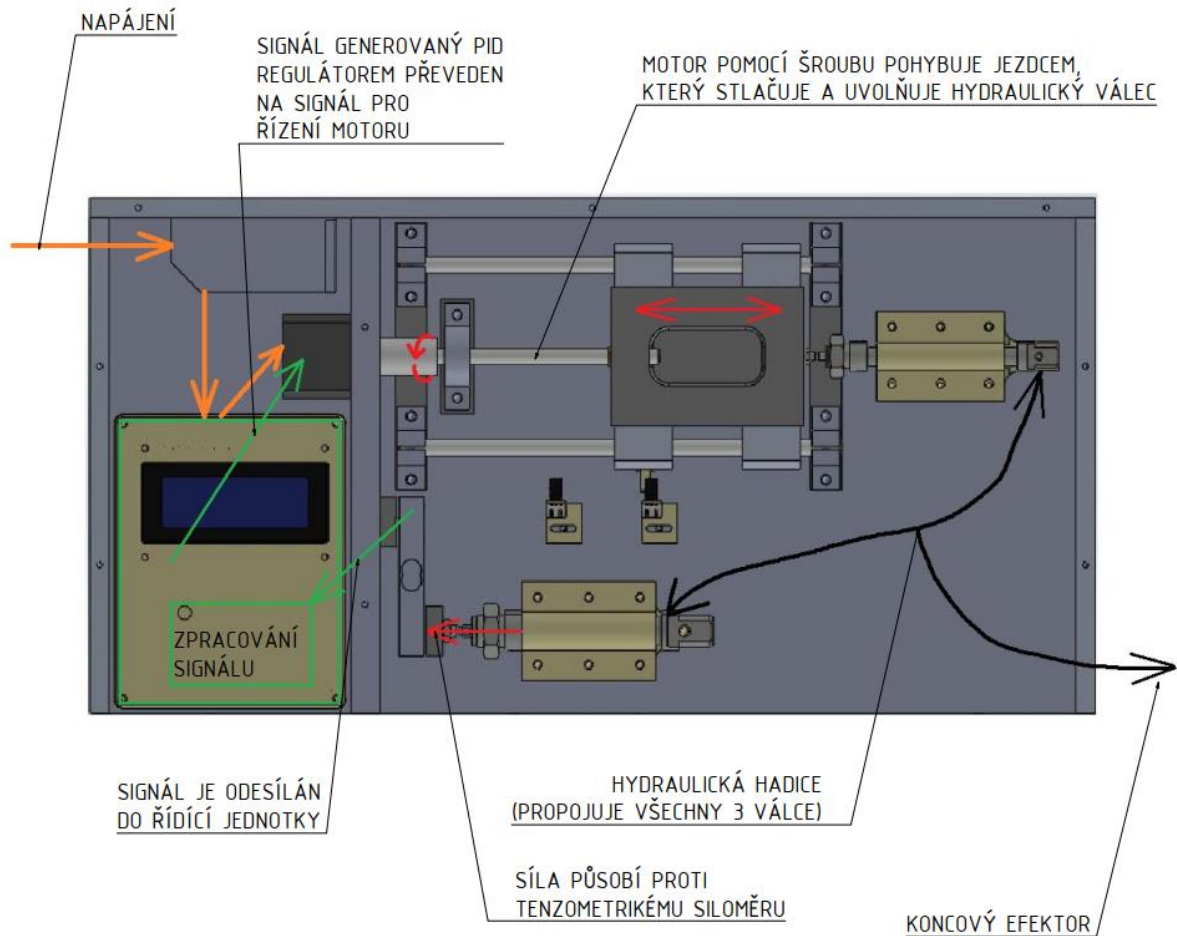
Elektronické součásti		
Součást	Označení	Množství
Mikrokontrolerový vývojový modul	ESP32	1
AD Převodník 24-bit	HX711	1
Tenzometrický siloměr	5kg YZC-131	1
Driver pro krokové motory	A4988	1
Krokový motor	42HD8011-01	1
Step-down měnič	MINI-360	1
Zdroj 12V/60W	YS-60-12	1
Rotační enkodér	KY-040	1
LCD panel	LCD2004 I2C	1

Tabulka 3: Rozpis nakupovaných součástí

Mechanické součásti nakupované		
Součást	Označení	Množství
Trapézová závitová tyč	Tr8x8 (P2)	1 (l=130)
Trapézová matice s přírubou (bronz)	Tr8x8 (P2)	1
Kuličkové ložisko s domkem	KP08	1
Vodící tyč ocelová D8	-	2 (l=220)
Držák vodící tyče	SK8	4
Lineární ložisko s vozíkem	SC8UU	4
Hřídelová spojka pružná	D19L25	1
Kruhový válec ISO 6432	16N1A12AN040	2
Kruhový válec ISO 6432	16N1A8AN050	1
Lícovaný šroub	ISO 7379-6-M5-20	1
Lícovaný šroub	ISO 7379-6-M5-20	2
Pouzdro kluzné (slinutý bronz)	SKF PSM 081208 A51	4
Camozzi super-rapid fitting (ser. 6000)	6540 5	1
Camozzi super-rapid fitting (ser. 6000)	6512 5-M5	3
Hydraulická hadice std. Shimano	2,3x5mm	4m (přibližně)
Spojovací materiál	DIN 912, DIN 934	-

Tabulka 4: Rozpis vyráběných součástí

Vyráběné součásti – Jednotka řízení přtlaku			
Součást	Označení	Výrobní technologie	Množství
Deska	24_2301_DP011	Frézování	1
Přepážka	24_2301_DP021	Frézování	1
Jezdec	24_2301_DP031	Frézování	1
Distanční podložka 1	24_2301_DP041	Frézování	2
Distanční podložka 2	24_2301_DP051	Frézování	1
Loadcell základna	24_2301_DP061	Frézování	1
Loadcell redukce	24_2301_DP071	Frézování	1
Bočnice 1	24_2301_DP081	Frézování	1
Bočnice 2	24_2301_DP091	Frézování	1
Bočnice průchodka	24_2301_DP101	Frézování	2
Víko skříně	24_2301_DP111	Řez vodním paprskem	
Skříň elektroniky	24_2301_DP911	3D tisk FDM	1
Víko skříně elektroniky	24_2301_DP921	3D tisk FDM	1
Držák koncového spínače	24_2301_DP931	3D tisk FDM	1
Vlajka koncového spínače	24_2301_DP941	3D tisk FDM	1
Držák válce D12	24_2301_DP951	3D tisk FDM	1
Držák válce D8	24_2301_DP961	3D tisk FDM	1
Držák válce D8 díl 2	24_2301_DP971	3D tisk FDM	1
Držák válce D12 díl 2	24_2301_DP981	3D tisk FDM	1
Vyráběné součásti – Koncový efektor			
Závěs rameno	2024_0301_11	Frézování	1
Závěs posuvný prvek	2024_0301_21	Frézování	1
Závěs montáž brusky	2024_0301_31	Frézování	1
Závěs válec	2024_0301_41	Soustružení	1



Obrázek 33: Schéma principu funkce jednotky řízení přtlaku

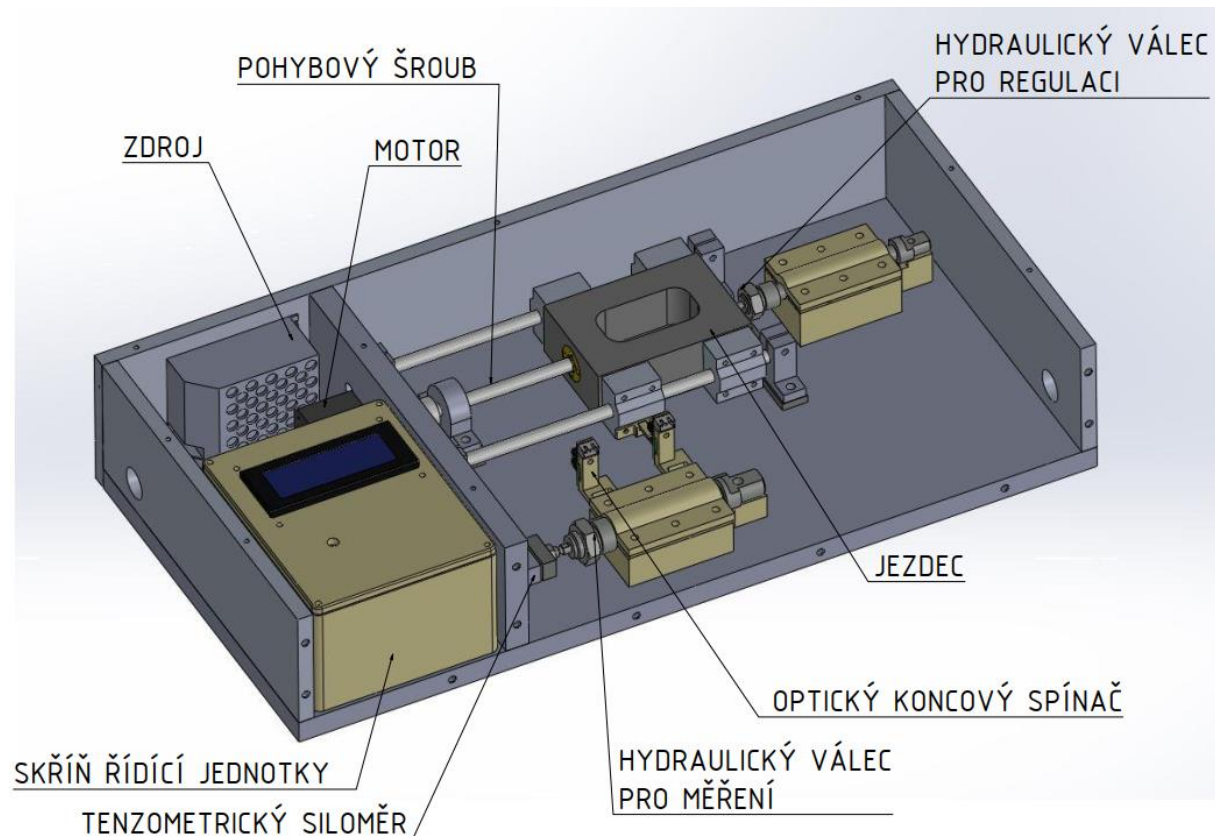
Systém pracuje na hydraulickém principu a skládá se ze tří hydraulických válců. První z nich (16N1A12AN040) je umístěn na koncovém efektoru a slouží k vyvíjení přtlaku bruskou proti obrobku. Druhý z válců je shodný s válcem vnějším a je umístěn uvnitř zařízení. Tento válec slouží k měření síly, a proto je pevně spojen s tenzometrickým siloměrem. Měřící válec nemá možnost se pohybovat, takže přímo a okamžitě působí proti siloměru silou shodnou, jako která působí v koncovém efektoru. Třetí z válců (16N1A8AN050) je rovněž umístěn uvnitř skříně zařízení. Tento válec slouží k regulaci síly vyvíjené zařízením, je proto spojen pomocí lineárního vedení s motorem. Převod rotačního pohybu motoru na translační je docílen pomocí lichoběžníkového čtyřchodého pohybového šroubu.

