VŠB – TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA

FAKULTA STROJNÍ

KATEDRA ROBOTIKY

BAKALÁŘSKA PRÁCE

2019 **Tomasz Kowalczyk**

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

Návrh efektoru pro paletizaci kartonových krabic

Design of End Effector for Cardboard Box Palletizing

Student: Tomasz Kowalczyk

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Michal Vocetka

Ostrava 2019

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra robotiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Tomasz Kowalczyk**

Studijní program: B2341 Strojírenství

Studijní obor: 2301R013 Robotika

Téma: Návrh efektoru pro paletizaci kartonových krabic
Design of End Effector for Cardboard Box Palletizing

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Sestavte požadavkový list.

2. Zpracujte analýzu dostupných metod úchopu a navrhněte varianty řešení efektoru pro paletizaci kartonových krabic a kartonových prokladů na paletu (EPAL).

3. Navrhněte tři varianty řešení a proveďte výběr optimální varianty.

4. Podrobný konstrukční návrh vybrané varianty zpracujte dle pokynů vedoucího. Tento podložte kompletní výkresovou dokumentací a potřebnými výpočty. Zhodnoťte dosažené výsledky.

5. Práci doložte v elektronické podobě a konstrukční řešení v CAD systému dle pokynů vedoucího.

Seznam doporučené odborné literatury:

Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce [online]. [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: http://robot.vsb.cz/pozadavky-na-prace/

KÁRNÍK, Ladislav. Periferní zařízení RTP. Ostrava: VŠB - Technická univerzita, 2006. ISBN 80-248-1221-5.

PALKO, Anton a Juraj SMRČEK. Robotika: koncové efektory pre priemyselné a servisné roboty : navrhovanie - konštrukcia - riešenie. Košice: [Technická univerzita],2004. ISBN 80 807-3218-3.

SKAŘUPA, Jiří. Kreativita a inovační myšlení v konstruování. Ostrava: VŠB, 2007. ISBN 978-80-248-1717-0.

RTP – NAVRHOVÁNÍ A PRAKTICKÉ APLIKACE. Katedra robotiky: fakulta strojní VŠB-TU Ostrava [online]. Ostrava [cit. 2018-11-20]. Dostupné z: http://robot.vsb.cz/file.php/rtp navrhovani-a-prakticke- aplikace.pdf

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Michal Vocetka**

Datum zadání: 21.12.2018

Datum odevzdání: 20.05.2019

prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry

prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 20.5.2019 .....

.....

podpis studenta

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo –bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- beru na vědomí, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě : 20. 5. 2019 ..... Kowalczyk .....

podpis

Jméno a příjmení autora práce: Tomasz Kowalczyk

Adresa trvalého pobytu autora práce: Smilovice 114, Smilovice u Třince, 739 55

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Kowalczyk, T. *Návrh efektoru pro paletizaci kartonových krabic*: Bakalářská práce. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robotiky, 2019, 55 s. Vedoucí práce: Vocetka, M.

Bakalářská práce se zabývá konstrukčním návrhem efektoru pro manipulaci s dvěma druhy krabic a kartonovými proklady. Úvodní část práce seznamuje s podtlakovými úchopnými hlavicemi a vakuovými ejektory. V další části práce jsou navrženy tři varianty řešení, z kterých byla vybrána varianta optimální metodikou vícekriteriální analýzy. Dále se práce zabývá vlastní konstrukcí, potřebnými výpočty a tvorbou výkresové dokumentace. 3D model vybrané varianty je zpracován v CAD systému Creo Parametric.

ANNOTATION OF THE BACHELOR THESIS

Kowalczyk, T. *Design of End Effector for Cardboard Box Palletizing*: Bachelor thesis. Ostrava: VŠB –Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Robotics, 2019, 55 p. Thesis head: Vocetka, M.

The bachelor thesis is focused on a design of end effector for manipulation with two types of cardboard boxes and cardboard leading. An introductory part acquaints us with suction cups and vacuum ejectors. In the next part of the thesis, three variants of the solution are designed, from which the optimal solution was chosen by multi-criteria analysis. Furthermore, the work deals with construction, necessary calculations and drawing documentation. 3D model of selected variant is made in CAD software Creo Parametric.

Poděkováni

Rád bych poděkoval mému vedoucímu bakalářské práce Ing. Michalovi Vocetkovi za cenné rady a připomínky, odborné vedení a ochotu, kterou mi během zpracování bakalářské práce věnoval.

Obsah

Seznam obrázků **10**
Seznam tabulek **12**
Seznam použitých značek a symbolů **13**
Úvod **14**
1 Rešerše **15**
1.1 Přísavky (Podtlakové úchopné hlavice) 15
1.1.1 Rozdělení přísavek podle tvaru 16
1.1.2 Materiály přísavek 18
1.1.3 Přípoje, ventily a příslušenství přísavek 18
1.2 Vakuové ejektory 19
1.2.1 Zdroje vakua 20
1.2.2 Jednostupňový ejektor 20
1.2.3 Vícestupňový ejektor 21
2 Požadavkový list **22**
2.1 Popis pracoviště 23
2.2 Popis robotu 25
3 Varianty řešení **26**
3.1 Varianta A 26
3.2 Varianta B 27
3.3 Varianta C 28
4 Výběr optimální varianty **30**
4.1 Kritéria hodnocení 30
4.2 Významnost kritérií 30
4.3 Stupnice hodnocení 31
4.4 Hodnocení variant 31
4.5 Určení významnosti 32
4.6 Určení vážených indexů pro jednotlivá kritéria 34
5 Optimální varianta **36**
5.1 Konstrukce 36
5.1.1 Rám 36
5.1.2 Interface 37

5.1.3 Uchycení přísavek ... 38
5.1.4 Uchycení ejektorů ... 38
5.2 Pneumatické prvky ... 39
5.2.1 Ejektor ... 39
5.2.2 Přísavky ... 42
5.2.3 Šroubení ... 43
5.2.4 Hadice ... 44
5.3 Senzor pro měření vzdáleností ... 44
5.4 Pneumatický okruh ... 46
5.4.1 Výpočet maximálního zrychlení robotu ... 47
5.4.2 Výpočet odporové síly ... 48
5.4.3 Výpočet bezpečnosti u kartonových prokladů ... 49
5.4.4 Kontrola rozmístění přísavek ... 49
6 Závěr ... 51
Seznam použité literatury ... 52
Přílohy ... 55

Seznam obrázků

Obr. 1 Různé druhy přísavek [4] ... 15
Obr. 2 Universální přísavka [5] ... 16
Obr. 3 Přísavka s vlnovcem [6] ... 16
Obr. 4 Plochá přísavka [7] ... 17
Obr. 5 Plochá přísavka s opěrnými žebry [9] ... 17
Obr. 6 Konkávní přísavka [10] ... 17
Obr. 7 Přípoje [8] ... 18
Obr. 8 Pružné vyrovnávací upevnění [8] ... 19
Obr. 9 Jednostupňový ejektor [14] ... 21
Obr. 10 Vícestupňový ejektor [15] ... 21
Obr. 11 Zadané pracoviště ... 23
Obr. 12 Layout pracoviště ... 24
Obr. 13 Robot ABB IRB 460 IRC5 [28] ... 25
Obr. 14 Varianta A ... 26
Obr. 15 Uchycení přísavky ... 27
Obr. 16 Varianta B ... 27
Obr. 17 Koutový svar ... 28
Obr. 18 Varianta C ... 28
Obr. 19 Uchycení přísavky ... 29
Obr. 20 Závislost váhy významnosti na počtu voleb ... 34
Obr. 21 Optimální varianta ve finální podobě se všemi potřebnými prvky ... 36
Obr. 22 Úhelník [18] ... 37
Obr. 23 Rám ... 37
Obr. 24 Interface s prstencem-rozložený pohled ... 38
Obr. 25 Dílce pro uchycení přísavek ... 38
Obr. 26 Držák ejektorů ... 39
Obr. 27 Ejektor OVEM [21] ... 40
Obr. 28 Graf závislosti spotřeby stlačeného vzduchu na provozním tlaku [23] ... 40
Obr. 29 Graf závislosti času odsátí 1 litru vzduchu na úrovní vakua při provozním tlaku 6 bar [23] ... 41

Obr. 30 Graf závislosti úrovně vakua na provozním tlaku [23] 41
Obr. 31 Plochá přísavka [24] 43
Obr. 32 Quick Star spojení [25] 43
Obr. 33 Nástrčná spojení, rozbočovač, redukce [27] 44
Obr. 34 Senzor W2S-2 [26] 44
Obr. 35 Rozmístění pneumatických okruhů 46
Obr. 36 Výsledek pevnostní analýzy kartonového prokladu 50

Seznam tabulek

Tab. 1 Rozdělení vakua 19
Tab. 2 Kritéria hodnocení 30
Tab. 3 Významnost kritérií 30
Tab. 4 Hodnoty kritérií 31
Tab. 5 Parametry a vlastnosti návrhu 31
Tab. 6 Hodnocení navržených variant – autor 31
Tab. 7 Hodnocení navržených variant – posuzovatel 32
Tab. 8 Průměrné hodnocení 32
Tab. 9 Porovnání jednotlivých kritérií hodnocení – autor 32
Tab. 10 Porovnání jednotlivých kritérií hodnocení – posuzovatel 33
Tab. 11 Průměrný počet voleb pro jednotlivá kritéria a určení váhy významnosti 33
Tab. 12 Vypočtené vážené indexy 35
Tab. 13 Konečné pořadí 35
Tab. 14 Vlastnosti a parametry ejektoru OVEM-10-L-B-QO-CE-N-LK [23] 42
Tab. 15 Vlastnosti a parametry senzoru WTB2S-2P3245 [26] 45

Seznam použitých značek a symbolů

Značka	Význam	Jednotka
a	Zrychlení robotu	$m \cdot s^{-2}$
a_{max}	Maximální zrychlení robotu	$m \cdot s^{-2}$
C	Součinitel odporu pro rovnou a tenkou desku	–
D	Průměr přísavky	mm
F_g	Gravitační síla	N
F_{odp}	Odporová síla	N
F_s	Setrvačná síla	N
g	Gravitační zrychlení	$m \cdot s^{-2}$
I	Proud	A
k	Koeficient bezpečnosti	–
m_k	Hmotnost krabice	kg
m_p	Hmotnost prokladu	kg
n	Počet přísavek	–
p_{kk}	Pevnost kartonu krabice v průtlaku	KPa
p_{kp}	Pevnost kartonu prokladu v průtlaku	KPa
p_u	Provozní tlak	bar
p_{umax}	Maximální úroveň vakua	bar
p_v	Úroveň vakua	KPa
q	Váha významnosti	–
S	Obsah prokladu	m^2
U	Napětí	V
v	Rychlost robotu	$m \cdot s^{-1}$
W_{max}	Maximální průhyb	mm
μ	Koeficient tření	–
ρ	Hustota vzduchu	$kg \cdot m^{-3}$
OM	Objekt manipulace	
QS	Quick star	
SMD	Surface mount device	

Úvod

Robotizace v posledních desetiletích stále vzrůstá. Roboty nahrazují pracovní místa ve všech oblastech průmyslu, a velmi často vykonávají fyzický náročnou a monotónní činnost, která bývá mezi zaměstnanci neoblíbená. Není tomu jinak ani u paletizace. Důležitou a nedílnou součásti robotizace je návrh efektorů, bez kterých by roboty byly nepoužitelné.

Tato práce se zabývá konstrukčním návrhem efektoru, který je využíván k paletizaci dvou druhů krabic a k manipulaci s kartonovými proklady. Efektor bude umístěn na paletizačním robotu s čtyřmi stupni volnosti. Při samotném návrhu je třeba brát ohled na zadané pracoviště, tj. rozmístění a polohu jednotlivých dopravníků a objektů manipulace.

1 Rešerše

Téma rešerše je zaměřeno na získání podstatných informací ohledně přísavek a výroby vakua, pro následný návrh efektoru.

1.1 Přísavky (Podtlakové úchopné hlavice)

Ve všech oblastech se neustále setkáváme s potřebou přemisťovat nebo manipulovat s různými předměty. U těžko uchopitelných rovinných těles, jaké jsou např. skleněné tabule, ocelové pláty nebo také drobné součásti jakými jsou SMD (surface mount device), se osvědčily podtlakové úchopné hlavice, využívající vlastnosti podtlaku. Úchopná síla je vytvořena podtlakem v přísavce, která slouží k uchopení a manipulaci s objekty. Tyto úchopné hlavice bývají často využity jako koncové prvky efektorů u složitých robotizovaných pracovišť. Používají se také úchopné hlavice mechanické, magnetické nebo speciální.

