



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

## NÁVRH KONCOVÉHO EFEKTORU PRO ROBOTICKOU BUŇKU

DESIGN OF END EFFECTOR FOR A ROBOTIC CELL

### DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

### AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Lukáš Machala

### VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Zdeněk Tůma, Ph.D.

BRNO 2022



## Zadání diplomové práce

Ústav: Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky  
Student: **Bc. Lukáš Machala**  
Studijní program: Výrobní stroje, systémy a roboty  
Studijní obor: bez specializace  
Vedoucí práce: **Ing. Zdeněk Tůma, Ph.D.**  
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### Návrh koncového efektoru pro robotickou buňku

#### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je vytvoření konstrukčního návrhu koncového efektoru pro zvedání a ustavování kusů v rámci robotické buňky umístěné na pracovišti Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky.

#### Cíle diplomové práce:

Rešerše současného stavu poznání.  
Systémový rozbor problematiky.  
Konstrukční návrh.  
Výkresová dokumentace.  
Ekonomické zhodnocení.  
Závěr a doporučení pro praxi.

#### Seznam doporučené literatury:

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů. Vyd. 2., přeprac. a rozš. Praha: MM Publishing, 2010. MM speciál. ISBN 978-80-254-7980-3.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

---

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

Tato diplomová práce se zabývá konstrukčním návrhem koncových efektorů pro manipulaci s objekty v rámci robotické buňky umístěné na pracovišti Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky VUT v Brně. Teoretická část práce se věnuje shrnutí současného stavu poznání v oblasti koncových efektorů. Praktická část se věnuje vytvořením návrhových variant řešení, volbu optimální varianty metodou multikriteriální analýzy a konstrukci jednotlivých koncových efektorů. Součástí práce jsou jednotlivé 3D modely těchto efektorů a stojanu pro jejich uložení, rovněž práce obsahuje výkresovou dokumentaci sestav a vybraných dílů. Práce je zakončena ekonomickým zhodnocením, diskuzí nad dosaženými výsledky a závěr.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Koncový efektor, robotické pracoviště, paralelní chapadlo, vakuový ejektor, manipulace

## **ABSTRACT**

This Master's thesis deals with the design of end effectors for object manipulation within robotic cell located at the Department of Production Machines, Systems and Robotics, Brno University of Technology. The theoretical part of the work is devoted to a summary of the current state of knowledge in the field of end effectors. The practical part deals with draft of several variants of the solution, from which is chosen optimal variant by the method of multicriteria analysis, after which follows the construction of individual end effectors. The work includes individual 3D models of these end effectors and a rack for their storage, the work also includes assembly and part drawings. The work ends with an economic evaluation, discussion of achieved results and a conclusion.

## **KEYWORDS**

End effector, robotic cell, parallel gripper, vacuum ejector, manipulation



## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

MACHALA, Lukáš. *Návrh koncového efektoru pro robotickou buňku*. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/140267>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Zdeněk Tůma.





## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Zdeňkovi Tůmovi, Ph.D za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval svým rodičům za podporu, kterou mi po celou dobu mého studia poskytovali.



## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Zdeňka Tůmy, Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 20.5.2022

.....

Lukáš Machala



# Obsah

|                                                 |           |
|-------------------------------------------------|-----------|
| <b>1 Úvod</b>                                   | <b>15</b> |
| <b>2 Současný stav poznání</b>                  | <b>17</b> |
| 2.1 Technologické výstupní hlavice              | 17        |
| 2.2 Manipulační výstupní hlavice                | 18        |
| 2.2.1 Pasivní úchopné prvky                     | 18        |
| 2.2.2 Aktivní úchopné prvky                     | 19        |
| 2.3 Kombinované výstupní hlavice                | 19        |
| 2.4 Speciální výstupní hlavice                  | 20        |
| 2.5 Automatická výměna koncových efektorů       | 20        |
| 2.6 Řešení dostupná na trhu                     | 21        |
| 2.6.1 Mechanické úchopné hlavice                | 21        |
| 2.6.2 Podtlakové úchopné hlavice                | 23        |
| <b>3 Systémový rozbor práce</b>                 | <b>25</b> |
| 3.1 Problémová situace                          | 25        |
| 3.2 Formulace problému                          | 25        |
| 3.3 Formulace cílů a řešení                     | 25        |
| 3.4 Popis řešené soustavy                       | 25        |
| 3.5 Systém podstatných veličin                  | 26        |
| <b>4 Analýza stávajících koncových efektorů</b> | <b>27</b> |
| 4.1 Efektor pro manipulaci s obrobky            | 27        |
| 4.2 Efektor adaptérů průtokového připojení      | 28        |
| 4.3 Efektor pro uchopování plochých součástí    | 29        |
| <b>5 Návrhové varianty</b>                      | <b>31</b> |
| 5.1 Varianta A                                  | 31        |
| 5.2 Varianta B1                                 | 32        |
| 5.3 Varianta B2                                 | 33        |
| 5.4 Varianta C                                  | 34        |
| <b>6 Multikriteriální analýza</b>               | <b>35</b> |
| 6.1 Parametry hodnocení                         | 35        |
| 6.2 Přiřazené váhy parametrům                   | 36        |
| 6.3 Hodnocení varianty A                        | 37        |
| 6.4 Hodnocení varianty B1                       | 38        |
| 6.5 Hodnocení varianty B2                       | 39        |

|           |                                               |           |
|-----------|-----------------------------------------------|-----------|
| 6.6       | Hodnocení varianty C                          | 40        |
| 6.7       | Výběr varianty                                | 41        |
| <b>7</b>  | <b>Návrh konstrukce koncových efektorů</b>    | <b>43</b> |
| 7.1       | Efektor pro manipulaci s obrobkem             | 43        |
| 7.2       | Efektor pro manipulaci s průtokovým adaptérem | 49        |
| 7.3       | Efektor pro manipulaci s akrylátovými skly    | 55        |
| <b>8</b>  | <b>Výkresová dokumentace</b>                  | <b>61</b> |
| <b>9</b>  | <b>Ekonomické zhodnocení</b>                  | <b>63</b> |
| <b>10</b> | <b>Zhodnocení a diskuze</b>                   | <b>65</b> |
| 10.1      | Možné pokračování                             | 65        |
| 10.2      | Využití v praxi                               | 66        |
| <b>11</b> | <b>Závěr</b>                                  | <b>67</b> |
|           | <b>Literatura</b>                             | <b>69</b> |
|           | <b>Seznam symbolů a zkratk</b>                | <b>73</b> |

# 1 Úvod

Koncový efektor je pracovní ústrojí, které je připevněno na konec kinematického řetězce průmyslových robotů nebo manipulátorů. Je tak nezbytným prvkem v oblasti automatizace procesů a návrhů robotických buněk. Cílem této diplomové práce je návrh koncových efektorů pro manipulační úlohy na pracovišti Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky.

V první části diplomové práce je provedeno shrnutí současného stavu poznání v oblasti koncových efektorů. Tato rešeršní část se zabývá jejich základním rozdělením a funkcí, v poslední části této rešerše byl zpracován přehled současných řešení, které jsou na trhu dostupná a jejich porovnání.

V další části je proveden systémový rozbor práce a analýza stávajícího řešení koncových efektorů na pracovišti, které vychází z představení pracoviště a problematiky vedoucím práce. Na základě těchto bodů byly vypracovány návrhové varianty, které byly vyhodnoceny multikriteriální analýzou.

Poslední část práce se zabývá konstrukčním návrhem vybrané varianty, ten vychází z rešerše dostupných produktů na trhu a jejich následnou aplikací ve finálním řešení, která se opírá o výpočty jednotlivých funkčních uzlů potřebných pro správné a bezpečné fungování koncového efektoru. Práce končí stanovením pořizovací ceny a diskuzí nad dosaženými výsledky.





## 2 Současný stav poznání

Koncový efektor je pracovní ústrojí, které je připevněno na konec kinematického řetězce průmyslových robotů a manipulátorů, jehož cílem je vykonávat především tyto činnosti [1]:

1. vkládání objektů do pracovního prostoru výrobních zařízení a jejich vyjímání
2. mezioperační manipulace
3. technologické operace
4. kontrolní operace
5. speciální práce

Koncové efekторы můžeme dále rozlišovat na základě jejich konstrukce:

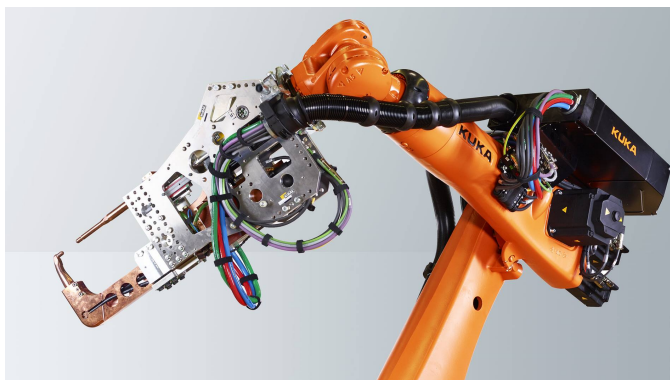
- technologické
- manipulační
- kombinované
- speciální [2]

### 2.1 Technologické výstupní hlavice

Technologickými operacemi pro průmyslové roboty se rozumí takové operace, jež může robot vykonávat sám pomocí uzpůsobeného nástroje nebo stroje. Typickým příkladem takové operace je elektrické svařování nebo nanášení nátěrových a ochranných hmot [3].

Technologické výstupní hlavice můžeme dále dělit na:

- tavné elektrické svařování
- stříkání ochranných a nátěrových hmot
- obrábění nářadí uzpůsobeného obsluhou
- montážní práce



Obr. 2.1: Svařovací technologická hlavice [10].

## 2.2 Manipulační výstupní hlavice

Pro další manipulování s objekty nám slouží manipulační výstupní hlavice. Jsou navrhovány pro konkrétní aplikace jednotlivými uživateli průmyslových robotů. Části hlavic, které přichází bezprostředně do styku s přenášenými objekty můžeme dále dělit podle charakteru tohoto styku na úchopné hlavice [1]:

- mechanické
- magnetické
- podtlakové

Současně tyto úchopné prvky můžeme dělit na aktivní a pasivní. Na rozdíl od aktivních prvků, nemůžou pasivní úchopné prvky ovládat uchopovací sílu. Takové hlavice jsou schopny objekt uchopit, ale k jeho uvolnění je zapotřebí vnějšího zásahu [3].

### 2.2.1 Pasivní úchopné prvky

Pasivní úchopné prvky představují takové hlavice, které nejsou schopny ovládat velikost uchopovací síly, hlavice vytvořené pouze z takovýchto prvků jsou schopny objekt uchopit, ale pro jeho uvolnění je zapotřebí vnějšího zásahu.

Pasivní úchopné prvky můžeme rozdělit do tří kategorií. První kategorií jsou pasivní prvky mechanické, ty využívají jednoduchých konstrukcí nebo vlastností materiálu pro vyvolání uchopovací síly. Takovou konstrukcí můžou být například odpružené čelisti s kladkou, které jsou k sobě vázány ozubeným soukolím. Při dopředném pohybu robotu a vyvinutím síly na kladku je způsobeno rozevření čelistí. Uchopení objektu nastává při zpětném pohybu robotu, kdy pro ustálení uchopovací síly je využita pružina mezi čelistmi.

Další kategorií jsou pasivní prvky podtlakové, které využívají vytvoření podtlaku pomocí pružné deformace přísavky. Takto vytvořená uchopovací síla pak závisí na styčné ploše přísavky a objektu manipulace a na tuhosti přísavky. Pro bezpečné uchopení předmětu je nezbytná vysoká těsnost styku, která závisí na hladkém a kvalitním povrchu.

Nejjednodušší formou pasivních manipulačních hlavic, jsou ty s magnetickými prvky, které využívají permanentních magnetů. Ty jsou rozmístěny v závislosti na uchopované součásti a požadované velikosti uchopovací síly. Jejich předností je jednoduchá konstrukce. Pro oddělení manipulovaného objektu od takové hlavice je nutné stažení spolu komunikujícím zařízením nebo využitím dorazu [1].

## 2.2.2 Aktivní úchopné prvky

Jako u pasivních úchopných prvků, rozdělujeme aktivní prvky do tří kategorií, a to na mechanické, magnetické a podtlakové.

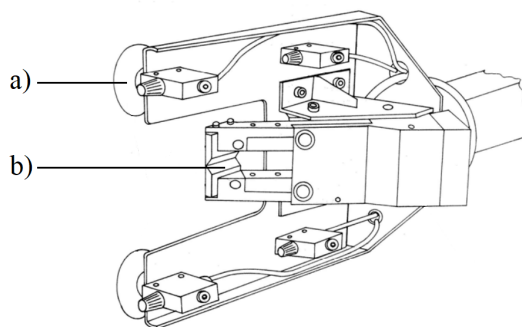
Právě jako "chapadla" jsou označovány aktivní mechanické úchopné hlavice, které jsou vybaveny pohyblivými čelistmi, jejichž pohyb mohou iniciovat různé druhy a typy pohonů.

Druhou kategorií jsou aktivní úchopné prvky podtlakové do kterých patří podtlakové systémy, které pro svou činnost využívají vývěvu nebo ejektor. Ejektor je odsávací nebo čerpací tryskové zařízení, které je poháněno proudem vody, plynu nebo páry. Při použití vývěvy se připojuje na společné odsávací vedení i více podtlakových komor. Velikost podtlaku je dána typem vývěvy a většinou se pohybuje v intervalu 30 až 80 kPa. V případě použití ejektoru můžeme na něj připojit několik podtlakových komor nebo může mít každá komora vlastní ejektor.

Poslední kategorií jsou aktivní magnetické úchopné hlavice, které využívají elektromagnetů, kdy pro uvolnění objektu manipulace stačí vypnout přívod proudu. V případě použití stejnosměrného magnetického pole se objekt při uchopení zmagnetizuje. Potom je nutno při odkládání objektu krátkodobé otočení směru proudu v magnetických cívkách, tím nastane odstranění remanentního magnetismu v objektu [1].

## 2.3 Kombinované výstupní hlavice

Takovéto výstupní hlavice jsou většinou kombinací koncových efektorů pro manipulaci a technologickou operaci. Toto řešení je často využíváno pro manipulaci s odlitky z plastových hmot, kde je dále využito pneumatického stříhacího zařízení, které slouží pro odstřižení vtokových nálitků [2].



Obr. 2.2: Kombinovaná výstupní hlavice - a) podtlakový efektor, b) stříhací zařízení [1].

## 2.4 Speciální výstupní hlavice

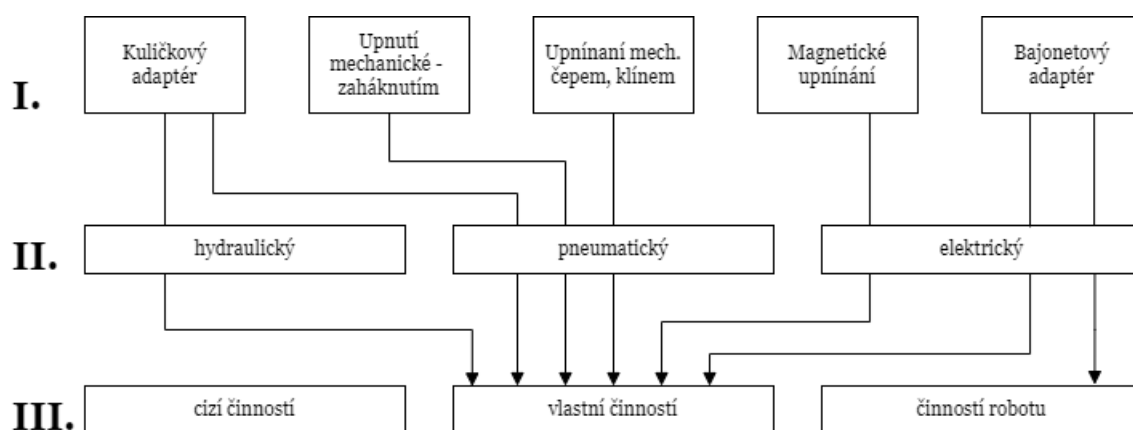
Jsou to efekторы, které se využívají u speciálních aplikací robotů a plní takové funkce, které se z pohledu systémového přístupu nedají zařadit do rozsahu běžných funkcí. Pro rozvoj adaptivity se takovéto efekторы vybavují čidly a snímači. Nejlepší příkladem speciálních hlavice jsou efekторы, které uchopení předmětu realizují principem omezení předmětu. To je realizováno pomocí volně otočných prstů, které jsou vůči sobě uloženy na rovnoběžných hřídelích. V okamžik otočení všech prstů do koncové polohy jsou axiální silou zafixovány v ustavené poloze [2].

## 2.5 Automatická výměna koncových efektorů

V případě některých robotických aplikací pro automatizované procesy, kde je využit pouze jeden robot, který zajišťuje různé manipulační operace, je zapotřebí využít systémů automatické výměny koncových efektorů. Tyto systémy rozšiřují uživatelské funkce robotu a umožňují, aby robot pružně reagoval na tvarovou i rozměrovou změnu manipulovaných objektů, aniž by bylo nutné přerušit cyklus dané aplikace.

Tento funkční uzel je konstrukčně založen na dvojici speciálních připojovacích přírub, které zajišťují mechanické spojení a automatické upnutí efektoru, dále také přívod tlakových médií, elektrického proudu a elektrických signálů pro řízení.

Připojovací příruba robotu je pevně spojena s ramenem robotu, připojovací příruba efektoru, která je protikusem příruby robotu, je zároveň tuhým rámem mechanické struktury koncového efektoru. Koncový efektor je spojen s připojovací přírubou efektoru, která mu zprostředkovává připojení silových a ovládacích médií, aby mohl vykonávat určené funkce [1].



Obr. 2.3: Rozdělení možných principů spojování přírub. I. - Rozdělení vázacích prvků, II. - způsob pohonu, III. - Způsob aretace [1].