Senzorem síly je nepřetržitě měřena síla, kterou systém vyvíjí a analogový signál je odeslán do řídicí jednotky. Tam je pomocí integrovaného obvodu HX711 zesílen a převeden na signál digitální, který je odeslán do ESP32. Vzorkovací frekvenci je možné za chodu zařízení měnit.

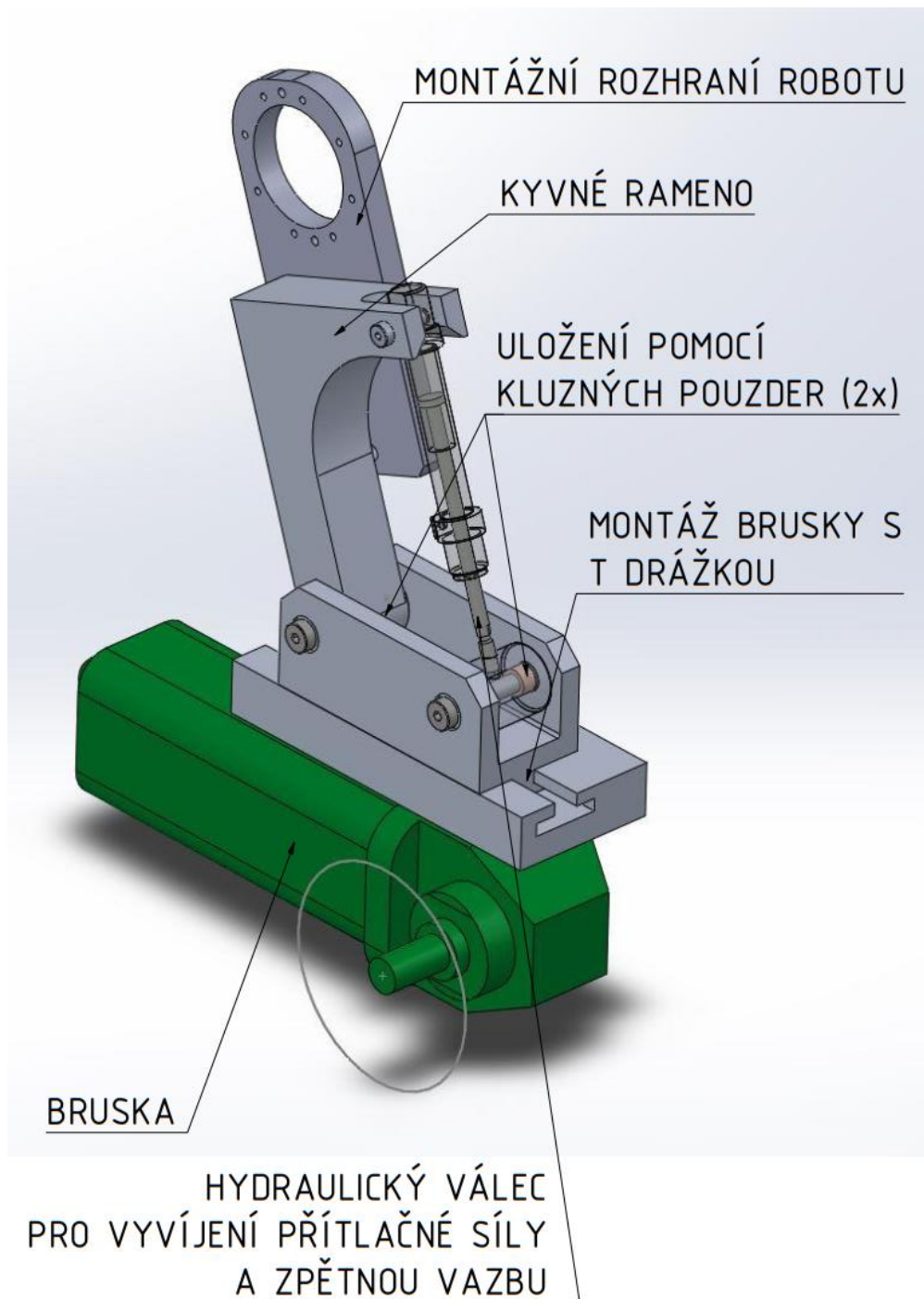
V řídicím systému, který na ESP32 běží, je pomocí knihovny PID.h, která je volně dostupná ke stažení, použití i modifikacím, díky licencování formou MIT License (svobodná licence), integrován PID regulátor, který na základě rozdílu mezi vstupní hodnotou, tedy změřenou silou a požadovanou silou (tzv. setpoint) generuje regulační zásah. Intenzitu, stabilitu a další vlastnosti regulačního zásahu lze za běhu programu ovlivňovat pomocí změny nastavení

hodnot proměnných proporcionální, derivační a integrační složky. Požadovanou sílu a její toleranci lze za chodu zařízení rovněž měnit. Při změně hodnot proporcionální integrační nebo derivační složky je nutné zařízení restartovat.

Regulační zásah generovaný regulátorem nabývá hodnot 0 až 255. Tento výstup je v programu převeden na hodnotu rychlosti a směru otáčení motoru v krocích za sekundu (steps per second), která může pro motor 42HD8011-01 nabývat celočíselných hodnot v intervalu -1000 až 1000. Při testování zařízení se však ukázaly rychlosti blíží se maximálním jako nespolehlivé, jsou proto softwarově omezeny na maximálně 800 kroků za sekundu. Řízení motoru je zajištěno pomocí budiče A4988.



Obrázek 34: 3D vizualizace jednotky pro řízení přítlaku s popisy hlavních komponent

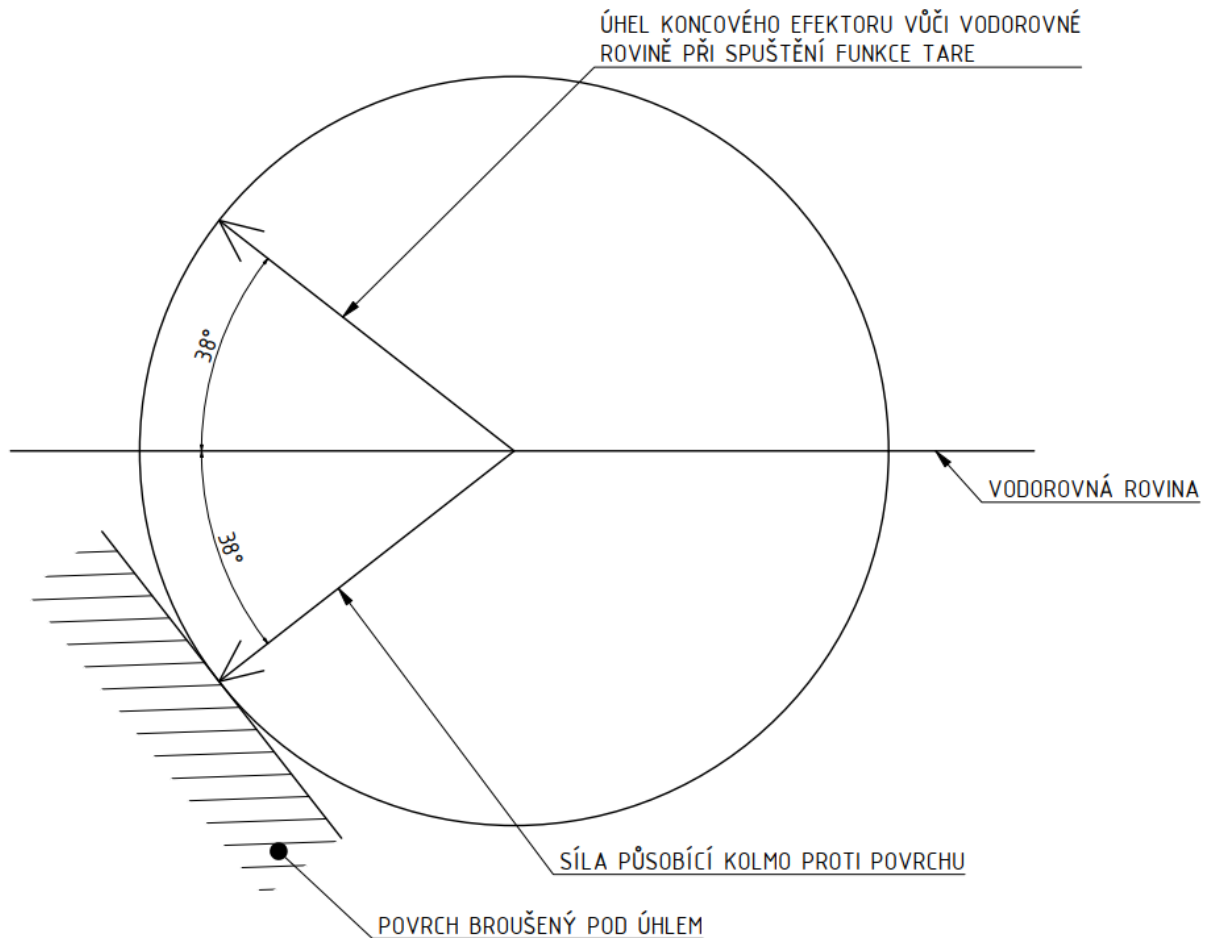


Obrázek 35: 3D vizualizace koncového efektoru s bruskou

Konstrukční řešení koncového efektoru je doplněno přesnou T drážkou. Součástí je vůči sobě možné polohovat a následně aretovat pomocí 2 šroubů. Viz přílohy, výrobní výkresy součástí.

Zařízení je schopno působit silou proti broušenému povrchu, není však schopno kompenzovat hmotnost brusky, respektive brusku z povrchu zdvihnout. Před zahájením provozu je proto nutné řídicí jednotce hmotnost brusky sdělit, aby byla síla vznikající vlivem

hmotnosti brusky připočtena k výsledné, požadované síle. K tomu slouží funkce pojmenovaná „TARE“ v menu zařízení.

