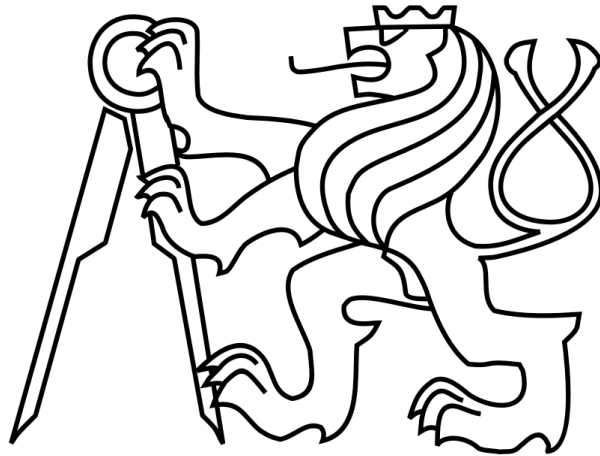


ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

**Návrh flexibilního systému automatické výměny obrobků
v malosériové výrobě**

2019

Bc. Miroslav Rajtmajer



ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Rajtmajer** Jméno: **Miroslav** Osobní číslo: **424073**
Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**
Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**
Studijní program: **Strojní inženýrství**
Studijní obor: **Výrobní stroje a zařízení**

II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

Návrh flexibilního systému automatické výměny obrobků v malosériové výrobě

Název diplomové práce anglicky:

Design of a flexible system for automatic exchange of workpieces in small batch production

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Navrhněte technologické pracoviště pro automatickou výměnu obrobků pro malosériovou výrobu dle definovaného obrobku. Hmotnost polotovaru do 6 kg, maximální výška upinaného polotovaru do 100 mm, maximální zástavbové rozměry (šířka x výška x hloubka): 1500x2000x1500 mm, čas výměny obrobku uvažujte 40 sekund; Proveďte zmapování současného stavu problematiky automatické výměny obrobku (AVO); Navrhněte varianty AVO a vyhodnoťte; Pro vybranou variantu definujte všechny potřebné periferie a proveďte prostorové uspořádání; Optimalizujte návrh AVO a zpracujte 3D modely včetně konstrukčního návrhu zásobníku; Navrhněte informační a energetické připojení AVO; Kontrola času AVO; rozsah textové části 60-80 stran.

Seznam doporučené literatury:

TALÁCKO, Jaroslav. Automatizace výrobních zařízení. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2000. ISBN 80-01-02160-2.; DUŠÁK, Karel. Prostředky automatizované montáže: (druhy a dopravníky). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010. ISBN 978-80-7372-284-5.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

Ing. Tomáš Krannich, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

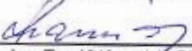
Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

Ing. Jaroslav Červenka, ústav výrobních strojů a zařízení FS


Datum zadání diplomové práce: **30.04.2019**

Termín odevzdání diplomové práce: **21.07.2019**

Platnost zadání diplomové práce: **30.09.2019**


Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) práce

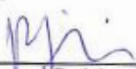

Ing. Matěj Sulitka, Ph.D.
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry


prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

30.4.2019
Datum převzetí zadání


Podpis studenta

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl v příloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 16. 7. 2019

.....

podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu své diplomové práce, panu Ing. Tomáši Krannichovi, Ph.D., za cenné připomínky a ochotné vedení při tvorbě diplomové práce. Panu Ing. Jaroslavu Červenkovvi za zodpovídání technických dotazů a trpělivost, kterou mi věnoval.

Dále bych chtěl poděkovat své rodině za podporu během celého studia.

Anotace

Autor:	Bc. Miroslav Rajtmajer
Název:	Návrh flexibilního systému automatické výměny obrobků v malosériové výrobě
Rozsah práce:	105 str., 73 obr., 16 tab.
Školní rok vyhotovení:	2019
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – Ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí práce:	Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Jaroslav Červenka
Zadavatel:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Využití:	Automatizace výměny obrobků při frézování v malosériové výrobě
Klíčová slova:	Automatizace, robot, SCARA, robotizace, AVO, výměna obrobku, malosériová výroba
Anotace:	Diplomová práce se zabývá návrhem mobilního flexibilního systému pro automatickou výměnu obrobků v malosériové výrobě. Na základě průzkumu situace na trhu byly s ohledem na zvolené parametry navrženy optimální komponenty – výrobní stroj, manipulátor a zásobník. Stěžejní částí práce je vlastní konstrukční návrh zásobníku. Byly provedeny výpočty pro určení času cyklu automatizace včetně vlastního výpočtu stanovení optimální trajektorie pohybu. Výstupy práce jsou 3D model navrženého AVO systému, výkresová dokumentace a výpočet času pohybu robotu.

Annotation

Author:	Bc. Miroslav Rajtmajer
Title:	Design of a flexible system for automatic exchange of workpieces in small batch production
Extent:	105 p., 73 fig., 16 tab.
Academic year:	2019
University:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Department:	PME – Department of Production Machines and Equipment
Supervisor:	Ing. Tomáš Krannich, Ph.D.
Consultant:	Ing. Jaroslav Červenka
Submitter of the Theme:	CTU – Faculty of Mechanical Engineering
Application:	Machine tending for milling machines in small batch production
Key words:	Automation, robot, SCARA, machine, tending, workpiece, small batch production
Annotation:	The thesis deals with the design of a modern flexible machine tending system that is intended for small batch production. Based on a research of existing machine tending systems, the suitable components were chosen and designed. The main components of the system are production machine, manipulator and feeder. Calculation of the total cycle time and calculation of the optimal trajectory of the chosen SCARA robot were done. The outputs include 3D CAD model, drawing documents and total cycle time calculation.

Obsah

1	Úvod.....	12
2	Cíl práce.....	13
3	Současný stav problematiky AVO.....	14
3.1	Základní charakteristika AVO.....	14
3.2	Rozdělení koncepcí AVO.....	18
3.3	Mobilní koncepce AVO.....	19
3.3.1	RoboJob Turn-Assist 200 VA.....	19
3.3.2	Agile Flex.....	21
3.3.3	MRC Flextray.....	22
3.3.4	DGI MORI Robo2Go.....	24
3.3.5	AWR – Load & Go DC.....	26
3.3.6	AWR - Load & Go RC.....	27
3.4	Výběr optimální varianty koncepce AVO.....	29
3.5	Shrnutí řešerše.....	30
4	Vlastní řešení.....	32
4.1	Návrh konceptu AVO.....	33
4.2	Výrobní stroj a polotovar.....	33
4.2.1	Typ výrobního stroje.....	33
4.2.2	Specifikace polotovaru.....	34
4.2.3	Upínání polotovaru na stůl výrobního stroje.....	35
4.2.4	Shrnutí volby výrobního stroje a polotovaru.....	37
4.3	Manipulátor.....	37
4.3.1	Typ manipulátoru.....	37
4.3.2	Úchopná hlavice.....	40
4.3.3	Rychloupínací adaptér.....	41
4.3.4	Nosnost manipulátoru.....	42
4.3.5	Moment setrvačnosti poslední osy robotu.....	43
4.3.6	Výběr robotu pomocí vícekritériálního rozhodování.....	46
4.3.7	Shrnutí návrhu manipulátoru.....	49
4.4	Zásobník – návrhy konstrukcí.....	49
4.4.1	Variety zásobníku.....	49

4.5	Zásobník – konstrukce vybrané varianty	53
4.5.1	Funkce	54
4.5.2	Rám	55
4.5.3	Pojezd výsuvných palet.....	56
4.5.4	Systém podepření vysunuté palety	58
4.5.5	Aretace pohyblivých komponent.....	58
4.5.6	Posuvná paleta	61
4.5.7	Snímání polohy palet	62
4.5.8	Upínání polotovarů.....	65
4.5.9	Výsuv palety k robotu.....	68
4.5.10	Krytování.....	70
4.5.11	HMI	71
4.5.12	Programování systému	72
4.6	Připojení zásobníku k výrobnímu stroji – informační a energetické propojení...75	
5	Výpočet času cyklu výměny obrobku.....	83
5.1	Pohyb robotu	83
5.2	Úvaha o minimalizaci doby pohybu	85
5.3	Stanovení ideální trajektorie pohybu	86
5.4	Čas pohybu mezi body A a B.....	88
5.5	Čas pohybu mezi body B a C.....	88
5.5.1	Výpočet přírůstků úhlů pro zvolenou trajektorii	88
5.5.2	Určení ideální trajektorie pohybu v úseku „BC“	91
5.5.3	Výpočet nejkratšího času pohybu v úseku „BC“	92
5.6	Výpočet celkového času cyklu robotu	95
6	Závěr.....	97
	Seznamy	100
	Příloha 1: Statické a gantry koncepce AVO	
	Příloha 2: Katalogový list robotu Toshiba THL900	
	Příloha 3: Výpočet času pohybu prvních dvou ramen robotu mezi body A a B	
	Příloha 4: Grafy pro určení omezení rychlosti a zrychlení pohybu os robotu Toshiba THL900 dle zatížení	
	Příloha 5: Inverzní kinematika – popis mechanického řetězce	

Seznam symbolů, jednotek a značek

a	mm	Délka strany kvádrů
a_z	m/s ²	Zrychlení osy „Z“
b	mm	Šířka kvádrů
c	mm	Výška kvádrů
C_{min}	N	Minimální únosnost lineárního vedení
D_v	mm	Průměr válce
$d\varphi_1$	°	Přírůstek natočení prvního ramene robotu
$d\varphi_2$	°	Přírůstek natočení druhého ramene robotu
e	mm	Vyosení těžiště od osy „Z“
F_2	N	Síla maximálního stlačení aretačního členu
F_{ar}	N	Celková aretační síla
F_{ob}	N	Síla obsluhy pro vysunutí palety
F_{odp}	N	Odporová síla
F_{tr}	N	Rezerva síly robotu v tahu
F_x	N	Axiální síla aretace
J	kgm ²	Moment setrvačnosti
J_{ap}	kgm ²	Moment setrvačnosti adaptéru
J_{cel}	kgm ²	Celkový moment setrvačnosti
J_{dov}	kgm ²	Maximální dovolený moment setrvačnosti
J_p	kgm ²	Moment setrvačnosti prstu
J_{pol}	kgm ²	Moment setrvačnosti polotovaru
J_{red}	kgm ²	Moment setrvačnosti redukce
J_{rKS}	kgm ²	Moment setrvačnosti redukce ke KŠ
J_{ru}	kgm ²	Moment setrvačnosti rychloupínače
J_{uh}	kgm ²	Moment setrvačnosti úchopné hlavice
m	m	Souřadnice středu kružnice v "x"
m_{adpA}	kg	Hmotnost adaptéru pro výměnu HWA
m_{adpK}	kg	Hmotnost adaptéru pro výměnu HWK
m_{amp}	kg	Hmotnost prstů s adaptérem
m_{ap}	kg	Hmotnost adaptéru k prstu
m_p	kg	Hmotnost válce
m_{pale}	kg	Hmotnost palety
m_{pol}	kg	Hmotnost nejtěžšího polotovaru
m_{prob}	kg	Hmotnost celkem (pož. nosnost robotu)

m_{red}	kg	Hmotnost redukce
m_{rKS}	kg	Hmotnost válce
m_{ru}	kg	Hmotnost rychloupínače
m_{uh}	kg	Hmotnost úchopné hlavice
n	m	Souřadnice středu kružnice v "y"
n_{ap}	1	Počet celkem
n_{ar}	1	Počet aretačních členů na jednu paletu
n_p	1	Počet celkem
n_{pol}	1	Počet polotovarů
P	N	Normálové zatížení
r_1	m	Délka prvního ramene robotu, také délka úsečky OV
r_2	m	Délka druhého ramene robotu, také délka úsečky VT
r_t	m	Poloměr trajektorie
r_v	mm	Poloměr
S	1	Koeficient bezpečnosti
s_{ta}	m	Dráha ujetá při zrychlení
s_{vk}	m	Dráha ujetá konstantní rychlostí
t	m	Délka úsečky OT
t_a	s	Čas zrychlování
t_a	s	Čas zpomalování
t_{a1}	s	Čas prvního ramene potřebný pro zrychlení na max. rychlost
t_{a2}	s	Čas druhého ramene potřebný pro zrychlení na max. rychlost
t_{cel1}	s	Celkový čas pohybu prvního ramene
t_{cel2}	s	Celkový čas pohybu druhého ramene
t_v	s	Čas pohybu konstantní rychlostí
t_{vk1}	s	Čas pohybu prvního ramene konstantní rychlostí
t_{vk2}	s	Čas pohybu druhého ramene konstantní rychlostí
t_z	s	Celkový čas pohybu osy „Z“
v_z	m/s	Rychlost pohybu třetí osy robotu
x_{T0}	m	Souřadnice ve směru „x“ od počátku – osa rotace ramene 1
y_{T0}	m	Souřadnice ve směru „y“ od počátku – osa rotace ramena 1
z	m	Zdvih pohybu třetí osy robotu
α_1	rad/s ²	Úhlové zrychlení prvního ramene robotu
α_2	rad/s ²	Úhlové zrychlení druhého ramene robotu
β_0	°	Úhel mezi stranami „x“ a „t“
β_1	°	Úhel mezi stranami „t“ a „r1“

γ	°	Úhel mezi stranami „r1“ a „r2“
ρ_{Al}	kg/m ³	Hustota hliníku
ρ_{Al}	kg/m ³	Hustota hliníku
ρ_{Al}	kg/m ³	Hustota hliníku
φ_1	°	Natočení prvního ramene robotu
φ'_1	°	Nové natočení prvního ramene robotu
φ_2	°	Natočení druhého ramene robotu
φ'_2	°	Nové natočení druhého ramene robotu
φ_{ta1}	rad	Úhel pohybu prvního ramene robotu při zrychlení na max. rychlost
φ_{ta2}	rad	Úhel pohybu druhého ramene robotu při zrychlení na max. rychlost
φ_{vk1}	rad	Úhel pohybu prvního ramene robotu při pohybu konstantní rychlostí
φ_{vk2}	rad	Úhel pohybu druhého ramene robotu při pohybu konstantní rychlostí
ω_1	rad/s	Úhlová rychlost prvního ramene robotu
ω_2	rad/s	Úhlová rychlost druhého ramene robotu
<i>AVO</i>		Automatická výměna obrobku
<i>CAD</i>		Computer Aided Design – software pro počítačem podporované navrhování
<i>CNC</i>		Computer Numeric Control – počítačem řízený obráběcí stroj
<i>HMI</i>		Human Machine Interface – rozhraní mezi zařízením a člověkem
<i>PLC</i>		Programmable Logic Controller – programovatelný logický automat
<i>SCARA</i>		Selective Compliance Articulated Robot Arm

1 Úvod

Automatická výměna obrobků (AVO) je proces, při kterém se do výrobního stroje automaticky upne polotovar a po dokončení technologické činnosti se opracovaný kus (obrobek, výlisek, výstřižek, odlitek, svařenec) zase automaticky vyjme a odloží mimo stroj. Automaticky znamená bez činnosti obsluhy.

Použití prvků automatizace se začíná vyplácet i malým výrobcům v malosériové výrobě (malé počty kusů v řádu stovek), především díky klesajícím cenám manipulátorů. Automatizace výměny obrobků pro malosériovou výrobu slouží menším výrobcům pro zvýšení produktivity výroby, eliminaci lidského faktoru ve výrobě a snížení fyzické námahy. Pro potřeby malosériové výroby je vhodný mobilní flexibilní systém automatizace, jenž se vyznačuje tím, že je robot se zásobníkem snadno přemístitelný a jednoduše použitelný i pro jiný obráběcí stroj podobné struktury. Vysoké pořizovací náklady takovýchto systémů jsou však bariérou pro širší využívání AVO právě v malosériové výrobě. V současnosti na trhu neexistuje plně vhodný systém AVO, který by byl mobilní, flexibilní, jednoduchý pro použití a zároveň levný pro pořízení, a proto vznikla potřeba takový systém AVO navrhnout.

2 Cíl práce

Cílem diplomové práce je vytvořit návrh flexibilního systému automatické výměny obrobku pro malosériovou výrobu malých výrobků umožňující manuální transport mezi pracovišti, s ohledem na jednoduchost používání a cenovou dostupnost.

Hlavní náplní práce je návrh všech komponent, které tvoří celý systém AVO. Tj. výběr vhodného typu výrobního stroje pro použití AVO, výběr a robotu jeho příslušenství, vlastní konstrukční návrh zásobníku polotovarů a zpracování výpočtů pro zjištění délky pracovního cyklu. Zpracování návrhu vychází z podmínek v zadání práce.

Postup zpracování diplomové práce je následující:

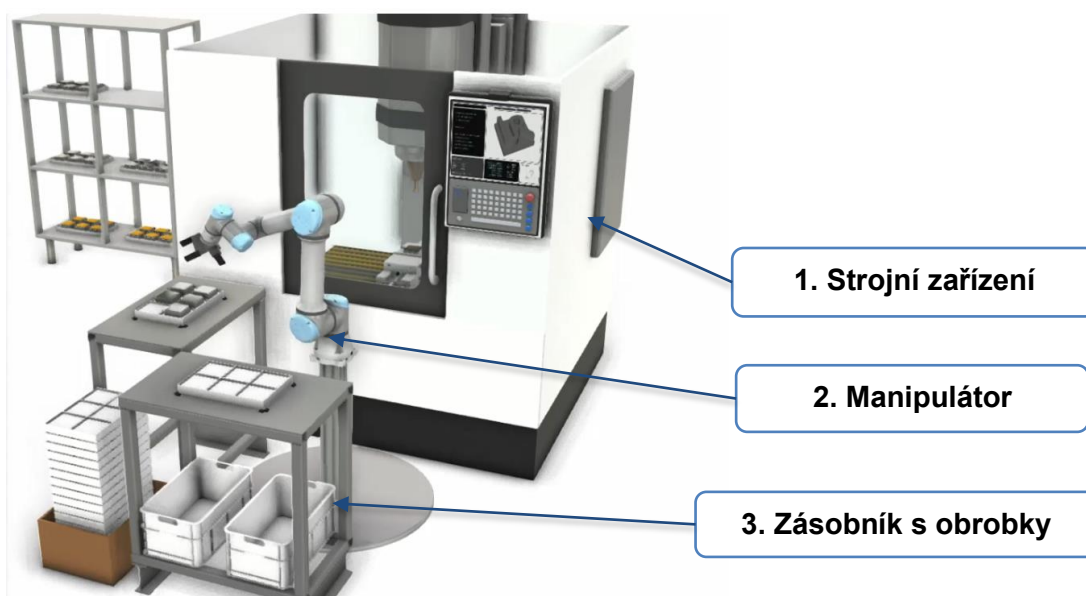
1. Zpracování rešerše: průzkum řešené problematiky, nalezení vhodné literatury a průzkum trhu.
2. Volba vhodných součástí celého systému.
3. Na základě získaných znalostí volba vhodného konceptu zásobníku a návrh několika variant umístění polotovarů v zásobníku. Zhodnocení variant a volba vhodné varianty pro detailní konstrukci.
4. Konstrukční návrh zásobníku a připojovacího rozhraní ke stroji. Tvorba 3D modelu.
5. Výpočet doby pracovního cyklu.

3 Současný stav problematiky AVO

V rámci rešerše bylo provedeno zmapování současného stavu problematiky automatické výměny obrobku (AVO). V úvodu je představena základní charakteristika AVO, tj. vysvětlení účelu automatické výměny obrobku a motivace pro její použití. Na základě zmapování konceptů AVO dostupných na trhu je provedeno vlastní rozčlenění konceptů AVO dle struktury. Vzhledem k zaměření práce jsou pak podrobněji představeny existující mobilní koncepty AVO. Z nich je následně proveden výběr vhodných konceptů, které sloužily jako inspirace při tvorbě vlastní konstrukční varianty splňující kritéria dle zadání práce.

3.1 Základní charakteristika AVO

Systém automatické výměny obrobku se skládá ze tří hlavních prvků a jejich vzájemných vazeb. Ze **strojního zařízení**, do kterého vkládáme a zakládáme obrobky; dále z **manipulátoru**, který obrobky vkládá a vykládá ze stroje; a v poslední řadě ze **zásobníku** s obrobky/polotovary. Účelem automatizovaného pracoviště je pracovat co nejdéle bez účasti pracovníka. [1] [2]

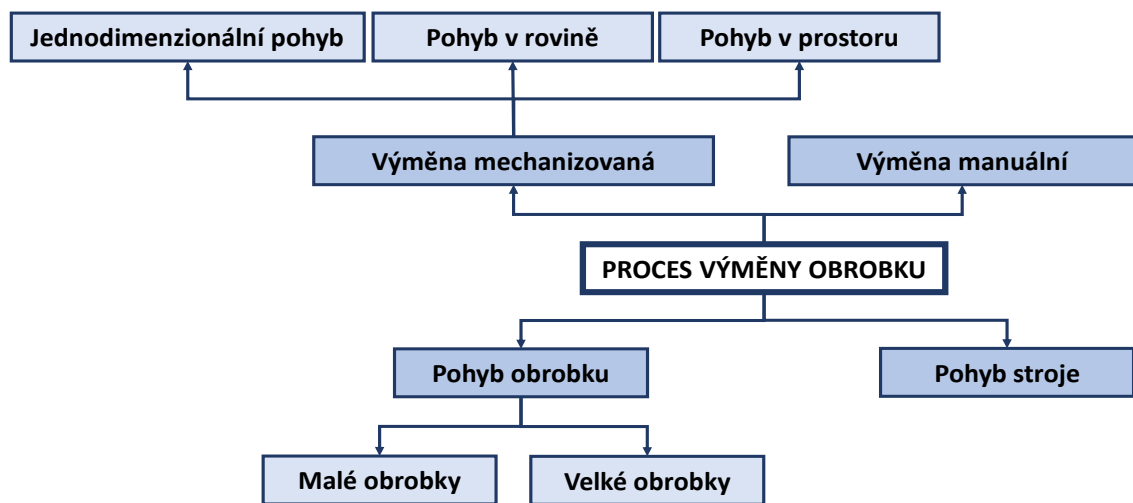


Obr. 1 Schéma automatické výměny obrobku [8]

S rozmachem číslicově řízených strojů (CNC) stoupá zájem o automatizaci výměny obrobků a nástrojů. Důvodem je snižování vedlejších časů těchto výrobních strojů – zvyšuje se tím produktivita, a výrobní stroje se tak dříve zaplatí. Proces automatické

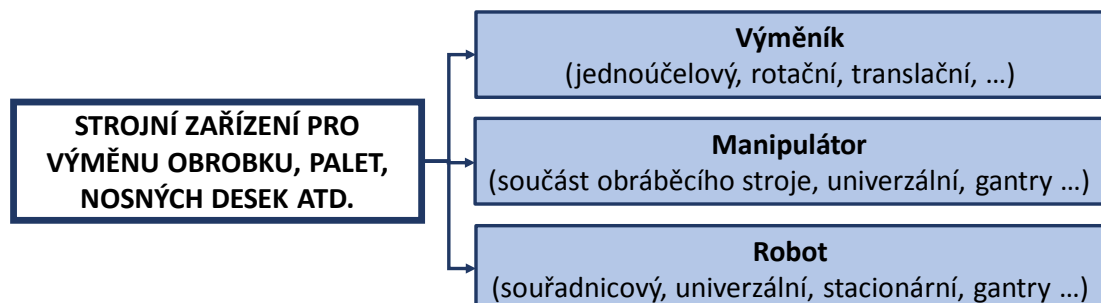
výměny obrobků má i další výhody, avšak mimo vysokou pořizovací cenu může mít i své nevýhody. Výhody a nevýhody AVO jsou podrobněji popsány níže.

Rozdělení procesu výměny obrobku je patrné z Obr. 2. Ve většině případů koná pohyb obrobek/polotovaru a stroj stojí na místě. Vzhledem k zadané hmotnosti polotovaru 6 kg (viz zadání práce) je také v tomto případě jednodušší manipulovat s polotovarem než se strojem. Výměna může být manuální nebo mechanizovaná, tj. automatická. V případě mechanizované můžeme dále rozlišit jednodimenzionální pohyb, pohyb v rovině a pohyb v prostoru. [5]



Obr. 2 Rozdělení procesu výměny obrobku [5]

Strojní zařízení potřebné k provedení výměny obrobku jsou popsána na Obr. 3. Nejlevnější variantou je výměník, středně náročnou variantou je manipulátor a nejdražší je víceosý angulární robot. [5]

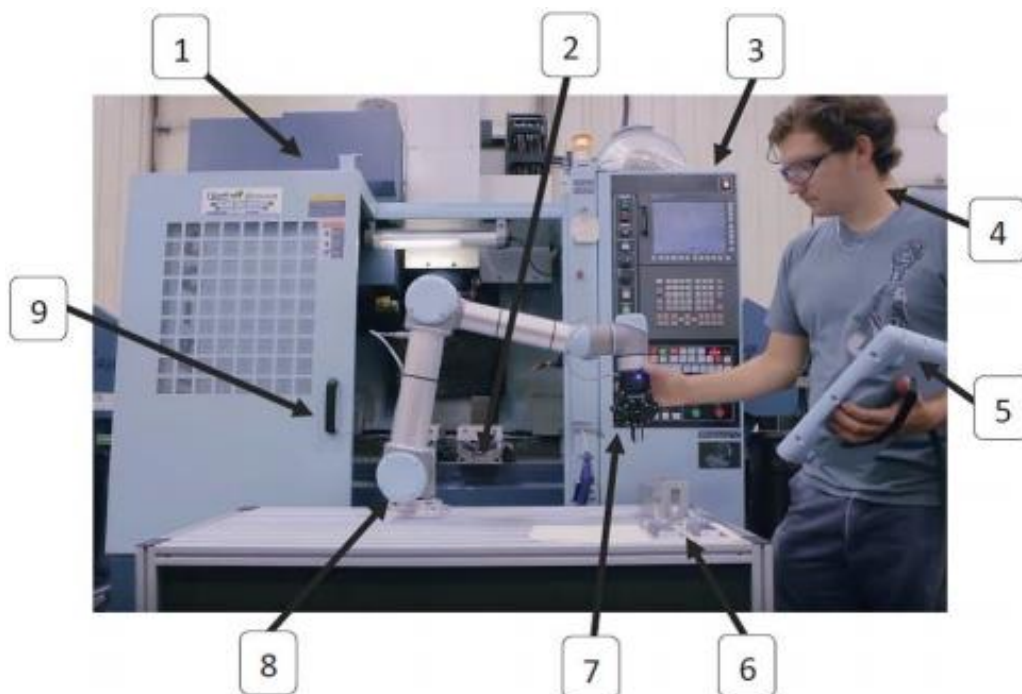


Obr. 3 Strojní zařízení pro výměnu obrobku [5]

Na obrázku níže je popsána struktura AVO, prvky potřebné k zajištění automatizace výměny obrobku. Systém AVO se skládá z výrobního zařízení (1), upínače

polotovaru (2) ve stroji, řídicí jednotky a ovládacího panelu výrobního stroje (3), který obsluhuje operátor (4) a který je zároveň dohledem zásobníku a manipulátoru. Dále příruční ovladač (5) manipulátoru, tzv. teach pendant. Polotovar (6) je umístěn v zásobníku a je uchopován manipulátorem (8) pomocí úchopné hlavice (7). V poslední řadě je nutné, aby byl výrobní stroj vybaven automaticky otevíratelnými dveřmi (9) pro vstup do pracovního prostoru.

V tomto případě je manipulátorem kolaborativní robot, proto se okolo zásobníku nevyskytuje krytí, pro zamezení přístupu obsluhy do pracovního prostoru. Krytí a ochrana operátorů pomocí bariér je v případě běžných průmyslových manipulátorů nezbytná.



Obr. 4 Části buňky pro automatizování výměny obrobků [6]

Motivace pro automatizaci výměny obrobku

Díky zlevnění prvků automatizace je v poslední době trendem použití AVO v celém spektru průmyslu, nově tedy také v malosériové výrobě. Děje se tak pro zvýšení produktivity výroby a v dnešní době nedostatku pracovníků také pro nahrazení pracovních pozic, aby vůbec bylo možné vyrábět. Dochází tak k eliminaci namáhavé a nebezpečné práce, kterou již nemusí vykonávat člověk.

Na trhu existuje několik výrobců flexibilních AVO systémů pro malosériovou výrobu, kteří vyrábějí tyto systémy pro soustruhy a soustružnická centra. Systémů AVO pro

frézovací stroje je na trhu méně a pro malé firmy zabývající se výrobou jsou příliš nákladné a složité pro obsluhu. Výsledkem této závěrečné práce je vytvořit takový systém AVO, který bude vhodný i pro malé výrobce.

Proč automatizovat výrobní proces

- Zkrácení nevýrobních časů (zakládání polotovaru, vyjímání obrobku), které přímo vede k vyšší produktivitě
- Zvýšení přesnosti opakovaného upínání součástí
- Odstranění lidského faktoru při výrobě – nahodilé jevy, nepřesnost, neopakovatelnost, otázka bezpečnosti na pracovišti a odstranění fyzicky i psychicky namáhavé monotónní práce
- Robot může pracovat v prostředí, ve kterém člověk nemůže
- Pružnější možnost reakce na změnu výroby [2] [4]

Zkrácení vedlejších (nevýrobních) časů vede ke zvýšení produktivity, a ta vede ke zvýšení zisku, protože zákazník požaduje vyhotovení zboží v co nejkratším čase. Zvýšení přesnosti opakovaného upínání součástí zvyšuje jakost produktu, stejně tak jako odstranění lidského faktoru při výrobě, kdy nahodilé chyby při manipulaci mají také vliv na jakost obrobku díky neopakovatelnosti a nepřesnosti pohybů operátora. [7]

Úskalí automatizace výrobního procesu

- Vysoká pořizovací cena manipulátoru či automatizovaného zásobníku
- Nutnost programování pohybů robota
- Chybí individuální schopnost kontroly (robot nepozná zmetek od dobrého kusu, aniž by ho měřil speciálními senzory nebo dodatečnou aparaturou)
- Zastavení cenného prostoru okolo stroje a omezení přístupu do stroje
- Otázka etiky – kde budou lidé pracovat při předpokladu automatizace celé výroby; v budoucnu hrozí firmám zvýšení daní za používání robotů

Vždy je potřeba investici do automatizace zvážit [4]. Hlavním faktorem při rozhodování je míra ušetřeného výrobního času, který je potřeba převést na finanční náklady, které jsou mu přímo úměrné. Proto je v práci mj. počítán čas pracovního cyklu. Ten je nejdůležitějším parametrem pro výpočet rentability investice.

Stupně automatizace pro automatickou výměnu obrobku

1. AVO systém s přetržitým provozem
2. AVO systém s nepřetržitým provozem bez automatické přípravy palet
3. AVO s nepřetržitým provozem a automatickým přípravou palet

Automatická výměna obrobku s přetržitým provozem představuje funkci, kdy se po zpracování všech polotovarů přeruší práce a je nutné vyskladnit a naskladnit paletu (případně se mění celá paleta obrobků za připravenou paletu polotovarů). Tento proces nemůže probíhat za činnosti robotu. AVO s nepřetržitým provozem bez automatické přípravy palet je výhodnější v tom, že obsluha může vyskladňovat obrobky a naskladňovat polotovary, zatímco probíhá automatizace. Za cenu komplikovanějšího řešení zásobníku se ušetří velké množství nevýrobního času. Třetí a nejvyspělejší možností je AVO systém s nepřetržitým provozem a automatickou přípravou palety s polotovarů. K tomuto řešení je zapotřebí další manipulátor a pásové či článkové řetězové dopravníky (základní typy dopravníků popisuje např. Dušák [3]). Jedná se o nejproduktivnější systém vhodný hlavně pro velkosériovou výrobu.

S ohledem na téma práce lze poznamenat, že pro potřeby malosériových výrobců se vyplatí nejvíce AVO systém s nepřetržitým provozem bez automatické přípravy palet, kdy polotovary zakládá do palety operátor. Případně pak AVO systém s přetržitým provozem ve výrobě opravdu malých sérií výrobků.

3.2 Rozdělení koncepcí AVO

Pro rozřídění různých konceptů AVO byly na základě rešerše existujících struktur vytvořeny následující kategorie konfigurace AVO systému dle uspořádání hlavních komponent (výrobní stroj, manipulátor, zásobník).

- **Mobilní**

Manipulátor a zásobník (odkládací stůl, paleta) jsou umístěny na společné základně, a tento celek lze snadno přemístit k jinému výrobnímu stroji (blíže viz kap. 3.3).

- **Statické**

Manipulátor a zásobník (odkládací stůl, paleta) jsou umístěny samostatně, a nelze je jednoduše přemístit. Pro potřebnou flexibilitu by se tyto koncepty

musely upravit. Nicméně je možno se u těchto systémů inspirovat řešeními výměny palet, umístěním ovládání a HMI, krytováním a bezpečností.

- **Gantry**

Manipulátor je rozšířený o další pohybovou lineární osu v poloze nad výrobním strojem či na podlaze. Toto řešení eliminuje nutnost použití dopravníků, a šetří tak místo na podlaze. Na druhou stranu je toto řešení finančně náročné a vyžaduje vysoký strop ve výrobní hale. Další nevýhodou je, že je potřeba mít výrobní stroje vhodně uspořádané za sebou, aby pro ně bylo možné využívat lineární pojezd manipulátoru.

Pro splnění požadavků na tuto práci (podmínka mobility) bylo třeba vybrat **mobilní koncept** AVO. Těmto koncepcím je proto věnována samostatná kapitola s přehledem konkrétních modelů zahraničních výrobců (viz kap. 3.3). Pro úplnost a možnou inspiraci byla provedena také rešerše statických a gantry koncepcí AVO, jejich podrobný přehled je uveden v příloze (Příloha 1).

3.3 Mobilní koncepce AVO

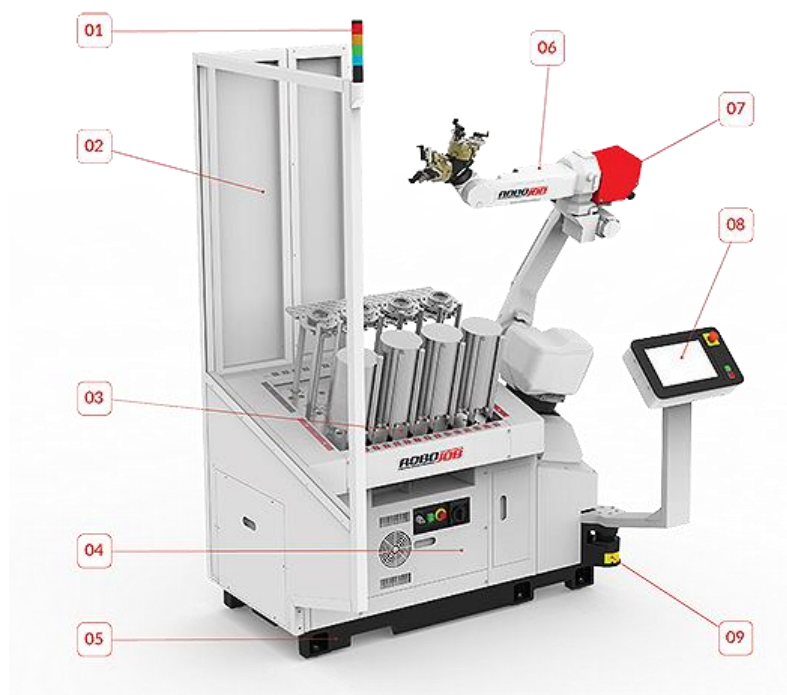
Mobilní systémy automatické výměny obrobků mají obrovskou výhodu ve flexibilitě použití. Celý systém je také možno přemístit k jinému výrobnímu zařízení kvůli změně výroby, ke které dochází v malosériové výrobě často. Níže jsou uvedeny konkrétní koncepty různých zahraničních výrobců, které jsou na trhu k dispozici. Žádná z dostupných variant však stále nespĺňuje požadavky cenové dostupnosti a jednoduchosti obsluhy, které jsou pro malosériové výrobce zásadní.

3.3.1 RoboJob Turn-Assist 200 VA

Systém RoboJob Turn-Assist 200 VA představuje velice kompaktní způsob automatizace zakládání a vyjímání polotovarů. Zařízení je určeno pro malé až středně velké série výrobků. Maximální průměr tyčového polotovaru kruhového průřezu je 200 mm. Dvě tříčelistové úchopné hlavice na šestiosém angulárním robotu šetří vedlejší výrobní čas tím, že je možno vyjmout první hlavici obrobek a druhou založit polotovar. Robot spolu s řídicí jednotkou je od výrobce Fanuc. Řada velikostí systému RoboJob pro soustružení je nabízena v několika konfiguracích lišících se nosností robotu a maximálním průměrem polotovaru:[9]

- Turn-Assist ESSENTIAL (maximální průměr polotovaru 400 mm + robot o nosnosti 20 kg / 35 kg / více)
- Turn-Assist 200 (maximální průměr polotovaru 200 mm + robot o nosnosti 12 kg / 20 kg / 35 kg / více)
- Turn-Assist 200 (maximální průměr polotovaru 270 mm + robot o nosnosti 20 kg / 35 kg / více)

Robot může být buď součástí palety (Obr. 5), nebo může fungovat odděleně (Obr. 6). Tento systém lze tedy zařadit jak do mobilních, tak do statických konceptů AVO.



Obr. 5 RoboJob Turn-Assist 200, verze s robotem, který je součástí palety [9]

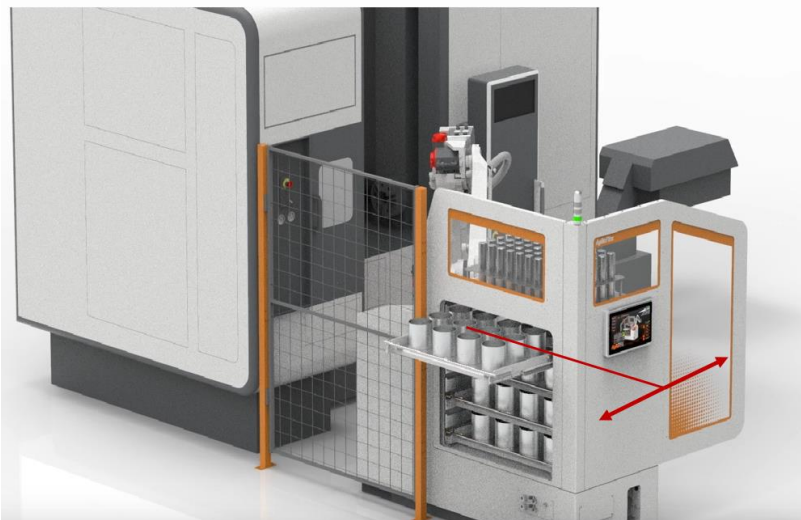
(01 = tříbarevný signální majáček, 02 = bezpečnostní přepážka, 03 = zásobník, 04 = vestavěná řídicí jednotka robotu, 05 = ustavovací patky, 06 = Fanuc robot s nosností 12 k, 07 = jednotka kontroly uchopovací síly hlavičky robotu, 08 = ovládací panel, 09 = laserový senzor)



Obr. 6 RoboJob Turn-Assist 200, verze s robotem, který není součástí palety [9]
(01 = ochranná přepážka, 02 = zásobník, 03 = elektronika, 04 = Fanuc robot 12kg nosnost, 05 = Modul pro kontrolu úchopu (síly), 06 = ovládací panel, 07 = stojan robotu, 08 = světelná závora)

3.3.2 Agile Flex

Velmi podobný systém vyrábí také firma Agile, konkrétně se jedná o model Flex. Výrobce bohužel neuvádí žádné technické údaje, nicméně z dostupných informací lze vyčíst, že systém AVO je vybaven robotem Fanuc M-201A/35M. Mimo hlavní paletu s pozicemi je stroj vybaven čtyřmi paletami, ty lze vysouvat oběma směry. Jak směrem k obsluze za hrazením – na Obr. 7, tak ve směru do vnitřku buňky k robotu, tam se pohybuje robot – na Obr. 8. Robot si sám vysouvá a zasouvá palety, pokud je chce používat. [10]



Obr. 7 Agile Flex umístěný u výrobního zařízení, výsuv šuplíku s obrobky je možný na obě strany hrzení [10]



Obr. 8 Agile Flex, dvě možnosti zásobníku, vlevo rozšíření o šuplíky, vpravo box pro delší tyčový materiál [10]

3.3.3 MRC Flextray

MRC Flextray [11] je mobilní, moderní automatizační buňka, která zajišťuje automatické vkládání a vykládání výrobních strojů. Děje se tak pomocí malého šestiosého robotu KUKA KR 6 R900 (nosnost 6 kg a dosah 900 mm) ze série KR AGILUS [12]. Zásobník je vybaven až čtyřmi paletami, které je možno teleskopicky vysouvat na obě strany. Díky tomuto řešení je umožněn nepřetržitý provoz AVO (bez automatické přípravy palety), podobně jako u výše zmíněného Agile Flex. Tento systém vyniká svojí skladností, krytování pracovního prostoru je vyřešeno integrovanou skládací zástěnou.