## 2.6 Řešení dostupná na trhu

### 2.6.1 Mechanické úchopné hlavice

V současné době se nabízí realizace koncových efektorů podle potřeb aplikace pomocí úchopných hlavice, jejichž různé velikosti a varianty jsou na trhu dostupné. Poté se podle manipulovaného objektu a zvoleného charakteru uchopení zvolí chapadlo, které se vhodně umístí na rám pro danou úlohu. Možnosti mechanických úchopných hlavice jsou následující:

- Paralelní chapadla
- Tříbodová chapadla (také označovaná jako středící)
- Čtyřbodová chapadla
- Úhlová chapadla
- Radiální chapadla

#### Paralelní úchopné hlavice

Nejčastěji se vyskytující úchopné hlavice v dnešních aplikacích jsou paralelní chapadla. Využívají jednoduchého principu pohybu čelistí, které jsou umístěny paralelně a vytvářejí tak síly působící proti sobě. Jsou dostupné s pohony elektrickými, pneumatickými i hydraulickými a díky tomu je na trhu dostupné velké množství těchto chapadel s různými parametry, které výrobci nabízí.

V tabulce 2.1 jsou porovnány vybrané modely paralelních chapadel, které byly vybrány na základě velikosti zavírací síly nebo hmotnosti. Pro lepší porovnání jednotlivých modelů mezi výrobci byl vypočten poměr zavírací síly při tlaku 6 bar ku hmotnosti úchopné hlavice, tento poměr nám udává jak velkou sílu vyvine jeden gram výrobku, jeho jednotkou tak je -  $[N \cdot g^{-1}]$ .



Obr. 2.4: Paralelní chapadlo firmy Schunk model PGN-plus-P 40 [15].

| Model chapadla | Výrobce | Zavírací síla [N] | Hmotnost [g] | Opakovatelnost [mm] | Zavírací síla /hmotnost |
|----------------|---------|-------------------|--------------|---------------------|-------------------------|
| PGN-plus-P 40  | Schunk  | 180               | 80           | 0,01                | 2,25                    |
| PGN-plus 40    | Schunk  | 123               | 80           | 0,01                | 1,54                    |
| MHZ2-32D       | SMC     | 158               | 715          | 0,02                | 0,22                    |
| JMHZ2-20D      | SMC     | 54,2              | 244          | 0,01                | 0,22                    |
| HGPT-16-A-B    | Festo   | 106               | 85           | 0,03                | 1,25                    |
| DHPC-16-A-S    | Festo   | 107,8             | 110          | 0,02                | 0,98                    |
| RDH-1M-L       | Destaco | 452               | 190          | 0,02                | 2,38                    |
| CP-2-C         | Destaco | 161               | 200          | 0,025               | 0,81                    |

Tab. 2.1: Paralelní úchopné hlavice [11], [12], [13], [14].

### Středící úchopné hlavice

Tříbodová chapadla s paralelně se pohybujícími čelistmi jsou velmi podobná sklíčidlům a jsou známá také jako středící. Čelisti se pro vyvození upínací síly pohybují k centrální ose chapadla, ovládané mohou být pneumaticky i hydraulicky. Vhodné jsou pro aplikace s velkým zatížením, avšak nevýhodou je malá flexibilita, a s tím spojená nutnost výměny čelistí při změně manipulovaného objektu [16].

V tabulce 2.2 jsou porovnány vybrané modely středících chapadel, které byly vybrány na základě velikosti zavírací síly nebo hmotnosti. Stejně jako v předchozí kapitole, zde byl pro lepší porovnání jednotlivých modelů vypočten poměr zavírací síly při tlaku 6 bar ku hmotnosti úchopné hlavice, tento poměr je nám udává jak velkou sílu vyvodí jeden gram výrobku, jeho jednotkou tak je -  $[N \cdot g^{-1}]$ .



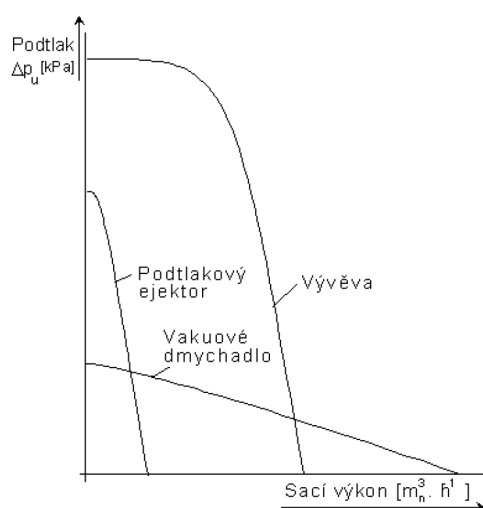
Obr. 2.5: Středící chapadlo firmy Festo model HGDT [20].

| Model chapadla | Výrobce | Zavírací síla [N] | Hmotnost [g] | Opakovatelnost [mm] | Zavírací síla- /hmotnost |
|----------------|---------|-------------------|--------------|---------------------|--------------------------|
| PZN-plus 40    | Schunk  | 255               | 130          | 0,01                | 1,96                     |
| MPZ 45         | Schunk  | 225               | 220          | 0,01                | 1,16                     |
| MHS3-25D       | SMC     | 42                | 140          | 0,01                | 0,3                      |
| MHS3-32D       | SMC     | 74                | 232          | 0,01                | 0,32                     |
| DHDS-16-A      | Festo   | 87                | 96           | 0,04                | 0,91                     |
| HGDT-25-A      | Festo   | 207               | 185          | 0,03                | 1,12                     |
| RTH/DTH-1M     | Destaco | 682               | 250          | 0,02                | 2,73                     |
| 6003P-C        | Destaco | 422               | 600          | 0,02                | 0,7                      |

Tab. 2.2: Středící úchopné hlavice [14], [17], [18], [19].

## 2.6.2 Podtlakové úchopné hlavice

V případě manipulace s plochými objekty můžeme využít podtlakových úchopných hlavice, kdy vytvoření úchopné síly je založeno na principu rozdílu tlaku vně a uvnitř úchopného prvku, kterým může být přísavka, která je vakuotěsně přitisknuta tímto rozdílem tlaků na definovanou plochou na povrch objektu. Odsávání vzduchu z podtlakové komory je prováděno aktivně, pomocí vnějšího zdroje vakua, který může být realizován pomocí vývěvy, vakuového dmychadla nebo ejektoru. V Obr. 2.6 jsou tyto prvky porovnány v závislosti velikosti vytvořeného podtlaku a sacího výkonu [3].



Obr. 2.6: Porovnání charakteristik zdrojů vakua [3].

V současné době se nejčastěji pro průmyslové aplikace používají ejektory, ty jsou schopny vyvodit dostačující podtlak relativně malou spotřebou stlačeného vzduchu. V následující tabulce Tab. 2.3 jsou porovnány právě ejektory vybraných výrobců.

| Model ejektoru | Výrobce  | Sací výkon<br>[l/min] | Hmotnost<br>[g] | Provozní tlak<br>pro max. pod-<br>tlak [bar] | Max. tlak<br>vakua<br>[kPa] |
|----------------|----------|-----------------------|-----------------|----------------------------------------------|-----------------------------|
| VN-10-H-T3-PI4 | Festo    | 25                    | 22              | 4,5                                          | -89                         |
| OVEL-10-H-15-P | Festo    | 21                    | 58              | 4,1                                          | -92                         |
| VN-10-H-T3-PQ2 | Festo    | 21,8                  | 63              | 3,5                                          | -93                         |
| ZU07SA         | SMC      | 28                    | 19,1            | 4                                            | -90                         |
| ZH07BLA        | SMC      | 27                    | 12,4            | 6                                            | -48                         |
| ZH10S-X267     | SMC      | 24                    | 267             | 5                                            | -88                         |
| ACV10-HS       | Air-Best | 27                    | 80              | 5                                            | -87                         |
| AZU07S         | Air-Best | 12                    | 6,5             | 4,5                                          | -85                         |

Tab. 2.3: Vakuové ejektory [21], [22], [23].

Sací výkon představuje funkce, která má maximum při pracovním tlak 4 až 5 bar, poté výrazně klesá, což přináší zvýšení spotřeby stlačeného vzduchu a výrazný pokles účinnosti ejektoru a s tím spojený maximální tlak vakua. Nejmodernější kompaktní provedení ejektorů pro robotizovanou manipulaci využívá integrovaných zdrojů vakua, která spolu s ejektory obsahují také tlumič hluku, filtr, elektromagnetické řídicí ventily a podtlakový spínač s nastavitelnou velikostí podtlaku a hysterezí [3].



Obr. 2.7: Ejektory SMC řady ZH-A [23].



## **3 Systémový rozbor práce**

### **3.1 Problémová situace**

V robotické buňce na pracovišti Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky se nachází průmyslový robot, který je schopen upnout tři koncové efektory, z něhož dva jsou provozuschopné a jeden, který aktuálně provozuschopný není. Tyto efektory byly sestaveny tak, aby byly schopny vykonávat konkrétní nebo obecné manipulační úlohy.

### **3.2 Formulace problému**

Problémem jsou tedy efektory, které byly navrženy jen na základě intuice konstruktéra a neopírají se o výpočty příslušných konstrukčních uzlů.

### **3.3 Formulace cílů a řešení**

Cíle diplomové práce jsou následující:

- Systémová analýza podstatných veličin
- Analýza současného konstrukčního řešení
- Vytvoření návrhových variant
- Konstrukční návrh
- Výkresová dokumentace
- Ekonomické zhodnocení
- Závěr a doporučení

Ze zadání diplomové práce je zřejmé, že je nutné vytvoření koncových efektorů pomocí systematického přístupu, které se opírají o výpočty příslušných uzlů soustavy. Celková tuhost soustavy automatické výměny a koncových efektorů by měla být zvýšena. Jako poslední by měl být navrhnout stojan pro odkládání těchto efektorů.

### **3.4 Popis řešené soustavy**

Koncový efektor je sestaven z kužele pro automatickou výměnu, přes který se realizuje propojení pneumatického obvodu, rámu a uchopovacích prvků. Dále je na rámu umístěn multifunkční konektor pro přenos elektrických signálů. Na konci této soustavy se nachází uchopovací prvky, které mohou být realizovány například čelistmi nebo přísavkami.

## 3.5 Systém podstatných veličin

Tvorba systému podstatných veličin je podmínkou pro aplikaci systémového přístupu, která je realizována prostřednictvím vztahů mezi subjektem (řešitelem), objektem zkoumání a systémem, jehož podoba je abstraktní a je vytvořen na objektu zkoumání. Takový systém obsahuje všechny důležité informace o objektech, procesech a vazbách k řešení zadaného problému [5].

Systém podstatných veličin:

- S0 - veličiny popisující okolí entity, tzv. enviromentální veličiny  
Entita pracuje v prostředí, které je vyplněno vzduchem, ten je popsán teplotou, která je ideálně stálá, dále tlakem a koeficientem přestupu tepla.
- S1 - veličiny popisující strukturu, geometrii a topologii entity  
Modelovaná entita je trojrozměrný objekt, který je charakterizován jeho celkovými rozměry a hmotností. Dalšími veličinami jsou pak veličiny z nich odvozené, a to momenty setrvačnosti v jednotlivých osách a poloha těžiště v jednotlivých osách.
- S2 - veličiny popisující podstatné vazby a interakce entity s okolím  
Entita je v případě manipulace pevně svázaná s robotem a vytváří obecnou vazbu v okamžiku uchopení objektu manipulace.
- S3 - veličiny vyjadřující aktivaci entity z jejího okolí  
Entita je aktivována z řídicí jednotky robotu pomocí přivedení tlaku stlačeného vzduchu.
- S4 - veličiny, které ovlivňují entitu z okolí  
Na entitu po celou dobu působí tíhová síla. V případě pohybu entity působí na její části zrychlení, které má za důsledek vytvoření setrvačných sil.
- S5 - veličiny vyjadřující oborové vlastnosti prvků struktury entity  
Entita je vyrobena z různých materiálů, které mají různé oborové vlastnosti, jako je například mez pevnosti, mez kluzu, modul pružnosti ve smyku, modul pružnosti v tahu a hustota.
- S6 - veličiny popisující procesy a stavy entity  
Jednotlivé stavy entity, které jsou charakterizovány tím, jestli je předmět uchopen nebo ne, vyjadřuje skutečně vyvozená uchopovací síla.
- S7 - veličiny popisující projevy entity  
Projevy entity můžeme popsat pomocí zdvihu čelistí v případě mechanických hlavic a velikosti podtlaku v případě podtlakových hlavic.
- S8 - veličiny popisující důsledky projevů entity  
Důsledkem projevů entity je uchopení objektu manipulace a s tím spojené vyvození uchopovací síly.

## 4 Analýza stávajících koncových efektorů

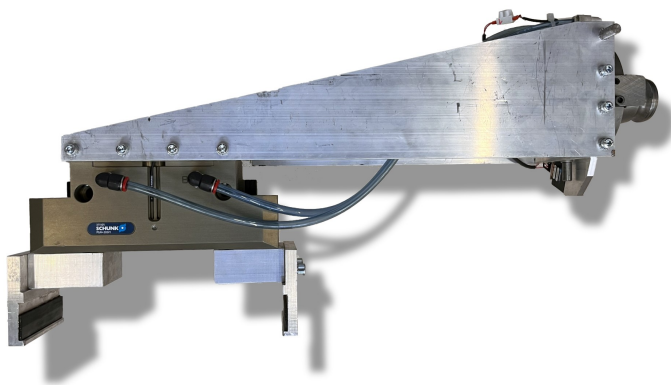
Robotické pracoviště obsluhuje robot společnosti ABB model IRB 4400 nosnosti 60 kg, který je vybaven pojezdovým ústrojím a umožňuje manipulaci se středně těžkými až těžkými součástmi. Dále se v prostoru buňky nachází dva CNC stroje, které tento robot obsluhuje. Na konci kinematického řetězce tohoto robota je systém automatické výměny koncových efektorů, který je výchozím rozhraním konstrukce.

### 4.1 Efektor pro manipulaci s obrobky

První efektor slouží pro zakládání ploché desky o hmotnosti 13 kg do tříosé CNC vertikální frézky. Tento efektor se skládá ze šroubovaného nerezového rámu a paralelního uchopovacího systému firmy Schunk, modelu **PGN+ 200/1**, který je pneumaticky poháněn. Z důvodu velkých rozměrů manipulovaných součástí a omezeného pracovního prostoru stroje je uchopovací systém posunut od příruby robota, což má za následek významnému posunu těžiště a tím vznikajících ohybových momentů a momentů setrvačnosti. To může vést ke zvýšenému opotřebení převodového ústrojí robota.

Parametry uchopovacího systému PGN+ 200/1 [24]:

- Zavírací síla - 2 700 [N]
- Hmotnost - 5,4 [kg]
- Doporučená hmotnost obrobku - 13,5 [kg]
- Max. přípustná hmotnost každého prstu - 6,5 [kg]
- Max. přípustná délka prstu - 280 [mm]
- Jmenovitý provozní tlak - 6 [bar]
- Třída ochrany - IP 40



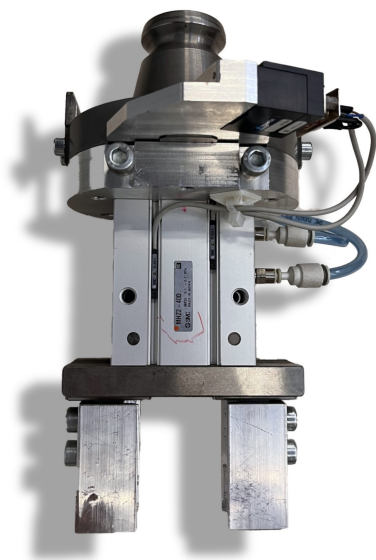
Obr. 4.1: Koncový efektor pro manipulaci s obrobky na pracovišti ÚVSSR.

## 4.2 Efektor adaptérů průtokového připojení

Další efektor byl vytvořen pro manipulaci s adaptéry průtokového připojení o hmotnosti 250 gramů. Tento konstrukčně velmi jednoduchý efektor se skládá z paralelního uchopovacího systému firmy SMC, modelu **MHZ2-40D**, který je stejně jako první efektor poháněn pneumaticky. Doporučená zavírací síla uváděna výrobcem je přibližně stonásobkem hmotnosti objektu manipulace, která tak vychází 25 N. Je tedy zřejmé, že bylo použito chapadlo, které je příliš velké pro tuto aplikaci.

Parametry uchopovacího systému MHZ2-40D [25]:

- Zavírací síla - 318 [N]
- Hmotnost - 1,275 [kg]
- Doporučená zavírací síla -  $10 \cdot m \cdot g$  [N]
- Zdvih na jednu čelist - 15 [mm]
- Jmenovitý provozní tlak - 7 [bar]
- Třída ochrany - IP 40



Obr. 4.2: Efektor pro manipulaci s adaptéry na pracovišti ÚVSSR.

## 4.3 Efektor pro uchopování plochých součástí

Poslední efektor slouží pro manipulaci s plochými součástmi jako je například karton, akrylátové skla nebo plechy. Přibližný maximální rozměr objektu manipulace se odvíjí jeho od hmotnosti. Z Obr. 4.3 je patrné, že je efektor rozdělen dvěma deskami na dvě pomyslné úrovně. V horní se realizuje rozvod vytvořeného vakua, ve spodní se nachází čtyři pryžové přísavky s písty, které slouží pro ideální dosednutí všech čtyř kontaktních bodů, a tím využití celé uchopovací síly. Tento efektor využívá pro vytvoření vakua in-line ejektor SMC **YU07S**. Tyto ejektory pracují na principu Venturiho dýzy a jejich charakteristickou vlastností je potřeba kontinuálního přívodu stlačeného vzduchu pro udržení vakua, což má za následek velkou spotřebu tohoto média.

Parametry ejektoru SMC YU07S [26]:

- Hmotnost - 4,3 [g]
- Provozní tlak - 1 až 7 [bar]
- Maximální podtlak - -90 [kPa]
- Maximální sací výkon - 11 [l/min]
- Spotřeba - 28 [l/min]
- Teplota okolí: -5 až 50 [°C]



Obr. 4.3: Podtlakový efektor robotického pracoviště ÚVSSR.