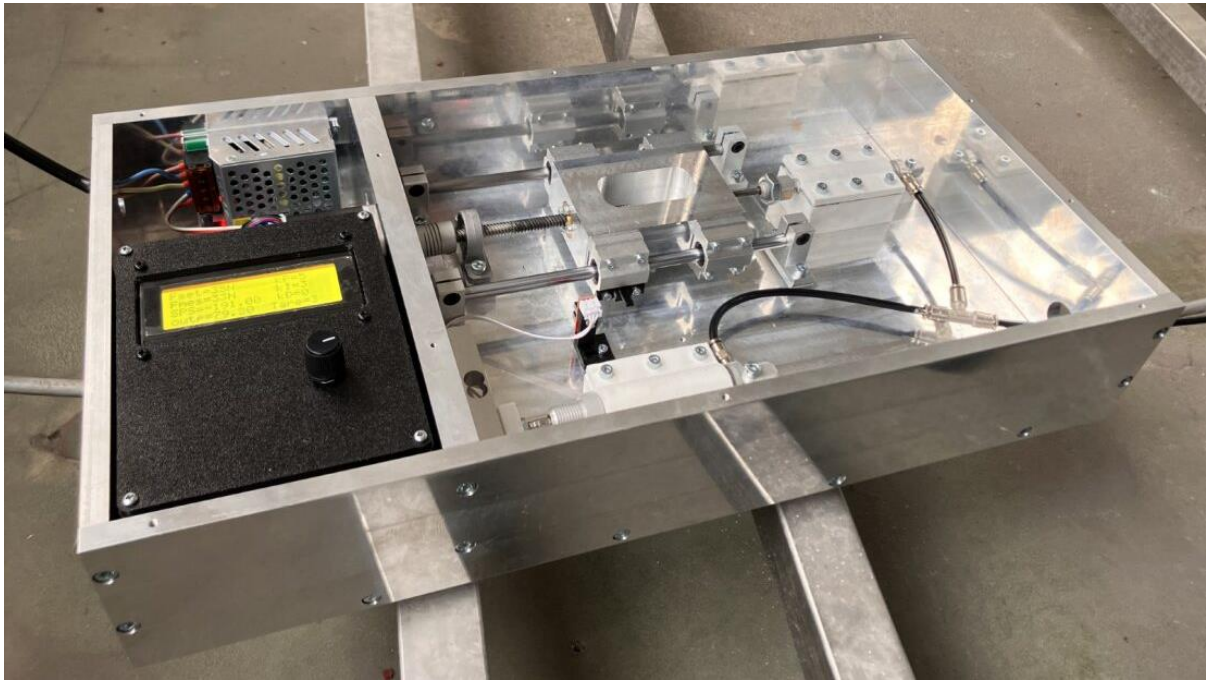


Obrázek 36: Schéma principu funkce „TARE“

Pokud je požadováno brousit povrch pod jiným úhlem, než rovnoběžně s vodorovnou rovinou, je nutné před spuštěním funkce „TARE“ postupovat způsobem uvedeným na Obr.36, tedy nastavit koncový efektor do stejného úhlu oproti vodorovné rovině, jakým bude síla působit, ale v opačném směru, respektive dodržet mezi vektorem síly požadované a síly vznikající nakloněním koncového efektoru osovou souměrnost vůči vodorovné rovině.

Pokud je požadováno vyvíjet sílu ve směru rovnoběžném s vodorovnou rovinou, je síla vznikající vlivem hmotnosti brusky nulová a proto lze funkci „TARE“ vyvolat v poloze, ve které bude broušení prováděno.

5 Realizace projektu automatizovaného pracoviště



Obrázek 37: Testování jednotky řízení přítlaku na robotickém pracovišti- bez víka skříně

5.1 Instalace zařízení na robot, nastavení zařízení

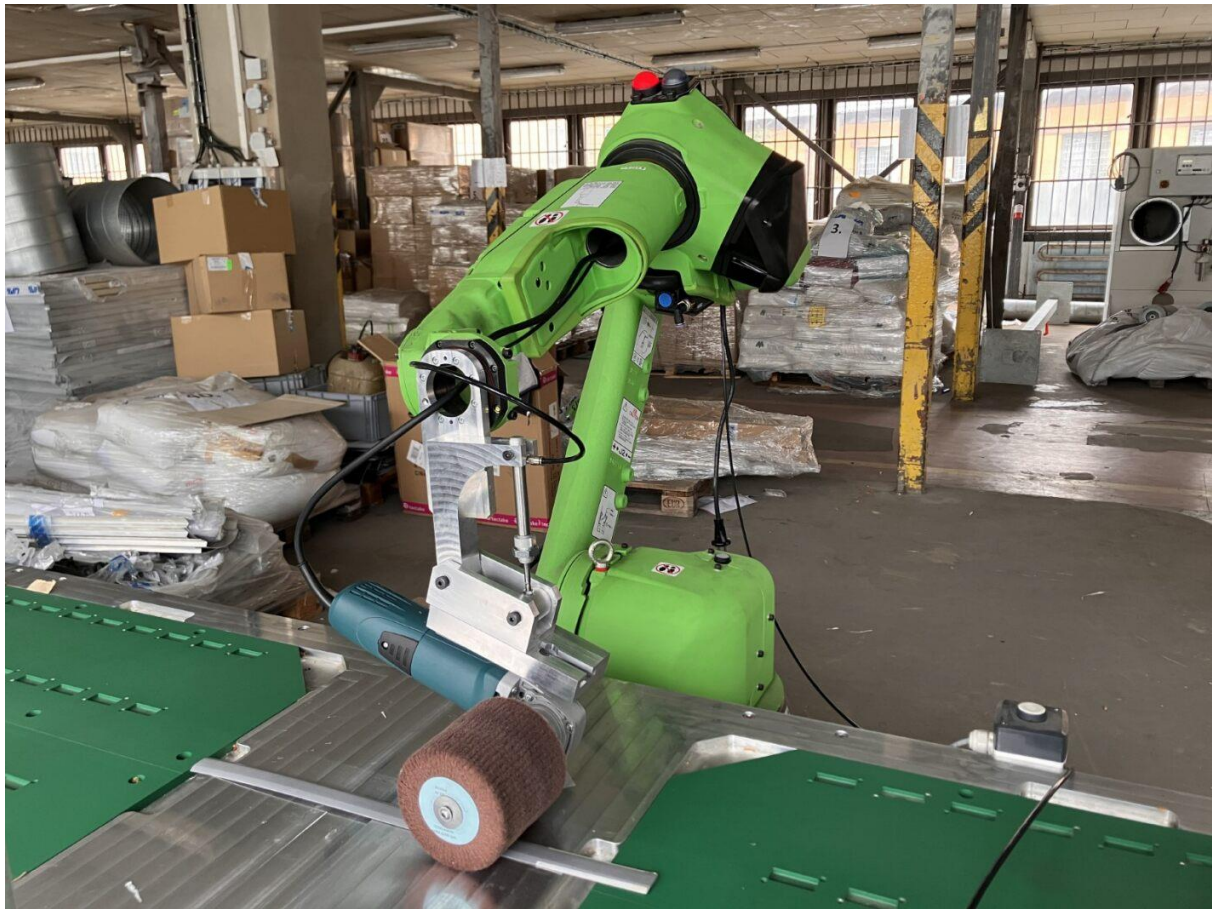
Instalace zařízení na úchopovou část robotu proběhla bez potíží a zařízení se jeví pracovat správně. Hydraulická hadice a napájení brusky je vedeno dutým zápěstím robotu. Zařízení dle pozorování dostatečně rychle a přesně kompenzuje přítlak při broušení se zdvihem přibližně 20mm. Parametry PID regulátoru jsou nastaveny na hodnoty:

- P- 5
- I- 1
- D- 1

(Proporcionální, integrační a derivační složka. Hodnoty těchto parametrů mohou dle knihovny nabývat čísel větších než nula, s maximálně sedmi desetinnými místy- datový typ float. Jedná se o bezrozměrnou veličinu, která působí jako koeficient, kterým jsou jednotlivé složky regulátoru násobeny, čímž se zvyšuje intenzita jejich působení na výsledek- output regulátoru)

Při pokusu o nastavení vyšších hodnot se regulátor nechová vhodným způsobem a dochází k rozkmitání systému. Zejména špatný vliv má nastavení hodnot nad 10 u libovolné ze složek. Výše uvedené nastavení se jeví plnit funkci nejlépe. Regulační odchylka je se stávajícím nastavením kompenzována zpravidla do 3 sekund.

Koncový efektor byl navržen s dostatečně přesným uložením jednotlivých komponent, a proto se pohybuje bez vůlí v axiálním i radiálním směru a bez významného tření v uloženích. Jeho funkce je správná.



Obrázek 38: Testování funkce systému řízení přitlaku s vypnutou bruskou

5.2 Testovací provoz

V rámci testovacího provozu proběhnou zkoušky systému, jejichž hlavním účelem je získat hodnoty parametrů výrobního procesu potřebné pro výpočty technicko ekonomického vyhodnocení. Systém bude nejprve naladěn na parametry, v důsledku kterých bude konzistentně vytvářena na zpracovávaných dílech povrchová úprava splňující kosmetický standard zákazníka, respektive bude dosaženo způsobilosti výrobního procesu.