Přísavky se rozdělují podle způsobu vyvození uchopovací síly na aktivní a pasivní. U pasivních přísavek je síla vyvozená přitlačením se k objektu manipulace. Tímto se vytlačí objem atmosférického vzduchu v přísavce, a následným zpětným pohybem se přísavka vrací do počáteční polohy a vytváří tímto podtlak. Tento způsob má své nevýhody. Jsou jimi např.: neschopnost řízení úchopné síly, nespolehlivost a závislost na rovinnosti a čistotě povrchu, nutnost použití odtrhovací síly buďto mechanickými prvky, jakými jsou dorazy, nebo vyhazovacími mechanismy. Proto se častěji používá přísavky aktivní, které jsou ovládaný řízeným vstupním signálem.

Aktivní podtlakové hlavice se v dnešní době nepoužívají jen u robotů a manipulátoru, ale bývají využity také na výrobních strojích jako upínací zařízení. První přísavky byly patentovány ve Spojených státech v letech 1866 a 1868. [1],[2],[3]

Obr. 1 Různé druhy přísavek [4]

1.1.1 Rozdělení přísavek podle tvaru

Podtlakové úchopné hlavice rozdělujeme podle tvaru do pěti skupin a každou tuto skupinu na tvary oválné, kruhové a jiné.

Universální přísavky – Jsou vhodné pro rovné nebo mírně zakřivené povrchy.

Obr. 2 Universální přísavka [5]

Přísavky s vlnovcem – Používají se pro vyrovnání výškových rozdílů – menší přesnost při manipulaci např. sáčky naplněné kapalinou, zmrazené potraviny atd.

Obr. 3 Přísavka s vlnovcem [6]

Ploché přísavky – Hodí se pro velké a těžké předměty s rovným povrchem a z pevného materiálu.

Obr. 4 Plochá přísavka [7]

Ploché s opěrnými žebry – Mají dobrou stabilitu. Při manipulaci zaručují velkou přesnost. Opěrná žebra zabraňují deformací a prohnutí slabších materiálů (poddajné materiály: např. papír, folie atd.). Používají se také pro rovné povrchy s větší drsností, jako například dřevěné desky. [8]

Obr. 5 Plochá přísavka s opěrnými žebry [9]

Konkávní přísavky – Jsou vhodné pro nepravidelné nebo zakřivené povrchy. Mohou také uchopit předměty za hrany nebo rohy. Naopak nejsou vhodné pro rovné plochy.

Obr. 6 Konkávní přísavka [10]

1.1.2 Materiály přísavek

Důležitými parametry materiálů u přísavek jsou: teplotní rozsah použití, odolnost proti opotřebení a jiné. Můžou být vyrobeny z různých druhů materiálů například: nitrilový kaučuk (N), polyuretan (U), Silikon (S) a Fluórový kaučuk (F). Zároveň se stále vyvíjejí materiály nové, jakými jsou např: [8]

- **THERBAN®** – Je vhodný použít do vysokých teplot, jakými jsou aplikace vyjímání dílů ze vstřikovacích forem, nebo manipulace v proudu horké vody. Jsou také odolnější proti oleji než standartní guma.
- **Duraflex®** – Spojuje v sobě velmi vysokou mechanickou odolnost polyuretanu a také pružnost gumy. Některé přísavky z tohoto materiálu jsou vyrobeny ze dvou různých stupňů tvrdosti. Měkčí část zajišťuje dobrou přilnavost k povrchu a tvrdší dostatečnou tuhost a stabilitu. Dále je tento materiál vhodný pro mastné znečištěné povrchy, protože má 3-4 krát větší přilnavost (třecí/ smyková síla) než klasické materiály. [11]

1.1.3 Přípoje, ventily a příslušenství přísavek

- **Přípoje** – Nejčastěji jsou vyrobeny z hliníku nebo kompozitních plastů a můžou být opatřena sítkem, které zabraňuje vniknuti nečistot do vakuového obvodu. Připoj si lze vybrat ze širokého sortimentu s různými připojovacími závity jako můžeme vidět na Obr. 7.
- **Ventily** – Zabraňují nebo minimalizují unik vakua. Rozdělujeme je na dotykové ventily a zpětné škrtící ventily.

Obr. 7 Přípoje [8]

- **Pružné vyrovnávací upevnění** – Vyrovnává výškové rozdíly, tzn. přísavky není zapotřebí přesné výškově polohovat. Proto mohou být použity na pružné a nepřesné objekty manipulace. Tlumí také rázy.

Obr. 8 Pružné vyrovnávací upevnění [8]

- **Výkyvné upevnění** – Přizpůsobuje polohu přísavky úhlovým nerovnostem a také minimalizuje ohýbací síly. Příkladem použití je manipulace s vlnitými předměty.
- **Úhlové upevnění** – usnadňuje realizaci a montáž přívodu vakua.

1.2 Vakuové ejektory

„*Vakuum (z lat. vacuus, prázdný) česky též vzduchoprázdno znamená prázdný prostor, ve fyzice prostor s velmi malou hustotou částic. V technické praxi se jím rozumí prostor, v němž je tlak plynu podstatně nižší než při normálním atmosférickém tlaku (podtlak). Škála kvality vakua má velmi rozmanité technické využití ve vakuové technice*.“ [12]

Vakuum můžeme dle Tab. 1 rozdělit do tří skupin: [15]

Tab. 1 Rozdělení vakua

Druh vakua	Úroveň vakua	Oblast použití
Dmychadlové vakuum	0 až -20 kPa	Pro ventilaci, chlazení, odsávání, ...
Průmyslové vakuum	-20 až -99 kPa	Pro manipulaci, automatizaci, přidržování, ...
Procesové vakuum	-99 kPa a více	Vysoké vakuum pro laboratoře, výrobu mikroprocesorů, pokovování, ...

1.2.1 Zdroje vakua

Pro vytvoření vakua se využívá více druhů zdrojů. Kvalitní vakuum dodávají objemové vývěvy, které jsou různými typy pístových, lamelových a membránových čerpadel. Z důvodu vysokých nákladů a složitosti technického řešení se v robotice používají jen ojediněle. Většinou jsou zdrojem vakua proudové ejektorové vývěvy. [1],[2]

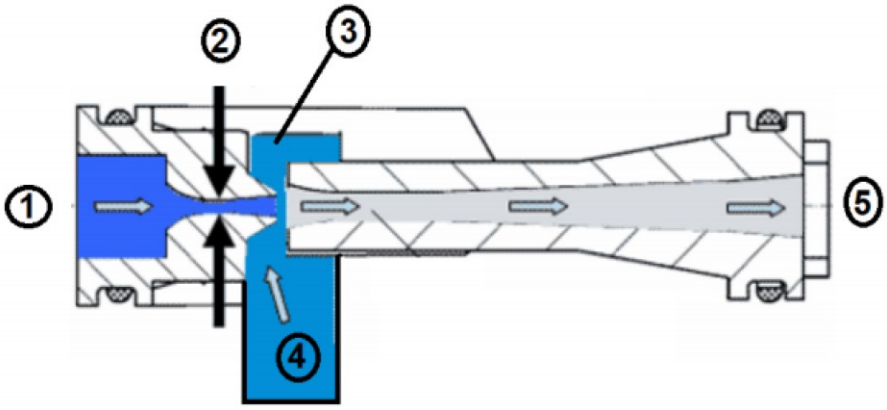
Ejektory pracuji na principu Venturiho trubice, do které přivádíme stlačený vzduch, jako zdroj energie. Ejektory dělíme podle počtu těchto trubic na jednostupňové a vícestupňové.

Výhody ejektorů oproti mechanickým vývěvám:

- jsou bezúdržbové
- při práci se neopotřebovávají a nezahřívají
- nevznikají vibrace
- mají menší hmotnost a rozměry
- možnost připojení přímo na přísavku
- smí se použitím do výbušného prostředí [13],[14]

1.2.2 Jednostupňový ejektor

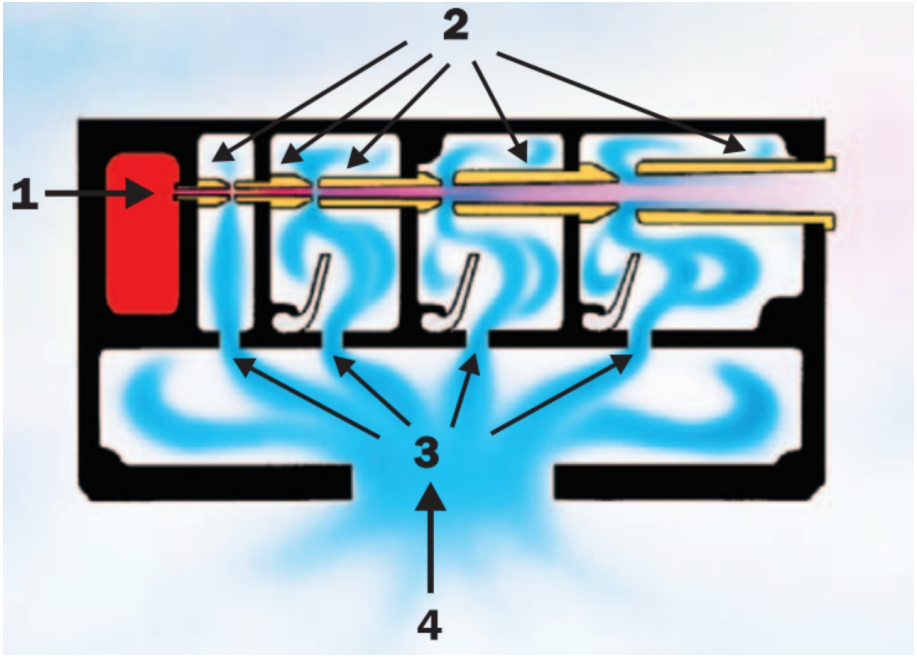
Na Obr. 9 je znázorněn jednostupňový ejektor. Zdroj energie, stlačený vzduch je přiveden to vstupního hrdla ejektoru (1). Dále je stlačený vzduch veden přes zúženou část trysky (2), kde se zvyšuje rychlost a následně v prostoru (3) jsou strhávány částice vzduchu. Tím pádem se zde snižuje tlak, vzniká podtlak a z prostoru (4) se přisává vzduch. Výstup do atmosféry může být proveden přes potrubí nebo tlumiče vzduchu (5). Důležité je, aby výfuk vzduchu nevytvářel protitlak a tím nesnižoval vytvořený podtlak.[14]



Obr. 9 Jednostupňový ejektor [14]

1.2.3 Vícestupňový ejektor

Vyznačuje se mnohem lepším využitím stlačeného vzduchu a taky mnohem nižší spotřebou energie než jednostupňový ejektor. Má také výhodu v tom, že se dá využít pro výrobu hlubokého vakua při velkém objemovém průtoku. U jednostupňových ejektorů tato vlastnost není možná. Na Obr. 10 je zobrazeno schéma vícestupňového ejektoru. Funguje na podobném principu jako jednostupňový ejektor. Na vstupu (1) se nachází stlačený vzduch a proudí tryskami řazenými za sebou (2) a tím jsou strhávaný částice vzduchu z jednotlivých komor, které mají uzavírací klapky. Klapky se zavírají postupně s rostoucím podtlakem a po dosažení maximální úrovně vakua v prostoru (4) je otevřena pouze první komora.[15]



Obr. 10 Vícestupňový ejektor [15]

2 Požadavkový list

- Cena: max 100 000CZK
- Hmotnost: max 50Kg
- Robot: ABB IRB 460 IRC5
- Rozsah pracovní teploty: 5 C ° – 50 °C
- Objekty manipulace:
    1. Kartonové krabice o rozměrech 384x376x185 mm a o hmotnosti 25 kg
    2. Kartonové krabice o rozměrech 384x188x185 mm a o hmotnosti 13 kg
    3. Kartonové proklady o rozměrech 1160x790x2 mm
- Materiál objektů manipulace:

