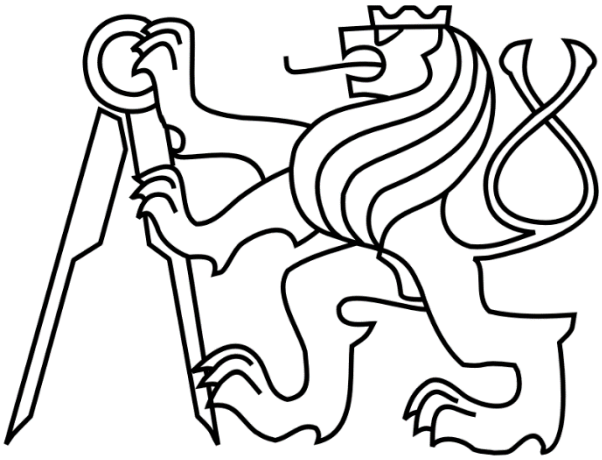
ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

Ústav výrobních strojů a zařízení



Bakalářská práce

Návrh integrované smart úchopné hlavice manipulačního robota

2021 **Ester Jančaříková**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Jančaříková** Jméno: **Ester** Osobní číslo: **485683**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav výrobních strojů a zařízení**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Návrh integrované smart úchopné hlavice manipulačního robota

Název bakalářské práce anglicky:

Design of integrated smart effector for an industrial robot

Pokyny pro vypracování:

Popis tématu: Každý manipulační robot musí být vybaven úchopnou hlavicí, která umožní manipulovat konkrétní součástku. Cíl práce: Cílem je návrh úchopné hlavice pro manipulaci papírových obálek. Těleso hlavice je tvořené 3D tištěným tělesem se čtyřmi rameny s rozhraním pro připojení ejektorů pro vytvoření vakua a osmi savkami. Dále je v tělese integrováno sledování tlaků pneumatického systému, které jsou komunikovány s řídicí jednotkou. Osnova práce: Rešerše uchopovacích hlavic průmyslových robotů s integrovanou senzorikou; návrh koncepce uchopovací hlavice dle zadané aplikace; návrh ejektorové části hlavice; návrh systému sledování tlaků a komunikace; provedení základních dimezovacích výpočtů; vytvoření 3D modelu. Rozsah grafické části: výkres sestavy hlavice, výrobní výkres tělesa hlavice. Rozsah textové části: 40-60 stran;

Seznam doporučené literatury:

Škařupa, J., Mostýn, V. Teorie průmyslových robotů, 2000, VIENALA.
Dokumentace výrobců koncových efektroů robotů dostupná na internetu.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D., ústav výrobních strojů a zařízení FS

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

Ing. Ondřej Novák, katedra řídicí techniky FEL

Datum zadání bakalářské práce: **29.04.2021** Termín odevzdání bakalářské práce: **25.07.2021**

Platnost zadání bakalářské práce: **30.09.2021**

doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D. podpis vedoucí(ho) práce	Ing. Matěj Sulitka, Ph.D. podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	prof. Ing. Michael Valášek, DrSc. podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Studentka bere na vědomí, že je povinna vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

. Datum převzetí zadání

Podpis studentky

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci na téma „Návrh integrované smart úchopné hlavice manipulačního robota“ vypracovala samostatně a že jsem uvedla v přiloženém seznamu veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principů při přípravě vysokoškolských závěrečných prací, vydaným ČVUT v Praze 1. 7. 2009.

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

V Praze dne …….

Poděkování

Téma bakalářské práce je zpracováváno na Ústavu výrobních strojů a zařízení, FS, ČVUT v Praze. Realizace prototypů a testy byly provedeny s využitím vybavení Testbed Průmyslu 4.0 CIIRC, ČVUT v Praze.

Ráda bych poděkovala za podporu při řešení této práce. Poděkování zaslouží doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D. za odborné vedení mé bakalářské práce a cenné rady. Dále Ing. Ondřej Novák a Ing. Alexander Lazarov za odborné konzultace problematiky. V neposlední řadě bych ráda poděkovala vedoucímu Testbed Průmyslu 4.0 panu Ing. Pavlu Burgetovi, Ph.D. za nasměrování k tématu bakalářské práce a za cenné rady.

Anotace

Autor:	Ester Jančaříková
Název BP:	Návrh integrované smart úchopné hlavice manipulačního robota
Rozsah práce:	59str., 45obr.,11 tab., 7 grafů
Školní rok vyhotovení:	2021
Škola:	ČVUT v Praze, Fakulta strojní
Ústav:	Ú12135 – ústav výrobních strojů a zařízení
Vedoucí bakalářské práce:	doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D.
Konzultant:	Ing. Ondřej Novák – ČVUT CIIRC
Zadavatel:	ČVUT CIIRC
Využití:	Podtlaková úchopná hlavice pro flexibilní automatizaci manipulačních operací
Klíčová slova:	Podtlakové smart hlavice, senzory, modulární konstrukce, parametrizace
Anotace:	Bakalářská práce se zabývá konstrukcí smart podtlakové úchopné hlavice. V první části je uveden přehled stávajících průmyslových řešení inteligentních úchopných hlavic. V druhé části je popsána konstrukce CAD modelu, který umožňuje rychlé a finančně efektivní generování různých konstrukčních variant určených k výrobě technologií 3D tisku. Koncept integruje též různé úrovně senzoriky. V závěru jsou popsány dva konkrétní příklady uplatnění a testování prvního prototypu.

Annotation

Author:	Ester Jančaříková
Title of bachelor thesis:	Design of integrated smart effector for an industrial robot
Extent:	59p., 45fig., 11 tab., 7 charts
Academic year:	2021
University:	CTU, Faculty of Mechanical Engineering
Department:	Ú12135
Supervisor:	doc. Ing. Petr Kolář, Ph.D
Consultant	Ing. Ondřej Novák – CTU CIIRC
Submitter of the Theme:	CTU CIIRC
Application:	Vacuum gripper for flexible automation
Key words:	Vacuum gripper, sensors, modular construction, parametrization
Annotation:	This thesis describes the construction of a smart vacuum gripper. The first part provides an overview of smart grippers. The second part describes the CAD construction of the part, which allows easy modification of models parameters according to the specific assignment, enabling fast and cost-effective generation of CAD models. This concept also integrates various levels of sensors used to monitor the condition of the part around the gripper. In the final part, two specific examples of application and testing of the first prototype are described.

Přehled použitých veličin a jednotek

α	[°]	úhel tvarového vybírání v čelistech
μ	[-]	koeficient tření
σ_D	[Pa]	dovolené napětí
σ_{krit}	[Pa]	kritické napětí
σ_{RED}	[Pa]	redukovaná hodnota napětí
σ_r	[Pa]	radiální napětí
σ_t	[Pa]	tečné napětí
μ_0	[N/A ^{2}]	permeabilita vakua
μ_r	[N/A ^{2}]	relativní permeabilita
a	[m/s^2]	zrychlení
B	[T]	magnetická indukce v místě styku magnetů
F	[N]	přídržná síla
F_A	[N]	odtrhovací síla
F_1	[N]	upínací síla
g	[m/s^2]	tíhové zrychlení
k	[-]	koeficient bezpečnosti
m	[kg]	hmotnost uchopovaného předmětu
n	[-]	počet ejektorů
$n_č$	[-]	počet čelistí
p_1	[Pa]	vnitřní tlak v potrubí
p_2	[Pa]	vnější tlak okolo potrubí
S	[m^2]	plocha
r_1	[m]	vnitřní poloměr nádoby
r_2	[m]	vnější poloměr nádoby

Obsah

1 Úvod 8
2 Cíle práce 9
3 Inteligentní úchopné hlavice 10
3.1 Definice základních pojmů 10
3.1 Podtlakové úchopné hlavice 14
3.2 Mechanické úchopné hlavice 23
3.3 Magnetické úchopné hlavice 27
3.4 Dílčí závěr 31
4 Návrh parametrické podtlakové hlavice 32
4.1 Koncepční návrh konstrukce 32
4.2 Základní těleso 33
4.3 Přípojné moduly 35
4.1 Komponenty pneumatického obvodu 37
4.2 Možnosti osazení senzorikou 39
4.3 Komunikační připojení na robota 45
5 Návrhové a kontrolní výpočty 46
5.1 Výpočet tloušťky stěny vedení 46
5.1 Výpočet přídržné síly a volba savek 47
6 Zkoušky pneumatického obvodu 49
6.1 Testovaný prototyp 49
6.2 Průběh testování 49
6.3 Výsledky měření 50
7 Realizace 51
7.1 Úchopná hlavice pro projekt Denso 51
7.2 Úchopná hlavice pro projekt Delta 55
8 Závěr 58
Seznamy: .....
Přílohy .....

1 Úvod

Flexibilní průmyslová automatizace je v dnešní době založena zejména na průmyslových robotech. Podtlakové úchopné hlavice jsou jednou z možností pro manipulaci objektů. Při jejich navrhování se konstruktér vždy musí rozhodnout mezi dvěma strategiemi: použití standardních komponent, které zajišťují cenově výhodné, ale hmotnostně neoptimální řešení, nebo dedikované hlavice, kde lze optimalizovat hmotnost a tlakové ztráty, ale výroba je časově náročnější, a tedy dražší.

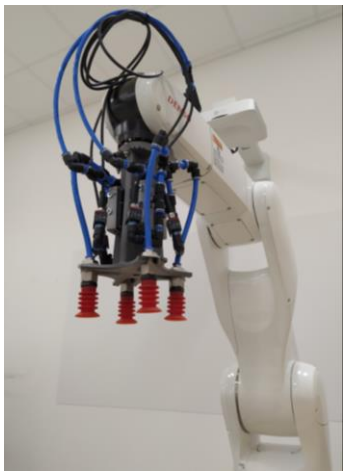
Tato bakalářská práce představuje řešení, které spojuje výhody obou přístupů: modulární CAD konstrukci dílce připraveného pro výrobu 3D tiskem s možností plug-and-produce napojení na robota. Model umožňuje rychlé a finančně efektivní generování CAD modelů určených k výrobě 3D tiskem. Koncept integruje též různé úrovně senzoriky, sloužící k sledování stavu dílce v okolí hlavice: určování přítomnosti dílce, měření vzdálenosti úchopné hlavice od dílce a snímání obrazu.

2 Cíle práce

Cílem práce je návrh úchopné hlavice pro manipulaci papírových obálek. Primární aplikací úchopné hlavice je pilotní projekt **„Denso“**. V tomto projektu je manipulováno s různě naplněnými papírovými obálkami o hmotnosti do 0,15 kg. Obálky mohou být různé velikosti. Z toho důvodu je dán požadavek na využití osmi savek rozmístěných ve dvou soustředných čtvercových patternech s délkou strany vnitřního čtverce 40 mm a vnějšího 80 mm. Hlavice je připojena přes aplikační přírubu k manipulačnímu robotu Denso VS-087. **Vakuum je na hlavici generováno čtyřmi pneumatickými ejektory CHIP L14A6-ZN,** které jsou k hlavici připojeny přes vlastní dedikované přípojné rozhraní. Dále je navrženo sledování tlaků pneumatického systému, které jsou komunikovány s řídicí jednotkou. Model je určen k realizaci technologií **Multi Jet Fusion** (práškovým 3D tiskem) z materiálu HP High Reusability PA12 tisknutého metodou ASTM D638. Navrhované řešení nahrazuje původní řešení hlavice (viz obr. 2.1). **Nové řešení úchopné hlavice má být lehčí a kompaktnější.**

Rešeršní část práce je věnována úchopným hlavicím manipulačních průmyslových robotů s integrovanou senzorikou dále označovaných jako inteligentní úchopné hlavice.

Konstrukční část práce popisuje návrh podtlakové úchopné hlavice, která je koncipována jako částečně variabilní CAD model určený pro výrobu 3D tiskem. Je navrženo ejektorové přípojné rozhraní, systém sledování tlaků v pneumatickém systému a komunikace mezi úchopnou hlavicí a řídicím systémem. **V závěru konstrukční práce je popsána aplikace na dvou konkrétních projektech.**



Obr. 2.1 Původní řešení podtlakové úchopné hlavice projekt „Denso“

3 Inteligentní úchopné hlavice

Úkolem manipulačního robota je opakovatelná manipulace s předměty. K tomu musí být robot opatřen vhodným koncovým efektorem – úchopnou hlavicí. Úchopné hlavice lze využít v celé řadě aplikací. Z toho důvodu existuje velké množství konstrukčních variant, které pro vznik úchopu využívají různých fyzikálních principů vzniku úchopné síly. V této bakalářské práci je uvažováno rozdělení úchopných hlavic dle fyzikálního principu vzniku přídržné síly. Na základě tohoto rozdělení jsou úchopné hlavice rozděleny do tří základních kategorií: **podtlakové, mechanické a magnetické**. Mimo tyto kategorie existují i hlavice využívající speciálních způsobů úchopu. Jako příklad lze uvést hlavice adhezní využívající vzniku Van der Waalsových sil. Tyto hlavice však nebudou v této bakalářské práci blíže popisovány.

Úchopné hlavice mohou být osazeny senzorikou, díky které lze kontrolovat a sledovat stavy na hlavici. Díky informacím, které jsou zprostředkovávány ze senzorů, lze kontrolovat a řídit vznik bezpečného úchopu, kontrolovat pohyb robota a díky tomu zajistit bezpečný průběh manipulace.

3.1 Definice základních pojmů

V této kapitole jsou představeny základní pojmy související s problematikou inteligentních úchopných hlavic. Úchopné hlavice jsou koncovým efektorem manipulačního robota, tedy robota, jehož úkolem je manipulace s předměty. Úchopná hlavice (dále také pouze hlavice, popř. chapadlo) manipulačního robota zprostředkovává silovou vazbu mezi robotem a manipulovaným dílcem, tzv. úchop. Uchopení je dosaženo vytvářením přídržné síly a tvarem úchopných prvků. Termín úchopná hlavice je uvažován i v případě, kdy nedochází ke skutečnému uchopení, ale spíše k držení objektu, jako je tomu například u podtlakových hlavic. [1]

V této práci definujeme inteligentní úchopnou hlavici jako koncový efektor s aktivní senzorikou. Díky této senzorice, přesněji řečeno díky konkrétním změřeným signálům, se provoz hlavice i robota dokáže přizpůsobit fyzikálním vlastnostem a změnám prostředí (síle, poloze, režimu uchopení atd.). Senzorika na úchopných hlavic může být různě komplexní.

Senzory snímají průběhy sledovaných veličin a převádějí je na signál. Zprostředkovávají informace o průběhu činnosti robota a o stavu manipulovaného objektu. Senzorika umožňuje sledování, řízení a regulaci systému díky čemuž lze zajistit bezpečný a efektivní průběh manipulace.

Rozdělení senzorů

Senzory lze rozdělovat do kategorií na základě mnoha faktorů. Prvním možných způsobem je dělení dle měřené veličiny (teplota, tlak, průtok, radiační, mechanické, magnetické či elektrické veličiny atp.) druhým možný způsobem je dělení dle fyzikálního principu (odporové, indukční, kapacitní, magnetické, piezoelektrické, optoelektronické atp.). Dalšími možnými způsoby je např. dle styku s měřeným prostředním, dle transformace signálu nebo dle výrobní technologie. [2]

Požadavky kladené na senzor

Pro správnou funkci senzorů je nutná jednoznačná závislost výstupní veličiny na vstupní veličině a dostačující přesnost senzorů. Senzor musí mít vhodné dynamické vlastnosti. Měření nesmí být výrazně ovlivňováno vnějšími vlivy (jako je např. teplota, tlak, vlhkost), případně musí být vliv znám, aby bylo možné jej kompenzovat. Z konstrukčního hlediska je snaha o jednoduché konstrukce senzorů s možností snadné údržby. Neposledním požadavkem je cenová dostupnost. [2] [3]

Vlastnosti senzorů

Senzory mají řadu specifických vlastností. Následující vlastnosti jsou obecně platné pro většinu senzorů a lze je na základě nich porovnat. **Třída přesnosti** udává o kolik procent může být zobrazovaná hodnota odlišná od skutečné. **Rozlišovací schopnost** udává spolehlivě rozlišitelný přírůstek. **Linearita** udává největší odchylku skutečné charakteristiky od vztažené ideální přímky a uvádí se v procentech. **Životnost** udává dobu, po kterou jsou parametry a vlastnosti senzoru uváděných tolerancích. [3]

Senzory inteligentních úchopných hlavic

Inteligentní úchopné hlavice jsou vybaveny senzory, které slouží pro zajištění správné funkce úchopné hlavice, bezpečnosti a přesnosti manipulace. Senzory sledují průběh činnosti manipulace a podávají o něm informace do řídicího systému. V následující kapitole jsou představeny senzory vhodné k aplikaci na úchopné hlavici sledující veličiny související s činností manipulačního robota. Vybranými sledovanými veličinami jsou

přítomnost manipulovaného objektu, vzdálenost manipulovaného objektu od úchopné hlavice a obraz.

Přítomnost manipulovaného objektu

Pro manipulaci s objektem je často nutné ověřit jeho přítomnost. Senzory vhodné pro tuto úlohu se liší dle vzdálenosti, na kterou má být dílec detekován, materiálu manipulovaného objektu a podmínek prostředí, které vyžadují. Vliv mají i další faktory. Pro detekci obalů a produktů v manipulačních úlohách jsou nejčastěji využívány **optoelektronické nebo ultrazvukové senzory.**

Optoelektronické senzory jsou založeny na šíření elektromagnetických vln (světelných paprsků). Zdrojem světelného paprsku může být například laser nebo LED dioda. Existuje celá řada provedení (reflexní, difúzní atp.). **Laserové senzory reflexní** ke své funkci potřebují odrazku. Princip funkce je postaven na detekci objektu přerušením vysílaného paprsku světla. **Laserové senzory difuzní** ke své funkci nepotřebují odrazky. Fungují na principu detekce vyslaného paprsku světla odraženého od detekovaného předmětu. Podmínkou použití optoelektronických senzorů je provoz v čistém prostředí.