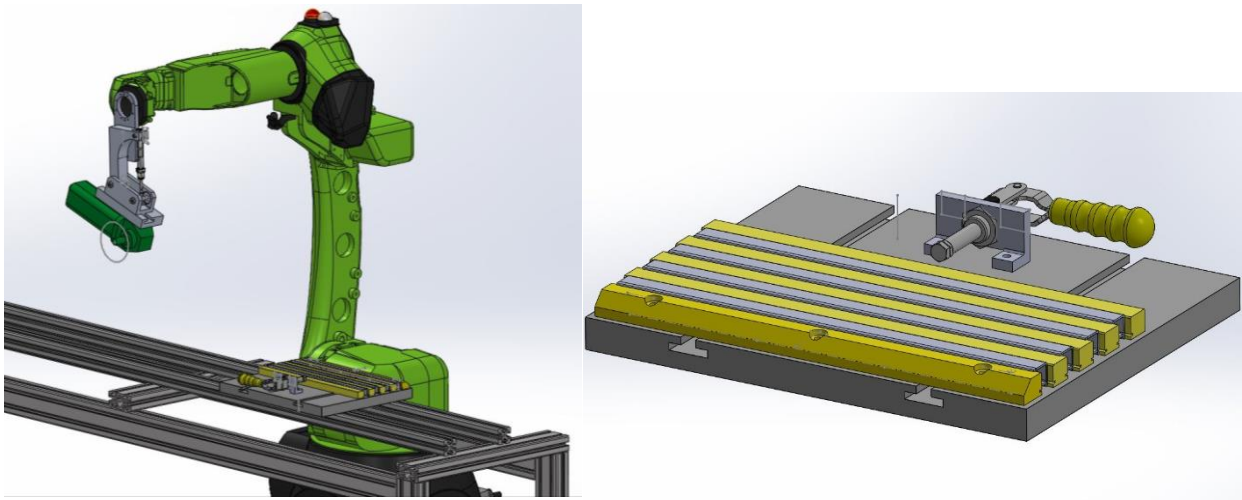
5.2.1 Upínání dílů na stůl pracoviště

Pro robotické pracoviště byl navržen vícenásobný upínací přípravek s vyměnitelnými čelistmi, které umožňují upnutí dílů ve všech polohách nutných pro jejich kompletní broušení. Přípravků je možné na stůl robotického pracoviště instalovat více, což umožní upnutí většího množství dílů, které mohou být následně broušeny během jednoho pracovního cyklu. Výsledný delší pracovní cyklus systému umožní vícestrojovou obsluhu.

V základním návrhu pracoviště jsou zatím přípravky 2, zejména z důvodu upínání dílů, které významně rozměry přesahují čelisti jednoho přípravku a u kterých proto hrozí vznik vibrací při broušení. Přípravky jsou navrženy pro montáž na hliníkový drážkový profil, po

kterém mohou být snadno posouvány, a jejich polohu lze aretovat pomocí dvou šroubů. Navržený systém je tedy vysoce modulární.

Po konzultaci s vedoucími pracovníky ve firmě bylo rozhodnuto, že je vhodné přípravek na pracoviště instalovat až v poslední fázi projektu, zejména z důvodu nutnosti ověřit, zda navržený systém správně pracuje a z důvodu přetrvávajícího vysokého vytížení obráběcích strojů ve firmě. Proto byly jako dočasné řešení upínání dílů, z důvodu jejich okamžité dostupnosti zvoleny 2 svěráky GERARDI 1-3X200. Dočasné řešení neumožňuje upínání většího množství dílů zároveň. Výrobní časy, které by byly dosahovány s vícenásobnými upínacími přípravky, budou dopočítány.



Obrázek 39: Vícenásobný upínací přípravek- 3D vizualizace



Obrázek 40: Upínání obrobku pomocí strojních svěráků GERARDI 1-3X200

5.2.2 Výběr brusného nástroje

Pro výběr vhodného brusného nástroje je nutné provést výrobu vzorků broušených povrchů. Vzorky budou následně posouzeny pracovníky kontroly, zda splňují požadovaný kosmetický standard. Po broušení se díly eloxují dle předpisu zákazníka, který definuje barvu i strukturu povrchu pomocí broušeného a eloxovaného etalonu. Vyráběné díly se mají etalonu povrchovou úpravou co nejlíže podobat, povrchová úprava vyráběného dílu musí být od etalonu nerozeznatelná pouhým okem při běžném osvětlení a při osvětlení s definovanou vlnovou délkou dle předpisu zákazníka.

V procesu eloxování dochází k moření povrchů dílů. Tento chemický proces je do velké míry ovlivněn strukturou povrchu, kdy na více členitém povrchu probíhá agresivněji. Povrch se při moření vždy do jisté míry vizuálně změní. Následný proces anodické oxidace, při kterém na povrchu hliníkového dílu vzniká porézní oxidická vrstva, rovněž díl z vizuální stránky mění. Významným prekurzorem úspěšnosti procesu, tedy dosažení povrchové úpravy splňující kosmetický standard, je vhodná předfinální povrchová úprava broušením. Z dílu musí být jednak odstraněny veškeré vrypy, škrábance a stopy po obráběcích nástrojích a zároveň musí být povrch z vizuálního hlediska homogenní. Nejdůležitějším prekurzorem je však stále struktura povrchu vytvořená brusným nástrojem. Tato struktura není definována číselnými hodnotami veličin definujících jakost povrchu, protože popisovat povrch parametry jakosti povrchu je v tomto případě velmi neefektivní. Pro úplnou definici požadované jakosti povrchu by bylo nutné velké množství parametrů, jejichž měření při mezioperační kontrole by bylo z hlediska potřeby velkého množství drahých měřících přístrojů a jejich kvalifikované obsluhy, časového, i finančního nevýhodné.

Efektivním způsobem kontroly je kontrola pohledem proškoleného a zkušeného pracovníka. Vyžaduje tedy jisté know-how, které si pracovníci kontroly na základě empirických poznatků budují. V tuto chvíli funguje tento způsob kontroly ve firmě velmi efektivně, rychle a spolehlivě. Pro porovnání výsledků slouží interní etalon bez povrchové úpravy anodizací.

Pro automatizaci kontroly kvality povrchové úpravy obrobků se nabízí možnost kamerového porovnání kvality obrobků pomocí počítače se systémem strojového vidění s využitím neuronové sítě. Automatizace kontroly kvality však není cílem řešení práce.

Výběr abrazivního nástroje tedy proběhne pomocí výroby broušených vzorků, které budou posouzeny pracovníky kontroly. Vyhovující povrchové úpravy postoupí do další fáze výběru, kde budou posuzovány výhody a nevýhody vybraných abraziv z technologického hlediska. Mezi tato kritéria patří zejména trvanlivost brusných nástrojů a možná rychlost posuvu, se kterou je dosahováno povrchu splňujícího požadavky.





Brusné nástroje a broušené vzorky jsou k vidění v tabulce níže. Jako vyhovující byly označeny vzorky broušené nástroji 3M scotch-brite VFN, 3M Trizact 237AA A45 a Lamelovým obvodovým kotoučem XF. Brusné prstence je nutné k brusce upínat pomocí tzv. expanzního válce. Jedná se o dutý gumový válec s přírubami, který je po nasazení brusného prstence nutné nahustit vzduchem. Tím je brusný prstenec upnut.





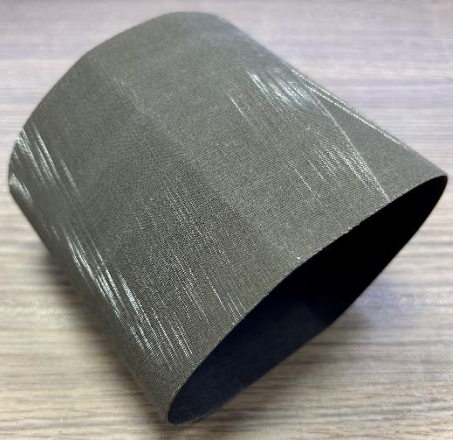

Brusný materiál Trizact 237AA je univerzálním abrazivem navrženým pro dokončovací operace na površích kovů. Skládá se z velkého množství velmi ostrých zrn korundu, která jsou vůči sobě uložena s výrazně vyšší hustotou, než jak je tomu u brusného rouna [15]. Trizact 237AA proto ubírá materiál výrazně rychleji, než standartní brusné rouno. Zrna jsou rovněž zcela zalita v pojivu, což vede k vyššímu tření a tedy intenzivnímu zahřívání obrobku.





Pro bezpečné upnutí prstence je nutné v expanzním válci vytvořit dostatečný tlak, což vedlo ke vzniku ostrých přechodů mezi plochami broušeného dílu. Ostré přechody mezi broušenými plochami jsou na dílech dle kosmetického standardu zákazníka nepřijatelné. Brusný nástroj skládající se z expanzního válce a brusného prstence se proto jeví být pro tuto aplikaci příliš tvrdým a tedy nevhodným.

Brusný prstenec 3M Scotch-brite VFN vytváří na první pohled nerozeznatelný povrch od lamelového brusného kotouče. Z těchto tří brusných materiálů se proto jako nejvhodnější jeví Lamelový kotouč, z důvodu jeho vyšší životnosti oproti brusným prstencům.

Tabulka 5: Výběr brusného nástroje

Brusný nástroj	Broušený vzorek (vyhovující označeny *)
	
3M Scotch-brite XCR (~FEPA P80)	
	
3M Scotch-brite CRS (~FEPA P120-P150)	

	
<p>3M scotch-brite VFN (~FEPA P400)</p>	<p>Vyhovuje</p>
	
<p>3M Trizact 237AA A100</p>	
	
<p>3M Trizact 237AA A65</p>	

	
<p>3M Trizact 237AA A45</p>	<p>Vyhovuje</p>
	
<p>Lamelový obvodový rounový kotouč XF (~FEPA P400)</p>	<p>Vyhovuje</p>

5.2.3 Program robotu a nastavení přítlaku

V současné fázi projektu je robotu naprogramována jednoduchá trajektorie, ve které lze změnit délku obrobku upravením hodnoty Y v souřadnici koncového bodu. Obrobek je poté zarovnán s hranou svěráku, na které leží počáteční bod dráhy brusného nástroje a zároveň je nulovým bodem, a upnut. Robot poté provede nájezd do řezu sestupem po přímce ležící v rovině ZY (souřadný systém WORLD), nájezd končí v koncovém bodě. Poté jsou okamžitě provedeny dva přejezdy, které končí v nulovém bodě. Následně dojde k návratu robotu do výchozí pozice HOME.

Pro správnou funkci systému řízení přítlaku je nutné před zahájením broušení provést pozvolný nájezd brusným kotoučem. Systém nedostatečně rychle reaguje na velkou skokovou změnu přítlaku. Reakce je omezená rychlostí pohybového šroubu, respektive rychlostí posuvu součásti 24_2301_DP031 „JEZDEC“. Skokové změny síly vyvolané změnou výšky broušeného povrchu v rádech jednotek milimetrů systém kompenzuje dostatečně rychle. Pozvolné změny rovněž nejsou problematické, pokud rychlost změny výšky profilu nepřesahuje maximální rychlost posuvu součásti 24_2301_DP031.