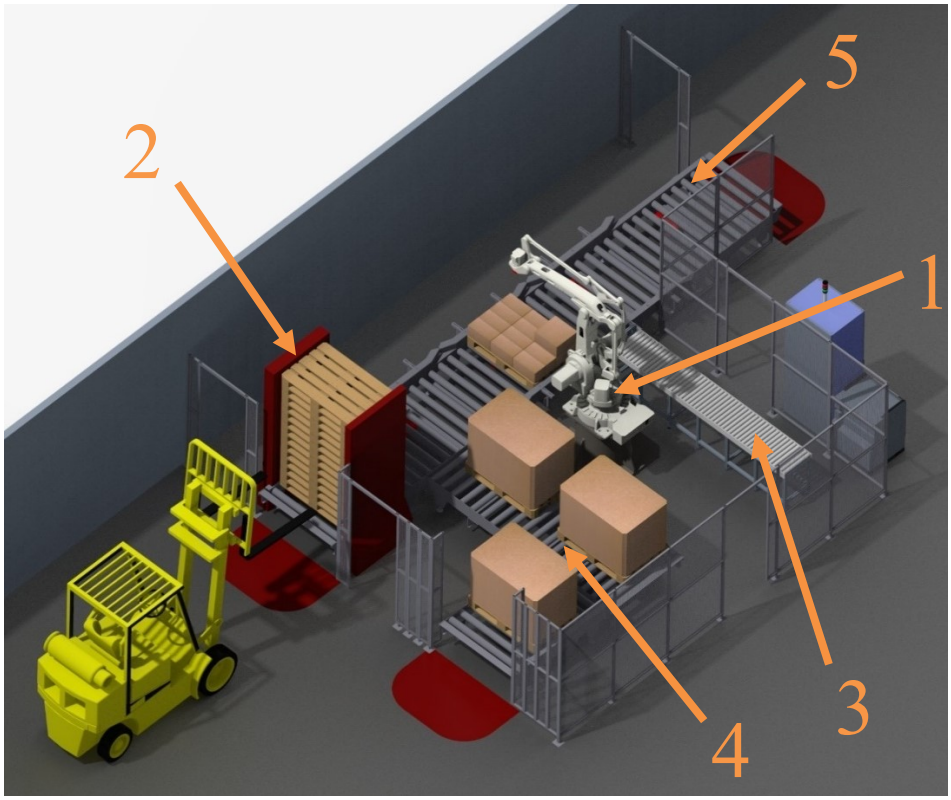
  Krabice – pětivrstvý zpevněný karton oblepený páskou

  Proklad-třívrstvý karton o tloušťce 2 mm
- Paletizace na Europaletu (EPAL 1200x800mm) – nosnost 2 t
- Pro uchopování použít stlačený vzduch z centrálního rozvodu haly o maximálním tlaku 0,7 MPa
- Zajistit čistý vzduch – (filtr 40μm, vlhkost – maximální rosný bod 7 °C) dle DIN ISO 8573-1

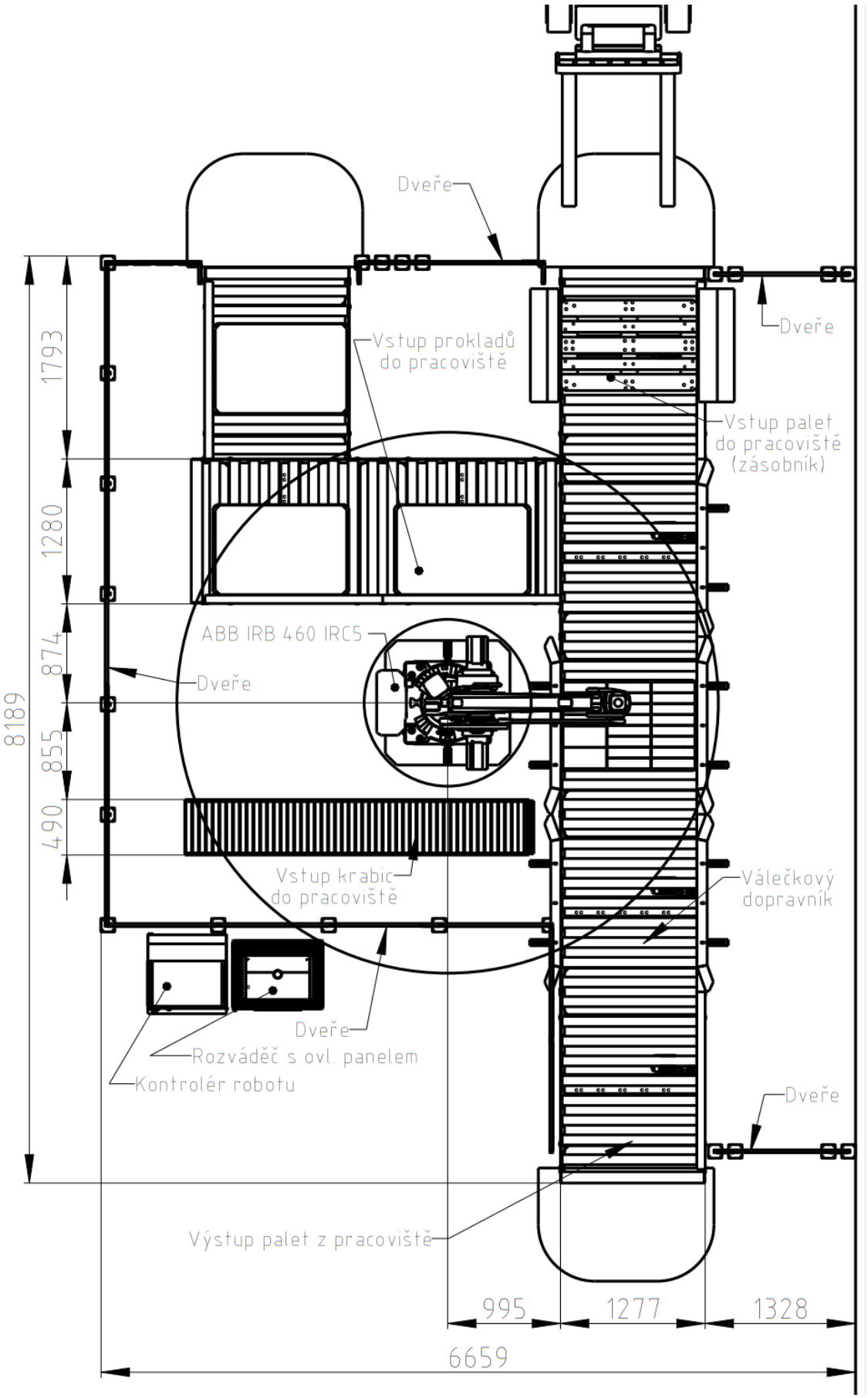
2.1 Popis pracoviště

Dalším požadavkem bylo použití navrhovaného efektoru do daného pracoviště. To znamená, musel být brán v úvahu pracovní prostor robotu a rozmístění prvků, jako jsou objekty manipulace a polohy Europalet, viz Obr. 12 layout pracoviště. Jedná se o plně automatizovanou paletizační linku (Obr. 11), která se skládá ze, tři dopravníků, paletizačního robotu ABB IRB 460 IRC5 (1) a zásobníků na Europalety (2). Po prvním dopravníku (3) jsou dopravovány dva druhy krabic o hmotnosti 13 a 25 kg. Na druhém (4) jsou připraveny tři palety plně naložených prokladů (600 ks), a na třetím dopravníku (5) jsou přepravovány jak prázdné palety, které jsou automaticky podávány ze zásobníku, tak patetizované palety. Po paletizováni by mělo následovat ovinování. Tato část ale již není součástí zadaného pracoviště. Celá linka je oplocená. Jediným úkol, který bude provádět pracovník je navážení a odvážení Europalet.

Pracovní cyklus je následující. Na prázdnou paletu na dopravníku (5) se položí kartonový proklad, následně se paletizuje 6 ks 25 kg krabic. Další vrstvu proložíme prokladem a robot uloží 12 ks 13 kg krabic. Tento postup robot opakuje až do doby, než výška nedosáhne 2 metrů.



Obr. 11 Zadané pracoviště



Obr. 12 Layout pracoviště

2.2 Popis robotu

ABB IRB 460 IRC5 (Obr. 13) je vysokorychlostní paletizátor s nosností 110 kg. Jedná se o čtyřosého robota, s rozsahem 2,4m a s opakovatelnou přesností 0,2mm. Rychlost v jednotlivých osách je od 110 do 400 °/s. [28]

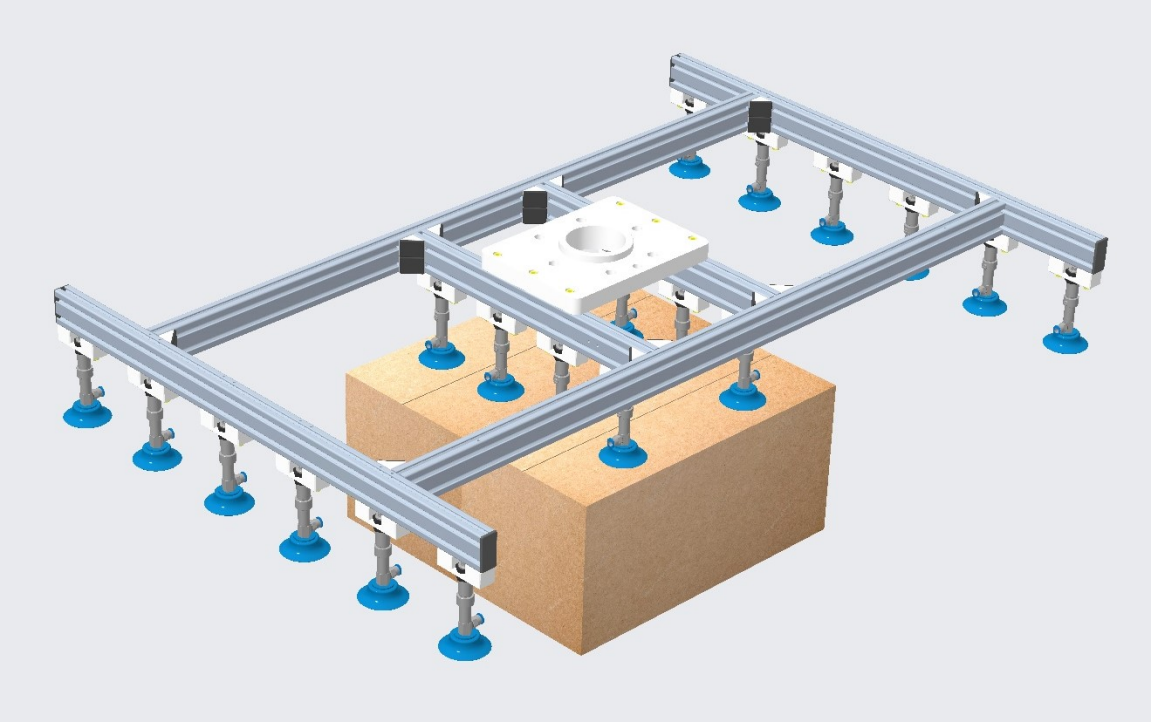
Obr. 13 Robot ABB IRB 460 IRC5 [28]

3 Varianty řešení

Na základě požadavkového listu a poznatků z rešerše byly vypracované následující tři předběžné varianty řešení. Navržený efektor bude přizpůsoben všem OM a pro úsporu času budou 13 kg krabice přepravovány po dvou.

3.1 Varianta A

Základní rám je tvořen z hliníkových profilů od firmy ITEM [16] (profil 5, 40x20 mm, natural). Tyto profily jsou spolu sešroubovány pomoci úhelníku, vždy dvěma kusy nad sebou. Robot bude uchycen s tímto efektorem přírubou vyfrézovanou z hliníku, která bude spojena s rámem pomoci drážkových matic. Počet přísavek byl odhadnut na 20 ks - 8 ks je použito pro přepravu krabic a zbývající na kartonový proklad, což je zřejmé z Obr. 14. Tyto přísavky jsou spojeny s hliníkovým dílcem pomoci dvou kontramatic, a tyto dílce k rámu pomoci drážkových matic viz Obr. 15.



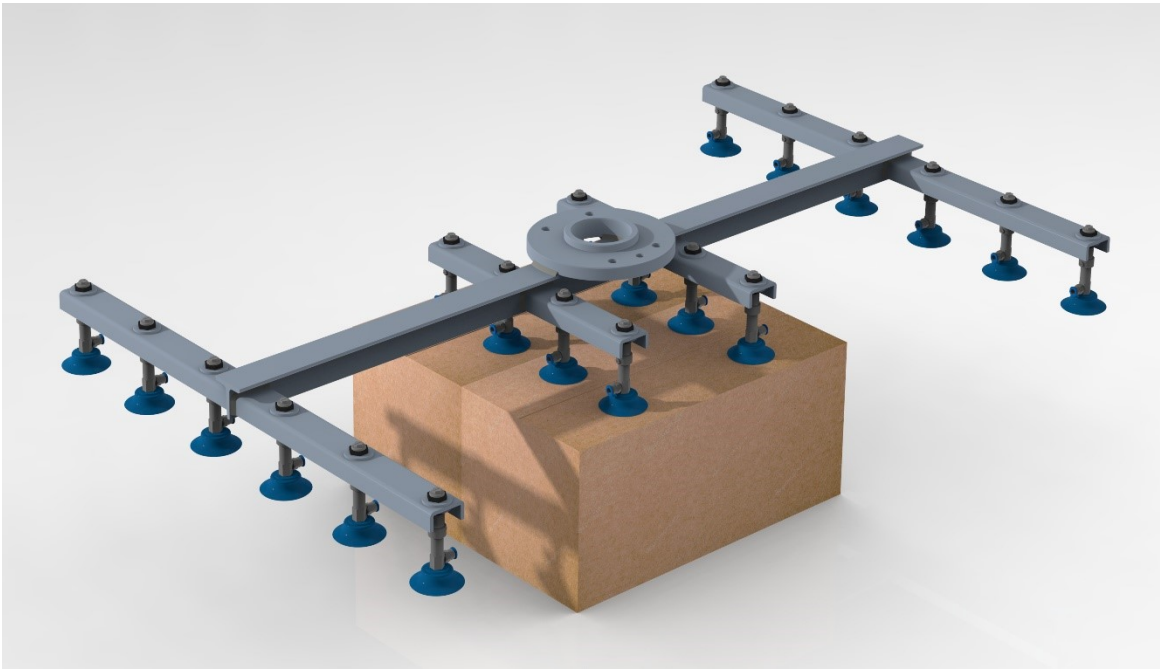
Obr. 14 Varianta A

Celková hmotnost této konstrukce je 8,5 kg a cena 46 830 CZK. Výhoda tohoto návrhu je jednoduchost sestavení a možnost jednoduchého přestavení polohy přísavek.