## 5 Návrhové varianty

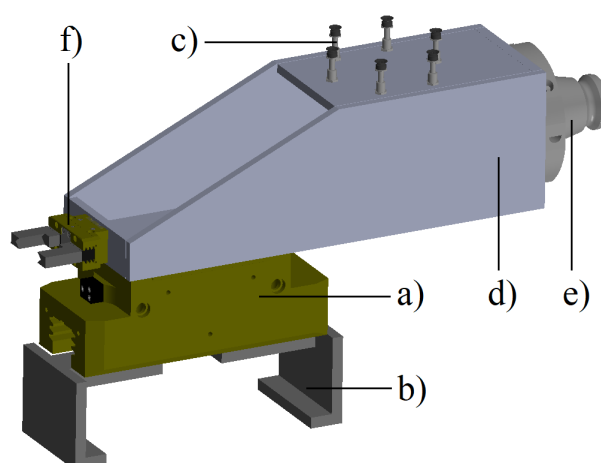
### 5.1 Varianta A

Pro první variantu A, která je zobrazena na Obr. 5.1, se nabízí spojení všech stávajících efektorů do jednoho. Nosný rám tohoto efektoru je svařovaný a jeho rozměr je ovlivně efektozem pro zakládání desky do CNC stroje, a to z důvodu omezené konfigurace robota při zakládání. Dále jsou na konstrukci přidělaný prvky pro podtlakový efektor, ty jsou umístěny na opačné straně vůči uchopovací hlavici obrobku, protože by systém s čelistmi mohl vést ke kolizi se stolem nebo dopravníkem na kterém by byla plochá součást odebírána. Rovněž by v případě druhé operace mohla nastat kolize podtlakového efektoru a CNC stroje. Nakonec je na čelo konstrukce přidělán uchopovací hlavice pro manipulaci s adaptéry.

#### Výhody a nevýhody varianty A

Největší výhodou je snížení nutnosti výměny koncových efektorů a maximalizace využití celkové nosnosti robota, která ale rovněž při tomto konceptu může být přesažena, tím by se tato varianta z pohledu bezpečnosti a povoleného zatěžování stala nepřijatelnou.

Tento koncept by pak měl největší zástavbové rozměry, což by vedlo i ke zvýšení momentů setrvačnosti, které by mohly snížit maximální zrychlení robotu při manipulaci a rovněž by mohly vést ke zvýšenému opotřebení převodového ústrojí robotu. Dále by tyto celkové rozměry mohly vést k problematickému řešení jednotlivých drah manipulací, kdy by na mnohých místech mohlo dojít ke kolizním stavům.



Obr. 5.1: Varianta A a) chapadlo obrobku, b) čelisti chapadla, c) podtlakové chapadlo, d) rám efektoru, e) kužel výměny efektoru, f) chapadlo adaptérů.

## 5.2 Varianta B1

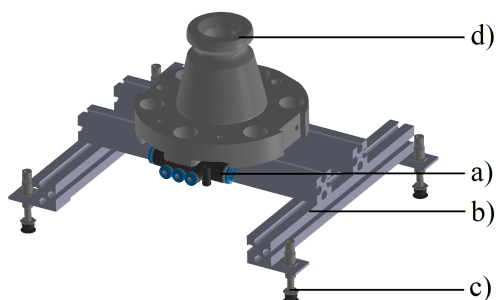
Variantou B1 je spojení efektorů pro manipulaci s obrobkem a adaptérem průtokového připojení, tento koncept se od předchozího návrhu liší pozicí kužele pro výměnu koncových efektorů, ten byl v této návrhové variantě umístěn na rovinu rovnoběžnou se základnou chapadla jak je vidět na Obr. 5.3. Takovýto rám dovoluje rozdílnou konfiguraci robotu v okamžiku manipulace v CNC stroji, díky které se těžiště efektoru dostává blíže k ose příruby robotu. Takto by se mohly snížit celkové síly působící na pohonné ústrojí robotu a tím i zvýšit tuhost celé soustavy.

Řešení podtlakového efektoru pro manipulaci s plochou součástí, na Obr. 5.2, je pak samostatné a jeho šroubovaný rám tvoří standardizované hliníkové profily. V centrální části takového efektoru se realizuje tvorba vakua, která se ze středu efektoru rozvádí do jednotlivých rohů, kde jsou připevněny na konci profilů jednotlivé přísavky.

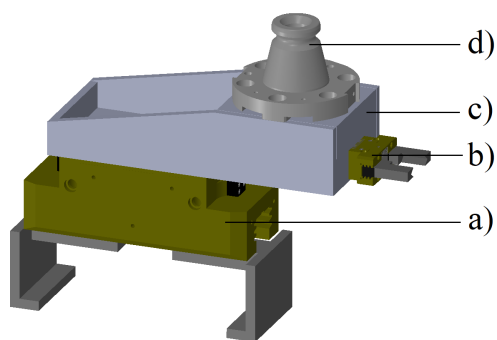
### Výhody a nevýhody varianty B1

Výhodou této varianty je oddělení efektorů pro manipulaci s obrobky a plochými součástmi, ty jsou rozměrově nejvíce náročné a pravděpodobně by tak způsobovali problematické vytváření drah a možné kolize. Výhodou podtlakového efektoru je jednoduchá konstrukce, kterou lze v případě potřeby změny tvaru dílu jednoduše přenastavit či přestavět.

Nevýhodou této varianty je velikost kombinovaného efektoru, ta je v případě manipulace s adaptéry příliš velká a při manipulaci s objektem bude mít největší vliv na momenty setrvačnosti těžký rám. To může omezit maximální zrychlení a rychlosti robota.



Obr. 5.2: Podtlakový efektor - a) rozvod vakua, b) rám, c) přísavky, d) kužel výměny efektoru.



Obr. 5.3: Kombinovaný efektor - a) chapadlo obrobku, b) chapadlo adaptéru, c) rám efektoru, d) kužel výměny efektoru.



## 5.3 Varianta B2

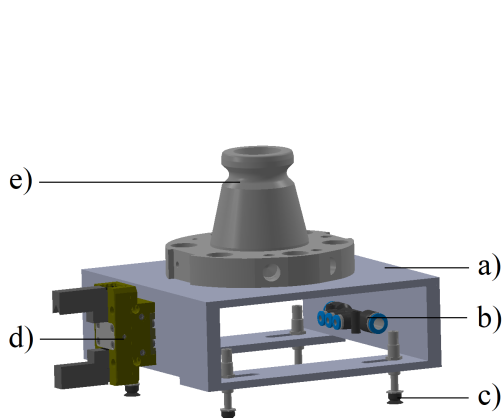
Varianta B2 představuje další možnost kombinace dvou chapadel v jednom efektoru, kterou v tomto konceptu představuje spojení chapadla pro manipulaci s adaptéry a přísavek pro manipulaci s plexiskly. Tuto návrhovou variantu, která je na Obr. 5.4, tvoří šroubovaný rám ve tvaru kvádra. Na jeho vnitřních stěnách jsou připevněny prvky pro tvorbu vakua, které je rozváděno do rohů kde jsou umístěny přísavky. Vnější stěna této konstrukce je využita pro umístění chapadla pro manipulaci s adaptéry průtoku.

Koncept efektoru pro manipulaci s obrobky je využit jako v předchozí variantě B1, v tomto případě je pouze odstraněno menší chapadlo, to lze vidět na Obr. 5.5.

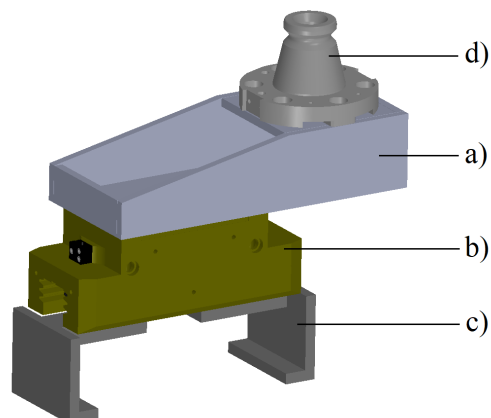
### Výhody a nevýhody varianty B2

Výhodou samostatného efektoru pro manipulaci s obrobky jeho maximální možné snížení hmotnosti na pouze nezbytné prvky pro zvládnutí manipulační úlohy. Nosnost robotu klesá se zvyšující se vzdáleností od jeho příruby, a tak může být tato úspora klíčová pro zajištění jeho bezpečné činnosti. Další výhodou je vytvoření poměrně kompaktního řešení kombinovaného efektoru, kdy by oba tyto efekторы vytvořili obálku o podobných rozměrech a jsou tak jejich prvky sloučeny k vytvoření jednotné obálky sestavy.

Nevýhodou kombinovaného efektoru je omezená možnost změny podtlakového chapadla, v případě zachování hmotnosti objektu manipulace a změny tvaru dílu by musel být vyroben nový rám, který by respektoval nové připojovací rozměry.



Obr. 5.4: Kombinovaný efektor - a) rám b) rozvod vakua c) přísavky d) chapadlo adaptéru e) kužel výměny efektoru.



Obr. 5.5: Efektor pro manipulaci s obrobky - a) nosný rám b) paralelní chapadlo c) čelisti d) kužel výměny efektoru.

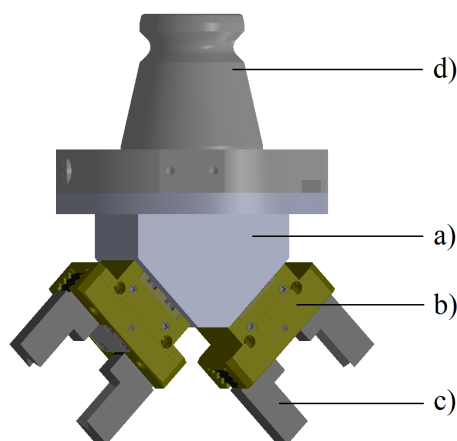
## 5.4 Varianta C

Poslední variantou je pak vytvoření samostatných koncových efektorů. Návrh je tak vytvořen na základě stávajícího stavu v robotické buňce a jejich možné optimalizaci. Koncept koncového efektoru pro zakládání obrobku by byl použit stejný jako bylo popsáno v kapitole 5.3, který je na Obr. 5.5 a rovněž by se využilo i návrhu samostatného podtlakového efektoru popsaného v kapitole 5.2, který je na Obr. 5.2. Pro tuto variantu tak stačí definovat samostatný efektor pro manipulaci s průtokovým adaptérem, který je na Obr. 5.6. Ten se skládá z rámu a na něj upevněných dvou paralelních uchopovacích hlavic. Počet chapadel je v tomto případě zvýšen z důvodu většího využití nosnosti robotu a možnosti manipulovat s dvěma součástmi najednou.

### Výhody a nevýhody varianty C

Výhodou ponechání samostatných koncových efektorů je tak maximální možná optimalizace efektorů samostatně, kdy se nemusí hledat konstrukční kompromisy mezi jednotlivými efekty. Dále také maximální snížení hmotnosti, kterou tak tvoří pouze nezbytný materiál pro správnou funkci efektoru a vykonání určené manipulační úlohy. Další výhodou efektoru pro manipulaci s adaptéry je také snížení časů manipulace, kdy robotu slouží druhé chapadlo jako přípravek ve kterém je nachystán nový kus a může tím být dosaženo např. snížení prostojů stroje nebo měřící stanice.

Nevýhodou je velikost stojanu, který musí být schopen pojmout všechny tři efektorů současně, ten tak zabírá velkou plochu robotického pracoviště. Nejpodstatnější nevýhodou je neekonomičnost výroby tří samostatných efektorů, kdy je tato varianta nejvíce náročná na množství materiálu a počet vyráběných a nakupovaných dílů.



Obr. 5.6: Varianta C - efektor pro manipulaci s adaptéry a) rám b) uchopovací hlavice c) čelisti d) kužel výměny efektoru.

## 6 Multikriteriální analýza

Pro výběr optimální návrhové varianty je využito multikriteriální analýzy. V této metodě je důležitý výběr náležitých parametrů  $\mathbf{P}_i$ , které charakterizují každou návrhovou variantu. Těmto parametrům je následně přiřazena váha  $\mathbf{VP}_i$ , která odpovídá důležitosti parametru. Nakonec jsou obodovány jednotlivé parametry dané varianty  $\mathbf{BP}_i$ . Optimální varianta je ta, která získá nejvyšší celkové ohodnocení, přičemž bodového ohodnocení 1 může získat nejvýstižnější řešení, 0 bodů je pak naopak nejnižší bodové ohodnocení. Výsledný počet bodů bude vypočítán podle následujícího vztahu [7]:

$$\delta_i = \frac{\sum VP_i \cdot BP_i}{\sum VP_i} \cdot 100[\%] \quad (1)$$

### 6.1 Parametry hodnocení

**P1: Hmotnost:** je základní vlastnost materiálu. Ovlivňuje momenty setrvačnosti a cenu efektoru.

**P2: Moment setrvačnosti:** je rozložení hmoty vůči jednotlivým osám otáčení. Ovlivňuje maximální možné rychlosti a zrychlení robota.

**P3: Složitost konstrukce:** je charakterizována počtem součástí a jednotlivých konstrukčních uzlů. Může ovlivnit celkovou tuhost, hmotnost a cenu.

**P4: Kompaktnost:** jsou přibližné nejmenší nutné rozměry celkové sestavy, příliš velké rozměry mohou zapříčinit kolizní stavy.

**P5: Tuhost konstrukce:** je schopnost konstrukce zachovávat tvar a geometrii pod vlivem působení vnějších sil.

**P6: Ekonomičnost:** je nenáročnost na cenu, aplikaci a náklady spojené se změnou.

**P7: Energetická náročnost:** je celková spotřeba energií a medií při provozu.

**P8: Spolehlivost:** je schopnost plnit požadovaný úkol s nízkou pravděpodobností poruchy systému.

**P9: Náročnost údržby:** je časová náročnost kdy prvek není schopen plnit svou funkci a finanční náročnost dílů prvku se zvýšeným opotřebením a častou výměnou.

**P10: Modularita:** je možnost rozložení systému do jednotek, které jsou na sobě nezávislé.

## 6.2 Přřazené váhy parametrů

Pro přiřazení váhy parametrů byla použita metoda párového srovnání dle Dobřického. Vždy je porovnávám jeden parametr ze sloupce a jeden z řádku, do tabulky je potom zapsán důležitější parametr z takto vytvořeného páru. Dále se určí, kolikrát se každý parametr vyskytuje v trojúhelníkové matici a na základě celkové sumy výskytu je mu přiřazeno pořadí. V Tab. 6.1 jsou porovnány jednotlivé parametry touto metodou a určení jejich konečného pořadí [5].

| Parametr | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | P8 | P9 | P10 | Suma | Pořadí |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|------|--------|
| P1       | P1 | P1 | P1 | P1 | P1 | P1 | P1 | P1 | P1 | P1  | 10   | 1.     |
| P2       |    | P2 | P2 | P4 | P5 | P6 | P2 | P8 | P2 | P2  | 5    | 6.-7.  |
| P3       |    |    | P3 | P3 | P5 | P3 | P3 | P3 | P3 | P3  | 7    | 3.-4.  |
| P4       |    |    |    | P4 | P5 | P4 | P4 | P4 | P4 | P4  | 7    | 3.-4.  |
| P5       |    |    |    |    | P5 | P5 | P5 | P5 | P5 | P5  | 9    | 2.     |
| P6       |    |    |    |    |    | P6 | P6 | P8 | P6 | P6  | 5    | 6.-7.  |
| P7       |    |    |    |    |    |    | P7 | P8 | P7 | P10 | 2    | 9.     |
| P8       |    |    |    |    |    |    |    | P8 | P8 | P8  | 6    | 5.     |
| P9       |    |    |    |    |    |    |    |    | P9 | P10 | 1    | 10.    |
| P10      |    |    |    |    |    |    |    |    |    | P10 | 3    | 8.     |

Tab. 6.1: Párové porovnání parametrů.

V posledním kroku se vytvoří tabulka, kde jsou zapsány parametry v pořadí od prvního po poslední, v případě kdy mají dva parametry shodné pořadí, rozhoduje výsledek důležitosti porovnání právě tohoto páru. Hodnotíme je poté dle číselného hodnocení z hlediska jejich charakteristické blízkosti, tzn. jak k sobě mají dva vybrané parametry blízko. Stupnice číselného hodnocení parametrů je od 1 do 3, kdy platí 1 - blízko, 2 - středně, 3 - daleko, takto dokážeme zohlednit vzájemnou závislost jednotlivých parametrů, součtem všech hodnocení v řádku získáme bodovou hodnotu významnosti parametru  $BHV_i$ . V Tab. 6.2 jsou zapsány stanovené výsledné váhy jednotlivých parametrů [5].

Stanovení váhy významnosti parametru se určí ze vztahu:

$$VP_i = \frac{BHV_i}{\sum_{i=1}^k BHV_i} \quad (2)$$

| Parametr | P1 | P5 | P3 | P4 | P8 | P6 | P2 | P10 | P7 | P9 | BHV <sub>i</sub> | Váha VP <sub>i</sub> |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|-----|----|----|------------------|----------------------|
| P1       | 1  | 3  | 2  | 1  | 3  | 3  | 1  | 3   | 3  | 3  | 23               | 0,181                |
| P5       |    | 1  | 1  | 2  | 3  | 2  | 3  | 3   | 3  | 3  | 21               | 0,165                |
| P3       |    |    | 1  | 3  | 3  | 1  | 3  | 2   | 3  | 3  | 19               | 0,150                |
| P4       |    |    |    | 1  | 3  | 3  | 1  | 3   | 3  | 3  | 17               | 0,134                |
| P8       |    |    |    |    | 1  | 2  | 3  | 3   | 2  | 3  | 14               | 0,110                |
| P6       |    |    |    |    |    | 1  | 3  | 2   | 2  | 3  | 11               | 0,087                |
| P2       |    |    |    |    |    |    | 1  | 3   | 3  | 3  | 10               | 0,079                |
| P10      |    |    |    |    |    |    |    | 1   | 3  | 3  | 7                | 0,055                |
| P7       |    |    |    |    |    |    |    |     | 1  | 3  | 4                | 0,031                |
| P9       |    |    |    |    |    |    |    |     |    | 1  | 1                | 0,008                |
| Suma     |    |    |    |    |    |    |    |     |    |    | 126              | 1                    |

Tab. 6.2: Kvantifikovaná matice pro stanovení vah kritérií.

V následujících kapitolách hodnocení jednotlivých variant bude využito pouze parametrů, které přesáhli hodnotu váhy důležitosti 0,06 a výše, resp. 6 % a více. Z hodnocení tak budou vyřazeny parametry **P7**, **P9** a **P10**.