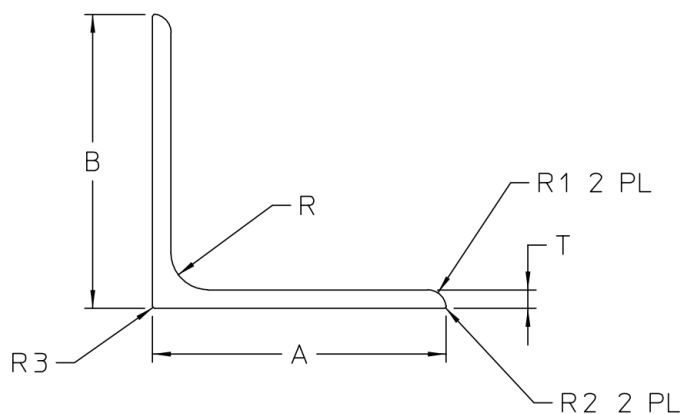
Přítlak je nastaven na hodnotu 30 N.

6 Technicko ekonomické vyhodnocení

6.1 Chronometráž na manuálním pracovišti

Za účelem porovnání ekonomické efektivity (z časového hlediska) robotizovaného pracoviště a stávajícího stavu byla provedena chronometráž na manuálním pracovišti broušení. Pro chronometráž byly zvoleny díly typově shodné, jako které budou zpracovávány na robotizovaném pracovišti.

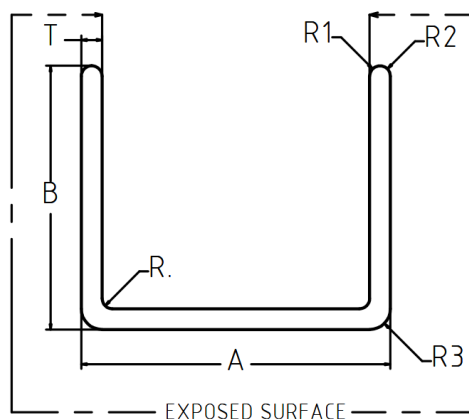
Prvním je díl s číslem výkresu 503588-135 z polotovaru 3000011. Jedná se o extrudovaný L profil ze slitiny hliníku o délce 519mm. Broušeny jsou 2 vnější a 2 vnitřní stěny. Vnitřní stěny jsou pracovníky broušeny obě současně čelem i obvodem brusného nástroje.



PART NUMBER	A	B	T	R	R1	R2	R3	MAT'L-ALLOY	SPEC. NO.	LBS/FT	REPLACES P/N
3000001	.50	.50	.040	.016	-	-	-	ALUM. 6061-T6	00-A-200/8	.046	1121 Δ
020	1.00	.62	.060	.030	-	-	.050			.118	1054 Δ

Obrázek 41: Výkres L profilu- detail

Druhým je díl s číslem výkresu 6038F9-18-5 z polotovaru 3010020. Jedná se o extrudovaný U profil ze slitiny hliníku o délce 424,6mm. Broušeny jsou 3 vnější stěny.



PART NUMBER	A	B	T	R	R1	R2	R3	MAT'L-ALLOY	SPEC. NO.	LBS/FT	REPLACES P/N
3010001	0.330	0.250	0.040	0.015	0.015	0.015	0.015	ALU. 6061-T6 Δ	QQ-A-200/8	0.040	1074 Δ
3010020	0.880	0.750	0.060	0.030	0.030	0.030	0.052			0.176	1152-3 Δ

Obrázek 42: : Výkres U profilu- detail

Díly, na kterých byla provedena chronometráž, byly zvoleny na základě konzultace s dílenským mistrem a vedoucím výrobního oddělení. Jedná se o díly, které z hlediska rozměrů leží uprostřed výrobního portfolia. Délka zpracovávaných dílů se nejčastěji pohybuje v rozmezí 400 až 700 mm. Díly kratší, než v uvedeném rozmezí se vyskytují přibližně v jedné až dvou výrobních dávkách denně, z celkových nižších desítek výrobních dávek, které je dílna schopna denně zpracovat. Delší díly rovněž.

Dílů z typově shodných polotovarů je ve výrobním portfoliu firmy velmi vysoké množství- v řádu stovek jednotlivých položek, není proto efektivní a prakticky ani možné provádět chronometráž s účelem zjištění nevýrobních časů u všech typů výrobků ve výrobních dávkách. Byly měřeny časy:

- Čistý čas broušení jedné stěny t , tedy čas od prvního kontaktu dílu s brusným nástrojem až po poslední přerušení kontaktu, tedy včetně přehmatávání úchopu pracovníka.
- Celkový čas práce výrobní dávky T , tedy čas od uchopení prvního dílu do odložení posledního dílu, včetně vizuální inspekce dílů a průběžného orovnávání brusného nástroje.

Tabulka 6: Měření času broušení L profilu

L profil											
L_L [mm]	t [s]				t [s]						
519											
vnější stěna	25,6				vnitřní stěny (současně)	32,5					
	27,2					30,1					
	24,7					37,4					
	28,1					29,7					
	32,6					34,5					
	34,7					34,2					
	29,2					34,6					
	31,7					PRŮMĚR: t_{L1} 29,27				31,2	PRŮMĚR: t_{L2} 32,88
	29,6					MEDIÁN: 29,2				31,7	MEDIÁN: 32,5

Tabulka 7: Měření času broušení U profilu

U profil					
L_U [mm]	t [s]				
424,6					
Vnější stěna	26,4				
	24,3				
	28,9				
	29,1				
	25,7				
	24,2				
	27,3				
	25,6				PRŮMĚR: t_{U1} 26,26
	24,8				MEDIÁN: 25,7

Tabulka 8: Měření času zpracování výrobní dávky

Výrobní dávka L profil		
délka dílu	L_L [mm]	519
počet kusů	K_s [1]	4
vnější stěny /ks	[1]	2
vnitřní stěny/ks	[1]	*2
čas práce	T [s]	428,53
*broušeny současně		

Ze změřených hodnot byly vypočteny průměrné časy broušení jedné stěny, se kterými bude pracováno dále.

Protože dílů vyráběných z typově shodných polotovarů je velké množství a jediným významným rozlišovacím prvkem jsou rozměry těchto dílů, respektive jejich délka, byly průměrné časy broušení jednotlivých ploch přepočteny na čas nutný pro broušení jednoho mm délky dílu v $\text{mm}\cdot\text{s}^{-1}$. Tento čas byl vypočítán z čistých časů nutných pro broušení jednotlivých stěn dílu, nezahrnuje tedy manipulační a další nevýrobní úkony (uchopování a odkládání dílů, kontrola kvality povrchové úpravy pohledem, orovnávaní nástroje apod.)

Pro usnadnění následných výpočtů a názornost je výstupní hodnotou převrácená hodnota rychlosti.

Časy broušení 1mm délky dílů byly vypočteny podle následujících vzorců:

Pro L profil, na kterém je prováděno broušení dvou vnějších a následně dvou vnitřních stěn současně.

$$t_L = \frac{2 \cdot t_{L1} + t_{L2}}{L_L} \quad (2)$$
$$t_L = \frac{2 \cdot 29,27 + 32,88}{519}$$
$$t_L = 0,176 \text{ s} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Kde t_L je časem nutným pro úplné broušení 1mm délky dílu, t_{L1} je čas nutný pro broušení vnější stěny dílu, t_{L2} je čas nutný pro broušení vnitřní stěny dílu a L_L je délka dílu. Časy jsou dosazovány v sekundách a délka v milimetrech.

Pro U profil, na kterém je prováděno broušení třech vnějších stěn postupně.

$$t_U = \frac{3 \cdot t_{U1}}{L_U} \quad (3)$$
$$t_U = \frac{3 \cdot 26,26}{424,6}$$
$$t_U = 0,186 \text{ s} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Kde t_U je časem nutným pro úplné broušení 1mm délky dílu, t_{U1} je čas nutný pro broušení vnější stěny dílu a L_U je délka dílu. Časy jsou dosazovány v sekundách a délka v milimetrech.

Zjištění času nevýrobních úkonů, které do celkového výrobního času přispívají, proběhlo výpočtem podle následujícího vzorce:

$$t_{nv} = \frac{T - t_L \cdot L \cdot n}{n} \quad (4)$$
$$t_{nv} = \frac{428,53 - 0,176 \cdot 519 \cdot 4}{4}$$
$$t_{nv} = 15,7885 \text{ s} \doteq 15,8 \text{ s}$$

Kde t_{nv} je čas nevýrobních úkonů připadající na jeden kus v dávce, T je celkový čas práce nutný na dokončení výrobní dávky, t_L je čas nutný pro úplné broušení 1mm délky dílu (v tomto případě se jedná o L profil), n je počet dílů ve výrobní dávce a L je délka jednotlivých broušených dílů.

Vypočítaný čas nevýrobních úkonů výše bude uvažován jako standartní pro všechny výrobky z typově shodných polotovarů (U profily, L profily), na základě tvrzení v pátém odstavci této kapitoly. Je vhodné poznamenat, že tvrzení bylo ověřeno dalším zběžným měřením, které potvrdilo, že časy nevýrobních úkonů se vlivem změny rozměrů broušených dílů významně neliší.

6.2 Pracovní výkon automatizovaného pracoviště

Pro porovnání automatizovaného a manuálního pracoviště je dále nutné vyjádřit pracovní výkon, kterého automatizované pracoviště dosahuje. Pro výpočet budou použity hodnoty procesních podmínek, se kterými bylo dosahováno konzistentních výsledků broušení v požadované kvalitě. Protože je navrhované pracoviště modulární, bude pracovní výkon porovnáván výpočtem a graficky pro různé případy použití.

Čas broušení jedné stěny dílu o délce 700mm robotem je 5,2s.

Bruska se nad obrobky pohybuje rychlostí 269,23 mm.s⁻¹. Otáčky brusky jsou nastaveny na 2200 1.min⁻¹, což odpovídá při průměru brusného válce 100mm řezné rychlosti 11,52 m.s⁻¹. Použitý brusný lamelový rounový kotouč je limitován otáčkami 3700 1.min⁻¹

Pro výpočet pracovního výkonu bude uvažováno broušení U profilu, výpočet bude proveden pro čistý čas broušení bez manipulačních nevýrobních úkonů, protože jejich čas je zejména závislý na konstrukčním řešení přípravku, délce broušených kusů (obtížnější manipulace), zručností pracovníka a dalších vnějších vlivech. Manipulační úkony budou navíc pravděpodobně prováděny jedním pracovníkem obsluhujícím více brousících systémů zároveň, tím méně bude jejich výsledný čas vstupovat do celkového času broušení profilů jedním pracovníkem. Odhad času manipulačních úkonů bude proveden pomocí metody MTM a následně porovnán s měřeným časem manipulačních úkonů při manuálním broušení.