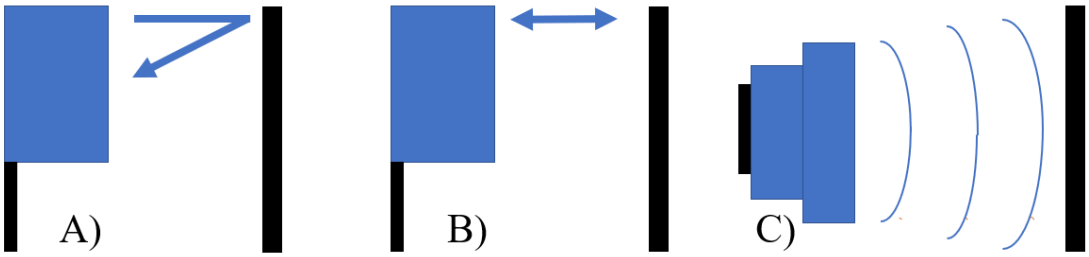
Ultrazvukové senzory detekují pevné předměty na velkou vzdálenost (až 10 m). Fyzikálním principem měření je detekce odrazu vysílaných ultrazvukových vln. Jejich nevýhodou bývá omezená přibližovací rychlost v axiálním směru.

Další variantami senzorů jsou **indukční a kapacitní senzory**, které jsou ale omezeny velmi malou detekční zónou. Pro detekci přítomnosti kovových dílců do vzdálenosti několika cm lze využít **indukční senzory**. Ty fungují na principu změny indukčnosti cívky při změně magnetické vodivosti jejího obvodu. Dále lze využít **kapacitní senzory**, které fungují na principu změny kapacity oscilačního obvodu a tím i jeho amplitudy po vniknutí předmětu do elektrostatického pole kondenzátoru. Oproti indukčním senzorům detekují i nekovové objekty. [4]

Vzdálenost objektu od úchopné hlavice

Měření vzdálenosti úchopné hlavice od objektu slouží pro přesné uchopení. V praxi jsou pro tuto úlohu běžně využívané **optické a ultrazvukové senzory**. Fyzikálním principem určování vzdálenosti je měření časové odezvy vysílaného signálu. Schéma metod měření vzdáleností je na obr. 3.1. **Na schématu A)** je metoda laserové triangulace, na schématu

B) je metoda měření doby letu přímého paprsku, na schématu **C)** je metoda měření doby letu ultrazvukového signálu.



Obr. 3.1 Metody měření vzdáleností

Optické senzory pro měření vzdálenosti využívají obvykle metodu triangulace nebo metodu měření doby letu přímého světelného paprsku. Principem metody laserové triangulace je přepočet změny úhlu dopadu vysílaného paprsku. Senzor promítá laserový bod na detekovaný objekt. Odražené světlo dopadá na přijímací část senzoru v různém úhlu a na základě změny tohoto úhlu je dopočítávána vzdálenost. Optické senzory měřící dobu letu přímého paprsku vysílají paprsek přímo a vzdálenost je určena na základě doby, která uplyne mezi vysláním paprsku a detekcí jeho odrazu. [5] [6]

Další variantou senzorů běžně využívaných pro měření vzdálenosti jsou **ultrazvukové senzory,** které určují vzdálenost na základě vyhodnocení doby letu zvukového impulzu. Princip měření je obdobný jako u optických senzorů, které fungují na principu měření doby světelného paprsku. Ultrazvukový senzor vysílá signál, zvukový impulz, který se odráží od detekovaného objektu. Na základě doby, která uplyne mezi vysláním zvukového impulzu a detekcí jeho odrazu senzorem, je určena vzdálenost. [6]

Sledování obrazu

Pro některé aplikace je výhodné přenášet komplexní kamerový obraz. Typicky se jedná například o kontrolu vizuálních vlastností manipulovaného objektu. Pro tyto úlohy jsou využívané kamerové systémy.

Kamery jsou nedílnou součástí montážních a výrobních úkolů, kde mohou sloužit pro měření dílce, rozpoznávání rozdílů mezi dílci či pro navigací robota. Kamerové systémy využívají průmyslové zpracování obrazu. **Jsou rozlišovány kamery plošné (2D Machine Vision) a prostorové (3D Machine Vision).**

2D Machine Vision je vhodný pro aplikace, kde lze rozlišovat objekty a vlastnosti podle rozdílných barev nebo kontrastů. Analyzovaná scéna je snímaná plošnou kamerou. Kvalita snímání výrazně závisí na osvětlení. Příkladem je například měření povrchových struktur.

3D Machine Vision je vhodný pro aplikace, kdy je užitečné získat informace o prostorových parametrech objektu (objem, výška, pozice a skutečný tvaru objektu). Pomocí 3D Machine vision je obraz skenován ve 3D. Technologie je vhodná například pro odlišení objektů, které mají stejnou barvu nebo stejný vzor. [6]

3.1 Podtlakové úchopné hlavice

Podtlakové úchopné hlavice jsou řešením vysoce flexibilním, a proto velmi často využívaným pro manipulační roboty ve výrobě. Obvykle je úchopná hlavice vybavená gumovými nebo polyuretanovými savkami, které slouží pro manipulaci objektu. Dále existují i podtlakové plošné uchopovací systémy, jejichž největší výhodou je velká přídržná síla a možnost manipulace i s vysoce porézními materiály.

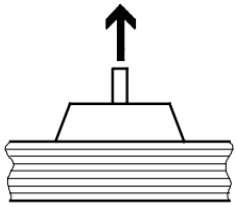
Tato bakalářská práce se věnuje konstrukci podtlakové úchopné hlavice. Z toho důvodu je v této bakalářské práci podtlakovým hlavicím věnována větší pozornost než hlavicím mechanickým a magnetickým.

Princip vzniku přídržné síly

Jedním z důležitých faktorů pro bezpečné uchopení je vytvoření dostatečného rozdílu tlaku mezi vnitřní komorou savky a vnějším atmosférickým tlakem. Tento podtlak je vytvářen nejčastěji aktivním odsáváním vzduchu z komor savek pomocí ejektorů nebo elektricky poháněných vývěv. Druhým zásadním faktorem je tvar a velikost savek (případně pryžové plochy). Plocha savky přímo ovlivňuje velikost přídržné síly. Tvar a materiál savky oproti tomu ovlivňuje správné dosednutí savky na objekt a s tím související zacpání komor savek a vznik rozdílu tlaků mezi vnitřní komorou savky a vnějším okolím. Existuje celá řada velikostí a tvarů savek. Při volbě savky je doporučeno vycházet z katalogu výrobce (zde uvedené výpočty vycházejí z katalogu *Basic principles of vacuum technology* od společnosti Festo [7]).

Velikost požadované přídržné síly je závislá na orientaci a směru pohybu savky. Jsou rozlišovány tři případy, podle kterých je vypočítána požadovaná přídržná síla.

V prvním případě je savka v horizontální pozici a pohyb je ve vertikálním směru (viz obr. 3.2).

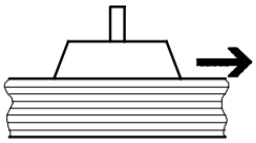


Obr. 3.2 Orientace savky pro první případ [7]

Požadovaná přídržná síla pro první případ je dána vztahem:

$$F = m \cdot (\mathrm{g} + \mathrm{a}) \cdot \mathrm{k} \quad [\mathrm{N}] \tag{3.1-1}$$

V druhém případě je savka v horizontální pozici a pohyb je v horizontálním směru (viz obr. 3.3).

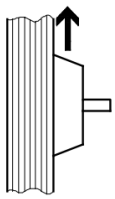


Obr. 3.3 Orientace savky pro druhý případ [7]

Požadovaná přídržná síla pro druhý případ je dána vztahem:

$$F = m \cdot (\mathrm{g} + \frac{\mathrm{a}}{\mu}) \cdot \mathrm{k} \quad [N] \tag{3.1-2}$$

V třetím případě je savka ve vertikální pozici a pohyb je realizován ve vertikálním směru (viz obr. 3.4).



Obr. 3.4 Orientace savky pro třetí případ [7]

Požadovaná přídržná síla pro třetí případ je dána vztahem:

$$F = \frac{\mathrm{m}}{\mu} \cdot (\mathrm{g} + \mathrm{a}) \cdot \mathrm{k} \quad [N] \tag{3.1-3}$$

Z hlediska požadované přídržné síly je pro manipulaci nejvýhodnější případ první, více náročný je případ druhý a nejnáročnější je případ třetí.

Pro určení konkrétní velikosti savky je důležité určit velikost teoretické odtrhovací síly:

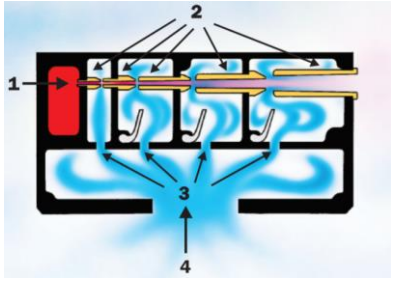
$$F_A = \frac{F}{n} \quad [N] \qquad (3.1\text{-}4)$$

Na základě vypočtené teoretické odtrhovací síly a zvoleného typu savky je z katalogu výrobce možné zvolit velikost savky.

Tvorba podtlaku

Pro generování vakua jsou v robotice nejběžněji využívány **vakuové generátory – ejektory** napojené na rozvod tlakového vzduchu. V aplikacích, kdy není možné využít tlakového vzduchu nebo jsou vyžadovány velké sací kapacity, je pro tvorbu vakua využito elektrických vakuových generátorů (vývěv).

Vakuového generátory vytváří podtlak průchodem tlakového vzduchu ejektorem. Na vstup do vakuového ejektoru je přiveden tlakový vzduch. Ten je veden do trysky s difuzorem. Zužující se průřez trysky způsobuje, že je tok vzduchu urychlován a strhává s sebou další vrstvy vzduchu, a to i z komor savek, které jsou na ejektor napojeny. V případě, že je savka zacpána, tedy není možné odvádět žádný další vzduch; v komorách je vytvořen hluboký podtlak. Podle počtu využívaných trysek a difuzorů jsou rozlišovány ejektory jednostupňové a vícestupňové. Jednostupňový ejektor obsahuje trysku a jediný difuzor. Ve vícestupňovém ejektoru je difuzorů několik. Vzduch vystupující z difuzorů je vypouštěn do okolní atmosféry přímo, případně po průchodu tlumičem hluku. Schéma principu funkce vícestupňového vakuového ejektoru od společnosti Piab je na obr. 3.5. Stlačený vzduch je přiváděn na vstup (1), proudí několika za sebou řazenými tryskami (2) s různými charakteristikami a strhává s sebou okolní vzduch v jednotlivých komorách, které jsou vybaveny uzavíracími klapkami (3). Tyto klapky se účinkem rostoucího podtlaku na vakuovém výstupu (4) postupně uzavírají, takže při dosažení maximální úrovně vakua je v činnosti pouze první tryska. [8]



Obr. 3.5 Princip vakuových pump PIAB.

Kontrola dosaženého podtlaku

Vakuové generátory mohou vytvářet různě kvalitní vakuum. Vzhledem k tomu, že dosažená hodnota podtlaku závisí na více faktorech, je velmi důležité hodnotu podtlaku sledovat. Pro měření je možné využít tlakové senzory, zařízení, které převádí tlak na elektrický signál. Existují různé typy senzorů tlaku, ale jedním z nejčastějších typů je senzor tlaku s tenzometrickým můstkem. Senzor měří fyzikální deformace tenzometrů, které jsou implementovány do membrány senzoru. Tato deformace je převáděna na elektrický signál. Působící tlak vytváří průhyb membrány, která přenáší mechanické napětí na měřicí tenzometry. Mechanické napětí způsobí změnu elektrického odporu tenzometrů úměrnou připojenému tlaku. [11]

Příklady podtlakových úchopných hlavic

Pro lepší přiblížení problematiky podtlakových úchopných hlavic bylo vybráno šest společností zabývajících se jejich výrobou a prodejem: Piab, Robotiq, OnRobot, SMC, COVAL, Schmalz. V následujícím odstavci jsou představena jejich nabízená řešení.

Piab

Vybraným příkladem podtlakové hlavice od společnosti Piab [12] je **piCOBOT** s vakuovými ejektory a integrovanými řídicími prvky (viz obr. 3.6). **piCOBOT** má pevnou konstrukci základního dílce, na který lze připevnit přípojná ramena či přímo savky. Standartně lze na **piCOBOT** připojit dvě ramena. Na připojených ramenech lze modifikovat rozteč a naklopení savek. Nastavitelná rozteč savek je od 97 do 142 mm. Možný úhel naklopení savek je ±15°. **PiCOBOT** je opatřen tlakovými čidly, pro kontrolu podtlaku v savkách a senzorem piSAVE, který umožňuje vytváření podtlaku v každém rameni zvlášť. Na hlavici je umístěn LCD displej, díky kterému se uživatel může přímo dozvědět informace o průběhu manipulace (podtlak na savkách).

Obr. 3.6 piCOBOT od Piab [12]

Hlavice s oběma rameny (bez savek) váží 0,89 kg a umožňuje manipulaci s objekty o hmotnosti až 7 kg. Cena uchopovače je zhruba 90 tisíc korun.

Robotiq

Příkladem nabízených podtlakových úchopných hlavic od společnosti Robotiq [13] jsou **Airpick** a **Epick**. Hlavní rozdíl v těchto modelech je ve způsobu generování vakua. **AirPick** využívá vakuové ejektory, **EPick** (viz obr. 3.7) je poháněn elektricky bez potřeby přívodu tlakového vzduchu. Jedná se o variabilní uchopovače umožňující změnu počtu a rozmístění savek.

Obr. 3.7 EPick od Robotiq [13]

Dosahovaná úroveň vakua je u **EPick** 80 % u **AirPick** 85 %. Na zakázku lze do hlavic integrovat další senzory z nabídky společnosti, jako je například senzor síly a momentu FT 300 Force Torque Sensor nebo kamera Wrist. Hmotnost **EPick** je 0,71 kg a cena je zhruba 92 tisíc korun. Hmotnost **AirPick** je 0,332kg a cena je zhruba 88 tisíc korun.

OnRobot

Vybranými příklady podtlakových úchopných hlavic od společnosti OnRobot [14] jsou elektrické podtlakové uchopovače **VG10** a **VGC10** (viz obr. 3.8).

Obr. 3.8 VG10(vlevo) a VGC10 (vpravo) OnRobot [14]

Oba tyto uchopovače pracují bez přívodu vzduchu. Podtlak je v savkách vytvářen elektricky. **VG10** je duální uchopovač, což znamená, že umožňuje aktivovat pravou a levou stranu uchopovače nezávisle. Další flexibilita úchopu je zajištěna možností změny úhlu vyklopením jednotlivých ramen. Model **VGC10** je oproti modelu **VG10** výrazně kompaktnější a umožňuje manipulaci i ve stísněných prostorech. Model **VGC10** váží 0,814kg a umožňuje manipulovat s výchozími nástavbami s předměty do hmotnosti 6kg. Jeho cena je přibližně 62 tisíc korun. Model **VG10** váží 1,62kg a umožňuje jmenovité zatížení 10kg a maximální zatížení 15kg. Jeho cena je přibližně 104 tisíc korun.

SMC

Příkladem podtlakové hlavice od společnosti SMC [15] je hlavice **ZXP7□01-X1** (viz obr. 3.9) určená pro připojení na kolaborativního robota MOTOMAN-HC10DT. K hlavici je možné připojit 1 až 4 savky. Podtlak v savkách je generován vakuovými ejektory a jeho hodnota je snímána integrovanými senzory podtlaku. Hlavice umožňuje Plug & play konfiguraci.

Obr. 3.9 ZXP7□01-X1 SMC [15]

COVAL

Společnost COVAL [16] nabízí celou řadu podtlakových hlavic. Vybraným příkladem je série velkoplošných uhlíkových chapadel **CVGC** (viz obr. 3.10). Jedná se o chapadla s integrovaným ejektorem, tlumičem a elektronickým spínačem vakua. Díky velké sací pryžové ploše jsou uchopovače schopny vytvořit velkou přídržnou sílu.

Obr. 3.10 Velkoplošené chapadlo CVGC COVAL [16]

Schmalz

Společnost Schmalz [17] nabízí celou řadu podtlakových uchopovačů. Vybranými příklady podtlakových úchopných hlavic jsou hlavice **VEE** a **SLG.**

VEE je plně modulární řešení (viz obr. 3.11). Jedná se o modulární soupravu dílců, ze kterých si zákazník výslednou úchopnou hlavici může seskládat dle svých požadavků. K dispozici **VEE** je i online konfigurátor, ve kterém lze snadno namodelovat optimální rozložení modulů na hlavici. Výhodou tohoto řešení je snadná a rychlá přestavba a oproti variantě s přípojnými rameny i nižší pořizovací cena.

Obr. 3.11 Modulární chapadlo VEE Schmalz [17]

SLG je hlavice vyráběná aditivní technologií (viz obr. 3.12). Na základě požadavků zákazníka je v konfigurátoru vygenerováno optimální řešení podtlakové hlavice, které je následně vytištěno, složeno a odesláno zákazníkovi.

Obr. 3.12 Konfigurovatelná 3D tištěná hlavice Schmalz [17]

Úchopná hlavice je vyráběná v provedení s elektrickým nebo tlakovým generováním vakua. Hlavice je vybaven tlakovým senzorem VSI-V D. Cena i hmotnost konfigurovatelného řešení se odvíjí podle zadaných požadavků. Maximální rozměry hlavice jsou *350x350 mm*^{2} a maximální užité zatížení *10 kg*.

Dílčí shrnutí informací o podtlakových hlavicích

V této kapitole byly představeny základní pojmy související s problematikou podtlakových úchopných hlavic: tvorba vakua, kontrola podtlaku a výpočet přídržné síly. Velikost potřebné přídržné síly je závislá na směru pohybu úchopné hlavice a umístění savky. Nejvýhodnější manipulační úlohou z hlediska velikosti přídržné síly je umístění savky v horizontální pozici a pohyb ve vertikálním směru. Pro kontrolu podtlaku je na hlavici běžně integrováno tlakové čidlo v kombinaci s tlakovým spínačem.

Správná funkce podtlakových hlavic závisí na dosažení podtlaku v savkách, což je závislé i na jejich přesném dosednutí na objekt. Z toho důvodu není obvyklé univerzální řešení distribuované ve velkých sériích. Zásadní jsou řešení přizpůsobené pro konkrétní aplikaci zákazníka. Zde lze rozlišit dva existující způsoby. První variantou je řešení označované

dále jako **částečně univerzální modifikovatelné konstrukční řešení.** Obvykle se jedná o úchopnou hlavici s pevným základním dílcem, na který lze připojovat přípojná ramena, moduly či přímo savky. Druhou variantou je **plně variabilní model pro zakázkovou výrobu**, např. technologií 3D tisku.