## 6.3 Hodnocení varianty A

V následující tabulce Tab. 6.3 jsou zapsány body jednotlivých parametrů a odůvodnění příslušného zisku.

| Parametr | Body parametru   | Odůvodnění hodnoty parametru                                   |
|----------|------------------|----------------------------------------------------------------|
| P1       | $BP_{A_1} = 0,5$ | Nejvyšší možná hmotnost, může překročit možnou nosnost robota. |
| P2       | $BP_{A_2} = 0,4$ | Nejvyšší možný moment setrvačnosti.                            |
| P3       | $BP_{A_3} = 0,6$ | Podstatně jednoduchá konstrukce.                               |
| P4       | $BP_{A_4} = 0,3$ | Velké zástavbové rozměry.                                      |
| P5       | $BP_{A_5} = 0,7$ | Dostatečně tuhá soustava.                                      |
| P6       | $BP_{A_6} = 0,8$ | Nejlevnější varianta.                                          |
| P8       | $BP_{A_8} = 0,5$ | Komplexní soustava, která může mít sníženou spolehlivost.      |

Tab. 6.3: Bodové hodnocení parametrů varianty A a jejich odůvodnění.

Pro výpočet celkového hodnocení varianty byl využit vzorec (1), který se v základním tvaru nachází na začátku kapitoly 6.

$$\delta_A = \frac{VP_1 \cdot BP_{A_1} + VP_2 \cdot BP_{A_2} + VP_3 \cdot BP_{A_3} + VP_4 \cdot BP_{A_4}}{VP_1 + VP_2 + VP_3 + VP_4} + \frac{VP_5 \cdot BP_{A_5} + VP_6 \cdot BP_{A_6} + VP_8 \cdot BP_{A_8}}{VP_5 + VP_6 + VP_8} \cdot 100[\%] \quad (3)$$

$$\delta_A = \frac{0,181 \cdot 0,5 + 0,079 \cdot 0,4 + 0,150 \cdot 0,6 + 0,134 \cdot 0,3}{0,181 + 0,079 + 0,150 + 0,134} + \frac{0,165 \cdot 0,7 + 0,087 \cdot 0,8 + 0,110 \cdot 0,5}{0,165 + 0,087 + 0,110} \cdot 100$$

$$\delta_A = 54\%$$

## 6.4 Hodnocení varianty B1

V následující tabulce Tab. 6.4 jsou zapsány body jednotlivých parametrů a odůvodnění příslušného zisku.

| Parametr | Body parametru    | Odůvodnění hodnoty parametru                    |
|----------|-------------------|-------------------------------------------------|
| P1       | $BP_{B1_1} = 0,6$ | Nejtěžší efekty rozděleny do dvou samostatných. |
| P2       | $BP_{B1_2} = 0,6$ | Druhé nejnižší momenty setrvačnosti.            |
| P3       | $BP_{B1_3} = 0,8$ | Méně složitá konstrukce.                        |
| P4       | $BP_{B1_4} = 0,6$ | Dobré zástavbové rozměry.                       |
| P5       | $BP_{B1_5} = 0,6$ | Průměrně tuhá konstrukce.                       |
| P6       | $BP_{B1_6} = 0,7$ | Druhá nejlevnější varianta.                     |
| P8       | $BP_{B1_8} = 0,6$ | Prvky jsou spolehlivé.                          |

Tab. 6.4: Bodové hodnocení parametrů varianty B1 a jejich odůvodnění.

Pro výpočet celkového hodnocení varianty byl využit vzorec (1), který se v základním tvaru nachází na začátku kapitoly 6.

$$\delta_{B1} = \frac{VP_1 \cdot BP_{B1_1} + VP_2 \cdot BP_{B1_2} + VP_3 \cdot BP_{B1_3} + VP_4 \cdot BP_{B1_4}}{VP_1 + VP_2 + VP_3 + VP_4} + \frac{VP_5 \cdot BP_{B1_5} + VP_6 \cdot BP_{B1_6} + VP_8 \cdot BP_{B1_8}}{VP_5 + VP_6 + VP_8} \cdot 100[\%] \quad (4)$$

$$\delta_{B1} = \frac{0,181 \cdot 0,6 + 0,079 \cdot 0,6 + 0,150 \cdot 0,8 + 0,134 \cdot 0,6}{0,181 + 0,079 + 0,150 + 0,134} +$$

$$+ \frac{0,165 \cdot 0,6 + 0,087 \cdot 0,7 + 0,110 \cdot 0,6}{0,165 + 0,087 + 0,110} \cdot 100$$

$$\delta_{B1} = 64\%$$

## 6.5 Hodnocení varianty B2

V následující tabulce Tab. 6.5 jsou zapsány body jednotlivých parametrů a odůvodnění příslušného zisku.

| Parametr | Body parametru    | Odůvodnění hodnoty parametru                    |
|----------|-------------------|-------------------------------------------------|
| P1       | $BP_{B2_1} = 0,6$ | Nejtěžší efekty rozděleny do dvou samostatných. |
| P2       | $BP_{B2_2} = 0,5$ | Druhé největší momenty setrvačnosti.            |
| P3       | $BP_{B2_3} = 0,6$ | Konstrukce jsou komplexnější.                   |
| P4       | $BP_{B2_4} = 0,5$ | Velké celkové rozměry.                          |
| P5       | $BP_{B2_5} = 0,5$ | Nejnižší tuhost konstrukce.                     |
| P6       | $BP_{B2_6} = 0,6$ | Druhá nejnákladnější varianta.                  |
| P8       | $BP_{B2_8} = 0,6$ | Prvky jsou spolehlivé.                          |

Tab. 6.5: Bodové hodnocení parametrů varianty B2 a jejich odůvodnění.

Pro výpočet celkového hodnocení varianty byl využit vzorec (1), který se v základním tvaru nachází na začátku kapitoly 6.

$$\delta_{B2} = \frac{VP_1 \cdot BP_{B2_1} + VP_2 \cdot BP_{B2_2} + VP_3 \cdot BP_{B2_3} + VP_4 \cdot BP_{B2_4}}{VP_1 + VP_2 + VP_3 + VP_4} +$$

$$+ \frac{VP_5 \cdot BP_{B2_5} + VP_6 \cdot BP_{B2_6} + VP_8 \cdot BP_{B2_8}}{VP_5 + VP_6 + VP_8} \cdot 100[\%] \quad (5)$$

$$\delta_{B2} = \frac{0,181 \cdot 0,6 + 0,079 \cdot 0,5 + 0,150 \cdot 0,6 + 0,134 \cdot 0,5}{0,181 + 0,079 + 0,150 + 0,134} +$$

$$+ \frac{0,165 \cdot 0,5 + 0,087 \cdot 0,6 + 0,110 \cdot 0,6}{0,165 + 0,087 + 0,110} \cdot 100$$

$$\delta_{B2} = 56\%$$

## 6.6 Hodnocení varianty C

V následující tabulce Tab. 6.6 jsou zapsány body jednotlivých parametrů a odůvodnění příslušného zisku.

| Parametr | Body parametru   | Odůvodnění hodnoty parametru         |
|----------|------------------|--------------------------------------|
| P1       | $BP_{C_1} = 0,7$ | Nejnižší možná hmotnost.             |
| P2       | $BP_{C_2} = 0,7$ | Nejnižší možné momenty setrvačnosti. |
| P3       | $BP_{C_3} = 0,9$ | Samostatné jednoduché konstrukce.    |
| P4       | $BP_{C_4} = 0,8$ | Malé zástavbové rozměry.             |
| P5       | $BP_{C_5} = 0,6$ | Průměrně tuhá konstrukce.            |
| P6       | $BP_{C_6} = 0,5$ | Nejnákladnější varianta.             |
| P8       | $BP_{C_8} = 0,6$ | Prvky jsou spolehlivé.               |

Tab. 6.6: Bodové hodnocení parametrů varianty C a jejich odůvodnění.

Pro výpočet celkového hodnocení varianty byl využit vzorec (1), který se v základním tvaru nachází na začátku kapitoly 6.

$$\delta_C = \frac{VP_1 \cdot BP_{C_1} + VP_2 \cdot BP_{C_2} + VP_3 \cdot BP_{C_3} + VP_4 \cdot BP_{C_4}}{VP_1 + VP_2 + VP_3 + VP_4} + \frac{VP_5 \cdot BP_{C_5} + VP_6 \cdot BP_{C_6} + VP_8 \cdot BP_{C_8}}{VP_5 + VP_6 + VP_8} \cdot 100[\%] \quad (6)$$

$$\delta_C = \frac{0,181 \cdot 0,7 + 0,079 \cdot 0,7 + 0,150 \cdot 0,9 + 0,134 \cdot 0,8}{0,181 + 0,079 + 0,150 + 0,134} + \frac{0,165 \cdot 0,6 + 0,087 \cdot 0,5 + 0,110 \cdot 0,6}{0,165 + 0,087 + 0,110} \cdot 100$$

$$\delta_C = 70\%$$



## 6.7 Výběr varianty

Na základě multikriteriální analýzy pro kterou bylo vybráno celkem 10 hodnotících parametrů, byla vybrána varianta C, která dosáhla nejvyššího bodového hodnocení. Získané celkové hodnocení jednotlivých variant je zrekapitulováno v Tab. 6.7.

Varianta C byla lepší oproti ostatním variantám zejména v jednoduchosti konstrukce a nízké hmotnosti, která je rozdělena do samostatných efektorů. Naopak nejhorší byla v parametru ekonomičnosti.

| Varianta                 | A    | B1   | B2   | C    |
|--------------------------|------|------|------|------|
| <i>Celkové hodnocení</i> | 54 % | 64 % | 56 % | 70 % |

Tab. 6.7: Celkové hodnocení variant.



## 7 Návrh konstrukce koncových efektorů

V této kapitole jsou provedeny konstrukční návrhy jednotlivých koncových efektorů.

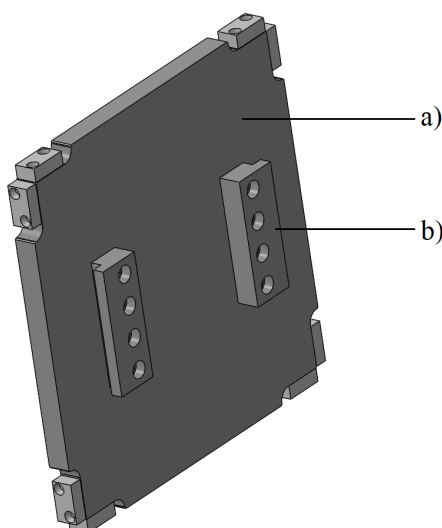
### 7.1 Efektor pro manipulaci s obrobkem

#### Stanovení okrajových podmínek

Na Obr. 7.1 můžeme vidět první objekt manipulace, kterým je obrobek z něhož vychází vstupní parametry pro konstrukční návrh prvního efektoru. Na samotné desce jsou připevněny destičky, skrze které se realizuje samotné uchopení. Již podle samotného charakteru předmětu můžeme vidět, že se bude jednat o aplikaci vnějšího centrického uchopení pomocí chapadla se dvěma posuvnými úchopnými prvky. Bude se tak jednat o třetí uchopení, které bude zohledněno ve výpočtu uchopovací síly. Hmotnost této desky je 13 kg a výchozí rozhraní pro spojení s koncovým efektem jsou právě destičky umístěné na desce, Obr. 7.1 - b). A právě jejich rozměry a rozteč udává připojovací rozměry od kterých se bude odvíjet návrh uchopovacích čelistí.

#### Stanovení dráhy a pohybů objektu při manipulaci

Předpokládá se manipulační úloha, kdy je obrobek zakládán do CNC stroje. Na celou soustavu budou působit největší síly při obecném pohybu **PTP**, což je obecný pohyb mezi dvěma body po křivce, která není přímá. Zrychlení robotu po takové dráze může nabývat až  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .



Obr. 7.1: Objekt manipulace - a) deska obrobku, b) destičky pro úchop.

## Výpočet uchopovací síly

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly je využito tzv. třetího uchopení. Potom pro stanovení velikosti úchopné síly platí následující vzorec:

$$F_T = \frac{m \cdot (g + a)}{\mu \cdot n} \cdot k_s [N] \quad (7)$$

Kde:

$m$  - Hmotnost objektu manipulace [kg]

$g$  - Tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

$a$  - Maximální zrychlení robotu [ $m \cdot s^{-2}$ ]

$\mu$  - Koeficient statického tření [-]

$n$  - Počet čelistí [-]

$k_s$  - koeficient bezpečnosti [-]

$$F_T = \frac{13 \cdot (9,81 + 14)}{0,3 \cdot 2} \cdot 4 = 2063,5 [N]$$

Koeficient statického tření byl zvolen pro kontakt oceli s polyamidem, pro nějž je hodnota 0,3. Tento kontakt bude dále popsán v následujících části návrhu. Hodnota koeficientu bezpečnosti pro větší objekty manipulace se běžně volí 4.

## Volba chapadla

V kapitole 4.1 byl analyzován současný stav efektoru, který je osazen chapadlem PGN+/200, to je schopno vyvodit zavírací sílu 2 700 N. Na první pohled je jasné, že bylo toto chapadlo dostatečné, jelikož může vyvodit sílu větší než je nutná. Z rešerše v kapitole 2.6.1 ale vyplývá, že chapadla prošly značným vývojem a jsou na trhu nové moderní řady, které jsou schopny vyvodit stejnou sílu při mnohem menších rozměrech a hmotnostech.

Je tedy vybráno nové chapadlo společnosti Schunk, konkrétně je zvolena řada PGN+ P, díky které se můžeme posunout o jeden řád níž. Použité chapadlo tak bude **PGN+ P/160-1**.

Jeho parametry jsou:

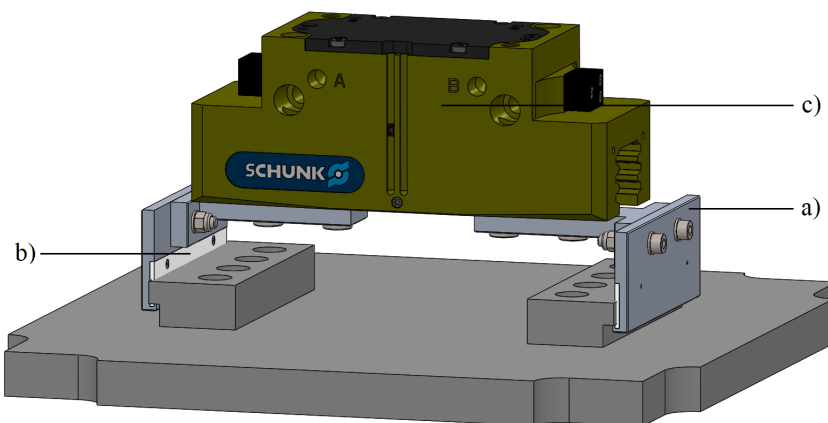
- Zavírací síla = 2 500 [N]
- Hmotnost = 3 [kg]
- Doporučená hmotnost obrobku = 12.5 [kg]

Doporučená hmotnost obrobku je o půl kilogramu nižší, ale to může být dáno příliš přísnými koeficienty bezpečnosti a nejlimitnějšími podmínkami provozu ze strany výrobce. Z tohoto hlediska je zvolené chapadlo stále vhodné.

## Návrh úchopných prvků

Jako kontakt mezi obrobkem a čelistmi byly zvoleny polyamidové destičky. Tento materiál byl zvolen pro zvýšení koeficientu tření a pro dobré vlastnosti těchto materiálů, kterými jsou např. vysoká pevnost, vysoká odolnost v oděru a nízká hustota. Dále je nutné při návrhu čelistí zohlednit i upínací přesah, což je dráha, kterou by čelisti chapadla ještě mohly urazit, pokud by nebyl uchopen obrobek. Tento přesah se u velkých chapadel volí 2 mm.

Celkový návrh čelistí je pak na Obr. 7.2 - a), kde je jedna čelist složena ze tří prvků. První díl realizuje spojení s chapadlem skrze dva šrouby s válcovou hlavou M8x25 a udává nám rozteč obou čelistí. Druhý díl nám definuje výšku čelistí a je spojen s prvním skrze dva šrouby M5x25 a samojistnou maticí. Tyto díly jsou vyrobeny ze slitin hliníku EN AW-2024, které jsou vhodné k obrábění a jsou charakteristické velkou pevností a nízkou měrnou hmotností. Třetím prvkem je polyamidová destička (b), která je zasunuta v drážce druhého dílu a je zajištěna vůči pohybu dvěma zápusťnými šrouby M2x5.



Obr. 7.2: Chapadlo s čelistmi a objektem manipulace - a) čelist, b) polyamidová destička, c) chapadlo Schunk.

## Kontrola momentů působících na uchopovací hlavici

Pro správné a bezpečné použití chapadel je nutná kontrola působících momentů čelistí a objektu na uchopovací hlavici. Dovolené momenty v jednotlivých osách jsou uváděny výrobcem a pro model chapadla PGN+ P/160-1 jsou následující:

- Maximální moment v ose x -  $M_{x_{max}} = 190 \text{ [Nm]}$
- Maximální moment v ose y -  $M_{y_{max}} = 180 \text{ [Nm]}$
- Maximální moment v ose y -  $M_{z_{max}} = 200 \text{ [Nm]}$
- Maximální axiální síla v ose z -  $F_{z_{max}} = 10\,000 \text{ [N]}$

Axiální síla je stanovena jako součet hmotností objektu manipulace a čelistí krát maximální možné zrychlení, které může na hlavici působit. Toto zrychlení je rovno součtu zrychlení tíhového a maximálního zrychlení robota, to představuje natočení a pohyb chapadla v ose působení tíhové síly.

$$F_z = (m_o + m_c) \cdot (g + a) = (13 + 0,3) \cdot (9,81 + 14) = 309,5[N] < F_{z_{max}} \quad (8)$$

Kde:

$m_{o,c}$  - Hmotnost objektu manipulace a čelistí [kg]

Stanovení rovnic ohybových momentů působících na chapadlo vychází z působící axiální síly na rameni od čela chapadla po těžiště objektu v závislosti na jeho natočení.

$$M_x = F_z \cdot (L_y + L_z) = 13,3 \cdot 23,81 \cdot (0,055 + 0,061) = 35,9[Nm] < M_{x_{max}} \quad (9)$$

$$M_y = F_z \cdot (L_x + L_z) = 13,3 \cdot 23,81 \cdot (0,059 + 0,061) = 37,1[Nm] < M_{y_{max}} \quad (10)$$

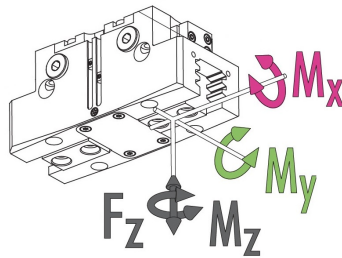
$$M_z = F_z \cdot (L_x + L_y) = 13,3 \cdot 23,81 \cdot (0,059 + 0,055) = 35,3[Nm] < M_{z_{max}} \quad (11)$$

Kde:

$M_{x,y,z}$  - Ohybové momenty v jednotlivých osách x,y a z [Nm]

$L_{x,y,z}$  - Rameno působící síly v ose x,y a z [m]

Jelikož jsou všechny momenty a síla působící na chapadlo menší než maximální dovolené, jsou takto navržené čelisti vhodné k použití. Aby byly tyto momenty nepřipustné a čelisti se tak staly nepřipustnými, muselo by být aplikováno excentrické uchopení, které by tak způsobilo zvýšené namáhání chapadla.