Dále je vhodné poznamenat, že šířka brusného kotouče (válce) umožňuje broušení více profilů zároveň, v závislosti na jejich šířce a šířce upínacích čelistí navrhovaného přípravku. Budou proto spočteny a znázorněny časy broušení jednoho, dvou a tří kusů na jeden přejezd.

Se stoupajícím počtem kusů a tedy zvětšením broušené plochy klesá výsledný tlak, který je na jednotlivé díly vyvíjen. Broušení více kusů zároveň proto vyžaduje zvýšení síly přitlaku násobkem, který koresponduje s počtem broušených dílů.

Pro U profil, na kterém je prováděno broušení třech vnějších stěn postupně, byl čas broušení 1mm délky dílu vypočten dle následujícího vzorce:

$$t_{UR} = \frac{3 \cdot t_{UR1}}{L} \quad (5)$$

$$t_{UR} = \frac{3 \cdot 5,2}{700}$$

$$t_{UR} = 0,022 \text{ s} \cdot \text{mm}^{-1}$$

Kde t_{UR} je čas nutný pro úplné broušení 1mm délky dílu robotem, T_{UR1} je čas nutný pro broušení jedné vnější stěny dílu a L je délka dílu, respektive dráhy robotu. Časy jsou dosazovány v sekundách a délka v milimetrech.

Výrazně vyšší rychlost broušení je umožněna zejména vyšším přitlakem, kterého je díky robotu možné dosahovat konzistentně. Pracovník vykonávající práci manuálně je poměrně rychle zatížen únavou horních končetin, která je s tímto typem práce bezesporu spojena. Aby byl pracovník schopen úspěšně dokončit směnu, je z jeho strany nutné si přizpůsobit sílu přitlaku jeho vlastním fyzickým možnostem z vytrvalostního hlediska. S nižším přitlakem nedochází k tak rychlému úběru materiálu. Vyšší přitlak rovněž vede k rychlému a intenzivnímu zahřívání dílů, které následně není možné udržet v ruce. Pracovník je proto proces broušení nucen pravidelně přerušovat. Přerušování broušení ze strany pracovníka vede ke zvýšení času broušení 1mm délky dílu.

Tabulka 9: Odhad času zakládání obrobků

MTM- zakládání obrobků						
popis, levá ruka	četnost pohybů	symbol	TMU	symbol	četnost pohybů	popis, pravá ruka
	6	R70B	24,1	R70B	6	sáhnout pro obrobek
	6	G1C1	7,3	G1C1	6	uchopit obrobek
	6	M70B	22,8	M70B	6	přesunout obrobek
	6	P2SSE	19,7	P2SSE	6	umístit obrobek
	6	RL1	2	RL1	6	pustit obrobek
			455,4			
sáhnout na páku	1	R25A	8,8			
uchopit páku	1	G1A	2			
působit silou	1	SC2	1,6			
pustit páku	1	RL1	2			
			14,4			
CELKEM:			469,8 TMU	(1 TMU = 0,036s)		

Odhad času nutného pro založení šesti obrobků do přípravku a jejich upevnění zatažením za páku se rovná 467,8 TMU, tedy 16,91 s. Čas bude označen t_{RZ} .

Čas se zdál být podezřele krátký, proto jsem provedl simulaci úlohy v reálném prostředí. Bylo přemístěno 6 kusů profilů na vyznačené místo a poté posunuto pákou. Po závčikové fázi se čas potvrdil jako odpovídající.

Tabulka 10: Odhad času otáčení obrobků

MTM- otáčení obrobků						
popis, levá ruka	četnost pohybů	symbol	TMU	symbol	četnost pohybů	popis, pravá ruka
sáhnout na páku	2	R25A	8,8			
uchopit páku	2	G1A	2			
působit silou	2	SC2	1,6			
pustit páku	2	RL1	2			
			28,8			
přemístění rukou	1	R30A	9,5	R30A	1	přemístění rukou
přemístění rukou k dílu	6	R4A	3,4	R4A	6	přemístění rukou k dílu
uchopit díl	6	G1C1	7,3	G1C1	6	uchopit díl
vyzvednutí dílu z přípravku	6	M10A	6	M10A	6	vyzvednutí dílu z přípravku
přehmat	6	G2	5,6	G2	6	přehmat
přemístit díl k pozici v přípravku	6	M10B	6,8	M10B	6	přemístit díl k pozici v přípravku
umístit obrobek	6	P2NSE	21	P2NSE	6	umístit obrobek
CELKEM:			338,9 TMU	(1 TMU = 0,036s)		

Odhad času nutného pro otočení šesti obrobků v přípravku a jejich upevnění zatažením za páku se rovná 338,9 TMU, tedy 12,2 s. Čas bude označen t_{RO} .

Tabulka 11: Odhad času vyjmutí obrobků z přípravku a jejich přípravy k transportu

MTM- vyjmutí obrobků z přípravku a umístění do transportní bedny						
popis, levá ruka	četnost pohybů	symbol	TMU	symbol	četnost pohybů	popis, pravá ruka
sáhnout na páku	1	R25A	8,8			
uchopit páku	1	G1A	2			
působit silou	1	SC2	1,6			
pustit páku	1	RL1	2			
			14,4			
přemístění ruky	6	R30A	9,5			
uchopit díl	6	G1C1	7,3			
přemístění dílu k druhé ruce	6	M30B	13,3			
přehmat	6	G3	5,6	G3	6	přehmat
			15,6	M40B	6	přemístit díl do bedny
			5,6	P1SE	6	umístit obrobek
CELKEM:			355,8 TMU	(1 TMU = 0,036s)		

Odhad času nutného pro vyjmutí šesti obrobků z přípravku a jejich uložení do transportní bedny se rovná 355,83 TMU, tedy 12,81 s. Čas bude označen t_{RV} .

Celkový čas nevýrobních úkonů může být přepočten na čas připadající na manipulaci s jedním dílem (U profil) dle následujícího vzorce:

$$t_{Rnv} = \frac{t_{RZ} + (2 \cdot t_{RO}) + t_{RV}}{n} \quad (6)$$

$$t_{RV} = \frac{16,91 + (2 \cdot 12,2) + 12,81}{6}$$

$$t_{Rnv} = 9,02 \text{ s}$$

Kde t_{Rnv} je čas nevýrobních úkonů připadající na jeden kus v dávce o šesti kusech zpracovávané automatickým pracovištěm, t_{RZ} je čas nutný pro založení šesti kusů do přípravku, t_{RO} je čas nutný pro odjištění dílů, jejich otočení v přípravku a následné zajištění a t_{RV} je čas nutný pro vyjmutí dílů z přípravku a jejich uložení do transportní bedny.

Výpočet i odhad časů dle MTM byl proveden pro dávku šesti kusů, protože se jedná o stávající maximální kapacitu navrženého přípravku. Je možné, že v budoucnu bude kapacita přípravku navýšena.

Výpočet času nevýrobních úkonů neobsahuje veškeré úkony, které je s díly a nástrojem nutné pro dokončení operace provádět, protože čas jejich trvání zatím není znám. V reálném provozu bude proto čas pravděpodobně vyšší. Jedná se o odhad minimálního nutného času.

Pro ilustraci byl dle shodných tabulek a vzorce 6 stanoven odhad pro manipulaci s jedním kusem obrobku v dávce o jednom kuse. Celkový čas pro manipulaci s jedním kusem se rovná 12,18s.

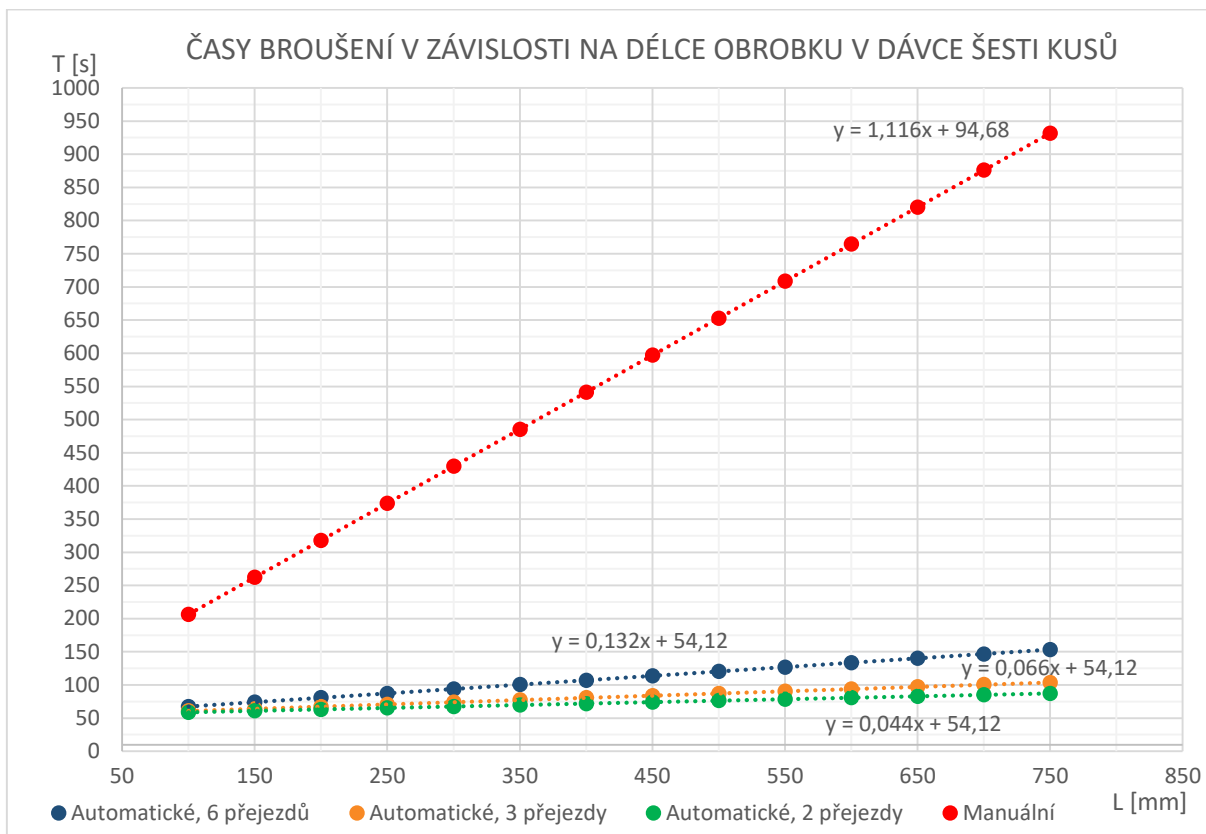
6.3 Porovnání ekonomické efektivity pracovišť z hlediska času

Vedení firmy WPA, s.r.o. si z pochopitelných důvodů nepřeje, aby byly zveřejňovány strojní hodinové sazby a další tajné informace týkající se výrobního procesu, včetně nákupních cen strojního vybavení a dalších. Porovnání proto bude provedeno čistě z časového hlediska.