Obr. 9 MRC Flextray s vysunutými paletami na stranu k robotu i na stranu k obsluze [11]

Připojení zásobníku k výrobnímu stroji je realizováno pomocí pneumatického kuželového upínače „zero point clamp“, tlak pro upnutí zásobníku je zprostředkován pomocí hadice výrobním strojem a po upnutí kuželovými upínači ke stroji je následně obsluhou odpojen. Skládací zástěna je následně obsluhou rozložena a zařízení je připravené k použití.



Obr. 10 MRC Flextray s rozloženým krytováním, připraveno k používání [11]

3.3.4 DGI MORI Robo2Go

Dalším zástupcem mobilních konceptů je systém AVO od DGI MORI. Zásobník obrobků s integrovaným robotem podává ze skloněné palety polotovary do obráběcího centra. Obrobky vrací zpět na paletu. Po obrobení všech polotovarů obsluha vymění paletu hotových kusů za paletu neobrobených, kterou mezitím připraví. Jde o AVO systém s přetržitou funkcí. Tento postup prodlužuje nevýrobní časy, a snižuje tak produktivitu nevyužitím obráběcího stroje. Výhodou je ale jednoduchost a vyšší kapacita zásobníku. Firma DGI MORI nabízí tento systém pro svá obráběcí centra řad CTX a CLX. [13]

K dispozici jsou tři varianty:

- Robo2Go 10 kg: max. hmotnost obrobku 5 kg, max. rozměry obrobku 100x250 mm
- Robo2Go 20 kg: max. hmotnost obrobku 12 kg, max. rozměry obrobku 135x250 mm
- Robo2Go 35 kg: max. hmotnost obrobku 22 kg, max. rozměry obrobku 175x250 mm



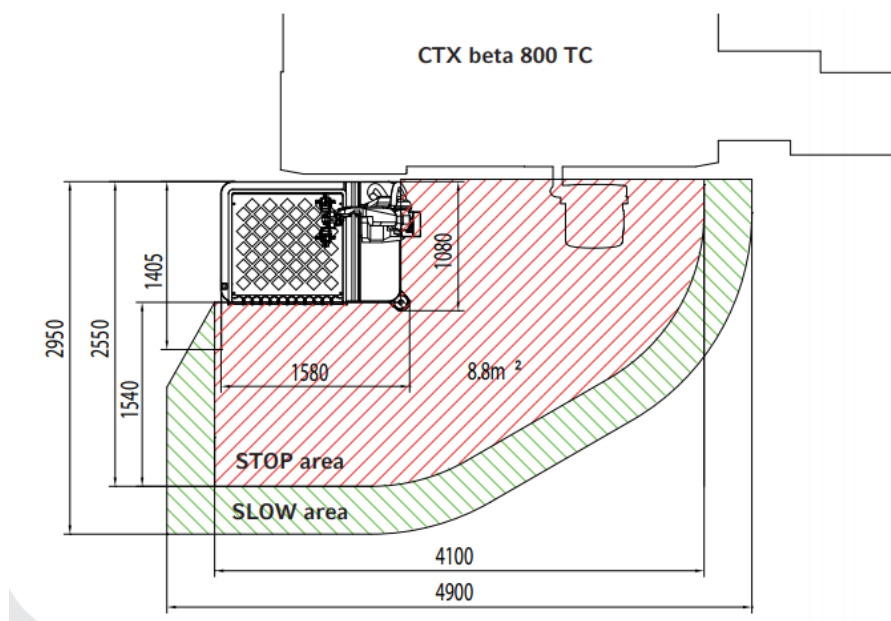
Obr. 11 Vlevo zásobník DGI MORI, vpravo obráběcí stroj CTX 2500 | 700 [13]



Obr. 12 Pohled na paletu s polotovary a obrobky spolu s dvojitou úchopnou hlavicí [13]

System je vybaven optickým čidlem zajišťující bezpečnost, které respektuje tři stavy (jednotlivé zóny znázorňuje Obr. 13):

1. Obsluha se nenalézá v nebezpečné zóně a systém funguje normálně, manipulátor se pohybuje nastavenou rychlostí.
2. Obsluha se nachází v tzv. pomalé oblasti (slow area) – manipulátor zpomalí, ale dále koná svou práci.
3. Obsluha je v zóně stop (stop area) – AVO systém se pozastaví. Po opuštění této zóny začne systém znovu fungovat ve zpomaleném režimu.



Obr. 13 Schéma půdorysu DGI MORI Robo2Go a okolí, které je hlídáno optickým čidlem [13]

Řídicí software robotu s názvem CELOS umožňuje jednoduché programování pozic zásobníku. Pozice zásobníku jsou dány stejně jako u předchozích systémů plechovou šablonou, do které s malou vůlí zapadají polotovary.

3.3.5 AWR – Load & Go DC

Systém Load & Go, model DC od firmy Automation within Reach (AWR) je jednoduchý, mobilní systém AVO pro CNC výrobní zařízení. Vhodné řešení pro malé až středně velké série výrobků o malé hmotnosti. Toto řešení je podobné DGI MORI Robo2Go. Nabízí také jednoduché ovládání a programování počtu obrobků, jejich pozice a počet používaných šuplíků, stejným způsobem je vyřešena i bezpečnost (optické čidlo, hlídající prostor před zásobníkem na straně robotu. [14]

Strategie používání zařízení: Obsluha z druhé strany (za přepážkou, kde nestojí robot) naskladní polotovary do palet. Po naskladnění je zasune do stroje, paleta je takto připravena a robot si ji může vysunout na druhé straně, kde vkládá polotovary do výrobního stroje. Po zpracování všech polotovarů výrobním zařízením robot paletu zasune do zásobníku a je dán signál obsluze, která pouze vyskladní obrobky a znovu naskladní polotovary. Takto může tato automatizovaná buňka fungovat v nepřetržitém provozu (za předpokladu, že obsluha manuálně naskladní a vyskladní nepoužívané palety během chodu automatizace).



Obr. 14 Load & Go DC od firmy AWR, mobilní AVO systém [14]

Tab. 1 Technické údaje, Load & Go DC [14]

Průměr polotovaru	12-120 mm
Délka polotovaru	25-175 mm
Množství polotovarů (jeden šuplík)	23 ks
Výška x Šířka x Hloubka	2300 x 700 x 1200 mm
Hmotnost zařízení	907 kg
Požadavek na napájení	240 V / 20 A / 60 Hz
Minimální tlak pneumatické přípojky	SI (5,5 bar)

Zásobník Load & Go DC je nabízen se třemi různými verzemi robotů Fanuc, lišící se jejich nosností.

- Fanuc M-10iA /12 (nosnost robotu 12 kg)
- Fanuc M-20iA /20 (nosnost robotu 20 kg)
- Fanuc M-20iA /35 (nosnost robotu 35 kg)

3.3.6 AWR - Load & Go RC

Typ zásobníku RC od firmy AWR je do velké míry shodný s výše uvedeným modelem DC. Nabízí však místo posuvných palet rotační desku, která se v případě potřeby otočí o 180° okolo své osy, aby se vystřídaly polotovary s obrobky. Obsluha naskladňuje polotovary a vyskladňuje obrobky, robot na druhé straně může ve stejnou dobu vkládat polotovary do výrobního zařízení a vykládat z něj hotové obrobky. Robot zde vrací předměty na stejné místo, odkud je bere. Půlkruhová deska je skloněná pro přesnější orientaci obrobků, které se tímto způsobem vždy sesunou dolů a opřou se pokaždé stejně. Je tak jasně definována poloha předmětu. Nevýhodou oproti paletové verzi DC je menší kapacita při stejně velké zástavbě. [15]



Obr. 15 Load & Go RC od firmy AWR, mobilní AVO systém [15]

Tab. 2 Technické údaje, Load & Go RC [15]

Průměr polotovaru	12-120 mm
Délka polotovaru	25-275 mm
Množství polotovarů pro šablonu 25 mm*	163 ks
Množství polotovarů pro šablonu 50 mm*	73 ks
Množství polotovarů pro šablonu 75 mm*	36 ks
Množství polotovarů pro šablonu 100 mm*	21 ks
Množství polotovarů pro šablonu 125 mm*	14 ks
Výška x Šířka x Hloubka	1950 x 1450 x 1500 mm
Hmotnost zařízení	907 kg
Požadavek na napájení	240 V / 20 A / 60 Hz
Minimální tlak pneumatické přípojky	80 PSI (5,5 bar)

3.4 Výběr optimální varianty koncepce AVO

Cílem zmapování dostupných mobilních konceptů AVO bylo nalezení takového konceptu či konceptů, které nejvíce odpovídají požadavkům malosériové výroby. Tyto existující koncepty či jejich prvky pak sloužily jako inspirace při tvorbě vlastní konstrukční varianty splňující kritéria dle zadání práce.

Kritéria pro volbu optimální varianty koncepce zásobníku pro AVO systém byla zvolena následovně:

- Kapacita zásobníku
- Potenciální cena
- Velikost zástavby
- Mechanická složitost
- Přístup obsluhy do výrobního stroje se zásobníkem
- Přístup obsluhy k zásobníku

Dále byla zvolena váha kritérií dle jejich důležitosti. Všechny varianty mobilních konceptů AVO byly obodovány a byla vytvořena rozhodovací tabulka (Tab. 3). Na základě nejvyššího dosaženého počtu bodů byly vybrány tři optimální varianty, které sloužily jako inspirace při tvorbě vlastní konstrukční varianty.

Tab. 3 Rozhodovací tabulka – výběr optimální varianty koncepce AVO

	Kritéria						Celkem bodů (po vážení)
	Kapacita zásobníku	Potenciální cena	Velikost zástavby	Mechanická složitost	Přístup do stroje	Přístup k zásobníku	
<i>váha kritéria</i>	<i>0,7</i>	<i>1</i>	<i>0,5</i>	<i>0,8</i>	<i>0,4</i>	<i>0,6</i>	
RoboJob Turn-Assist 200 VA	4	8	7	8	9	9	29,7
Agile Flex	8	6	8	6	8	10	29,6
Flextray MRC	8	7	9	7	8	8	30,7
DGI MORI Robo2Go	6	7	7	6	8	8	27,5
Load & Go DC - AWR	8	7	8	7	8	8	30,2
Load & Go RC - AWR	6	8	5	6	5	6	25,1
RoboJob Turn-Assist 200 VB	5	6	5	6	7	5	22,6
RoboJob Racks Medium	10	5	6	9	5	9	29,6

Výsledkem je výběr tří konceptů mobilní AVO:

- *RoboJob Turn-Assist 200 VA*
- *Flextray MRC*
- *Load & Go DC – AWR*

3.5 Shrnutí řešerše

AVO systém tvoří tři hlavní součásti: výrobní stroj, manipulátor a zásobník polotovarů. Dle uspořádání součástí lze rozdělit koncepty do tří skupin – mobilní, statické a gantry.

První součástí AVO systému je **výrobní stroj**. Výrobní stroj je obvykle prvkem, který je daný, a který ovlivňuje volbu manipulátoru se zásobníkem. Z provedeného průzkumu plyne, že mobilní zásobníky s manipulátory jsou vhodné pro menší výrobní stroje s automatickými dveřmi. Důležitými rozměry výrobních strojů pro návrh zásobníku a manipulátoru jsou: výška stolu od podlahy a vzdálenost středu stolu od automatických dveří stroje, tyto rozměry diktují požadavky na dosah manipulátoru. Detailně je výběr konkrétních výrobních strojů, pro které je AVO systém určen, uveden v kapitole 4.2.1.

Co se týče **manipulátorů** pro mobilní koncepce systémů AVO, nejčastěji je používán šestiosý angulární robot o nosnosti 12 až 35 kg. Statické a gantry koncepce používají roboty nebo kartézské manipulátory o vyšší nosnosti až 125 Kg. Žádný výrobce nepoužívá roboty typu SCARA, který je v práci použit. Detailně je volba manipulátoru popsána v kapitole 4.3.1.

Poslední částí AVO systému je **zásobník** polotovarů. Momentálním trendem je použití několika palet pro zajištění nepřetržitého provozu AVO, dále také moderní rozhraní HMI pro zjednodušení práce operátorů. A v neposlední řadě je stále kladen větší důraz na skladnost celého automatizačního zařízení. Roboty již také nejsou umístěny pouze za drátěným plotem, ale objevují se i varianty krytí s plexiskly, ta umožňují lepší výhled do pracovního prostoru robotu.

Typ zásobníku pro malosériovou výrobu

Jak vyplývá z provedené řešerše, pro vytvoření flexibilního mobilního systému AVO pro malosériovou výrobu není potřeba velký zásobník, protože buď jde o složitou vyráběnou součást, nebo jde o výrobu jednoduché součásti ve velice malých sériích. Složitá součást vyžaduje dlouhý čas obrábění, tudíž není potřeba taková kapacita. V případě výroby jednoduché součásti ve velice malých sériích je pak požadována jednoduchá přestavitelnost i programování manipulátoru.

Ideálním stupněm automatizace pro systém AVO charakteru malosériové výroby je AVO systém s nepřetržitým provozem bez automatické přípravy palet (stupně automatizace pro automatickou výměnu obrobku jsou podrobněji popsány výše). Jde o řešení, kdy jsou náklady vyváženy užitnou hodnotou zařízení právě pro menší výrobce.

Z výsledku výběru optimální varianty zásobníku v kapitole 4.4 plyne, že v praktické části bude zpracována konstrukce inspirovaná koncepty AVO systému MRC Flextray, *RoboJob Turn-Assist 200 VA* a konceptem *Load & Go DC – AWR*.

4 Vlastní řešení

Obsahem kapitoly je vlastní řešení práce, kde jsou zpracovány dílčí úkoly.

Zadáním práce jsou dány následující parametry navrhovaného systému AVO:

- Hmotnost polotovaru 6 kg
- Maximální výška upínaného polotovaru 100 mm
- Maximální zástavbové rozměry (šířka x výška x hloubka): 1500x2000x1500 mm
- Čas výměny obrobku 40 sekund

Dalšími uvažovanými kritérii při vlastním návrhu byly cenová dostupnost pro malosériové výrobce a jednoduchost obsluhy.

Vlastní řešení, tj. návrh vlastního systému AVO pro malosériovou výrobu, zahrnovalo tyto činnosti:

- Volba výrobního stroje
 - výběr vhodného typu obráběcího stroje;
 - volba tvaru, materiálu a rozměrů polotovaru;
 - volba způsobu upínání polotovaru na stůl výrobního stroje
- Návrh manipulátoru
 - výběr vhodného typu manipulátoru na základě potřebné velikosti a nosnosti;
 - volba typu a počtu úchopných hlavíc a jejich prstů;
 - kontrola momentu setrvačnosti hlavice s polotovarem
- Návrh zásobníku – **vlastní konstrukční řešení**
 - návrh tří variant konceptu zásobníku
 - detailní konstrukční zpracování vybrané varianty

4.1 Návrh konceptu AVO

Vlastní návrh komponent systému automatické výměny obrobku pro malosériovou výrobu je založen na konceptu MRC Flextray, který byl vybrán jako optimální výchozí varianta (viz kap. 3.4). Při tvorbě konceptu se se vycházelo i z dalších vybraných variant.

Pro splnění zadaných parametrů je třeba správně volit veškeré komponenty celého systému AVO. Za tímto účelem byl pro každou z komponent (výrobní stroj, manipulátor, zásobník) proveden rozsáhlý průzkum, na kterém jsou založena vybraná řešení jednotlivých součástí.

4.2 Výrobní stroj a polotovar

V prvé řadě je třeba určit, pro který výrobní obráběcí stroj bude vytvořený systém automatizace určen. Výběr vhodného typu obráběcího stroje byl proveden na základě vhodnosti AVO a hmotnosti polotovaru. V zadání je dána hmotnost polotovaru 6 kg, což již předem určuje, že se jedná o automatizaci výrobního stroje o malé velikosti. S ohledem na vybraný stroj byl následně zvolen tvar, materiál a rozměry polotovaru a zvolen způsob upínání polotovaru na stůl výrobního stroje.

4.2.1 Typ výrobního stroje

Prvotní výběr typu výrobního stroje byl proveden na základě toho, pro jaký druh třískového obrábění je systém automatizace nejvýhodnější. Níže je uvedena Tab. 4 s vyhodnocením výhodnosti automatizace různých třískových obráběcích procesů. Automatizace výměny obrobků se v této oblasti uplatňuje stále častěji a sahá téměř do všech druhů třískových operací.

Tab. 4 Výhodnost automatizace pro jednotlivé druhy třískového obrábění

Druhy třískového obrábění	Výhodnost automatizace výměny obrobku
Soustružení	Výhodné, AVO implementováno často přímo do stroje
Frézování	Výhodné, Externí AVO systémy
Vrtání	Výhodnost AVO diskutabilní
Hoblování	Nevýhodné, hoblování trvá dlouhou dobu
Obrážení	Výhodnost AVO diskutabilní
Broušení	Výhodnost AVO diskutabilní
Lapování	Nevýhodné, lapování trvá dlouhou dobu
Honování	Nevýhodné, honování trvá dlouhou dobu

Soustruh a soustružnická centra pracují nejčastěji s válcovými polotovary, systém automatizace je zde vyřešen automatickým podáváním tyčového materiálu kruhového průřezu skrz vřeteno, které má danou průchodnost. Po obrobení se obrobek od polotovarové tyče oddělí a spadne do připravené nádoby, kde se stohuje. Obdobné struktury pracoviště pro obrábění uvádí např. Talácko [1] či Adamec [2]. Tento systém automatizace výměny obrobků je často vyřešen samotným výrobcem a bývá součástí stroje. Tudíž zde není takový potenciál pro externí řešení AVO, které by si uživatel stroje musel pořizovat. Pohyby pro zakládání a vyjímání jsou jednodušší díky symetrii polotovaru, který se zakládá přímo do osy vřetene. [2]

Větší uplatnění systémů výměny obrobků lze spatřovat u **frézovacích strojů a multifunkčních strojů**. Zde je potřeba umisťovat polotovar na stůl stroje, kde se upne do svěráku, opracuje a zase vyjme. Pro automatizaci výroby je tedy nutné provádět všechny tyto úkony automaticky. Na základě provedeného průzkumu bylo zjištěno, že pro větší složitost tuto problematiku řeší většinou přímo výrobci automatizačních systémů, někdy také výrobce stroje (např. DMG MORI a jejich zásobník Robo2Go). Nicméně na trhu je stále prostor pro výrobce AVO systémů pro **malé frézovací stroje**, kde jsou konkurenční systémy pro malosériovou výrobu příliš nákladné z důvodu použití velkých šestiosých angulárních robotů, anebo jsou tyto systémy určeny pouze pro rotačně symetrické polotovary.

Nejvýhodnější je použití AVO pro operaci frézování. Výsledný systém AVO bude určen pro frézovací stroje. Podle současných trendů se snaží výrobci automatizace automatizovat právě frézovací stroje a multifunkční obráběcí centra. Na trhu ale stále chybí flexibilní mobilní AVO systémy pro malé výrobce.

4.2.2 Specifikace polotovaru

Tvar polotovaru je určen s ohledem na stroj, který bude polotovar obrábět. Jde tedy o malý nebo středně velký frézovací nebo multifunkční stroj (viz výše). Jelikož nejsou frézovací stroje vhodné pro obrábění rotačně symetrických polotovarů, nejčastěji je polotovarem **kvádr**. Pro jednu z navrhovaných variant upínání polotovarů na paletu zásobníku (viz kap. 4.4.2) byl zvolen jako alternativní tvar plochý polotovar.

Je vhodné zvolit takovou velikost a materiál polotovaru, který je používán ve výrobě co nejčastěji, aby měl systém automatizace zakládání takového polotovaru do stroje co nejvyšší užití v praxi. Nejčastěji používaným materiálem malých výrobců jsou slitiny

hliníku. Mezi výrobky ze slitin hliníku patří tělesa pro hydraulické, pneumatické komponenty, víka převodovek, díly skříňového typu, redukce, šablony a další podobné díly. V malosériové výrobě se navíc nevyplatí vyrábět formu pro vstřikovací lis, levnější je v tomto případě obrábění, a tím je portfolio výroby rozšířeno. Je tedy uvažován materiál **hliník**.

Z hlediska velikosti platí, že čím větší polotovary, tím méně se vyplatí použití automatizace, protože velké díly se obrábí dlouhý čas. Navíc nejsou standardně upínány a při jejich manipulaci je nutno dbát zvýšených bezpečnostních rizik.

Dle zadání práce byla omezena výška polotovaru (100 mm). Ostatní rozměry byly zvoleny s ohledem na dodržení maximální hmotnosti 6 kg, pro výsledný model zásobníku byl uvažován polotovar o velikosti 100x100x100 mm pro polotovar typu kvádr, a o velikosti 180x100x10 mm pro plochý polotovar.

4.2.3 Upínání polotovaru na stůl výrobního stroje

Polotovar je potřeba automaticky upnout na stůl obráběcího stroje. Nejpoužívanějším typem jsou pneumatické a hydraulické strojní svěráky s automatickou činností. Na základě provedeného průzkumu byla vybrána varianta pneumatického svěráku, protože zdroj tlakového vzduchu obsahuje samotný výrobní stroj a pneumatické systémy nejsou limitovány místem použití z důvodu hygieny. Dalším důvodem použití pneumatického svěráku je fakt, že pro sevření kvádrů z hliníkových slitin není potřeba velká síla, protože na polotovar nepůsobí tak velké řezné síly, jako při obrábění jiných materiálů s větší pevností, navíc by hrozila deformace polotovaru při obrábění, a tím pádem i vzniku geometrických nepřesností. Pneumatický svěrák byl zvolen na základě rešerše upínacích zařízení pro frézovací stroje.

Zvolenou variantou automatického strojního svěráku je samostředící automatický pneumatický svěrák **SCHUNK KSP plus 250-BWM**. Svěrák má zdvih na jednu čelist 5 mm a maximální svěrná síla při tlaku 6 bar je 55 kN. Opakovatelná přesnost je 0,03 mm. Maximální výška čelistí je 70 mm a hmotnost svěráku 34,5 kg. [16]



Obr. 16 Automatický pneumatický samostředící svěrák SCHUNK KSP plus 250-BWM [16]

Druhou variantou strojního automatického pneumatického svěráku je **VMC-6P**, maximální rozevření 160 mm, šířka čelistí 160 mm, hmotnost 50 kg. Doba otevření/uzavření je 1,5 s, upínací síla 0-6000 kg/cm², rychlé a snadné ovládání. Dno svěráku a vodící plochy jsou kalené. (cena 34 050 Kč, bez DPH).

První varianta se samostředícím svěrákem je použita v návrhu a v modelu. Tento systém upínání je vhodný pro součásti tvaru kvádrů s až třemi obrobitelnými plochami, jež se upínají mezi čelisti za dvě navzájem rovnoběžné plochy. Pro obrobení pěti stran polotovaru je nutné přeupnutí. Manipulátor může svou poslední osou otočit polotovár podle osy Z. Následná eliminace nepřesnosti ustavení obrobku ve svěráku je řešená pomocí dotykové sondy (v nástrojovém držáku). Ta přesně zjistí, kde se obrobek nachází, a tak je možné dále přesně obrábět.



Obr. 17 Ukázka obrobků, pro něž je navrhovaný systém automatizace vhodný [17] [18]

4.2.4 Shrnutí volby výrobního stroje a polotovaru

Tabulka níže shrnuje parametry výrobního stroje a polotovaru pro navrhovaný systém AVO:

Tab. 5 Shrnutí volby výrobního stroje a polotovaru

Typ výrobního stroje	malé frézovací stroje
Tvar polotovaru	kvádr
Hmotnost polotovaru	max. 6 kg
Materiál polotovaru	hliník
Upínání polotovaru na stůl výrobního stroje	pneumatický svěrák

4.3 Manipulátor

Dále je potřeba podle hmotnosti polotovaru zvolit vhodný typ manipulátoru a jeho příslušenství, jako je úchopná hlavice, prsty a rychloupínací adaptér. Po výběru všech těles byla vypočtena potřebná nosnost manipulátoru a proveden výpočet momentu setrvačnosti poslední pohybové osy manipulátoru. Nakonec byl na základě vícekritériálního rozhodování zvolen konkrétní model robotu pro konstrukční návrh.

4.3.1 Typ manipulátoru

Velikost potřebného manipulátoru je určena dvěma parametry: dosahem a nosností manipulátoru. Potřebný dosah byl stanoven na základě průzkumu rozměrů obráběcích strojů (viz tabulka níže). Výška stolu od podlahy se pohybuje od 800 do 1020 mm a vzdálenost ode dveří stroje po střed stolu, kam se bude polotovar upínat z důvodu nejlepších užitných vlastností stroje, je v rozmezí od 350 po 750 mm. Výška stolu dává nepřímo požadavek na zdvih manipulátoru v ose „Z“ (ve svislé ose), pokud není paleta zásobníku ve stejné rovině jako stůl obráběcího stroje. Vzdálenost ode dveří výrobního stroje po střed stolu udává požadavek na dosah manipulátoru v „XY“ rovině, tzn. délku ramen manipulátoru. Pro vyhovění co nejvíce výrobním strojům, a tím pro maximalizování univerzality řešení, byly zvoleny následující hodnoty. Návrh řešení AVO je optimalizován pro stroje s výškou stolu od 650 mm do 900 mm a vzdáleností ode dveří po střed stolu do 700 mm. Různou výšku stolů výrobních strojů lze kompenzovat zdvihem manipulátoru v ose „Z“ nebo zvýšením či snížením základny, na které manipulátor stojí. To se ale již týká konstrukce zásobníku. Pro verze obráběcích strojů se stolem vyšším než 900 mm by bylo vhodné vyrábět druhou variantu zásobníku s delšími stojkami rámu např. o 200 mm.

Tab. 6 Rozměry frézovacích strojů – výška stolu a vzdálenost středu stolu od dveří stroje

Frézovací stroj/obráběcí centrum s vodorovným stolem	Výška stolu stroje od podlahy [mm]	Vzdálenost středu stolu od dveří [mm]
Kovosvit MCV 800	810	350
Kovosvit MCV 2220	1257	773
MAZAK	-	-
OKUMA millac 44V	850	cca 600
OKUMA millac 44H	1035	cca 600
HAAS	-	-
DMG MORI	-	-
PRIMERO KM80	800	cca 450
PRIMERO KM120	900	cca 450
DOOSAN	-	-
Eumach HSM-600	850	cca 500
Eumach HSM-800	810	cca 500
Eumach VMC-1100	895	cca 600
Tongtai EZ-SERIES	850	cca 500
Tongtai VTX SERIES	850	cca 500
Tongtai VP-8	900	cca 600
Tongtai VP-10	900	cca 600
Tongtai TMV-510A	920	cca 450
Tongtai TMV-720A	900	cca 500
Tongtai TMV-920A	900	cca 550
Tongtai TMV-1350A	950	cca 550
Tongtai TMV-1500A	950	cca 600
Tongtai VC-610	900	cca 550
Tongtai QVM-610All	950	cca 500
Extron	-	-
DMG DMC 60 U hi-dyn	1015	cca 600
DMG DMC 80 U hi-dyn	1015	cca 600
DMG DMC 125 U hi-dyn	1105	cca 600
DMG DMU 60 T	815,5	cca 800
DMG DMU 80 T	889,5	cca 800
DMG DMU 100 T	889,5	cca 800
EMAG VSC 200 TRIO	1020	-
Matsura LX-1	900	550
CMX 50 U	-	650
CMX 70 U	-	750

Pozn.: Proškrtnuté buňky – údaje nebyly nalezeny v katalogu výrobce
 cca = přibližné hodnoty získané nepřímým měřením

Kartézské manipulátory pro tento typ použití nejsou vhodné, mají veliké zástavbové rozměry a nenabízí požadovanou flexibilitu. Stejně tak roboty s paralelní kinematickou strukturou.¹ Jak vyplývá z provedeného průzkumu, nejvhodnějším řešením jsou víceosé roboty.

Angulární robot se šesti stupni volnosti je velice kompaktní a flexibilní součást AVO systému. Jedná se v současné době o nejrozšířenější průmyslový robot [1]. Avšak oproti SCARA robotům jsou až dvakrát dražší (při stejné nosnosti) a komplikovanější pro programování, které je v malosériové výrobě častěji potřeba, protože se tvary dílů a jejich rozmístění v zásobníku častěji mění.

SCARA roboty vynikají vysokou dynamikou, vysokou rychlostí manipulace s malými a lehkými objekty (cca 200 g). Z provedené rešerše je známo, že se vyrábějí i SCARA roboty s nosností až 20 kg a dosahu v rovině XY až 1200 mm. Tento typ robotu je schopen při nižší pořizovací ceně zastat stejnou práci jako šestiosý angulární robot v případě AVO v malém či středně velkém frézovacím stroji. Výhodami SCARA robotů jsou: nižší hmotnost, jednodušší programování a vyšší přesnost polohování.

Šestiosé angulární roboty se v AVO vyplácejí hlavně pro svoji univerzálnost použití, možnost naklápění a natáčení polotovaru a vyšší nosnost oproti SCARA robotům. Nicméně pro řešení AVO systému pro malosériovou výrobu malých obrobků tyto výhody nepřevažují nad nevýhodami, a proto je pozornost dále soustředěna na **SCARA roboty**.

V rámci provedeného průzkumu robotů a jejich příslušenství byl zpracován i přehled výrobců (viz tabulka níže). Z příslušných katalogů pak byly čerpány technické informace.

Tab. 7 Výrobci SCARA robotů

Významní výrobci angulárních šestiosých robotů a příslušenství	Fanuc, Destaco, Festo, Bara, Robotiq, Parker, Tuenkers, SAS-automation, ATI, Staubli, ABB, Schunk, Yaskawa, Toshiba
Výrobci SCARA robotů	Denso, Epson, Stäubli, Toshiba, Mitsubishi, Omron, Janome, Yaskawa, Fanuc, Yamaha, ABB, KUKA, Nachi-Fojikoshi, IAI Scara, Topstar, Adtech, HIWIN

¹ Popis jednotlivých typů manipulátorů uvádí např. Andrlík [4] či Talácko [1].

Při návrhu manipulátoru je dále nutno určit typ a počet úchopných hlavice a jejich prsty, a na základě toho pak vypočítat požadovanou nosnost manipulátoru. Dále je potřeba provést kontrolu momentu setrvačnosti hlavice s polotovarem.

4.3.2 Úchopná hlavice

Hmotnost polotovaru je max. 6,0 kg. Tato hodnota určuje nosnost (velikost) úchopné hlavice. Úchopná hlavice byla vybrána na základě průzkumu dostupných možností, kdy hlavními požadavky pro výběr byly:

- Vysoká opakovaná úspěšnost uchopení předmětu
- Minimalizace hmotnosti a rozměrů
- Přesnost uchopení a upuštění
- Vysoká rychlost sevření
- Vysoká síla sevření
- Univerzálnost čelistí
- Vysoká spolehlivost mechanismu
- Nízká cena

Zvoleným požadavkům nejvíce vyhovuje hlavice **SCHUNK PGN-plus-P 100-2**.

Jedná se o pneumatickou paralelní úchopnou hlavici se dvěma prsty vhodnou pro uchopování objektů za dvě navzájem rovnoběžné plochy. Zdvih jedné čelisti je roven 5 mm. **Doporučená hmotnost břemene je max. 8,75 kg** (při jmenovitém tlaku 6 bar a délce prstů 30 mm), hmotnost samotné úchopné hlavice je 0,9 kg. Úchopná hlavice bude vybavena magnetickými snímači polohy otevření / zavření čelistí hlavice.



Obr. 18 Úchopná hlavice Schunk PGN plus-P 100-2 (bez prstů a adaptérů) [16]

Počet úchopných hlavíc

Některé koncepce AVO používají dvě úchopné hlavice pro zkrácení doby zakládání a vykládání tím, že se ušetří jedna „cesta“ do zásobníku. Robot nejprve vyloží obrobek ze stroje, ale hned poté může zakládat polotovar, který má připravený v druhé úchopné hlavici.

Zatímco robot s pouze jednou hlavicí musí nejprve vyložit obrobek, umístit ho do zásobníku, vzít ze zásobníku nový polotovar a umístit ho do výrobního stroje.

Vhledem k tomu, že obrábění polotovaru trvá v řádu desítek minut a samotná manipulace s polotovarem je krátká, dvě chapadla pro zkrácení nevýrobního času nemají velký význam, navíc by snižovala robotu užitečnou nosnost a zvyšovala pořizovací cenu celého systému AVO. V případě, že by celkový čas pracovního cyklu přesahoval stanovenou hodnotu ze zadání práce, bylo by nutné uvažovat o přidání druhé úchopné hlavice.

Prsty robotu

Prsty jsou vyrobeny z hliníkové slitiny a jejich maximální délka je určena úchopnou hlavicí, délka prstu je katalogem omezena na max. 135 mm (šířka 20 mm, hloubka 40 mm), hmotnost jednoho prstu je tedy max. 0,3 kg, dohromady 0,6 kg, protože je úchopná hlavice dvouprstá. Firma Schunk dodává prsty jako polotovar k obrobení, protože finální tvar prstu je dán tvarem součásti, kterou uchopuje.



Obr. 19 Prst chapadla Schunk [16]

4.3.3 Rychloupínací adaptér

Pro rychlou manuální výměnu úchopné hlavice je vhodné zařadit do řetězce rychloupínací adaptér. Při změně výroby se rychlou výměnou úchopné hlavice zkrátí nevýrobní čas, protože bude dopředu připravena nová, s např. jinou šířkou úchopu prstů

a jinou délkou prstů. Před spuštěním jiné výroby se tedy vymění pouze minulé používaná hlavice za novou připravenou.

K úchopné hlavici PGN-plus 100-2 je vhodným rychloupínacím adaptérem **HWA-040-000-000 / HWK** od firmy Schunk. Tento adaptér má dohromady hmotnost 0,18 kg (část pro připevnění na robota HWK plus část pro úchopnou hlavici HWA). Doporučená nosnost adaptéru je max. 8,0 kg, a splňuje tak kladené požadavky (břemeno, úchopná hlavice, prsty).



Obr. 20 Rychloupínací adaptér pro manuální výměnu úchopných hlavic, typ Schunk HWA-040-000-000 / HWK [16]

4.3.4 Nosnost manipulátoru

Požadovaná nosnost manipulátoru je dána součtem všech hmotností těles, které robot musí nést. Do požadované nosnosti vybraného robotu je kromě hmotnosti polotovaru potřeba zahrnout hmotnost úchopné hlavice s jejími prsty (případně adaptéry k prsům), hmotnost rychloupínacího mechanismu pro manuální výměnu hlavice a hmotnost redukce mezi tímto rychloupínacím adaptérem a zakončením na poslední ose SCARA robotu, tj. s opracovaným koncem kuličkového šroubu. Hmotnost adaptéru k robotu je 0,15 kg.

Tab. 8 Výpočet požadované nosnosti robotu

Výpočet požadované nosnosti robotu			
hmotnost redukce	m_{red}	0,15	kg
hmotnost adaptéru pro výměnu HWA	m_{adpA}	0,06	kg
hmotnost adaptéru pro výměnu HWK	m_{adpK}	0,12	kg
hmotnost úchopné hlavice	m_{uh}	0,90	kg
hmotnost prstů s adaptérem	m_{amp}	0,60	kg
hmotnost polotovaru	m_{pol}	6,00	kg
hmotnost celkem (pož. nosnost robotu)	m_{prob}	7,83	kg

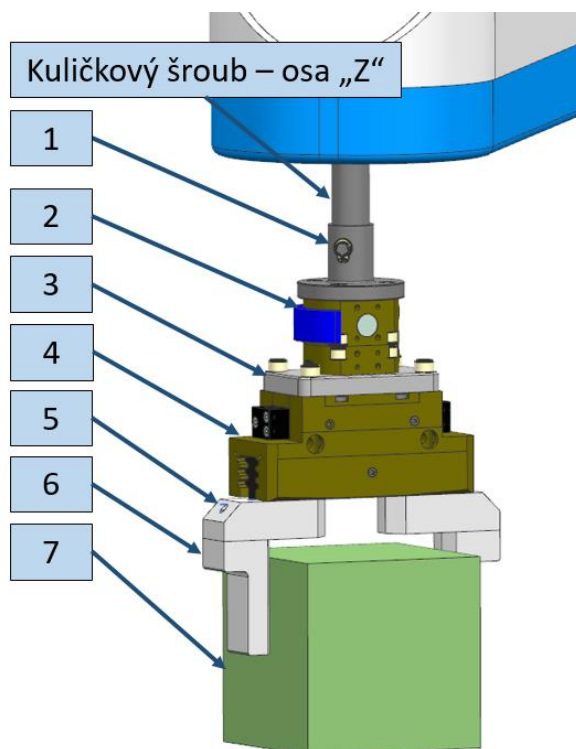
Požadovaná nosnost robotu pro manipulaci s 6 kg polotovarem je tedy **7,83 kg**.

4.3.5 Moment setrvačnosti poslední osy robotu

Při návrhu robotu je důležité kontrolovat, zda není přesáhnout dovolený moment setrvačnosti poslední pohybové osy (podle osy „Z“). Tato hodnota je uvedena v katalogovém listu a pro roboty nosnosti 6 až 20 kg se pohybuje v rozmezí od 0,063 až 1,05 kgm².

Výpočet momentu setrvačnosti poslední pohybové osy se skládá z momentů setrvačnosti jednotlivých těles:

- 1) Rotačně symetrický adaptér k robotu (válec)
- 2) Rychloupínací adaptér HWA+HWK (válec)
- 3) Redukce mezi rychloupínacím adaptérem a úchopnou hlavici (kvádr)
- 4) Úchopná hlavice (kvádr)
- 5) Hliníkový adaptér k prstům (kvádr)
- 6) Hliníkové prsty úchopné hlavice (kvádr)
- 7) Polotovar (kvádr)



Obr. 21 Schéma pro výpočet momentů setrvačnosti jednotlivých těles

Tab. 9 Výpočet momentu setrvačnosti těles k ose „z“ - vstupní a výstupní hodnoty

1. Válec – Redukce u KŠ			
hmotnost válce	m_{rKS}	0,15	kg
moment setrvačnosti redukce ke KŠ	J_{rKS}	0,00005	kgm ²
2. Válec – Rychloupínání			
průměr válce	D_v	50	mm
poloměr	r_v	25	mm
hmotnost rychloupínače	m_{ru}	0,18	kg
moment setrvačnosti rychloupínače	J_{ru}	0,00011	kgm ²
3. Kvádr – Redukce mezi HWK a úchopnou hlavici			
délka strany kváдру	a	50	mm
šířka kváдру	b	81	mm
výška kváдру	c	10	mm
hmotnost redukce	m_{red}	0,10	kg
moment setrvačnosti redukce	J_{red}	0,00006	kgm ²
4. Kvádr – úchopná hlavice			
délka strany kváдру	a	55	mm
šířka kváдру	b	120	mm
výška kváдру	c	50	mm
hmotnost úchopné hlavice	m_{uh}	0,9	kg
moment setrvačnosti úchopné hlavice	J_{uh}	0,00127	kgm ²

5. Kvádr – adaptér k prstu			
délka strany kvádrů	a	20	mm
šířka kvádrů	b	100	mm
výška kvádrů	c	20	mm
vyosení těžiště od osy „Z“	e	95	mm
hustota hliníku	ρ_{Al}	2700	kg/m ³
hmotnost adaptéru k prstu	m_{ap}	0,108	kg
moment setrvačnosti adaptéru	J_{ap}	0,00107	kgm ²
počet celkem	n_{ap}	2	ks
6. Kvádr – prst (maximální velikost)			
délka strany kvádrů	a	135	mm
šířka kvádrů	b	20	mm
výška kvádrů	c	40	mm
vyosení těžiště od osy „Z“	e	95	mm
hustota hliníku	ρ_{Al}	2700	kg/m ³
hmotnost válce	m_p	0,292	kg
moment setrvačnosti prstu	J_p	0,00268	kgm ²
počet celkem	n_p	2	ks
7. Kvádr – polotovar			
délka strany kvádrů	a	100	mm
šířka kvádrů	b	150	mm
výška kvádrů	c	150	mm
hustota hliníku	ρ_{Al}	2700	kg/m ³
hmotnost nejtěžšího polotovaru	m_{pol}	6,075	kg
moment setrvačnosti polotovaru	J_{pol}	0,02278	kgm ²
celkový moment setrvačnosti	J_{cel}	0,03167	kgm²
maximální dovolený moment setrvačnosti	J_{dov}	0,25	kgm²

Celkový moment setrvačnosti J_{cel} je součet momentů setrvačnosti jednotlivých těles, ty byly vypočítány dle následujících vzorců. Schéma pro výpočet momentu setrvačnosti pro kvádr je znázorněn na Obr. 22. Moment setrvačnosti redukce ke kuličkovému šroubu byl zjištěn pomocí CAD modelu, pro jeho nepravidelný tvar. Moment setrvačnosti polotovaru velice závisí na rozprostření hmoty, pokud se bude jednat o díl skříňového typu, bude moment setrvačnosti vyšší. Pro výpočet byl uvažován hliníkový polotovar jednoduchého tvaru kvádrů o rozměrech 150x150x100 mm a hmotnosti 6 kg.