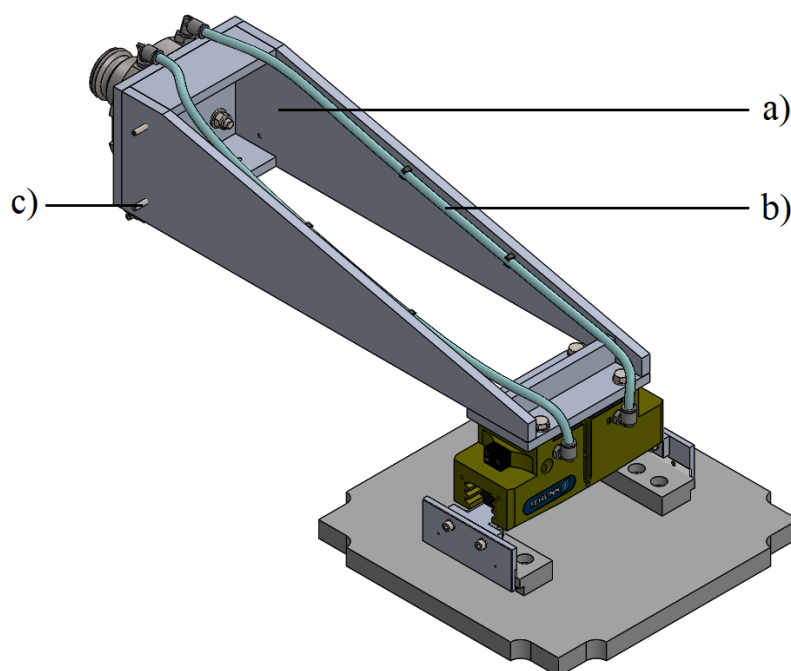


Obr. 7.3: Schéma souřadného systému chapadla Schunk [11].

## Návrh nosného rámu

Při navrhování délky nosného rámu efektoru bylo využito softwaru Process Simulate, ve kterém byl poskytnut model robotického pracoviště ÚVSSR k vypracování této práce. Na základě tohoto modelu provedena zkouška maximálního dosahu robota ze které vyplývá, že v konfiguraci, kdy je osa příruby robota kolmo se zemí, je dosah snížen o 30 % oproti případu kdy je tato osa se zemí rovnoběžně. Takto by se značně prodloužila délku efektoru a zvýšila jeho hmotnost, což odporuje požadavku jeho optimalizace. Pro návrh je tedy dále uvažována původní konfigurace a ponechání vzdálenosti bodu TCP od příruby robota.

Pro zvýšení tuhosti celého efektoru byl navržen svařovaný rám ze slitin hliníku EN AW-5005 na Obr. 7.4 - a), které jsou vhodné ke svařování a vyznačují se vysokou pevností k jejich měrné hmotnosti. Pro optimální tuhost byly na vhodné místa přidány vzpěry. Tento rám je s chapadlem spojen pomocí čtyř šroubů s šestihrannou hlavou M8x35 a s kuželem pro výměnu efektoru pomocí šroubu s válcovou hlavou M8x35 a pojistnou maticí. Uložení efektoru do stojanu se realizuje stavěcími šrouby do prizmatických lůžek, ty jsou na pozici (c). Vnitřní částí rámu je přiváděn stlačený vzduch (b), který je tak částečně chráněn polohou proti případnému poškození nárazem efektoru.

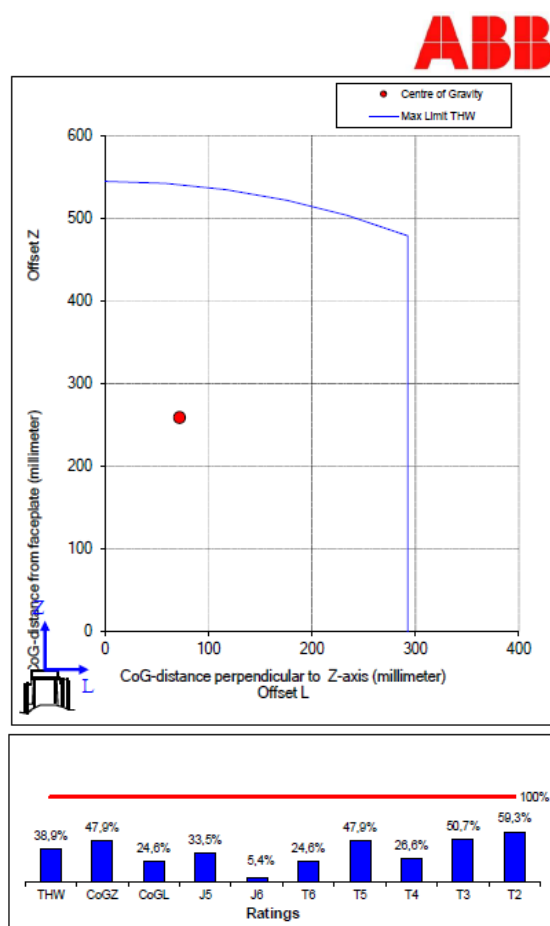


Obr. 7.4: Navržená konstrukce efektoru pro manipulaci s obrobky - a) svařovaný rám, b) pneumatický obvod, c) stavěcí šroub.

## Kontrola zatížení robotu

Jako poslední je důležité provést kontrolu maximálního povoleného zatížení robotu, k tomu byl využit podpůrný software ABB RobotLoad 2.0. V tomto programu byl vybrán robot na který bude efektor upevněn a pro něj vytvořené zatížení, které se skládá z upínacího elementu kužele výměny efektoru, samotného efektoru a objektu manipulace. Hmotnost této celé soustavy je 23,35 kg.

Po nastavení se provede výpočet, který vyhodnotí zda je efektor vhodné použít a jak jsou namáhané jednotlivé části robotu. Toto můžeme vidět na Obr. 7.5. kde je vidět, že navržený efektor je vhodné použít na robotu ABB IRB 4400/60. Horní diagram nám znázorňuje polohu těžiště k poloze příruby robotu a limitní oblast použití. Můžeme zde vidět i jednotlivé ohybové momenty a momenty setrvačnosti, které působí na osy, ty jsou vidět ve spodní části diagramu s názvem "Ratings". Efektor by se stal nepřipustným pro použití tehdy, když by došlo k překročení hodnoty 100 % a poloze těžiště mimo limitní oblast.



Obr. 7.5: Kontrola celkového zatížení robotu efektozem.



## 7.2 Efektor pro manipulaci s průtokovým adaptérem

### Stanovení okrajových podmínek

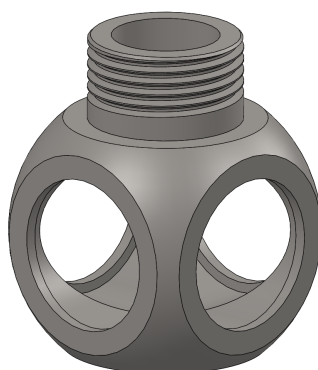
Na Obr. 7.4 můžeme vidět druhý objekt manipulace, kterým jen adaptér průtokového připojení, který je vyroben z galvanizované oceli. Tento díl bude umístěn v zásobníku ze kterého bude odebírán, uchopení se tak bude realizovat ve vrchní část adaptéru, tedy za válec se závitem o velikosti M26x2. V závislosti na tvaru předmětu se bude jedna o tvarové uchopení prizmatickými čelistmi, které bude zohledněno ve výpočtu uchopovací síly. Hmotnost tohoto adaptéru je 250 g.

### Stanovení dráhy a pohybů objektu při manipulaci

Jako u prvního efektoru se může efektor při manipulační úloze pohybovat obecným pohybem **P<sub>TP</sub>**, která není zadána a uvažuje se tak obecná aplikace na pracovišti ÚVSSR. Zrychlení robotu bude nabýt jako v případě předchozího efektoru maximálně  $14 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

### Výpočet uchopovací síly

Jak již bylo zmíněno na začátku kapitoly, pro uchopení předmětu bude použito prizmatických čelistí s bodovým stykem, jejichž úhel je  $90^\circ$ . Ve výpočtu minimální uchopovací síly je tak nutné zohlednit směr zrychlení robotu vůči chapadlu, souřadný systém tak bude vztažen k Obr. 7.3. Vzhledem k nízkým předpokládaným silám není potřeba v prvotním návrhu uvažovat speciální materiály pro zvýšení koeficientu tření, je tak uvažován kontakt oceli s hliníkem kterému odpovídá koeficient statického tření 0,2. Pro manipulační úlohy s malými předměty se uvažuje koeficient bezpečnosti 3.



Obr. 7.6: Objekt manipulace - adaptér průtokového připojení.

Je-li pohyb zrychlení hlavice v ose působení tíhové síly, potom pro uchopovací sílu platí [4]:

$$F_G = \frac{m \cdot g}{2 \cdot \mu} \cdot \left(1 + \frac{a}{g}\right) \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot k_s [N] \quad (12)$$

$$F_G = \frac{0,25 \cdot 9,81}{2 \cdot 0,2} \cdot \left(1 + \frac{14}{9,81}\right) \cdot \sin \frac{90}{2} \cdot 3 = 31,6 [N]$$

Je-li zrychlení hlavice ve směru y, potom pro sílu kterou musí být chapadlo schopno vyvinout platí [4]:

$$F_{G,z} = \frac{m \cdot g}{2 \cdot \mu} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot k_s = \frac{0,25 \cdot 9,81}{2 \cdot 0,2} \cdot \sin \frac{90}{2} \cdot 3 = 13 [N] \quad (13)$$

$$F_y = \frac{m \cdot a}{2 \cdot \mu} \cdot \tan \frac{\alpha}{2} \cdot k_s = \frac{0,25 \cdot 14}{2 \cdot 0,2} \cdot \tan \frac{90}{2} \cdot 3 = 26,3 [N] \quad (14)$$

Je-li zrychlení hlavice ve směru x, potom pro sílu kterou musí být chapadlo schopno vyvinout platí [4]:

$$F_{G,z} = \frac{m \cdot g}{2 \cdot \mu} \cdot \sin \frac{\alpha}{2} \cdot k_s = \frac{0,25 \cdot 9,81}{2 \cdot 0,2} \cdot \sin \frac{90}{2} \cdot 3 = 13 [N] \quad (15)$$

$$F_x = m \cdot a \cdot k_s = 0,25 \cdot 14 \cdot 3 [N] = 10,5 [N] \quad (16)$$

Kde:

$m$  - Hmotnost objektu manipulace [ $kg$ ]

$g$  - Tíhové zrychlení [ $m \cdot s^{-2}$ ]

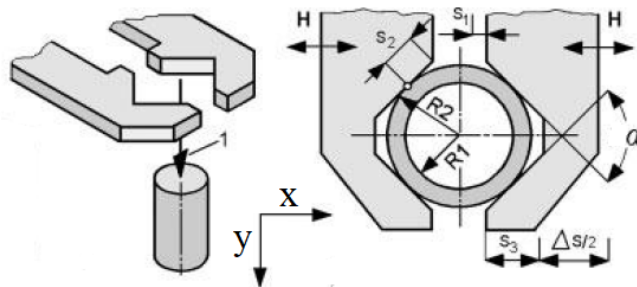
$a$  - Maximální zrychlení robotu [ $m \cdot s^{-2}$ ]

$\mu$  - Koeficient statického tření [-]

$\alpha$  - Úhel prizmatických čelistí [ $^\circ$ ]

$k_s$  - Koeficient bezpečnosti [-]

Z výsledků jasně vyplývá, že minimální potřebná síla kterou musí být chapadlo schopno vyvinout pro bezpečnou manipulaci je 31,6 N.



Obr. 7.7: Reprezentace uchopení předmětu prizmatickými čelistmi [4].

## Volba chapadla

V kapitole 4.1 byl analyzován současný stav efektoru, který využívá chapadla SMC MHZ2-40D, to je schopno vyvodit zavírací sílu 318 N. Tato síla je tak desetkrát větší než minimální síla, která byla stanovena pro bezpečnou aplikaci. Z kapitoly 2.6.1 rovněž vyplývá, že jsou chapadla SMC nejsou vhodné pro manipulační úlohy kvůli jejich špatným parametrům, které jsou pro tyto aplikace klíčové např. poměr hmotnosti chapadla k maximální zavírací síle.

Je tedy vybráno nové chapadlo společnosti Schunk řady PGB, která je vhodná pro střední komponenty, konkrétně se jedná o model **PGB 64**. To je nejmenší dostupné chapadlo této řady, které má oproti původnímu chapadlu SMC pětkrát menší hmotnost.

Jeho parametry jsou následující [11]:

- Zavírací síla = 90 [N]
- Hmotnost = 0,28 [kg]
- Doporučená hmotnost obrobku = 0.7 [kg]

## Návrh úchopných prvků

Jako kontakt mezi adaptérem průtokového připojení a čelistmi byla jako u předchozího efektoru zvolena slitina hliníku EN-AW 2024, a to pro její přínosné vlastnosti. Dále je nutné při návrhu čelistí zohlednit i upínací přesah, jak již bylo zmíněno je to dráha, kterou by čelisti mohly urazit, pokud by nebyl uchopen adaptér. Tento přesah se u malých chapadel volí 1 mm. Tyto čelisti jsou zobrazeny na Obr. 7.8 - d).

## Kontrola momentů působících na uchopovací hlavici

Jako o předchozího efektoru je pro správné a bezpečné použití chapadel nutné zkontrolovat působící momenty čelistí a uchopeného předmětu na uchopovací hlavici. Dovolené momenty v jednotlivých osách jsou uváděny výrobcem a pro model PGB 64 jsou následující [11]:

- Maximální moment v ose x -  $M_{x_{max}} = 20$  [Nm]
- Maximální moment v ose y -  $M_{y_{max}} = 25$  [Nm]
- Maximální moment v ose z -  $M_{z_{max}} = 10$  [Nm]
- Maximální axiální síla v ose z -  $F_{z_{max}} = 500$  [N]

Následující rovnice jsou analogické od efektoru pro manipulaci s obrobky, to platí i o souřadném systému který je stejný jako na Obr. 7.3.

Axiální síla působící na chapadlo je dána následujícím vztahem:

$$F_z = (m_o + m_c) \cdot (g + a) = (0,25 + 0,05) \cdot (9,81 + 14) = 7,1[N] < F_{z_{max}} \quad (17)$$

Pro rovnice ohybových momentů, které mohou působit na hlavici platí:

$$M_x = F_z \cdot (L_y + L_z) = 7,1 \cdot (0,02 + 0,07) = 0,6[Nm] < M_{x_{max}} \quad (18)$$

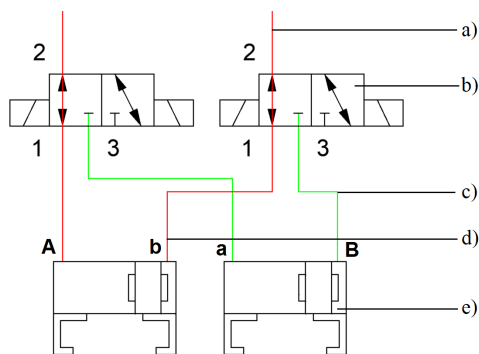
$$M_y = F_z \cdot (L_x + L_z) = 7,1 \cdot (0,03 + 0,07) = 0,7[Nm] < M_{y_{max}} \quad (19)$$

$$M_z = F_z \cdot (L_x + L_y) = 7,1 \cdot (0,02 + 0,03) = 0,4[Nm] < M_{z_{max}} \quad (20)$$

Je vidět, že jsou momenty působící na hlavici dvacetkrát menší než maximální přípustné hodnoty dány výrobcem, navržené čelisti jsou tak vhodné k použití. Tyto výsledky nejsou překvapivé, jelikož se jedná o centrické uchopení, kdy je osa manipulovaného objektu totožná s osou chapadla.

### Výběr pneumatického ventilu

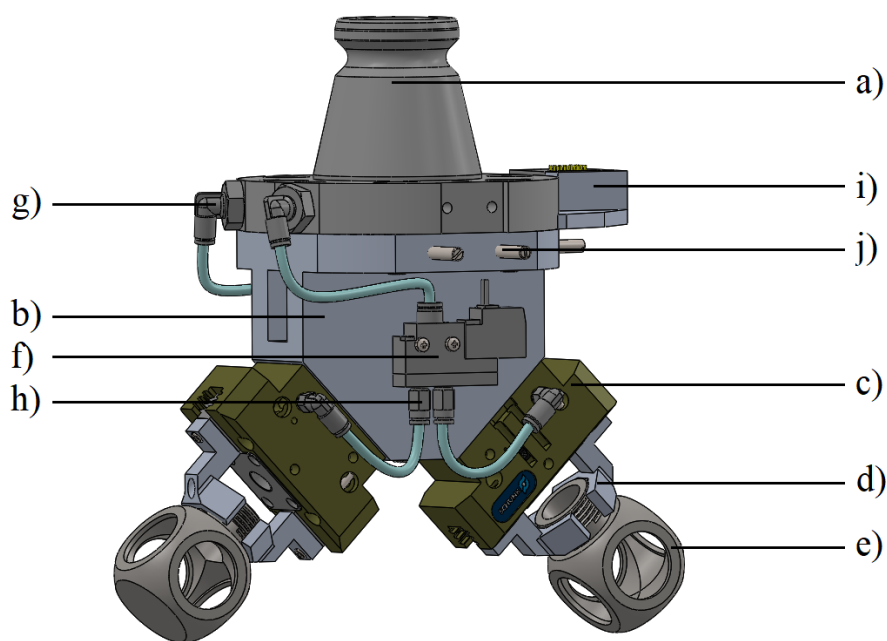
Pro správnou funkci obou chapadel je nutné využití pneumatického ventilu pro řízení rozvodu stlačeného vzduchu, bez kterého by obě chapadla uchopovali a upouštěli součásti současně. Je tak využito dvou elektromagnetických nepřímo ovládaných 3/2 ventilů, které jsou schopny přepínat mezi ovládaným chapadlem. Byly využity ventily společnosti SMC řady VQZ, které jsou svou velikostí vhodné pro použití v koncových efektorech. Na Obr. 7.8 lze vidět schéma tohoto pneumatického zapojení ve kterém lze vidět, že ventily musí být přepínány současně. Takto je pak zajištěn průchozí obvod pro zvolené chapadla a druhé se nachází v pozici pneumatického zámku, kdy jsou přívody tomuto chapadlu zablokovány.