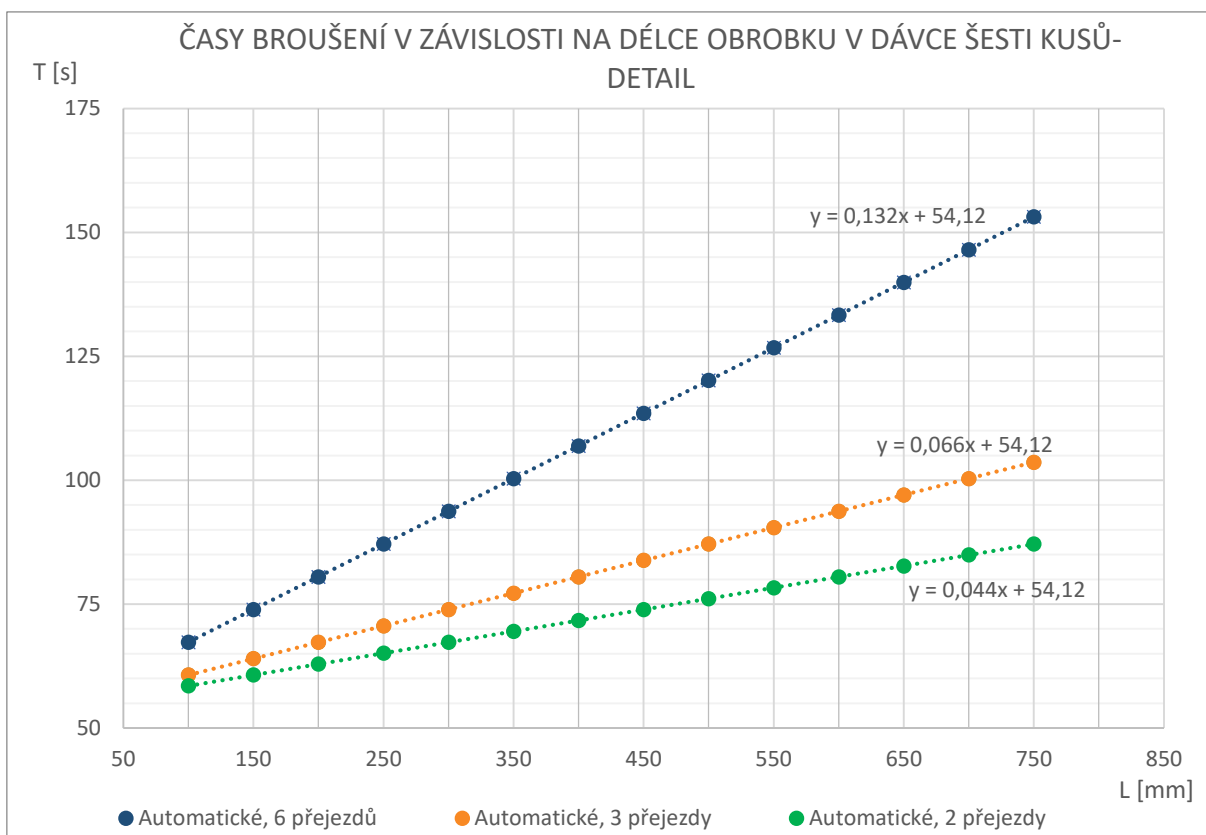
Porovnávány budou vypočtené časy pro výrobní dávku U profilů o šesti kusech:

Tabulka 12: Vstupní hodnoty pro technicko ekonomického hodnocení

Vstupní hodnoty- U profil	
Čas úplného broušení 1mm délky dílu robotem	0,022s.mm ⁻¹
Čas připadající na manipulaci s jedním kusem na automatickém pracovišti	9,02s
Čas úplného broušení 1mm délky dílu manuálně	0,022s.mm ⁻¹
Čas připadající na manipulaci s jedním kusem na manuálním pracovišti	15,78s



Obrázek 43: Graf závislosti času broušení na délce obráběné plochy v dávce šesti kusů



Obrázek 44: Graf závislosti času broušení na délce obráběné plochy v dávce šesti kusů- detail

Z číselných výsledků i grafu je zřejmé, že pracovní výkon automatizovaného pracoviště výrazně převyšuje výkon manuálního pracoviště. Prvním důvodem je výrazné zrychlení procesu broušení, druhým je pokles nároků na manipulaci, kdy je na automatickém pracovišti manipulováno vždy se všemi kusy zároveň, figuruje zde tedy v přeneseném významu princip zhromadnění. Manipulace je zároveň prováděna vždy stejným způsobem a lze ji proto dále přizpůsobovat předpisy pro dosažení lepších výsledků z hlediska času i ergonomie. Předpis pro manipulaci s díly při manuálním broušení v podniku neexistuje, manipulace v průběhu broušení je pouze obecně definována v předpisu o manipulaci s díly, který je však cílen na kvalitu a zamezení poškození dílů při ukládání a transportu na pracovištích a mezi pracovišti.

Je pravděpodobné, že podíl nevýrobních časů na automatickém pracovišti bude narůstat v případě nutnosti přenastavovat systém v průběhu směny, například kvůli změně typu vyráběných dílů. Lze však předpokládat, že se nízké efektivitě manuálního procesu nepřiblíží, už jen z důvodu vysoké rychlosti broušení dílů. Zároveň bude automatické pracoviště obsluhováno v režimu vícestrojové obsluhy, takže bude v porovnání s manuálním procesem snižena požadavek na množství personálu nutného pro vykonání práce, což je jedním z hlavních cílů celého projektu.

Automatické pracoviště rovněž v případě broušení menších dílů, přibližně do 150mm, umožňuje populovat jednotlivé pozice v přípravku více díly zároveň. Proto byly výpočty provedeny způsobem vyjádření času na broušení 1mm délky. Systém je taktéž možné osadit více přípravky, čímž se podíl nevýrobních časů lépe rozdělí mezi počet kusů, protože systém bude pracovat déle mezi přestávkami. V úvahu je nutné vzít rovněž vysokou opakovatelnost kvalitativního vzhledu obrobeného povrchu oproti ručnímu broušení.

6.4 Další možné využití automatického systému broušení

Systém automatického broušení nabízí další možnosti využití v budoucnu. Vzhledem k velkému množství vyráběných dílů z profilových polotovarů však bude nejméně jedno pracoviště zachováno pouze za tímto účelem.

Dalším typem výrobků, které jsou velmi časově náročné na operaci broušení, jsou díly typu workdeck nebo worktop. Jedná se o rozměrné výrobky deskového charakteru, které slouží jako kuchyňské pracovní stoly ve velkých modelech letadel Airbus, které obsluhují mezikontinentální linky. Pohledové plochy výrobků jsou broušeny a musí splňovat velmi přísný kosmetický standard. Ruční broušení takovýchto výrobků, které mají nezřídka rozměry 2000x400mm je velmi pracné. Proto by se, alespoň s cílem hrubého přípravného broušení s účelem odstranění stop po obrábění, operaci automatizovat rovněž vyplatilo. Pro obrázek dílu typu workdeck viz Obr. 30 vpravo dole.

Vzhledem k velkému množství vnitřních rádiů a zkosených ploch na pohledové ploše probíhá ruční broušení pomocí ručních vibračních brusek s odsáváním. Vystavování pracovníků intenzivním vibracím po delší dobu není z ergonomického hlediska vhodné, ale vibrační brusky jsou v tomto případě nejvhodnějším pracovním prostředkem, zejména z důvodu rychlosti práce a vyhovující povrchové úpravy, kterou vytváří.

Vibrační brusku s odsáváním by právě z důvodu vyhovující povrchové úpravy, kterou vytváří a její prověřené vhodnosti pro tuto konkrétní výrobní operaci bylo vhodné aplikovat v systému automatického broušení s řízením přítlaku. Následně by bylo nutné automatický systém doplnit o stanici pro automatickou výměnu brusného média a přímé odsávání prachu zpod brusky.

7 Závěr

V rámci projektu se podařilo navrhnout a zprovoznit systém automatického broušení, který je schopný v konstantní kvalitě produkovat díly s vyhovující povrchovou úpravou. Součástí systému je externí jednotka řízení přítlaku, která v průběhu procesu neustále monitoruje a udržuje přítlačnou sílu při broušení v přijatelných mezích.

Použití jednotky řízení přítlaku se po průzkumu literatury a testování systému s kolaborativním robotem ukázalo jako nezbytné zejména z dvou hlavních důvodů. Prvním z důvodů je nutnost zajištění konstantních podmínek broušení i přes změnu průměru nástroje vlivem opotřebení a dalších vlivů ovlivňujících výsledek procesu, jakým je například nepřesné uložení dílů v přípravku, nepřesnost rozměrů polotovarů a nedostatečná tuhost robotu. Druhým důvodem je ochranný systém FANUC DCS, který zajišťuje bezpečnost obsluhy zastavením robotu při kontaktu s cizími tělesy, nebo lidmi. V případě broušení tento systém zastavuje celý robot takřka okamžitě při prvním kontaktu s obrobkem. Systém řízení přítlaku umožňuje předem nastavit sílu, která bude v průběhu procesu broušení vyvíjena a tuto očekávanou sílu je následně možné nastavit robotu jako povolený limit. Výsledkem je známá síla, kterou bude robot působit. Změny této síly zároveň nejsou díky systému řízení přítlaku skokové. Právě prudká změna síly detekovaná robotem a překročení jejího nastaveného limitu, je příčinou spuštění ochranného systému a zastavení robotu.

Systém díky navrženému přípravku umožňuje hromadné zpracování většího množství součástí, což má pozitivní vliv na produktivitu.

V další fázi projektu bude okolo pracovního stolu navržena a připevněna stěna se stropem z čirého plexiskla, která umožní efektivně z pracovní buňky odsávat prach a nečistoty. Stěna bude doplněna dveřmi s bezpečnostní pojistkou, které budou sloužit k výměně obrobků, a pojistka bude bránit spuštění pracovního cyklu s otevřenými dveřmi z důvodu bezpečnosti.