Částečně univerzální modifikovatelné konstrukční řešení s pevným základním dílcem je nejrozšířenější variantou. Toto řešení umožňuje měnit počet, rozmístění a velikost savek v rozmezí prostoru základního dílce a přípojných ramen či modulů. V základním dílci je běžně integrován generátor vakua a tlakové spínače. Příkladem úchopných hlavic s možnosti napojení přípojných ramen jsou **EPick** od společnosti Robotiq (viz obr. 3.7) či **piCOBOT** od společnosti Piab (viz obr 3.6). Výhodou tohoto řešení je jednoduchá a rychlá implementace do výroby a možnost částečně měnit rozložení savek i po sestavení hlavice. Nevýhodou tohoto řešení je vyšší pořizovací cena a vyšší hmotnostní a rozměrové parametry. Další variantou této kategorie je modulární stavebnicová konstrukce z univerzálních dílců. Od varianty s přípojnými rameny se odlišuje zvýšenou mírou modifikovatelnosti. Příkladem je **VEE** od společnosti Schmalz (viz obr. 3.11). Toto řešení je prodáváno jako set modulů a savek.

Plně zákaznické řešení vyrobené technologií 3D tisku umožňuje konfiguraci přímo dle konkrétních požadavků zákazníka. Výhodou tohoto řešení je krom jedinečného prostorového rozmístění savek také menší zástavbový prostor a nižší hmotnost. Díky stále větší dostupnosti 3D tisku je toto řešení i časově a finančně efektivní a oproti částečně univerzálnímu řešení levnější. Příkladem jsou úchopné hlavice **SLG** od společnosti Schmalz (viz. obr. 3.12). Tyto hlavice jsou nakonfigurovány dle konkrétních požadavků zákazníka. V rámci poptávky jsou zadány požadované parametry, jako je například váha a rozměry manipulovaného objektu a na jejich základě je vygenerováno jedinečné těleso.

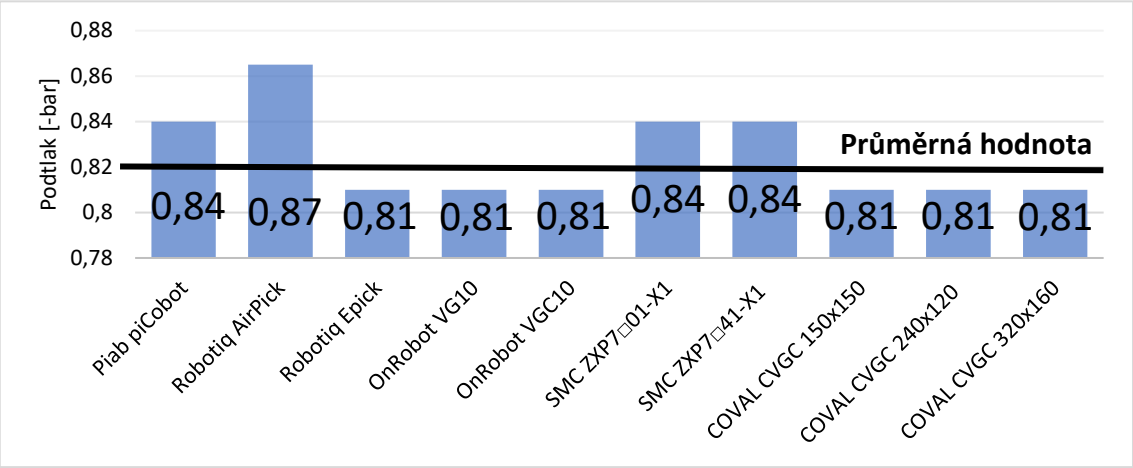
Porovnání vybraných příkladů podtlakových úchopných hlavic.

Byly představeny konkrétní podtlakové úchopné hlavice od šesti vybraných společností: Piab, OnRobot, Robotiq, SMC, Schmalz a COVAL.

Porovnání hodnot maximálního vakua

Jedním z charakteristických parametrů podtlakové úchopné hlavice je hodnota maximálního dosaženého vakua savkách. V grafu 3.1 jsou vyobrazeny maximální

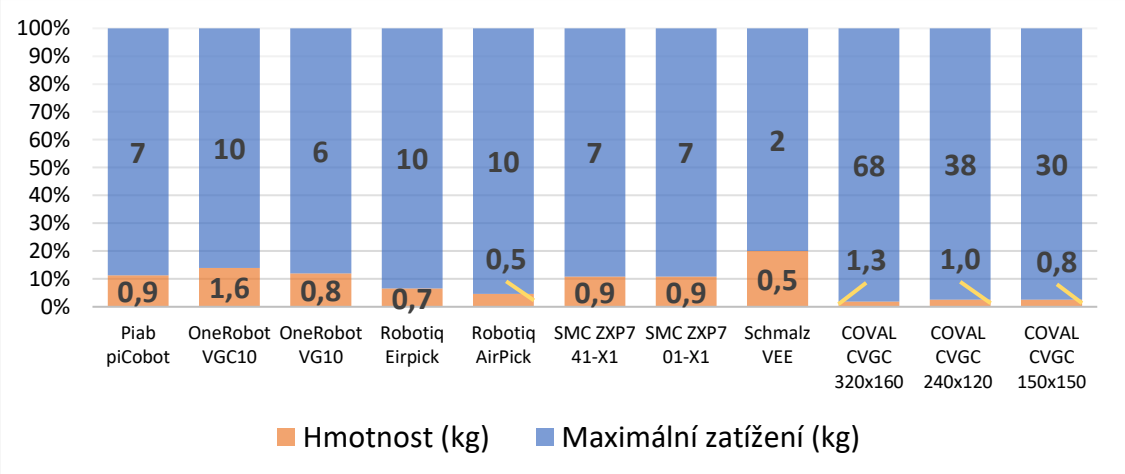
hodnoty podtlaku v savkách vybraných průmyslových řešení podtlakových úchopných hlavic. **Průměrná hodnota podtlaku je -0,82 bar.**



Graf 3.1 Hodnota maximálního vakua [-bar] vybraných podtlakových hlavic

Porovnání únosností

Druhým charakteristický parametrem úchopných hlavic je maximální zatížení. Hodnota maximálního zatížení je však velmi často rozdílná dle velikosti a hmotnosti úchopné hlavice. V grafu 3.2 je graficky porovnána hodnota maximálního zatížení vybraných podtlakových hlavic vztažená na hmotnost hlavice. Z grafu vyplývá, že nejlepší poměr maximálního zatížení ku hmotnosti mají velkoplošná chapadla od společnosti COVAL. To je dáno velkou přísavnou plochou chapadla. Z chapadel využívajících savek má nejlepší poměr hodnot hlavice **AirPick** od společnosti Robotiq a modulární hlavice **VEE** od společnost Schmalz.



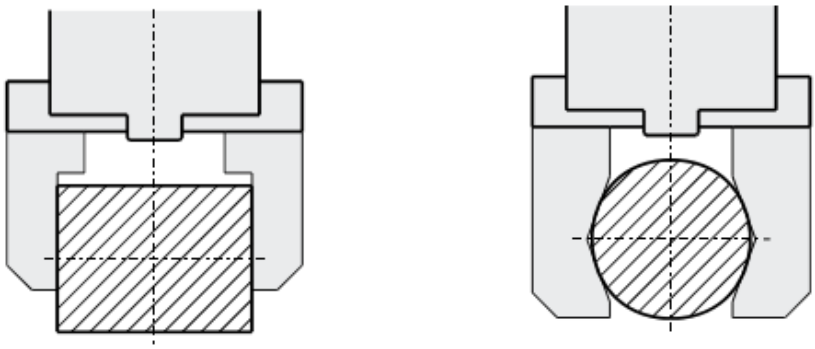
Graf 3.2 Porovnání vybraných podtlakových chapadel z hlediska poměru hmotnosti a maximálního zatížení

3.2 Mechanické úchopné hlavice

Mechanické úchopné hlavice jsou robustní efektory vhodné i do nejnáročnějších podmínek. Z pohledu konstrukce existuje mnoho variant úchopných prvků. V průmyslových odvětvích se pro manipulaci běžně využívají konstrukční řešení s pohyblivými čelistmi a s dvěma, třemi či více prsty. Pohyblivé čelisti mohou být otočné nebo posuvné. Tvar úchopných prvků, tj. prstů a čelistí, je volen tak, aby byl co nejjednodušší a zároveň aby co nejlépe kopíroval tvar objektu manipulace, jelikož bez správného kontaktu mezi objektem manipulace a úchopnými prvky nelze zaručit bezpečnou manipulaci. Prsty chapadla bývají opatřeny vložkou, která zajišťuje lepší tření a přesnější uchopení objektu.

Princip vzniku přídržné síly

V manipulačních aplikacích jsou rozlišovány dva základní druhy uchopení: **silové a tvarové** (viz obr. 3.13), případně **tvarově-silové** jakožto jejich kombinace. Principem silového úchopu je silové působení chapadla na součástí. Potřebná síla je z velké části závislá na součiniteli tření mezi tvarovým prvkem a manipulovanou součásti. V případě tvarového uchopení je úchop závislý na obepnutí manipulovaného objektu a tím znemožnění jeho vyklouznutí. Tvarový úchop vyžaduje nižší uchopovací síly, ne vždy je však jeho využití možné.



Obr. 3.13 Silové uchopení vlevo a tvarové uchopení vpravo [18]

Výpočet síly mechanických prvků lze podle [19] spočítat z následujících rovnic**:**

Přídržná síla silového uchopení chapadla s dvěma čelistmi:

$$F = \frac{m \cdot g}{n_č \cdot \mu} \cdot \left(1 + \frac{a}{g}\right) \cdot \sin\frac{\alpha}{2} \cdot k \quad [N] \qquad (3.2\text{-}1)$$

Přídržná síla tvarového uchopení chapadla s dvěma čelistmi v poloze čelistí horizontálně:

$$F = m \cdot (g + a) \cdot k \tag{3.2-2}$$

Přídržná síla tvarového uchopení chapadla s dvěma čelistmi v poloze čelistí vertikálně:

$$F = m \cdot (g + a) \cdot \frac{tan\frac{\alpha}{2}}{2} k \tag{3.2-3}$$

Příklady mechanických úchopných hlavic

Vzhledem k charakteru úchopu bývají hlavice opatřeny integrovanými senzory síly a točivého momentu. Příkladem mechanických úchopných hlavic s integrovanými senzory jsou hlavice **RG2-FT** od společnosti OnRobot a **WSG 25** od společnosti Schunk.

OnRobot

Vybraný příklad od společnosti OnRobot [14] je hlavice **RG2-FT** (viz obr. 3.14) se dvěma prsty. Na konci obou prstů je integrován šestiosý senzor síly a točivého momentu. Díky těmto senzorům je chapadlo schopné manipulovat i s nepřesně uloženými dílci.

Obr. 3.14 RG2-FT od OnRobot [14]

Schunk

Vybraným příkladem od společnosti Schunk [20] je mechanická úchopná hlavice **EGP** (viz obr. 3.15). Hlavice je navržená pro kolaborativní provoz například pro uchopování a přemisťování malých a středně velkých dílců. Chapadlo umožňuje ruční řízení úchopné síly. V hlavici jsou integrovány indukční senzory, díky kterým je monitorována poloha chapadla.

Obr. 3.15 EGP od Schunk [20]

Weiss Robotics

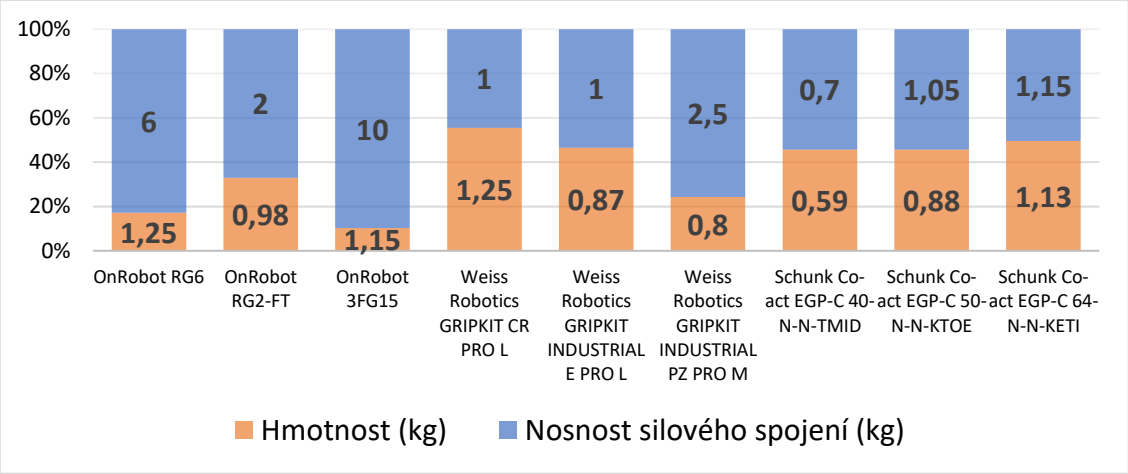
Vybraným příkladem mechanické úchopné hlavice od firmy Weiss Robotics [13] je inteligentní dvouprstý efektor **GRIPKIT** (viz obr. 3.16) určený pro kolaborativní aplikace. Chapadlo je vybaveno integrovaným sledováním uchopovací síly. Hmotnost varianty **CR Easy velikosti L** je 0,8 kg a nosnost 4,3kg. Uchopovací síla této varianty je 75 až 200 N.

Obr. 3.16 GRIPKIT Dvouprsté chapadlo [13]

Dílčí shrnutí

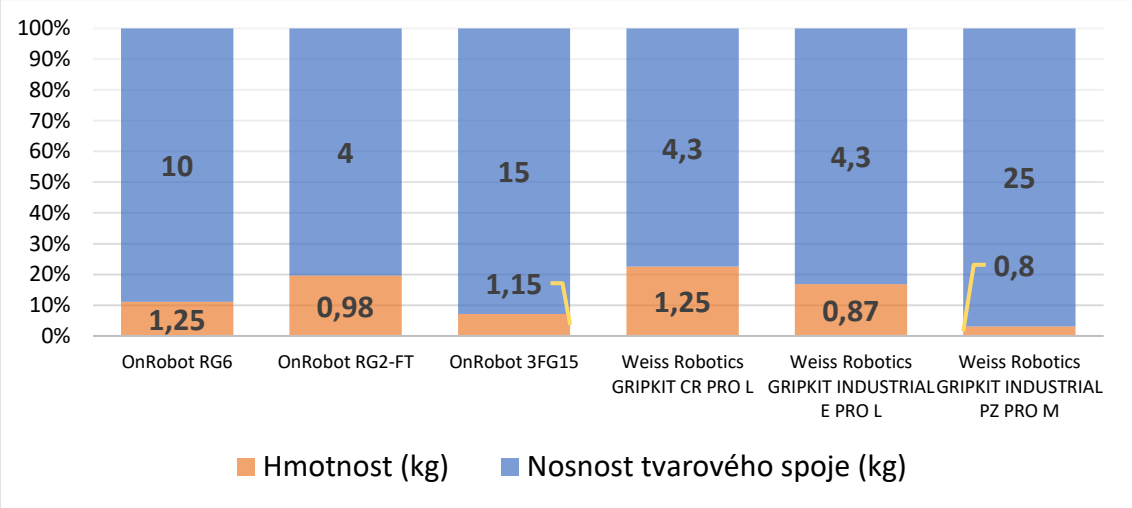
Byly představeny základní vlastnosti mechanických úchopných hlavic a princip vzniku přídržné síly. Přídržná síla je rozdílná podle typu úchopu, který může být silový, nebo tvarový. Tvarový úchop je z hlediska robustnosti uchopení výhodnější, ne vždy je však jeho využití možné.

Dále byly představeny tři společnosti zabývající se výrobou mechanických úchopných hlavic: OnRobot, Weiss Robotics a Schunk a jejich vybraná řešení. V grafu 3.3 jsou porovnány úchopné hlavice společností OnRobot, Weiss Robotics a Schunk z hlediska poměru únosnosti silového spoje a hmotnosti úchopné hlavice. Z grafu vyplývá, že nejlepší poměr hmotnosti ku nosnosti silového spojení má hlavice **3FG15** od společnosti OnRobot.



Graf 3.3 Porovnání hmotnosti ku nosnosti silového sevření vybraných mechanických úchopných hlavic

V grafu 3.4 jsou porovnány úchopné hlavice z hlediska poměru únosnosti tvarového sevření a hmotnosti úchopné hlavice. Pro porovnání byly vybrány hlavice od společností Weiss Robotics a OnRobot. Z grafu vyplývá, že nejlepší poměr hmotnosti ku nosnosti tvarového spoje má hlavice **GRIPKIT INDUSTRIAL PZ PRO M** od společnosti Weiss Robotics.



Graf 3.4 Porovnání hmotnosti ku nosnosti tvarového sevření vybraných mechanických úchopných hlavic

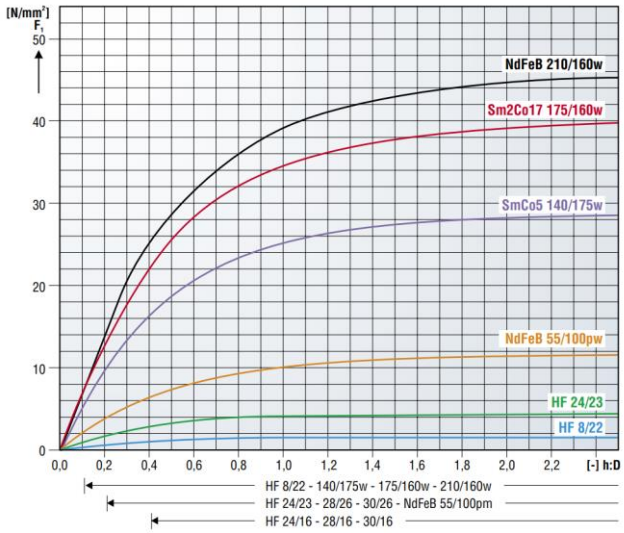
3.3 Magnetické úchopné hlavice

Magnetické hlavice využívají k úchopu magnetického pole. To může být vytvářeno **permanentní (trvalými) magnety** nebo **elektromagnety**. Limitujícím faktorem magnetických chapadel je omezení použití pouze na zmagnetizovatelné materiály.