Moment setrvačnosti válce:

$$J = \frac{m' \cdot r^2}{2} \quad (1)$$

m' [kg] Hmotnost válce – těles tohoto tvaru

r_v [m] Poloměr válce

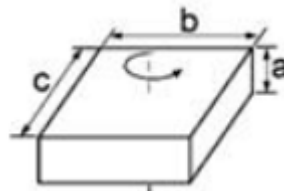
Moment setrvačnosti kvádrů:

$$J = \frac{m'}{12} \cdot (b^2 + c^2) \quad (2)$$

m' [kg] Hmotnost kvádrů – těles tohoto tvaru

b [m] Šířka kvádrů

c [m] Délka kvádrů



Obr. 22 Schéma pro výpočet momentu setrvačnosti pro kvádr [35]

Hodnota celkového momentu setrvačnosti komponent na koncové části robotu je **0,0317 kgm²**, a je tedy řádově menší než maximální dovolený moment setrvačnosti pro roboty nosnosti 6 až 20 kg (0,063 až 1,05 kgm², viz výše).² Lze tedy konstatovat, že všechny roboty, ze kterých je vybíráno, z tohoto hlediska vyhovují.

4.3.6 Výběr robotu pomocí vícekriteriálního rozhodování

Výběr konkrétního typu SCARA robotu proběhl dle vícekriteriálního rozhodování (viz Tab. 10). Byla zvolena jednotlivá kritéria a jejich váhy. Technické údaje byly rozškálovány do úrovně a k nim přiřazeny body pro hodnocení. Typ, který dosáhl nejvyššího bodového ohodnocení je vybrán pro konstruovaný AVO systém. V tabulce figurují pouze takové typy SCARA robotů, které splňují požadavek na dosah a nosnost. Všechny uvedené typy byly poptány a jejich cena je konkrétně známa, protože na nízkou cenu manipulátoru je kladena velká váha. Cena AVO systému je totiž více než z poloviny dána právě cenou manipulátoru.

² Čím je moment setrvačnosti menší, tím rychlejší mohou být pohyby robotu. U pohonů robotů jsou omezena zrychlení pohybových os dle toho, jak těžké břemeno je nesené.

Tab. 10 Výběr robotu pomocí vícekritériálního rozhodování

Kritérium	Dosah	Nosnost	Moment setřvačnosti	Cena	Hmotnost	Čas cyklu*	Přesnost	Hodnocení
	mm	kg	kgm ²	Kč	kg	s	± mm	<i>celkem</i>
Váha kritéria	1	1	0,5	3	1	0,5	0,5	-
Denso HM-4085 3	2	3	4	3	3	4	1	21,5
Denso HM-40A0 3	4	3	4	3	3	4	1	23,5
Epson G10	2	3	4	3	4	4	1	22,5
Stäubli TS2-80	1	2	1	4	5	3	6	25
Stäubli TS2-100	4	2	1	4	4	3	6	27
Stäubli TS80	1	2	1	4	3	3	6	23
Toshiba THL800	1	3	3	5	5	3	2	28
Toshiba THL900	2	3	3	5	5	3	2	29
Toshiba THL1000	4	3	3	5	5	3	2	31
Mitsubishi RH-12FH8535N-D1-S15	2	3	3	3	2	4	4	21,5
Mitsubishi RH-20FH10035N-D1-S15	4	4	6	3	1	4	4	25
OMRON e Cobra 800	1	1	4	3	4	1	3	19
Omron R6YXG800 XG SERIES	1	4	6	2	3	3	2	19,5
OMRON R6YXG900 XG SERIES	2	4	6	2	3	3	2	20,5
OMRON R6YXG1000 XG SERIES	4	4	6	1	3	3	2	19,5
JANOME JS880TH	2	4	3	2	2	3	1	17,5
JANOME JS1000TH	4	4	3	1	1	3	1	15,5
YASKAWA MYS 850L	2	3	4	1	4	3	1	16

Škálování kritérií pro výběr robotu vzniklo rozdělením intervalu nejmenší a nejvyšší hodnoty technického parametru. Je vytvořené tak, že čím je vyšší kvalita parametru, tím více bodů varianta získává.

Tab. 11 Škálování kritérií pro výběr robotu

body	Dosah [mm]	Nosnost [kg]	Mom. setr. [kgm ²]	Cena [tis Kč]	Hmotnost [kg]	Čas cyklu [s]	Přesnost [± mm]
1	800	7	0,1	800-700	80-70	0,7-0,6	0,025
2	850	8	0,15	700-600	70-60	0,6-0,5	0,02
3	900	10	0,2	600-500	60-50	0,5-0,4	0,0175
4	1000	20	0,25	500-400	50-40	0,4-0,3	0,015
5	1100	30	0,5	400-300	40-30	0,3-0,2	0,125
6	1200	40	1	300-200	30-20	0,2-0,1	0,1

Na základě vícekritériálního rozhodování byl vybrán robot Toshiba THL1000, který dosáhl nejvyššího bodového ohodnocení. Při konstrukci zásobníku bylo ale zjištěno, že jeho první rameno je příliš dlouhé a zbytečně by komplikovalo manipulaci, protože je nutné se vejít do obráběcího prostoru stroje. Následně byla tedy vybrána druhá varianta robotu Toshiba a to model **THL900**, který má první rameno o 100 mm kratší. Hlavní technické parametry robotu THL900 uvádí tabulka níže. Zdvih třetí osy „Z“ je standardně 300 nebo 450 mm. Na vyžádání může být ale libovolně velký.

Tab. 12 Hlavní technické parametry robotu THL900

Dosah:	900 mm
Nosnost:	10 kg
Dovolený moment setrvačnosti:	0,2 kgm ²
Přesnost:	± 0,02 mm
Hmotnost:	37 kg
Cena:	323 400 Kč (DDP)

Cena zahrnuje SCARA robot THL900, řídicí jednotku TS3000 a ovladač (teach pendant) TP3000. Oproti angulárním robotům stejného dosahu a nosnosti jde o poloviční cenu. Katalogový list robotu je umístěn v příloze diplomové práce jako Příloha 2.

4.3.7 Shrnutí návrhu manipulátoru

Tabulka níže shrnuje parametry zvoleného manipulátoru a jeho příslušenství:

Tab. 13 Shrnutí volby manipulátoru a příslušenství

Typ manipulátoru	SCARA robot
Konkrétní model manipulátoru	Toshiba THL9000
Úchopná hlavice	SCHUNK PGN-plus-P 100-2
Rychloupínací adaptér	Schunk HWA-040-000-000 / HWK

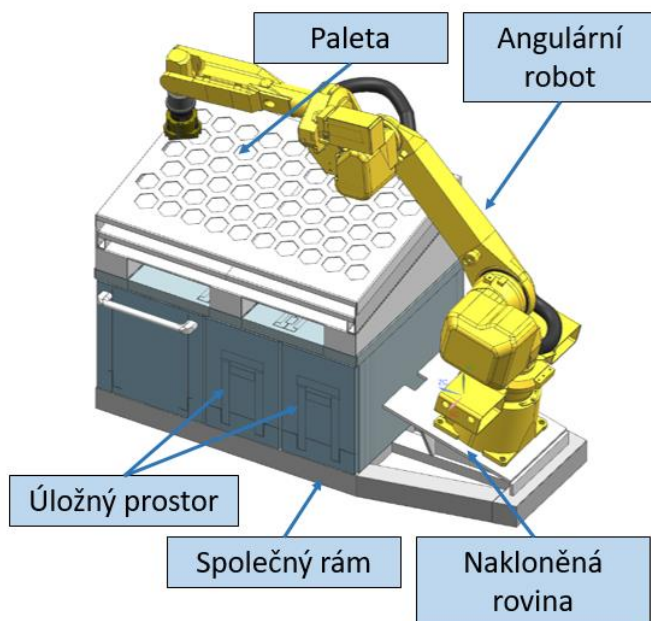
4.4 Zásobník – návrhy konstrukcí

Zásobník polotovarů je třetí důležitou součástí navrhovaného systému AVO a plní funkci malého skladu, kam je zapotřebí umístit polotovary. Polotovary budou založeny do výrobního stroje a vráceny zpět do zásobníku SCARA robotem. Výměnu obrobků za nové polotovary provádí operátor stroje.

Koncept zásobníku, který je konstrukčně zpracován, byl vybrán na základě vypracované rešerše. V prvním kroku byly vypracovány návrhy třech variant konceptu zásobníku, které vychází z vybraných vhodných existujících mobilních konceptů AVO (viz kap. 3.4). Varianty byly zpracovávány s ohledem na koncepci celého AVO pracoviště, jsou proto uvažovány ještě i varianty s angulárním robotem. Z navržených variant byla následně vybrána jedna varianta pro detailní konstrukční zpracování.

4.4.1 Varianta s robotem na nakloněné rovině

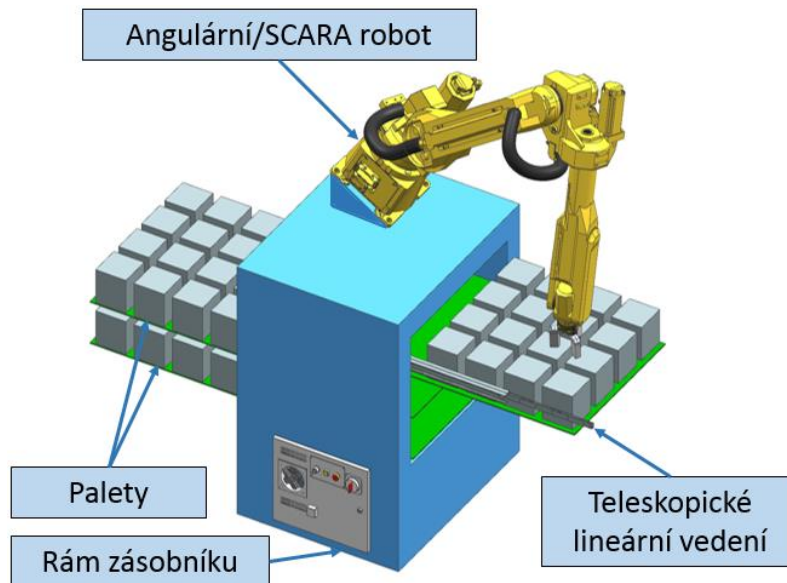
První varianta zásobníku obvykle využívá angulární šestiosý robot na nakloněné rovině. Robot je umístěn spolu s paletou na jedné základně. Robot je nakloněný kvůli tomu, aby se jeho ramena dokázala složit do pracovního prostoru výrobního stroje. Kvůli nutnosti použití angulárního robotu jde o příliš nákladné řešení pro malosériové výrobce, navíc není umožněn nepřerušovaný provoz AVO. Výhodou této koncepce je veliká kapacita palety, jednoznačná orientace polotovarů v šabloně a integrovaný úložný prostor pro příslušenství. Výměna polotovarů probíhá buď přímo vyskladněním palety kus po kusy obsluhou nebo se vymění celá nakloněná paleta (pomocí VZV) za novou, která je již obsluhou připravená. Systém AVO ale musí na dobu výměny polotovarů stát a nelze ho používat.



Obr. 23 Koncept AVO s nakloněnou plochou zásobníku a angulárním robotem

4.4.2 Varianta s výsuvnými paletami

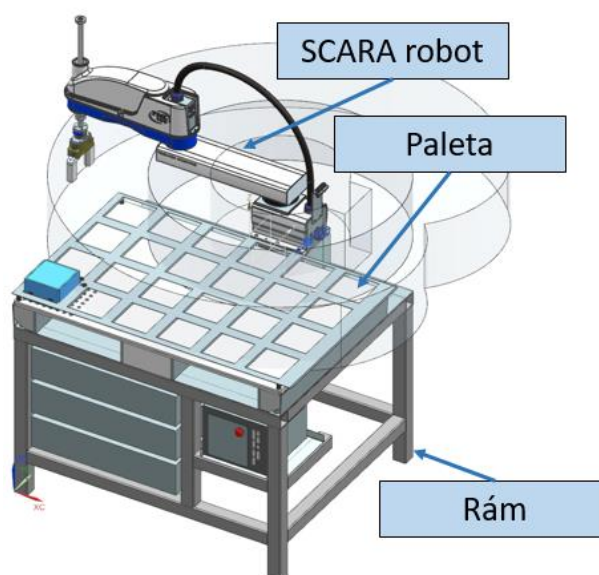
Druhá varianta se vyznačuje několika patry palet, která jsou teleskopicky vysouvána na obě strany zásobníku s buď angulárním nebo SCARA robotem (na obrázku 24 je použitý angulární robot). Koncept umožňuje nepřetržitý provoz, jde o nejskladnější zásobník, který efektivně využívá své zástavbové rozměry. Nevýhodou je nutnost řešení svěšování vysunutých palet, statické vyvážení zásobníku a vyšší pořizovací cena díky lineárním vedením a většímu množství použitých snímačů polohy.



Obr. 24 Koncept AVO systému s výsuvnými paletami

4.4.3 Varianta s vodorovnou paletou a SCARA robotem

Třetí varianta má jednoduchou konstrukci, SCARA robot umístěný vedle vodorovné palety na stranu k výrobnímu stroji, na společné základně. Nejjednodušší možný koncept mobilního AVO systému. Horní paleta je stejně jako v prvním případě vyměnitelná pomocí VZV, nebo lze vyměnit přímo obrobky za polotovary. Výhodou je nízká cena a jednoduchost zařízení. Nevýhodou je nemožnost nepřetržitého provozu a větší fyzická námaha při obsluhování tohoto systému.



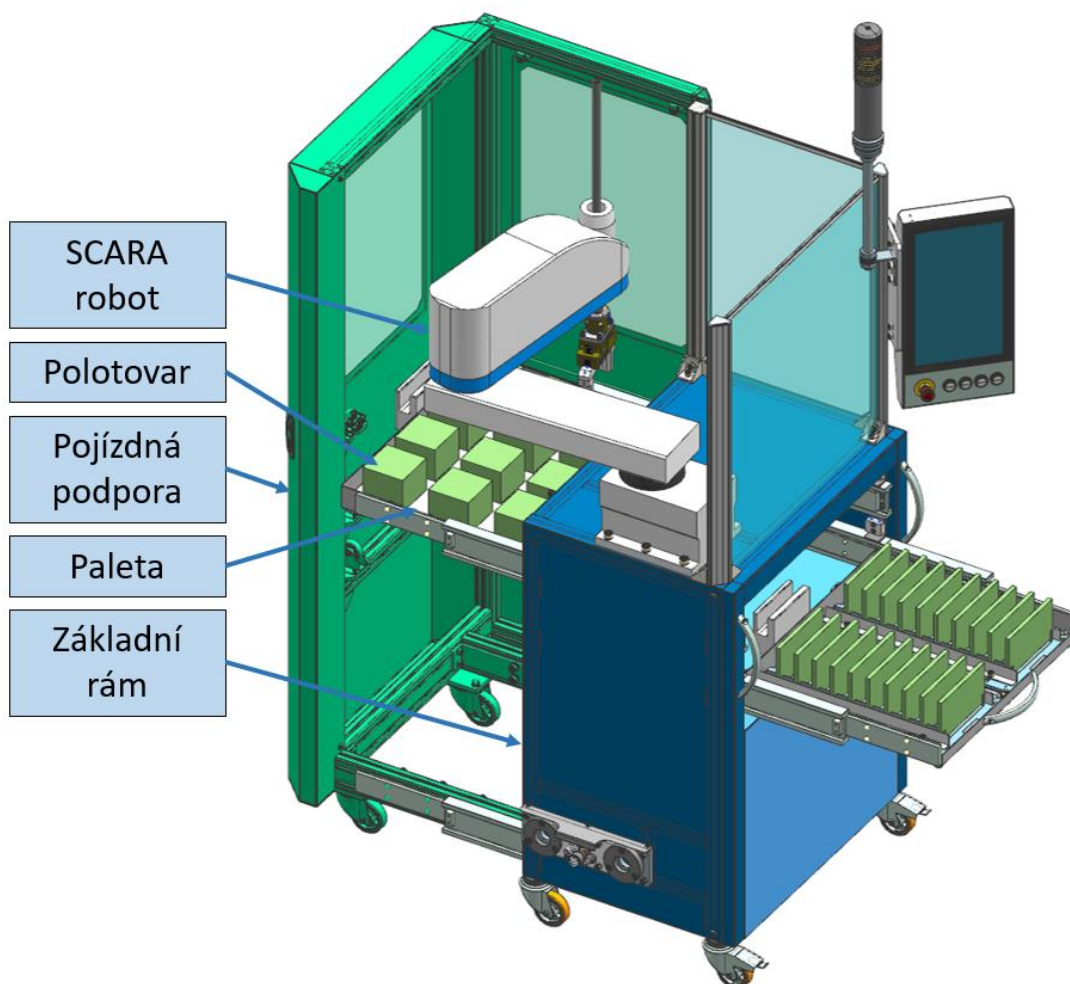
Obr. 25 Koncept zásobníku s vodorovnou paletou a SCARA robotem

Nejprve začala být konstrukčně zpracovávána varianta třetí s vodorovnou paletou a SCARA robotem, a to kvůli tomu, že jde o finančně nenáročné řešení konstrukce. Tato varianta však nespĺňuje vlastnost nepřetržitého provozu AVO. Ten sice není zadáním přímo vyžadován, ale velice zvyšuje komfort a zjednodušuje práci operátorovi systému. Právě jednoduchost používání systému je jedním z cílů této práce.

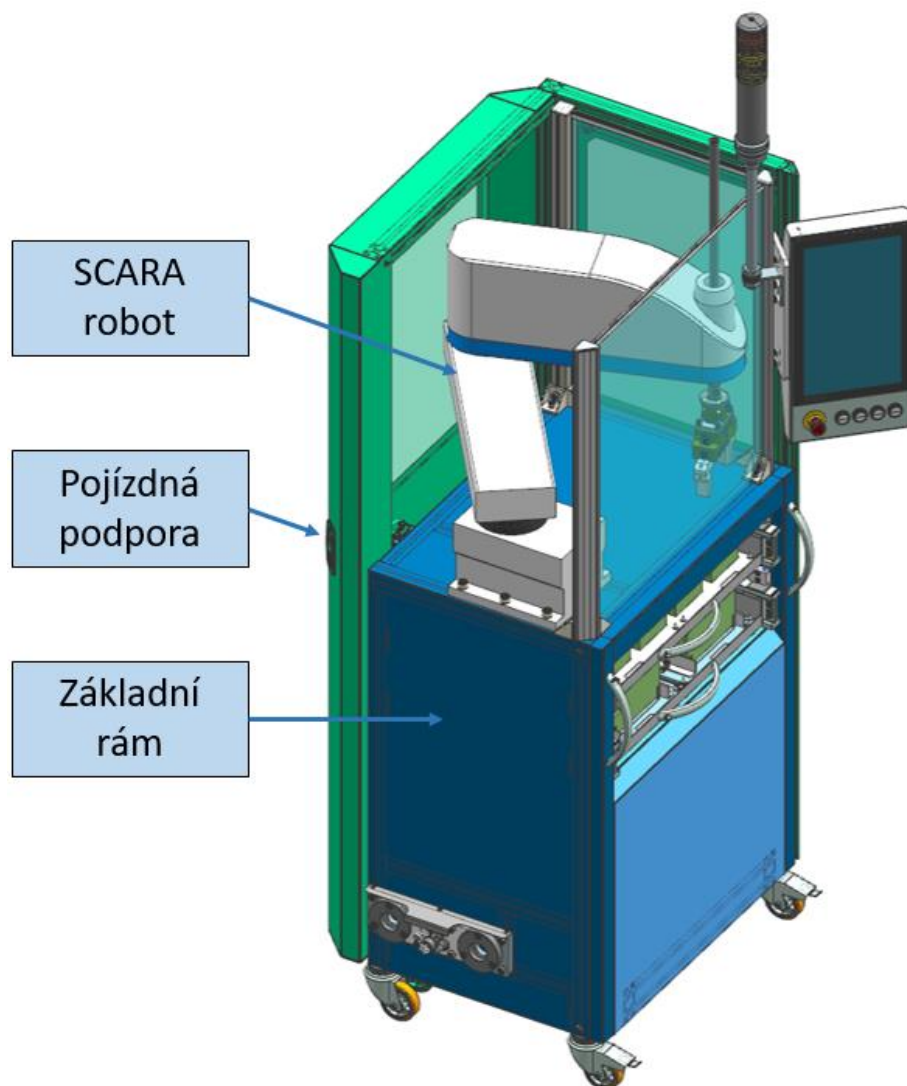
Detailně byla nakonec zpracována varianta druhá, tj. zásobník s výsuvnými paletami, byly pro ni navrženy všechny potřebné periferie. Jde o vyvážený koncept, který splňuje podmínky zadání práce.

4.5 Zásobník – konstrukce vybrané varianty

Zásobník je zkonstruován tak, aby byly splněny zadané vlastnosti AVO systému. Mobilita zásobníku je zaručena umístěním SCARA robotu na stejnou základnu, kde jsou umístěny také palety. Zásobník tvoří dvě hlavní části – rám zásobníku a pojízdná podpora. Pokud je pojízdná podpora vysunutá z rámu zásobníku, jde o transportní režim zásobníku (Obr. 27). Pokud je pojízdná podpora zasunutá do rámu, jde o pracovní režim (Obr. 26). Celá základna (na Obr. 26 a 27 modře označena) je opatřena pojízdnými koly s brzdou. Ze základny se kromě pojízdné podpory vysouvá i krytování pracovního prostoru robotu.



Obr. 26 AVO systém v pracovním režimu – pojízdná podpora (označena zeleně) vysunutá



Obr. 27 AVO systém v transportním režimu – pojízdná podpora (označena zeleně) zasunuta

4.5.1 Funkce

Navržený systém AVO je schopný fungovat nepřetržitě díky dvěma patřům palet, které mohou zaujímat tři různé polohy:

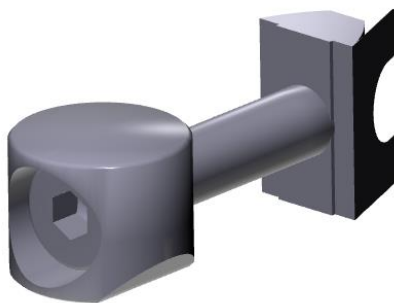
- 1) poloha u obsluhy
- 2) poloha v zásobníku
- 3) poloha u robotu

Nejprve je nutné vysunout ochranný kryt s podpěrami palet. Následně je dán signál pomocí HMI, že je možné spustit automatizaci. V prvním kroku robot uchopí madlo palety a vysune ji z polohy (2) do polohy u robotu (3). Během chodu automatizace je tedy jedna paleta v poloze (3) u robotu a jsou z ní odebírané polotovary. V momentě, kdy jsou

všechny polotovary obrobené a vložené zpět na paletu, je robot zasune zpět do pozice připraveno (2). Během chodu automatizace je možné paletu z druhého patra přesunout ručně z polohy (2) do polohy u obsluhy (1). Následně probíhá vyskladnění obrobených a naskladnění nových polotovarů. Tento proces provádí obsluha. Po dokončení naskladnění polotovarů je paleta opět ručně přesunuta do polohy v zásobníku (2) a je připravena pro nový cyklus AVO. Aretaci v jednotlivých polohách zajišťují aretační elementy. Podrobněji jsou popsány v textu níže.

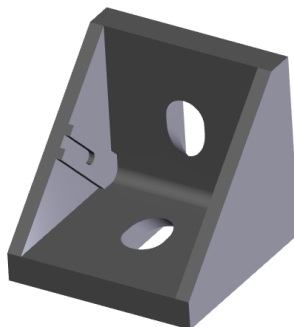
4.5.2 Rám

Konstrukce rámu zásobníku je tvořena hliníkovými profily Alutec KK s modulem 40 a drážkou velikosti 8. Použité rozměry průřezu profilu jsou 40x40 mm a ve spodní části rámu 80x40 mm. Drážka v profilech umožňuje použití matic M5, M6 a M8. Kolmé spoje profilů jsou řešeny pomocí spojky „šroub s válečkem“. Jde o šroub M8x40 v kombinaci s opěrným válcem zabudovaným do zahloubeného čela profilu.



Obr. 28 Alutec KK spojka pro kolmé spoje – šroub s válečkem 312040 [19]

Pro více namáhané kolmé spoje byl použit malý úhelník 40x40 mm, ten je připevněn k profilům celkem dvěma šrouby M8x16 s válcovou hlavou.



Obr. 29 Alutec KK spojka pro kolmé spoje – úhelník 40x40 mm 304040 [19]

4.5.3 Pojezd výsuvných palet

Palety je možno přesouvat do třech poloh díky použití teleskopických lineárních vedení s výsuvem na obě strany typ HGT080-0500 firmy Rollon. Řada HGT vedení je určena pro vysoké zatížení a oproti ostatním nabízeným řadám vyniká vyšší tuhostí. Vedení je opatřeno antikorozní úpravou. Výška vedení je 80 mm a délka výsuvu je 500 mm. Délka složeného vedení je v případě řady vedení HGT taktéž 500 mm. Únosnost jednoho páru v radiálním směru je 10 000 N. Maximální rychlost pojezdu vedení je 0,5 m/s. A dovolené zrychlení výsuvu vedení je 1,2 m/s².



Obr. 30 Teleskopické lineární vedení Rollon HGT080 [20]

Vedení jsou namontována na bocích ohraněného šestimilimetrového plechu s otvory s požadovanou roztečí. Teleskopická vedení mají nevýhodu, která znesnadňuje jejich aplikaci – svěšování volného konce. Svěšování při zatížení polotovary je nutno vyřešit, protože by jinak docházelo ke kolizi úchopné hlavice s polotovar, či šablonou. Hodnota svěšení ve svislé ose je 1 % z hodnoty maximálního zdvihu, v tomto konkrétním případě je hodnota svěšení rovna 5 mm při maximálním zatížení. V další části textu je popsáno řešení eliminaci svěšování vedení. Vedení je vybaveno systémem, aby se jednotlivé segmenty vysouvaly společně („driving disc“). Tato schopnost zjednodušuje řešení aretace palety, tím že stačí blokovat pouze jeden pohyblivý segment vedení.

Návrhový výpočet lineárního teleskopického vedení Rollon

Výpočet normálového zatížení P [N] lineárního vedení (jednoho páru)

$m_{pale} = 15,6$ kg Hmotnost nejtěžší verze palety bez polotovarů

$m_{pol} = 6,0$ kg Maximální hmotnost jednoho polotovaru

$n_{pol} = 12$ ks Maximální počet polotovarů na jednu paletu

$g = 9,81$ m/s² Gravitační konstanta

$$P = (m_{pale} + m_{pol} \cdot n) \cdot g = (15,6 + 6 \cdot 12) \cdot 9,81 = 860 \text{ N} \quad (3)$$

Výpočet minimální požadované únosnosti vedení C_{min} [N]

Paleta je zatěžována pouze v radiálním směru, v axiálním směru na lineární vedení nepůsobí žádné další síly.

$P = 860 \text{ N}$ Normálové zatížení jednoho páru vedení Rollon

$S = 3,5$ Koeficient bezpečnost (doporučeno 1 až 3,5)

$$C_{min} = P \cdot S = 860 \cdot 3,5 = 3010 \text{ N} \quad (4)$$



Obr. 31 Schéma zatížení vedení Rollon, pouze radiální zatížení (normálový směr působení zátěžné síly) [20]

Kontrolu únosnosti vedení, na kterém se vysouvá pojízdná podpora, není potřeba provádět. Její zatížení je minimální, protože je zásobník podepřen čtyřmi koly a pojízdná podpora dalšími dvěma koly.

Dále je v návrhu zásobníku použito ještě jedno menší lineární vedení pro podporu bočního krytování a snížení vibrací a hluku při roztahování pojízdné podpory. Krytování je tak tužší a lépe funguje. Typ zvoleného teleskopického vedení Rollon je LTF-44 – 0500.

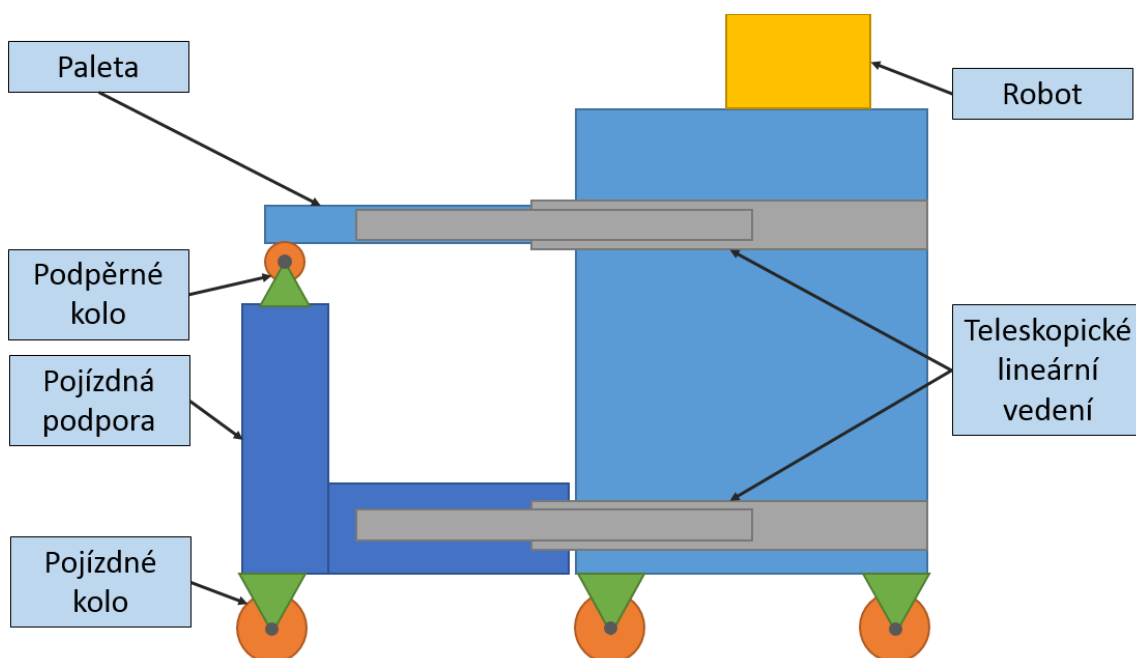


Obr. 32 Teleskopické lineární vedení Rollon typ LTF-44 [20]

Výška vedení je 44 mm a délka zdvihu 500 mm. Maximální zatížení na pár je 1296 N, maximální rychlost výsuvu je pouze 0,3 m/s. Toto vedení slouží pouze jako doplňkové pro eliminaci vzepření posuvného krytování. Jeho zatížení je minimální.

4.5.4 Systém podepření vysunuté palety

Svěšování je eliminováno podpěrnými koly, na které paleta najede těsně před dosažením maximálního zdvihu. Použití obyčejných rolen není vhodné, polyuretanový povrch kol snižuje hluk a vibrace při pohybu palety po podpěrných kolech. Svěšování palety v poloze u obsluhy funkčnosti nevádí, navíc tento nedostatek nahrazuje aretaci, protože pro překonání svěšení a navrácení palety zpět do polohy v zásobníku musí být vyvinuta určitá síla.

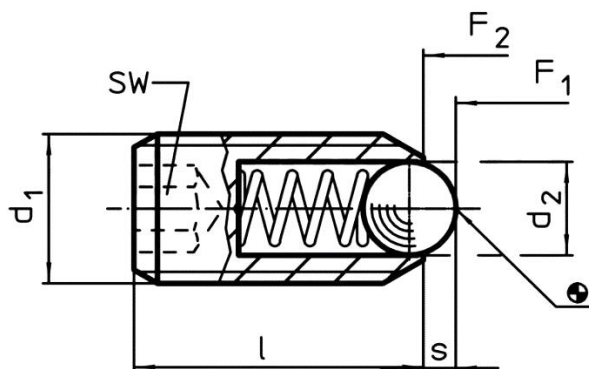


Obr. 33 Schéma podepření vysunuté palety pomocí podpěrného kola

4.5.5 Aretace pohyblivých komponent

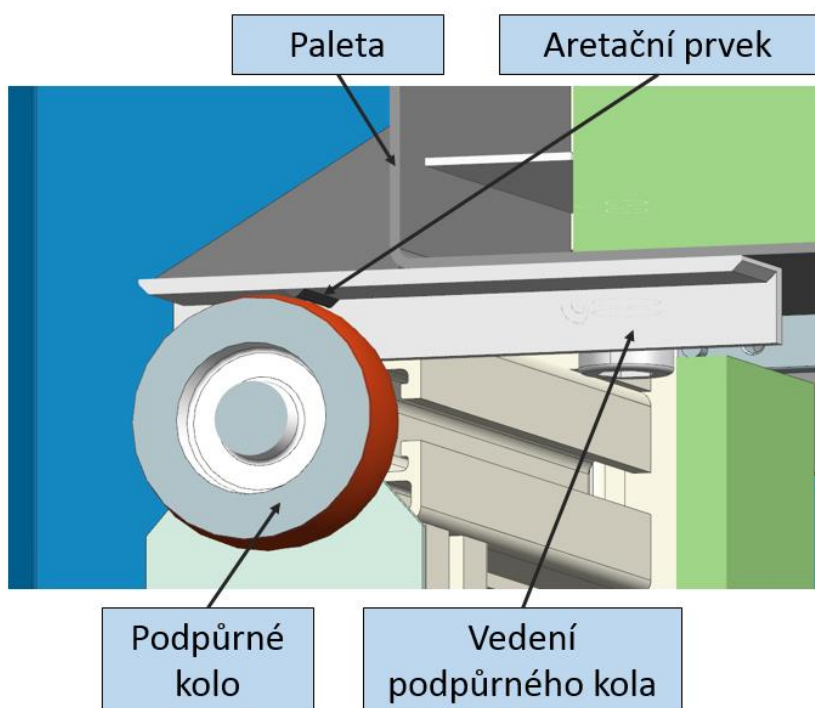
Vzhledem k tomu, že se palety pohybují ve třech polohách, je nutné zajistit paletu proti pohybu na daných místech. Aretace palety v poloze v zásobníku (2) je zajištěna dvěma odpruženými elementy Haberkorn. V pouzdru M8 je uložena pružina s kuličkou. Tato kulička zapadá v potřebném místě do otvoru aretační destičky, je namontována na segmentu teleskopického lineárního vedení. Aby byl znovu umožněn pohyb, tak je nutno překonat určitou sílu. Tím je vytvořena aretace polohy palety v zásobníku. Výpočet aretační síly je uveden níže, v kapitole 4.5.9. Aretační členy jsou umístěné v hliníkových

blocích s přípravou pro celkem čtyři aretační členy na jednu paletu. Aretační členy je možno v případě potřeby zvýšení aretační síly jednoduše doplnit a seřídít.



Obr. 34 Odpružený element Haberkorn [21]

Aretace polohy palety u robotu je zajištěna aretačním členem ve vedení pro opěrné kolo. Pro pohyb palety zpět do zásobníku je nutné překonat aretační prvek, což vyžaduje zvýšenou tažnou sílu. Aretace palety v poloze u obsluhy není potřeba, jak už bylo zmíněno výše.

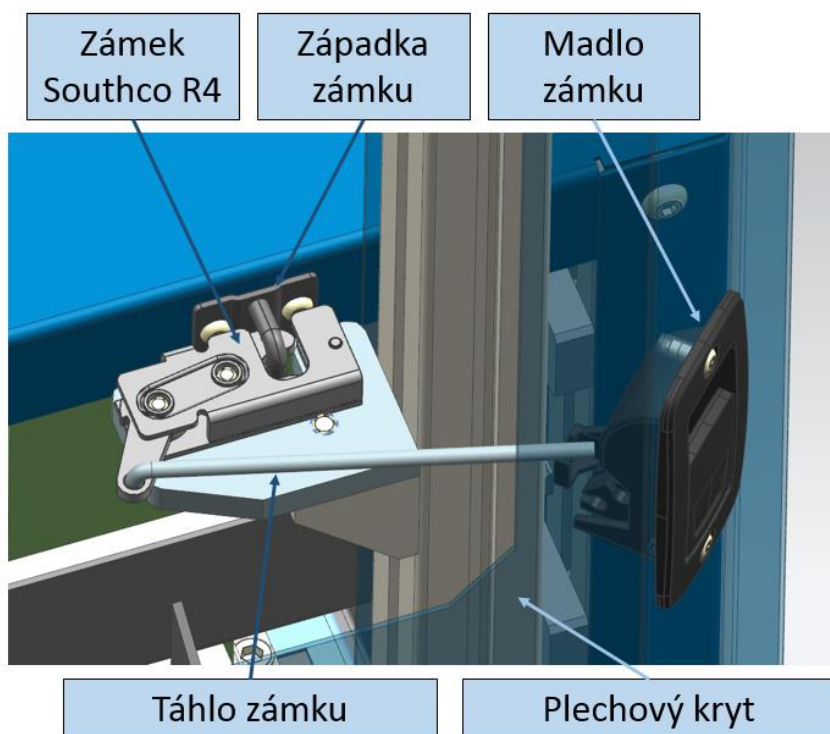


Obr. 35 Aretace palety v poloze u robotu – řez

Další pohybuující se součástí je pojízdná podpora s bočními kryty, na této podpoře jsou namontována opěrná kola a také indukční snímače polohy, které poskytují informaci

o tom, zda je paleta skutečně vysunutá až na doraz. Celá tato pojízdná podpora je výsuvná na stejných teleskopických vedeních, jako jsou použita pro výsuvné palety.

Zajištění této podpory v zasunutém stavu (přepravní režim) je uskutečněno rotačním zámkem Southco typu R4 v kombinaci se západkou. Tento typ zámku je velice podobný zámkům dveří automobilů, pomocí lanka je možno přes kliku odjišťovat západku.



Obr. 36 Aretace pojízdné podpory zámkem Southco

Konkrétně byl použit rotační zámek typ R4-10-12-501-10, jde o typ s jedním stupněm zajištění (zámků pro automobily mají dva stupně). Montován je k hliníkové nosné desce pomocí dvou šroubů M6x16. Páka otevírání zámku je spojena táhlem (AC-CAB1-3-0130-048) s černým plastovým madlem (AC-70-101-11). Táhlo je vybaveno pružinou, ta vrací páku madla do původní polohy „zavřeno“. CAD model táhla byl pouze zjednodušeně vymodelován, protože ho firma Southco neposkytuje.

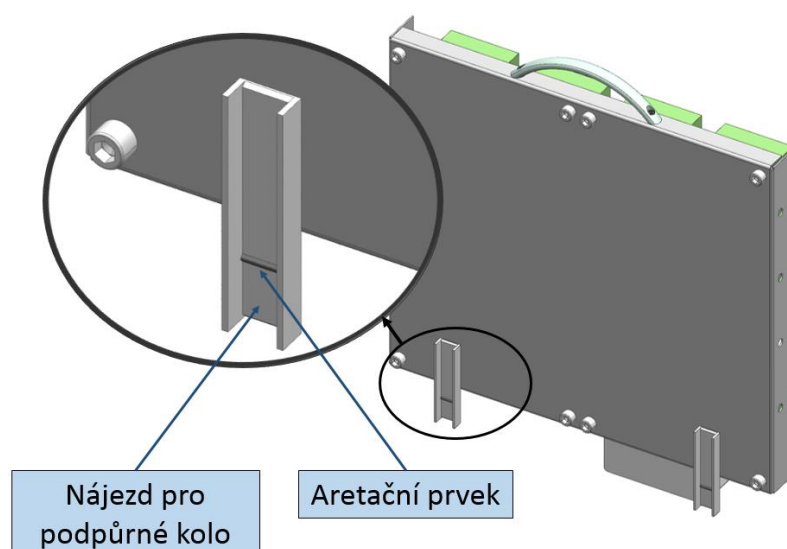


Obr. 37 Rotační zámek Southco R4

4.5.6 Posuvná paleta

Na paletě se skladují polotovary a jsou z ní odebírané robotem do výrobního stroje. Paleta je vysouvána na teleskopickém vedení namontovaném na bocích hlavního ohraňovaného plechu tloušťky 1,5 mm. Na straně k obsluze je namontováno obloukové madlo a na druhé madlo pro robota, za které si paletu z polohy v zásobníku přemístí do polohy u robota. V konstrukci jsou použity zápusťné nýťovací matice různých velikostí.