Vedoucí pracovníci z oddělení technologie a výroby hodnotí průběžné výsledky projektu velice pozitivně. Dokončení projektu a zapojení systému do výrobního procesu je schváleno a očekáváno.

8 Seznam použité literatury

- [1] ČERMÁK, Roman. *Přednáška z předmětu KKS/ZRO- Základy robotiky: Úvod* [PDF]. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [2] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory* [PDF]. Ostrava, 2007, 260 s. ISBN 978-80-248-1522-0. Dostupné také z: http://www.elearn.vsb.cz/archived/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf. Učební text. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [3] Industrial robots with artificial intelligence. In: Developmentscout [online]. 2023 [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://en.developmentscout.com/industry/automation/robot/11493-industrial-robot-mitsubishi-electric>
- [4] Maximální rychlost s novým robotem DELTA od firmy KUKA pro ještě vyšší produktivitu. In: KUKA. Kuka.com [online]. 2023 [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/firma/tisk/novinky/2022/06/nov%C3%BD-vysokorychlostn%C3%AD-robot-delta>
- [5] OITZMAN, Mike. What is an industrial mobile robot? In: Mobile Robot Guide [online]. 2023 [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://mobilerobotguide.com/2022/04/20/what-is-an-industrial-mobile-robot/>
- [6] ACKERMAN, Evan. Reconfigurable Robot Can Climb Up Its Own Track. In: *IEEE Spectrum* [online]. 2023 [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://spectrum.ieee.org/reconfigurable-robot-can-climb-up-its-own-track>
- [7] COLLINS, Danielle. What is a Cartesian robot? In: *Linear motion tips* [online]. 2023 [cit. 2023-12-05]. Dostupné z: <https://www.linearmotiontips.com/what-is-a-cartesian-robot/>
- [8] THNET.CO.UK. *Robot working envelopes* [online]. 2023 [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <http://thnet.co.uk/thnet/robots/25.htm>
- [9] SCARA Robot SR-6iA. In: Fanuc [online]. 2023 [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%c3%a1nka-filtru-robot%c5%af/scara-series/scara-sr-6ia>
- [10] ARC Mate 100iD/10L: Technický list. In: *Fanuc* [online]. 2023 [cit. 2023-12-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%c3%a1nka-filtru-robot%c5%af/sva%c5%99ov%c3%a1n%c3%ad-elektrick%c3%bdm-obloukem/arcmate-100id-10l>
- [11] ČERMÁK, Roman. *Přednáška z předmětu KKS/ZRO- Základy robotiky: Opakování pojmů z mechaniky Kinematika robotických manipulátorů: Část 1 – Přímá úloha* [PDF]. Západočeská univerzita v Plzni, 2018.
- [12] LIU, L., B.J. ULRICH a M.A. ELBESTAWI. Robotic grinding force regulation: design, implementation and benefits. In: *Proceedings., IEEE International Conference on Robotics and Automation* [online]. Cincinnati, OH, USA: IEEE Comput. Soc. Press, 1990, s. 258-265 [cit. 2024-01-13]. ISBN 0-8186-9061-5. Dostupné z: doi:10.1109/ROBOT.1990.125983

[13] JERSÁK, Jan. *TEPLO A TEPLoty PŘI OBRÁBĚNÍ, OPOTŘEBENÍ ŘEZNÝCH NÁSTR.* [PDF]. Technologie III - OBRÁBĚNÍ - přednáška. TOS, PRECIOSA. Technická univerzita v Liberci, 2013. CZ.1.07/2.2.00/15.0089. Dostupné také z: http://educom.tul.cz/educom/inovace/TOB/VY_03_36-Teplo%20a%20teploty%20p%C5%99i%20obr%C3%A1b%C4%9Bn%C3%AD.%20opot%C5%99eben%C3%AD%20%C5%99ezn%C3%BDch%20n%C3%A1stroj%C5%AF_MZ_6%20%20.pdf

[14] Všeobecné soustružení: Jak při soustružení dosáhnout dobré kvality obroběných součástí [online]. In: SANDVIK COROMANT. [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://www.sandvik.coromant.com/cs-cz/knowledge/general-turning/how-to-achieve-good-component-quality-in-turning>

[15] TRUHLÁŘ, Jan. *Nové abrazivní materiály pro broušení.* Praha, 2022. <http://hdl.handle.net/10467/103479>. Dostupné také z: <https://dspace.cvut.cz/handle/10467/103479> Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze.

[16] Norton: *Reshaping the world of precision grinding.* In: SAINT-GOBAIN. Saint-Gobain Abrasives [online]. 2016 [cit. 2024-01-20]. Dostupné z: <https://www.nortonabrasives.com/en-gb/resources/expertise/reshaping-world-precision-grinding>

[17] HOROWITZ, Isaac. Fundamental theory of automatic linear feedback control systems [online]. 1959. Research Laboratories, Hughes Aircraft Co., Culver City, California: IRE Transactions on Automatic Control, 1959, 5-19 [cit. 2024-02-10]. 4(3). Dostupné z: doi:doi:10.1109/tac.1959.1104893

[18] Robotic Force Compliance End Effectors. In: PUSHCORP. *PushCorp* [online]. 2024 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://pushcorp.com/productcat/robotic-force-compliance-devices/>

[19] ERLBACHER, Edwin. Force Control Basics [pdf]. 1. PushCorp, 2020, 14 s. Dostupné také z: <https://pushcorp.com/wp-content/uploads/2020/06/Force-Control-Basics.pdf>

[20] LYNCH, Kevin a Frank PARK. NORTHWESTERN UNIVERSITY. Force Control. In: Video Supplements for Modern Robotics [online]. Cambridge University Press, 2019 [cit. 2024-02-17]. Dostupné z: <https://modernrobotics.northwestern.edu/nu-gm-book-resource/11-5-force-control/#department>

[21] NORDBO. Buffing. *Nordbo Robotics* [online]. 2020 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.nordbo-robotics.com/buffing>

[22] Automotive Robotic Metal Finishing. In: ACME. *Acme manufacturing* [online]. [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.acmemfg.com/automotive-metal-finishing/>

[23] Robotic system for grinding shotgun barrels. In: ARCOS. *Arcos* [video]. 2022 [cit. 2024-02-19]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=hpxKRhmjRjE>

[24] ATI INDUSTRIAL AUTOMATION. Force Control Devices. *ATI Industrial Automation: A Novanta company* [online]. 2024 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: https://www.ati-ia.com/products/deburr/deburring_home.aspx

[25] TEGRAM. Robotic Grinding, Sanding and Deburring. *Tegram: Experts in Vision Guided Robotics* [online]. 2024 [cit. 2024-02-26]. Dostupné z: <https://tegram.com/en/applications/robotic-grinding/>

- [26] ARCOS. *Machines for grinding, sanding, finishing: Study cases for grinding, sanding and finishing* [online]. 2024 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.arcossrl.com/en/grinding-sanding-finishing-beltin/>
- [27] ARCOS. *Robotic polishing and deburring cells: Robotic Cells* [online]. 2024 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.arcossrl.com/en/robotised-systems/>
- [28] Arcos: *Robotic system: robotic cell for polishing handles* [online]. In: . [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: https://youtu.be/hpxKRhmjRjE?si=udOJf_qulyqUSdA
- [29] ACME MANUFACTURING. *Robotic Metal Finishing* [online]. 2024 [cit. 2024-03-03]. Dostupné z: <https://www.acmemfg.com/robotic-metal-finishing/>
- [30] SERVIND. Robotické broušení. *Servind: Automatizace a robotizace v oblasti přípravy povrchů a lakování* [online]. 2024 [cit. 2024-03-06]. Dostupné z: <https://www.servind.cz/roboticke-brouseni>
- [31] MIRKA. What kind of electronics does the Mirka AIROS use. *Mirka support* [online]. 2024 [cit. 2024-03-06]. Dostupné z: https://support.mirka.com/en_EN/robotic-sanding/what-kind-of-electronics-does-the-mirka-airos-use
- [32] MIRKA. Nová Mirka AIROS je první inteligentní elektrická bruska. *Mirka* [online]. 2020 [cit. 2024-03-06]. Dostupné z: https://www.mirka.com/cs-CZ/Cz/ Top-Menu/CZ_News/mirka-airos/
- [33] ROWE, W.B, M.N MORGAN a T. JIN. Energy and temperature analysis in grinding. *Transactions on Engineering Sciences*. School of Engineering, Liverpool John Moores University, UK; S.I.M.S. Cranfield University, UK: WIT, 2003, (44), 3-23. ISSN 1743-3533. dostupné z: <https://www.witpress.com/Secure/elibrary/papers/LAMDAMAP03/LAMDAMAP03001FU.pdf>
- [34] Kolaborativní robot CR – 15iA. In: FANUC. *The factory automation company* [online]. 2024 [cit. 2024-03-17]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/kolaborativ>
- [35] WU, Chongjun, Beizhi LI, Jianguo YANG a Steven LIANG. Comparison of Machining Temperature in High Speed Grinding of Metallic Materials and Brittle Materials. 2017 INTERNATIONAL CONFERENCE ON MECHANICAL, MATERIAL AND AEROSPACE ENGINEERING (2MAE 2017). *MATEC Web Conf.* [online]. Donghua University, Shanghai, China; Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2017, (114) [cit. 2024-03-18]. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201711402006. International Conference on Mechanical, Material and Aerospace Engineering (2MAE 2017).
- [36] BLAŽEK, Jan. *Projektování robotizovaných pracovišť*. Praha 10, Rostovská 25: Oborový institut TST, 1987.
- [37] Kdy použít řízení s otevřenou nebo uzavřenou smyčkou. In: CONTROL ENGINEERING ČESKO. Vše o průmyslu [online]. 2017 [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.vseoprmyslu.cz/automatizace/automatizace-stroju/kdy-pouzit-rizeni-s-otevrenou-nebo-uzavrenou-smyckou.html>

Příloha č. 1

**CAD modely a výkresy součástí jednotky řízení přítlaku (výkresy
v tištěné i digitální podobě)**

Příloha č. 2

Technický list robotu FANUC Cr-15iA

Příloha č. 3

**Videa a fotografie zobrazující automatizovaný systém ve
zkušebním provozu**

Příloha č. 4

Fotografie vzorků ve vysokém rozlišení (pouze v digitální podobě)

Příloha č. 5

Řídící program jednotky řízení přítlaku