Hlavice s permanentním magnetem ke svému fungování nepotřebují další externí zdroj, proto bývají označovány jako pasivní. Fungují na principu trvalého magnetického pole. Pro uvolnění manipulovaného objektu je nutný vnější zdroj mechanické energie. Princip oddělení je nejčastěji buď najetím na vnější dorazy nebo pomocí pneumaticky poháněné planžety.

Princip vzniku přídržné síly permanentního magnetu

Přídržná síla trvalých magnetů je určována empiricky. Její velikost závisí na použitém materiálu, objemu magnetu, způsobu promagnetování, velikosti vzduchové mezery, tj. vzdálenosti od povrchu magnetu, teplotě a další vlivech. Jednou z možností určení síly je využití diagramu, jako je například diagram od společnosti Feromagnet (viz obr. 3.17), který porovnává závislost měrné upínací síly F_1 [N] na poměru výšky magnetu h [mm] a průměru D [mm] vybraných materiálů permanentních magnetů. Jedná se o střední hodnoty při nulové vzduchové mezeře (tj. magnet se přímo dotýká železa) při svislém odtahu. Ve spodní části diagramu je omezení minimální hodnoty poměru h:D podle použitých materiálů. [21] [22]



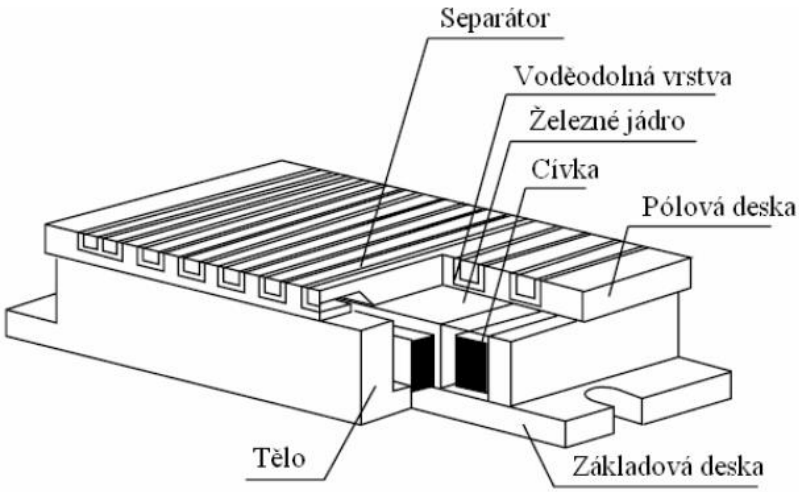
Obr. 3.17 Diagram pro empirické určování měrné upínací síly [22]

Odečtenou hodnotu měrné upínací síly lze následně využít pro výpočet velikost celkové přídržné síly magnetu ze vztahu:

$$F = F_1 \cdot S \qquad (3.3\text{-}1)$$

Kde S je velikost celkové přídržné plochy [mm^2] a F_1 [N] je odečtená měrná upínací síla

Hlavice s elektromagnetem ke svému fungování potřebují zdroj externího stejnosměrného napájení a řídicí jednotku, proto bývají označovány jako aktivní. Elektromagnet, který je umístěn n úchopné hlavici, je cívka s jádrem z magneticky měkké oceli, která slouží k vytváření dočasného magnetického pole (viz obr. 3.18). [23]



Obr. 3.18 Elektromagnetický upínač [24]

Princip vzniku přídržné síly elektromagnetu

Přídržná síla vzniká tokem elektrického proudu manipulovaným objektem. Ovládáním toku proudu lze řídit vznik i zánik přídržné síly. Pro uvolnění úchopu není nutný žádný externí zdroj. Přídržná síla aktivních magnetických efektorů je ovlivněna mnoha faktory, zejména pak vzdáleností magnetu od podložky. Mezi další faktory pak patří magnetická vodivost a materiál, ze kterého je magnet a podložka vyrobena, tloušťka materiálu, teplota a demagnetizační faktor magnetu, tj. míra odolnosti magnetu proti odmagnetování. [25] [26]

Zjednodušený předpoklad výpočtu přídržné síly elektromagnetu zanedbává magnetický odpor železa uchopovače a manipulovaného dílce. V idealizovaném výpočtu je uvažován pouze odpor vzduchové mezery.

Přídržnou sílu elektromagnetu lze dle [24] vypočítat z rovnice:

$$F = \frac{1}{2 \cdot \mu_0} \cdot B^2 \cdot S \quad [N] \qquad (3.3\text{-}2)$$

Pro reálný upínač musí být magnetický odpor železa uvažován.

Příklad magnetické úchopné hlavic

Magnetické úchopné hlavice jsou určeny pro manipulaci se zmagnetizovatelnými materiály. Konkrétním příkladem inteligentních magnetických hlavic je řada hlavic **EMH** od společnosti Schunk [20].

Schunk

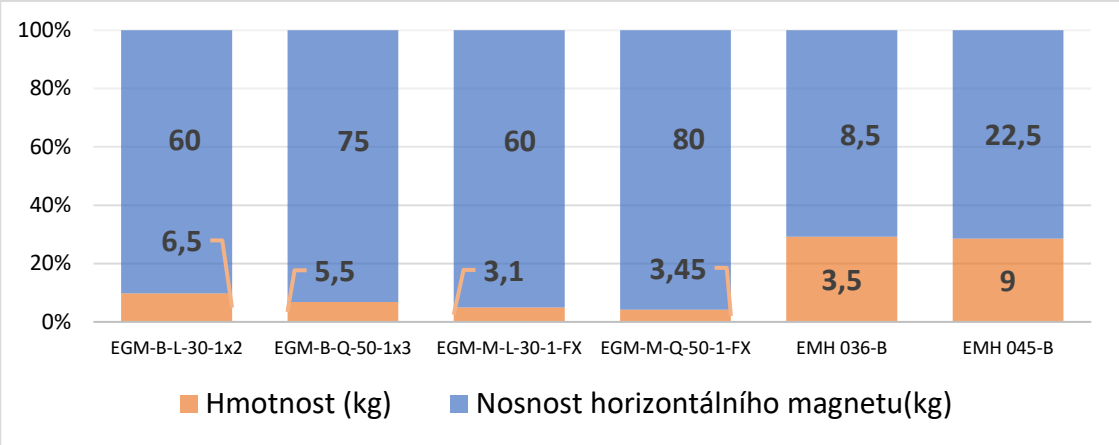
EMH jsou elektro-permanentní magnetická chapadla pro manipulaci s feromagnetickými dílci (viz obr. 3.19). Hlavice má integrovaný systém sledování dílce a dále dokáže informovat řídicí systém i o jeho případné ztrátě. V hlavici je dále integrována ochrana proti přehřátí.

Obr. 3.19 EMH, Schunk

Dílčí shrnutí

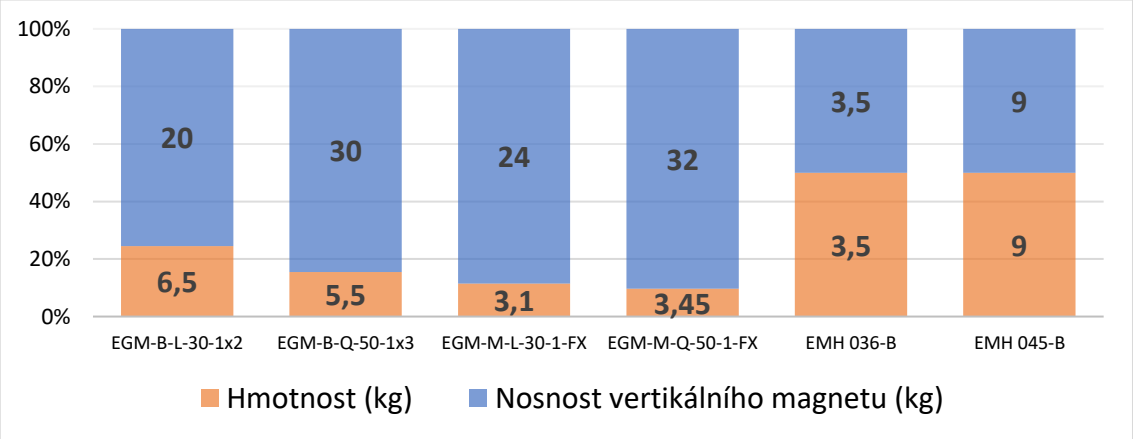
Byly představeny základní vlastnosti magnetických úchopných hlavic a princip vzniku přídržné síly. Magnetické úchopné hlavice se rozlišují na pasivní či aktivní podle toho, zda jsou zkonstruovány z permanentního magnetu či elektromagnetu. Přídržná síla úchopné hlavice z permanentního magnetu je určována empiricky. Její určení bylo ukázáno na diagramu z katalogu společnosti Feromagnet [22]. Přídržná síla elektromagnetu vzniká tokem elektrického proudu manipulovaným objektem. Její výpočet byl uveden. Velikost přídržné síly se liší dle polohy magnetu (horizontální, vertikální)

Pro porovnání poměru nosnosti ku hmotnosti bylo vybráno několik úchopných magnetických hlavic ze sériové řady **EMH** a **EGM** od společnosti Schunk. V grafu 3.5 je vyobrazen poměr nosnosti horizontálního magnetu ku hmotnosti.



Graf 3.5 Porovnání hmotnosti ku nosnosti horizontálního magnetu vybraných magnetických úchopných hlavic

V grafu 3.6 je ukázán poměr nosnosti vertikálního magnetu ku hmotnosti.



Graf 3.6 Porovnání hmotnosti ku nosnosti vertikálního magnetu vybraných magnetických úchopných hlavic

Z grafů vyplývá, že nejlepší poměr nosnosti magnetu ku hmotnosti hlavice z vybraných úchopných hlavic od společnosti Schunk mají hlavice série **EGM-M,** a to pro magnet umístěný horizontálně i vertikálně

3.4 Dílčí závěr

Inteligentní úchopné hlavice byly definovány jako koncové efektory s aktivní senzorikou, díky které se dokážou přizpůsobit fyzikálním vlastnostem a změnám prostředí. Jedním ze způsobů rozdělení senzorů je dle veličiny, kterou mají sledovat. V kapitole byly představeny tři úlohy využívající senzorického vybavení: **určení polohy manipulovaného dílce, vzdálenost manipulovaného dílce od úchopné hlavice a kamerový přenos obrazu**. Pro každou z těchto úloh byly představeny vhodné senzory a jejich omezení z hlediska využití.

Dále byly představeny inteligentní úchopné hlavice rozdělené dle fyzikálního principu vzniku přídržné síly: **podtlakové, mechanické, magnetické.** U každé z uvedených kategorií byl blíže představen fyzikální princip úchopu, výpočet přídržné síly a příklady úchopných hlavic od vybraných společností. Dále bylo pro každou kategorii uvedeno dílčí shrnutí, ve kterém byly uvedeny základní poznatky a navzájem porovnány vybrané příklady hlavic z hlediska jejich nosnosti ku hmotnost (tj. měrná únosnost).

Kategorie podtlakových úchopných hlavic byla vzhledem k zaměření práce popsána detailněji. U podtlakových hlavic je kvalita úchopu velmi závislá na správném dosednutí savky na manipulovaný objekt. Jednou z cest, jak zajistit správné dosednutí savky na objekt je univerzální modifikovatelná konstrukce. Tím je myšlena konstrukce hlavice, která umožňuje měnit počet a rozmístění savek, případně úhel naklopení jednotlivých ramen či další parametry. Jedná se o obvyklé konstrukční řešení. Další cestou je navržení plně zákaznického řešení dle požadavků konkrétní aplikace.

Uvedený přehled stavu techniky ukazuje, že na trhu je po vakuových uchopovacích hlavicích poptávka. Nabídka na trhu obsahuje řešení univerzální i přizpůsobitelná specifickým požadavkům zákazníka. Cílem je vždy minimalizace hmotnosti a ceny řešení. Tyto dva požadavky, často protichůdné, vytváří potenciál pro uplatnění úchopných hlavic dedikovaných pro konkrétní aplikaci.

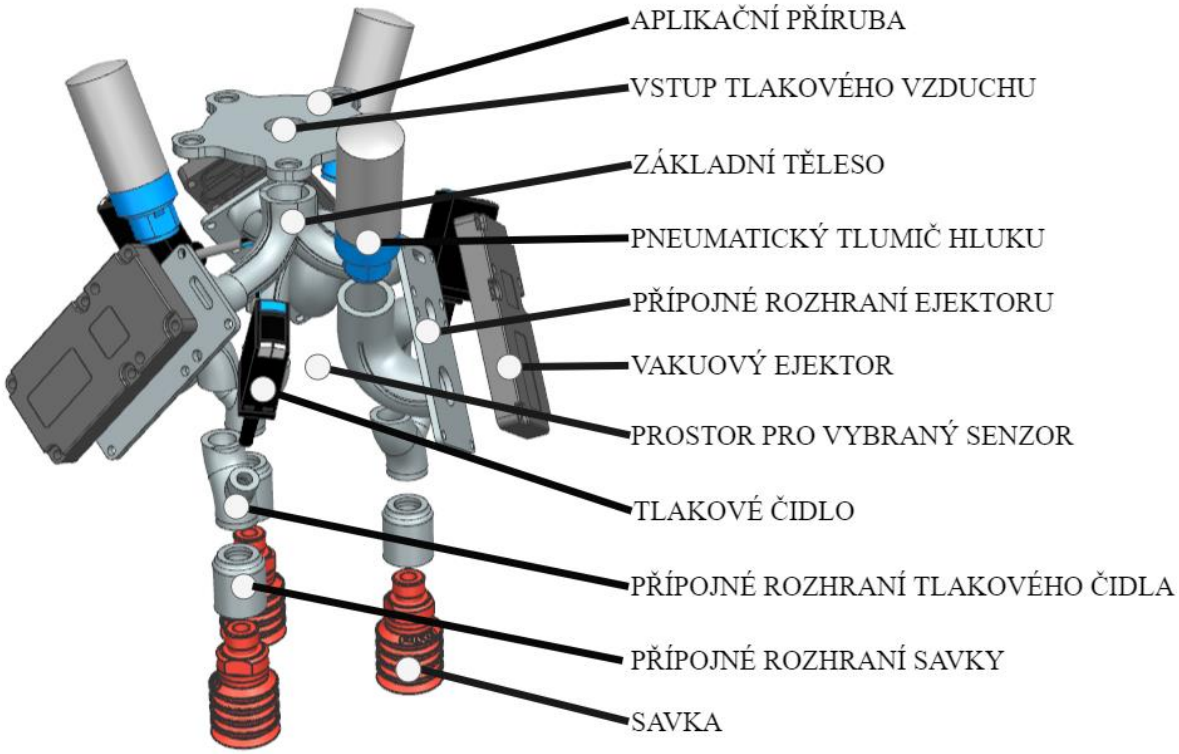
4 Návrh parametrické podtlakové hlavice

Při tvoření návrhu podtlakové úchopné hlavice byl hledán kompromis mezi rychle a finančně efektivně dostupným modelem a modifikovatelným zakázkovým řešením, upravitelným na míru požadavkům konkrétní aplikace. Hlavice je navržena pro aplikaci na robotech s nosností do 10 kg. V této kategorii je řada kolaborativních robotů a menších průmyslových robotů využívaných v automatické montáži. Hlavice prošla vývojem přes různé konstrukční varianty.

V této kapitole je představen finální návrh řešení podtlakové úchopné hlavice. CAD model je vytvořen v programu NX 12 od Siemens. Řešením je parametrický model hlavice. Model je určen k realizaci technologií **Multi Jet Fusion [28]** (práškovým 3D tiskem) z materiálu HP High Reusability PA12 tisknutý metodou ASTM D638.

4.1 Koncepční návrh konstrukce

Úchopná hlavice se skládá z několika CAD modulových částí, na které se po vytištění napojují pneumatické komponenty (viz obr. 4.1).



Obr. 4.1 Popis modulární stavby úchopné hlavice

Základem modulárního řešení je parametrický model **Základní těleso**. Jedná se o hlavní část hlavice, která je navržena parametricky. Na základě změny parametrů je dán počet větví tělesa a s tím související počet přípojných rozhraní pro připojení vakuových ejektorů. Všechny varianty **Základního tělesa** jsou vybaveny integrovaným přípojným rozhraním pro připojení vakuových ejektorů **CHIP L14A6-ZN** od společnosti Piab. [12]

K **Základnímu tělesu** jsou dále vytvořeny další **3D CAD moduly**. Jedná se zejména o aplikační příruby a přípojná rozhraní k senzorice. K úchopné hlavici jsou po vytištění připojovány vybrané **pneumatické prvky** a **senzory.** Úchopná hlavice může být vybavena různými typy senzorů pro různé pracovní úkoly. Koncept předpokládá využití tlakových čidel pro sledování podtlaku v každé savce a dále využití vybraného senzoru pro jednu z následujících úloh: určení přítomnosti dílce, určení vzdálenosti úchopné hlavice od dílce, kamerový přenos obrazu. Pro integraci vybraných senzorů jsou připravená přípojná rozhraní ve formě 3D CAD modelů.

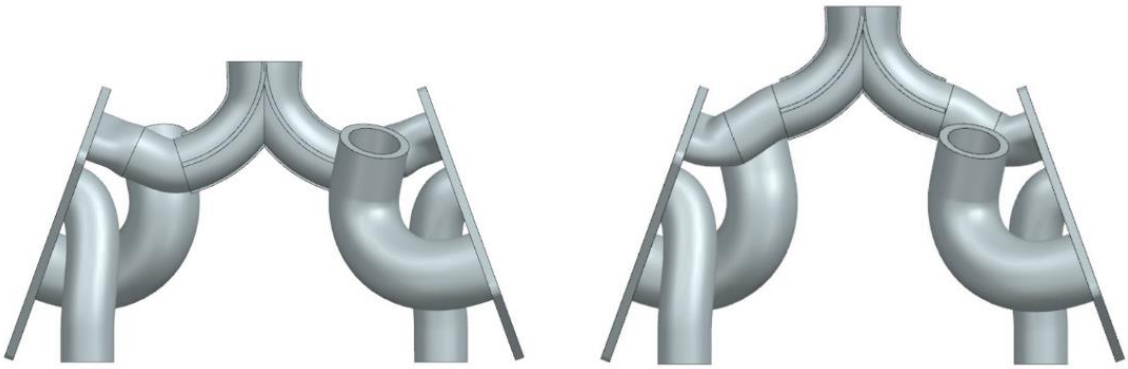
Finální hlavice je složena z vybraných modulů dle konkrétní aplikace a vytištěna. Před připojením kupovaných komponent je nutné **vyříznout závity** pro připojení pneumatických rychlospojek, tlumičů a savek a dále **obrousit** a **přelakovat přípojná interface** pro napojení vakuových ejektorů.