Obr. 15 Uchycení přísavky

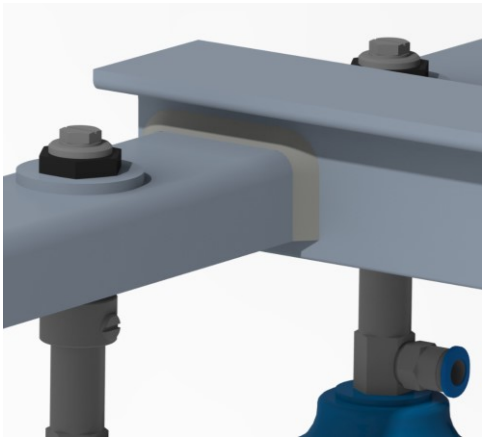
3.2 Varianta B

Rám je tvořen svařovanou konstrukcí. Základním nosným prvkem je ocelový T profil (40x40 mm) délky 970 mm. Tento nosník je svařen s 8 ks U profilů (40x20 mm), ve kterých jsou navrtány díry pro uchycení přísavek. Na Obr. 17 můžeme vidět koutový obvodový svar (a=3 mm), vyráběný obloukovým svařováním v ochranné atmosféře metodou MIG. Příruba je vyrobená s oceli, soustružením a je spojena s nosníkem taktéž svařováním viz Obr. 16.



Obr. 16 Varianta B

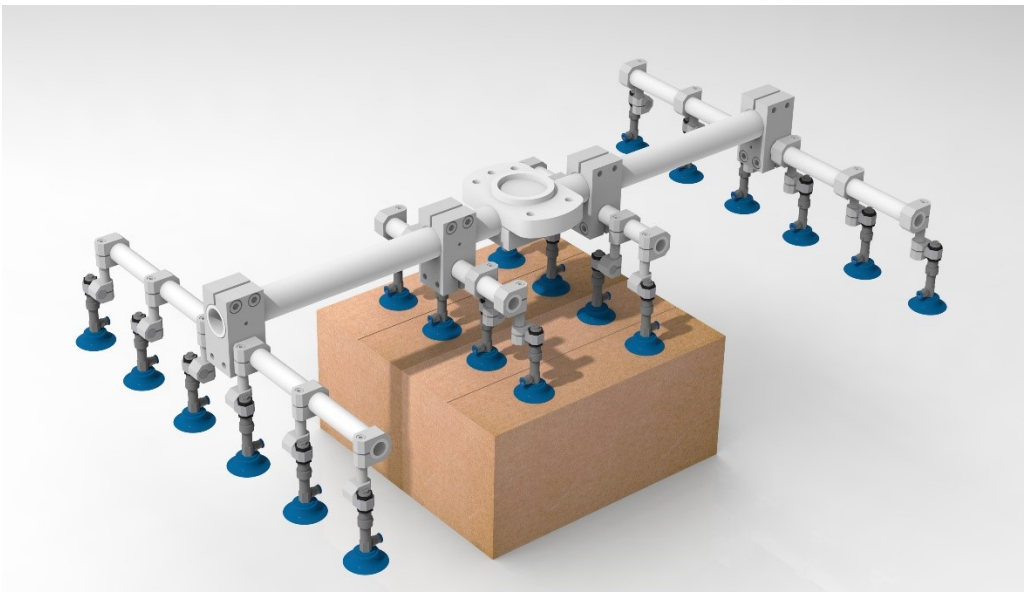
Celková hmotnost této konstrukce je 11 kg a cena 42 460 CZK. Tento návrh již není na výrobu tak jednoduchý. Nevýhodou je také nemožnost přestavení přísavek.



Obr. 17 Koutový svar

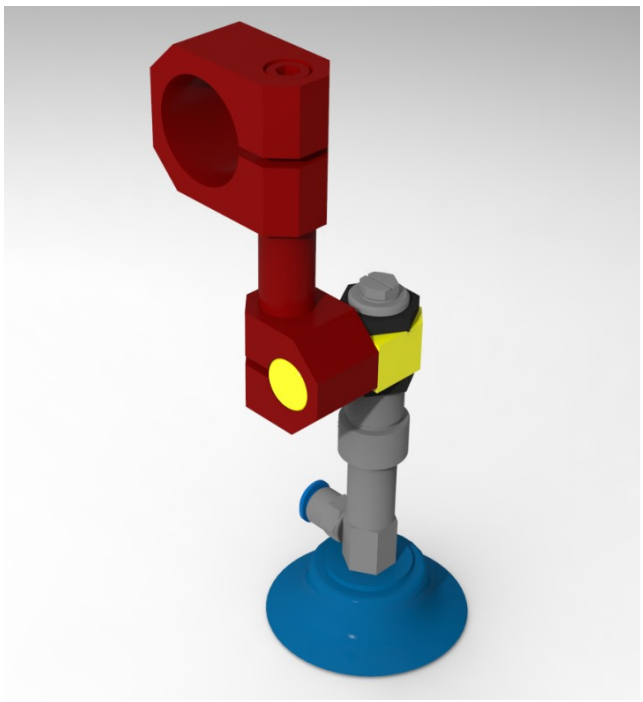
3.3 Varianta C

Základní prvky tvoří hliníkové trubky (40x4, 25x4 mm) a svěrné spoje od firmy DESTACO [17]. Tyto spoje používají pro vyvozeni svěrné síly imbusové šrouby. Na Obr. 19 můžeme vidět uchycení přísavky, skládající se ze dvou komponentů. Na prvním dílci (žlutý) je přichycena přísavka stejně jako u předchozích případů – kontramatici. Druhý dílec (červený) spojuje trubku s dílcem přísavky. Příruba je vyrobena taktéž jako svěrný spoj.



Obr. 18 Varianta C

Celková hmotnost této konstrukce (Obr. 18) je 9,4 kg a cena 79 300 CZK. Výhoda této varianty je možnost přestavení přísavek ve více směrech a také jednoduché sestavení.



Obr. 19 Uchycení přísavky

4 Výběr optimální varianty

Pro výběr optimální varianty jsem použil vícekriteriální analýzu.

4.1 Kritéria hodnocení

V Tab. 2 jsou vypsané kritéria hodnocení.

Tab. 2 Kritéria hodnocení

Hodnocená kritéria	Název
K1	Cena
K2	Hmotnost efektoru
K3	Počet stupňů volnosti přísavek
K4	Náročnost výroby
K5	Složitost přestavení přísavek
K6	Tuhost konstrukce

Cena – měla by být co nejmenší, a neměla by přesáhnout cenu v požadavkovém listu

Hmotnost efektoru – měla by být co nejmenší, a součet hmotnosti OM a efektorů nesmí přesáhnout nosnost robotu

Počet stupňů volnosti přísavek – možnost změny polohy přísavek

Náročnost výroby – složitost výroby a montáže

Složitost přestavení přísavek – jednoduchost změny polohy přísavek

Tuhost konstrukce – maximální dovolený průhyb: W_{max}=1 mm

4.2 Významnost kritérií

Tab. 3 Významnost kritérií

Číselná hodnota	Významnost
2	Nejvyšší
…	…
1	Nejnižší

4.3 Stupnice hodnocení

V Tab. 4 je uvedený číselný význam hodnocení.

Tab. 4 Hodnoty kritérií

Hodnoty kritérií	
Hodnocení	**Význam hodnocení**
1	Vysoká úroveň
2	Dobrá úroveň
3	Průměrná úroveň
4	Nízká úroveň
5	Nevyhovující úroveň
6	Nepříznivý stav

4.4 Hodnocení variant

Všechny varianty řešení byly hodnoceny dle Tab. 5, ve které jsou uvedené jednotlivé parametry a vlastnosti jednotlivých návrhů.

Tab. 5 Parametry a vlastnosti návrhu

Kritéria	Varianta A	Varianta B	Varianta C
Cena	46 830,-kč	42 460,-kč	79 300,-kč
Hmotnost efektoru	8,5 kg	11 kg	9,4 kg
Počet stupňů volnosti přísavek	1	0	2
Náročnost výroby	Jednoduchá	Složitější	Jednoduchá
Složitost přestavení přísavek	Jednoduchá	-	Jednoduchá
Tuhost konstrukce	Vysoká	Dostačující	Dostačující

Varianty byly hodnoceny autorem práce a jedním posuzovatelem. V Tab. 6 a Tab. 7 jsou již uvedena jednotlivá bodová hodnocení.

Tab. 6 Hodnocení navržených variant – autor

Kritéria	Varianta A	Varianta B	Varianta C
Cena	2	1	5
Hmotnost efektoru	2	4	3
Počet stupňů volnosti přísavek	3	6	2
Náročnost výroby	1	5	2
Složitost přestavení přísavek	2	6	2
Tuhost konstrukce	2	3	3

Tab. 7 Hodnocení navržených variant – posuzovatel

Kritéria	Varianta A	Varianta B	Varianta C
Cena	3	1	5
Hmotnost efektoru	1	3	2
Počet stupňů volnosti přísavek	3	4	1
Náročnost výroby	2	3	4
Složitost přestavení přísavek	1	6	2
Tuhost konstrukce	4	1	3

Průměrné hodnoty hodnocení navržených variant jsou v Tab. 8.

Tab. 8 Průměrné hodnocení

Kritéria	Varianta A	Varianta B	Varianta C
Cena	2,5	1	5
Hmotnost efektoru	1,5	3,5	2,5
Počet stupňů volnosti přísavek	3	5	1,5
Náročnost výroby	1,5	4	3
Složitost přestavení přísavek	1,5	6	2
Tuhost konstrukce	3	2	3

4.5 Určení významnosti

V Tab. 9 a Tab. 10 byly porovnány mezi sebou jednotlivá kritéria hodnocení.

Tab. 9 Porovnání jednotlivých kritérií hodnocení – autor

Porovnávané páry					Počet voleb
K1	K1	K1	K1	K1	5
K2	K3	K4	K5	K6	
	K2	K2	K2	K2	2,5
	K3	K4	K5	K6	
		K3	K3	K3	2,5
		K4	K5	K6	
			K4	K4	1,5
			K5	K6	
				K5	2
				K6	1,5

Tab. 10 Porovnání jednotlivých kritérií hodnocení – posuzovatel

Porovnávané páry					Počet voleb
K1	K1	K1	K1	K1	5
K2	K3	K4	K5	K6	
	K2	K2	K2	K2	0
	K3	K4	K5	K6	
		K3	K3	K3	3
		K4	K5	K6	
			K4	K4	2
			K5	K6	
				K5	1,5
				K6	3,5

Průměrný počet voleb jednotlivých kritérií je uveden v Tab. 11

Tab. 11 Průměrný počet voleb pro jednotlivá kritéria a určení váhy významnosti

Hodnocená kritéria	Průměrný počet voleb	Pořadí	Významnost
K1	5	1	2,00
K2	1,25	6	1,00
K3	2,75	2	1,40
K4	1,75	4-5	1,13
K5	1,75	4-5	1,13
K6	2,5	3	1,33

Závislost váhy významnosti na počtu voleb

Váha významnosti je lineárně závislá na počtu voleb a může být popsána lineární rovnicí, jejíž základní tvar je:

$$q = k \cdot v + b \qquad (1)$$

Kde: q – váha významnosti, k – směrnice přímky, v – počet voleb, b – posunutí přímky.

Váhu významnosti vypočteme dle rovnice (1) tak že si sestavíme dvě rovnice o dvou neznámých.