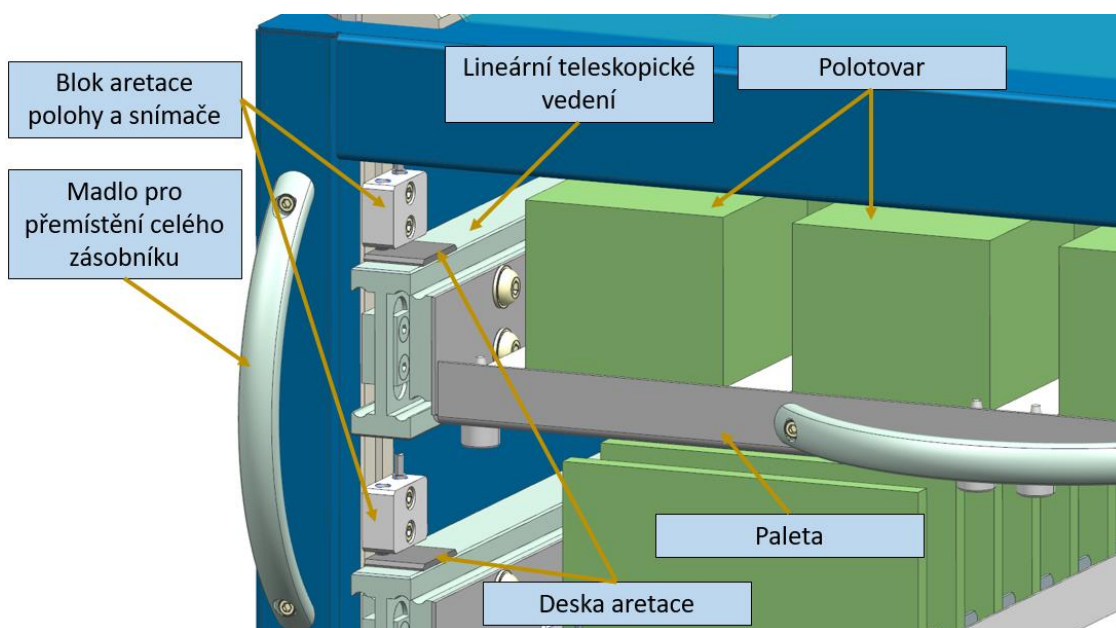
Dále je posuvná paleta vybavena dvěma nájezdy pro podpůrná kola, nájezdy jsou přivařené k základnímu plechu a podpořené žebrem, aby nedocházelo k průhybu na volném konci při podepírání palety kolem. Uvnitř nájezdu jsou navíc nalepené pásky z pryže pro aretaci polohy palety v poloze „u robota“. V poslední řadě jsou na paletě přišroubovány modifikované šrouby M12, které mají na konci dřívku kuželové zkosení s dosedací plochou. Slouží pro ustavení a připevnění různých typů upínacích způsobů.



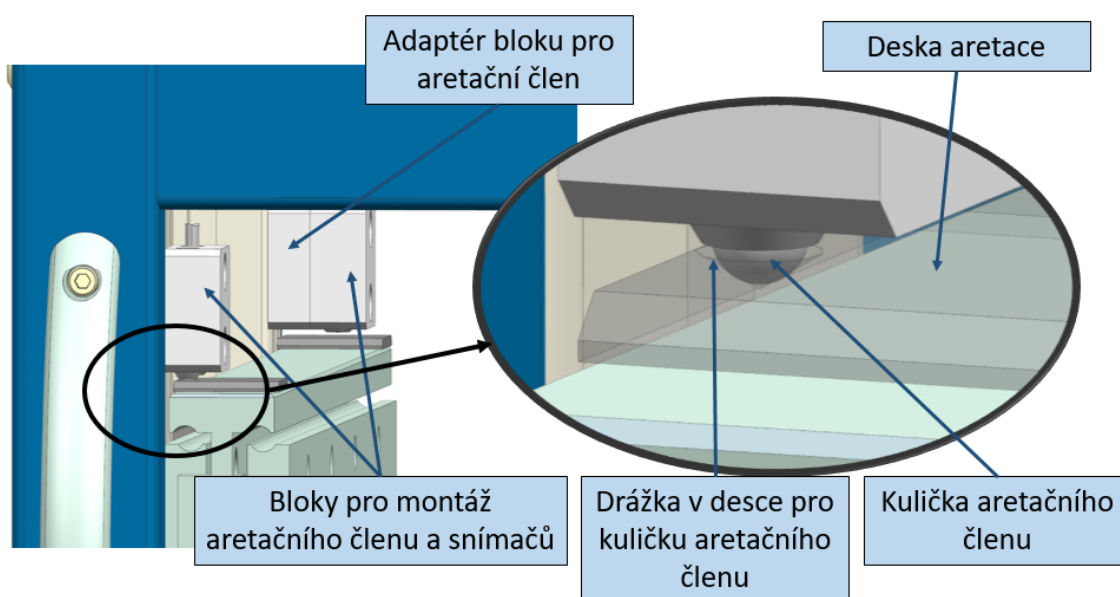
Obr. 38 Paleta s upínáním polotovarů pomocí plechové šablony – spodní strana, nájezd pro podpůrné kolo

4.5.7 Snímání polohy palet

Snímání polohy palety v poloze „v zásobníku“ je realizováno dvojicí indukčních snímačů v pouzdru se závitem M8 od výrobce OsiSense XS. Indukční snímač posílá signál v případě přiblížení kovového předmětu blíže jak 2,5 mm. Snímače jsou namontované ve stejných hliníkových blocích jako aretační členy Haberkorn, ale pouze po levé straně zásobníku. Snímače polohy stačí použít na rozdíl od aretačních členů pouze na jedné straně.

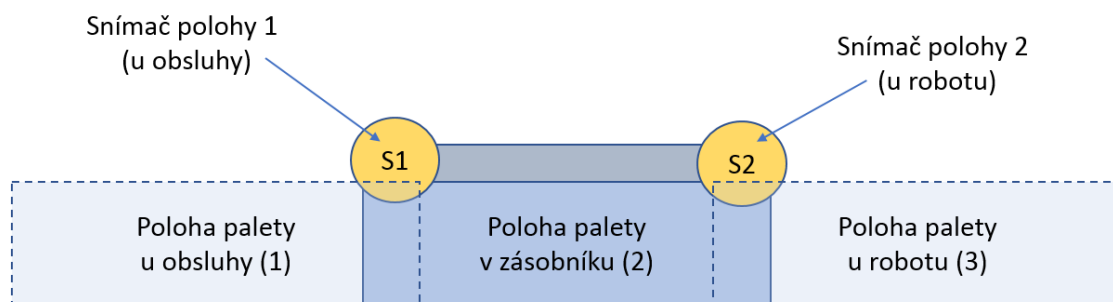


Obr. 39 Pohled na zásobník ze strany obsluhy, znázornění polohy bloků s aretačními členy a snímači polohy v levé části palety



Obr. 40 Umístění bloku, ve kterém je snímač polohy a aretační člen Haberkorn

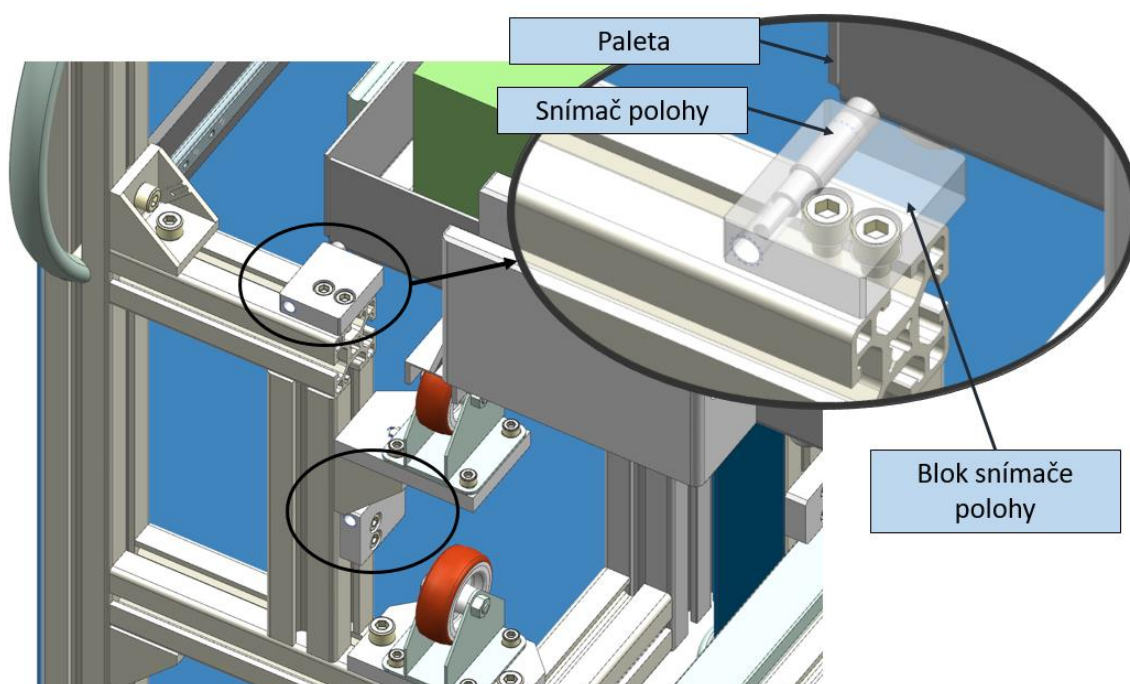
Poloha palety v zásobníku je indikována v případě, že oba snímače spínají signál. Pokud spíná pouze snímač 1 (na straně u obsluhy), tak je paleta vysunuta do polohy u obsluhy. A pokud spíná signál pouze snímač 2 (na straně u robotu), paleta je v poloze u robotu. Logika je vyřešena tak, že robot nesmí uchopit a posunout paletu z polohy v zásobníku, dokud stavu obou sepnutí snímačů nepředchází alespoň na 30 sekund stav, kdy je paleta umístěna u obsluhy – signál jde pouze ze snímače u obsluhy. Pokud nejde signál ani z jednoho snímače, nastává porucha a systém AVO se vypne.



Obr. 41 Schéma polohy palet a umístění dvou indukčních snímačů polohy v zásobníku

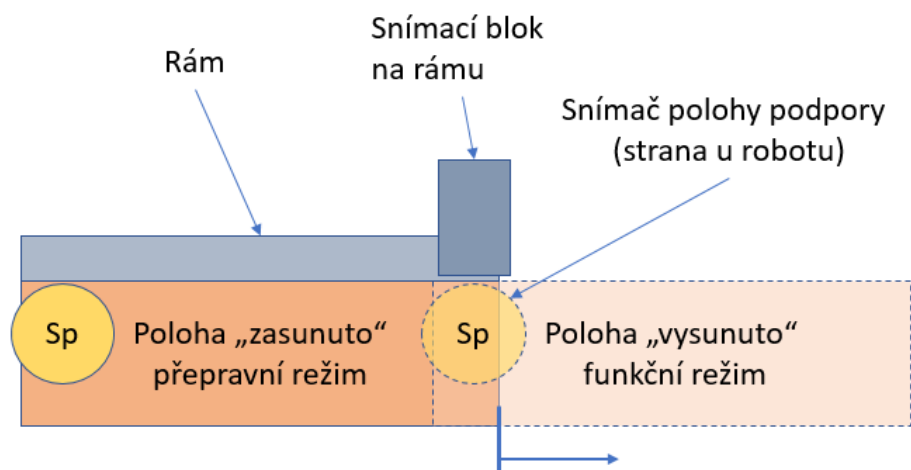
Dalším místem, kde jsou umístěné stejné snímače polohy, je koncový doraz palet při vysunutí na stranu u robotu. Robot přesune paletu do polohy u robotu a tato paleta indikuje stav vysunuto, protože je přiblížena ke snímači na dostatečnou vzdálenost (podpůrné kolo se nachází až za aretačním prvkem – aretace polohy u robotu). Pokud běží automatizace a přeruší se tento signál, nastává porucha a systém AVO se vypne.

Obě patra palet jsou osazena snímači nezávisle, je možné seřídít jejich polohu i po smontování konstrukce rámu, protože snímač polohy je opět namontován v samostatném hliníkovém bloku. Po nastavení poloh a odzkoušení systému je finální poloha pojištěna lepidlem.

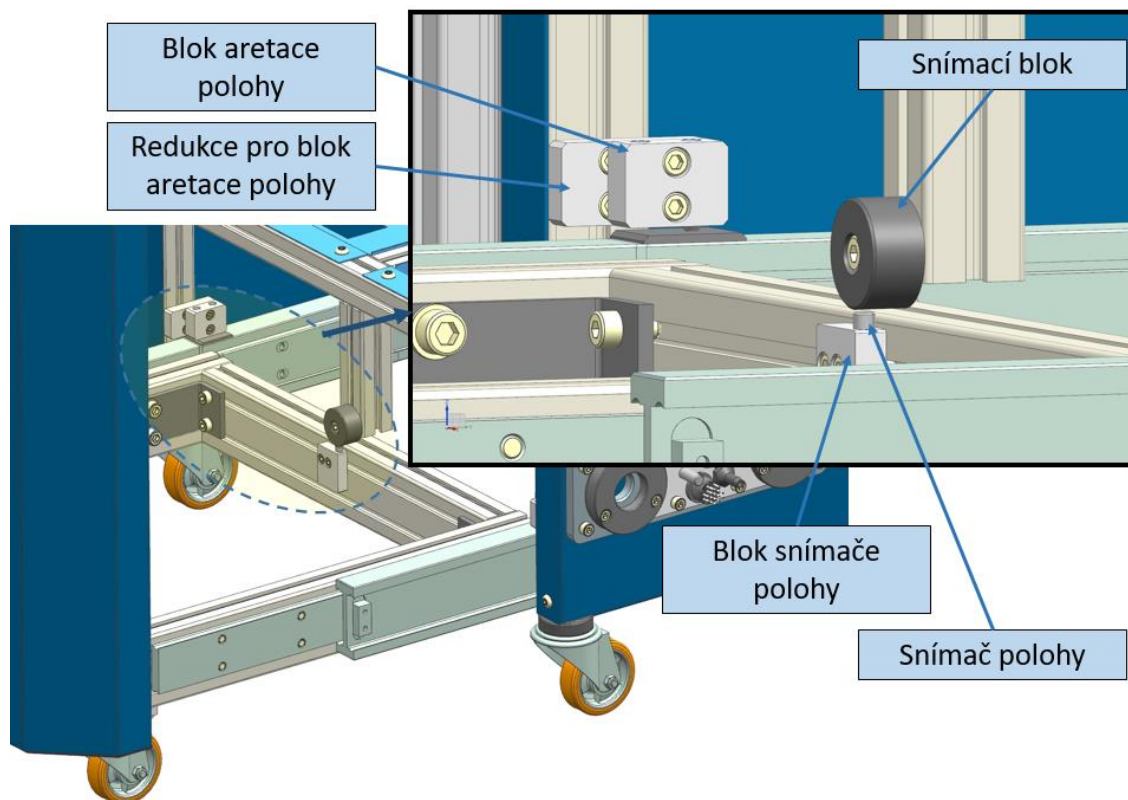


Obr. 42 Umístění obou snímačů koncového dorazu palet

V poslední řadě je potřeba indikovat stav vysunutí a zasunutí pojízdné podpory. Tento požadavek je vyřešen indukčním snímačem umístěným na vysouvací podpoře. Snímací blok, díky kterému snímač posílá signál, je umístěn na rámu. Pokud snímač neposílá signál, systém AVO nelze aktivovat a v případě že už běží, nastává porucha a AVO se zastaví.



Obr. 43 Znáznornění dvou poloh pojízdné podpory a umístění snímače polohy

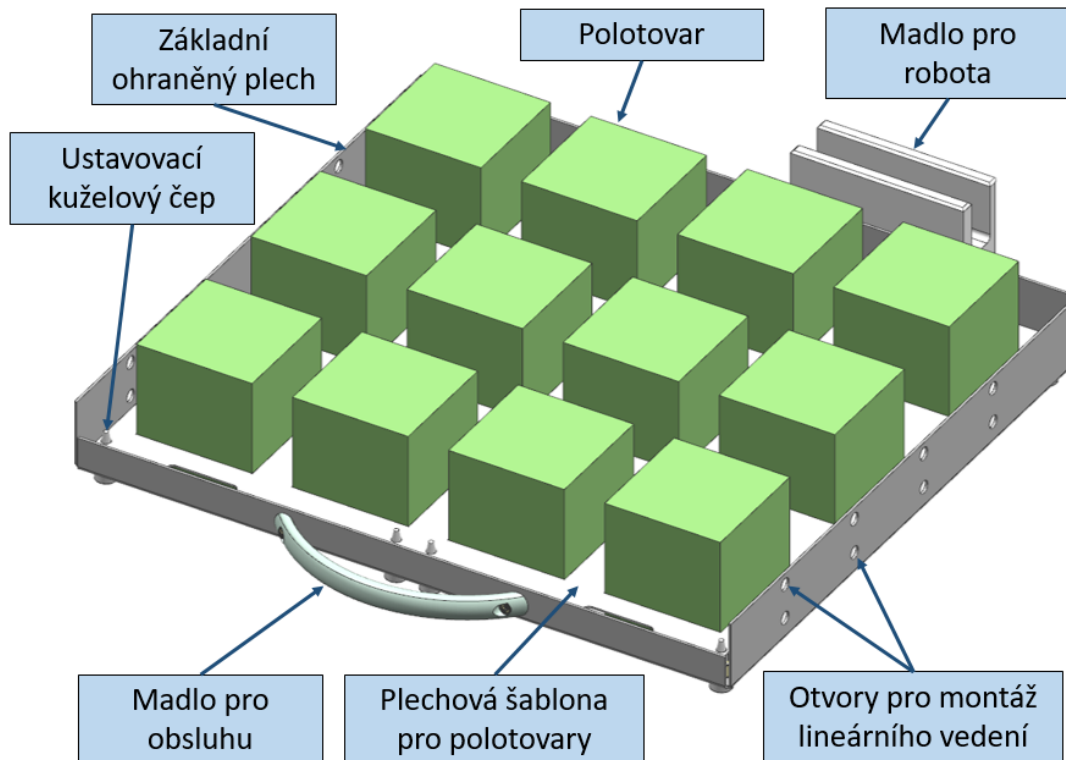


Obr. 44 Umístění snímače polohy v konstrukci, umístění bloku aretace; pracovní režim zásobníku – pojízdňá podpora je vysunuta

4.5.8 Upínání polotovarů

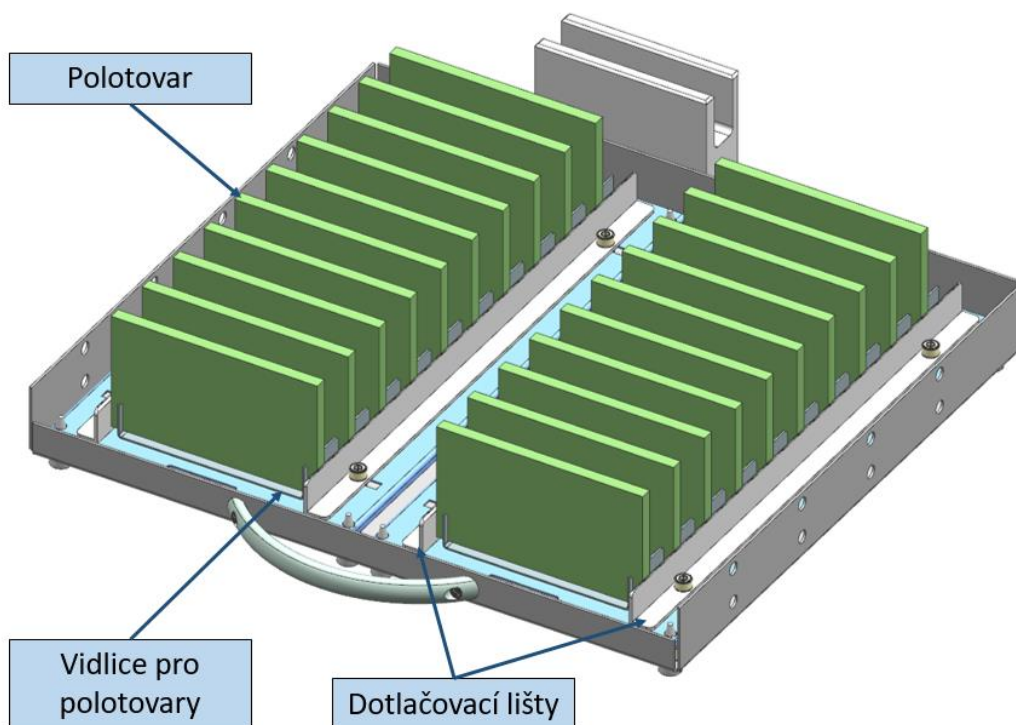
Upínání polotovarů na paletě může být realizováno třemi způsoby v závislosti tvaru výrobku:

- 1) Plechová šablona
 - 2) Vidlice s přitlačnými lištami
 - 3) Kolíkový způsob
- 1) Plechová šablona je výpalek z 1,5 mm tlustého plechu, do příslušných pozic zapadají polotovary s boční vřlí 1 mm. Vnitřní hrany jsou zkoseny a tvoří z části náběh pro navrácení polotovaru zpět. Výpalek má v rozích otvory ustavení pomocí kuželů namontovaných na spodní straně palety (ohraněný nerezový plech). Ustavení polotovarů pomocí šablony je vhodné pro tělesa typu kvádr.



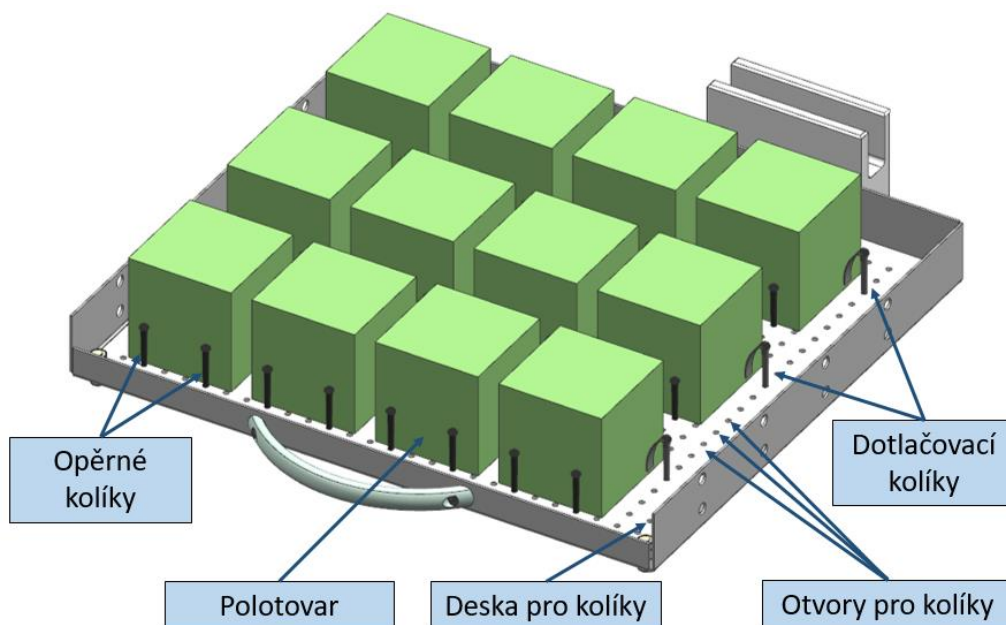
Obr. 45 Paleta s upínáním polotovarů pomocí plechové šablony

- 2) Vidlice s přítlačnými lištami je vhodná pro plochá tělesa, s jedním rozměrem výrazně menším než ostatní. Polotovary jsou založené do vidlice a z boku je poloha zajištěná stavitelnými přítlačnými lištami pro přizpůsobení šířce polotovaru. Prostor palety je rozdělen na dvě poloviční desky. Ty je možno vyjmout zvlášť, a usnadnit tak zakládání a vyjímání polotovaru obsluze tím, že manipuluje s lehčím objektem. Maximální šířka polotovaru je v tomto případě omezena na hodnotu: 232 mm, výška 100 mm a tloušťka není omezena. Vidlice, do které zapadají polotovary má zkosené hrany, které tvoří náběh, aby nedocházelo ke kolizi. Uživatel AVO systému si pro různé tloušťky polotovarů musí vyrobit různé plechové výpalky, které tvoří vidlici. Důležité je pouze dodržet rozteč drážek minimálně 20 mm, aby nedocházelo ke kolizi prstů úchopné hlavice a vedlejších polotovarů.



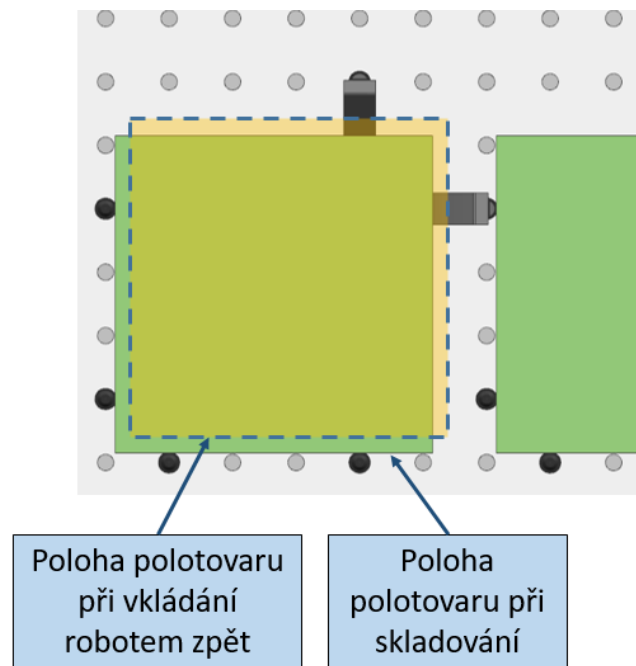
Obr. 46 Paleta s upínáním plochých polotovarů – vidlice s přítlačnými lištami

- 3) Třetí způsob upínání polotovarů je realizován kolíkovým způsobem. Hliníková deset milimetrů tlustá deska obsahuje síť otvorů pro standardní kuželové kolíky. Systém je vymyšlen tak, že je polotovar opřen dvěma sousedními stranami o pevné kolíky a zároveň je dotlačován kolíky s listovými pružinami ze zbylých dvou stran.



Obr. 47 Paleta s upnutými polotovary pomocí kolíkového způsobu

Při vkládání obrobku zpět do palety je zamezeno kolizi (obrobek-pevný kolík) tím, že je obrobek vkládán o 3 mm blíže ke straně, kde se nachází kolíky s pružinou. Síť otvorů má rozteč 20 mm a průměr kolíků je 6 mm s tolerancí h10 a délka 50 mm s kuželovitostí 1/50, tyto rozměry vychází z normy ČSN 022153. Kolíky jsou doplněny zkosením na náhledové straně pro eliminaci drobných kolizí. Dotlačovací kolíky obsahují navíc drážku, do které je vlepena plochá pružina. Výhodou tohoto řešení upínání je univerzálnost a také není potřeba vyrábět žádné plechové díly při změně výroby. Nevýhodou je vyšší pořizovací cena a nevhodnost použití pro ploché díly.

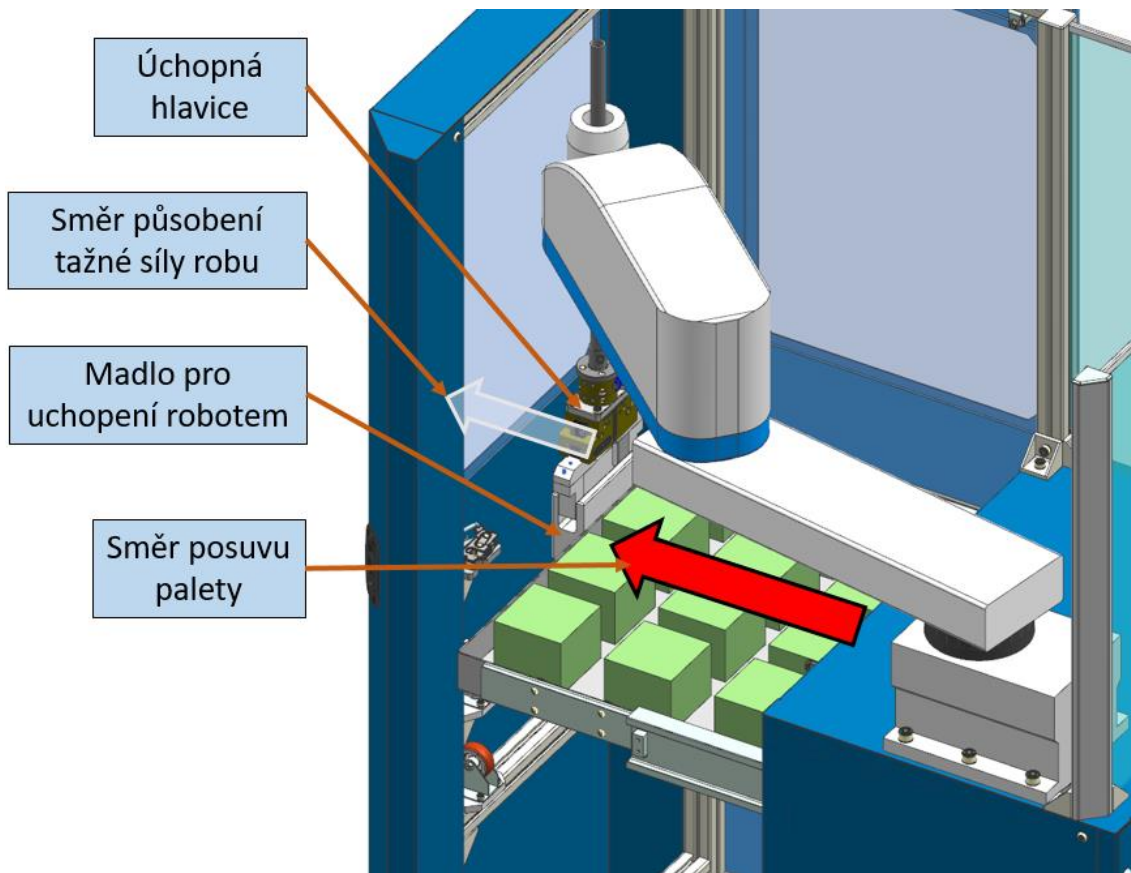


*Obr. 48 Poloha polotovaru při vkládání a skladování
 Přerušovanou čarou je vyznačena přibližná poloha obrobku při vkládání zpět na paletu.*

4.5.9 Výsuv palety k robotu

Výsuv palety na stranu k robotu je zajištěn samotným robotem, uchopení madla palety probíhá bez svírání úchopné hlavice, je využito tloušťky prstů, které jsou robotem vloženy do drážky. Následně robot vysune paletu z polohy „v zásobníku“ do polohy „u robotu“. Tím, že je použita drážka v madle, je dosaženo univerzálnosti. Protože pro různě široké polotovary bude použito stále stejné madlo. Madlo je sice zástavbou větší, nicméně nekoliduje se zásobníkem a nijak nebrání funkci AVO systému. Robot má k dispozici 100 N v tahu v rovině „XY“. Valivé odpory lineárního vedení Rollon jsou zanedbatelné, daleko větší vliv má přesnost montáže vedení. Vlivem nepřesnosti montáže a křížení vedení vzniká odporová síla F_{odp} působící proti tahu robotu. Úvahou

byla tato síla stanovena na 20 N, ale její přesná výše by se musela stanovit experimentem. Robot svým tahem musí překonat hlavně aretaci palety v poloze „v zásobníku“. Tedy celkem dva aretační členy Haberkorn.



Obr. 49 Schéma výsuvu palety ze zásobníku pomocí robotu

Maximální aretační normálová síla F_2 při stlačení aretačního členu Haberkorn je 31 N a zdvih kuličky je 1,5 mm. Počet aretačních členů v této poloze jsou dva ($n_{ar} = 2$). Kulička zapadá do drážky vývrtu pod stykovým úhlem $\alpha = 120^\circ$. Výsledná axiální síla F_x je rovna 17,9 N.

$$F_x = 0,577 \cdot F_2 = 17,9 \text{ N} \quad (5)$$

Celková aretační síla F_{ar} je získána vynásobením počtu aretačních členů silou F_x .

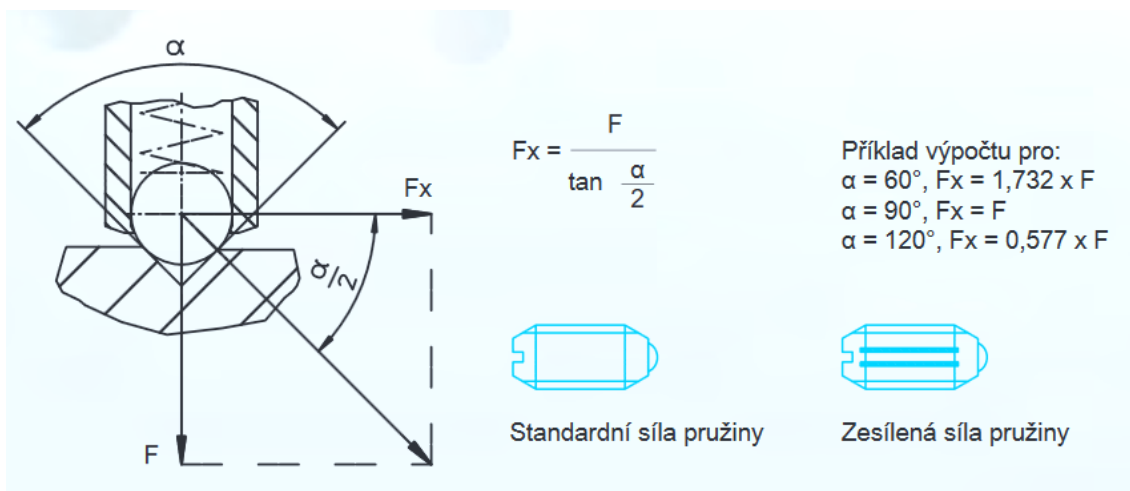
$$F_{ar} = n_{ar} \cdot 17,9 = 2 \cdot 17,9 = 35,8 \text{ N} \quad (6)$$

Tažná rezerva robotu F_{tr} [N]:

$$F_{tr} = F_t - F_{odp} - F_{ar} = 100 - 20 - 35,8 = 44,2 \text{ N} \quad (7)$$

Teoreticky má robot tažnou rezervu ještě 44,2 N. Nelze se ale spolehnout na hodnotu odporové síly, vzniklou nepřesnou montáží vedení. Pokud by se ukázalo, že je aretace příliš silná, lze aretační členy posunout na rámu ve směru nahoru, čímž se sníží aretační síla F_x a zvýší se tak rezerva síly robotu F_{tr} . Celková síla, kterou musí vyvinout obsluha F_{ob} pro vysunutí palety ze zásobníku je rovna součtu odporové síly a celkové aretační síly. Požadovaná síla obsluhy je tedy:

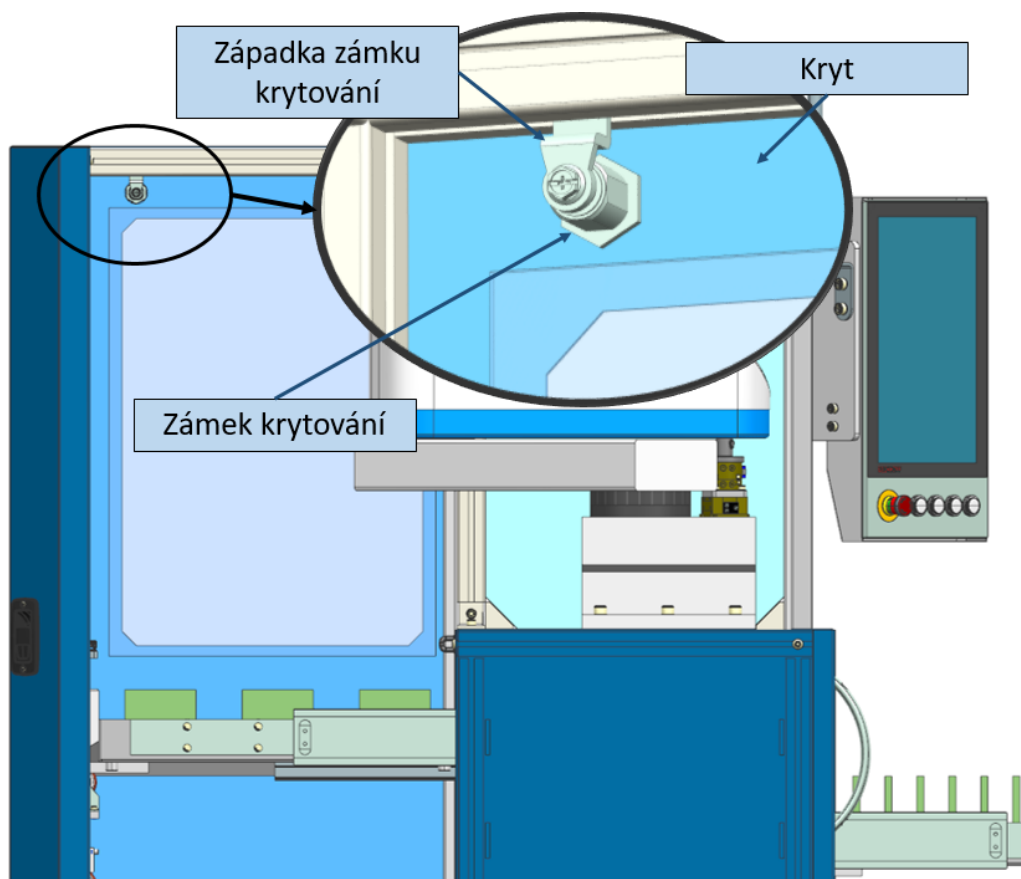
$$F_{ob} = F_{odp} + F_{ar} = 20 + 35,8 = 55,8 \text{ N} \quad (8)$$



Obr. 50 Schéma výpočtu aretační síly F_x pro aretační elementy firmy Haberkorn [21]

4.5.10 Krytování

Kryty konstrukce jsou vyrobeny z nerezového ohýbaného plechu tloušťky 1,5 mm. V kombinaci s plexisklem tlustým 4 mm. Byl kladen důraz na jednoduchou montáž a demontáž, té je dosaženo co nejmenším počtem spojovacích součástí a vhodným ohraňením plechů. Kryty tak přiléhají na rám samy. Jeden segment krytování, umístěný na boku pojízdné podpory je možno rychle demontovat pro pohodlnější inspekci pracovního prostoru SCARA robotu. V horní části tohoto krytu jsou umístěny dva zámky na tvarovou kličku. Po otočení kličky o 180° proti směru hodinových ručiček je možno kryt vyklopit a v dolní části vysadit z drážky. Zbytek plechových krytů je připevněn pomocí šroubů s půlkulatou hlavou a vnitřním šestihranem či šrouby, které připevňují i další prvky jako například madla nebo nosný plech pro konektory.