4.2 Základní těleso

Základní těleso je navrženo jako parametrický CAD model. Těleso má jeden přívod tlakového vzduchu (ke kterému se napojuje dedikovaná příruba) a volitelný počet větví s přípojným rozhraním pro napojení vakuových ejektorů. Od každého přípojného rozhraní je vedeno jedno vedení pro napojení tlumiče hluku a druhé pro napojení přípojného rozhraní tlakového čidla a savky. **Díky změně parametrů může mít těleso 2 až 6 větví** (viz obr. 4.2).

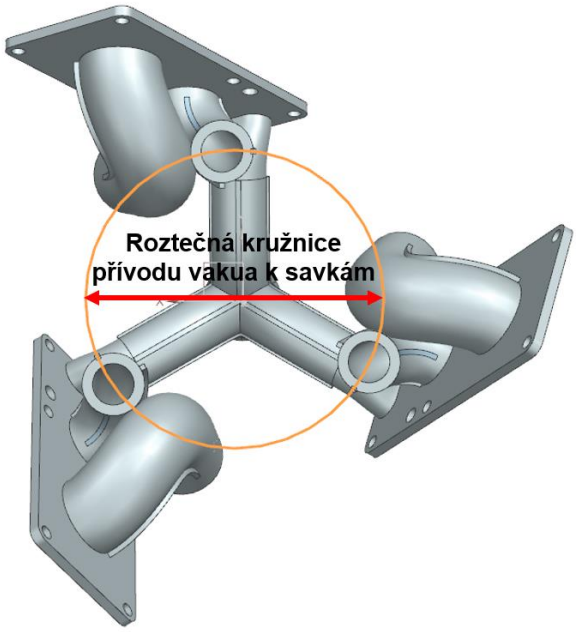
Obr. 4.2 Možnosti konfigurace Základního tělesa

Těleso dále umožňuje měnit výšku průřezu přívodu tlakového vzduchu (viz obr. 4.3).



Obr. 4.3 Modifikace výšky vstupního průřezu přívodu tlakového vzduchu.

A dále umožňuje změnu průměru roztečné kružnice výstupního kanálu vzduchového vedení vedoucího k savkám (viz obr. 4.4).



Obr. 4.4 Roztečná kružnice přívodu vakua k savkám

Parametrizace

Program NX12 umožňuje tvorbu parametrů (expressions). Parametry je možné jednoduše upravovat. V tabulce 4.1 je název, popis a doporučená hodnota nejdůležitějších parametrů využitých v modelu **Základního tělesa**. Změnou parametrů lze měnit počet větví základního tělesa a dále měnit výšku vstupního průřezu tlakového vzduchu a průměr rozteče výstupního kanálu vedoucího k savkám.

Tabulka 4.1 Parametry Základního tělesa

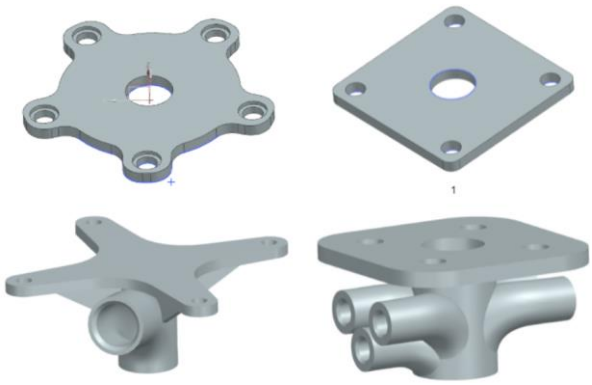
Popis	**Název parametru:**	**Funkční rozsah**
Počet ejektorů (počet větví)	n	2 až 6
Vstupní průřez potrubí	r_1	11,8 mm
Průřez potrubí vedoucí k ejektorům	r_2	$r_2 = \sqrt{\frac{r_1^2}{n}}$
Průměr rozteče výstupního vzduchového kanálu vedoucího k savkám	kruhova_roztec_savek	70 až 90 mm
Výška vstupního průřezu	vyska_vrchniho_dilce	Dvě savky: 0 až 12 mm Tři savky: – 2 až 17 mm Čtyři savky: – 5 až 16 mm Pět savek: – 5 až 12 mm Šest savek: – 6 až 11 mm

4.3 Přípojné moduly

Přípojné moduly jsou určeny k připojení na **Základní těleso.** Přípojné moduly jsou důležité, protože díky jejich využití je možné CAD model úchopné hlavice dokončit dle konkrétních požadavků. Jedná se o moduly aplikačních přírub a o přípojná rozhraní senzorů a savek.

Aplikační příruby

Příruba slouží pro napojení úchopné hlavice na robota. Její tvar se liší podle koncového efektoru robota a také podle toho, zda je možné přívod tlakového vzduchu možné vést robotem či je nutné zajistit vnější vedení (viz obr. 4.5). Horní modely jsou univerzální a jsou určené pro vedení tlakového vzduchu robotem. Spodní modely jsou určené pro realizované varianty úchopných hlavic (viz Kapitola 7) pro projekt **„Denso“** (vlevo) a pro projekt **„Delta“** (vpravo). Oba spodní modely jsou určené pro vnější přivedení tlakového vzduchu.



Obr. 4.5 Moduly aplikačních přírub.

Přípojná rozhraní savek

Přípojné rozhraní pro savky slouží pro připojení savek na úchopnou hlavici. Připojení je realizováno pomocí závitu G ⅛, do kterého jsou savky našroubovány. Byly vytvořeny dva typy přípojných rozhraní: **rozdvojené** určené pro našroubování dvou savek, a **přímé** pro napojení jedné savky. Na obr. 4.6. je přípojné rozhraní pro dvě savky (vlevo) a přímé přípojné rozhraní pro jednu savku vpravo.

Obr. 4.6 Modul připojení savek

Přípojná rozhraní senzorů

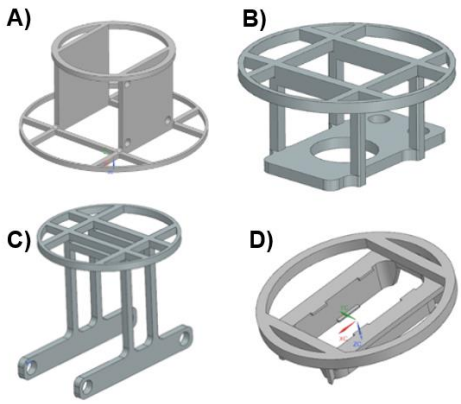
Na podtlakové úchopné hlavici je možné využívat různou úroveň senzoriky. Konkrétní výběr senzorů je popsán v Kapitole 4.2. V zásadě se jedná o tlaková čidla a dále senzory pro určení přítomnosti dílce, měření vzdálenosti úchopné hlavice od dílce a pro kamerový přenos obrazu. K vybraným senzorům byla vytvořena přípojná rozhraní.

Jedním z přípojných rozhraní je připojení pro tlaková čidla. Tlakové čidlo **SPAE-V1R-S4-PNLK-2.5K** je připojeno pomocí modulárního přípojného rozhraní a pneumatické rychlospojky. Čidlo je umístěno ke komoře vedoucí k savkám.

Dále byla navržena přípojná rozhraní sloužící pro napojení jednoho dalšího vybraného senzoru. Vybraný senzor je určen pro napojení do středu hlavice. Přípojná rozhraní byla navržena pro následující senzory:

- Produktovou řadu optoelektronických senzorů W2S-2 od SICK
- Produktovou řadu laserových triangulačních senzorů OD1 od SICK
- Produktovou řadu Ultrazvukový senzor UC4 od SICK
- Produktovou řadu kapacitních senzorů: CQF od SICK
- Produktovou řadu indukčního senzoru: IM04-01 od SICK
- Kamer picoCAM2 I2D301M-2RCA11 od SICK

Na obr. 4.7 jsou vyobrazena vybraná vytvořená přípojná rozhraní pro senzory od společnosti SICK: **A)** Kamera picoCAM, **B)** laserový senzor ODmini, **C)** ultrazvukový senzor UC4, **D)** kapacitní senzor CQF16.



Obr. 4.7 Modul přípojného rozhraní pro senzory

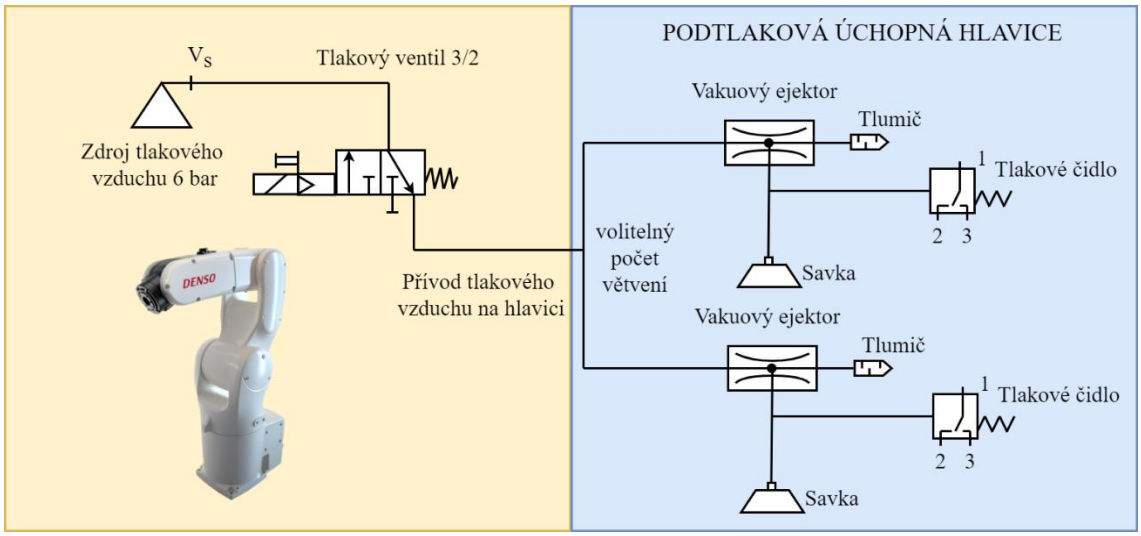
4.1 Komponenty pneumatického obvodu

Jak již bylo uvedeno, úchopná hlavice se skládá z 3 D tištěného **Základního tělesa,** na které se napojují **3D CAD Moduly**. K vytištěné úchopné hlavici je po vytištění nutné namontovat další komponenty vakuové ejektory díky kterým je vytvářen podtlak v komorách savek, dále tlumiče hluku a savky.

Schéma pneumatického obvodu

Na obr. 4.8 je ukázáno schéma pneumatického obvodu jedné větve podtlakové úchopné hlavice napojené na přívod tlakového vzduchu. Tlakový vzduch je možné vést tlakovým ventilem, který je možné regulovat a řídit tak úchop podtlakové hlavice. Zásadní pro

tvorbu vakua je vakuový ejektor, ve kterém je pomocí tlakového vzduchu generován podtlak v savkách. Ejektor odsává vzduch z komor vedoucí k savkám. Vzduch z ejektoru je odváděn pryč z pneumatického systému přes tlumič hluku.



Obr. 4.8 Schéma pneumatického obvodu

Vakuové ejektory

Tvorba kvalitního vakua je pro podtlakovou hlavici zásadní. Pro tvorbu podtlaku v savkách jsou na úchopné hlavici využívány lokální ejektory **CHIP L14A6-ZN** [8] využívající pro vytváření vakua stlačený vzduch.

Vakuové ejektory CHIP jsou dodávány v různých provedeních. V modelu je využit ejektor CHIP bez přípojné desky, který se na úchopnou hlavici připojuje přes vlastní integrované přípojné interface. Důležité technické parametry ejektorů jsou v tabulce 4.2

Tabulka 4.2 Technické parametry ejektoru L14A6-ZN, CHIP

Max. Vakuum [kPa]	**Max. nasávané množství [Nl/s] :**	**Rozměry [mm]**	**Hmotnost [g]:**
-75 ÷ -95	0.5 ÷ 3	64 x 30 x 16.5	13

Tlumič hluku

Při úniku urychleného vzduchu z pneumatického obvodu je vytvářen hluk. Úlohou tlumiče je tento hluk snížit. Tlumiče hluku jsou na úchopnou hlavici našroubovány přes závit G ¼.

Savky

Savka je v přímém kontaktu s manipulovaným objektem. Její výběr je závislý na manipulovaném objektu. Důležitými faktory pro výběr vhodné savky je materiál a prostorové a hmotnostní parametry dílce. Savky se na úchopnou hlavici šroubují do dedikovaného přípojného rozhraní závitem G ⅛.

4.2 Možnosti osazení senzorikou

Koncept zahrnuje možnost integrace různé úrovně senzoriky sledující následující veličiny **podtlak, přítomnost dílce, vzdálenost úchopné hlavice od dílce, obraz**. Vybraná senzorika je popsána v následující podkapitole.

Snímání podtlaku

Sledování podtlaku v savkách je pro správný průběh manipulačního robota s podtlakovou úchopnou hlavici zásadní. Pro tyto účely bylo vybráno tlakové čidlo SPAE od společnosti Festo.

Vybrané tlakové čidlo **SPAE-V1R-S4-PNLK-2.5K** vysílá signály ve formě digitálního výstupu. V případě zacpání savek v komorách hlavice, na které je napojeno čidlo je vytvořen podtlak. Při překročení přednastavené hodnoty podtlaku se čidlo sepne. Signál z tlakového čidla je zpracováván v řídicím systému a je využit pro regulaci přívodu tlakového vzduchu. Spínáním a rozpínáním tlakového ventilu, který je umístěn mezi zdrojem tlakového vzduchu a hlavicí, je umožněno řídit vznik podtlaku v savkách, a docílit tak kontrolovaného úchopu.

Tlakové čidlo

Tlakové čidlo **SPAE-V1R-S4-PNLK-2.5 K** (viz obr. 4.9) od společnosti Festo je tlakové čidlo měřící v rozsahu -1 bar až 0 bar. Čidlo obsahuje integrované zpracování signálu, numerický displej procentuálního tlaku, ovládací tlačítka a spínací výstup. Prostřednictvím IO-Link lze přenášet dva spínací signály a hodnotu měření tlaku.

Obr. 4.9 Tlakový spínač SPAE [29]

Charakteristické rozměry jsou uvedeny v tabulce 4.3 Výhodou tohoto tlakového čidla jsou nízké prostorové a hmotnostní parametry a snadná montáž typu plug-in.

Tabulka 4.3 Charakteristické rozměry: tlakové čidlo SPAE [29]

Charakteristické rozměry: SPAE-V1R-S4-PNLK-2.5 K	
Rozměry:	**Hmotnost:**
9,8 mm x20,3 mm x 30,8 mm	40 g

Detekce přítomnosti dílce

Pro určení přítomnosti dílce lze využít více způsobů. Obvykle jsou pro určení přítomnosti používány optoelektronické senzory s laserem nebo LED diodou. Další variantou jsou jednoduché kamerové systémy rozlišující např. stupně šedi. V neposlední řadě lze pro tyto úlohy použít kapacitní nebo indukční senzory, jejich využití je však omezené z hlediska spínacích vzdáleností a materiálu manipulovaného dílce.

Optoelektronické senzory

Pro kontrolu přítomnosti dílce jsou velmi vhodné optoelektronické senzory. Pro integraci na úchopnou hlavici byly vybrány **miniaturní optoelektronické senzory W2S-2** od společnosti SICK (viz obr. 4.10). Senzory řady **W2S-2** jsou reflexní světelné senzory jejichž principem detekce je zaclonění pozadí. Vysílačem světla může být dle konkrétního typu senzoru laser, pinPoint LED nebo LED dioda.

Obr. 4.10 Optoelektronické senzory W2S [30]

Charakteristické rozměry produktové řady jsou uvedeny v tabulce 4.4

Tabulka 4.4 Charakteristické rozměry: Optoelektronické senzory W2S-2 [30]

Charakteristické rozměry: W2S-2	
Rozměry:	Hmotnost:
7,7 mm x 21,8 mm x 13,5 mm	dle konkrétního typu senzoru od 15 g

Kamerový systém

Další variantou pro určení přítomnosti dílce jsou jednoduché kamerové systémy. Vybraným kamerovým systémem pro integraci na úchopnou hlavici je **CA-HS200C miniaturní kamerový systém High-speed, small 2 megapixel camera** od společnosti Keyence (viz obr. 4.11). Jedná se o velmi jednoduchý kamerový systém s digitálním výstupem. Kameru lze nastavit na spínací intenzitu světla a podle spínacího výstupu může být použita pro kontrolu přítomnosti dílce. Kamera se skládá z kamerové části a objektivu. Výběr objektivu záleží na velikosti dílce a vzdálenosti mezi kamerou a dílcem.

Obr. 4.11 Kamerový systém CA-HS200C [31]

Charakteristické rozměry kamery jsou uvedeny v tabulce 4.5

Tabulka 4.5 Charakteristické rozměry CA-HS200C [31]

Charakteristické rozměry: CA-HS200C	
Rozměry:	Hmotnost
23,5 mm x 23 mm x 30 mm	45 g

Kapacitní senzor

Pro určení přítomnosti dílce na malé vzdálenosti je možné použít kapacitní senzor. Pro integraci na úchopnou hlavici byl vybrán **kapacitní senzory řady CQG** od společnosti SICK se spínací vzdáleností od 0,5 do 0,6 mm (viz obr. 4.12).

Obr. 4.12 Kapacitní senzor CQF [32]

Charakteristické rozměry senzoru jsou uvedeny v tabulce 4.6.

Tabulka 4.6 Charakteristické rozměry: CQF [32]

Charakteristické rozměry: CQF	
Rozměry:	Hmotnost
16 mm x 34 mm x 8 mm 5	81 g …85 g

Indukční senzor

Pro určení přítomnosti kovových dílců je možné využít indukční senzory. Pro integraci na úchopnou hlavici byl vybrán **indukční senzor IM04 produktové řady IMM** od společnosti SICK se snímací vzdáleností 1 mm (viz obr. 4.13). Produktová řada **IMM** jsou miniaturní senzory pro průmyslové aplikace. **IM04** je senzor s konstrukcí pouzdra v krátkém provedení.

Obr. 4.13 Indukční senzor IMM [33]

Charakteristické rozměry senzoru jsou uvedeny v tabulce 4.7.