Do první rovnice dosadíme q=1 -nejmenší váha významnosti, v=1,25 - nejmenší počet voleb.

$$1 = k \cdot 1{,}25 + b \tag{2}$$

A naopak do druhé rovnice q=2 - největší váha významnosti, v=5 - největší počet voleb.

$$2 = k \cdot 5 + b \tag{3}$$

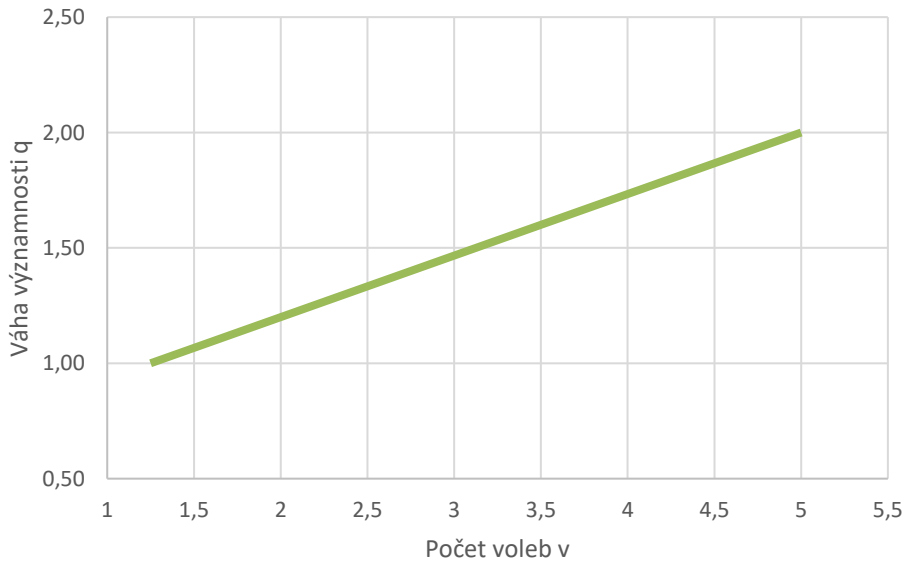
Z těchto rovnic vypočteme koeficienty b a k.

b = 2/3

k = 4/15

Pomocí těchto koeficientů určíme vztah pro závislost váhy významnosti na počtu voleb, kterou popisuje lineární rovnice (4) - její průběh je znázorněn na Obr. 20

$$q = 4/15 \cdot v + 2/3 \tag{4}$$



Obr. 20 Závislost váhy významnosti na počtu voleb

4.6 Určení vážených indexů pro jednotlivá kritéria

Vážený index se vypočte jako součin průměrného hodnocení a váhy významnosti.

Tab. 12 Vypočtené vážené indexy

Kritéria	Varianta A	Varianta B	Varianta C
Cena	5,00	2,00	10,00
Hmotnost efektoru	1,50	3,50	2,50
Počet stupňů volnosti přísavek	4,20	7,00	2,10
Náročnost výroby	1,70	4,53	3,40
Složitost přestavení přísavek	1,70	6,80	2,27
Tuhost konstrukce	4,00	2,67	4,00
∑	**18,10**	**26,50**	**24,27**

Z výsledků kriteriální analýzy vyplývá, že varianta s nejmenším váženým indexem je varianta optimální.

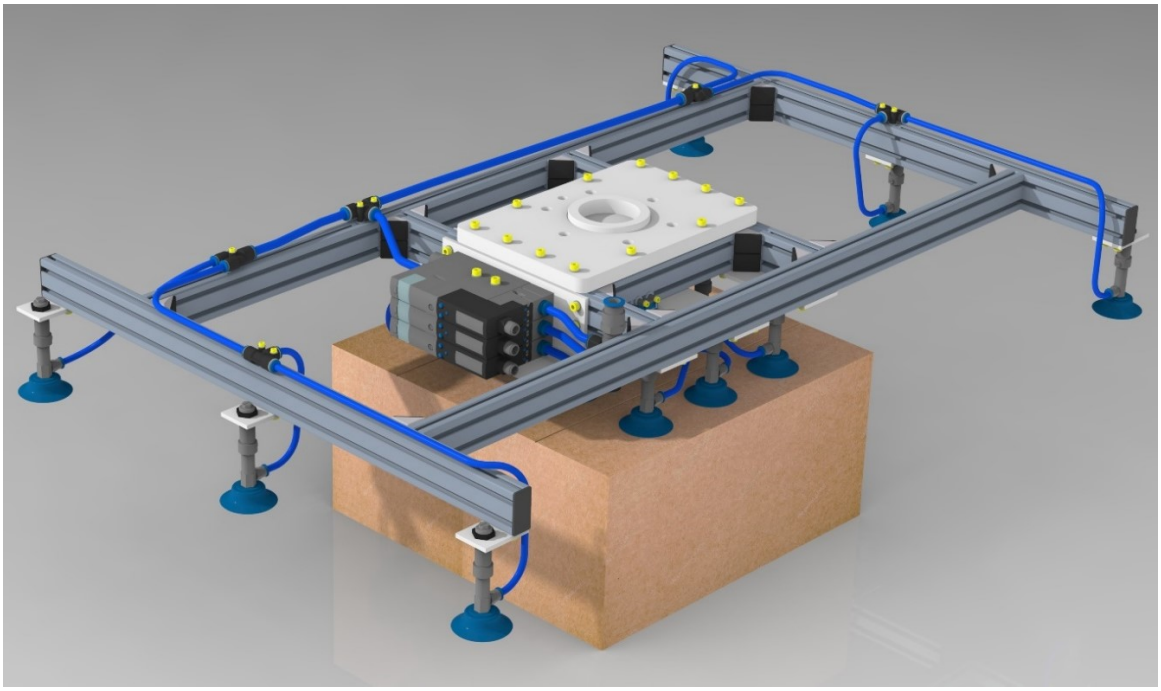
Tab. 13 Konečné pořadí

Pořadí	Varianta	Součet indexů
1	**Varianta A**	**18,10**
2	Varianta C	24,27
3	Varianta B	26,50

Z Tab. 13 je patrné že optimální řešení je varianta A.

5 Optimální varianta

V kapitole 5 byla vybrána varianta A jako nejvhodnější řešení. Z tohoto návrhu jsem vypracoval variantu konečnou (Obr. 21). V této kapitole je popsáno celé konstrukční řešení se všemi potřebnými prvky a také výpočty.

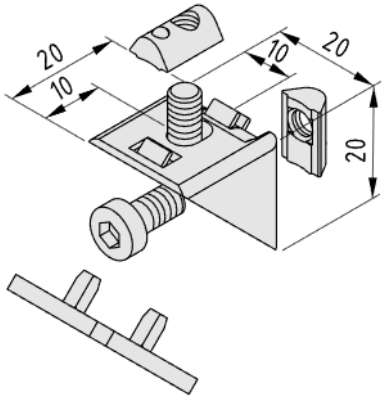


Obr. 21 Optimální varianta ve finální podobě se všemi potřebnými prvky

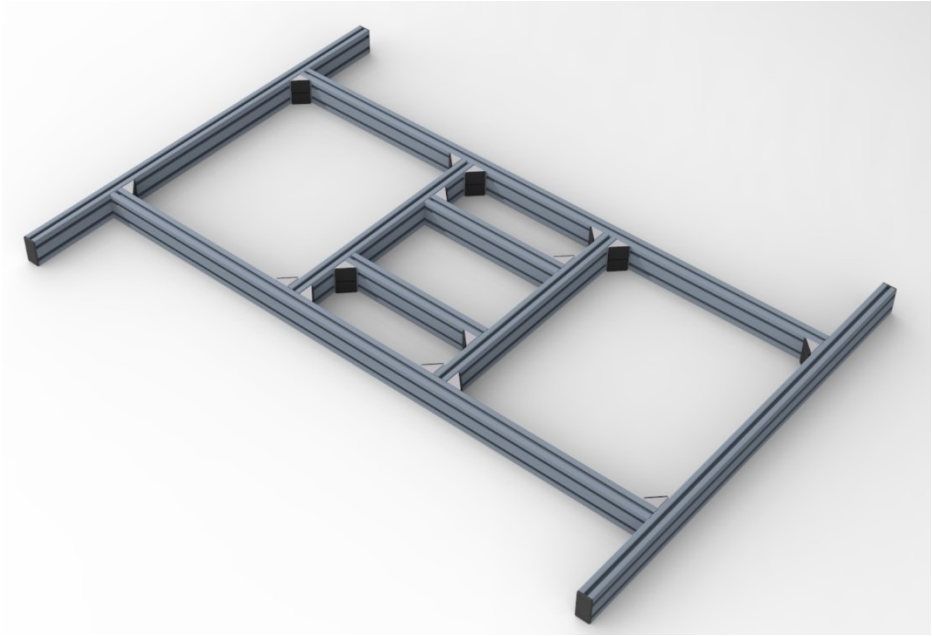
5.1 Konstrukce

5.1.1 Rám

Hlavní část konstrukce tvoří rám z hliníkových profilů. Tyto profily vyrábí firma ITEM [16] v pěti velikostních řadách s různými rozměry. Výhoda těchto profilů je nízká hmotnost a zároveň poměrně vysoký průřezový modul v ohybu. V tomto řešení byla požita řada 5 s rozměry 40x20 mm s drážkami po všech stranách v provedení NATURAL. Spojení je realizováno pomoci úhelníků, vždy dvou nad sebou, které nesvírají uhel 90°, ale o něco menší. Tato vlastnost se používá k vyvození předpětí a zvýšeni tuhostí. Proto nejsou tyto úhelníky použity ve všech rozích. Skládají se ze dvou šroubů M5x8, drážkových matic, ocelového úhelníku a plastové krytky viz. Obr. 22. Utahovací moment u šroubů je předepsaný na 4,5 Nm. Celý rám (Obr. 23) má rozměry 890x630x40 mm a hmotnost 4,5 kg. Čtyři vnější konce profilů jsou opatřeny plastovými krytkami.



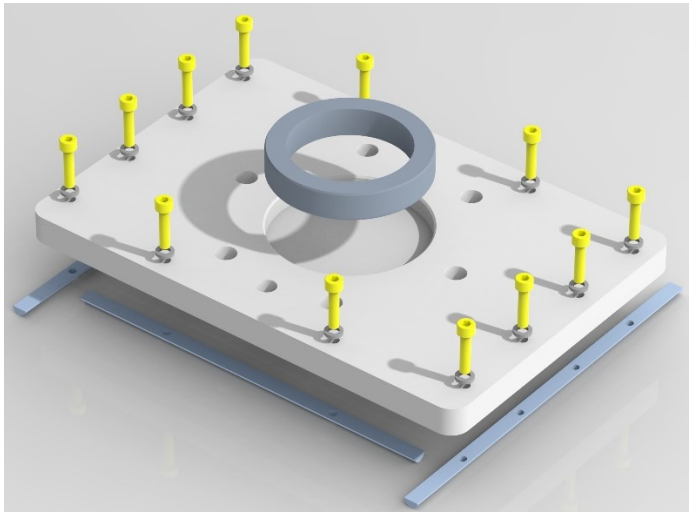
Obr. 22 Úhelník [18]



Obr. 23 Rám

5.1.2 Interface

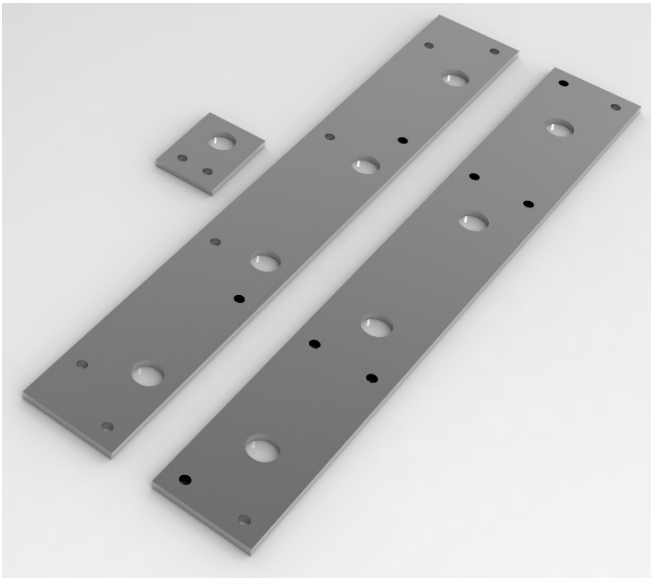
Interface o rozměrech 254x172x15 mm je vyroben z hliníku (EN AW-6061). Polotovar je vyřezán z desky vodním paprskem a následně dokončen, broušením, frézováním a vrtáním. Funkce má dvojí. Jednak přichycení efektoru k robotu, tak také vyztužení rámu. Pro přichycení k hliníkovým profilům byly použity lišty (profil 5, ITEM [16]), 12 ks šroubů M5 a podložky Nord-Lock, které zajišťují spoj proti povolení, při dynamickém zatěžování viz Obr. 24. Připojovací rozměry k robotu byly zjištěny z katalogového listu [19]. Toto spojení je vytvořeno jedním středícím kolíkem (průměru 10 mm) a 6ks šroubů M10 tř. pevnosti 12.9, které jsou na roztečném průměru 125 mm. Pro vystředění se použije ocelový prstenec konzervovány olejem.