Obr. 7.8: Pneumatické schéma zapojení chapadel PGB - a) zdroj stlačeného vzduchu, b) 3/2 ventil, c) uzavřený pneumatický obvod, d) průchozí pneumatický obvod, e) chapadlo.

## Konstrukce efektoru

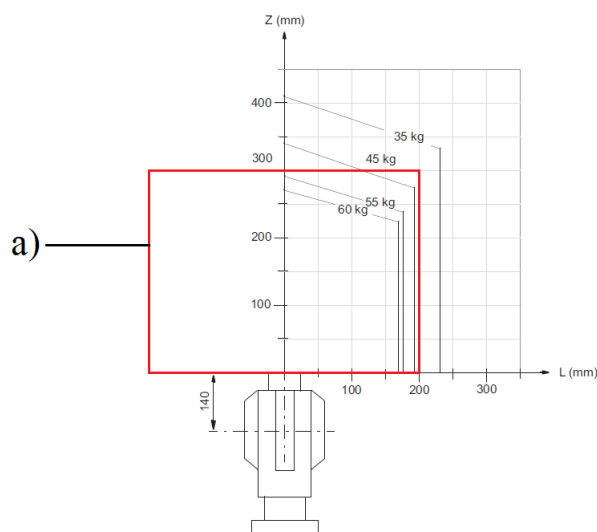
Konečný návrh konstrukce efektoru je na Obr. 7.9., jehož hlavní část tvoří kužel výměny koncových efektorů (a) a tělo efektoru (b), které realizuje spojení s ostatními prvky sestavy. Toto tělo je navrženo ze slitiny hliníku EN-AW 2024, díky které bude efektor velmi pevný a lehký. Pro maximální snížení hmotnosti je do tohoto těla vyfrézována dutina. Na tomto těle jsou připevněny chapadla PGB (c), které svírají úhel 90°, díky tomuto úhlu bude snazší tvoření manipulační úlohy kdy pro najetí do jednoho bodu druhým chapadlem stačí otočení páte osy o právě tento úhel. Na těchto chapadlech můžeme vidět navržené čelisti s prizmatickými lůžky (d) ve kterých je uchopen manipulovaný předmět (e). Po stranách konstrukce jsou umístěny vybrané pneumatické ventily SMC (f), kterými se řídí ovládání chapadel. Zdroj stlačeného vzduchu je přiveden z kužele výměny efektoru (g), pomocí ventilu je pak rozdělen na dvě paralelní větve (h). Elektrické propojení s robotem se realizuje pomocí konektoru SWO-A15 (i), jehož protikusem je osazen robot na pracovišti. Efektor může být odložen do stojanu za pomoci stavěcích šroubů (j), které realizují uložení do prizmatických lůžek stojanu.



Obr. 7.9: Navržená konstrukce efektoru pro manipulaci s adaptéry průtokového připojení.

## Kontrola zatížení robotu

Stanovená celková hmotnost tohoto efektoru je 3,5 kg, dále je nutné zohlednit hmotnosti dvou manipulovaných předmětů a část výměny koncových efektorů, která je trvale upnuta na robotu ABB. Hmotnost celé této soustavy je 6 kg a tvoří tak teoretickou obálku 300x200x100 mm. Na Obr. 7.10, který reprezentuje zátěžový diagram nosnosti robotu dostupný v katalogu výrobce lze vidět, že se efektor pohybuje v oblasti maximální nosnosti 45 kg a efektor tak můžeme považovat za přípustný pro aplikaci s tímto robotem.



Obr. 7.10: Zátěžový diagram nosnosti robotu IRB 4400/60 - a) Teoretická obálka efektoru pro manipulaci s adaptéry.

## 7.3 Efektor pro manipulaci s akrylátovými skly

### Stanovení okrajových podmínek

Posledním objektem manipulace je akrylátové sklo o maximálním rozměru 250x250 mm, tloušťce 5 mm a hmotnosti 375 g. Vzhledem k čtvercovému tvaru takového předmětu je vhodné použití minimálně čtyř přísavek, které jsou umístěny na úhlopříčkách tohoto předmětu. Na základě rešerše o podtlakových úchopných hlavicích v kapitole 2.6.2 je uvažován relativní tlak vůči a tlaku atmosferickému alespoň -80 kPa, což odpovídá absolutnímu tlaku 20 kPa.

### Stanovení dráhy a pohybů objektu při manipulaci

Předpokládá se obecná manipulační úloha, kdy může být s objektem manipulováno v horizontální i vertikální poloze jako je na Obr. 7.11, preferována je ovšem horizontální poloha jako je na Obr. 7.11 - a). Zrychlení robota by v případě manipulace s podtlakovými efektory neměli přesáhnout  $10 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ .

### Výpočet uchopovací síly a stanovení průměru přísavky

Průměr kruhové přísavky je dán vzorcem [4]:

$$d_{min} = 11,3 \cdot \sqrt{\frac{m \cdot k_s}{\sigma_u \cdot z \cdot \mu}} [mm] \quad (21)$$

Kde:

$d_{min}$  - Minimální vnitřní průměr přísavky [mm]

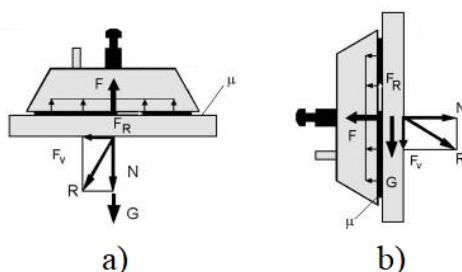
$m$  - Hmotnost objektu manipulace [kg]

$k_s$  - Koeficient bezpečnosti [-]

$\sigma_u$  - Absolutní tlak v přísavce [bar]

$z$  - Počet přísavek [-]

$\mu$  - Koeficient statického tření [-]



Obr. 7.11: Orientace objektu manipulace a) horizontální b) vertikální [4].

Kontaktu silikonové přísavky a plexiskla odpovídá koeficient statického tření 0,5 a pro obdobným aplikacím odpovídá koeficient bezpečnosti 3. Po dosazení hodnot do rovnice dostáváme minimální průměr přísavky:

$$d_{min} = 11,3 \cdot \sqrt{\frac{0,375 \cdot 3}{0,8 \cdot 4 \cdot 0,5}} = 9,5[mm]$$

Bude tak využita plochá přísavka o průměru 10 mm, což je nejbližší vyšší průměr nabízený výrobcem. Přísavka je vybrána od společnosti SMC typ **ZP3-Y10UMKSK6-04** s odpruženým nástavcem a bočním přívodem vakua nástrčnou spojkou.

### Stanovení dalších důležitých parametrů podtlakového systému

Teoretická síla vyvozená jednou přísavkou:

$$\begin{aligned} F_p &= (\sigma_o - \sigma_u) \cdot S \cdot 1000 = (\sigma_o - \sigma_u) \cdot \frac{\pi \cdot d^2 \cdot 1000}{4} = \\ &= (100 - 20) \cdot \frac{\pi \cdot 0,01^2 \cdot 1000}{4} = 6,28[N] \end{aligned} \quad (22)$$

Kde:

$F_t$  - Teoretická úchopná síla jedné přísavky [N]

$\sigma_o$  - Atmosferický tlak [kPa]

$\sigma_u$  - Absolutní tlak v přísavce [kPa]

$S$  - Účinná plocha přísavky [m<sup>2</sup>]

$d$  - Skutečný průměr přísavky [m<sup>2</sup>]

Vyvozený tlak na jednu přísavku:

$$p_p = \frac{F_p}{S} = \frac{6,28}{0,000079} = 79,49[kPa] \quad (23)$$

Objem přísavky, který je nutné vysát:

$$V_p = \frac{\pi \cdot r^2 \cdot h}{3} = \frac{\pi \cdot 0,005^2 \cdot 2 \cdot 0,005}{3} = 2,62 \cdot 10^{-7}[m^3] \quad (24)$$

Kde:

$r$  - Skutečný poloměr přísavky [mm]

$h$  - Skutečná výška přísavky [mm]



## Volba podtlakového ejektoru

Určení objemu vedení mezi přísavkami a zdrojem vakua:

$$V = V_1 + V_2 + V_3 = 4 \cdot V_p + 4 \cdot (\pi \cdot r_2^2 \cdot L_2) + \pi \cdot r_3^2 \cdot L_3 [mm^3] \quad (25)$$

Kde:

$V$  - Celkový objem nutný k vysátí pro vytvoření vakua [ $mm^3$ ]

$V_1$  - Objem přísavek [ $mm^3$ ]

$V_2$  - Objem vedení mezi místem větvení a přísavkami [ $mm^3$ ]

$V_3$  - Objem vedení ejektorem a místem větvení [ $mm^3$ ]

$r_2$  - Poloměr hadice mezi místem větvení a přísavkou [ $mm$ ]

$L_2$  - Maximální délka hadice mezi místem větvení a přísavkou [ $mm$ ]

$r_3$  - Poloměr hadice mezi ejektorem a místem větvení [ $mm$ ]

$L_3$  - Maximální délka hadice mezi ejektorem a místem větvení [ $mm$ ]

$$\begin{aligned} V &= 4 \cdot 262 + 4 \cdot (\pi \cdot 4^2 \cdot 100) + (\pi \cdot 5^2 \cdot 350) = \\ &= 48642 [mm^3] = 0,049 [dm^3] \end{aligned}$$

Po stanovení celkového objemu nutného k vyčerpání stanovíme potřebný nasávaný objem vzduchu ejektorem ve kterém je nutné zohlednit i ztráty, které mohou v reálném systému nastat, uvažujeme je maximálně 10 % hodnoty ideálního stavu:

$$Q_P = \frac{V \cdot 60}{t_{max}} + Q_Z = 1,1 \cdot \frac{0,049 \cdot 60}{0,5} = 5,9 [l \cdot min^{-1}] \quad (26)$$

Kde:

$Q_P$  - Potřebný nasávaný objem vzduchu pro vyčerpání celkového objemu vedení [ $l \cdot min^{-1}$ ]

$t_{max}$  - Maximální přípustná doba pro dosažení požadované hodnoty vakua [ $s$ ]

$Q_Z$  - Ztráty při přísávání objektu manipulace [ $l \cdot min^{-1}$ ]

Minimální potřebný nasávaný objem vzduchu ejektorem pro pokrytí obsluhovaného objemu, neboli sací výkon, podle kterého bude následně vybrán ejektor se pohybuje v trojnásobku skutečně potřebného objemu, což je zohledňující bezpečnostní koeficient:

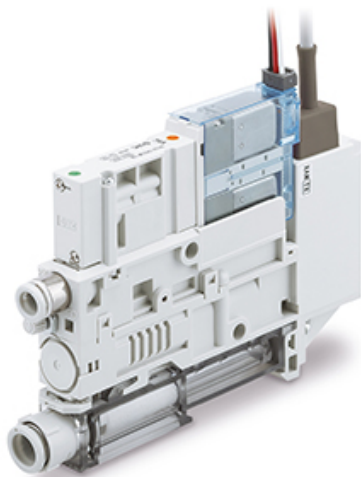
$$Q_{pmin} = 3 \cdot Q_p = 3 \cdot 5,9 = 17,7 [l \cdot min^{-1}] \quad (27)$$

Byl vybrán 2-stupňový ejektor společnosti SMC typ **ZK2-A07K5PLA-06-B**, jehož maximální objem který je schopen nasát je  $29 l \cdot min^{-1}$ , to splňuje stanovené

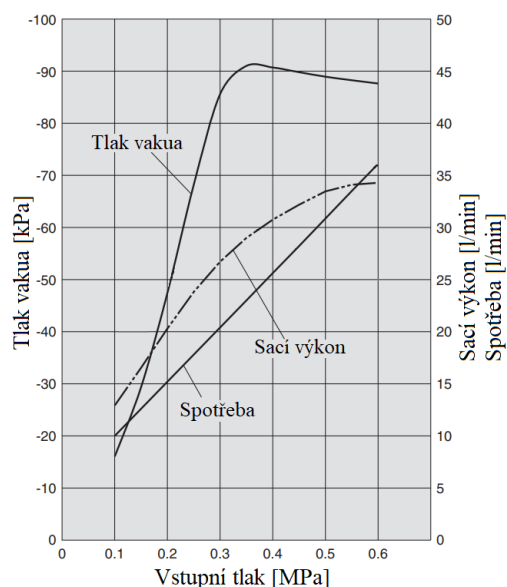
požadavky na pneumatický obvod. Tento efektor má výrazně nižší spotřebu stlačeného vzduchu, díky prvkům, které přeruší přívod vzduchu v momentě dosažení požadované úrovně vakua a vakuového ventilu pro jeho udržení.

Funkčnost podtlakového efektoru je podmíněna úplným dosednutím přísavky na kontaktní plochu objektu a zajištěním těsnosti. Špatná pozice manipulovaného dílu nebo případná změna tvaru dílu může vést chybnému dosednutí přísavky, a tím ke ztrátě podtlaku a nefunkčnosti celého efektoru. Proto jsou do obvodu pro každou přísavku přidány samostatné ventily k udržení vakua, které v případě netěsnosti některé z přísavek zajistí uzavření této větve vakuového obvodu, použit byl typ **ZP2V-W4-05**.

Pro maximální optimalizování provozu efektoru je vhodné se zaměřit na provozní charakteristiku ejektoru na Obr. 7.13, ze které je jasné že hladiny podtlaku -80kPa je dosaženo už při vstupním tlaku 3 bary. S narůstající hodnotou vakua vzrůstá lineárně spotřeba stlačeného vzduchu, tu je vhodné omezit snížením právě vstupního tlaku. Požadovaný tlak na vstupu ejektoru je tak omezen na 3 bary, kdy je efektor schopen dosáhnout sacího výkonu  $25 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$  a spotřeby stlačeného vzduchu  $20 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ . Takto omezený sací výkon je stále dostatečný vzhledem k požadovanému sacímu výkonu  $17,7 \text{ l} \cdot \text{min}^{-1}$ , který byl stanoven v rovnici (27).



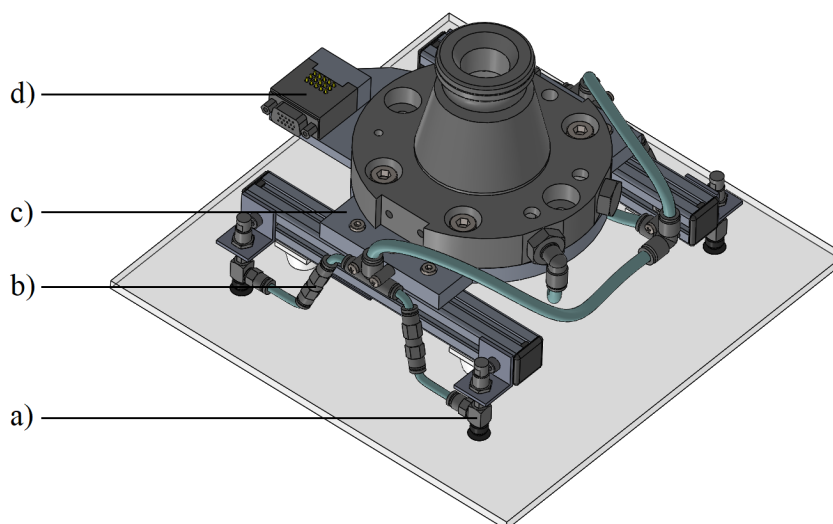
Obr. 7.12: Samostatný ejektor SMC typ ZK2-A [23].



Obr. 7.13: Charakteristika zvoleného ejektoru [23].

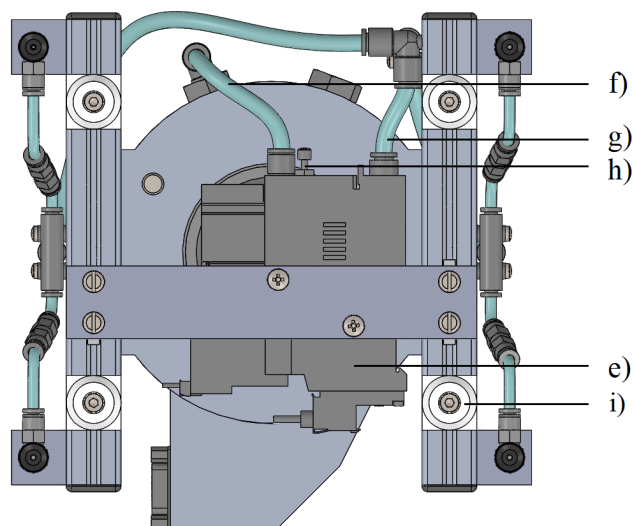
## Konstrukce vakuového efektoru

Podtlakový efektor je tvořen šroubovaným rámem Obr. 7.14 - c), který se skládá ze dvou hliníkových stavebnicových profilů 20x20 mm a dílu pomocí kterého se realizuje spojení s kuželem pro výměnu efektorů. Mezi tyto díly je vložena i spojka s konektorem elektrických signálů (d), pomocí kterého je realizováno elektrické spojení a komunikace s robotem. Na konci těchto profilů jsou připevněny úhelníkové profily na kterých jsou umístěny přísavky s odpruženým nástavcem (a), kterým můžeme seřídit výšku díky závitů na těle držáku nástavce. Toto spojení představuje pasivní flexibilitu, kdy je možnost posouvání těchto úhelníků po rámu a měnit tak polohu přísavek. Před samotnou přísavkou je pak umístěn ventil pro udržení vakua (b), který je do obvodu vložen pomocí nástrčných spojek na jeho těle.