Obr. 51 Detail zámků krytu zásobníku

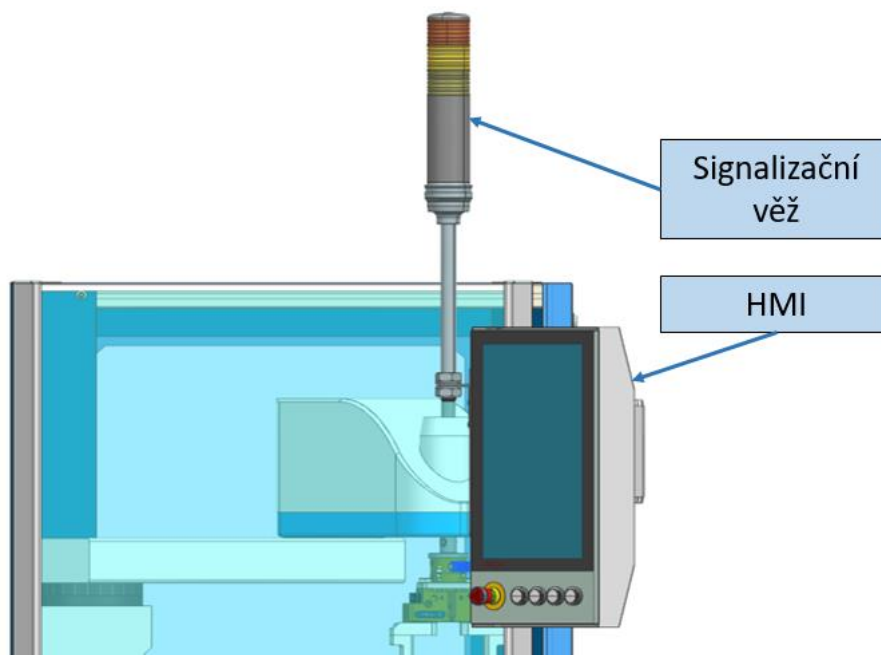
4.5.11 HMI

Ovládací panel s plochou dotykovou obrazovkou – HMI (Human machine interface) zajišťuje pohodlné ovládání, změnu programu robotu, rychlou orientaci, zda běží či neběží AVO systém a také kolik kusů ještě zbývá obrobít. Dále je možno zobrazit, jak dlouho bude robot ještě vykládat paletu a za jak dlouho bude potřeba asistence obsluhy pro vykládku obrobků.

Panel HMI Beckhoff typ CP2216 G014 je osazen procesorem Intel a dokáže zpracovávat vstupy a komunikovat s PLC, které je součástí řídicí jednotky robotu. Pod displejem jsou umístěna čtyři hardwarová tlačítka, ta jsou použita jako jednotlivé zkratky v systému. Tato velikost HMI byla použita, protože součástí panelu Beckhoff je v tomto případě také bezpečnostní stop tlačítko. To je díky celkové poloze HMI umístěno v požadované výšce od podlahy, dle příslušné normy.

V horní části držáku HMI je namontována třibarevná signalizační věž. Slouží pro znázornění stavů AVO systému. Červená znamená, že je systém zastavený chybou (přerušení cyklu AVO, disfunkce snímače polohy), žlutá znamená, že systém AVO čeká

na pokyny od obsluhy, které obsluha zadá přes HMI. Zelená znamená, že systém AVO běží, robot zakládá a vykládá polotovary.



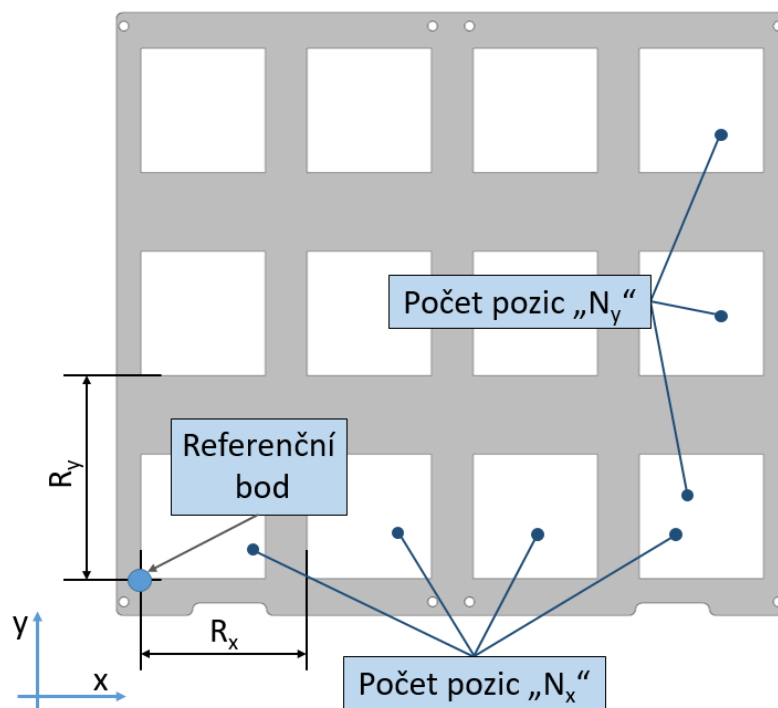
Obr. 52 Tříbarevná signalizační věž spolu s panelem HMI na straně zásobníku u obsluhy

4.5.12 Programování systému

Programování polohy polotovaru je usnadněno tím, že všechny polotovary jsou umístěné v pomyslné síti. Je zvolena síť pozic s danou roztečí ve směru „X“ (R_x) a ve směru „Y“ (R_y). Dále je potřeba zadat, kolik pozic se v daném směru vyskytuje (N_x a N_y). Úchopná hlavice svírá polotovar vždy vprostřed strany. Toto místo je počítáno jako polovina délky polotovaru „ L_y “. Posledním parametrem je výška polotovaru „ H “. Do systému v HMI se tedy zadává parametr rozteče „ R_x “, „ R_y “ a počty pozic „ N_x “ a „ N_y “, délka polotovaru „ L_y “ a jeho výška „ H “. Při změně výroby a použití jiné šablony je ale nutno určit referenční bod sítě. Ten se určí najetím SCARA robotu do referenčního bodu palety. Nicméně pokud je referenční bod umístěn na identickém místě jako na šabloně předchozí (s přesností $\pm 0,8$ mm), není třeba hledat a programovat referenční bod nový.

Jako ukázka v konkrétním případě slouží šablona pro polotovary velikosti 100x100x100 mm. Ve směru „x“ jsou 4 pozice („ N_x “) a ve směru „y“ 3 pozice („ N_y “), dohromady 12 pozic pro polotovary, které jsou umístěny vedle sebe s roztečí „ R_x “ = 135 mm a „ R_y “ = 165 mm. Celá síť je vztažena k referenčnímu bodu umístěnému v levém dolním rohu pozice pro polotovar. Využitelná velikost šablony pro tvorbu

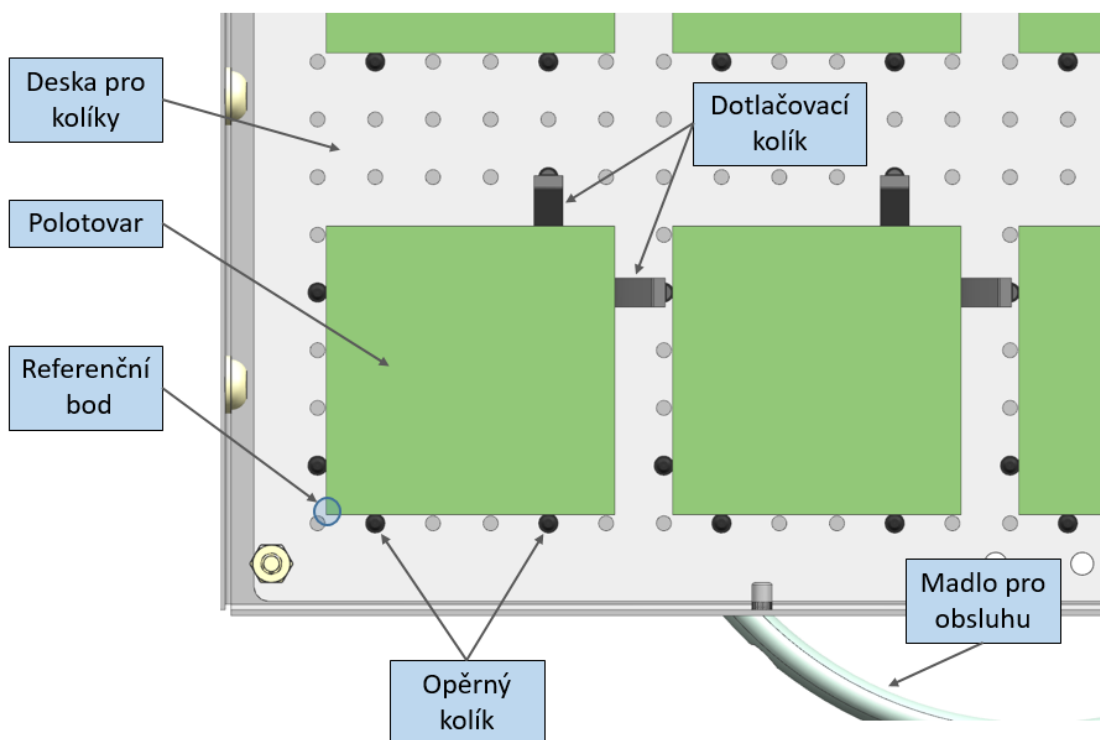
libovolné sítě je ve směru „x“ 505 mm a ve směru „y“ 430 mm. Mezi otvory pro polotovary je nutno dodržet rozestupy alespoň 20 mm pro prsty úchopné hlavice.



Obr. 53 Šablony pro vkládání polotovarů na paletu, popis důležitých parametrů pro programování AVO systému.

Také je možné zvolit přístup, že se předprogramují šablony pro různě velké polotovary s různými referenčními body a poté se v systému HMI pouze zvolí, která šablona je nyní osazená na které paletě. Řídicí systém následně ví, kde se polotovary společně s referenčním bodem nacházejí a není třeba v průběhu změny výroby opakovaně zjišťovat tento referenční bod.

Pokud je použit systém upínání pomocí kolíků, není třeba hledat referenční bod za předpokladu, že je tento bod stejný pro všechny ostatní kombinace rozložení polotovarů na paletě. Jedná se o levý spodní roh desky pro kolíky a je dán tečnami dvou rovin tvořených opěrnými kolíky a polotovarem.



Obr. 54 Referenční bod při použití kolíkového způsobu upínání polotovaru na paletě

Pro ruční ovládání robotu, pro seřizování a prvotní programování AVO systému je použit ovladač robotu (Teach pendant) TP300, ten je ale později odpojen a pro veškeré ovládání se využívá HMI panel Beckhoff. Ovladač je dodáván spolu s robotem a řídicí jednotkou.

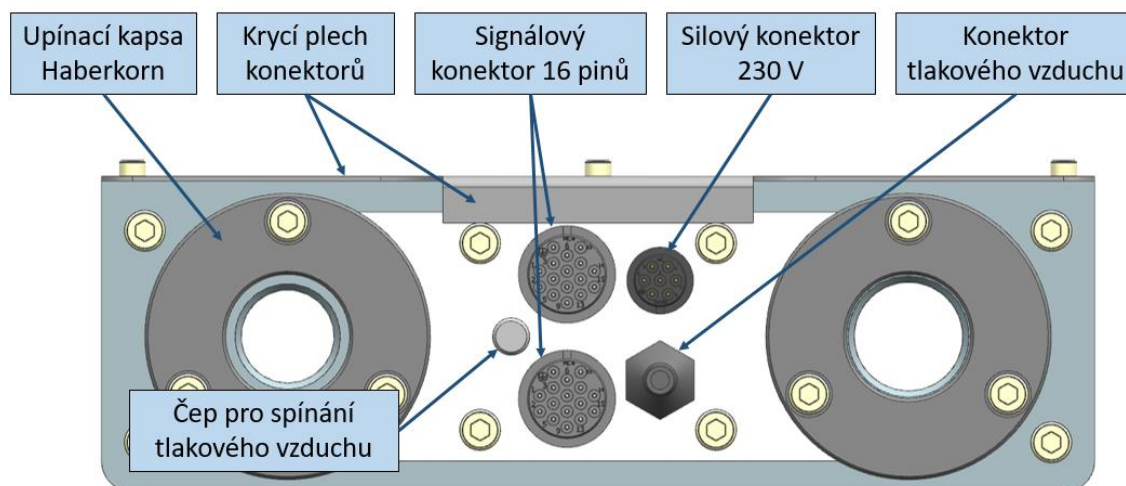


Obr. 55 Ovladač Toshiba TP3000 [22]

4.6 Připojení zásobníku k výrobnímu stroji – informační a energetické propojení

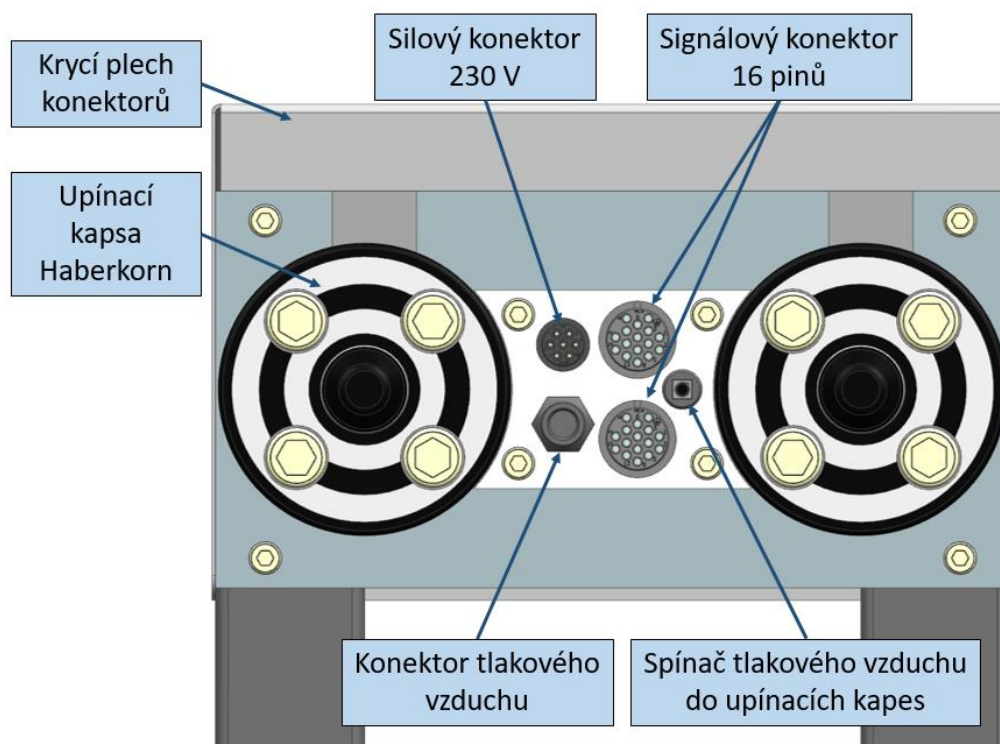
Fyzické spojení zásobníku s výrobním strojem je zajištěno dvěma pneumatickými upínacími kapsami („zero point“ upínače) Haberkorn. Jde o kuželové upínače s kuličkami, které při přívodu tlakového vzduchu zapadnou do drážky v protikusů. Konektor umístěný mezi upínacími kapsami zprostředkovává spojení energetické, signálové a také připojení zdroje tlakového vzduchu. Tím je zajištěn přenos informací z výrobního stroje do zásobníku a opačně. Zásobník je napájen 230 V přes tento sdružený konektor (Obr. 56).

Celé spojení tvoří dvě části. První část namontovaná na zásobníku čítá upínací kroužky, do kterých zapadají kuželové upínače s kuličkami. Zároveň slouží jako vedení pro připojení. Dále jsou zde umístěny samčí konektory pro připojení signálů vstupů (16 pinů) a výstupu (16 pinů), dále silové připojení 230 V a automatická přípojka na tlakový vzduch.



Obr. 56 Konektor na zásobníku, konektory s kolíky (piny)

Druhá část se skládá ze stojanu pro konektor, upínacích kapes Haberkorn, konektorů signálových, silového připojení a tlakového vzduchu. Stojan druhé části (Obr. 57) je přišroubován na podlaze, v přímé blízkosti posuvných dveří obráběcího stroje.

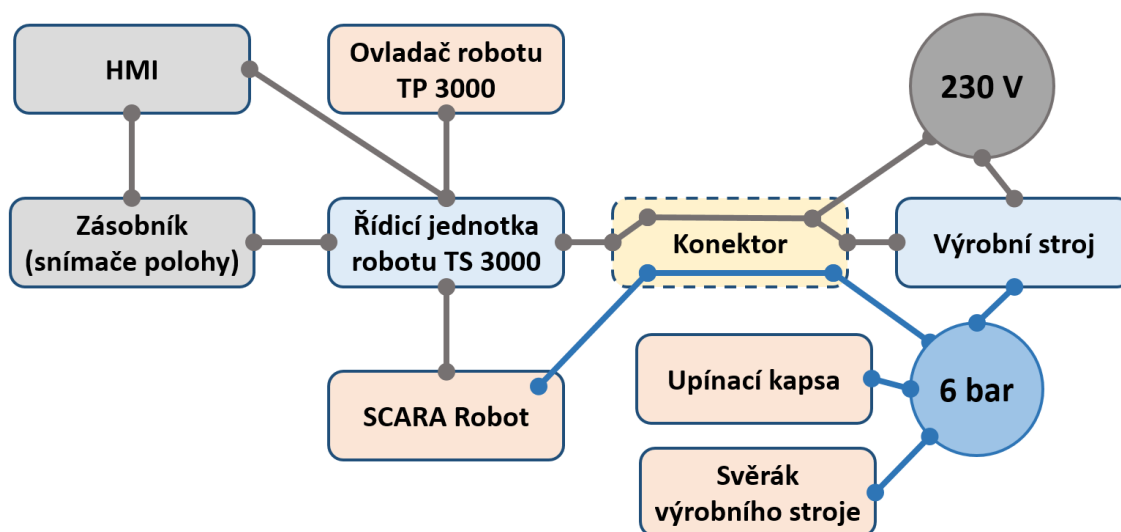


Obr. 57 Konektor na stojanu u výrobního stroje, konektory se zdíčkami

Všechny konektory jsou od firmy Stäubli. Síťový konektor je uložen v pouzdru G1, typ 18.1305. Dokáže přenášet proud 3x 16 A. Signálový konektor v pouzdru G2 disponuje šestnácti piny a je typu 18.1407. Automatický konektor tlakového vzduchu je typ RMA 06, průměr dutinky 6 mm. Maximální tlak je konektorem omezen na 50 bar. Vzhledem k tomu, že provozní tlak úchopné hlavice Schunk je 6 bar, jeho použití nijak nelimituje její funkci. Velikosti pouzder konektorů byly zvoleny tak, aby připojení konektorů nevyžadovalo velkou sílu, proto jsou signálové konektory rozděleny do dvou menších.

Informační a energetické propojení komponent

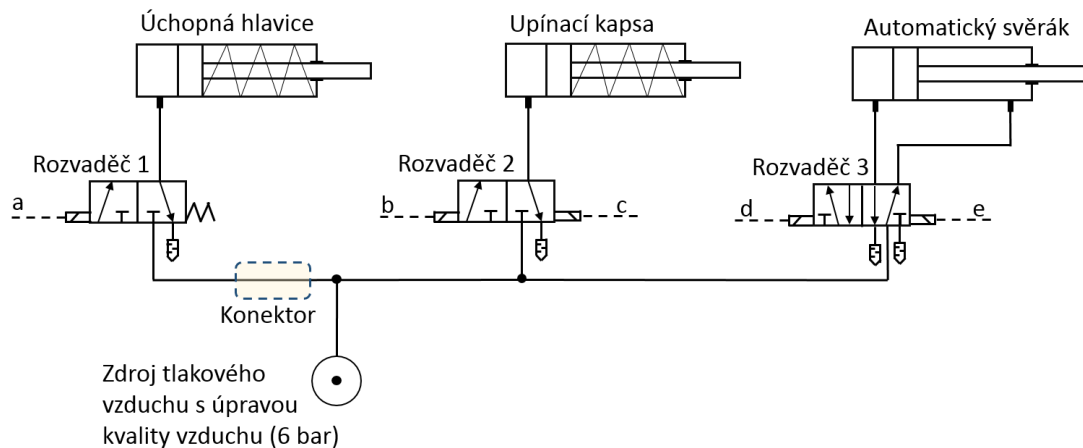
Jednotlivé komponenty vyžadují síťové připojení 230 V, někdy navíc i signálové propojení pro společnou komunikaci. Rozvod tlakového vzduchu je potřebný pro pneumatické komponenty: úchopnou hlavici, upínací kapsu a automatický svěrák výrobního zařízení. Na dalším obrázku níže je schéma popisující propojení jednotlivých komponent jak elektricky (230 V), tak propojení médií (tlakového vzduchu).



Obr. 58 Elektrické i pneumatické propojení jednotlivých komponent AVO

Vysvětlivky: šedá linie – propojení elektrické 230 V; modrá linie – propojení energetické (tlakový vzduch)

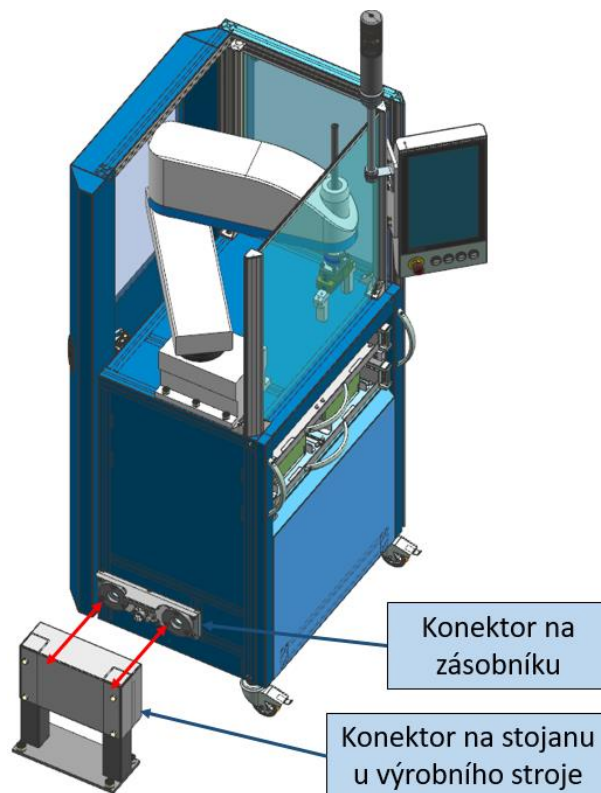
Ovládání a připojení pneumatických komponent je zobrazeno na obrázku níže. Úchopná hlavice je připojena ze zdroje tlakového vzduchu 6 bar přes třicestný monostabilní rozvaděč. Uzavírání úchopné hlavice je realizováno přivedením elektrického signálu „a“ do rozvaděče, díky tomu se přesune šoupátko a tlakový vzduch je vpuštěn do prostoru pod píst – úchopná hlavice tak uzavře své prsty. Signál „a“ je posílán z řídicí jednotky robotu a je spouštěn přímo z programu robotu. Tlakový vzduch jde v tomto případě i přes konektorové spojení zásobník-výrobní stroj. Upínací kapsa Haberkorn je připojena také na společný zdroj tlakového vzduchu vedoucí z výrobního stroje. Kapsa je připojena přes třicestný bistabilní rozvaděč ovládaný dvěma elektrickými signály. Signál „b“ je zajištěn průmyslovým mikrospínačem přímo v konektorovém spojení zásobník-výrobní stroj. Pokud je konektor dostatečně hluboko připojen, mikrospínač se sepne a aktivuje tím rozvaděč 2. Tím je přiveden tlakový vzduch do upínací kapsy a celý zásobník je tímto procesem fyzicky pevně spojen s výrobním strojem. Odpojení probíhá buď přes HMI panel, který pošle signál „c“ případně manuálně přes další mechanický spínač, pokud by nastala porucha HMI panelu a bylo by nutno odpojit zásobník od výrobního stroje. Signál „c“ způsobuje odpojení signálu „b“ přes relátko a přestavení rozvaděče 2 do polohy, kdy je upínací kapsa uvolněna. Poslední pneumaticky poháněnou komponentou je automatický svěrák Schunk. Svěrák je dvojčinný, potřebuje dva signály pro ovládání funkce. Svěrák lze ovládat buď manuálně přes panel HMI nebo automaticky přímo v programu robotu spínáním výstupů. Signálem „d“ pro sevření polotovaru a signálem „e“ pro uvolnění polotovaru.



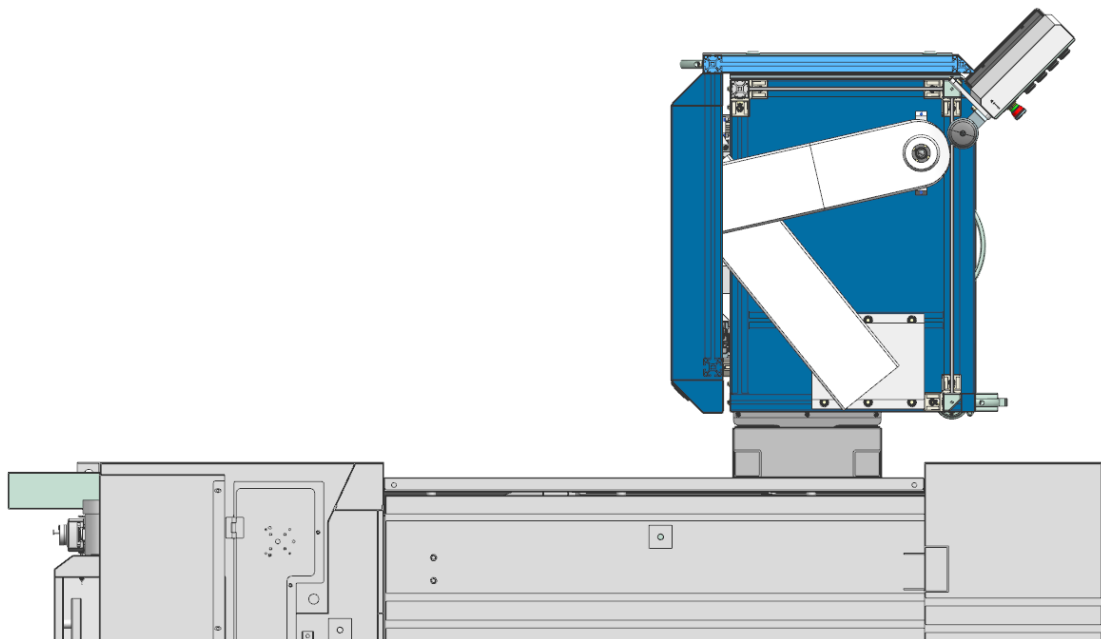
Obr. 59 Zjednodušené schéma zapojení pneumatických komponent

Postup připojení zásobníku ke stroji

Obsluha doveze zásobník na pojízdných kolech ve složeném stavu k výrobnímu stroji. Následně zajede zásobníkem do konektoru (Obr. 60), čímž se v dorazu stiskne tlačítko signálového spínače (spínač od výrobce NKK, typ BB-16AP), které dá signál rozvaděči a spustí tak přívod tlakového vzduchu do upínací kapsy Haberkorn. Tím je zásobník pevně spojen s výrobním strojem (Obr. 61). Nakonec obsluha pouze zabrzdí obě pojízdná kola. Odpojení zásobníku lze provést přes panel HMI, který pošle signál rozvaděči, a ten odpojí tlakový vzduch od upínací kapsy.

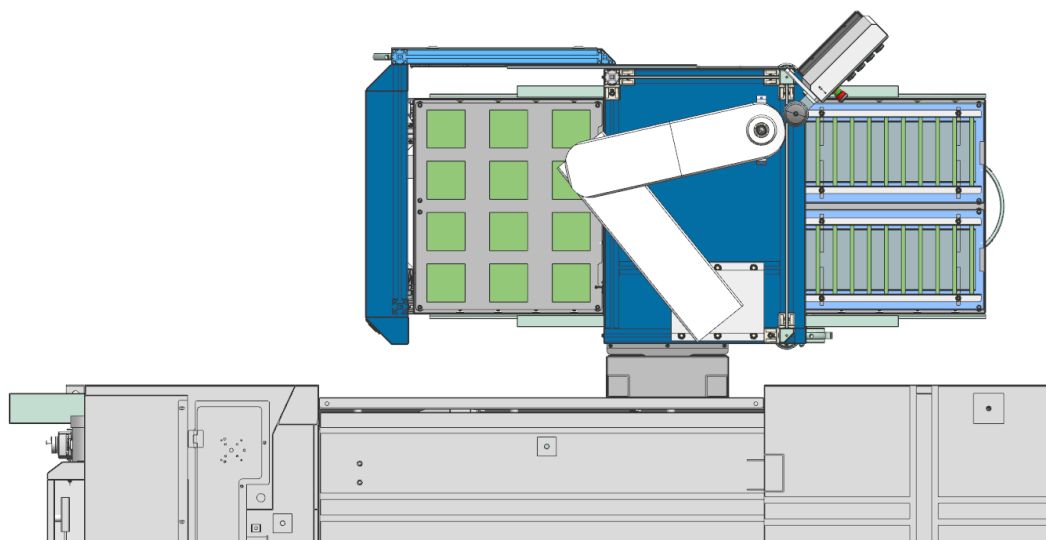


Obr. 60 Připojení zásobníku ke stojanu konektoru

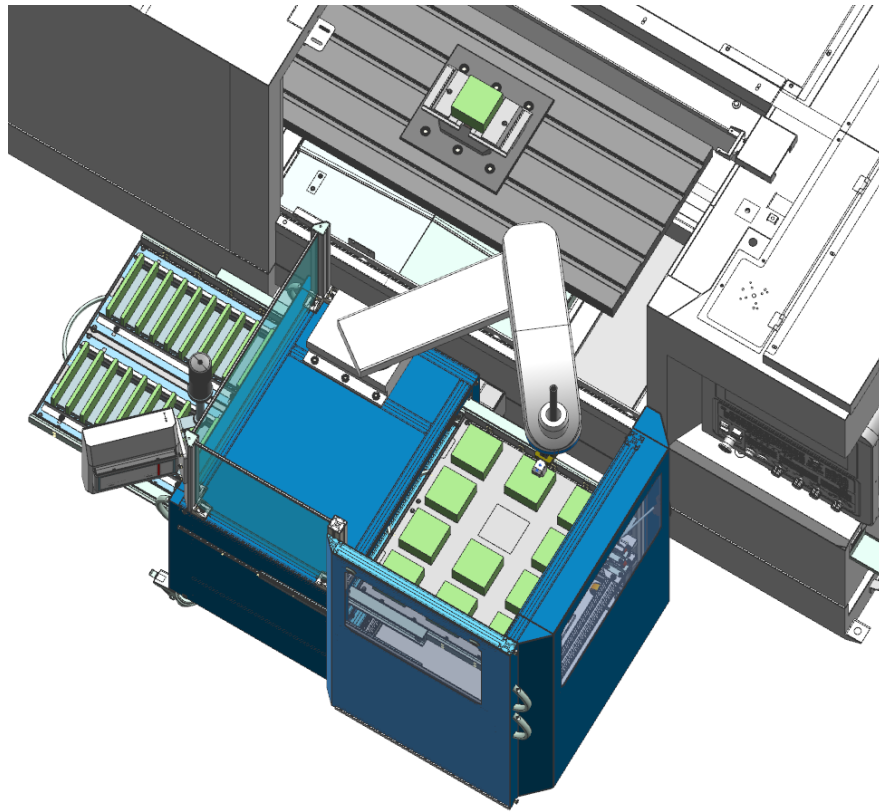


Obr. 61 Horní pohled na zásobník připojený k výrobnímu stroji; zásobník je ve složeném transportním stavu

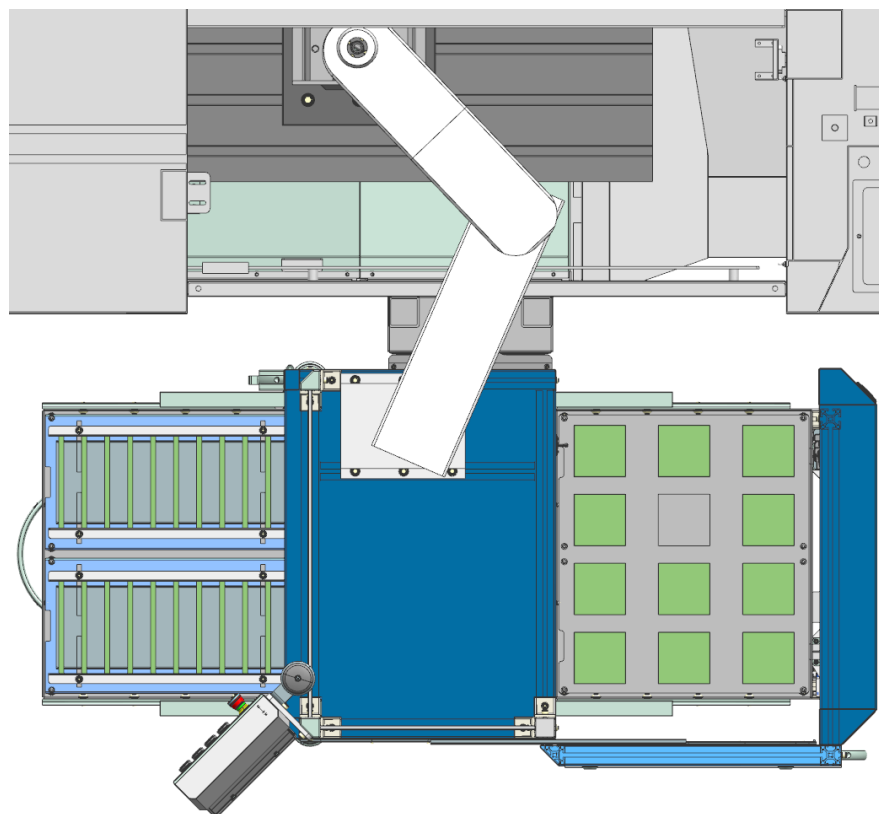
Pomocí madla obsluha otevře zámek a tím odjistí západku. Následně je možno vysunout pojízdnou podporu až do aretace (Obr. 62). Nyní je nutno na HMI identifikovat výrobní stroj, pokud je systém AVO používán pro více výrobních strojů. Identifikací se zvolí balík souřadnic, ve kterém se nachází např. souřadnice svěráku. Dále už je možné spustit pomocí HMI cyklus vykládání zásobníku (Obr. 63, 64, 65). A systém AVO běží, dokud má robot zásobu polotovarů nebo není zastaven systémem výrobního stroje pro splnění vyrobené dávky.



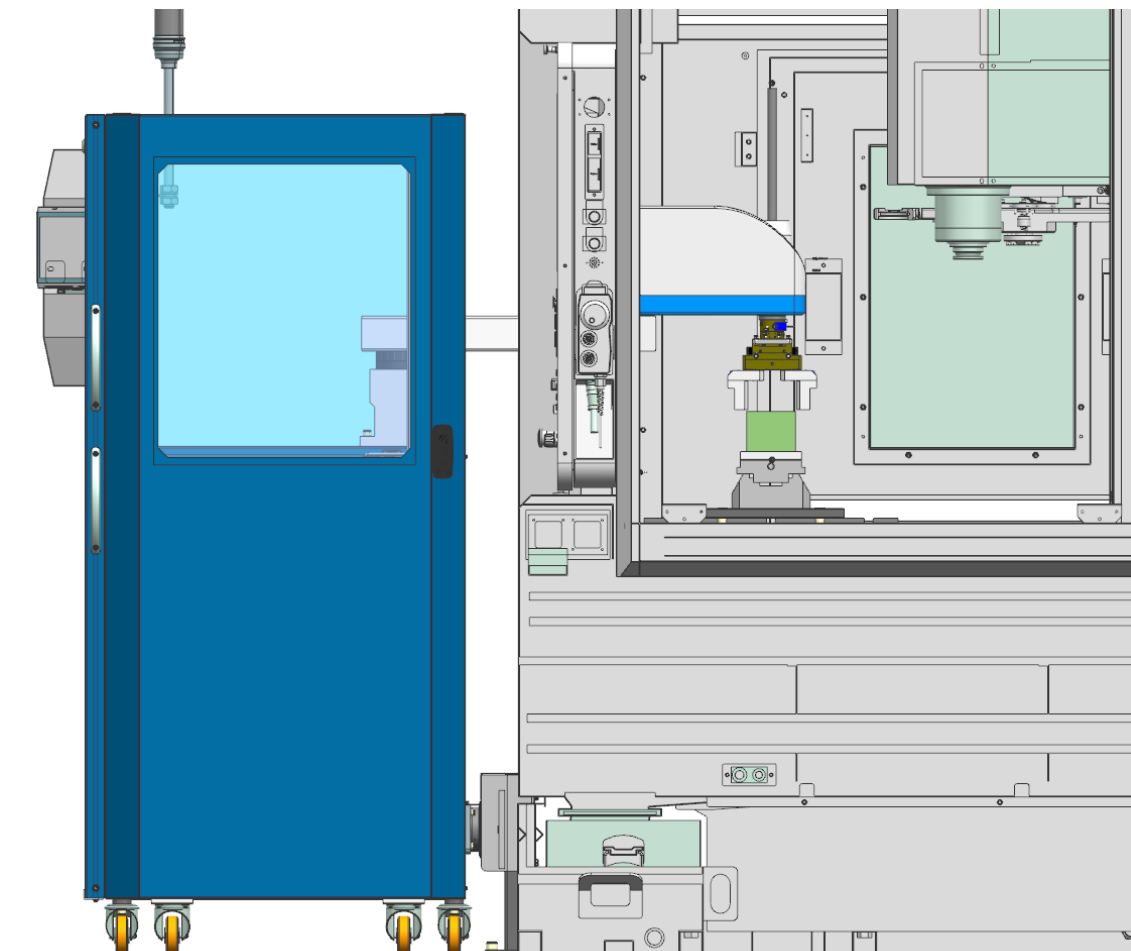
Obr. 62 Horní pohled na zásobník připojený k výrobnímu stroji s vysunutou pojízdnou podporou



Obr. 63 AVO systém s vloženým polotovarem do svěráku stroje

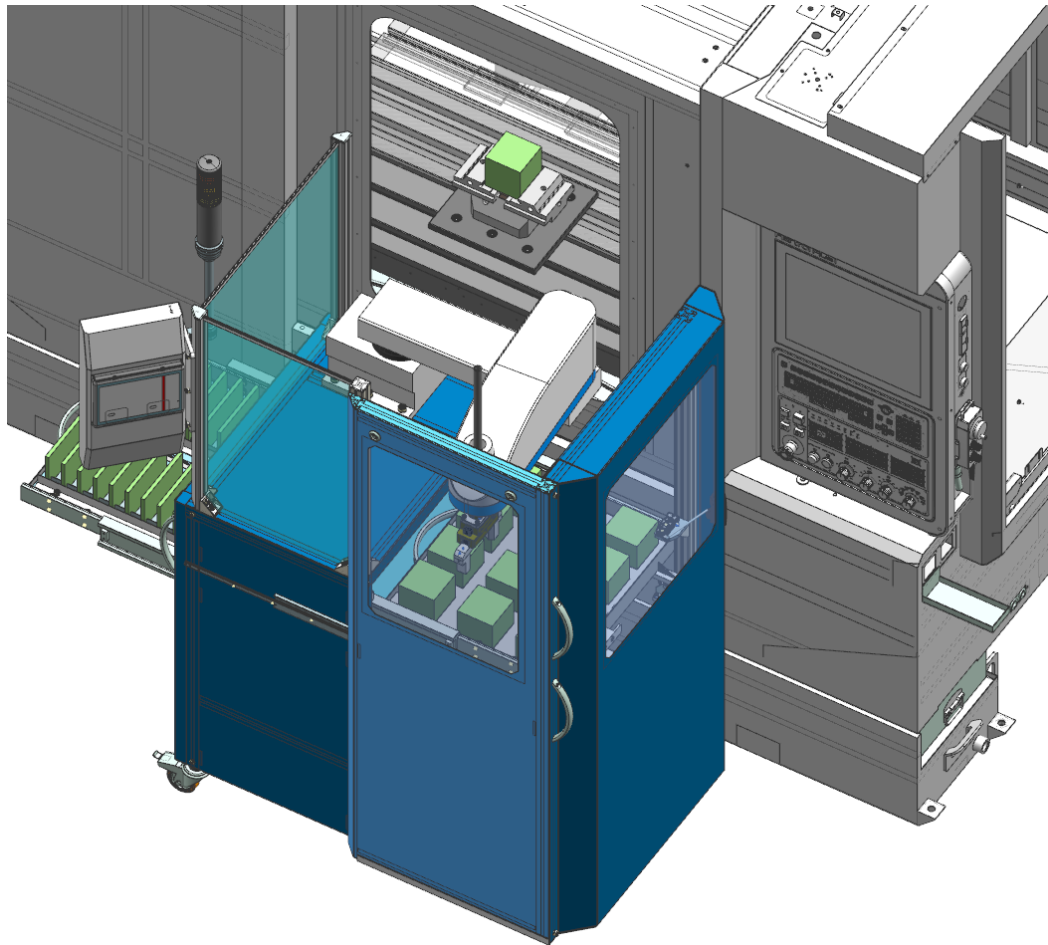


Obr. 64 Zakládání polotovaru do svěráku - horní pohled



Obr. 65 Zakládání polotovaru do svěráku - boční pohled

Robot se pohne do referenčního bodu v prostoru zásobníku. Nyní se mohou zavřít automatické posuvné dveře výrobního stroje a stroj začne obrábět (Obr. 66). Po dokončení obrábění se posuvné dveře stroje zase otevrou, stejně tak i automatický pneumatický svěrák Schunk, a robot se může napolohovat do prostoru výrobního stroje a vyzvednout obrobek, který vrátí na původní pozici v zásobníku, následně uchopí nový polotovaz a pracovní cyklus se opakuje, dokud nejsou všechny polotovary na paletě obrobena.