Obr. 24 Interface s prstencem-rozložený pohled

5.1.3 Uchycení přísavek

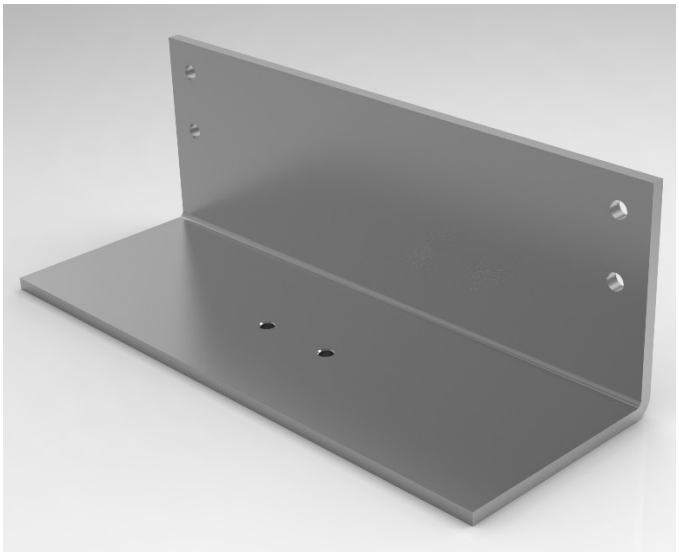
Uchycení přísavek je provedeno pomoci korozivzdorných plechů. Pro šest vnějších přísavek byl použít plech o rozměrech 50x35x4 mm. U přísavek vnitřních byly použity pásy plechů o rozměrech 375x50x4 mm. Tyto dílce (Obr. 25) jsou spojený s rámem šrouby M5 a drážkovými maticemi.



Obr. 25 Dílce pro uchycení přísavek

5.1.4 Uchycení ejektorů

Držák (Obr. 26) je vyroben z ohýbaného nerezového plechu tloušťky 4 mm. Uchycení k rámu je realizováno stejným způsobem jako u držáků přísavek.



Obr. 26 Držák ejektorů

5.2 Pneumatické prvky

Všechny pneumatické prvky byly vybrány od firmy Festo [20].

5.2.1 Ejektor

Ejektor Ovem je vybrán z více důvodů. Prvním z nich je možnost regulace úrovně vakua. Tato vlastnost je výhodná s ohledem na přepravované objekty manipulace. Při přepravě krabic a kartonových prokladů se stejnou úrovni vakua, by totiž mohlo dojít k protržení prokladů.

Další výhody jsou:

- Rychlá a spolehlivá instalace díky šroubení QS
- Integrovaný filtr a tlumič hluku
- Zamezení poklesu tlaku – vestavěný zpětný ventil
- Možnost sledování úrovně vaku na displeji
- Možnost regulace vyfukovacího impulsu
- Integrovaný elektromagnetický ventil
- Vše je zabudované do kompaktní jednotky

Uvažováno bylo také použití inline ejektory, ale z důvodu výše zmíněných vlastností a výhod, je volen ejektor OVEM, který je zobrazen na Obr. 27.

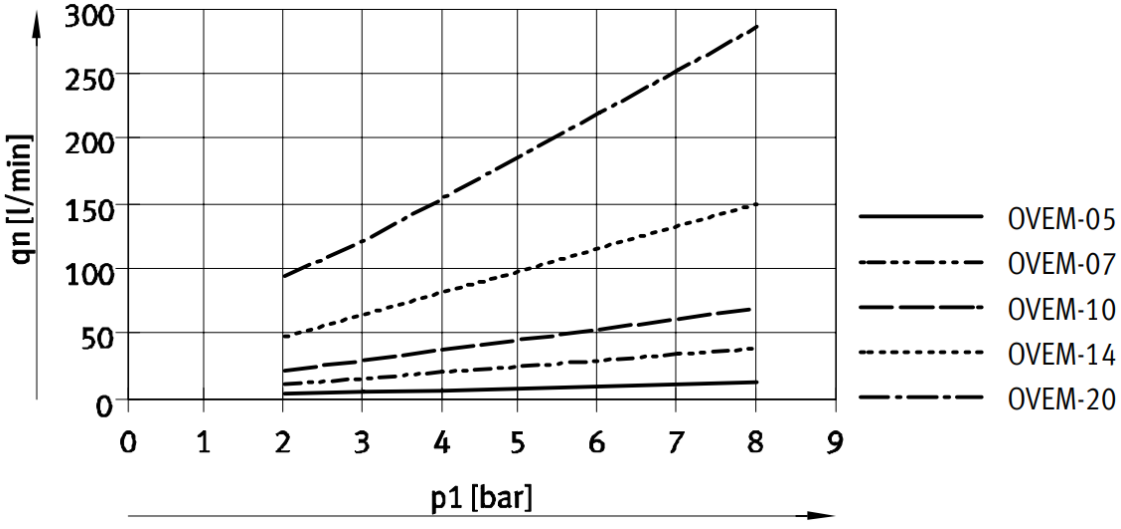
Obr. 27 Ejektor OVEM [21]

Tyto ejektory se dělí na dva druhy:

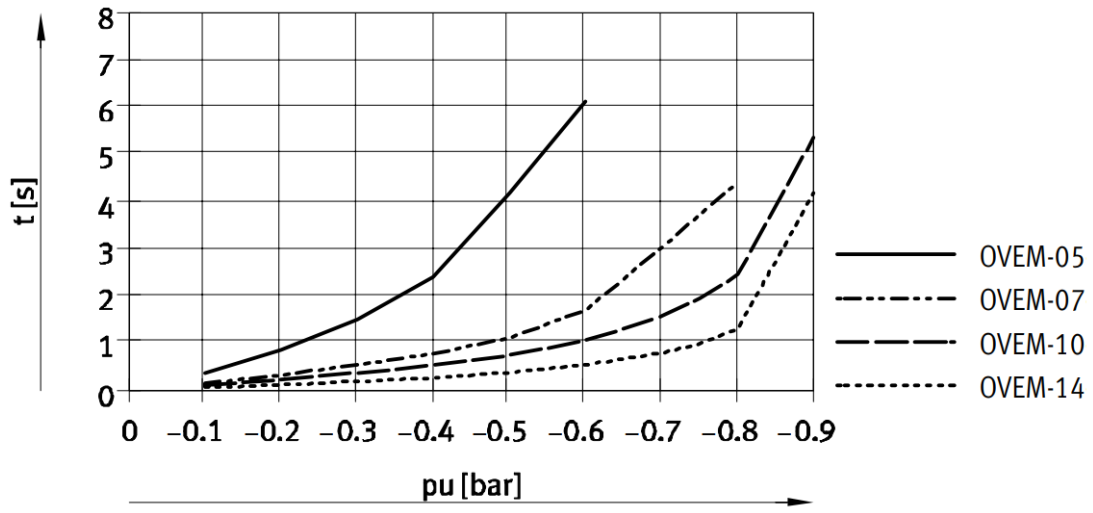
- pro hluboké vakuum
- pro velký průtok sání

Byl zvolený velký průtok sání, z důvodu kratšího času odsání vzduchu z hadic a z prostorů přísavek. Další volbou byla světlost Lavalovy trysky. Na Obr. 29 je zobrazen graf závislosti času odsátí jednoho litru vzduchu na úrovní vakua (při provozním tlaku 6 bar) a na Obr. 28 graf závislosti spotřeby vzduchu na provozním tlaku. Grafy ukazují různé průběhy dle světlosti trysky (0,5-2,0 mm). Jelikož stlačený vzduch je řádově 10krát dražší než elektrická energie [22], musí se brát v úvahu spotřeba. Provozní tlak z centrálních rozvodů v hale je 7 bar. Z grafů je zřejmé, že čím větší je světlost trysky, tím narůstá spotřeba (Obr. 28), ale také že čím větší je světlost trysky tím je čas na odsátí kratší (Obr. 29).

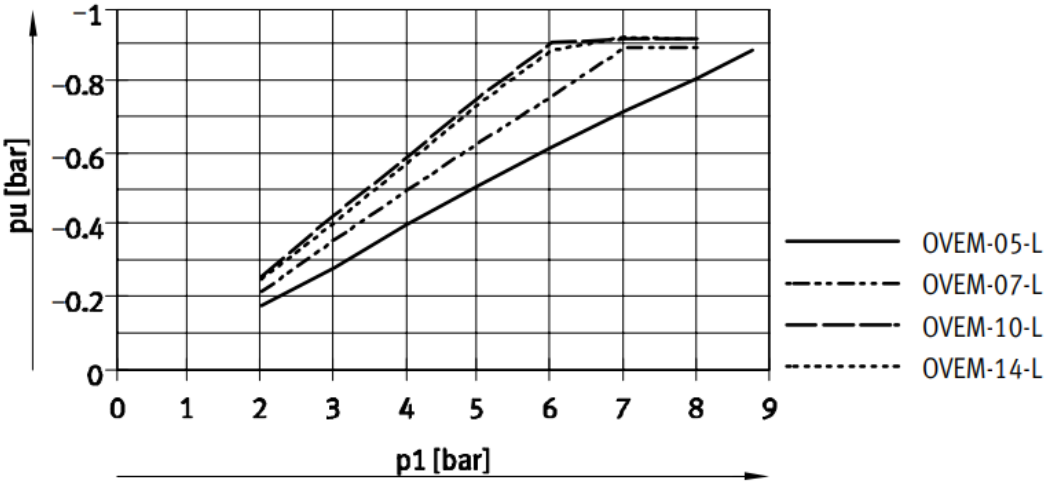
Volím proto kompromis – trysku světlosti 1,0 mm (OVEM-10).



Obr. 28 Graf závislosti spotřeby stlačeného vzduchu na provozním tlaku [23]



Obr. 29 Graf závislosti času odsátí 1 litru vzduchu na úrovní vakua při provozním tlaku 6 bar [23]



Obr. 30 Graf závislosti úrovně vakua na provozním tlaku [23]

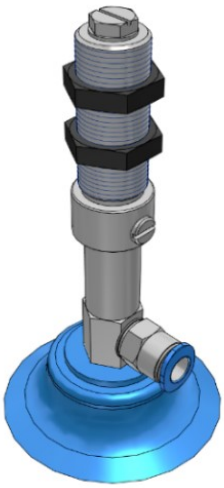
Celkem budou požity tři tyty ejektory viz kapitola 5.4 a budou spojené s držákem dvěma šrouby M5x70. Z Obr. 30 je patrné, že maximální vyvozené vakuum je – p_{umax}=0,91 bar. Vlastnosti a parametry konkrétního vybraného ejektoru jsou uvedeny v Tab. 14.

Tab. 14 Vlastnosti a parametry ejektoru OVEM-10-L-B-QO-CE-N-LK [23]

Charakteristika ejektoru	velký objem sání
Jmenovitá světlost Lavalovy trysky	0,95 mm
Připojení pro stlačený vzduch a vakuum	nástrčné připojení QS-8
Integrovaná funkce:	vyfukovací impulz, elektricky škrticí ventil elektrický spínací ventil filtr elektrická funkce úspora vzduchu zpětný ventil otevřený tlumič hluku vakuový spínač
Funkce ventilu	bez proudu uzavřeno
Jemnost filtrace	40 µm
Vakuové čidlo	IO-Link
Indikace stavu	displej
Jednotka zobrazení vakua	[bar]
Elektrická přípojka	konektor M12x1 (5 pinů)
Spínací logika vstupů	PNP (spíná plus)
Stupeň krytí	IP65

5.2.2 Přísavky

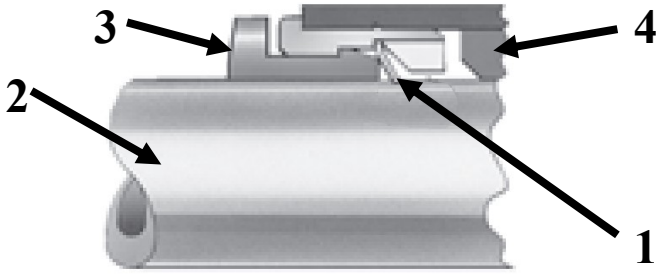
Je zvolena universální plochá přísavka z matriálu polyuretan (Obr. 31). Tento materiál je odolný proti opotřebení a také vhodný jak pro hrubé, tak hladké povrchy. Dále bylo zvoleno odpružení 20 mm pro vyrovnání nerovnosti krabic a kartonových prokladů. Velikost byla odhadnuta na průměr 50 mm, viz kapitola 5.4. Připojení vakua je uskutečněno pomoci bočního nástrčného připojení (QS-6). Upevnění k držáku bylo provedeno kontramatící (velikost závitu – M14x1). Hmotnost jednoho kusu přísavky se všemi prvky je 87 g.