Obr. 7.14: Navržená konstrukce podtlakového efektoru - a) přísavka s bočním přívodem vakua, b) ventil pro udržení vakua, c) šroubovaný rám, d) konektor elektrických signálů.

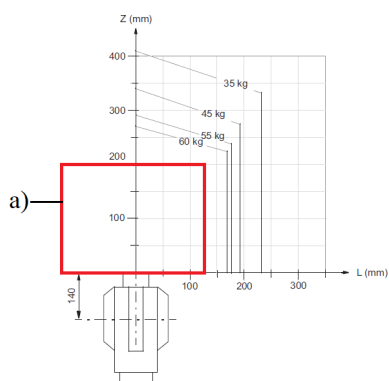
Na spodní části hliníkových profilů je připevněn plech, který drží samotný dvou-  
stupňový ejektor. Ten je vidět na Obr. 7.15 - e), který představuje spodní pohled  
na efektor a realizace jeho pneumatického obvodu. Stlačený vzduch je přiveden z  
kužele pro výměnu efektoru (f) a vytváří tak podtlak, který vysává objem vzduchu  
z pneumatického obvodu (g). Takto vytvořený proud vzduchu vystupuje z efektoru  
tlumičem (h), který jej vypouští do pracovního prostoru. Uložení efektoru do sto-  
janu se realizuje pomocí kónických dorazů (i), které usedají do lůžka protikusu a  
mají tak středící funkci v případě nepřesného najetí robotu na pozici.



Obr. 7.15: Realizace pneumatického obvodu - (e) ejektor SMC, (f) přívod stlačeného vzduchu, (g) rozvod vakua, (h) tlumič vyfukovaného vzduchu, i) doraz.

### Kontrola nosnosti robotu

Odhadovaná celková hmotnost tohoto efektoru je 2,5 kg, která zohledňuje i uchopený díl o maximální hmotnosti 375 g, dále je nutné přičíst hmotnost druhé části adaptérů výměny koncových efektorů, který je trvale upnut na robotu ABB, jehož hmotnost je 2 kg. Celkově je tak na přírubě materiál o celkové hmotnosti 4,5 kg, který tvoří obálku rozměru 250x250x200 mm. Jak je vidět na Obr. 7.16, tento efektor je oblasti kdy může celková hmotnost efektoru dosahovat až 60 kg, není tak potřeba jiná zatěžovací zkouška a efektor je tak způsobilý pro navrženou aplikaci.



Obr. 7.16: Zátěžový diagram nosnosti robotu IRB 4400/60 - a) Teoretická obálka efektoru pro manipulaci s plexiskly.

## 8 Výkresová dokumentace

Výkresová dokumentace vychází ze sestavy DP-000, což je sestava stojanu a navržených efektorů. Dále se dokumentace dělí na jednotlivé sestavy efektorů, kterým přísluší čísla výkresů DP-001 až DP-003 viz. Tab. 8.1. Výkresy s více listy jsou označeny podtržítkem jako např. DP-000\_1, což označuje sestavu 000 a 1. list. Dále byl vytvořen výkres svarku a dva výrobní výkresy, které byly vybrány s vedoucím práce, ty jsou označeny jako DP-XXX-01 podle sestavy ve které jsou obsaženy.

Výkresy vychází z jednotlivých 3D modelů sestav, které byly vytvořeny v programu SolidWorks, tyto modely se nachází v příloze. Výkresy sestav, součástí a svarku byly vytvořeny v programu AutoCAD, tato výkresová dokumentace se rovněž nachází v příloze. Pneumatické schéma bylo vytvořeno v programu FluiSIM Pneumatics. Výkresová dokumentace se opírá o Základy konstruování [8] a Výběry z norem [9].

| Název                              | Typ výkresu    | Číslo výkresu |
|------------------------------------|----------------|---------------|
| Stojan s efektory                  | Výkres sestavy | DP-000        |
| Efektor pro manipulaci s obrobky   | Výkres sestavy | DP-001        |
| Svařovaná konstrukce               | Výkres svarku  | DP-001-01     |
| Efektor pro manipulaci s adaptéry  | Výkres sestavy | DP-002        |
| Tělo efektoru                      | Výrobní výkres | DP-002-01     |
| Efektor pro manipulaci s plexiskly | Výkres sestavy | DP-003        |
| Spojka profilů                     | Výrobní výkres | DP-003-01     |
| Zapojení pneumatického obvodu      | Pneu schéma    | DP-PNEU       |

Tab. 8.1: Přehled přiložených výkresů.



## 9 Ekonomické zhodnocení

Tato kapitola je zaměřena na přibližné stanovení ceny takto navržených koncových efektorů, která byla odhadnuta na 122 800,- Kč. Takto vysoká je z důvodu použití tří chapadel společnosti Schunk, které tak tvoří přes 70 % pořizovací ceny. Druhou největší položkou jsou vyráběné díly ze slitiny hliníku EN-AW 2024, které tvoří 13 % celkové částky. Takto nákladné řešení by tak mělo přínos spíše ve výrobním podniku, kde by výhody těchto efektorů opodstatnily jejich použití a umožnili zvýšení taktu robotického pracoviště. Pouze efektor pro manipulaci s akrylátovými skly je cenově přijatelný pro použití na pracovišti ÚVSSR. Do kalkulace se nepromítly komponenty, které jsou na pracovišti dostupné jako např. kužely pro výměnu efektoru nebo konektory elektrický signálů.

| Název dílu                | Počet kusů | Cena za kus        |
|---------------------------|------------|--------------------|
| Schunk PGN+P/160          | 1          | 36 000,- Kč        |
| Svařovaná konstrukce      | 1          | 6 000,- Kč         |
| Obráběné díly pro čelisti | 2          | 1 500,- Kč         |
| Polyamidová destička      | 2          | 100,- Kč           |
| Polyuretanová hadice      | 1          | 200,- Kč           |
| Nástrčné spojky           | 4          | 100,- Kč           |
| Spojovací materiál        | 1          | 1000,- Kč          |
| <b>Celková cena</b>       |            | <b>46 800,- Kč</b> |

Tab. 9.1: Odhadovaná cena efektoru pro manipulaci s obrobky.

| Název dílu              | Počet kusů | Cena za kus        |
|-------------------------|------------|--------------------|
| Schunk PGB 64           | 2          | 26 500,- Kč        |
| 3/2 ventil SMC - VQZ115 | 2          | 500,- Kč           |
| Obráběné tělo efektoru  | 1          | 4 000,- Kč         |
| Obráběna čelist         | 4          | 500,- Kč           |
| Nástrčné spojky         | 10         | 100,- Kč           |
| Polyuretanová hadice    | 2          | 200,- Kč           |
| Spojovací materiál      | 1          | 500,- Kč           |
| <b>Celková cena</b>     |            | <b>61 900,- Kč</b> |

Tab. 9.2: Odhadovaná cena efektoru pro manipulaci s průtokovými adaptéry.

| Název dílu                 | Počet kusů | Cena za kus        |
|----------------------------|------------|--------------------|
| Ejektor ZK2-A07K5PLA-06    | 1          | 3 500,- Kč         |
| Přísavky ZP3-Y10UMHSK6-04  | 4          | 1 050,- Kč         |
| ZP2V-W4-05                 | 4          | 600,- Kč           |
| Hliníkové profily 20x20    | 1          | 500,- Kč           |
| Obráběné díly              | 1          | 1 500,- Kč         |
| Plechové díly              | 1          | 300,- Kč           |
| Polyuretanové hadice       | 1          | 200,- Kč           |
| Nástrčné spojky a šroubení | 5          | 100,- Kč           |
| Spojovací materiál         | 1          | 1 000,- Kč         |
| <b>Celková cena</b>        |            | <b>14 100,- Kč</b> |

Tab. 9.3: Odhadovaná cena efektoru pro manipulaci s akrylátovými skly.



## 10 Zhodnocení a diskuze

Diplomová práce řešila problém analyzování stávajícího stavu koncových efektorů a vytvoření nových optimalizovaných efektorů, které jsou tak výsledkem této diplomové práce.

U prvního efektoru pro manipulaci s obrobky bylo dosaženo snížení hmotnosti o necelých 35 %, a to hlavně díky návrhu nového svařovaného rámu z moderních slitin hliníku a výběru nového chapadla. Zavedením svařované konstrukce bylo dosaženo požadovaného zvýšení tuhosti tohoto efektoru.

Druhý efektor určený pro manipulaci s průtokovými adaptéry prošel celkovou změnou koncepce, kdy bylo přidáno druhé chapadlo sloužící jako přípravek v manipulační úloze, do kterého se může předpřipravit nový díl a snížit tak takt manipulační úlohy. Rovněž byl efektor vybaven vhodnějším chapadlem, které tak nahradilo předdimenzované chapadlo SMC. Takto vznikl optimalizovaný efektor o srovnatelné hmotnosti s aktuálním řešením.

Jako poslední byl navržen podtlakový efektor, který využívá moderní prvky pro tvorbu a udržení vakua. Tyto finančně nenáročné prvky výrazně sníží spotřebu stlačeného vzduchu. V reálné aplikaci, kdy efektor pracuje kontinuálně ve vícesměnném provozu, tvoří spotřeba stlačeného vzduchu zásadní podíl na energii robotického pracoviště. Další jeho výhodou oproti stávajícímu řešení je jeho pasivní flexibilita, kdy je možné upravovat pozice přísavky či dokonce změnit tvar manipulované součásti výměnou stavebnicových profilů.

V posledním kroku byl navržen stojan, který je nedílnou součástí aplikace výměnných koncových efektorů. Ten byl navržený podle původní koncepce na robotickém pracovišti jako šroubovaná konstrukce. Ta je tak dostatečně tuhá pro efekторы, které po snížení hmotnosti budou na konstrukci působit menším zatížením. Pro větší stabilitu byl zvýšen počet prizmatických lůžek. Tento stojan je součástí příloh jako 3D model a výkres sestavy.

### 10.1 Možné pokračování

Zadáním diplomové práce bylo vytvořit efekторы s výchozím rozhraním, kterým je kužel automatické výměny koncových efektorů. Je vhodné aby se v budoucnu změnil tento zastaralý způsob za modernější systémy, které jsou na trhu dostupné. Bylo by tak nutné upravit konstrukci navržených efektorů pro tento nový systém. Ty se vyznačují menší hmotností a menšími zástavbovými rozměry, neměl by tak nastat problém s jejich zavedením.

## 10.2 Využití v praxi

Cílem této práce bylo navržení koncových efektorů pro robotické pracoviště ÚVSSR a přirozeně se tak nabízí výroba a sestavení těchto efektorů, které se následně musí na pracovišti odladit pro přesné polohování. Jako poslední je důležité vytvořit příslušné programy manipulačních úloh i pohybů kdy je efektor robotem odkládán do dokovací stanice.

Dalším využitím může být laboratorní úloha virtuálního zprovoznění pro studenty ústavu, především efektoru pro manipulaci s adaptéry průtokového připojení, kdy by si studenti vyzkoušeli problematiku programování úlohy s dvěma chapadly a měli by možnost porovnání zkrácení pracovního cyklu oproti původnímu efektoru, který pracuje vždy jen s jedním objektem.

# 11 Závěr

Výsledkem této diplomové práce bylo vytvoření konstrukčního návrhu koncových efektorů pro manipulaci s objekty v rámci robotické buňky umístěné na pracovišti Ústavu výrobních strojů, systému a robotiky FSI VUT v Brně.

Práce začíná podrobnou rešerší v oblasti koncových efektorů, jejich principu, stavby a možnostech jejich aplikace. Rovněž je zde uvedena problematika automatické výměny koncových efektorů, která tvoří výchozí rozhraní konstrukce. Nejdůležitější částí této rešerše je shrnutí dostupných řešení na trhu, která je základem výběru příslušných komponent v konstrukční části práce.

V kapitole systémový rozbor je popsána zadaná problematika práce, která byla diskutována s vedoucím práce, na základě které byly stanoveny cíle a adekvátní postup řešení. Na tuto kapitolu navazuje analýza stávajícího řešení, které popisuje výchozí efektor a diskutuje případné konstrukční uzly, které jsou klíčové pro návrhnutí optimalizovaného řešení.

Pátá kapitola se věnuje vytvoření návrhových variant, které by mohly být pro řešení přínosné. Byly navrženy čtyři koncepty, včetně schématických návrhových modelů. Na tuto kapitolu navazuje multikriteriální analýza, jejíž úkolem je objektivní zhodnocení těchto návrhových variant podle parametrů, které byly vybrány na základě sestaveného systematického rozboru. Na základě jejího výsledku bylo rozhodnuto ponechání samostatných efektorů, a to především pro maximální snížení jejich hmotnosti a momentů setrvačnosti.

Sedmá kapitola se zabývá výpočty a konstrukcí efektorů podle zvoleného konceptu. Tyto konstrukce vychází z předmětů manipulace, které tak stanovují okrajové podmínky. Na konci tohoto návrhu je posouzení efektoru z hlediska bezpečnosti jejich aplikace na zadaném robotu, přičemž výsledné konstrukce byly stanoveny jako vhodné.

V poslední části je vytvořena výkresová dokumentace, která je popsána ve stejnojmenné kapitole, na kterou navazuje ekonomické zhodnocení, které se snaží o stanovení přibližných nákladů na realizaci tohoto návrhu. Tato částka byla stanovena na 123 tisíc korun českých.



# Literatura

- [1] KOLÍBAL, Zedeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: VUTUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [2] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory*. Ostrava: VŠB - TUO, 2007. ISBN 978-80-248-1522-0.
- [3] HOTAŘ, Vlastimil. *Efektory a periferní zařízení robotů*. Technická univerzita v Liberci, Fakulta strojní. Liberec, 2019.
- [4] MONKMAN, Gareth J., Stefan HESSE, Ralf STEINMANN, Henrik SCHUNK a Valentin PETROV. *Robot Grippers*. Weinheim: WILEX-VCH Verlag GmbH & Co., 2007. ISBN 978-3-527-40619-7.
- [5] MAREK, Jiří. *Systémový přístup a rozhodování v konstrukčním procesu: Metodika brněnské konstrukční školy*. Brno, 2021.
- [6] BRAŽINA, Jakub. *Virtuální zprovoznění výrobního systému* [online]. Brno, 2019 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/116785>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Vetiška.
- [7] SZABARI, Mikuláš. *Konstrukce kráčejícího mobilního robotu*. [online]. Brno, 2018 [cit. 2022-03-26]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/83508>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Petr Kočiš.
- [8] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a Robert KOVÁŘÍK. *Základy konstruování*. 6. vyd. Brno: CERM, 2015. ISBN 978-80-7204-921-9.
- [9] SVOBODA, Pavel a Jan BRANDEJS. *Výběry z norem*. 5. vyd. Brno: CERM, 2016. ISBN 978-80-7204-838-0.
- [10] Robotické systémy: KUKA [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: [https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%c5%beby/robotick%c3%a9-syst%c3%a9my/ready2\\_use/kuka-ready2\\_spot](https://www.kuka.com/cs-cz/produkty,-slu%c5%beby/robotick%c3%a9-syst%c3%a9my/ready2_use/kuka-ready2_spot).
- [11] Paralerní chapadlo. *Schunk* [online]. [cit. 2022-03-14]. Dostupné z: [https://schunk.com/cz\\_cs/uchopovaci-systemy/category/uchopovaci-systemy/uchopovace-schunk/paralerni-chapadlo/](https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/category/uchopovaci-systemy/uchopovace-schunk/paralerni-chapadlo/).

- [12] 2 čelisti - Paralelní pohyb. *SMC* [online]. SMC Corporation, c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
<https://www.smc.eu/cs-cz/produkty-a-podpora/2-celisti-paralelni-pohyb~17432~nav#s>.
- [13] Paralelní chapadla. *Festo* [online]. Festo, c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
[https://www.festo.com/cz/cs/c/vyroby/tovarni-automatizace/chapadla/mechanicka-chapadla/paralelni-chapadla-id\\_pim487/](https://www.festo.com/cz/cs/c/vyroby/tovarni-automatizace/chapadla/mechanicka-chapadla/paralelni-chapadla-id_pim487/).
- [14] Paralelné uchopovače. *Destaco* [online]. D-S-C Czech, c2010 - 2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
<https://dsczech.cz/paralelne-uchopovace>.
- [15] PGN-plus-P 40. *Schunk* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
[https://schunk.com/cz\\_cs/uchopovaci-systemy/product/49862-0318448-pgn-plus-p-40/](https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/product/49862-0318448-pgn-plus-p-40/).
- [16] Robot Gripper. *Robotiq* [online]. 2015 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
<https://blog.robotiq.com/why-use-a-robot-gripper-with-3-fingers>.
- [17] Středicí chapadla. *Schunk* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
[https://schunk.com/cz\\_cs/uchopovaci-systemy/category/uchopovaci-systemy/uchopovace-schunk/stredici-chapadla/](https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/category/uchopovaci-systemy/uchopovace-schunk/stredici-chapadla/).
- [18] 3 čelisti. *SMC* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
<https://www.smc.eu/cs-cz/produkty-a-podpora/3-celisti~17474~nav#s>.
- [19] Tříbodová chapadla. *Festo* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
[https://www.festo.com/cz/cs/c/vyroby/tovarni-automatizace/chapadla/mechanicka-chapadla/tribodova-chapadla-id\\_pim488/](https://www.festo.com/cz/cs/c/vyroby/tovarni-automatizace/chapadla/mechanicka-chapadla/tribodova-chapadla-id_pim488/).
- [20] Tříbodová chapadla HGDT. *Festo* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
[https://www.festo.com/cz/cs/p/tribodova-chapadla-id\\_HGDT/?q=~:festosortorderScored](https://www.festo.com/cz/cs/p/tribodova-chapadla-id_HGDT/?q=~:festosortorderScored).
- [21] Vakuové ejektory. *Festo* [online]. c2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z:  
[https://www.festo.com/cz/cs/c/vyroby/prumyslova-automatizace/vakuova-technika/vakuove-ejektory-id\\_pim112/?siteUId=fox\\_cz&siteName=Festo+CZ](https://www.festo.com/cz/cs/c/vyroby/prumyslova-automatizace/vakuova-technika/vakuove-ejektory-id_pim112/?siteUId=fox_cz&siteName=Festo+CZ).
- [22] Vacuum Pumps. *Airbest* [online]. c2018 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z:  
<https://www.air-best.com/product/index/9.html?md=0>.