Tabulka 4.7 Charakteristické rozměry: IMM [33]

Charakteristické rozměry: IM04-01	
Rozměry:	Hmotnost
Ø 4 mm, délka pouzdra 12 mm	27 g

Měření vzdálenosti úchopné hlavice od dílce

Pro měření vzdálenosti se běžně používají komplexnější senzory. Typicky se jedná o laserové senzory přímé a triangulační nebo o ultrazvukové senzory.

Laserový triangulační senzor

Laserový triangulační senzor je využíván pro měření vzdálenosti úchopné hlavice od dílce. Pro integraci na úchopnou hlavici byl vybrán **laserový triangulační senzor produktové řady OD1 mini** od společnosti SICK (viz obr. 4.14).

Obr. 4.14 Laserový senzor OD mini [34]

Charakteristické rozměry produktové řady jsou uvedeny v tabulce 4.8. Senzorovou hlavu OD mini lze použít v kombinaci s vyhodnocovací jednotkou AOD1 nebo jako samostatné řešení.

Tabulka 4.8 Charakteristické rozměry: OD mini [34]

Charakteristické rozměry: OD1 pro měření mezery a vzdálenosti	
Rozměry:	Hmotnost
17,8mm x 44,4 mm x 31 mm	40 g…70g

Ultrazvukový senzor

Pro učení přítomnosti dílce je možné využít ultrazvukové senzory. Pro integraci na úchopnou hlavici byl vybrán **ultrazvukový senzorů produktové řady UC4** od společnosti SICK (viz obr. 4.15).

Obr. 4.15 Ultrazvukový senzor UC4 [34]

Charakteristické rozměry produktové řady UC4 jsou uvedeny v tabulce 4.9.

Tabulka 4.9 Charakteristické rozměry: UC4 [34]

Charakteristické rozměry: UC4	
Rozměry:	Hmotnost
16 mm x 40,1m x 16,7mm	10 g

Komplexní přenos scény

Pro komplexní přenos kamerového obrazu jsou vhodné kamerové systémy. Tyto systémy mohou být 2D nebo 3D.

Kamerový systém

Pro navigaci robota, kontrolu přítomnosti dílce, polohování a měření ve 2D lze použít **kamerový systém s 2D Machine Vision**. Pro integraci na úchopnou hlavici byl vybrán **kamerový systém picoCAM** od společnosti SICK (viz obr. 4.16). Navrhovaný kamerový systém se skládá z kamery picoCAM, objektivu a osvětlení. Výběr objektivu a osvětlení závisí na podmínkách aplikace.

Obr. 4.16 Kamera s objektivem picoCAM [35]

Charakteristické rozměry kamery jsou uvedeny v tabulce 4.10.

Tabulka 4.10 Charakteristické rozměry picoCAM [35]

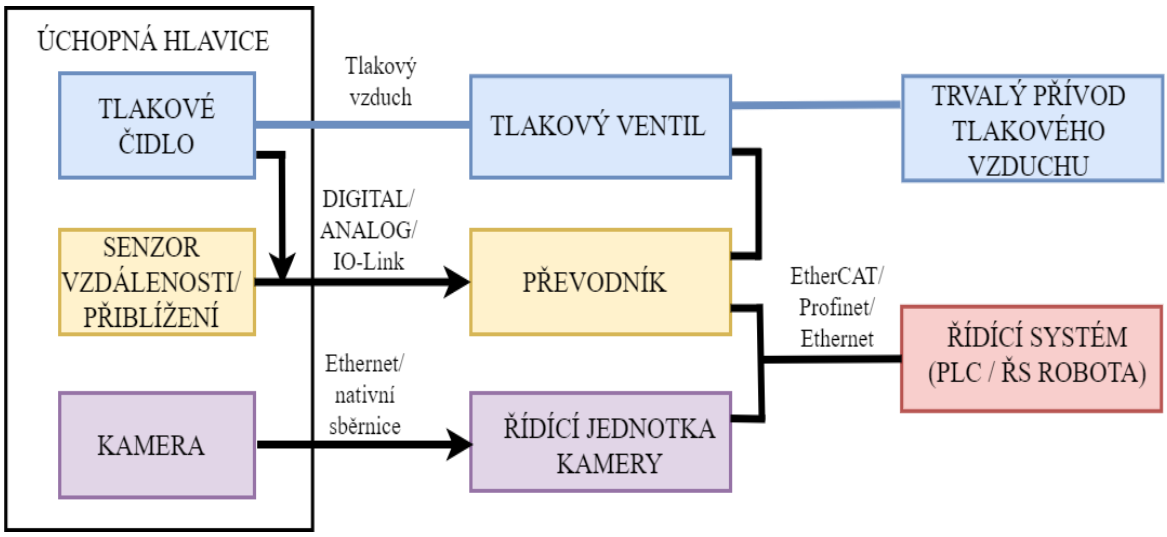
Charakteristické rozměry: Kamera picoCAM2	
Rozměry:	Hmotnost
29 mm x 29 mm x 29 mm	51g … 52 g

Pro aplikaci na úchopné hlavici se nepodařilo nalézt vhodný **3D kamerový systém**. Veškeré nalezené 3D kamerové systémy byly pro aplikaci na úchopnou hlavici moc těžké a velké. V případě využití kamerového systému je nutné jej umístit mimo úchopnou hlavici.

4.3 Komunikační připojení na robota

Senzory poskytují informace, které slouží pro kontrolu uchopení a eventuelně i pro řízení robota. Pro správné zpracování výstupních signálů ze senzorů je zásadní komunikace mezi úchopnou hlavicí a řídícím systémem.

Pro snadnou implementaci úchopné hlavice do výroby je vytvořen univerzální koncept komunikace. Princip komunikace je založen na tom, že sjednocuje různé výstupní signály senzorů do jednotného výstupu převodníku, který je dále veden do řídícího systému robota. Principiální schéma komunikace je na obr. 4.17. Tento koncept zajišťuje možnost Plug-and-Produce zapojení inteligentní úchopné hlavice.



Obr. 4.17 Schéma komunikace mezi úchopnou hlavicí a řídicím systémem

Komunikace mezi úchopnou hlavicí a robotem je zajištěna přes převodník, který slouží pro sjednocení různých výstupních signálu ze senzorů do jednotného výstupu, který je dále veden do řídícího systému. Každý senzor dává výstupní informace, které je možné zpracovat a využít pro řízení manipulačního robota. Výstupní signál z vybraného senzoru (analogový, digitální, I/O Link) je přes kabeláž veden do převodníku. Konkrétním možným řešením je například převodník EtherCAT Coupler-EK1100 od společnosti Beckhoff [36]. Z tohoto převodníku vede jednotný výstup EtherCAT do řídícího systému (PLC, Řídicí systém robot). V případě, že je využita kamera, je napojena zvlášť přes vlastní řídicí jednotku.

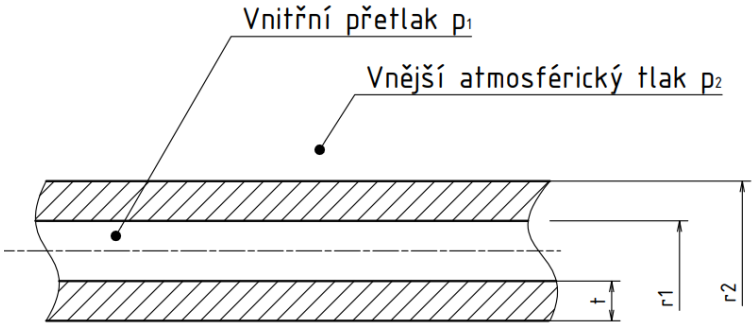
5 Návrhové a kontrolní výpočty

Úchopná hlavice využívá k tvorbě podtlaku přívod tlakového vzduchu o tlaku 6 bar. Tlakový vzduch je veden integrovanými vzduchovými kanály úchopné hlavice až k ejektorům. Charakteristickým parametrem tělesa je tloušťka stěny vedení tlakového vzduchu, která musí zajistit pevnost tělesa při vnitřním přetlaku.

Každá savka má vlastní zdroj vakua – ejektor. Tyto ejektory mají společný přívod stlačeného vzduchu. Tento způsob generování vakua zajišťuje vznik přídržné síly i v případě, kdy není dosednutí jedné ze savek těsné.

5.1 Výpočet tloušťky stěny vedení

Výpočet tloušťky stěny vedení tlakového vzduchu (viz obr. 5.1) vychází z teorie otevřené tlustostěnné nádoby s vnitřním přetlakem $p_1 = 0{,}6\ MPa$ a uvažovaným vnějším (atmosférický) tlakem $p_2 = 0{,}1\ MPa$. Výpočet je proveden pro poloměr $r_1 = 3{,}5\ mm$.



Obr. 5.1 Popis stěny vedení tlakového vzduchu

Pro zvolený materiál HP High Reusability PA12 tisknutý metodou ASTM D638 jsou dány hodnoty parametrů: E = 1600MPa, ν = 0,4, σ_{krit} =46 MPa, bezpečnost $k = 3$

$$\sigma_D = \frac{\sigma_{krit}}{k}] \tag{5.1-1}$$

$$\sigma_{RED} = \sigma_t(r_1) - \sigma_r(r_1) \leq \sigma_D \tag{5.1-2}$$

$$\sigma_t(r_1) = 2 \cdot \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + p_1 \tag{5.1-3}$$

$$\sigma_r(r_1) = -p_1 \tag{5.1-4}$$

$$\sigma_{RED} = 2 \cdot \frac{p_1 r_1^2 - p_2 r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} + 2 \cdot p_1 = 2 \cdot \left(\frac{(p_1 - p_2) \cdot r_2^2}{r_2^2 - r_1^2} \right) \leq \sigma_D \tag{5.1-5}$$

Dovolený tlakový spád v tlustostěnné nádobě s vnitřním přetlakem:

$$(p_1 - p_2)_D \leq \frac{\sigma_D}{2} \cdot \left[1 - \left(\frac{r_1}{r_2}\right)^2\right] \qquad (5.1\text{-}6)$$

Odvozený vztah pro vnější poloměr nádoby r_2 je dán rovnicí:

$$r_2^2 = \frac{-r_1^2}{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\sigma_D} - 1} \qquad (5.1\text{-}7)$$

Pro zadané hodnoty lze ze vztahu 5.1-8 vyjádřit vnější poloměr nádoby r_2:

$$r_2^2 = \frac{-r_1^2}{\frac{2 \cdot (p_1 - p_2)}{\sigma_D} - 1} \rightarrow r_2 = 3{,}62\ mm$$

Vypočtená minimální tloušťka stěny:

$$r_2 - r_1 = 3{,}62 - 3{,}5 = 0{,}12\ mm$$

Rozdíl vnitřního poloměru r_1 a vnějšího poloměru r_2 je minimální tloušťka stěny. Pro materiál HR PA12 tisknutý metodou ASTM D638 s předpokladem vstupního tlaku 6 barů vychází minimální tloušťka stěny 0,12 mm. **Z technologických důvodů je navržena tloušťka stěny 2 mm, což pevnostně vyhovuje.**

5.1 Výpočet přídržné síly a volba savek

Velikost savek určuje, jak hmotný dílec může být manipulován. Hodnota maximální přídržné síly závisí na velikosti savek a hodnotě dosaženého podtlaku v komorách savek. Princip vzniku přídržné síly je založen na rozdílu vnějšího atmosférického tlaku a tlaku v savce. Hodnota přídržné síly dále závisí na poloze a směru pohybu savky.

Jsou uvažovány následující hodnoty: *p = -0,7 bar* a předpokládaná maximální hmotnost manipulovaného dílce *m = 0,2 kg*. Savka je umístěna v horizontální pozici a pohyb je ve vertikálním směru. Předpokládané maximální zrychlení robota je $2\,m \cdot s^2$. Toto maximální zrychlení má například Robot ABB IRB 140 s nosností 6 kg. Je uvažována bezpečnost *k=1,5*

Výpočty vycházejí z katalogu *Basic principles of vacuum technology* od společnosti Festo [7].

Velikost přídržné síly:

$$F = m \cdot (g + a) \cdot \mathrm{k} \qquad (5.1\text{-}1)$$

$$F = 0{,}2 \cdot (9{,}81 + 2) \cdot 1{,}5 = 3{,}54N \qquad (5.1\text{-}2)$$

Velikost teoretické odtrhovací síly:

$$F_A = \frac{F}{n} \qquad (5.1\text{-}3)$$

Kde n je počet savek. Dále budeme rozlišovat tři konstrukční provedení:

A) n =3, provedení s třemi savkami, teoretická odtrhovací síla $F_A = 1{,}81N$,

B) n = 4, provedení s čtyřmi savkami, teoretická odtrhovací síla $F_A = 0{,}89N$,

C) n=8, provedení s osmi savkami, teoretická odtrhovací síla $F_A = 0{,}445N$

Při volbě standardní savky je dostačující průměr pro variantu A) *Ø8 mm* a více, pro variantu B) *Ø6 mm* a více pro variantu C) *Ø4 mm*

Při manipulaci s prodyšným materiálem je doporučeno volit co nejmenší průměr savek.

6 Zkoušky pneumatického obvodu

Zásadní pro správnou funkci hlavice je funkce pneumatického systému, těsné dosednutí ejektorů na navržený interface a s tím související vznik požadovaného podtlaku v savkách. Pro ověření funkce pneumatického obvodu bylo povedeno testovací měření.

6.1 Testovaný prototyp

Pro účely testování funkce pneumatického systému byl vytištěn prototyp úchopné hlavice v provedení s dvěma ejektory s možností napojení tlakových čidel do každé komory savky. Vytištěný prototyp je ukázán na obr. 6.1.

Před připojením pneumatických komponent na vytištěný model bylo ručně obroušeno a čirým lakem přelakováno přípojné rozhraní vakuových ejektorů. Tyto úpravy sloužily pro zajištění těsného dosednutí ejektorů na přípojná rozhraní. Dále byly ručně vyřezány potřebné závity.

Obr. 6.1 Testování podtlaku prototypu s dvěma ejektory

6.2 Průběh testování

Byla testována těsnost pneumatického systému závisející na správném dosednutí vakuových ejektorů na přípojné rozhraní a celkové porózitě modelu.

Měření probíhalo se vstupním tlakem 6 bar, pro který je úchopná hlavice navržena. Při testování pneumatického obvodu byl kanál vedoucí k savkám zaslepen. Vzniklý podtlak byl tedy přímo závislý na výkonu vakuového ejektoru a nebyl ovlivněn špatným přisátím savek.

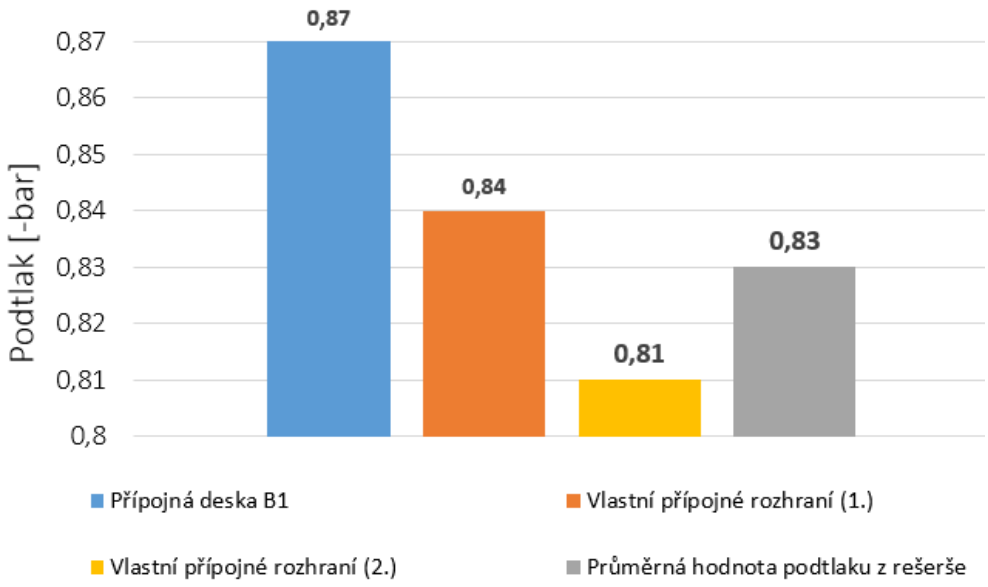
Ejektory byly na rozhraní připojeny pomocí šroubů a matic. Spojení bylo utahováno ručně. Podtlak byl měřen v každé větvi zvlášť.

6.3 Výsledky měření

Naměřené hodnoty podtlaku v jedné a druhé větvi testovaného prototypu byly různé. Při opakovaném měření podtlaku v komorách savek byla při přívodu tlakového vzduchu 6 bar naměřená hodnota podtlaku v první větvi - 0,84 bar a v druhé -0,81 bar.

Na testovaném prototypu bylo využito připojení vakuových ejektorů přes vlastní přípojné rozhraní. Testování bylo porovnáno s podtlakovou hlavicí využívající stejný typ ejektorů, ale v provedení s kupovanou přípojnou deskou B1. V porovnání s hlavicí s přípojnou deskou B1 je hodnota podtlaku na hlavici s vlastním přípojným rozhraním nižší. Rozdíl v naměřených hodnotách podtlaku je nízký a může být dán jak tvarem a těsností připojení vakuových ejektorů, tak celkovou vyšší drsností vedení tlakového vzduchu 3D tištěného modelu. V porovnání s průměrnou hodnotou maximálního podtlaku šesti vybraných průmyslových řešení podtlakových hlavic z Kapitoly 3.1 je hodnota naměřeného podtlaku srovnatelná. V grafu 6.1 jsou vizuálně porovnány naměřené hodnoty podtlaku.

Měření bylo úspěšné. Naměřená hodnota podtlaku -0,84 bar i -0,81 bar je srovnatelná s hodnotou maximálního podtlaku průmyslově využívaných řešení. **Na základě měření se dá předpokládat funkčnost navrženého konceptu podtlakové hlavice.**



Graf 6.1 Porovnávací graf naměřených hodnot podtlaku v savkách

7 Realizace

Modulární parametrická úchopná hlavice umožňuje tvorbu různých konstrukčních variant. Dvě realizované konstrukční varianty úchopné hlavice jsou popsány v následující kapitole. Úchopné hlavice jsou určeny pro pilotní projekty: **Projekt „Denso“** a **Projekt „Delta“** probíhající v Testbed pro Průmysl 4.0 v CIIRC.