Obr. 31 Plochá přísavka [24]

5.2.3 Šroubení

Všechny pneumatické spoje na efektoru jsou uskutečněny pomoci nástrčných spojení Quick Star (QS, Obr. 32). Jedná se o jednoduché a spolehlivé řešení. Nedochází k poškození hadice z důvodu západky vyrobené z nerezové oceli (1). Rázy a záchvěvy se absorbují. Hadice kalibrovaná na vnější průměr (2) se snadno uvolní stlačením uvolňovacího kroužku (3). Těsnicí kroužek je vyroben z nitrilkaučuku (4) a zajišťuje absolutní těsnost. Spoje jsou vhodné pro stlačený vzduch i pro podtlak.[25]



Obr. 32 Quick Star spojení [25]

Celkem bylo využito tři kusů T-spoje, dvou kusů Y-spoje, jednoho kusu rozbočovače pro připojení efektoru k médiu stlačeného vzduchu s vnějším závitem G1/4 a se třemi výstupy QS-8, a také redukce pro tento díl na nástrčné spojení QS-12. Posledním využitými prvky byly dva kusy rozbočovačů se 6 výstupy QS-6 a dvě redukce G1/8 na QS-8 Některé tyto součásti jsou pro představu zobrazeny na Obr. 33. Upevnění ke konstrukci bylo provedeno šrouby M3x20 a s drážkovými matici, a u rozbočovačů stahovacími páskami.

Obr. 33 Nástrčná spojení, rozbočovač, redukce [27]

5.2.4 Hadice

Pro nástrčné spojení QS musí být použity hadice s kalibrací na vnější průměr. Materiál jsem zvolil polyuretan. Ze softwaru Creo Parametric bylo vyčtena délka hadic: Ø 6 mm – délka 4,9 m a Ø 8 mm – délka 1,6 m. Uchycení bude vhodně provedeno stahovacími páskami.

5.3 Senzor pro měření vzdáleností

Na Obr. 34 je zobrazen zvolený miniaturní optoelektronický snímač WTB2S-2P3245 od firmy SICK [26]. Budou použity dva tyto snímače, z důvodu přepravování dvou krabic – pro předávaní informací řídicímu systému. Jednak pro nalezení polohy OM a jednak pro hlášení nepřisátí OM. Senzor je vhodný pro různé typy podkladů, platí ale čím tmavší objekt tím horší přesnost. Hmotnost je pouhých 13 g a rozměry 21,8x13,5x7,7 mm. Další vlastnosti tohoto senzoru jsou uvedený v Tab. 15.

Obr. 34 Senzor W2S-2 [26]

Tab. 15 Vlastnosti a parametry senzoru WTB2S-2P3245 [26]

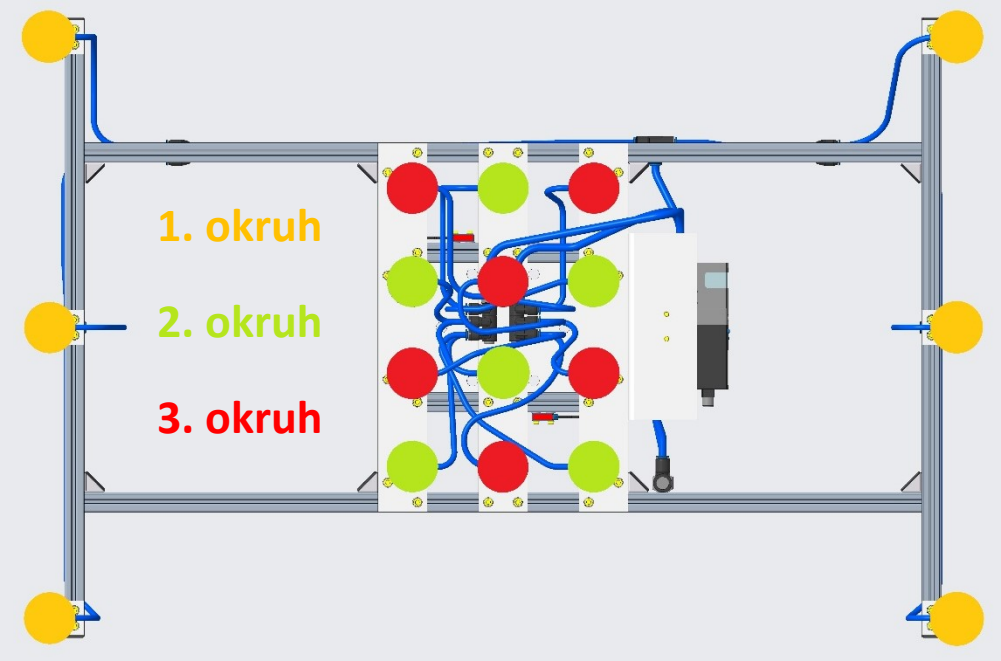
Princip senzoru/ detekce	Reflexní světelný snímač, Zaclonění pozadí
Rozměry (Š x V x H)	7,7 mm x 21,8 mm x 13,5 mm
Provedení pouzdra (výstup světla)	Ve tvaru kvádru
Snímací vzdálenost max.	4 mm ... 110 mm [1)]
Snímací dosah	10 mm ... 90 mm [1)]
Druh světla	Viditelné červené světlo
Vysílač světla	PinPoint LED [2)]
Velikost světelného bodu (vzdálenost)	Ø 4,4 mm (60 mm)
Vlnová délka	640 nm
Zvláštní použití	Detekce malých objektů
Napájecí napětí	10 V DC ... 30 V DC [3)]
Zbytkové vlnění	≤ 5 V_{ss} [4)]
Odběr proudu	20 mA [5)]
Spínací výstup	PNP
Způsob spínání	Spínání na světlo
Výstupní proud $I_{max.}$	< 50 mA
Doba odezvy	< 0,5 ms [6)]
Spínací frekvence	1.000 Hz [7)]
Druh připojení	Kabel s konektorem M8, 4pinovým, 200 mm [8)]
Materiál kabelu	PVC
Průměr vedení	Ø 3 mm
Krytí	IP67
Teplota okolí provoz	–25 °C ... +50 °C

1) Snímaný materiál s odrazivostí 90 % (vztaženo ke standardní bílé podle normy DIN 5033).
2) Průměrná životnost: 100 000 h při TU = +25 °C.
3) Mezní hodnoty.
4) Nesmí přesáhnout horní ani dolní mez tolerance Uv.
5) Bez zatížení.
6) Doba průchodu signálu s odporovou zátěží.
7) Při poměru světla a tmy 1:1.
8) Při teplotě pod 0 °C kabel neohýbejte.

Uchycení senzoru k rámu je uskutečněno standartně, jako u předešlých komponentů – drážkovými matici a šrouby.

5.4 Pneumatický okruh

Pro přepravování OM byly navrhnuté tři pneumatické okruhy – proto jsou použity tři ejektory. První okruh je pouze pro přísavky vnější. Druhý a třetí se kříží tak, aby složili jako pojistný prvek, tzn. při funkci pouze jednoho z těchto okruhů je zaručená dostatečná přidržovací síla k manipulování. Rozmístění je zobrazeno na Obr. 35.



Obr. 35 Rozmístění pneumatických okruhů

Parametry OM:

Kartonový proklad

- Rozměry – 1160x790x2 mm
- Pevnost kartonu v průtlaku – p_{kp}=400 KPa
- Hmotnost – $m_p = 0{,}22$ kg

Krabice 1

- Rozměry – 384x376x185 mm
- Pevnost kartonu v průtlaku – p_{kk}=800KPa
- Hmotnost – $m_{k1} = 25$ kg

Krabice 2

- Rozměry – 384x188x185 mm

- Pevnost kartonu v průtlaku – p_{kk}=800KPa
- Hmotnost – $m_{k2} =$ 13 kg

5.4.1 Výpočet maximálního zrychlení robotu

Jak bylo zmíněno v kapitole 3, musí být tento efektor schopný manipulovat současně se 2 ks 13 kg krabic, proto bude tento výpočet prováděn na jedné krabici s polovičním počtem přísavek. Následující výpočet mohl být proveden až po mém odborném odhadu následujících parametrů:

- Počet přísavek – n=6 ks
- Průměr přísavky – D=50 mm
- Úroveň vakua – p_v= -80KPa
- Bezpečnost – k=2

Výpočet maximálního zrychlení při vertikálním pohybu

$$p = \frac{F}{S} \tag{5}$$

$$p_v = \frac{F}{S} \cdot k \tag{6}$$

$$\frac{p_v \cdot S}{k} = -(F_s + F_g) \tag{7}$$

$$\frac{p_v \cdot S}{k} = -m_{k2} \cdot a - m_{k2} \cdot g \tag{8}$$

$$a = -\frac{p_v \cdot S}{k \cdot m_{k2}} - g \tag{9}$$

$$a = -\frac{p_v \cdot \pi \cdot D^2 \cdot n}{4 \cdot k \cdot m_{k2}} - g = -\frac{-0{,}08 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 6}{4 \cdot 2 \cdot 13} - 9{,}81 = 26{,}439\ m \cdot s^{-2} \tag{10}$$

Výpočet maximálního zrychlení při horizontálním pohybu

- Hodnota tření (karton-přísavka) – μ=0,6

$$p = \frac{F}{S} \tag{11}$$

$$p_v = \frac{F}{S \cdot \mu} \cdot k \tag{12}$$

$$\frac{p_v \cdot S \cdot \mu}{k} = -(F_s + F_g) \tag{13}$$

$$\frac{p_v \cdot S \cdot \mu}{k} = -m_{k2} \cdot a - m_{k2} \cdot g \tag{14}$$

$$a = -\frac{p_v \cdot S \cdot \mu}{k \cdot m_{k2}} - g \tag{15}$$

$$a = -\frac{p_v \cdot \pi \cdot D^2 \cdot n \cdot \mu}{4 \cdot k \cdot m_{k2}} - g = -\frac{-0{,}08 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 6 \cdot 0{,}6}{4 \cdot 2 \cdot 13} - 9{,}81 = 11{,}939\, m \cdot s^{-2} \tag{16}$$

Na základě těchto výpočtů je stanoveno $a_{max} = 10\, m \cdot s^{-2}$, a rychlost doporučuji omezit na $v = 10\, m \cdot s^{-1}$. V reálném provozu by se tyto hodnoty musely testovat.

Výpočet maximálního zrychlení při výpadku jednoho pneumatického okruhu

$$a = -\frac{p_v \cdot \pi \cdot D^2 \cdot n \cdot \mu}{4 \cdot k \cdot m} - g = -\frac{-0{,}08 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 3 \cdot 0{,}6}{4 \cdot 2 \cdot 13} - 9{,}81 = \ 1{,}065\, m \cdot s^{-2} \tag{17}$$

Při výpadku jednoho okruhu: $a_{1max} = 1\, m \cdot s^{-2}$, doporučena rychlost $v_1 = 1\, m \cdot s^{-1}$.

Kontrola protrhnutí kartonu v místě přísavky:

- Pevnost kartonu krabice v průtlaku – p_{kk}=800KPa

$$p_{kk} > |p_v| \text{ -karton se neprotrhne} \tag{18}$$

5.4.2 Výpočet odporové síly

V podkapitole 5.4.1 byla zanedbána odporová sílu vzduchu. U kartonových prokladů, při vertikálním pohybu ale tuto sílu zahrnu do výpočtů.