Obr. 66 AVO systém během obrábění polotovaru, robot se nachází v domovském bodě v prostoru zásobníku, posuvné automatické dveře obráběcího stroje jsou zavřeny

Doba nezávislosti systému je dána počtem polotovarů v jedné paletě, dobou obrábění jednoho polotovaru a dobou jednoho pracovního cyklu AVO. Například, pokud máme na jedné paletě 12 polotovarů a každý polotovar se obrábí např. 20 minut, tak je doba nezávislosti systému rovna přibližně 4 hodinám. Navržený AVO systém pracuje se dvěma paletami. Doba nezávislosti systému je dvojnásobná, tedy 8 hodin.

5 Výpočet času cyklu výměny obrobku

Zadání práce stanovuje maximální čas výměny obrobku 40 s. Cílem výpočtů je získat dobu cyklu výměny obrobku u vybraného robotu a ověřit, zda je schopen provést potřebné úkony v požadovaném čase.

Celkový čas cyklu výměny obrobku se skládá z jednotlivých pohybů robotu a také technologických časů, mezi kterými jsou časové prodlevy.³ Jednotlivé úkony celého jednoho cyklu automatické výměny obrobku jsou uvedeny v tabulce 16 (kap. 5.6).

Pro stanovení celkového času je tedy nutno znát čas pohybu robotu ze zásobníku do upínače na stole stroje a zpět. Pracovní cyklus zahrnuje otevření automatických dveří výrobního stroje, pohyb robotu pro obrobený díl, vrácení obrobku do zásobníku, napolohování na jinou pozici v zásobníku a odebrání nového polotovaru. Ten je vložen do svěráku ve výrobním stroji. Následuje už pouze návrat robotu do zásobníku a zavření posuvných automatických dveří výrobního stroje. Je přitom nutné rozlišovat pohyb robotu bez polotovaru (100% zrychlení) a pohyb robotu s polotovarem, kdy je zrychlení omezeno dle zatížení robotu. Pro zatížení 6 kg (zadaná hmotnost obrobku) je zrychlení pro první dvě ramena robotu omezeno na 30 % a pro pohyb v ose „Z“ na 70 %.⁴ Časy pohybu robotu jsou vypočítány pro všechny tyto případy (viz dále).

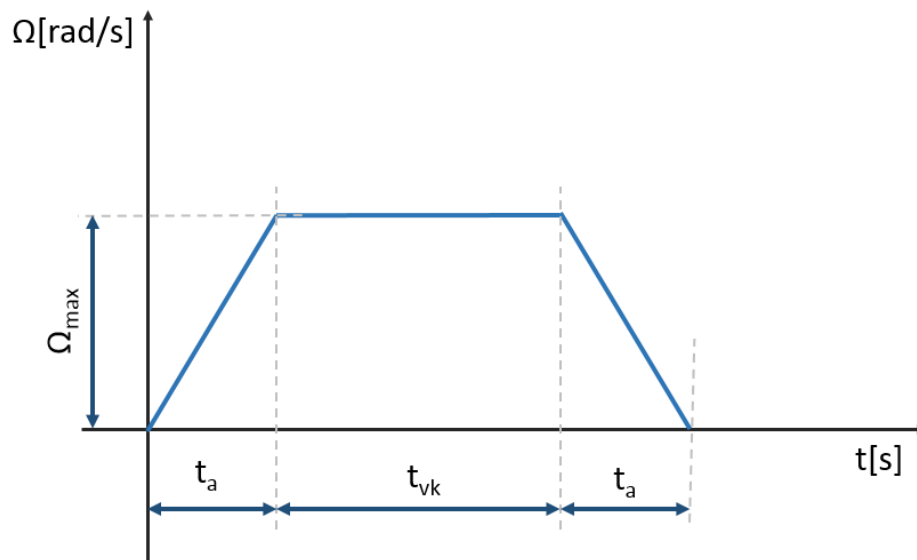
V rámci požadavku dosažení času výměny obrobku (pod 40 s) bylo stanoveno jako dílčí cíl **minimalizovat čas pohybu robotu**, tj. nalézt nejkratší čas doby pohybu robotu, kterého je možné dosáhnout. Za účelem minimalizace času pohybu bylo třeba nejprve nalézt **optimální trajektorii pohybu** jednotlivých ramen robotu (viz kap. 5.3).

5.1 Pohyb robotu

Koncový bod robotu koná rovnoměrně zrychlený pohyb s úsekem konstantní rychlosti a dále zase pohyb rovnoměrně zpomalený (viz Obr. 67). Klasický pohyb s rampou zrychlení.

³ Prodlevy mezi úkony zvyšují spolehlivost chodu AVO systému – čím kratší jsou prodlevy, tím lépe musí být celý systém AVO seřízený.

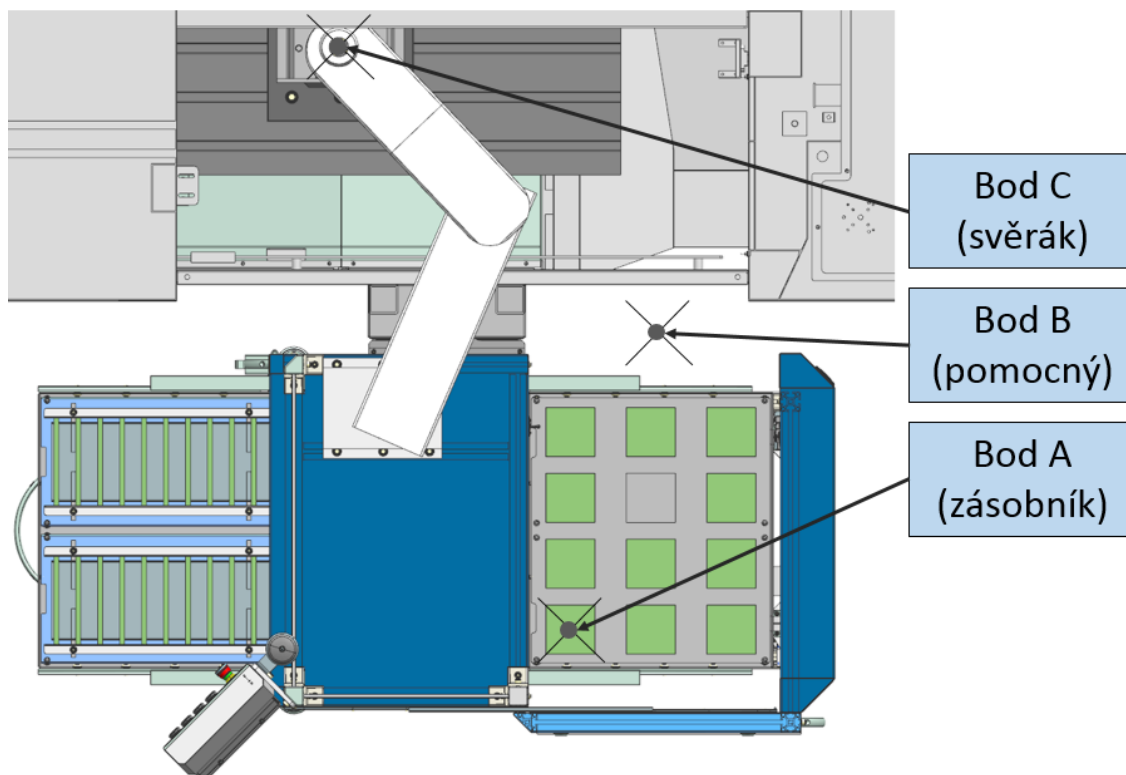
⁴ Grafy pro určení omezení zrychlení os robotu dle zatížení jsou uvedeny v přílohách jako Příloha 4.



Obr. 67 Závislost úhlové rychlosti na čase, rovnoměrně zrychlený a zpomalený pohyb s úsekem konstantní rychlosti

Pohyb robotu v jednom směru (ze zásobníku do upínače či zpět) je rozdělen do dvou úseků, aby bylo zaručeno, že robot nebude kolidovat s dveřmi stroje. Pohyb je zadán třemi body, bodem A (nejvzdálenější pozice v zásobníku polotovarů), průjezdným bodem B – projetím tohoto bodu jsou eliminovány kolize mezi robotem a výrobním strojem. A posledním bodem je bod C, ten reprezentuje svěrák umístěný na stole výrobního stroje (Obr. 68). Trajektorií pohybu je obecná křivka, ta je dána nastavením pohonů robotu v řídicím systému a nelze se na její použití plně spolehnout. Jednoduchým příkazem lze však zadat trajektorii tvaru přímky či oblouku s daným poloměrem. V kapitole 5.3 je zjišťováno vlastním výpočtem, jaký tvar trajektorie je nevhodnější pro dosažení nejmenšího času pohybu.

Souřadnice polohy bodů A, B, C byly zjištěny pomocí vytvořeného CAD modelu systému AVO. Bod A reprezentuje nejvzdálenější místo na zásobníku, kam je možné ukládat polotovary. Bod B slouží jako pomocný bod pro eliminaci potenciálních kolizí úchopné hlavice s dveřmi obráběcího stroje či pojízdné podpory zásobníku. Polohy bodů A, B, C jsou znázorněny v obrázku níže. Čas pohybů robotu mezi body A, B, C lze stanovit výpočtem.



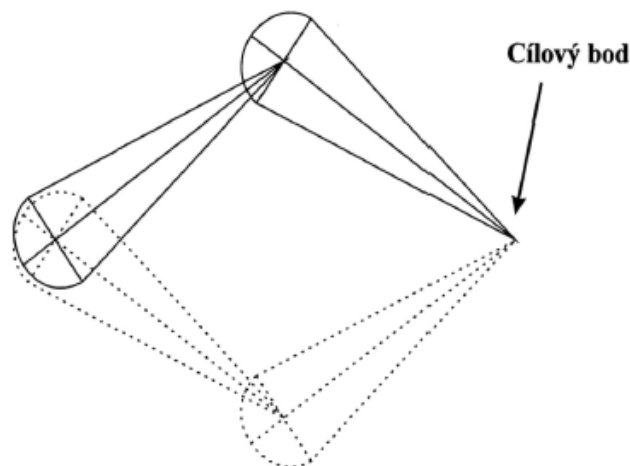
Obr. 68 Polohy bodů A, B, C Pro výpočet optimální trajektorie a doby pohybu robotu

5.2 Úvaha o minimalizaci doby pohybu

K dosažení požadované polohy úchopné hlavice v rovině „XY“ je možné využít natočení dvou ramen, ramena prvního (o úhel φ_1 [°]) a ramena vzdálenějšího od stojanu robotu – rameno druhé (o úhel φ_2 [°]). Čím je úhel natočení ramene robotu menší, tím kratší doba je potřeba, aby se koncový bod dostal na požadované místo.

S tím souvisí vhodná volba kombinací natočení ramen během pohybu mezi body startu a cíle. V tomto případě mohou být natočení ramen libovolná, protože není určena trajektorie pohybu.

Nicméně natočení obou ramen jsou na startu a v cíli daná, pro případ SCARA robotu existují dvě možnosti natočení ramen pro dosažení jednoho cílového bodu, jde o problém zvaný redundance (viz Obr. 69).



Obr. 69 Dvě možná natočení ramen robotu pro dosažení požadovaného cílového bodu [23]

Výrobce Toshiba tyto dva stavy konfigurace kinematického řetězce označuje podle toho, z jakého směru se rameno dostane k cílovému bodu. A to tedy buď zleva (lefty configuration) nebo zprava (righty configuration). V obrázku 69 je konfigurace zleva vyznačena plnou čarou a konfigurace zprava je znázorněna čarou přerušovanou. Pro minimalizaci času pohybu je nutné zachovat jednu z konfigurací po zbytek pohybu, pokud je to možné, protože pro změnu konfigurace je nutné natočit ramena do jiné polohy, což vyžaduje čas navíc.

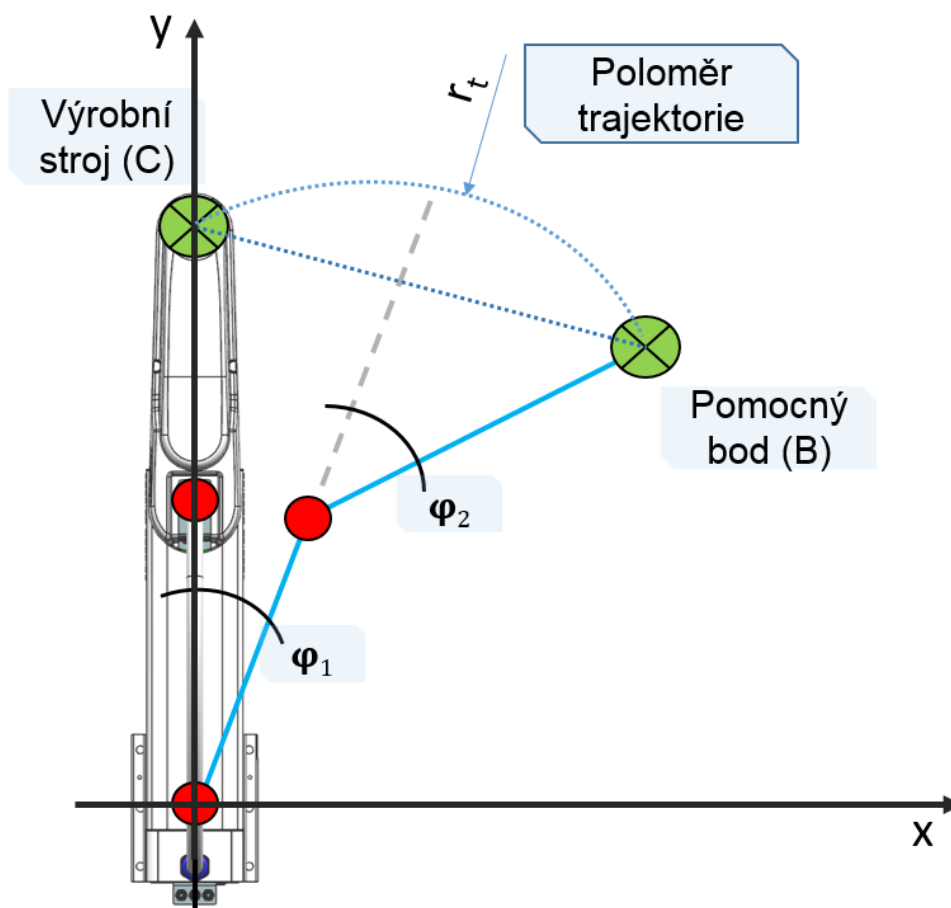
5.3 Stanovení ideální trajektorie pohybu

V této kapitole je určena ideální trajektorie pohybu úchopné hlavice v rovině XY, co se týče minimalizování natočení jednotlivých kloubů robotu. Nejkratší dráha pohybu je dosažena volbou trajektorie typu přímky. Pokud jde o dobu pohybu u rotačního pohybu, hraje roli hlavně úhel, o který je třeba se pohnout pro dosažení požadované polohy. Trajektorie tvaru výseče kružnice může být vhodnější pro minimalizování času pohybu tím, že se ramena robotu nemusí v součtu natočit o tak velký úhel. Optimální poloměr oblouku byl vypočítán pro oba úseky pohybu – pohyb AB a pohyb BC. V textu práce je pro ukázkou uveden postup výpočtu pro úsek BC, jehož výsledný průběh je zajímavější. Výpočty pro úsek AB jsou analogické, a jsou proto uvedeny v příloze (Příloha 3). Výpočet času pohybu ramen v obou úsecích je dále dělen na dva další výpočty dle dovoleného zrychlení:

- Zrychlení 100 % (bez polotovaru)
- Zrychlení 30 % (s polotovarem o hmotnosti 6 kg)

Postup výpočtu

1. Volba velikosti poloměru trajektorie „ r_t “
2. Výpočet souřadnic středu kružnice, kružnice musí procházet startem i cílem
3. Součet přírůstků $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ pro obě ramena zvlášť (celkový úhel pohybu ramene robotu) – viz Obr. 70
4. Volba jiného poloměru (znovu kroky 1 až 3)
5. Maximum ze součtů přírůstků $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ určuje celkový úhel, o který je třeba pohnout ramenem robotu, aby se dostal ze startu do cíle. Čas pohybu robotu je přímo úměrný k velikosti tohoto úhlu
6. Při jakém poloměru je toto maximum nejmenší = nejkratší čas pohybu; takový poloměr trajektorie je optimální



Obr. 70 SCARA robot, natočení ramen φ_1 a φ_2 , trajektorie pohybu

5.4 Čas pohybu mezi body A a B

Výsledný nejkratší čas pohybu robotu (tj. čas pohybu po ideální trajektorii) pro úsek AB byl na základě výpočtů (viz Příloha 3) stanoven na **0,51 sekundy** pro maximální zrychlení 100 % a **2,24 sekundy** pro zrychlení omezené na 30 % maximální hodnoty.

Podrobný výpočet pro úsek „AB“ je uveden v Příloze 3.

5.5 Čas pohybu mezi body B a C

Následující výpočty slouží pro výpočet nejkratšího času pohybu ramen SCARA robotu v úseku z bodu B (pomocný bod) do bodu C (místo strojního pneumatického svěráku ve výrobním stroji). V prvním kroku je na základě výpočtu přírůstků úhlů stanovena optimální trajektorie pohybu, na níž je čas pohybu robotu nejkratší. Ve druhém kroku je pak proveden výpočet tohoto minimálního času pohybu z B do C.

5.5.1 Výpočet přírůstků úhlů pro zvolenou trajektorii

Výpočet přírůstků $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ je ukázán pro optimální poloměr trajektorie v úseku „BC“. Stejný postup byl experimentálně aplikován u obou úseků („AB“ i „BC“), postupně od minimálního poloměru až po zvolený maximální.

Vstup:

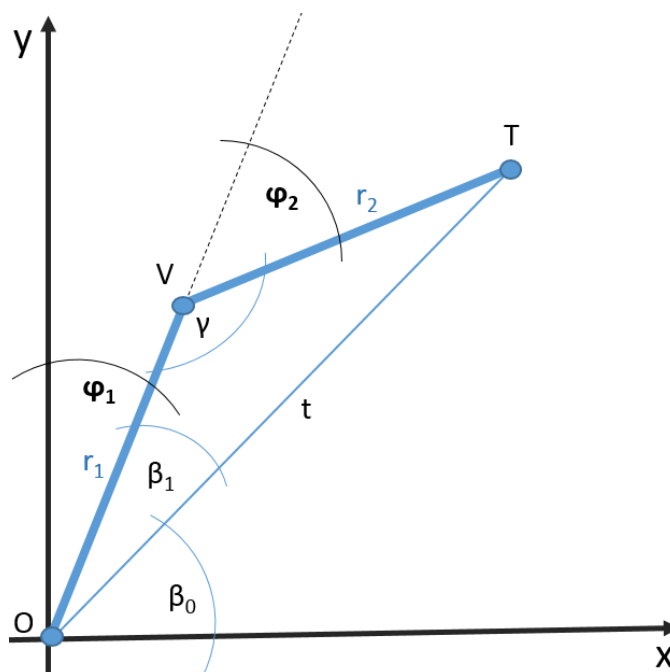
$y_{T0} = 739$ mm	Souřadnice ve směru „y“ od počátku ⁵ – osa rotace ramena 1
$r_1 = 450$ mm	Délka prvního ramene robotu
$r_2 = 450$ mm	Délka druhého ramene robotu
$r_t = 478$ mm	Poloměr kružnice – mění se pro jednotlivé trajektorie

Výstupy:

β_0 [°]	Úhel mezi stranami „x“ a „t“
β_1 [°]	Úhel mezi stranami „t“ a „r ₁ “
γ [°]	Úhel mezi stranami „r ₁ “ a „r ₂ “
φ_1 [°]	Úhel natočení prvního ramene robotu od osy „y“
φ_2 [°]	Úhel natočení ramene 2 od ramene 1 „r ₁ “
$x_{T0} = 114,5$ mm	Souřadnice ve směru „x“ od počátku – osa rotace ramene 1

⁵ Počátek souřadného systému je zvolen v ose první rotační osy SCARA robotu.

Tato hodnota je dopočítaná podle rovnice kružnice s posunutým středem.



Obr. 71 Ramena SCARA robotu v rovině XY, rozměry použité ve výpočtu

Souřadnice y_{T0} je volena od 739 mm („y“ souřadnice bodu C) až do 244 mm („y“ souřadnice bodu B) po krocích 1 mm a souřadnice x_{T0} je počítána podle funkce pro kružnici.

Rovnice kružnice, se středem v souřadnicích [m,n]:

$$r_t^2 = (x - m)^2 + (y - n)^2 \quad (8)$$

Souřadnice středu „m“ a „n“ jsou zjištěny díky náčrtu v CAD programu, kružnice o zadaném poloměru „ r_t “ je zavazbená tak, aby procházela startovním (bod C) a cílovým bodem (B) pohybu. Její souřadnice středu jsou následně odečteny pomocí kót.

$$m = 18,746 \text{ mm}$$

$$n = 270,687 \text{ mm}$$

Výpočet souřadnice x_{T0} :

$$\begin{aligned} x_{T0} &= \sqrt{r^2 - (y_{T0} - n)^2} + m = \sqrt{478^2 - (739 - 270,687)^2} + 18,746 \\ &= 114,45 \text{ mm} \end{aligned} \quad (9)$$

Následuje výpočet velikosti jednotlivých úhlů dle **kosinové věty**. Alternativou ke kosinové větě je výpočet přes inverzní kinematiku. Tu je nutno použít pro složitější kinematické struktury. Schéma kinematického řetězce SCARA robotu a transformační matice jsou uvedené v Příloze 5.

$$\beta_0 = \arctg \frac{y_{T0}}{x_{T0}} = \arctg \frac{739}{114,45} = 81,19^\circ \quad (10)$$

Pro další výpočty je nezbytné spočítat délku „t“ – délka úsečky mezi body O a T

$$t = \sqrt{x_{T0}^2 + y_{T0}^2} = \sqrt{114,45^2 + 739^2} = 747,81 \text{ mm} \quad (11)$$

$$\beta_1 = \arccos \frac{r_1^2 + t^2 - r_2^2}{2 \cdot r_1 \cdot t} = \arccos \frac{450^2 + 747,81^2 - 450^2}{2 \cdot 450 \cdot 747,81} = 33,81^\circ \quad (12)$$

$$\gamma_1 = \arccos \frac{r_1^2 + r_2^2 - t^2}{2 \cdot r_1 \cdot r_2} = \arccos \frac{450^2 + 450^2 - 747,81^2}{2 \cdot 450 \cdot 450} = 112,38^\circ \quad (13)$$

Úhly natočení ramen robotu, spočítané z předchozích vzorců:

$$\varphi_1 = 90^\circ - \beta_0 - \beta_1 = 90^\circ - 23,50^\circ - 57,79^\circ = -25,00^\circ \quad (14)$$

$$\varphi_2 = 180 - \gamma_1 = 180^\circ - 64,41^\circ = 67,62^\circ \quad (15)$$

V dalším kroku se souřadnice „y“ zvětší o 1 mm (na hodnotu 738 mm) a výsledné hodnoty úhlů natočení ramen robotu jsou následující:

$$\varphi'_1 = -24,66^\circ \quad (16)$$

$$\varphi'_2 = 67,67^\circ \quad (17)$$

Velikost pohybu ramenu v jednom kroku:

$$d\varphi_1 = |\varphi_1 - \varphi'_1| = |-25,00^\circ - (-24,66)^\circ| = 0,34^\circ \quad (18)$$

$$d\varphi_2 = |\varphi_2 - \varphi'_2| = |67,62^\circ - 67,67^\circ| = 0,05^\circ \quad (19)$$

V každém kroku od $y_{T0} = 739$ až do $y_{T0} = 244$ mm (po jednom milimetru souřadnice „y“) je vypočítán přírůstek pohybu ramene robotu $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$. Výsledná suma těchto

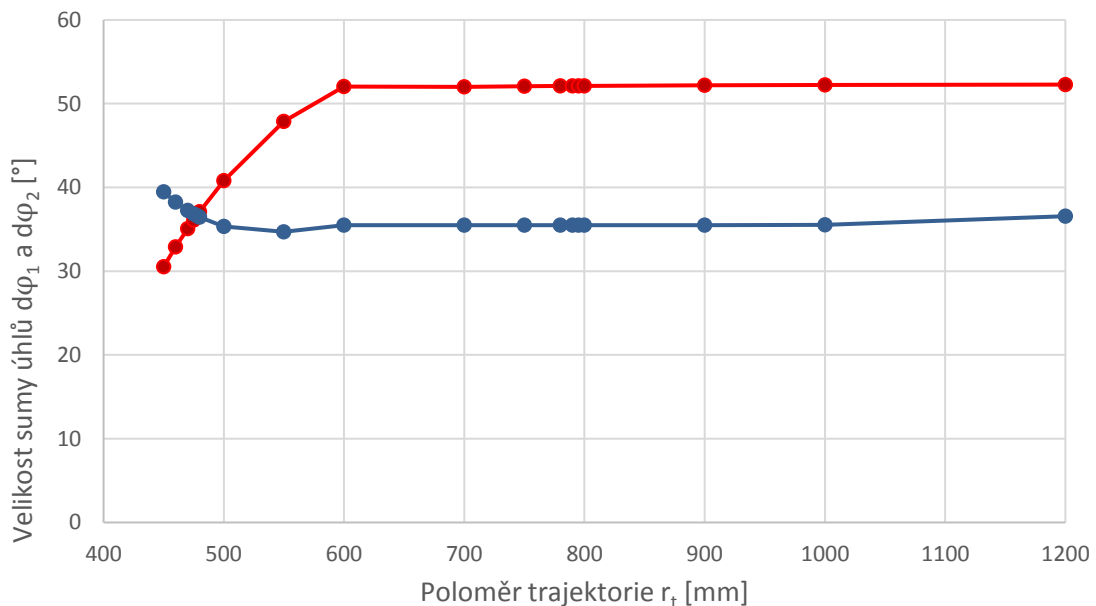
přírůstků je vyhodnocena pro následující trajektorie o poloměrech kružnice od minimálního poloměru 450 mm do 1200 mm po určitých krocích.

Celková suma přírůstků úhlů pro poloměr trajektorie $r_t = 478$ mm je $d\varphi_1 = 36,70^\circ$ a $d\varphi_2 = 36,59^\circ$.

Takto byly vypočítány všechny uvedené trajektorie typu kružnice, pro porovnání a nalezení nejmenší celkové sumy přírůstků, protože hledaný nejmenší celkový úhel pohybu robotu je ekvivalentní k času pohybu ramene.

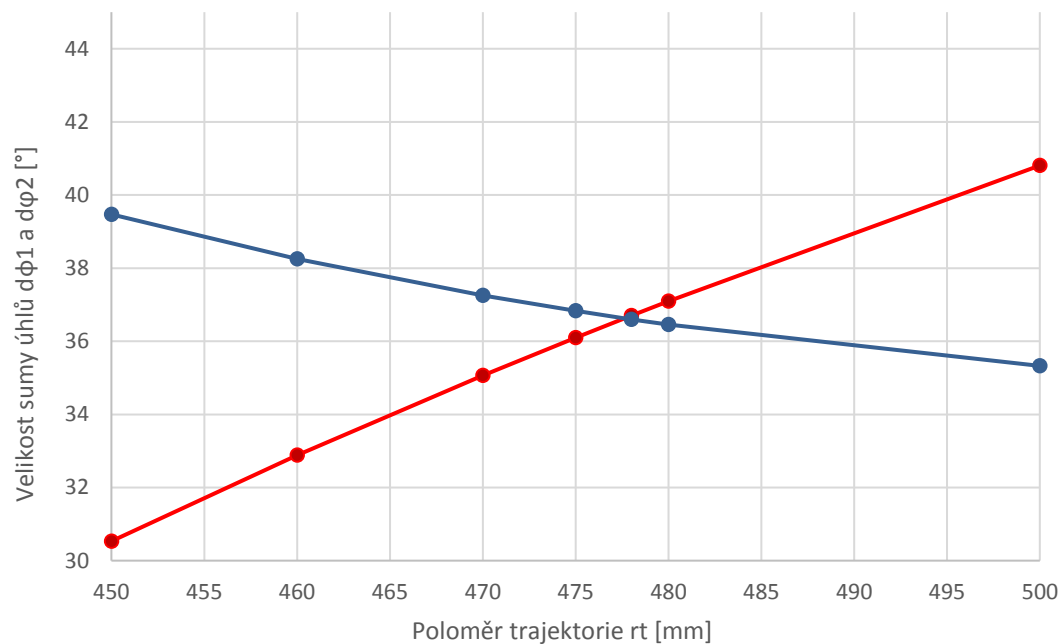
5.5.2 Určení ideální trajektorie pohybu v úseku „BC“

Pro úhly $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ platí, že jejich společné maximum určuje, jak dlouho trvá pohyb z bodu B do bodu C. Z výsledků je patrné, že nejmenší maximum z obou úhlů nastává při trajektorii o poloměru $r_t = 478$ mm. V oblasti poloměru od 600 mm do 1200 mm je suma úhlů $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ téměř konstantní. Závislost $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ na poloměru trajektorie je zobrazena na grafu níže.



Obr. 72 Suma přírůstků $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ v závislosti na poloměru trajektorie – pohyb BC

Na dalším grafu je zobrazeno místo průniku křivek $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ (při $r_t = 478$ mm), které značí optimální poloměr trajektorie, neboť je v tomto místě suma přírůstků minimální, a tím pádem je minimální i čas pohybu robotu.



Obr. 73 Detail minima sum přírůstků $d\phi_1$ a $d\phi_2$ v závislosti na poloměru trajektorie – pohyb BC

5.5.3 Výpočet nejkratšího času pohybu v úseku „BC“

Nyní je možné vypočítat čas, který trvá vykonat pohyb úchopnou hlavici z místa startu do místa cíle.

Při volbě optimální trajektorie je zadání pro výpočet následující (výpočet se 100 % hodnoty zrychlení).

$r_t = 478 \text{ mm}$	velikost poloměru optimální trajektorie
$\text{suma } d\phi_1 = 36,70^\circ = 0,64 \text{ rad}$	celková výchylka prvního ramene robotu
$\text{suma } d\phi_2 = 36,60^\circ = 0,64 \text{ rad}$	celková výchylka druhého ramene robotu
$\omega_1 = 3,27 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	úhlová rychlost prvního ramene robotu
$\omega_2 = 3,79 \frac{\text{rad}}{\text{s}}$	úhlová rychlost druhého ramene robotu
$\alpha_1 = \alpha_2 = 40,00 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2} \text{ (100 \%)}$	úhlové zrychlení prvních dvou ramen robotu ⁶

⁶ Zrychlení os SCARA robotů nelze dohledat, výrobci úhlová zrychlení os neuvádějí ani na vyžádání. Jsou ale známé hodnoty zrychlení angulárního robotu Fanuc LR Mate 200iD o podobném dosahu a nosnosti. U tohoto robotu se zrychlení pohybují v desítkách rad/s^2 , v závislosti na ose robotu. První osy mají větší momenty setrvačnosti, a tedy menší úhlová zrychlení, protože nesou hmotnost dalších os. Reálná hodnota zrychlení rotačních os SCARA robotu byla stanovena na 40 rad/s^2 .

Pohyb v úseku „BC“ – zrychlení 100 %

Čas pohybu ramene 1

Zrychlování:

Čas t_{a1} potřebný ke zrychlení na maximální úhlovou rychlost ω_1 .

$$t_{a1} = \frac{\omega_1}{\alpha_1} = \frac{3,27}{40} = 0,081 \text{ s} \quad (20)$$

Úhel φ_{ta1} , o který se rameno pohne během zrychlení z nuly na maximální rychlost.

$$\varphi_{ta1} = \frac{1}{2} \alpha \cdot t_{a1}^2 = \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 0,081^2 = 0,13 \text{ rad} \quad (21)$$

Doba zrychlování je stejná jako doba zpomalování a úhel pohybu, který je při tom vykonán je také stejný.

Úhel φ_{vk1} , který je potřeba ještě urazit:

$$\varphi_{vk1} = d\varphi_1 - (2 \cdot \varphi_{ta1}) = 0,64 - (2 \cdot 0,13) = 0,38 \text{ rad} \quad (22)$$

Čas t_{vk1} pohybu konstantní rychlostí:

$$t_{vk1} = \frac{\varphi_{vk1}}{\omega_1} = \frac{0,37}{3,27} = 0,11 \text{ s} \quad (23)$$

Celkový čas t_{cel1} pohybu prvního ramene robotu:

$$t_{cel1} = 2 \cdot t_{a1} + t_{vk1} = 2 \cdot 0,081 + 0,11 = \mathbf{0,28 \text{ s}} \quad (24)$$

Čas pohybu ramene 2

Stejným postupem byl spočítán celkový čas pro pohyb druhého ramene. Vyšla hodnota času:

$$t_{cel2} = 2 \cdot t_{a2} + t_{vk2} = 2 \cdot 0,09 + 0,07 = \mathbf{0,25 \text{ s}} \quad (25)$$

Vzhledem k tomu, že obě ramena robotu vykonávají pohyb současně, je tedy důležitá maximální hodnota z obou celkových časů. Čas pohybu robotu z bodu B do C trvá 0,28 sekundy, při uvažování pohybu bez polotovaru, kdy jsou zrychlení nastavena na 100 %.

Pohyb v úseku „BC“ – zrychlení 30 %

Zrychlení os robotu je sníženo, pokud robot nese břemeno. V případě, že robot nese maximálních 6 kg, je zrychlení dle informací výrobce omezeno na 30 % maximální hodnoty. Toto platí pro první a druhou osu robotu. Vstupní hodnota pro výpočty času pohybu je tedy pouze 12 rad/s^2 . Výpočet byl proveden stejným postupem jako pro 100% zrychlení.

Čas pohybu robotu z B do C (i naopak), s uchopeným obrobkem je 1,92 sekundy. Z výpočtu plyne, že omezení hodnoty zrychlení velice ovlivňuje čas pohybu.

Pohyb osy Z – zrychlení 100 %

Byl spočítán i čas posuvného pohybu, kdy je vysouvána poslední osa „Z“. Plná výchylka 450 mm trvá **0,33 sekundy**. Při pohybu maximálním zrychlením.

Tab. 14 Výpočet času pohybu osy Z

Výpočet času pohybu v ose „Z“ nahoru/dolů			
Maximální zrychlení (100 %)			
délka pohybu	z	0,45	m
rychlost pohybu	v_z	2,00	m/s
zrychlení osy „Z“	a_z	20,00	m/s^2
čas zrychlování	t_a	0,10	s
čas pohybu konstantní rychlostí	t_v	0,13	s
čas zpomalování	t_a	0,10	s
dráha ujetá při zrychlení	s_{ta}	0,10	m
dráha ujetá konstantní rychlostí	s_{vk}	0,25	m
celkový čas pohybu osy „Z“	t_z	0,33	s

Pohyb osy Z – zrychlení 70 %

Pro pohyb třetí osy robotu (osa „Z“) je zrychlení při maximálním zatížení limitováno na 70 % hodnoty maximálního zrychlení (14 m/s^2). Hodnota maximálního zrychlení je 20 m/s^2 . Doba pohybu je 0,37 sekundy.

5.6 Výpočet celkového času cyklu robotu

Jak již bylo uvedeno, celkový čas pohybu se skládá z jednotlivých pohybů robotu a také technologických časů, mezi kterými jsou časové prodlevy. Technologické časy byly určeny na základě informací o jednotlivých komponentech, časy prodlev byly odhadnuty dle pozorování jiných systémů AVO. Časy pohybu robotu byly vypočítány (viz kapitoly výše) a jsou souhrnně uvedeny v tabulce 15.⁷

Tab. 15 Vypočítané časy pohybů v úsecích AB, BC a v ose „Z“

Pohyby robotu	Čas	
pohyb AB nebo BA 100% zrychlení	0,51	s
pohyb AB nebo BA 30% zrychlení	2,24	s
pohyb BC nebo CB 100% zrychlení	0,28	s
pohyb BC nebo CB 30% zrychlení	1,92	s
pohyb v Z ose 100% zrychlení	0,33	s
pohyb v Z ose 70% zrychlení	0,37	s

Níže je uvedena tabulka 16, která uvádí rozpis všech úkonů v jednom pracovním cyklu seřazených chronologicky za sebou, včetně doby trvání.

⁷ Pohyby čtvrté osy (natáčení úchopné hlavice) podle osy „Z“ nebyly počítány, vzhledem k vysoké rychlosti otáčení této osy a malému úhlu pootočení jsou pohyby čtvrté osy robotu nevýznamné. Navíc jsou konány během polohování robotu v rovině „XY“, takže neprodlužují celkový čas cyklu.

Tab. 16 Časy jednotlivých úkonů v pracovním cyklu

Start pracovního cyklu		
• Otevření automatických dveří výrobního stroje	2,00	s
• Pohyb z domovské polohy A robotu do bodu B	0,51	s
• Pohyb do bodu C nad stůl OS	0,28	s
• Polohování níže do správné výšky osou „Z“	0,33	s
• Otevření pneumatického svěráku	1,00	s
• Sevření úchopné hlavice	0,07	s
• Prodleva	0,50	s
• Polohování výše osou „Z“	0,37	s
• Pohyb do bodu B, aby nenastala kolize s dveřmi stroje	1,92	s
• Pohyb do bodu A nad zásobník, na danou prázdnou polohu	2,24	s
• Polohování níže do správné výšky osou „Z“	0,37	s
• Otevření úchopné hlavice	0,07	s
• Polohování výše osou „Z“	0,33	s
• Nastavení polohy, příjezd k jiné pozici polotovaru, bod A	0,28	s
• Polohování níže do správné výšky osou „Z“	0,33	s
• Zavření úchopné hlavice	0,07	s
• Polohování výše osou „Z“	0,37	s
• Prodleva	0,50	s
• Pohyb do bodu B, aby nenastala kolize s dveřmi stroje	2,24	s
• Pohyb nad stůl obráběcího stroje, bod C	1,92	s
• Polohování níže do správné výšky osou „Z“	0,37	s
• Otevření úchopné hlavice	0,07	s
• Prodleva	0,50	s
• Sevření pneumatickým svěrákem	1,00	s
• Prodleva	0,50	s
• Polohování výše osou „Z“	0,33	s
• Pohyb z bodu C do B, aby nenastala kolize s dveřmi stroje	0,28	s
• Pohyb do bodu A	0,51	s
• Zavření automatických dveří výrobního stroje	2,00	s
Konec pracovního cyklu		
Délka pracovního cyklu celkem	21,23	s

Celková délka pracovního cyklu byla výpočtem stanovena na **21,23 sekund**. Limit 40 sekund daný zadáním práce je tedy splněn.

6 Závěr

Práce se zabývá návrhem mobilního flexibilního systému pro automatickou výměnu obrobků v malosériové výrobě. Na trhu neexistuje plně vhodný systém AVO, který by splňoval výše uvedené vlastnosti, a navíc byl levný pro pořízení a jednoduchý pro obsluhu.

Nejprve byla zpracována rešerše existujících systémů AVO. Tyto systémy byly rozčleněny do tří typů koncepcí dle uspořádání hlavních komponent (mobilní koncepty, statické a gantry) a u všech koncepcí byla popsána funkce, jejich výhody a nevýhody. Výsledkem rešerše byl výběr tří konkrétních konceptů uspořádání hlavních komponent systému AVO, které sloužily jako podklad k řešení konstrukce vlastního AVO systému. Hlavními komponentami jsou: **výrobní stroj, manipulátor a zásobník** polotovarů. Po prostudování si dostatečného množství literatury bylo přistoupeno k vlastnímu návrhu jednotlivých komponent AVO systému. Hmotnost obrobku byla určena zadáním práce a z této informace vyplývá velikost obráběcího stroje. Velikost obráběcího stroje dává požadavky na dosah manipulátoru a rozměry zásobníku.