- [23] Ejektory. *SMC* [online]. c2022 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z:  
<https://www.smc.eu/cs-cz/produkty-a-podpora/ejektory~29029~nav#s>.
- [24] PGN-plus 200-1. *Schunk* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
[https://schunk.com/cz\\_cs/uchopovaci-systemy/product/661-0371105-pgn-plus-200-1/](https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/product/661-0371105-pgn-plus-200-1/).
- [25] Series MHZ. *SMC* [online]. c2022 [cit. 2022-03-14]. Dostupné z:  
[https://static.smc.eu/pdf/MHZ\\_EU.pdf](https://static.smc.eu/pdf/MHZ_EU.pdf).
- [26] VQC2000. *SMC* [online]. c2022 [cit. 2022-03-15]. Dostupné z:  
<https://www.smc.eu/cs-cz/produkty-a-podpora/vqc2000-elektromagneticky-neprimo-ovladany-5-2-a-5-3-ventil-vsechna-provedeni~49973~cfg?partNumber=VQC2200KN-51>.





# Seznam symbolů a zkratek

| Název       | Jednotka               | Význam                       |
|-------------|------------------------|------------------------------|
| 3D          | [–]                    | Trojrozměrný                 |
| $\alpha$    | [°]                    | Úhel prizmatických čelistí   |
| $\mu$       | [–]                    | Koeficient statického tření  |
| $\pi$       | [–]                    | Ludolfovo číslo              |
| $\sigma_o$  | [kPa]                  | Atmosferický tlak            |
| $\sigma_u$  | [kPa],[bar]            | Absolutní tlak v přísavce    |
| $a$         | [m · s <sup>-2</sup> ] | Zrychlení robotu             |
| $BP_{A_1}$  | [–]                    | Body parametru 1 varianty A  |
| $BP_{A_2}$  | [–]                    | Body parametru 2 varianty A  |
| $BP_{A_3}$  | [–]                    | Body parametru 3 varianty A  |
| $BP_{A_4}$  | [–]                    | Body parametru 4 varianty A  |
| $BP_{A_5}$  | [–]                    | Body parametru 5 varianty A  |
| $BP_{A_6}$  | [–]                    | Body parametru 6 varianty A  |
| $BP_{A_8}$  | [–]                    | Body parametru 8 varianty A  |
| $BP_{B1_1}$ | [–]                    | Body parametru 1 varianty B1 |
| $BP_{B1_2}$ | [–]                    | Body parametru 2 varianty B1 |
| $BP_{B1_3}$ | [–]                    | Body parametru 3 varianty B1 |
| $BP_{B1_4}$ | [–]                    | Body parametru 4 varianty B1 |
| $BP_{B1_5}$ | [–]                    | Body parametru 5 varianty B1 |
| $BP_{B1_6}$ | [–]                    | Body parametru 6 varianty B1 |
| $BP_{B1_8}$ | [–]                    | Body parametru 8 varianty B1 |
| $BP_{B2_1}$ | [–]                    | Body parametru 1 varianty B2 |
| $BP_{B2_2}$ | [–]                    | Body parametru 2 varianty B2 |
| $BP_{B2_3}$ | [–]                    | Body parametru 3 varianty B2 |
| $BP_{B2_4}$ | [–]                    | Body parametru 4 varianty B2 |
| $BP_{B2_5}$ | [–]                    | Body parametru 5 varianty B2 |
| $BP_{B2_6}$ | [–]                    | Body parametru 6 varianty B2 |
| $BP_{B2_8}$ | [–]                    | Body parametru 8 varianty B2 |
| $BP_{C_1}$  | [–]                    | Body parametru 1 varianty C  |
| $BP_{C_1}$  | [–]                    | Body parametru 2 varianty C  |
| $BP_{C_1}$  | [–]                    | Body parametru 3 varianty C  |
| $BP_{C_1}$  | [–]                    | Body parametru 4 varianty C  |
| $BP_{C_1}$  | [–]                    | Body parametru 5 varianty C  |
| $BP_{C_1}$  | [–]                    | Body parametru 6 varianty C  |
| $BP_{C_1}$  | [–]                    | Body parametru 8 varianty C  |

|               |                    |                                                           |
|---------------|--------------------|-----------------------------------------------------------|
| $CNC$         | [-]                | "Computer Numerical Control"- Počítačové číslicové řízení |
| $CoGZ$        | [-]                | Vzdálenost těžiště k přírubě robotu v ose z               |
| $CoGL$        | [-]                | Vzdálenost těžiště k přírubě robotu v ose x               |
| $d$           | [mm]               | Skutečná průměr přísavky                                  |
| $d_{min}$     | [mm]               | Minimální vnitřní průměr přísavky                         |
| $F_G$         | [N]                | Tíhová síla                                               |
| $F_{G,x}$     | [N]                | Tíhová síla působící při pohybu v ose x                   |
| $F_{G,z}$     | [N]                | Tíhová síla působící při pohybu v ose y                   |
| $F_T$         | [N]                | Třecí uchopovací síla                                     |
| $F_x$         | [N]                | Síla působící na prizmatické lůžko při pohybu v ose x     |
| $F_y$         | [N]                | Síla působící na prizmatické lůžko při pohybu v ose y     |
| $F_z$         | [N]                | Axiální síla v ose z                                      |
| $F_{z_{max}}$ | [N]                | Maximální axiální síla v ose z                            |
| $g$           | $[m \cdot s^{-2}]$ | Tíhové zrychlení                                          |
| $h$           | [mm]               | Skutečná výška přísavky                                   |
| $J_5$         | $[kg \cdot m^2]$   | Celkový moment setrvačnosti pro osu robotu 5              |
| $J_6$         | $[kg \cdot m^2]$   | Celkový moment setrvačnosti pro osu robotu 6              |
| $k_s$         | [-]                | Koeficient bezpečnosti                                    |
| $L_2$         | [m]                | Maximální délka hadice mezi místem větvení a přísavkou    |
| $L_3$         | [m]                | Maximální délka hadice mezi ejektorem a místem větvení    |
| $L_x$         | [m]                | Rameno působící síly v ose x                              |
| $L_y$         | [m]                | Rameno působící síly v ose y                              |
| $L_z$         | [m]                | Rameno působící síly v ose z                              |
| $m_c$         | [kg]               | Hmotnost čelistí chapadla                                 |
| $m_o$         | [kg]               | Hmotnost objektu manipulace                               |
| $M_x$         | [Nm]               | Ohybový moment v ose x                                    |
| $M_{x_{max}}$ | [Nm]               | Maximální ohybový moment v ose x                          |
| $M_y$         | [Nm]               | Ohybový moment v ose y                                    |
| $M_{y_{max}}$ | [Nm]               | Maximální ohybový moment v ose y                          |
| $M_z$         | [Nm]               | Ohybový moment v ose z                                    |
| $M_{z_{max}}$ | [Nm]               | Maximální ohybový moment v ose z                          |
| $n$           | [-]                | Počet čelistí chapadla                                    |
| $p_p$         | $[kPa]$            | Vyvozený tlak na přísavku                                 |
| $P1$          | [-]                | Parametr 1                                                |
| $P2$          | [-]                | Parametr 2                                                |
| $P3$          | [-]                | Parametr 3                                                |
| $P4$          | [-]                | Parametr 4                                                |
| $P5$          | [-]                | Parametr 5                                                |

|            |                     |                                                                       |
|------------|---------------------|-----------------------------------------------------------------------|
| $P6$       | $[-]$               | Parametr 6                                                            |
| $P7$       | $[-]$               | Parametr 7                                                            |
| $P8$       | $[-]$               | Parametr 8                                                            |
| $P9$       | $[-]$               | Parametr 9                                                            |
| $P10$      | $[-]$               | Parametr 10                                                           |
| $PTP$      | $[-]$               | "Point to Point"- Obecná dráha robotu                                 |
| $Q_p$      | $[l \cdot min - 1]$ | Potřebný nasávaný objem vzduchu pro vyčerpání celkového objemu vedení |
| $Q_{pmin}$ | $[l \cdot min - 1]$ | Minimální potřebný nasávaný objem vzduchu ejektorem                   |
| $Q_Z$      | $[l \cdot min - 1]$ | Ztráty při přísávání objektu manipulace                               |
| $r$        | $[mm]$              | Skutečná poloměr přísavky                                             |
| $r_2$      | $[mm]$              | Poloměr hadice mezi místem větvení a přísavkou                        |
| $r_3$      | $[mm]$              | Poloměr hadice mezi ejektorem a místem větvení                        |
| $S$        | $[mm^2]$            | Účinná plocha přísavky                                                |
| $t_{max}$  | $[s]$               | Maximální přípustná doba pro dosažení požadované hodnoty vakua        |
| $T6$       | $[Nm]$              | Ohybový moment působící na šestou osu robotu                          |
| $T5$       | $[Nm]$              | Ohybový moment působící na pátou osu robotu                           |
| $T4$       | $[Nm]$              | Ohybový moment působící na čtvrtou osu robotu                         |
| $T3$       | $[Nm]$              | Ohybový moment působící na třetí osu robotu                           |
| $T2$       | $[Nm]$              | Ohybový moment působící na druhou osu robotu                          |
| $TCP$      | $[-]$               | „Tool Centre Point“ - Referenční bod nástroje                         |
| $THW$      | $[-]$               | „Total Handling Weight“ - Celková manipulovaná hmotnost               |
| $ÚVSSR$    | $[-]$               | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky                            |
| $V$        | $[mm^3]$            | Celkový objem nutný k vysátí pro vytvoření vakua                      |
| $V_1$      | $[mm^3]$            | Celkový objem přísavek                                                |
| $V_2$      | $[mm^3]$            | Objem vedení mezi místem větvení a přísavkami                         |
| $V_3$      | $[mm^3]$            | Objem vedení ejektorem a místem větvení                               |
| $V_p$      | $[mm^3]$            | Objem přísavky                                                        |
| $VP_1$     | $[-]$               | Váha parametru 1                                                      |
| $VP_2$     | $[-]$               | Váha parametru 2                                                      |
| $VP_3$     | $[-]$               | Váha parametru 3                                                      |
| $VP_4$     | $[-]$               | Váha parametru 4                                                      |
| $VP_5$     | $[-]$               | Váha parametru 5                                                      |
| $VP_6$     | $[-]$               | Váha parametru 6                                                      |
| $VP_7$     | $[-]$               | Váha parametru 7                                                      |
| $VP_8$     | $[-]$               | Váha parametru 8                                                      |
| $VP_9$     | $[-]$               | Váha parametru 9                                                      |
| $VP_{10}$  | $[-]$               | Váha parametru 10                                                     |
| $z$        | $[-]$               | Počet přísavek                                                        |



# Seznam obrázků

|     |                                                                                                                                                                   |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Svařovací technologická hlavice [10].                                                                                                                             | 17 |
| 2.2 | Kombinovaná výstupní hlavice - a) podtlakový efektor, b) stříhací zařízení [1].                                                                                   | 19 |
| 2.3 | Rozdělení možných principů spojování přírub. I. - Rozdělení vázacích prvků, II. - způsob pohonu, III. - Způsob aretace [1].                                       | 20 |
| 2.4 | Paralelní chapadlo firmy Schunk model PGN-plus-P 40 [15].                                                                                                         | 21 |
| 2.5 | Středící chapadlo firmy Festo model HGDT [20].                                                                                                                    | 22 |
| 2.6 | Porovnání charakteristik zdrojů vakua [3].                                                                                                                        | 23 |
| 2.7 | Ejektory SMC řady ZH-A [23].                                                                                                                                      | 24 |
| 4.1 | Koncový efektor pro manipulaci s obrobky na pracovišti ÚVSSR.                                                                                                     | 27 |
| 4.2 | Efektor pro manipulaci s adaptéry na pracovišti ÚVSSR.                                                                                                            | 28 |
| 4.3 | Podtlakový efektor robotického pracoviště ÚVSSR.                                                                                                                  | 29 |
| 5.1 | Varianta A a) chapadlo obrobku, b) čelisti chapadla, c) podtlakové chapadlo, d) rám efektoru, e) kužel výměny efektoru, f) chapadlo adaptérů.                     | 31 |
| 5.2 | Podtlakový efektor - a) rozvod vakua, b) rám, c) přísavky, d) kužel výměny efektoru.                                                                              | 32 |
| 5.3 | Kombinovaný efektor - a) chapadlo obrobku, b) chapadlo adaptéru, c) rám efektoru, d) kužel výměny efektoru.                                                       | 32 |
| 5.4 | Kombinovaný efektor - a) rám b) rozvod vakua c) přísavky d) chapadlo adaptéru e) kužel výměny efektoru.                                                           | 33 |
| 5.5 | Efektor pro manipulaci s obrobky - a) nosný rám b) paralelní chapadlo c) čelisti d) kužel výměny efektoru.                                                        | 33 |
| 5.6 | Varianta C - efektor pro manipulaci s adaptéry a) rám b) uchopovací hlavice c) čelisti d) kužel výměny efektoru.                                                  | 34 |
| 7.1 | Objekt manipulace - a) deska obrobku, b) destičky pro úchop.                                                                                                      | 43 |
| 7.2 | Chapadlo s čelistmi a objektem manipulace - a) čelist, b) polyamidová destička, c) chapadlo Schunk.                                                               | 45 |
| 7.3 | Schéma souřadného systému chapadla Schunk [11].                                                                                                                   | 46 |
| 7.4 | Navržená konstrukce efektoru pro manipulaci s obrobky - a) svařovaný rám, b) pneumatický obvod, c) stavěcí šroub.                                                 | 47 |
| 7.5 | Kontrola celkového zatížení robotu efektozem.                                                                                                                     | 48 |
| 7.6 | Objekt manipulace - adaptér průtokového připojení.                                                                                                                | 49 |
| 7.7 | Reprezentace uchopení předmětu prizmatickými čelistmi [4].                                                                                                        | 50 |
| 7.8 | Pneumatické schéma zapojení chapadel PGB - a) zdroj stlačeného vzduchu, b) 3/2 ventil, c) uzavřený pneumatický obvod, d) průchozí pneumatický obvod, e) chapadlo. | 52 |

|      |                                                                                                                                                                     |    |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 7.9  | Navržená konstrukce efektoru pro manipulaci s adaptéry průtokového připojení.                                                                                       | 53 |
| 7.10 | Zátěžový diagram nosnosti robotu IRB 4400/60 - a) Teoretická obálka efektoru pro manipulaci s adaptéry.                                                             | 54 |
| 7.11 | Orientace objektu manipulace a) horizontální b) vertikální [4].                                                                                                     | 55 |
| 7.12 | Samostatný ejektor SMC typ ZK2-A [23].                                                                                                                              | 58 |
| 7.13 | Charakteristika zvoleného ejektoru [23].                                                                                                                            | 58 |
| 7.14 | Navržená konstrukce podtlakového efektoru - a) přísavka s bočním příívodem vakua, b) ventil pro udržení vakua, c) šroubovaný rám, d) konektor elektrických signálů. | 59 |
| 7.15 | Realizace pneumatického obvodu - (e) ejektor SMC, (f) příívod stlačeného vzduchu, (g) rozvod vakua, (h) tlumič vyfukovaného vzduchu, i) doraz.                      | 60 |
| 7.16 | Zátěžový diagram nosnosti robotu IRB 4400/60 - a) Teoretická obálka efektoru pro manipulaci s plexiskly.                                                            | 60 |

# Seznam tabulek

|     |                                                                 |    |
|-----|-----------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Paralelní úchopné hlavice [11], [12], [13], [14].               | 22 |
| 2.2 | Středící úchopné hlavice [14], [17], [18], [19].                | 23 |
| 2.3 | Vakuové ejektory [21], [22], [23].                              | 24 |
| 6.1 | Párové porovnání parametrů.                                     | 36 |
| 6.2 | Kvantifikovaná matice pro stanovení vah kritérií.               | 37 |
| 6.3 | Bodové hodnocení parametrů varianty A a jejich odůvodnění.      | 37 |
| 6.4 | Bodové hodnocení parametrů varianty B1 a jejich odůvodnění.     | 38 |
| 6.5 | Bodové hodnocení parametrů varianty B2 a jejich odůvodnění.     | 39 |
| 6.6 | Bodové hodnocení parametrů varianty C a jejich odůvodnění.      | 40 |
| 6.7 | Celkové hodnocení variant.                                      | 41 |
| 8.1 | Přehled přiložených výkresů.                                    | 61 |
| 9.1 | Odhadovaná cena efektoru pro manipulaci s obrobky.              | 63 |
| 9.2 | Odhadovaná cena efektoru pro manipulaci s průtokovými adaptéry. | 63 |
| 9.3 | Odhadovaná cena efektoru pro manipulaci s akrylátovými skly.    | 64 |





# Seznam příloh

Přílohy v elektronické podobě:

- 3D model efektoru pro manipulaci s obrobky (formát .STEP)
- 3D model efektoru pro manipulaci s adaptéry (formát .STEP)
- 3D model efektoru pro manipulaci s plexiskly (formát .STEP)
- 3D model stojanu s efektoru (formát .STEP)
- Výkresová dokumentace (formát .pdf):

|                                    |                    |           |
|------------------------------------|--------------------|-----------|
| Stojan                             | Výkres sestavy     | DP-000_1  |
| Stojan                             | Seznam položek     | DP-000_2  |
| Stojan                             | Seznam položek     | DP-000_3  |
| Efektor pro manipulaci s obrobky   | Výkres sestavy     | DP-001_1  |
| Efektor pro manipulaci s obrobky   | Seznam položek     | DP-001_2  |
| Efektor pro manipulaci s obrobky   | Seznam položek     | DP-001_3  |
| Svařována konstrukce               | Výkres svarku      | DP-001-01 |
| Efektor pro manipulaci s adaptéry  | Výkres sestavy     | DP-002    |
| Spojka profilů                     | Výkres součásti    | DP-002-01 |
| Efektor pro manipulaci s plexiskly | Výkres sestavy     | DP-003    |
| Tělo efektoru                      | Výkres součásti    | DP-003-01 |
| Pneumatický obvod                  | Pneumatické schéma | DP-PNEU_1 |
| Pneumatický obvod                  | Seznam položek     | DP-PNEU_2 |
| Pneumatický obvod                  | Seznam položek     | DP-PNEU_3 |