Pro projekt **„Denso“** je realizována varianta úchopné hlavice s čtyřmi ejektory a celkem osmi savkami. Hlavice je vybavena dedikovanou přírubou pro připojení na angulárního robota Denso VS-087. Úchopná hlavice nahrazuje původní provedení úchopné hlavice (viz obr. 2.1) oproti kterému je lehčí a kompaktnější**.** Realizace úchopné hlavice je popsaná v Kapitole 7.1**.** Úchopná hlavice pro projekt **„Denso“** je primární aplikací této bakalářské práce (viz 2 Cíle práce).

Pro projekt **„Delta“** je realizována hlavice s třemi ejektory a třemi savkami. Úchopná hlavice je vybavena dedikovanou přírubou pro připojení na výměník nástrojů. Úchopná hlavice je primárně určená pro využití na delta robotu RL5-1450-6kg, odtud název projekt Delta. Díky výměníku nástrojů je však možné její snadné plug in připojení i na jiné typy robota (např. na angulárního manipulačního robota KR 8 CYBERTECH od společnosti KUKA viz obr 7.4). Bližší informace o realizaci úchopné hlavice pro projekt **„Delta“** jsou popsány v Kapitole 7.2

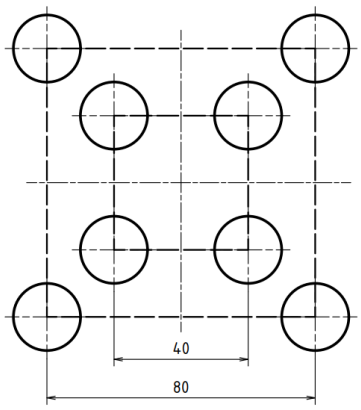
Obě hlavice jsou navrženy pro vnější přívod tlakového vzduchu o tlaku 6 bar.

7.1 Úchopná hlavice pro projekt Denso

Úchopná hlavice je navržena pro upevnění na manipulačního robota Denso VS-087. Úkolem robota je manipulace s naplněnými sáčky o hmotnosti do 150 g. Sáčky jsou neprodyšné a různě velké. Hlavice je navržena v provedení s čtyřmi ejektory a osmi savkami. Savky jsou rozmístěné ve do dvou soustředných čtverců o délce strany 40 mm a 80 mm (viz obr. 7.1). Výhoda více savek není v tomto případě ve zvýšení únosnosti, ale v lepším rozložení přídržné síly.

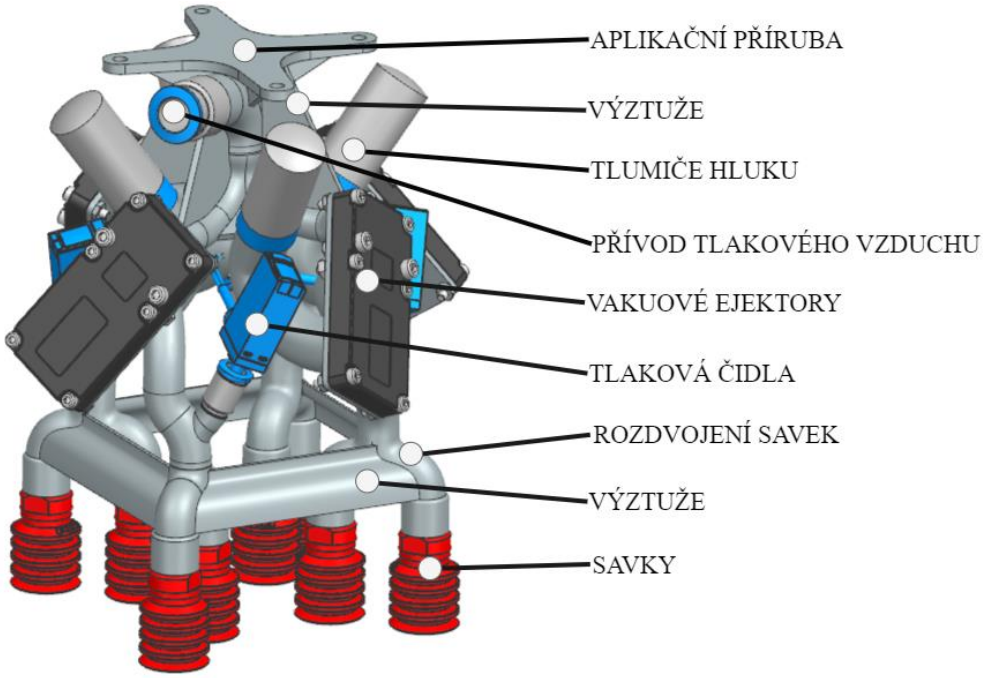
Tlakový vzduch je přiveden na hlavici průměru 10 mm. Tlakový vzduch je rozvětven do čtyř větví a veden do ejektorů. Odvod vzduchu je od každého ejektoru veden přes tlumiče hluku. Na hlavici jsou integrovány tlaková čidla, která slouží pro kontrolu podtlaku

v savkách. Informace z tlakových čidel jsou využity pro regulaci přívodu tlakového vzduchu, a tedy pro řízení úchopu.



Obr. 7.1 Rozmístění savek projekt Denso

Na obr. 7.2 je popsán CAD model sestavy úchopné hlavice. Jednotlivé části úchopné hlavice jsou spojeny výztužemi, což pozitivně ovlivňuje celkovou tuhost hlavice. Výztuže jsou plochy o tloušťce 2 mm a slouží pro zvýšení tuhosti spodní části, kde jsou vedeny mezi moduly pro připojení savek a horní části, kde spojují dedikovanou přírubu a těleso hlavice.



Obr. 7.2 Úchopná hlavice projekt Denso

Volba pneumatických komponent

Všechna konstrukční provedení hlavice předpokládají využití vakuových ejektorů L14A6-ZN CHIP. Na hlavici jsou využity čtyři. Dále jsou využity čtyři tlumiče hluku **UC-1/4** od společnosti Festo.

Volba savek

Na úchopné hlavici je využito stejného typu savek, jako bylo na původní hlavici. Využité savky jsou **BL20-2.20.02AB** bez zpevňovacího kroužku od společnosti Vakuum technik [37]. Savky jsou vhodné pro jemně zakřivené povrchy. Při podtlaku -0,7 bar je v jedné přisáté savce dosažena přídržná síla 0,62N**.** Celková kalkulovaná síla při nasátí všech savek je 4,96N.

Byl proveden srovnávací výpočet přídržné síly. Při uvažovaném maximálním zrychlení robota $a = 2{,}5\, m \cdot s^2$, hmotnosti manipulovaného sáčku $m = 0{,}15\, kg$ a bezpečnosti $k = 1{,}5$ je přídržná síla dána vztahem:

$$F = m \cdot (g + a) \cdot \mathrm{k} \qquad (7.1\text{-}1)$$

$$F = 0{,}15 \cdot (9{,}81 + 2{,}5) \cdot 1{,}5 = \ 2{,}77N \qquad (7.1\text{-}2)$$

Velikost teoretické odtrhovací síly:

$$F_A = \frac{F}{n} = \frac{2{,}77}{8} = 0{,}35\ N \qquad (7.1\text{-}3)$$

Na základě výpočtu odtrhovací síly lze dle katalogu od společnosti Festo [7] zvolit velikost savky. Po aplikaci může být využita standardní savka o velikosti $\emptyset 4\, mm$. Z výpočtu vyplývá, že řešení využívající savek **BL20-2.20.02AB** je výrazně předimenzované.

Vybraná senzorika

Pro kontrolu podtlaku v savkách jsou využity čtyři tlakové senzory **SPAE-V1R-S4-PNLK-2.5 K** od společnosti Festo, které jsou komunikovány s řídicím systémem robota. Tlakové spínače jsou umístěny mimo úchopnou hlavici.

Finální sestava

Model nové úchopné hlavice nahrazuje řešení označované jako původní podtlaková úchopná hlavice (viz obr. 2.1). Jednalo se o hlavici složenou z 3D tištěného dílce, na který byly zvenku napojeny veškeré pneumatické komponenty. Pro tvorbu vakua byly využity

vakuové ejektory CHIP s hliníkovou přípojnou deskou B1. Tlakový vzduch byl veden hadicemi vně hlavice. Hmotnost celé sestavy původního řešení s veškerými komponenty byla 1,2 kg a válcová obálka vnějších rozměrů byla $\emptyset 290x193\ mm^3$. Důvodem pro hledání nového řešení byly zejména velké hmotnostní a prostorové parametry původní hlavice. Dalším důvodem také byla nekompaktnost vnějšího vedení tlakového vzduchu a nově definované rozmístění savek. Na původní hlavici byly využity čtyři savky, při tvorbě zadání byl dán požadavek na využití osmi savek v definovaném patternu.

Na původní úchopné hlavici byly využity savky **BL20-2.20.02AB** bez zpevňovacího kroužku od společnosti Vakuum technik [37]. Celková kalkulovaná přídržné síla při podtlaku 0,7 bar byla 2,48 N.

Nově navržené řešení je oproti původnímu výrazně kompaktnější. Vnější rozměry válcové obálky nové hlavice jsou ø145 x 167 mm^3. Hmotnost celého řešení s veškerými komponenty je 0,6 kg. Předpokládaná hodnota podtlaku nového řešení vychází z testování prototypu v provedení s dvěma větvemi, na kterém byly naměřené hodnoty podtlaku -0,81 bar a -0,83 bar. Porovnání parametrů stávajícího a nového řešení je v tabulce 7.1.

Tabulka 7.1 Porovnání původního a nového řešení

	Původní řešení	Nové řešení	Změna
Válcová obálka vnějších rozměrů	Ø290x193 (12,7 dm^3)	Ø148x167 (2,873 dm^3)	-77,4 %
Hmotnost sestavy:	1,2kg	0,6kg	- 50 %
Změřený podtlak za ejektorem	-0,87bar	-0,83bar -0,81 bar	- 4,6 % - 6,9 %

Na hlavici je uvažován minimální podtlak -0,7 bar, který je po kompletaci testován a pro který je kalkulovaná přídržná síla. **Celková kalkulovaná síla nového řešení je 4,96 N.**

Na obr. 7.3 jsou vytištěná 3D tištěná jádra podtlakových hlavic. Vlevo je nové řešení s integrovaným vedením tlakového vzduchu. Vpravo je holé jádro původního řešení. Nové řešení podtlakové hlavice bylo vytištěno a je připraveno pro využití.

Obr. 7.3 Rozměrové porovnání podtlakových hlavic projektu Denso. Vlevo těleso navrženého nového řešení, vpravo původní těleso.

7.2 Úchopná hlavice pro projekt Delta

Úchopná hlavice pro projekt **„Delta“** je hlavice v provedení s třemi ejektory a třemi savkami. Hlavice je navržena pro upevnění na delta robota RL5-1450-6kg. Úkolem robota je přendávání drobných předmětů z dopravníku. Předměty mohou být různých tvarů a velikostí do hmotnosti 0,2 kg. Těleso hlavice je vyztuženo pomocí funkce **lattice,** odlehčenými strukturami. Tyto výztuhy se pozitivně promítají do výsledné tuhosti modelu.

Specifikací modelu je aplikační příruba. Hlavice je k delta robotu připojena přes výměník nástrojů, tj. je možná automatická výměna hlavice.

Na hlavici jsou integrována tlaková čidla.

První tisk hlavice pro projekt Delta

První tisk podtlakové hlavice je vyobrazen na obr. 7.4. Hlavice na obrázku je napojená přes výměník nástrojů na robota Kuka. Při testování této úchopné hlavice byla zjištěna nedostatečná tuhost horní části modelu, na obrázku zvýrazněná červeným kruhem. Těleso

hlavice se v daném místě výrazně zužovalo. Úchopná hlavice se kvůli nezpevněné části při manipulaci rozkmitávala. Na základě tohoto poznatku byly přidány výztuže mezi přírubu a těleso hlavice. Díky přidaným výztužím se výrazně zvýšila tuhost tělesa a nové řešení představené ve finální sestavě je již plně funkční.

Vybrané pneumatické komponenty

Všechna konstrukční provedení hlavice předpokládají využití vakuových ejektorů **L14A6-ZN CHIP**. Na úchopné hlavici jsou využity tři. Na hlavici jsou dál tři tlumiče hluku **UC-1/4** od společnosti Festo.

Velikost savek

V projektu Delta je předpokládaná vyšší rychlost manipulačního robota a s tím související vyšších zrychlení efektoru.

Při uvažování maximální hmotnosti manipulovaneho předmětu 0,2 kg, maximální zrychlení $a = 5\ m \cdot s^2$, bezpečnosti $k = 1{,}5$ je přídržná síla dána vztahem:

$$F = m \cdot (g + a) \cdot \mathrm{k} \qquad (7.2\text{-}1)$$

$$F = 0{,}2 \cdot (9{,}81 + 5) \cdot 1{,}5 = \ 4{,}43N \qquad (7.2\text{-}2)$$

Velikost teoretické odtrhovací síly je dána vztahem:

$$F_A = \frac{F}{n} = \frac{3{,}543}{3} = \ 1{,}48N \qquad (7.2\text{-}3)$$

Z katalogu od společnosti Festo [7] je zvolena standartní savka o průměru $\emptyset 8\ mm$.

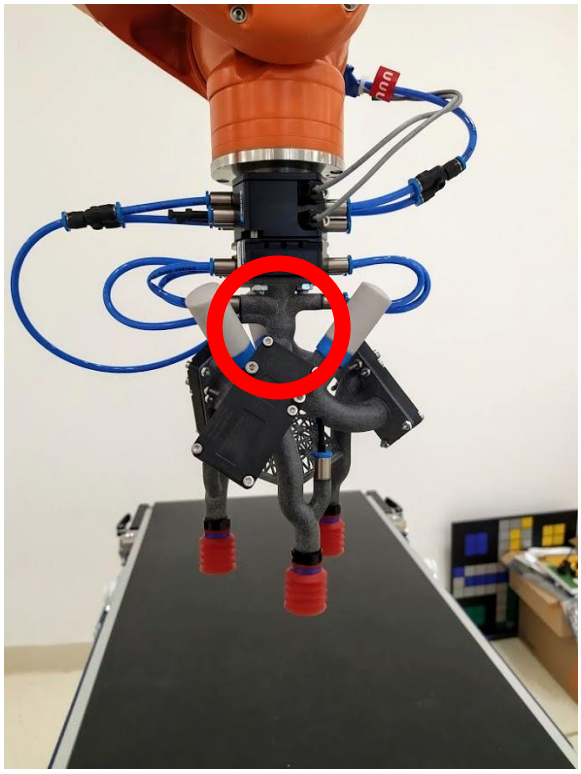
Přepočet přídržné síly pro jiný typ savek

Vzhledem ke skladovým zásobám jsou na podtlakové hlavici prozatím využity savky **BL20-2.20.02AB** bez zpevňovacího kroužku od společnosti Vakuum technik [37]. Savky jsou vhodné pro jemně zakřivené povrchy. Při podtlaku -0,7bar je dle katalogu [37] v každé savce dosažena přídržná síla 0,62N. **Celková kalkulovaná přídržná síla tří savek je 1,86N.**

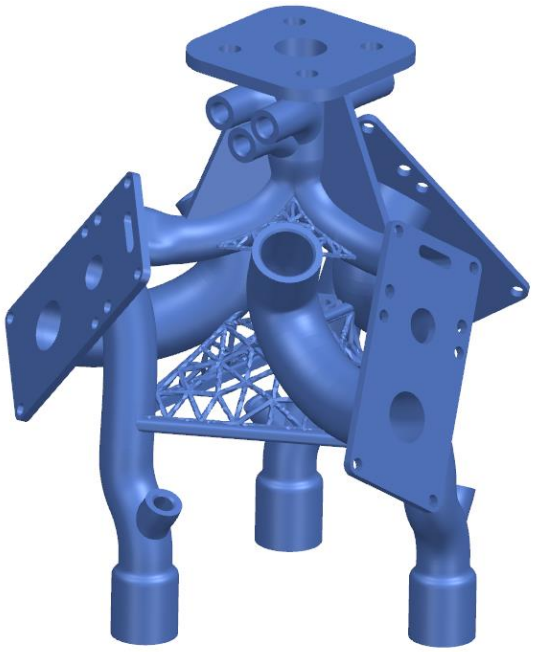
Finální sestava

Podtlakové hlavice s přidanými výztužemi je na obr. 7.5. Vnější rozměry válcové obálky hlavice jsou $\emptyset 136\ x 125\ mm^3$. Jednotlivé větve jsou propojeny příhradovou strukturou,

aby došlo k vyztužení celé konstrukce a omezilo se kmitání jednotlivých ramen při rychlém pohybu robota.



Obr. 7.4 Úchopná hlavice umístěna přes výměník na efektor manipulačního robota



Obr. 7.5 Finální model hlavice Denso s přidanými výstužemi

8 Závěr

Každý manipulační robot musí být vybaven úchopnou hlavicí, která umožní manipulovat konkrétním objektem. V rámci bakalářské práce bylo navrženo řešení úchopné hlavice pro manipulaci s drobnými objekty. Hlavice je zkonstruována jako parametrické modulární 3D CAD těleso, které umožňuje rychle a efektivně vytvářet různé konstrukční varianty.

Navržený modulární podtlakový gripper je vhodným řešením pro rychlé a finančně efektivní vytváření různých konstrukčních variant podtlakové manipulační hlavice. Řešení je založeno na modulárním CAD modelu tělesa, který umožňuje podle požadavků zákazníka vygenerovat potřebný tvar tělesa (viz obr. 8.1). K tělesu je možno volitelně integrovat senzory s různými funkcemi (měření podtlaku, určení přítomnosti tělesa, měření vzdálenosti, kamerový přenos obrazu). Podtlak je vytvářen ejektory CHIP nakoupenými od existujícího dodavatele. Funkce pneumatického systému byla ověřena dílčími testy vakuového systému i realizací variant celých hlavic. Dosažené hodnoty podtlaku v jednotlivých savkách jsou srovnatelné s řešením založeným na použití standardních pneumatických komponent. Tím je ověřena vyrobitelnost a funkčnost sestavy dílce vytvořeného technologií 3D tisku MJF v kombinaci s nakupovaným ejektorem. Řešení může být výhodnou variantou využitelnou v průmyslové praxi on-demand vytvářených součástí.