Vztah pro výpočet odporové síly:

$$F_{odp} = C \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot S \cdot v^2 \tag{19}$$

Kde C–součinitel odporu, ρ-hustota tekutiny, S-obsah desky, v-rychlost kolmá na plochu S

- Součinitel odporu pro rovnou a tenkou desku – C=1,2
- Hustota vzduchu při 20 °C - $\rho = 1{,}205\, kg \cdot m^{-3}$
- Doporučená rychlost (viz podkapitola 5.4.1) – $v = 10\, m \cdot s^{-1}$

- Obsah prokladu:

$$S = a \cdot b = 1{,}16 \cdot 0{,}79 = 0{,}916\ m^2 \tag{20}$$

$$F_{odp} = 1{,}2 \cdot \frac{1}{2} \cdot 1{,}205 \cdot 0{,}916 \cdot 10^2 = 66{,}227\ N \tag{21}$$

5.4.3 Výpočet bezpečnosti u kartonových prokladů

Bezpečnost bude počítána s $a_{max} = 10\ m \cdot s^{-2}$ viz podkapitola 5.4.1 a pouze s vnějšími přísavkami – n=6

$$p_v = \frac{F}{S} \cdot k \tag{22}$$

$$p_v \cdot S = -(F_s + F_g + F_{odp}) \cdot k \tag{23}$$

$$k = \frac{p_v \cdot \pi \cdot D^2 \cdot n}{-4 \cdot (m_p \cdot (a + g) + F_{odp})} = \frac{-0{,}08 \cdot \pi \cdot 50^2 \cdot 6}{-4 \cdot (0{,}22 \cdot (10 + 9{,}81) + 66{,}227)} = 13{,}352 \tag{24}$$

Z výpočtu je zřejmé, že bezpečnost je velká pouze z šesti přísavkami, ale z důvodu poddajnosti kartonového prokladu, nemůže být brán ohled na tuto hodnotu. Proto budou pro manipulování s kartonovými proklady použity všechny přísavky.

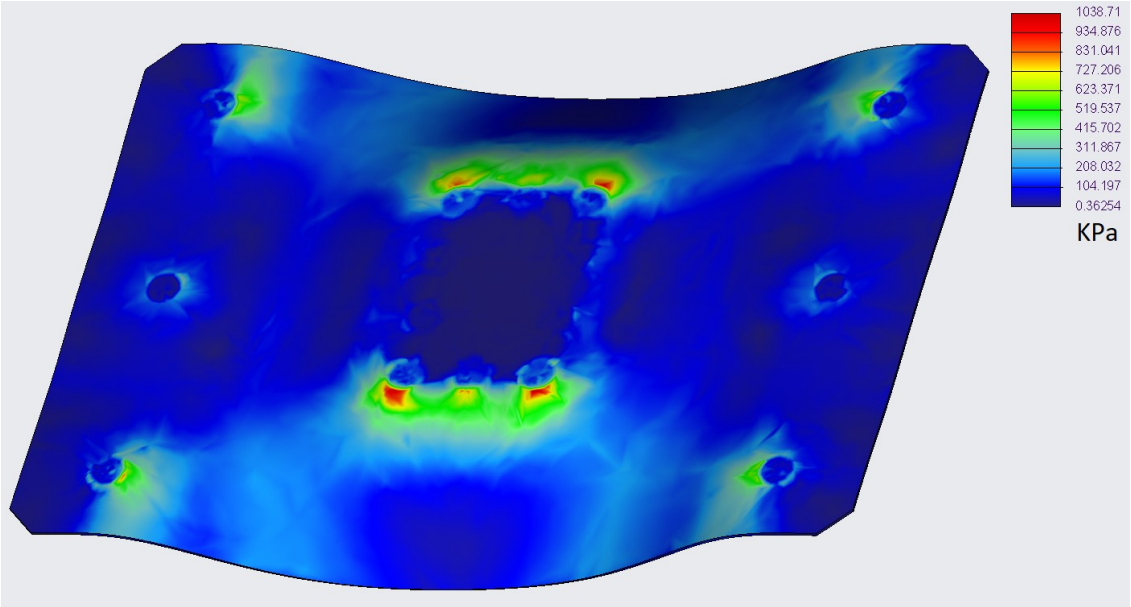
Kontrola protrhnutí kartonu v místě přísavky:

- Pevnost kartonu prokladu v průtlaku – p_{kp}=400KPa

$$p_{kp} > |p_v| \text{-karton se neprotrhne} \tag{25}$$

5.4.4 Kontrola rozmístění přísavek

Jak můžeme vidět v podkapitole 5.4.3, bezpečnost přidržovací síly při manipulaci s proklady je dostatečně velká. Může nastat ale situace, že při přepravování a deformaci kartonu dojde v některém místě k protržení. Toto se nedá řešit jednoduše numericky, proto byl proveden výpočet pomoci metody konečných prvků softwarem CREO Simulate. Z Obr. 36 je patrné, že kolem přísavek a na jejich okrajích ve střední části, vzniká největší napětí, které může překročit pevnost kartonu v průtlaku.



Obr. 36 Výsledek pevnostní analýzy kartonového prokladu

Beru ale na vědomí, že tato simulace je pouze odhad, a že před uvedením efektoru do provozu se bude muset provést odzkoušení.

6 Závěr

Podle stanovených požadavků jsem navrhl tři varianty řešení, z kterých byla pomoci vícekriteriální analýzy vybrána varianta A. Tato varianta byla následovně rozpracována do finální polohy.

Efektor se skládá z hliníkových profilů spojených pomoci úhelníků šroubovými spoji, na kterých jsou připevněné korozivzdorné plechy pro uchycení přísavek. Celkem bylo použito osmnáct přísavek, jak pro uchopování krabic, tak pro uchycení kartonových prokladů. Všechny pneumatické prvky byly vybrány od společnosti Festo, mezi nimiž byly tři ejektory pro tvorbu podtlaku a pro vytvoření třech nezávislých pneumatických okruhů. Senzor pro snímání vzdáleností efektoru od krabic byl vybrán od společnosti SICK.

Cílem výpočtů bylo určení největšího zrychlení a rychlosti pohybu robotu. Byla to úloha inverzní, z důvodu toho že jsem neznal časy cyklů. Dále byla provedena kontrola neprotrhnutí kartonu, kde jsem si vyzkoušel simulaci pomoci Creo Simulate.

Celá konstrukce by měla být podrobena pevnostní analýze, protože výpočet pevnosti a průhybů nelze řešit komplexně numericky. Neuváděl jsem ji zde, z důvodu toho že nejsem ještě s touto problematiko dostatečně seznámen, a budu se ji věnovat v následujících ročnících.

3D model a výkresová dokumentace byla provedena v softwaru Creo Parametric.

Seznam použité literatury

[1] JELÍNEK, Tomáš. *Podtlakové úchopné hlavice* [online]. BRNO, 2010 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://www.umel.feec.vutbr.cz/~bousek/vak/KONSTRUKCE/PODTLAK_UCHOP_JELINEK.pdf. Semestrální projekt. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav mikroelektroniky.

[2] SKAŘUPA, Jiří. *Průmyslové roboty a manipulátory* [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, [2008] [cit. 2019-04-23]. ISBN 978-80-248-1522-0. Dostupné z: http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf

[3] Přísavka (technika). In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/P%C5%99%C3%ADsavka_(technika)

[4] Suction cups for every application and industry. *Piab AB* [online]. c2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.piab.com/en-US/news/press-releases/suction-cups-for-every-application-and-industry/

[5] U15-3. *Piab AB* [online]. 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.piab.com/Products/suction-cups/shape/universal/u---universal-2-50-mm/u15-3/

[6] BL50-5. *Piab AB* [online]. c2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.piab.com/Products/suction-cups/shape/multibellows/bl-5---bellows-long-30-50-mm/bl50-5/

[7] Model FP Cups. *SMC Pneumatic Cylinders* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.smcpneumatics.com/piab/Model_FP_Cups.pdf

[8] *Přísavky* [online]. PIAB, 2005 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://www.vakuumtechnik.cz/download/piab/PIAB_prisavky_brozura_CZ.pdf

[9] F75P. *Piab AB* [online]. c2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.piab.com/Products/suction-cups/shape/flat/f---flat-duraflex-75-110-mm/f75p/

[10] D50. *Piab AB* [online]. c2019 [cit. 2019-05-07]. Dostupné z: https://www.piab.com/Products/suction-cups/shape/deep/d---deep-15-50-mm/d50/

[11] DURAFLEX® suction cups. *Piab AB* [online]. c2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.piab.com/en-US/about/innovations/duraflex-suction-cups/

[12] Vakuum. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Vakuum

[13] TOMÁŠ, Jaroslav. *Realizace efektoru s přísavkami pro PR ABB IRB 140* [online]. Ostrava, 2010 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/81114/TOM392_FS_N2301_2301T013_2010.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robototechniky.

[14] KENICKÝ, Antonín. *Demonstrační zařízení vakuových mechanismů* [online]. Ostrava, 2018 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://dspace.vsb.cz/bitstream/handle/10084/129381/KEN0007_FS_B2341_2302R007_2018.pdf?sequence=1&isAllowed=n. Bakalářská práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra hydromechaniky a hydraulických zařízení.

[15] *Vakuum pro automatizaci* [online]. PIAB [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: http://www.vakuumtechnik.cz/download/piab/vakuum_pro_automatizaci_CZ.pdf

[16] *Item Industrietechnik GmbH* [online]. 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://cz.item24.com/

[17] *DESTACO* [online]. c2010-2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://dscczech.cz/

[18] Angle Bracket Set 5 20x20. *Item Industrietechnik GmbH* [online]. 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://cz-product.item24.com/cs/detaily-produktu/products/angle-bracket-zn-1001046547/angle-bracket-set-5-20x20-42502/

[19] *Product specification IRB 460: ROBOTICS* [online]. A9. ABB, 2018 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://library.e.abb.com/public/7594b3c7da04464f96d3147ddfba7679/3HAC039611%20PS%20IRB%20460-en.pdf

[20] *Skupina Festo* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.festo.com/cms/cs_cz/index.htm

[21] Konfigurátor Festo: Vacuum generator OVEM, metric. *Festo* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: https://www.festo.com/cz/cs/npc/npc-config-ui/start.do?caller=KAT&product=OVEM.CONFIGURATIONVIEW&caturl=https%3A%2F%2Fwww.festo.com%2Fcat%2Fcs_cz%2Fproducts_OVEM&configurationId=4bb9991d-dd83-486c-a2ad-e08f8c98c71c&tabId=6a5ed9ef-a823-4879-b313-8b1cc2dcad52#!/product/OVEM_PRODUKTKONFIGURATOR

[22] Trademedia: Program. *TRADE MEDIA INTERNATIONAL* [online]. [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.konference-tmi.cz/program-36.html

[23] *Vakuové ejektory OVEM* [online]. Festo, 2018 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/data/doc_cs/PDF/CZ/OVEM_CZ.PDF

[24] Konfigurátor Festo: Suction gripper ESG, round. *Festo* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: https://www.festo.com/cz/cs/npc/npc-config-ui/start.do?caller=KAT&product=ESG_RUND.CONFIGURATIONVIEW&caturl=https%3A%2F%2Fwww.festo.com%2Fcat%2Fcs_cz%2Fproducts_ESG&configurationId=033da308-3b13-4286-8bb9-73c9fe426519&tabId=608281d0-05c6-455d-ab53-020d9a399755#!/product/ESG_RUND_PRODUKTKONFIGURATOR

[25] *Vícenásobné rozdělovací díly QS, Quick Star* [online]. Festo, 2006 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/en-gb_gb/data/doc_CS/PDF/CZ/DISTRIBUTOR-QS_CZ.PDF

[26] *WTB2S-2P3245: W2S-2* [online]. SICK, 2019 [cit. 2019-04-23]. Dostupné z: https://www.sick.com/media/pdf/2/32/632/dataSheet_WTB2S-2P3245_1064615_cs.pdf

[27] Festo katalog: Nástrčná šroubení. *Festo* [online]. [cit. 2019-05-09]. Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/products__01198

[28] *IRB 460 High speed robotic palletizer: ROBOTICS* [online]. ABB, 2018 [cit. 2019-05-16]. Dostupné z: https://search-ext.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=ROB0206EN_A&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch

Přílohy

Příloha A: Výkresová dokumentace:

Výkres sestavy:	Celková sestava	KOW0030_SV-001
Výkresy podsestav:	Rám	KOW0030_SV-01
	Celek přísavky středové	KOW0030_SV-02
	Celek přísavky boční	KOW0030_SV-03
	Celek přísavka vnější	KOW0030_SV-04
	Celek ejektory	KOW0030_SV-05
	Celek QST-8	KOW0030_SV-06
	Celek QST-6	KOW0030_SV-07
	Celek QSY-8-6	KOW0030_SV-08
	Celek senzor W2S-2	KOW0030_SV-09
Výrobní výkresy:	Příruba	KOW0030_VV-01
	Prstenec	KOW0030_VV-02
	Držák přísavky středový	KOW0030_VV-03
	Držák přísavky boční	KOW0030_VV-04
	Držák přísavky 1	KOW0030_VV-05
	Držák ejektorů	KOW0030_VV-06
	ITEM lišta profil 5-210	KOW0030_VV-07
	ITEM lišta profil 5-200	KOW0030_VV-08
Výkres pneumatického okruhu:	Pneumatický okruh	KOW0030_PV-01

Příloha B: CD-ROM – Kowalczyk – Bakalářská práce

Obsah CD-ROM:

- Bakalářská práce ve formátu PDF
- Přílohy