Na začátku bylo nutné vybrat typ **obráběcího stroje**, pro který by byl AVO systém pro malosériovou výrobu vhodný, dále určit materiál a tvar obráběného polotovaru. Dle provedeného průzkumu je vhodným strojem malý frézovací stroj. V kapitole 4.3.1 je uveden konkrétní výčet frézovacích strojů, pro které je vytvořený AVO systém vhodný.

V dalším kroku byl proveden výběr **manipulátoru**. Technickými parametry, které bylo nutno dodržet, byl dosah manipulátoru a jeho nosnost. Při výběru byl kladen důraz na nízkou cenu manipulátoru, protože ta tvoří více než polovinu ceny konkurenčních AVO systémů. Na základě vícekritériálního rozhodování byl vybrán SCARA robot THL900 od výrobce Toshiba. Použití SCARA robotu má svá specifika, která ovlivňují konstrukci zásobníku. Velkou výhodou použití SCARA robotu je naopak úspora financí (zhruba 300 tis. Kč) při pořízení AVO systému a jednoduchá struktura programování robotu, což je velice důležité právě pro malé výrobce, pro které je tento systém AVO navržen a určen. Na základě provedeného průzkumu byly navrženy i další potřebné periferie celého systému, konkrétně byly vybrány např. úchopná hlavice Schunk PGN-plus 100-2, adaptér pro rychlou výměnu úchopné hlavice Schunk HWA/HWK-040, správný tvar prstů úchopné hlavice a automatický pneumatický strojní svěrák Schunk KSP plus 250-BWM.

Stěžejní částí práce je vlastní konstrukce **zásobníku**. Ze třech variant byl vybrán finální koncept zásobníku, konkrétně se jedná o koncept AVO systému s výsuvnými paletami (varianta 2). Navržený zásobník umožňuje nepřetržitý provoz systému AVO, díky použití dvou pater teleskopicky výsuvných palet na dvě strany, jak k obsluze, tak k robotu. Pro možnost použití tohoto konceptu bylo nutné vyřešit problém svěšování palet na volném konci teleskopického vedení na straně u robotu. Problém byl vyřešen výsuvnou pojízdou podporou s podpěrnými koly.

Palety zaujímají celkem tři polohy, ve dvou z nich je pro správnou funkci potřeba vyřešit aretaci a snímání koncové polohy. Aretace je vyřešena aretačními odpruženými členy Haberkorn v poloze palety v zásobníku a gumovými pásky v nájezdu pro podpůrné kolo v poloze na straně u robotu. U odpružených aretačních členů lze seřizovat sílu aretace. Snímání polohy je realizováno indukčními snímači. Díky modulárnímu rámu zásobníku z profilů Alutec KK je možno aretaci i snímání polohy seřídít tak, aby správně fungovaly. Krytování pracovního prostoru je tvořeno ohraněnými nerezovými plechy, připevněnými co nejmenším počtem spojovacích součástí na rám zásobníku. Jeden segment krytování lze jednoduše demontovat pomocí zámků na kliku pro rychlý přístup do pracovního prostoru robotu. Jednoduchost používání AVO systému zvyšuje důmyslně navržený připojovací konektor, který fyzicky, komunikačně a energeticky propojí zásobník AVO s výrobním strojem. Funkce zajištění konektoru je automatická, se zásobníkem je nutno pouze najet do konektoru umístěného ve stojanu u výrobního stroje. Při dostatečném zasunutí konektoru se aktivuje pneumatický nulový upínač Haberkorn a zásobník je následně fyzicky propojen s výrobním strojem.

Výhodou vytvořeného AVO systému je dobrá skladnost, kdy v pracovním režimu zabírá zásobník plochu pouze 928 x 1383 mm. V režimu transportním je zásobník složený a je na délku o 500 mm kratší (928 x 883 mm). Při manuálním obsluhování výrobního stroje se šetří cenná plocha ve výrobní hale a zásobník nepřekáží obsluze vstupující do výrobního stroje.

V rámci konstrukce zásobníku byly vytvořeny tři způsoby upínání polotovarů na paletu. Paleta by měla být co nejuniverzálnější, případně snadno modifikovatelná pro jinou velikost polotovaru. Byla navržena varianta s jednoduchou šablonou, tvořenou pouhým výpalkem s otvory pro polotovary, dále varianta ideální pro ploché součásti s plechovou vidlicí, do které jsou polotovary vkládány, a poslední variantou je deska s otvory pro kolíky. Kolíky lze velice variabilně umísťovat do desky, a tvořit tak pozice pro polotovary různých tvarů a velikostí.

Pro výpočet času pracovního cyklu bylo potřeba určit čas jednotlivých pohybů robotu a časy technologických úkonů. Při určování času pohybu ramen robotu byla použita vlastní metoda optimalizace trajektorie, s cílem minimalizování času pohybu. Celkový čas pracovního cyklu byl stanoven na 21,23 sekundy. Výsledná hodnota je menší než zadaná doba pracovního cyklu (40 sekund), bod zadání je tedy splněn.

Další směr práce. Po zakoupení robotu bude k dispozici plná verze software TSPC k jeho programování. V tomto programu bude možno nastavit základní body trajektorie – bod pneumatického strojního svěráku, pomocný bod a domovský bod pro složení robotu před uvedením zásobníku do transportního režimu. Dále bude možno naprogramovat síť pozic polotovarů na paletě a trajektorii pohybu dle výpočtů optimalizace trajektorie v kapitole 5.5.

Seznamy

Seznam použité literatury

- [1] TALÁCKO, Jaroslav. Automatizace výrobních zařízení. Vyd. 2. Praha: ČVUT, 2000.
- [2] ADAMEC, Jaromír. Technologie automatizovaných výrob. Vyd. 1. Ostrava: VŠB – TU Ostrava, 2006.
- [3] DUŠÁK, Karel. Prostředky automatizované montáže: (druhy a dopravníky). Liberec: Technická univerzita v Liberci, 2010.
- [4] ANDRLÍK, Vladimír a kol. Průmyslové roboty a manipulátory. Interní učební text na Ú12135 FS ČVUT. 2013.
- [5] Automatická výměna obrobku. MM Průmyslové spektrum [online]. 2014, 2014(Speciál), 274-277 [cit. 2018-12-08]. Dostupné z: https://www.mmspektrum.com/content/file/CNC_ukazky_Cz/3.6.pdf
- [6] The Machine Tending Playbook [online]. Robotiq, 41 s. [cit. 2018-12-06]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/hubfs/eBooks/TheMachineTendingPlaybook.pdf?hsLang=en-ca&t=1541184520864>
- [7] Applications - Machine Tending. Universal Robots [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/applications/machine-tending/>
- [8] Universal Robots [online]. [cit. 2018-12-06] Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/>
- [9] Turn-Assist 200. RoboJob [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.robojob.eu/en/products-in-cnc-automation/robojob-turn-assist/200-14>
- [10] Agile Flex CNC Machine Tool Loading System. Agile Robotic Systems [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://agilerobotics.com/cnc-machine-tool-loading-solutions/agile-flex>
- [11] MRC Flextray [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.wbt-automation.com/mrc-flextray>
- [12] Mobilní robotická buňka poskytuje podporu při nakládání a vykládání CNC obráběcích center [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/cs-cz/odv%C4%9Btv%C3%AD/solutions-database/2017/12/solution-robotics-dannoritzer>
- [13] Robo2Go 2.generace. DMG MORI [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://cz.dmgmori.com/produkty/automatizace/manipulace-s-obrobkem/robo2go>
- [14] DC Series. Automation Within Reach [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.automationwithinreach.com/dc-series>
- [15] RC Series. Automation Within Reach [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.automationwithinreach.com/rc-series>
- [16] Schunk [online]. [cit. 2019-04-06] <https://schunk.com>
- [17] Strojírna Vrága [online]. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <http://www.strojirnavraga.cz/vyroba/>
- [18] SKOL [online]. [cit. 2019-04-08]. Dostupné z: <https://skol.cz/produkty/regulatory-transmitteru>
- [19] Alutec KK [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.aluteckk.cz/>

- [20] Rollon [online]. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.rollon.com/>
- [21] Haberkorn. [cit. 2019-05-20]. Dostupné z: <https://www.haberkorn.cz/>
- [22] Toshiba Machine [cit. 2019-05-25]. Dostupné z: <https://www.toshiba-machine.co.jp>
- [23] GOLIÁŠ, R. Inverzní kinematika. Diplomová práce. Brno, Masarykova univerzita, Fakulta informatiky, 1999.
- [24] Racks Medium. RoboJob [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.robojob.eu/en/products-in-cnc-automation/racks/medium-20>
- [25] RoboJob Tower. RoboJob [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.robojob.eu/en/products-in-cnc-automation/tower>
- [26] LPC 2400. Liebherr [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/sgp/products/gear-cutting-technology-automation/automation-systems/storage-systems/palletising-cell/details/lpc2400.html>
- [27] EKM500. Liebherr [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/can/products/gear-cutting-technology-automation/automation-systems/storage-systems/decoupling-module/details/ekm500.html>
- [28] Storage systems. Liebherr [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/gbr/products/gear-cutting-technology-automation/automation-systems/storage-systems/storage-systems.html>
- [29] PHS 750. Liebherr [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/gbr/products/gear-cutting-technology-automation/automation-systems/pallet-handling-systems/linear-pallet-handling-systems/details/phs750.html>
- [30] RLS 1500. Liebherr [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/aus/products/gear-cutting-technology-automation/automation-systems/pallet-handling-systems/rotary-loading-systems/details/rls1500.html>
- [31] KKB L. Liebherr [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/int/products/gear-cutting-technology-automation/automation-systems/conveyor-systems/plastic-chain-conveyor/details/kkbl.html>
- [32] SKB. Liebherr [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/cze/products/gear-cutting-technology-automation/automation-systems/conveyor-systems/hinged-chain-conveyor/details/sbk.html>
- [33] LP 20. Liebherr [online]. [cit. 2018-12-09]. Dostupné z: <https://www.liebherr.com/en/sgp/products/gear-cutting-technology-automation/automation-systems/gantry-robots/linear-robots/details/lp20.html>
- [34] MotoRail 7. Robotics Online [online]. [cit. 2018-12-11]. Dostupné z: <https://www.robotics.org/product-catalog-detail.cfm/Yaskawa-America-Inc/MotoRail-7/productid/2544>
- [35] DENSO Robotics. Online [online]. [cit. 2019-06-04]. Dostupné z: https://densorobotics.com/content/user_manuals/19/004828.html

Seznam obrázků

Obr. 1 Schéma automatické výměny obrobku [8]	14
Obr. 2 Rozdělení procesu výměny obrobku [5].....	15
Obr. 3 Strojní zařízení pro výměnu obrobku [5]	15
Obr. 4 Části buňky pro automatizování výměny obrobků [6]	16
Obr. 5 RoboJob Turn-Assist 200, verze s robotem, který je součástí palety [9].....	20
Obr. 6 RoboJob Turn-Assist 200, verze s robotem, který není součástí palety [9]	21
Obr. 7 Agile Flex umístěný u výrobního zařízení, výsuv šuplíku s obrobky je možný na obě strany hrazení [10]	22
Obr. 8 Agile Flex, dvě možnosti zásobníku, vlevo rozšíření o šuplíky, vpravo box pro delší tyčový materiál [10].....	22
Obr. 9 MRC Flextray s vysunutými paletami na stranu k robotu i na stranu k obsluze [11]	23
Obr. 10 MRC Flextray s rozloženým krytováním, připraveno k používání [11].....	23
Obr. 11 Vlevo zásobník DGI MORI, vpravo obráběcí stroj CTX 2500 700 [13].....	24
Obr. 12 Pohled na paletu s polotovary a obrobky spolu s dvojitou úchopnou hlavicí [13].....	25
Obr. 13 Schéma půdorysu DGI MORI Robo2Go a okolí, které je hlídáno optickým čidlem [13]	25
Obr. 14 Load & Go DC od firmy AWR, mobilní AVO systém [14].....	26
Obr. 15 Load & Go RC od firmy AWR, mobilní AVO systém [15].....	28
Obr. 16 Automatický pneumatický samostředící svěrák SCHUNK KSP plus 250-BWM [16].....	36
Obr. 17 Ukázka obrobků, pro něž je navrhovaný systém automatizace vhodný [17] [18].....	36
Obr. 18 Úchopná hlavice Schunk PGN plus-P 100-2 (bez prstů a adaptérů) [16]	40
Obr. 19 Prst chapadla Schunk [16]	41
Obr. 20 Rychloupínací adaptér pro manuální výměnu úchopných hlavic, typ Schunk HWA-040-000-000 / HWK [16].....	42
Obr. 21 Schéma pro výpočet momentů setrvačnosti jednotlivých těles	44
Obr. 22 Schéma pro výpočet momentu setrvačnosti pro kvádr [35].....	46
Obr. 23 Koncept AVO s nakloněnou plochou zásobníku a angulárním robotem	50
Obr. 24 Koncept AVO systému s výsuvnými paletami.....	51
Obr. 25 Koncept zásobníku s vodorovnou paletou a SCARA robotem	51
Obr. 26 AVO systém v pracovním režimu – pojízdná podpora (označena zeleně) vysunuta ...	53
Obr. 27 AVO systém v transportním režimu – pojízdná podpora (označena zeleně) zasunuta	54
Obr. 28 Alutec KK spojka pro kolmé spoje – šroub s válečkem 312040 [19]	55
Obr. 29 Alutec KK spojka pro kolmé spoje – úhelník 40x40 mm 304040 [19].....	55
Obr. 30 Teleskopické lineární vedení Rollon HGT080 [20].....	56
Obr. 31 Schéma zatížení vedení Rollon, pouze radiální zatížení (normálový směr působení zátěžné síly) [20]	57
Obr. 32 Teleskopické lineární vedení Rollon typ LTF-44 [20].....	57
Obr. 33 Schéma podepření vysunuté palety pomocí podpěrného kola.....	58

Obr. 34 Odpružený element Haberkorn [21].....	59
Obr. 35 Aretace palety v poloze u robotu – řez	59
Obr. 36 Aretace pojízdné podpory zámekem Southco	60
Obr. 37 Rotační zámek Southco R4	61
Obr. 38 Paleta s upínáním polotovarů pomocí plechové šablony – spodní strana, nájezd pro podpůrné kolo.....	61
Obr. 39 Pohled na zásobník ze strany obsluhy, znázornění polohy bloků s aretačními členy a snímači polohy v levé části palety.....	62
Obr. 40 Umístění bloku, ve kterém je snímač polohy a aretační člen Haberkorn.....	62
Obr. 41 Schéma polohy palet a umístění dvou indukčních snímačů polohy v zásobníku.....	63
Obr. 42 Umístění obou snímačů koncového dorazu palet.....	64
Obr. 43 Znázornění dvou poloh pojízdné podpory a umístění snímače polohy	64
Obr. 44 Umístění snímače polohy v konstrukci, umístění bloku aretace; pracovní režim zásobníku – pojízdná podpora je vysunuta	65
Obr. 45 Paleta s upínáním polotovarů pomocí plechové šablony	66
Obr. 46 Paleta s upínáním plochých polotovarů – vidlice s přitlačnými lištami	67
Obr. 47 Paleta s upnutými polotovary pomocí kolíkového způsobu	67
Obr. 48 Poloha polotovaru při vkládání a skladování	68
Obr. 49 Schéma výsuvu palety ze zásobníku pomocí robotu.....	69
Obr. 50 Schéma výpočtu aretační síly F_x pro aretační elementy firmy Haberkorn [21].....	70
Obr. 51 Detail zámků krytu zásobníku	71
Obr. 52 Tříbarevná signalizační věž spolu s panelem HMI na straně zásobníku u obsluhy	72
Obr. 53 Šablony pro vkládání polotovarů na paletu, popis důležitých parametrů pro programování AVO systému.	73
Obr. 54 Referenční bod při použití kolíkového způsobu upínání polotovaru na paletě	74
Obr. 55 Ovladač Toshiba TP3000 [22].....	74
Obr. 56 Konektor na zásobníku, konektory s kolíky (piny).....	75
Obr. 57 Konektor na stojanu u výrobního stroje, konektory se zdíčkami	76
Obr. 58 Elektrické i pneumatické propojení jednotlivých komponent AVO	77
Obr. 59 Zjednodušené schéma zapojení pneumatických komponent	78
Obr. 60 Připojení zásobníku ke stojanu konektoru	78
Obr.61 Horní pohled na zásobník připojený k výrobnímu stroji; zásobník je ve složeném transportním stavu.....	79
Obr. 62 Horní pohled na zásobník připojený k výrobnímu stroji s vysunutou pojízdnou podporou	79
Obr. 63 AVO systém s vloženým polotovarem do svěráku stroje.....	80
Obr. 64 Zakládání polotovaru do svěráku - horní pohled.....	80
Obr. 65 Zakládání polotovaru do svěráku - boční pohled	81

Obr. 66 AVO systém během obrábění polotovaru, robot se nachází v domovském bodě v prostoru zásobníku, posuvné automatické dveře obráběcího stroje jsou zavřeny	82
Obr. 67 Závislost úhlové rychlosti na čase, rovnoměrně zrychlený a zpomalený pohyb s úsekem konstantní rychlosti.....	84
Obr. 68 Polohy bodů A, B, C Pro výpočet optimální trajektorie a doby pohybu robotu	85
Obr. 69 Dvě možná natočení ramen robotu pro dosažení požadovaného cílového bodu [23] ..	86
Obr. 70 SCARA robot, natočení ramen φ_1 a φ_2 , trajektorie pohybu	87
Obr. 71 Ramena SCARA robotu v rovině XY, rozměry použité ve výpočtu	89
Obr. 72 Suma přírůstků $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ v závislosti na poloměru trajektorie – pohyb BC	91
Obr. 73 Detail minima sum přírůstků $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ v závislosti na poloměru trajektorie – pohyb BC	92
Obr. 74 Manipulátor palet Liebherr PHS 750 [29]	5

Seznam tabulek

Tab. 1 Technické údaje, Load & Go DC [14]	27
Tab. 2 Technické údaje, Load & Go RC [15]	28
Tab. 3 Rozhodovací tabulka – výběr optimální varianty koncepce AVO	29
Tab. 4 Výhodnost automatizace pro jednotlivé druhy třískového obrábění	33
Tab. 5 Shrnutí volby výrobního stroje a polotovaru	37
Tab. 6 Rozměry frézovacích strojů – výška stolu a vzdálenost středu stolu od dveří stroje.....	38
Tab. 7 Výrobci SCARA robotů	39
Tab. 8 Výpočet požadované nosnosti robotu.....	43
Tab. 9 Výpočet momentu setrvačnosti těles k ose „Z“ - vstupní a výstupní hodnoty	44
Tab. 10 Výběr robotu pomocí vícekriteriálního rozhodování	47
Tab. 11 Škálování kritérií pro výběr robotu	48
Tab. 12 Hlavní technické parametry robotu THL900	48
Tab. 13 Shrnutí volby manipulátoru a příslušenství	49
Tab. 14 Výpočet času pohybu osy Z.....	94
Tab. 15 Vypočítané časy pohybů v úsecích AB, BC a v ose „Z“	95
Tab. 16 Časy jednotlivých úkonů v pracovním cyklu	96

Seznam příloh

Seznam textových příloh

- Příloha 1: Statické a gantry koncepce AVO
- Příloha 2: Katalogový list robotu Toshiba THL900
- Příloha 3: Výpočet času pohybu prvních dvou ramen robotu mezi body A a B
- Příloha 4: Grafy pro určení omezení rychlosti a zrychlení pohybu os robotu Toshiba THL900 dle zatížení
- Příloha 5: Inverzní kinematika – popis mechanického řetězce

Seznam elektronických příloh

- Text práce (.pdf)
- 3D modely:
 - 3D model hlavní sestavy ASM_4450 (.stp)
 - 3D model sestavy pracoviště ASM_4443 (.stp)
- Výkresy:
 - Hlavní sestava ZÁSOBNÍK SYSTÉM AVO č.v.: ASM_4450 (.pdf)
 - Podsestava POJÍZDNÁ PODPORA č.v.: ASM_4449 (.pdf)
 - Podsestava RÁM ZÁSOBNÍKU č.v.: ASM_4448 (.pdf)
- Kusovníky:
 - Hlavní sestava ZÁSOBNÍK SYSTÉM AVO č. ASM_4450-K (.pdf)
 - Podsestava POJÍZDNÁ PODPORA č. ASM_4449-K (.pdf)
 - Podsestava RÁM ZÁSOBNÍKU č. ASM_4448-K (.pdf)

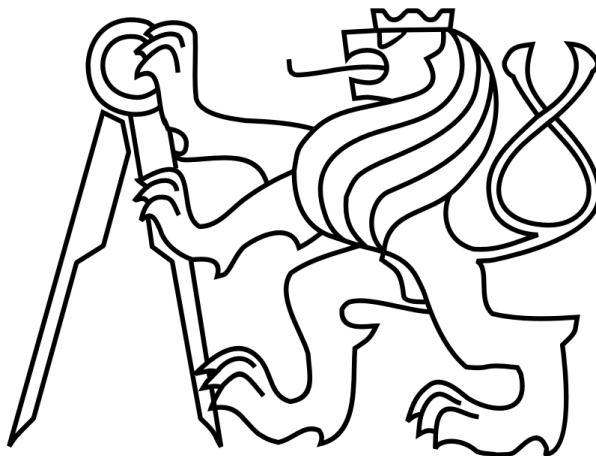
Seznam výkresové dokumentace

- Výkresy:
 - Hlavní sestava ZÁSOBNÍK SYSTÉM AVO č.v.: ASM_4450
 - Podsestava POJÍZDNÁ PODPORA č.v.: ASM_4449
 - Podsestava RÁM ZÁSOBNÍKU č.v.: ASM_4448
- Kusovníky:
 - Hlavní sestava ZÁSOBNÍK SYSTÉM AVO č. ASM_4450-K
 - Podsestava POJÍZDNÁ PODPORA č. ASM_4449-K
 - Podsestava RÁM ZÁSOBNÍKU č. ASM_4448-K

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Diplomová práce

Návrh flexibilního systému automatické výměny obrobků v malosériové
výrobě

Textové přílohy

Příloha 1: Statické a gantry koncepce AVO

A. Statické koncepce AVO

Další kategorií jsou statické koncepce. To jsou ty, kde AVO systém nelze jednoduše přemístit. Pro potřebnou flexibilitu by se následující koncepty musely upravit. Nicméně je možno se u těchto systémů inspirovat řešeními: výměny palet, umístěním ovládacího panelu a HMI, krytováním a bezpečností.

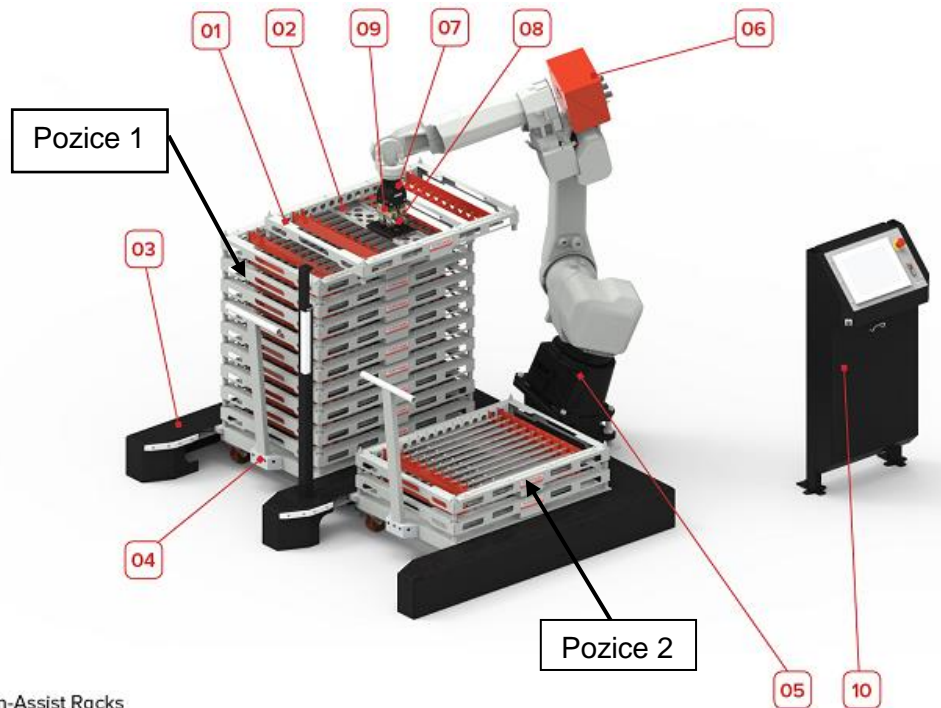
- **RoboJob Racks Medium**

Tento systém je vhodný pro malé a středně velké série výrobků, robot z výrobního zařízení vykládá výrobky do palet a tyto palety robot může celé přemísťovat. Systém je následující: z první pozice palet robot bere polotovary a vrací na tu stejnou paletu hotové výrobky. Tento postup opakuje, dokud nejsou všechny polotovary zpracovány, následně robot uchopí paletu a celou ji přemísť na druhou pozici. Takto se postupuje, dokud nejsou všechny polotovary zpracovány, následně obsluha odveze vozík s dokončenými výrobky a doveze nové nezpracované polotovary na pozici jedna.

Systém je vhodný pro polotovary do maximálního průměru 350 mm nebo délky 180 mm. RoboJob Racks Medium je vybaven robotem Fanuc o nosnosti 35 kg. [24] Rozměr regálu a nosnost robotu je určena verzí systému, výrobce nabízí tři velikosti:

- Racks small: regál velikosti $\frac{1}{4}$ europalety (nosnost robotu 12 kg / 20 kg / 35 kg)
- Racks medium: regál velikosti $\frac{1}{2}$ europalety (nosnost robotu 35 kg a více)
- Racks large: velikost regálu odpovídá ploše celé europalety (nosnost robotu 125 kg a více)

Pozn.: Europaleta má ložnou plochu rozměrů 1200x800 mm



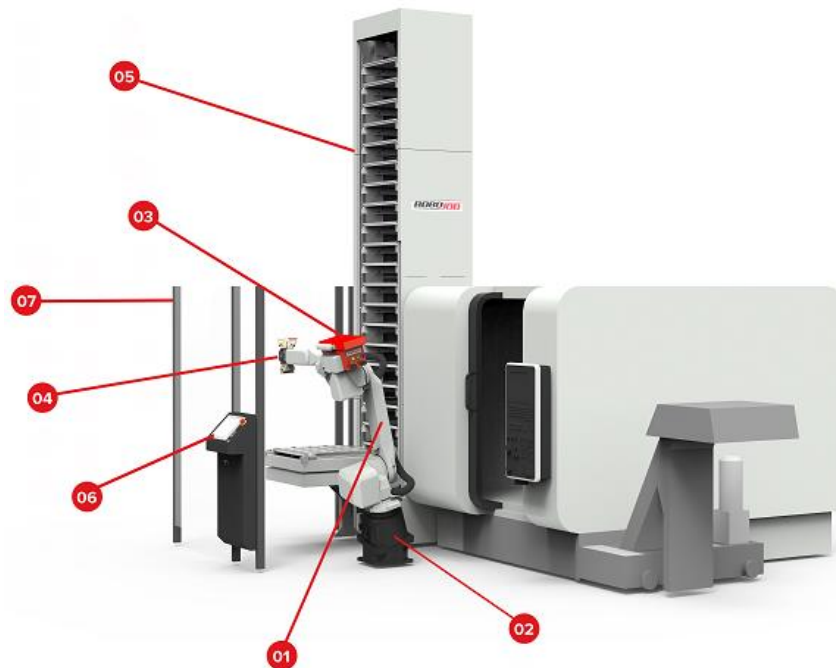
Turn-Assist Racks

Obr. P1 Regálový systém RoboJob Racks Medium [24]

(01 = Univerzální policový systém, 02 = univerzální šablony pro vkládání polotovarů, 03 = automatický zarovnávací systém, 04 = pojízdný vozík, 05 = základna robotu, 06 = jednotka kontroly uchopovací síly hlavičky robotu, 07 = úchopná hlavička krychlového konceptu, 08 = Schunk úchopná hlavička typu PGN/JGZ, 09 = RoboJob pohyblivá úchopná hlavička, 10 = RoboJob uživatelské rozhraní)

• RoboJob Tower Essential

RoboJob Tower Essential stohování polotovarů s výrobky do věže. Vhodné pro malé i velké série výrobků. Nosnost robotu: 35 kg / 50 kg / 70 kg. Možnost zakládat přímo výrobky nebo palety.[25]



Obr. P2 RoboJob Tower Essential systém ukládání polotovarů a výrobků do věže [25]

(01 = Robot Fanuc M-201A/35M, 02 = Základna robotu, 03 = jednotka kontroly uchopovací síly hlavice robotu, 04 = úchopná hlavice rychlového konceptu, 05 = skladovací věž, 06 = řídicí panel, 07 = pevná přepážka)

• Věžový paletový zásobník Liebherr EKM 500

Obrobky jsou umístěny na paletách v oddělovacím modulu a jsou k dispozici prostřednictvím výsuvných mechanismů pro portálové nebo robotové systémy, které umožňují nakládku a vykládku. V případě potřeby lze nastavit rozteč mezi paletami a volit si tak prostor pro výšku polotovaru. Integrovaný řídicí systém se standardizovaným softwarem společnosti Liebherr usnadňuje uvedení do provozu a umožňuje jednoduchou instalaci na výrobní lince. [27]



Obr. P3 Věžový paletový zásobník Liebherr EKM 500 [27]

Tab. P1 Technické údaje, Liebherr EKM 500 [27]

Velikost palety	800x800 nebo 800x1200 mm
Max. hmotnost palety s polotovary	500 kg
Využitelná výška zásobníku	6000 mm
Rychlost posuvu na prázdko	80 m/min
Rychlost posuvu s paletkou	60 m/min

• Regálový zásobník Liebherr

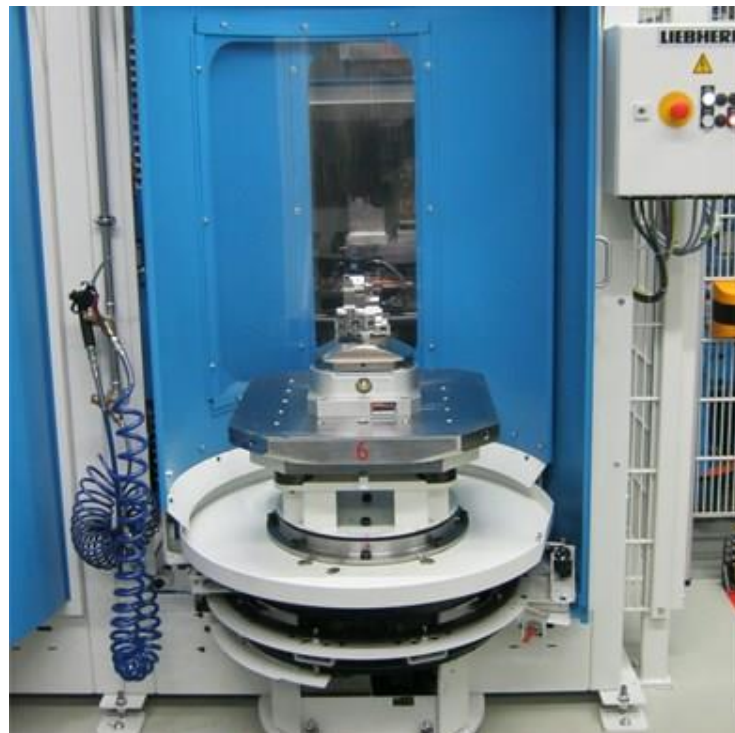
Regálový zásobníkový systém kombinuje pevné podpěry obrobku s nosným systémem portálu. Zde lze zásobník nakládat buď ze zadní strany, nebo z boční strany. Díky modulární konstrukci je možno celý systém rozšířit a v závislosti na uspořádání umožňuje ukládání na základě principu "first-in, first-out". [28]



Obr. P4 Regálový zásobník Liebherr [28]

- **Manipulátory palet Liebherr (PHS)**

K lineárnímu systému manipulace s paletami lze připojit libovolný počet strojů, které naskladňují a vyskladňují. Lineární systém se vyrábí ve třech velikostech pro přepravní zatížení od 500 kg do 13 000 kg. Konstrukce manipulátorů s vyšší nosností jsou k dispozici na vyžádání. [29] Pro ukázkou je níže uveden manipulátor palet Liebherr PHS 750.



Obr. P5 Manipulátor palet Liebherr PHS 750 [29]

Tab. P2 Technické údaje, Liebherr PHS 750

Maximální hmotnost palety	1200 kg
Maximální průměr obrobku	1000 mm
Maximální výška obrobku	1000 mm
Maximální velikost palety	630 x 630 mm
Rychlost posuvu v „X“	180 m/min
Rychlost posuvu v „Y“ (naloženo)	48 m/min
Rychlost posuvu v „Y“ (nenaloženo)	96 m/min
Rychlost posuvu v „Z“	90 m/min
Řídicí jednotka	Siemens
Jednotka buňky	SOFLEX PCS

- **Rotační manipulátory s paletami Liebherr RLS 1500**

Manipulátor je obklopen do tvaru půlkruhu policemi pro těžké palety, obdobný systém by mohl být aplikován i pro daleko menší a lehčí polotovary/obrobky. Podobné systémy jsou použity pro automatickou výměnu nástrojů. [30]



Obr. P6 Liebherr RLS 1500 [30]



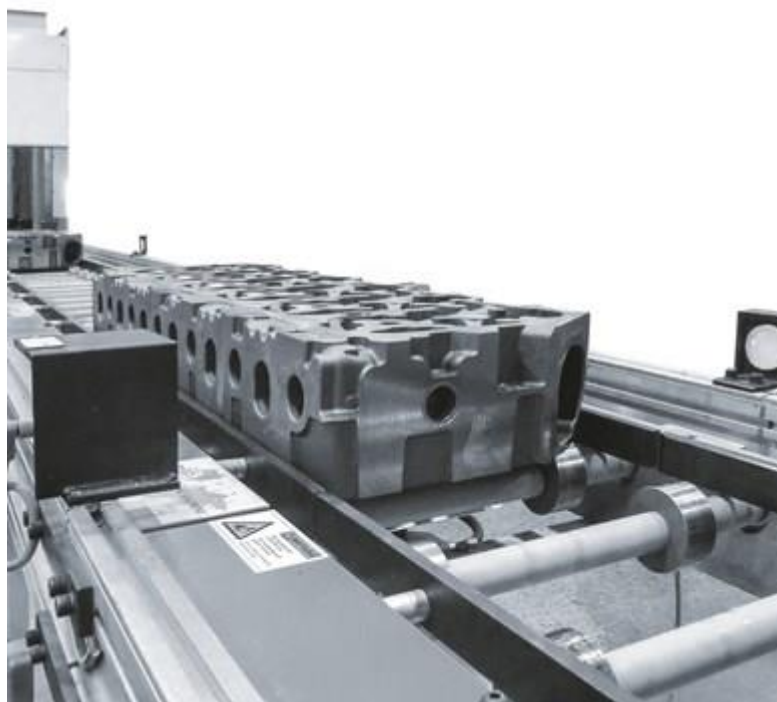
Obr. P7 Rotační systém uložště palet Liebherr RLS 1500 [30]

Tab. P3 Technické údaje Liebherr RLS 1500

Maximální hmotnost dílu	800 kg
Maximální průměr obrobku	800 mm
Maximální velikost palety	630 x 630 mm
Rychlost posuvu v „Z“	30 m/min
Rychlost posuvu v „Y“ (naloženo)	42 m/min
Rychlost posuvu v „Y“ (nenaloženo)	42 m/min
Řídicí jednotka	Siemens
Jednotka buňky	SOFLEX PCS

- **Třecí válečkový dopravník Liebherr FRB**

Válečkové dopravníky jsou vhodné pro transport větších sérií výrobků. Tento typ umožňuje transport materiálu přímo nebo na paletkách. Ve spojení s manipulátorem může jít o funkční velkokapacitní systém AVO.



Obr. P8 Třecí válečkový dopravník Liebherr FRB [30]

Tab. P4 Technické údaje, Liebherr FRB

Hmotnost polotovaru	80 kg
Délka dopravníku	0 - 6000 mm (na jeden pohon)
Rozteč rolen	110 – 140 mm
Průměr rolen	40 – 80 mm
Hmotnostní kapacita na jeden segment	2700 kg
Max. hmotnost na 1m délky dopravníku	450 kg
Pohon	Třífázový elektromotor s převodovkou
Rychlost transportu	6 m/min nebo 9 m/min

Umožňuje transport vhodných těles typu kvádr, krychle, ale i paletek.

- **Řetězový pásový dopravník plastový – Liebherr KKB L**

Řetězový pásový dopravník plastový – Liebherr KKB L umožňuje transport menších palet do hmotnosti 30 kg. Je vhodný pouze pro rotačně symetrické díly, tyto díly jsou umístěny v paletkách. Maximální délka jednoho poháněného řetězce je 10 m. [31]

Firma Liebherr vyrábí varianty řetězových dopravníků pro maximální hmotnost 30/50/150 kg (verze L/M/H).



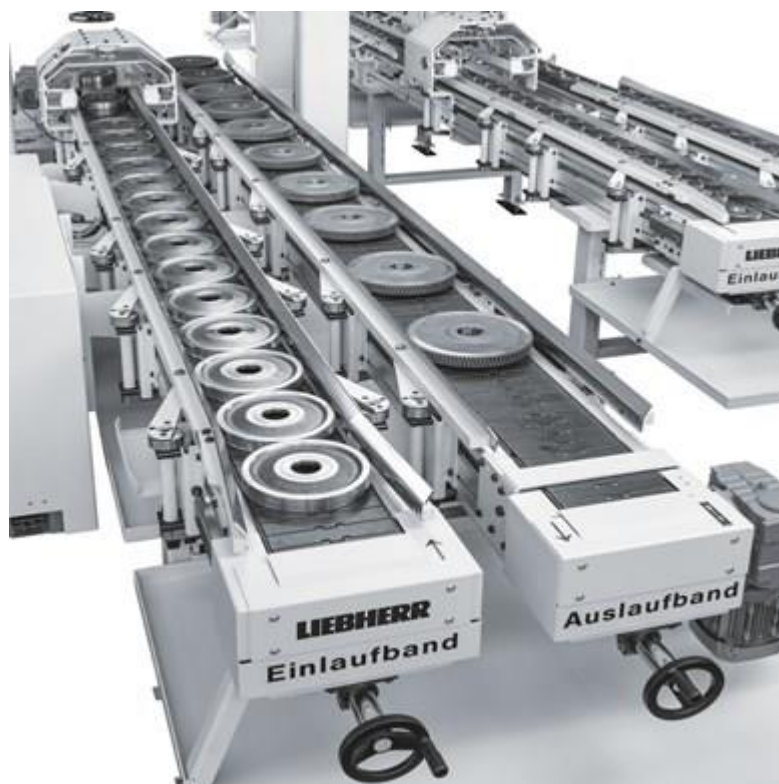
Obr. P974 Řetězový dopravník Liebherr KKB L [31]

Tab. P5 Technické údaje, Liebherr KKB L

Hmotnost polotovaru	30 kg
Umožňuje přepravu palet	ANO
Určeno pro	Rotačně symetrické díly
Délka dopravníku max.	0 – 10 000 mm na jeden pohon
Max. nosnost na jeden metr délky	300 kg
Pohon	Třífázový elektromotor s převodovkou
Rychlost transportu	6 m/min

- **Článkový dopravník s panty Model Liebherr SKB**

Dopravník SKB je vybaven plochým článkovým řetězem s panty, na tomto řetězu je přímo dopravován materiál, tudíž nepoužívá paletky. Tvar polotovaru/obrobku je v ideálním případě rotačně symetrický, případně čtvercového půdorysu. Hmotnost jednoho dílu je max. 10 kg. [32] Maximální délka poháněného článku dopravníku je 12 m. Výhodou dopravníku s článkovým řetězem je možnost řazení řetězců sériově za sebe a vytvořit tak libovolně dlouhý dopravník [3].