Koncept byl využit pro návrh dvou hlavic pro dva projekty

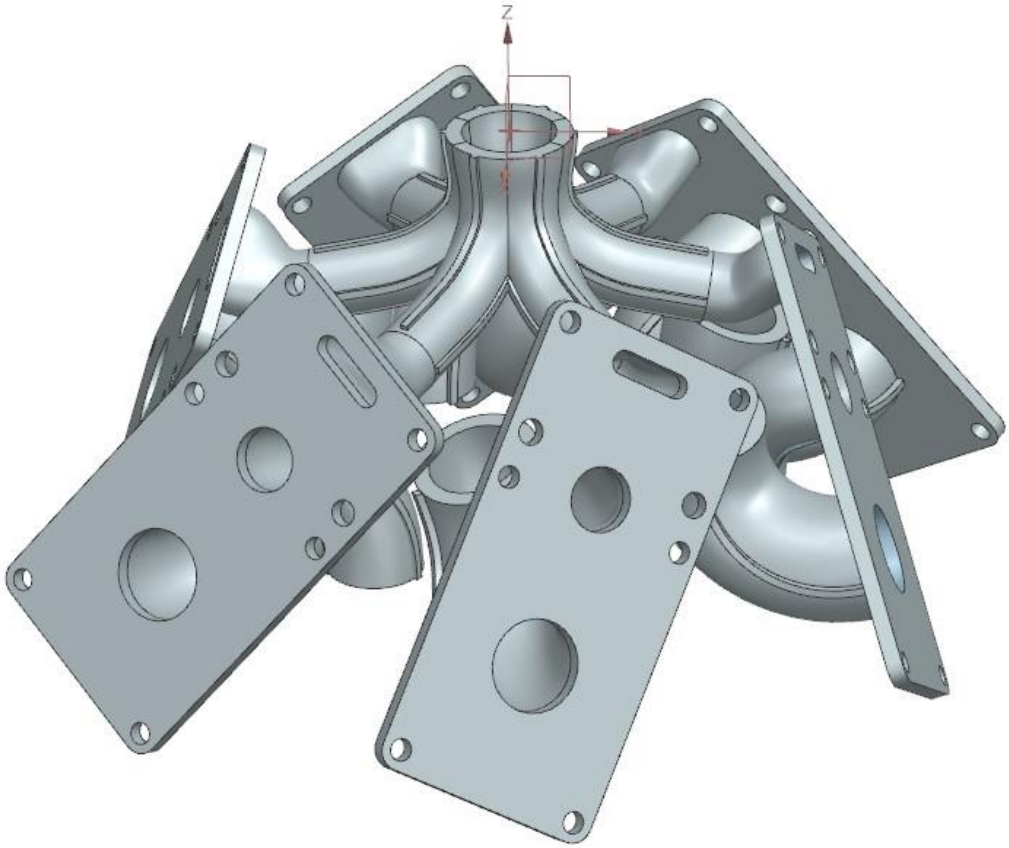
V prvním projektu je navržena podtlaková úchopná hlavice pro manipulaci s papírovými obálkami **(**projekt **„Denso“).** Těleso hlavice je tvořené 3D tištěným modelem s čtyřmi ejektory pro vytvoření vakua a osmi savkami. Dále je v tělese integrován systém sledování tlaků pneumatického systému, které jsou komunikovány s řídicí jednotkou. Toto řešení naplňuje zadané cíle práce. Nové řešení bylo porovnáno s původní úchopnou hlavicí a je výrazně lehčí a kompaktnější.

V druhém projektu je navržena podtlaková úchopná hlavice pro manipulaci s drobnými předměty v provedení s třemi ejektory (projekt **„Delta“).** Hlavice je vytvořená pro připojení na výměník nástrojů, tj. je možná automatická výměna hlavice. V tělese hlavice je integrován systém sledování tlaků pneumatického systému, které jsou komunikovány s řídicí jednotkou.

Obě hlavice byly realizovány v laboratořích Testbed pro průmysl 4.0 v CIIRC.

Díky realizaci celých variant podtlakových hlavic byl odhalen problém s tuhostí vytištěného modelu. Řešení, ve kterém je **Základní těleso** (viz obr. 8.1) pouze pospojováno s dalšími moduly, není dostatečně tuhé. Na hlavici je nutné připojit další výztuže jejichž velikost a tvar ovšem může být rozdílný pro každou aplikaci. Přidání výztuží je nutná operace, která může být časově náročná a komplikovaná. Na realizovaných hlavicích bylo využito dvou typů výztuží. Na úchopné hlavici v provedení s třemi ejektory pro projekt **„Delta“** bylo využito ve spodní části hlavice odlehčených výztuží vytvořených pomocí funkce **lattice.** Jejich výhodou je ušetření hmotnosti, které ovšem není vzhledem k nízké hmotnosti tištěného materiálu PA12 a nízkému objemu výztuží výrazné. Z estetického hlediska je preferováno provedení bez odlehčených strukturu, které bylo využito na projektu **„Denso“** s čtyřmi ejektory.

Navržené konstrukční řešení podtlakové úchopné hlavice lze v budoucnu rozšířit o dedikované výztuže.



Obr. 8.1 Základní dílec s šesti větvemi

Seznamy:

Seznam použitého softwaru:

NX12, Siemens

Autodesk Inventor 2020, Professional

Microsoft office 365

Seznam obrázků

Obr. 2.1 Původní řešení podtlakové úchopné hlavice projekt „Denso“ 9
Obr. 3.1 Metody měření vzdáleností 13
Obr. 3.2 Orientace savky pro první případ [7] 15
Obr. 3.3 Orientace savky pro druhý případ [7] 15
Obr. 3.4 Orientace savky pro třetí případ [7] 15
Obr. 3.5 Princip vakuových pump PIAB. 17
Obr. 3.6 piCOBOT od Piab [12] 18
Obr. 3.7 EPick od Robotiq [13] 18
Obr. 3.8 VG10(vlevo) a VGC10 (vpravo) OnRobot [14] 19
Obr. 3.9 ZXP7□01-X1 SMC [15] 19
Obr. 3.10 Velkoplošené chapadlo CVGC COVAL [16] 20
Obr. 3.11 Modulární chapadlo VEE Schmalz [17] 20
Obr. 3.12 Konfigurovatelná 3D tištěná hlavice Schmalz [17] 21
Obr. 3.13 Silové uchopení vlevo a tvarové uchopení vpravo [18] 24
Obr. 3.14 RG2-FT od OnRobot [14] 25
Obr. 3.15 EGP od Schunk [20] 26
Obr. 3.16 GRIPKIT Dvouprsté chapadlo [13] 26
Obr. 3.17 Diagram pro empirické určování měrné upínací síly [22] 28
Obr. 3.18 Elektromagnetický upínač [24] 29
Obr. 3.19 EMH, Schunk 30
Obr. 4.1 Popis modulární stavby úchopné hlavice 33
Obr. 4.2 Možnosti konfigurace Základního tělesa 34
Obr. 4.3 Modifikace výšky vstupního průřezu přívodu tlakového vzduchu. 35

Obr. 4.4 Roztečná kružnice přívodu vakua k savkám 35
Obr. 4.5 Moduly aplikačních přírub. 37
Obr. 4.6 Modul připojení savek 37
Obr. 4.7 Modul přípojného rozhraní pro senzory 38
Obr. 4.8 Schéma pneumatického obvodu 39
Obr. 4.9 Tlakový spínač SPAE [29] 41
Obr. 4.10 Optoelektronické senzory W2S [30] 41
Obr. 4.11 Kamerový systém CA-HS200C [31] 42
Obr. 4.12 Kapacitní senzor CQF [32] 43
Obr. 4.13 Indukční senzor IMM [33] 43
Obr. 4.14 Laserový senzor OD mini [34] 44
Obr. 4.15 Ultrazvukový senzor UC4 [34] 44
Obr. 4.16 Kamera s objektivem picoCAM [35] 45
Obr. 4.17 Schéma komunikace mezi úchopnou hlavicí a řídicím systémem 46
Obr. 5.1 Popis stěny vedení tlakového vzduchu 47
Obr. 6.1 Testování podtlaku prototypu s dvěma ejektory 50
Obr. 7.1 Rozmístění savek projekt Denso 53
Obr. 7.2 Úchopná hlavice projekt Denso 53
Obr. 7.3 Rozměrové porovnání podtlakových hlavic projektu Denso. Vlevo těleso navrženého nového řešení, vpravo původní těleso. 56
Obr. 7.4 Úchopná hlavice umístěna přes výměník na efektor manipulačního robota 58
Obr. 7.5 Finální model hlavice Denso s přidanými výstužemi 58
Obr. 8.1 Základní dílec s šesti větvemi 60

Seznam použité literatury:

[1] Tomáš Kratochvíl. Koncové efektory průmyslových robotů pro manipulaci. Brno 2013, Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Ing. Lukáš Flekal

[2] Michal Šerý. Senzory. Automatizace. České Budějovice, 2015 [Citace: 22.2.2021]. Dostupné z [online:] http://home.pf.jcu.cz/~kyklop/SERYM/automatizace/pred/pdf/Automatizace_senzory.pdf. Jihočeská univerzita v Českých Budějovicích, Pedagogická fakulta

[3] Pavel Vylegala. Rozdělení snímačů, požadavky kladené na snímače, vlastnosti snímačů. Roboti. Ostrava 2014. [Citace: 9. 6 2021]. Dostupné z [online]: https://www.sse-najizdarne.cz/projekty/roboti/dokumenty/v_prez_ss_1.pdf. Střední škola elektrotechnická, Ostrava.

[4] Antonín Vojáček. Ultrazvukové senzory přiblížení funkce, provedení, použití. [Online] 7. 7 2017. [Citace: 20. 10 2020] Dostupné z [online]: https://automatizace.hw.cz/ultrazvukove-senzory-priblizeni-funkce-provedeni-pouziti.html. Automaziace.hw.cz

[5] MICRO-EPSILON. Snímače [online stránky výrobce]. Copyright © 2021 [Citace: 25. 2 2021]. Dostupné z: https://www.micro-epsilon.cz/

[6] SICK. Sensor Intelligence [online stránky výrobce]. Copyright © 2021[Citace: 9. 6 2021] Dostupné z: https://www.sick.com/cz/cs

[7] FESTO. Basic principles of vacuum technology, brief overview. [online katalog výrobce]. Copyright © 2021 [Citace: 8. 6 2021]. Dostupné z: https://www.festo.com/net/SupportPortal/Files/286804/Basic_Vacuum_Technology_.

[8] VAKUUM technik s.r.o. Vakuové pumpy. [Online katalog výrobce] Copyright © 2021 [Citace: 9.6.2021]. Dostupné z: https://www.vakuumtechnik.cz/download/piab/vakuove_pumpy.pdf.

[9] SCHMALZ. Vacuum Pumps. [Online stránky výrobce] Copyright © 2021 [Citace: 9. 6 2021]. Dostupné z: https://www.schmalz.com/en-mx/vacuum-knowledge/the-vacuum-system-and-its-components/vacuum-generators/vacuum-pumps/.

[10] Porovnání skutečných nákladů na vakuové ejektory – Portál pro strojní konstruktéry. Portál pro strojní konstruktéry [online]. Copyright © 2013 [cit. 17.2.2021]. Dostupné z: https://e-konstrukter.cz/novinka/porovnani-skutecnych-nakladu-na-vakuove-ejektory

[11] OMEGA Engineering inc. Úvod do převodníků a snímačů tlaku [Online stránky výrobce] Copyright ©2021 [cit. 26.2.2021]. Dostupné z: https://www.omegaeng.cz/prodinfo_cz/snimac_tlaku.html

[12] PIAB. Gripping, lifting and moving solutions. [online stránky výrobce]. Copyright © 2021 [Citace: 13. 6 2021] Dostupné z: https://www.piab.com/.

[13] ROBOTIQ [online stránky výrobce]. Copyright © 2021 [Citace: 20. 6 2021]. Dostupné z: https://robotiq.com/

[14] ONROBOT [online stránky výrobce]. Copyright © 2021 [Citace: 20. 6 2021]. Dostupné z: https://onrobot.com/

[15] SMC [online stránky výrobce]. Copyright © 2021 [Citace: 20. 6 2021]. Dostupné z: https://www.smc.eu/

[16] COVAL [online stránky výrobce]. Copyright © 2021 [Citace: 20. 6 2021]. Dostupné z: https://www.coval-inc.com/

[17] SCHMALZ [online stránky výrobce]. Copyright © 2021 [Citace: 20. 6 2021]. Dostupné z: https://www.schmalz.com/en-us/

[18] EMI. EOAT R14 - Engineering & Reference Section. [Online katalog výrobce] Copyright © 2021 [Citace: 8. 6 2021] Dostupné z: https://www.emicorp.com/images/items/docs/gripper_formulas.pdf.

[19] Andreas Wolf, Ralf Steinmann a Henrik Schunk.. Grippers in motion: the fascination of automated handling tasks. Berlin: Springer, 2005, 248 p. ISBN 35-402-5657-1.

[20] SCHUNK [online stránky výrobce]. Copyright © 2021 [Citace: 20. 6 2021]. Dostupné z: https://schunk.com/

[21] Vlastimil Hotář. Automatizace a robotizace ve strojírenství. Liberec, 2019. [Citace: 20. 10 2020.]. Dostupné z: http://www.ksr.tul.cz/ksr/podklady/ARS-6.Efektory-3.pdf. Technická univerzita v Liberci, fakulta strojní.

[22] FEROMAGNET, s.r.o. Permanentní magnety, co je potřeba vědět o magnetech. [Online stránky výrobce] Copyright © 2021. [Citace: 8. 6 2021]. Dostupné z: http://www.feromagnet.cz/data/files/17a3af36d92b31c685214dc31fc53f5a_Permanentni_magnety.pdf.

[23] SCHMACHTL CZ SPOL. s R.O. Elektromagnety pro automatizaci. [Online stránky výrobce] Copyright © 2021. [Citace: 8. 6 2021]. Dostupné z: https://www.schmachtl.cz/elektromagnety.

[24] Pavel Volný. Vývojové trendy magnetických upínačů pro upínání feromagnetických předmětů. Praha. [Citace: 8. 6 2021.]. Dostupné z: https://www.cez.cz/edee/content/file/vzdelavani/14-volny.pdf. České vysoké učení technické v Praze, fakulta elektrotechnická, katedra elektrotechnologie.

[25] Časopis Elektro. Supravodivost. Praha. FCC PUBLIC, roč. 2006, č.5. ISSN 1210-0889.

[26] Pavel Macek. Návrh a analýza elektromagnetu. Brno 2011. Bakalářská práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky. Vedoucí práce: Ing. Ondřej Vítek, Ph.D.

[27] Adam Stehlík. Soft robotika a její aplikace. Ostrava 2018. VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robotiky. Vedoucí práce: doc. Ing. Zdenko Bobovský, Ph.D.

[28] MATERIALISE, s.r.o. 3D Printing an Materialise. Multi Jet Fusion. [Online stránky výrobce] [Citace: 20. 4 2021]. Dostupné z: https://www.materialise.com/en/manufacturing/3d-printing-technology/multi-jet-fusion.

[29] FESTO. SPAE čidla tlaku. [Online katalog výrobce] Copyright © 2021 [Citace: 19. 6 2021] Dostupné z: https://www.festo.com/cat/cs_cz/products_SPAE.

[30] SICK. Optoelektronické snímače, Produktové portfolio [online katalog výrobce]. Copyright © 2021 [Citace: 16. 6 2021]. Dostupné z: https://www.sick.com/sk/cs/optoelektronicke-snimace/c/g172752?q=:Def_Type:Product

[31] KEYENCE. Kamerové systémy [online katalog výrobce]. Copyright © 2021. [Citace: 16. 6 2021.] Dostupné z: https://www.keyence.eu/cscz/products/vision/vision-sys/

[32] SICK. Kapacitní snímače. [Online katalog výrobce] Copyright © 2021 [Citace: 19. 6 2021] Dostupné z: https://www.sick.com/cz/cs/ukoly/mereni/stav-hladiny/kapacitni-snimace/c/g201659

[33] SICK. Indukční snímače. [Online katalog výrobce] Copyright © 2021 [Citace: 19. 6 2021] Dostupné z: https://www.sick.com/cz/cs/indukcni-snimace/indukcni-snimace/imm/im04-01bpsvu2k/p/p416045

[34] SICK. Snímače pro měření vzdálenosti. [Online katalog výrobce] Copyright © 2021 [Citace: 19. 6 2021] Dostupné z: https://www.sick.com/cz/cs/snimace-mereni-vzdalenosti/c/g132151?q=:Def_Type:Product

[35] SICK. Průmyslové zpracování obrazu. [Online katalog výrobce] Copyright © 2021 [Citace: 19. 6 2021] Dostupné z: https://www.sick.com/cz/cs/prumyslove-zpracovani-obrazu/c/g114858?q=:Def_Type:ProductFamily

[36] VAKUUM technik s.r.o. Přísavky. [Online katalog výrobce] Copyright © 2021 [Citace: 9.6.2021]. Dostupné z: https://www.vakuumtechnik.cz/download/piab/PIAB_prisavky_brozura_CZ.pdf

[37] BECKHOFF New Automation Technology [online stránky výrobce]. Copyright © 2021. [Citace: 19. 6 2021]. Dostupné z: https://www.beckhoff.com/cs-cz/.

[38] VAKUUM technik s.r.o..Copyright © 2021[Citace: 9. 6 2021] Dostupné z: https://www.vakuumtechnik.cz/.

Přílohy

U12135-BP0272 KONFIGURAČNÍ PRŮVODKA MODULÁRNÍM CAD MODELEM TĚLESA

Výkresová dokumentace:

U12135-BP0272 -00-00 MODULÁRNÍ PODTLAKOVÁ HLAVICE, sestava

U12135-BP0272 -01-00 TĚLESO PODTLAKOVÉ ÚCHOPNÉ HLAVICE, výkres

Elektronická dokumentace

DENSO	**.**STL
DELTA	.STL
01-000_ZAKLADNI_TELESO	Siemens Part File
01-001_SPAE	Siemens Part File
01-002_CAMERA	Siemens Part File
01-003_CQG16	Siemens Part File
01-004_UC4	Siemens Part File
01-005_ODmini	Siemens Part File
01-006_W2S	Siemens Part File
01-101_DENSO	Siemens Part File
01-101_CHANGER	Siemens Part File
01-103_CIRCLE	Siemens Part File
001-004_SQUARE	Siemens Part File
01-201_TWO	Siemens Part File
01-202_ONE	Siemens Part File