Obr. P10 Článkový dopravník s panty Liebherr SKB [32]

Tab. P6 Technické údaje, Liebherr SKB

Hmotnost polotovaru	10 kg
Umožňuje přepravu palet	NE
Určeno pro	Rotačně symetrické díly a kvádry
Délka dopravníku max.	0 – 12 000 mm na jeden pohon
Max. nosnost na jeden metr délky	300 kg
Pohon	Třířákový elektromotor s převodovkou
Rychlost transportu	7 m/min

B. Gantry koncepce AVO

Gantry koncepce znamená, že je pohyb robotu rozšířený o lineární osu v poloze nad výrobním strojem či na podlaze. Toto řešení eliminuje nutnost použití dopravníků a šetří tak místo na podlaze. Na druhou stranu toto řešení je finančně náročné a vyžaduje vysoký strop ve výrobní hale. Další nevýhodou je, že je potřeba mít výrobní stroje vhodně uspořádané za sebou, aby pro ně bylo možné využívat lineární pojezd manipulátoru.

• Gantry AVO Liebherr

Systém gantry robotů umístěných na vedení ve stropě haly dělí firma Liebherr na dva druhy: **lineární** a **plošný** gantry systém automatizace. [33]

Lineární gantry systém

- Lineární pohyb manipulátoru v „X“ a „Z“
- Nosnost od 40 kg do 2400 kg
- S délkou pojezdu pro určité varianty nosnosti od 12 m do 120 m
- Výška zdvihu ve svislé ose 700 mm až 2200 mm, dle varianty

Tab. P7 Technické údaje, LP20

Maximální nosnost	160	Kg
Max. nosnost při maximálním výsuvu teleskopu	110	Kg
Max. délka pojezdu v ose „X“	120	m
Zdvih ve svislé ose „Z“	2 000	mm
Max. rychlost pohybu v ose „X“	180	m/min
Zrychlení v ose „Y“	4	m/s ²
Max. rychlost pohybu v ose „Z“	120	m/min
Zrychlení v ose „Z“	5	m/s ²
Opakovatelná přesnost	± 0,1	mm



Obr. P11 Liebherr Linear Gantry systém automatizace, model LP20 [33]



Obr. P12 Liebherr Linear Gantry systém automatizace, model LP2000 [33]

Plošný gantry systém Liebherr

Modulární flexibilní systém, pohyb ve třech osách „X“, „Y“ a „Z“, s nosností od 40 kg do 1300 kg a s délkou pojezdu pro určité varianty nosnosti v ose „X“ od 12 m do 60 m a „Y“ 6 m 12 m. Výška zdvihu ve svislé ose 700 mm až 2200 mm, dle varianty. [33]



Obr. P13 Liebherr Area Gantry systém automatizace, model LPR 2000 [33]

- **Paletizační buňka Liebherr LPC 2400**

Zařízení, které skladuje palety na jednom místě. Jde o pokročilý prvek pro realizaci moderního systému AVO ve výrobě. Manipulátor se pohybuje na lineární ose v úrovni nad výrobním strojem. Palety i polotovary jsou přemísťovány pomocí manipulátoru.



Obr. P14 Sklad palet: LPC 2400 [26]

Tab. P8 Technické údaje, LPC 2400

Typ	Dvoupaletový
Velikost palety	600 x 400 mm
Transportní zařízení	Vozík
Výška naskládání palet na sebe	1000 mm
Pohon	Servomotor
Řídicí jednotka	Externí

Firma Liebherr vyrábí automatizované sklady také pro palety rozměru 800 x 600 mm.

• YASKAWA – MotoRail 7

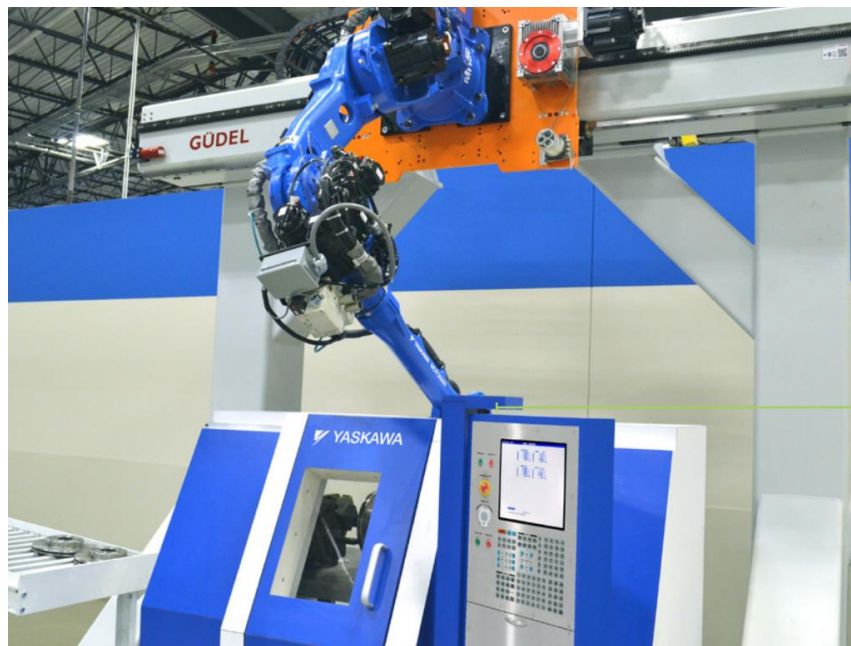
Řešení je ideální pro automatizaci vkládání a vykládání obrobků tam, kde je nutné zvětšit pracovní rozsah robotu a zároveň je šetřen cenný prostor na podlaze. Tento systém nabízí celkem 7 pohyblivých os, skládá se ze šestiosého angulárního robotu YASKAWA a lineární pohyblivé osy Güdel, po které se robot může pohybovat. Způsob automatizace je následovný: robot přijede ze stanoviště s polotovary k obráběcímu stroji. Déle robot vyloží hotový obrobek z výrobního stroje a založí nový polotovaru. S obrobkem robot přijíždí zpět na stanoviště zásobníku, kde vrátí obrobek na místo polotovaru.

Na jedné lineární ose lze provozovat dva roboty najednou, případně jednoho odstavit a s druhým manipulovat nezávisle. O správnou funkci se stará řídicí jednotka DX100 nebo DX200. [34]

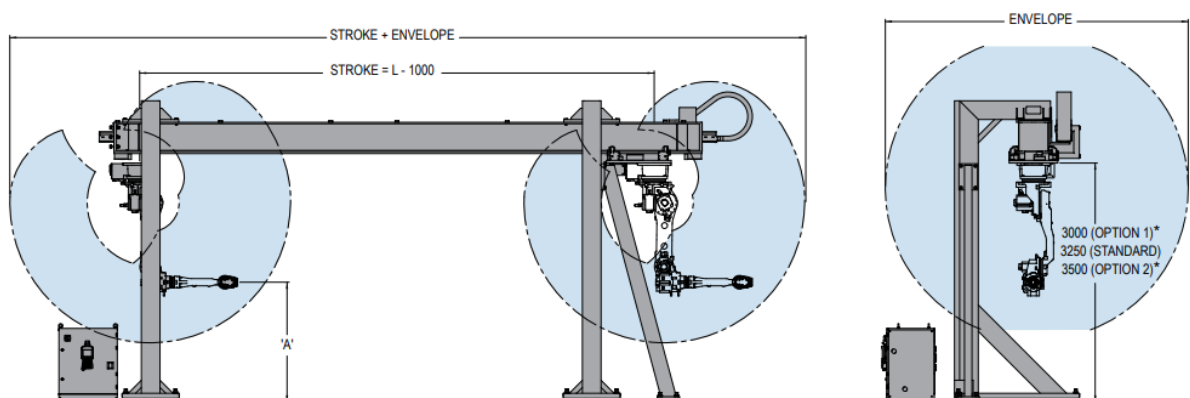
Řada velikostí, dle nosnosti robotu:

- 24 kg
- 50 kg
- 80 kg
- 200 kg

Všechny velikosti je možné objednat ve verzi od 4 do 32 metrů délky lineárního servopojezdu Güdel.



Obr. P15 Yaskawa – Motorail 7 [34]



Obr. P16 Pracovní prostor robotu Yaskawa – Motorail 7 v koncových polohách kolejnice [33]

Tab. P9 Technické údaje, Yaskawa – Motorail 7

	Jednotka	7-24*	7-50*	7-80*	7-200*
Robot	-	MH24	MH50 II, MH50 II-20, MH50 II-35	MH80 II	ES200TD (DX100)
Výška základny	mm	2500, 2750, 3000	3000, 3250, 3500	3000, 3250, 3500	3500
Max. rychlost pohybu	m/sec	2,5	2,5	2,5	1,6
Zrychlení na max. rychlost	s	1,0	0,5	0,5	0,5
Opakovatelná přesnost	± mm	0,1	0,1	0,1	0,15
Doba pro zastavení při STOP stavu	s	0,4	0,4	0,4	n/a
Max. vytížení pro cyklus	%	60	60	60	60

*Pojmenování manipulátorů se skládá z „A“-„B“, kde „A“ je celkový počet pohyblivých os a „B“ je nosnost robotu

Příloha 2: Katalogový list robotu Toshiba THL900

2. 2 Robot THL900 Standard Specifications

No	Item	Specification	Remarks
1	Type	Horizontal multi-articulation	
2	No. of controlled axes	4 axes	
3	Arm length	Full length	900(mm)
		Arm 1	450(mm)
		Arm 2	450(mm)
4	Working envelope	Axis 1	±125(deg)
		Axis 2	±145(deg)
		Axis 3	0~300(mm)
		Axis 4	±360(deg)
5	Maximum speed	Axis 1	187.5(deg/sec)
		Axis 2	217.5(deg/sec)
		Axis 3	2000(mm/sec)
		Axis 4	1700(deg/sec)
		Composite	4.6(m/sec)
6	Maximum payload mass	10 (kg)	*1
7	Standard cycle time (when transferring 2 kg)	0.48(sec)	*2
8	Permissible load inertia	0.2 (kg m ²)	*1
9	Positioning repeatability	X-Y	±0.02(mm)
		Z (axis 3)	±0.015(mm)
		C(axis 4)	±0.007(deg)
10	Drive system	AC servo motor for all axes	
11	Mass	35(kg)	
	Painting color	Arm 2: PANTONE 293C equivalent acrylic painting Body: White alumite treated Arm cover: White	*4
12	Power supply	1.4 kVA	

*1: Speed and acceleration are limited depending on motion patterns, payload mass, and offset value.

*2: Continuous operation of standard cycle motion pattern is not possible beyond the effective load ratio. (Horizontal 300 mm, vertical 25 mm, round-trip, coarse positioning)

*3: One way positioning repeatability when the environment temperature is constant at 20 degrees Celsius. Absolute position accuracy is not ensured. Positioning repeatability about X-Y and C is value in case of Z-axis upper side. Trajectory accuracy is not ensured.

*4: Painting color may vary depending on the production lot. It does not affect the quality of the product.

Robot je možno dodat i s delší třetí osou „z“, více než 300 mm.

Příloha 3: Výpočet času pohybu prvních dvou ramen robotu mezi body A a B

Následující výpočet slouží pro výpočet času pohybu ramen SCARA robotu v úseku z bodu A (zásobník) do bodu B (pomocný bod). Výpočet je ukázán pro optimální poloměr trajektorie. Stejný postup byl aplikován postupně od minimálního poloměru až po zvolený maximální.

Vstup:

$y_{T0} = 244$ mm	Souřadnice ve směru „y“ od počátku ⁸ – osa rotace ramena 1
$r_1 = 450$ mm	Délka prvního ramene robotu
$r_2 = 450$ mm	Délka druhého ramene robotu
$r_t = 100\,000$ mm	Poloměr kružnice – mění se pro jednotlivé trajektorie (každá má jiný poloměr). Tento poloměr reprezentuje téměř přímku.

Výstupy:

β_0 [°]	Úhel mezi stranami „x“ a „t“
β_1 [°]	Úhel mezi stranami „t“ a „r ₁ “
γ [°]	Úhel mezi stranami „r ₁ “ a „r ₂ “
φ_1 [°]	Úhel natočení prvního ramene robotu od osy „y“
φ_2 [°]	Úhel natočení druhého ramene robotu od předchozího ramene „r ₁ “
$x_{T0} = 496$ mm	Souřadnice ve směru „x“ od počátku – osa rotace ramene 1 Tato hodnota je dopočítaná podle rovnice kružnice s posunutým středem

Rovnice kružnice, se středem v souřadnicích [m,n]:

$$r_t^2 = (x - m)^2 + (y - n)^2$$

Souřadnice y_{T0} je volena od 244 mm („y“ souřadnice bodu B) až do -455 mm („y“ souřadnice bodu A) po krocích 1 mm a souřadnice x_{T0} je počítána podle funkce pro kružnici:

Souřadnice středu „m“ a „n“ jsou zjištěny díky náčrtu v CAD programu, kružnice o zadaném poloměru „r_t“ je zavazbená tak, aby procházela startovním výpočtu (bod B)

⁸ počátek souřadného systému je zvolen v ose první rotační osy SCARA robotu

a cílovým bodem výpočtu (A) pohybu. Její souřadnice středu jsou následně odečteny pomocí kót.

$$m = 18,746 \text{ mm}$$

$$n = 270,687 \text{ mm}$$

Výpočet souřadnice x_{T0}

$$x_{T0} = \sqrt{r^2 - (y_{T0} - n)^2} + m = \sqrt{100000^2 - (244 - (-97267))^2} + 21276,554 = 496 \text{ mm}$$

Úhly vypočítané dle kosinové věty:

$$\beta_0 = \arctg \frac{y_{T0}}{x_{T0}} = \arctg \frac{244}{496} = 26,19^\circ$$

Pro další výpočty je nezbytné spočítat délku „t“ – délka úsečky mezi body O a T

$$t = \sqrt{x_{T0}^2 + y_{T0}^2} = \sqrt{496^2 + 244^2} = 552,8 \text{ mm}$$

$$\beta_1 = \arccos \frac{r_1^2 + t^2 - r_2^2}{2 \cdot r_1 \cdot t} = \arccos \frac{450^2 + 552,8^2 - 450^2}{2 \cdot 450 \cdot 552,8} = 52,11^\circ$$

$$\gamma_1 = \arccos \frac{r_1^2 + r_2^2 - t^2}{2 \cdot r_1 \cdot r_2} = \arccos \frac{450^2 + 450^2 - 552,8^2}{2 \cdot 450 \cdot 450} = 75,79^\circ$$

Úhly natočení ramen robotu, spočítané z předchozích vzorců:

$$\varphi_1 = 90^\circ - \beta_0 - \beta_1 = 90^\circ - 26,19^\circ - 52,11^\circ = 11,65^\circ$$

$$\varphi_2 = 180 - \gamma_1 = 180^\circ - 75,79^\circ = 104,21^\circ$$

V dalším kroku se souřadnice „y“ zvětšila o 1 mm (na hodnotu 738 mm) a výsledné hodnoty úhlů natočení ramen robotu jsou následující:

$$\varphi'_1 = 11,90^\circ$$

$$\varphi'_2 = 104,39^\circ$$

Velikost pohybu ramenu v jednom kroku:

$$d\varphi_1 = |\varphi_1 - \varphi'_1| = |11,65^\circ - 11,90^\circ| = 0,25^\circ$$

$$d\varphi_2 = |\varphi_2 - \varphi'_2| = |104,21^\circ - 104,39^\circ| = 0,17^\circ$$

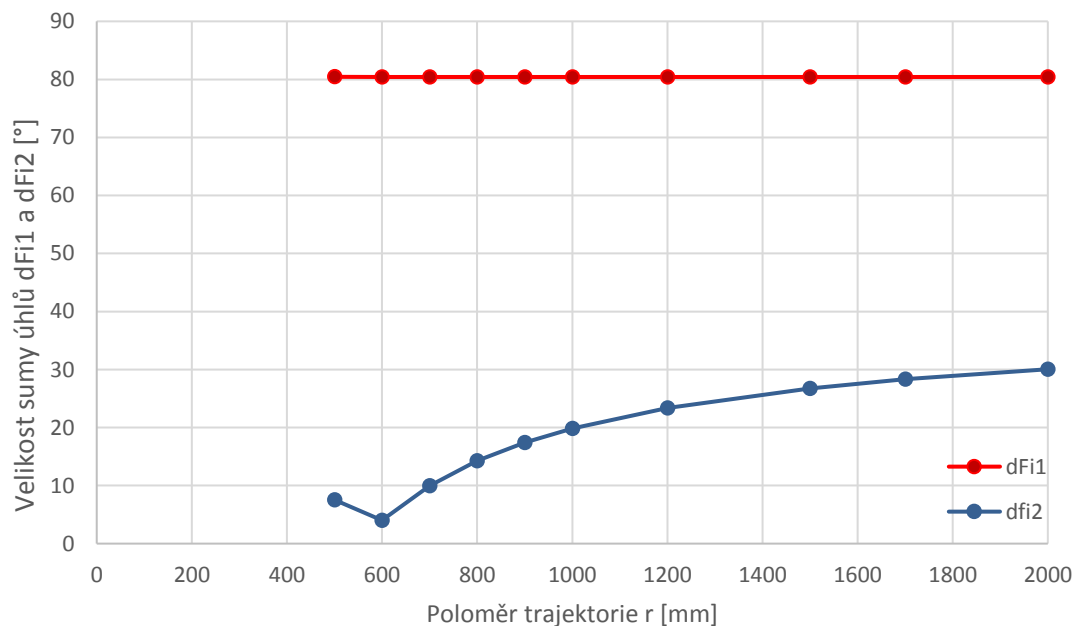
V každém kroku od $y = 244$ až do $y = -455$ mm (po jednom milimetru souřadnice „y“) je vypočítán přírůstek pohybu ramene robotu $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$. Výsledná suma těchto přírůstků je vyhodnocena pro následující trajektorie o poloměrech kružnice od minimálního poloměru 500 mm do 100000 mm po určitých krocích.

Celková suma přírůstků úhlů pro poloměr trajektorie $r_t = 100000$ mm je $d\varphi_1 = 80,40^\circ$ a $d\varphi_2 = 39,31^\circ$.

Takto byly vypočítány všechny uvedené trajektorie typu kružnice, pro porovnání a nalezení nejmenší celkové sumy přírůstků, protože hledaný nejmenší celkový úhel pohybu robotu je ekvivalentní k času pohybu ramene.

• Výsledky pro úsek „AB“

Pro úhly $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ platí, že jejich společné maximum určuje, jak dlouho trvá pohyb z bodu B do bodu C. Z výsledků je patrné, že nejmenší maximum z obou úhlů nastává při trajektorii o poloměru $r_t = 100\ 000$ mm. Ve všech případech je suma úhlu $d\varphi_2$ větší jak $d\varphi_1$. Důležitá suma úhlu $d\varphi_2$ pro výpočet času pohybu robotu se ale s velikostí oblouku trajektorie mění minimálně, z toho plyne, že délka pohybu robotu z bodu A do B a opačně, nezávisí na volbě poloměru trajektorie. Závislost $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ na poloměru trajektorie je zobrazena na grafu níže.



Obr. P17 Suma přírůstků $d\varphi_1$ a $d\varphi_2$ v závislosti na poloměru trajektorie – pohyb AB

Detail průběhu sum přírůstku $d\varphi_1$ je zobrazen na grafu níže. Změna sumy úhlu je minimální, nicméně jako optimální poloměr byla uvažována hodnota 100 000 mm.

Nyní je možné vypočítat čas, který trvá vykonat pohyb ramen z místa startu do místa cíle.

Při volbě optimální trajektorie je zadání pro výpočet následující.

$r_t = 100\,000\text{ mm}$	velikost poloměru optimální trajektorie
$\text{suma } d\varphi_1 = 80,40^\circ = 1,40\text{ rad}$	celková výchylka prvního ramene robotu
$\text{suma } d\varphi_2 = 39,31^\circ = 0,69\text{ rad}$	celková výchylka druhého ramene robotu
$\omega_1 = 3,27\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	úhlová rychlost prvního ramene robotu
$\omega_2 = 3,79\frac{\text{rad}}{\text{s}}$	úhlová rychlost druhého ramene robotu
$\alpha_1 = \alpha_2 = 40,00\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$ (100 %)	úhlové zrychlení prvních dvou ramen robotu

Pohyb AB nebo BA – zrychlení 100 %

Čas pohybu ramene 1

Zrychlování:

Čas t_{a1} potřebný ke zrychlení na maximální úhlovou rychlost ω_1 .

$$t_{a1} = \frac{\omega_1}{\alpha_1} = \frac{3,27}{40} = 0,081\text{ s}$$

Úhel φ_{ta1} , o který se rameno pohne během zrychlení z nuly na maximální rychlost

$$\varphi_{ta1} = \frac{1}{2} \alpha \cdot t_{a1}^2 = \frac{1}{2} \cdot 40 \cdot 0,081^2 = 0,13\text{ rad}$$

Doba zrychlování je stejná jako doba zpomalování a úhel pohybu, který je při tom vykonán je také stejný.

Úhel φ_{vk1} , který je potřeba ještě urazit:

$$\varphi_{vk1} = d\varphi_1 - (2 \cdot \varphi_{ta1}) = 1,40 - (2 \cdot 0,13) = 1,14\text{ rad}$$

Čas t_{vk1} pohybu konstantní rychlostí:

$$t_{vk1} = \frac{\varphi_{vk1}}{\omega_1} = \frac{1,14}{3,27} = 0,35\text{ s}$$

Celkový čas t_{cel1} pohybu prvního ramene robotu:

$$t_{cel1} = 2 \cdot t_{a1} + t_{vk1} = 2 \cdot 0,081 + 0,35 = \mathbf{0,51\text{ s}}$$

Čas pohybu ramene 2

Stejným postupem byl spočítán celkový čas pro pohyb druhého ramene. Vyšla hodnota času:

$$t_{cel2} = 2 \cdot t_{a2} + t_{vk2} = 2 \cdot 0,09 + 0,09 = \mathbf{0,28\ s}$$

Vzhledem k tomu, že obě ramena robotu vykonávají pohyb současně, je tedy důležitá maximální hodnota z obou celkových časů. Čas pohybu robotu z bodu A do B trvá **0,51 sekundy**, při uvažování pohybu bez polotovaru, kdy jsou zrychlení ramen nastavena na 100 %.

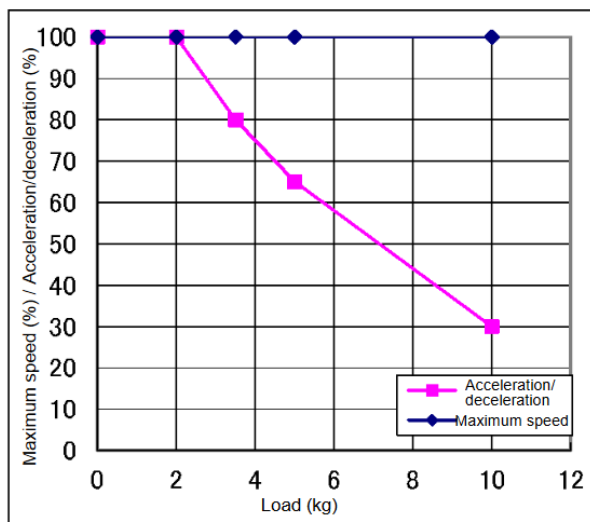
Pohyb BC nebo CB – zrychlení 30 %

Zrychlení os robotu je sníženo, pokud robot nese břemeno. V případě, že robot nese maximálních 6 kg, je zrychlení dle informací výrobce omezeno na 30 % maximální hodnoty. Toto platí pro první a druhou osu robotu. Vstupní hodnota pro výpočty času pohybu je tedy pouze 12 rad/s². Výpočet byl proveden stejným postupem jako pro 100% zrychlení.

Čas pohybu robotu z A do B (i naopak), s uchopeným obrobkem je **2,24 sekundy**.

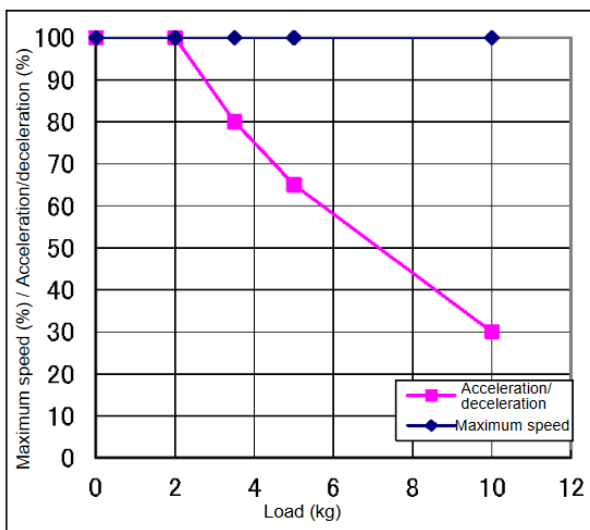
Příloha 4: Grafy pro určení omezení rychlosti a zrychlení pohybu os robotu Toshiba THL900 dle zatížení

Uvedené grafy náleží jednotlivým osám robotu.



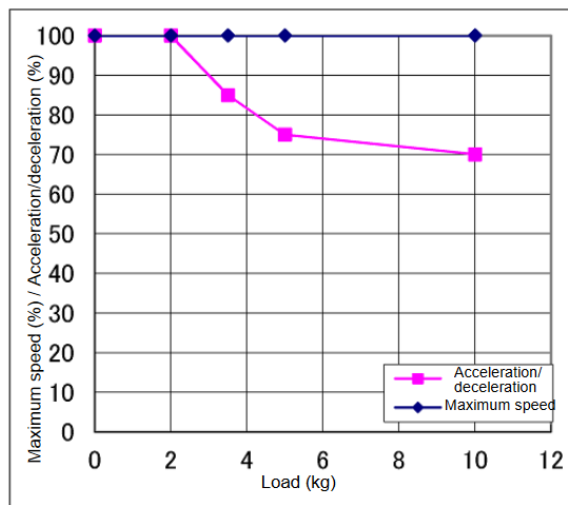
Setting of maximum speed and acceleration/deceleration in relation to load mass (Axis 1)

Obr. P18 Maximální rychlost a zrychlení dle zatížení (osa 1)



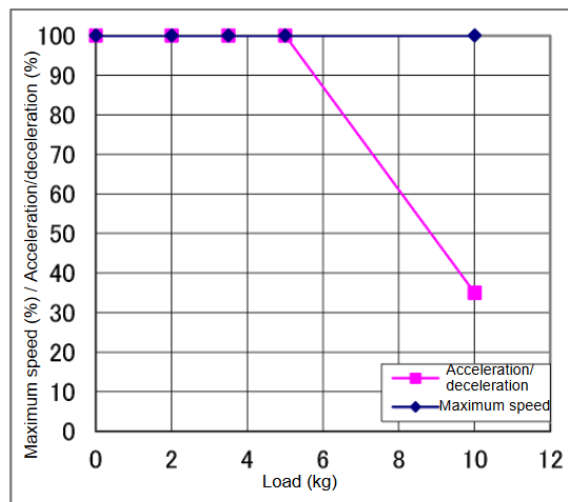
Setting of maximum speed and acceleration/deceleration in relation to load mass (Axis 2)

Obr. P19 Maximální rychlost a zrychlení dle zatížení (osa 2)



Setting of maximum speed and acceleration/deceleration in relation to load mass (Axis 3)

Obr. P20 Maximální rychlost a zrychlení dle zatížení (osa 3)



Setting of maximum speed and acceleration/deceleration in relation to load mass (Axis 4)

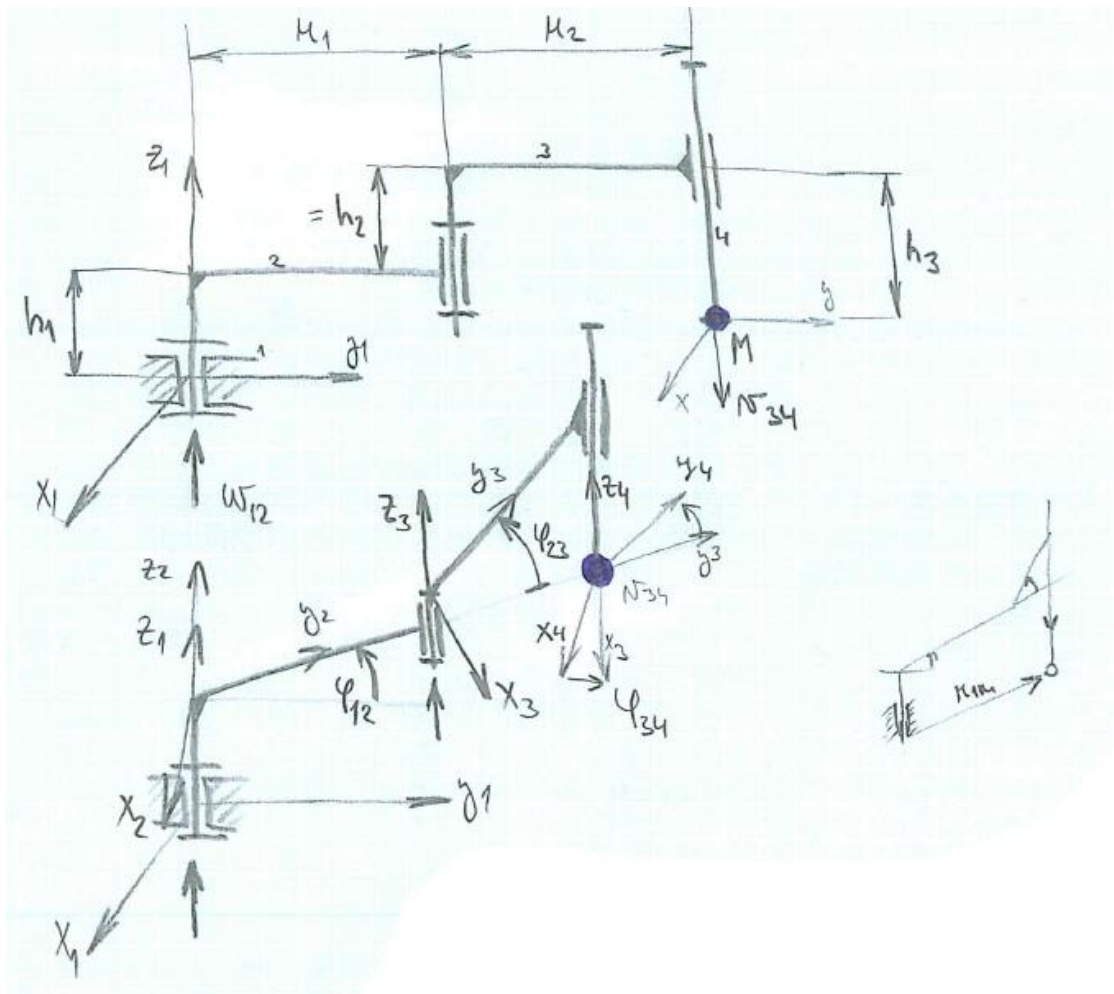
Obr. P21 Maximální rychlost a zrychlení dle zatížení (osa 4)

Příloha 5: Inverzní kinematika – popis mechanického řetězce

Jako alternativu ke kosinové větě, která byla použita pro výpočet času pohybu robotu (viz kap. 5.5), by bylo možné využít přístup s využitím inverzní kinematiky. V následujících odstavcích je představen základní přístup tohoto řešení.

Pro matematický popis polohy koncového bodu v závislosti na natočení ramen robotu byla použita inverzní kinematika ve formě maticové metody. Čtyřosý SCARA robot je mechanismus, který je vhodné popsat transformačními maticemi, protože se jedná o otevřenou kinematickou strukturu. Po provedení výpočtu lze získat z údajů o natočení ramen aktuální polohu a v případě inverzní kinematiky lze z polohy koncového bodu robotu vypočítat potřebná natočení ramen pro dosažení tohoto stavu.

SCARA robot se skládá ze čtyř těles včetně rámu. První těleso rameno „ r_1 “ je svázáno rotační vazbou k rámu a druhé těleso rameno „ r_2 “ rotační vazbou ke konci prvního ramene „ r_1 “. Na volném konci druhého ramene je válcovou vazbou připojeno třetí těleso (osa „ Z “), které koná posuvný i rotační pohyb.



Obr. P22 Kinematické schéma SCARA robotu Toshiba THL900

Počet stupňů volnosti

Každé těleso má v prostoru 6 stupňů volnosti, každá vazba mezi rámem a tělesem odebírá daný počet stupňů volnosti.

Výpočet je proveden dle následujícího vzorce:

$$n = 6(t - 1) - 3 \cdot d_{sfér} - 4 \cdot d_{válc} - 5 \cdot (d_{rot} + d_{posuv} + d_{šroub})$$

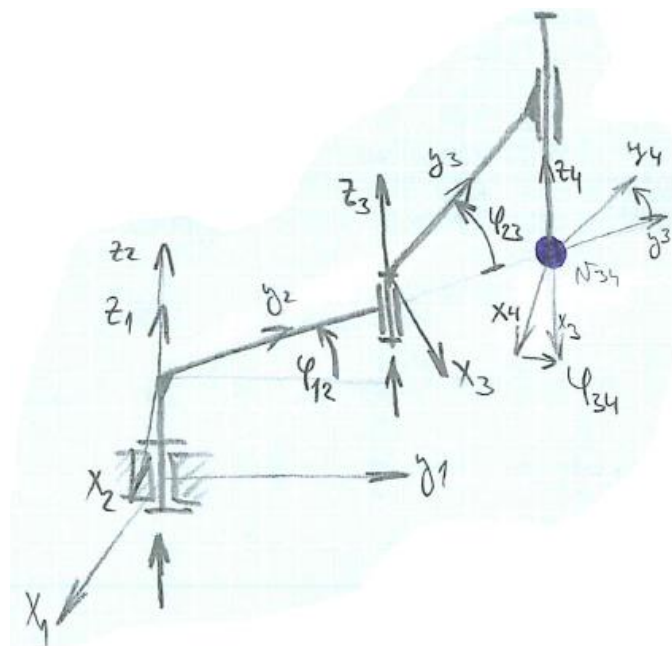
$$n = 6(4 - 1) - 3 \cdot 0 - 4 \cdot 1 - 5(2 + 0 + 0) = 18 - 4 - 10 = 4^\circ$$

Pro kinematickou strukturu SCARA robotu vychází 4 stupně volnosti. Číslo odpovídá počtu pohyblivých os robotu.

Fyzikální popis kinematické struktury

Pro další výpočty je nutné znát rozměry mechanismu, ty byly získány z katalogu SCARA robotů výrobce Toshiba THL900.

$r_1 = 450 \text{ mm}$	Délka prvního ramene robotu
$r_2 = 450 \text{ mm}$	Délka prvního ramene robotu
$h_1 = 194 \text{ mm}$	Výška spodní strany prvního ramene od plochy příruby robotu
$h_2 = 74 \text{ mm}$	Výška od spodní strany prvního ramene ke spodní straně druhého ramene
$h_3 = 50 \text{ mm}$	Vysunutí osy Z od spodní strany druhého ramene
$\varphi_{12} = [^\circ]$	Úhel natočení prvního ramene robotu od osy „y“
$\varphi_{23} = [^\circ]$	Úhel natočení druhého ramene robotu od předchozího ramene „r ₁ “
$\varphi_{34} = [^\circ]$	Úhel natočení osy Z robotu oproti druhému ramenu



Obr. P23 Obecná poloha mechanismu

Průvodič r_{1M} popisuje jako vektor směr a velikost spojnice mezi počátkem souřadného systému indexovaného jedničkou a koncovým bodem robotu „M“, který má souřadný systém označený indexem číslo čtyři.

Transformační matice

Transformační matice popisují změnu polohy mezi souřadnými systémy. Následující uvedené transformační matice jsou určeny pro popis tělesa v prostoru a lze je rozdělit na transformační matice, které posouvají souřadný systém a na ty které rotují se souřadným systémem.

Posuvné:

$T_x(x)$ znamená, že se posuneme ve směru osy „x“ (malý index „x“) o hodnotu souřadnice „x“ v závorce.

$$T_x(x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & x \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_x(y) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_x(z) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Rotací:

$$T_{\varphi_x}(\varphi_x) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos\varphi_x & -\sin\varphi_x & 0 \\ 0 & \sin\varphi_x & \cos\varphi_x & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad T_{\varphi_y}(\varphi_y) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_y & 0 & \sin\varphi_y & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ -\sin\varphi_y & 0 & \cos\varphi_y & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$T_{\varphi_z}(\varphi_z) = \begin{bmatrix} \cos\varphi_z & -\sin\varphi_z & 0 & 0 \\ \sin\varphi_z & \cos\varphi_z & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Poloha vyjádřená pomocí transformačních matic:

$$r_{1M} = T_{14}$$

$$T_{14} = T_{12} \cdot T_{23} \cdot T_{34}$$

$$T_{12} = T_{\varphi_z}(\varphi_{12}) \cdot T_z(h_1)$$

$$T_{23} = T_y(r_1) \cdot T_z(h_2) \cdot T_{\varphi_z}(\varphi_{23})$$

$$T_{34} = T_y(r_2) \cdot T_z(-h_3) \cdot T_{\varphi_z}(\varphi_{34})$$

Abychom dostali výsledek, bylo by třeba dosadit příslušné transformační matice do finálního vzorce popisující polohu bodu „M“ vůči rámu 1.

$$T_{14} = T_{\varphi_z}(\varphi_{12}) \cdot T_z(h_1) * T_y(r_1) \cdot T_z(h_2) \cdot T_{\varphi_z}(\varphi_{23}) * T_y(r_2) \cdot T_z(-h_3) \cdot T_{\varphi_z}(\varphi_{34})$$

Vyjádření souřadnic:

$$\begin{aligned}\varphi_{12} &= \varphi_{230} + \omega_{12} \cdot t \\ \varphi_{23} &= \varphi_{230} + \omega_{12} \cdot t \\ h_3 &= h_{30} + v_{34} \cdot t + \frac{1}{2} a_{34} t^2\end{aligned}$$

Rychlost vyjádřená pomocí transformačních matic:

Rychlost je vyjádřena derivací polohy:

$$\begin{aligned}\vec{v}_{14} &= \dot{r}_{1M} = \dot{T}_{14} \\ \dot{T}_{14} &= \dot{T}_{12} \cdot \dot{T}_{23} \cdot \dot{T}_{34}\end{aligned}$$

$$\dot{T}_{12} = T_{\varphi z}(\varphi_{12}) \cdot \mathbf{D}_{\varphi z}(\dot{\varphi}_{12}) \cdot T_z(h_1) * T_y(r_1) \cdot T_z(h_2) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{23}) * T_y(r_2) \cdot T_z(-h_3) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{34})$$

$$\dot{T}_{23} = T_{\varphi z}(\varphi_{12}) \cdot T_z(h_1) * T_y(r_1) \cdot T_z(h_2) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{23}) \cdot \mathbf{D}_{\varphi z}(\dot{\varphi}_{23}) * T_y(r_2) \cdot T_z(-h_3) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{34})$$

$$\begin{aligned}\dot{T}_{34} &= T_{\varphi z}(\varphi_{12}) \cdot T_z(h_1) * T_y(r_1) \cdot T_z(h_2) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{23}) * T_y(r_2) \cdot T_z(-h_3) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{34}) \cdot \mathbf{D}_{\varphi z}(\dot{\varphi}_{34}) \\ &\quad + T_{\varphi z}(\varphi_{12}) \cdot T_z(h_1) * T_y(r_1) \cdot T_z(h_2) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{23}) * T_y(r_2) \cdot T_z(-h_3) \cdot \\ &\quad \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{34}) \cdot \mathbf{D}_z(-\dot{h}_3)\end{aligned}$$

Finální vzorec pro výpočet rychlosti pohybu koncového bodu „M“.

$$\begin{aligned}\dot{T}_{14} &= T_{\varphi z}(\varphi_{12}) \cdot \mathbf{D}_{\varphi z}(\dot{\varphi}_{12}) \cdot T_z(h_1) * T_y(r_1) \cdot T_z(h_2) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{23}) * T_y(r_2) \cdot T_z(-h_3) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{34}) \\ &\quad * T_{\varphi z}(\varphi_{12}) \cdot T_z(h_1) * T_y(r_1) \cdot T_z(h_2) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{23}) \cdot \mathbf{D}_{\varphi z}(\dot{\varphi}_{23}) * T_y(r_2) \cdot T_z(-h_3) \\ &\quad \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{34}) * T_{\varphi z}(\varphi_{12}) \cdot T_z(h_1) * T_y(r_1) \cdot T_z(h_2) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{23}) * T_y(r_2) \cdot T_z(-h_3) \\ &\quad \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{34}) \cdot \mathbf{D}_{\varphi z}(\dot{\varphi}_{34}) + T_{\varphi z}(\varphi_{12}) \cdot T_z(h_1) * T_y(r_1) \cdot T_z(h_2) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{23}) \\ &\quad * T_y(r_2) \cdot T_z(-h_3) \cdot T_{\varphi z}(\varphi_{34}) \cdot \mathbf{D}_z(-\dot{h}_3)\end{aligned}$$