



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV VÝROBNÍCH STROJŮ, SYSTÉMŮ A ROBOTIKY

INSTITUTE OF PRODUCTION MACHINES, SYSTEMS AND ROBOTICS

NÁVRH SPECIÁLNÍHO KONCOVÉHO EFEKTORU AUTONOMNÍHO ROBOTU

DESIGN OF A SPECIAL EFFECTOR FOR AUTONOMOUS ROBOT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Slavomír Med

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jan Pavlík, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Bc. Slavomír Med
Studijní program:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Studijní obor:	bez specializace
Vedoucí práce:	Ing. Jan Pavlík, Ph.D.
Akademický rok:	2023/24

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

Návrh speciálního koncového efektoru autonomního robotu

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Navrhněte a konstrukčně zpracujte řešení koncového efektoru autonomního robotu pro odebrání vzorků z listů rostlin. Stanovení zbývajících charakteristik bude součástí návrhu.

Cíle diplomové práce:

Rozbor současného stavu vědy a techniky u řešené problematiky.

Návrh variant řešení a zdůvodnění výběru konkrétního řešení.

Konstrukční návrh zvolené varianty – 3D model.

Nezbytné výpočty potřebné pro návrh a dimenzování.

Výkresová dokumentace vybraných uzlů.

Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R MISCHKE a Richard G BUDYNAS, VLK, Miloš, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

MAREK, Jiří. Konstrukce CNC obráběcích strojů III. Praha: MM publishing, 2014. MM speciál. ISBN 978-80-260-6780-1.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce se zabývá návrhem speciálního koncového efektoru pro autonomní robot, který bude schopný odebírat rostlinné vzorky z listů rostlin. V první části, která je teoretická, je popsáno rozdělení průmyslových manipulátorů, jejich koncové efektorů a je zde krátce popsán výzkum rostlin. Právě výzkum rostlin je oblast uplatnění tohoto efektoru. Na základě rešerše dostupných řešení je navrženo několik koncepčních variant, ze kterých je pomocí multikriteriální analýzy vybráno nejlepší z nich. Tento koncept je testován a dále rozvíjen až do finální podoby. Následně jsou provedeny výpočty pro pneumatický obvod efektoru a vypsány bezpečnostní požadavky. V závěru práce je vyhotoveno ekonomické zhodnocení celého efektoru, zhodnocení projektu a navržení dalšího postupu.

ABSTRACT

This master's thesis deals with the design of a specialized end effector for an autonomous robot capable of collecting plant samples from plant leaves. The theoretical part describes the classification of industrial manipulators, their end effectors, and briefly outlines plant research. Plant research is the specific application area for this end effector. Based on a review of available solutions, several conceptual variants are proposed, and the best one is selected using multicriteria analysis. This concept is tested and further developed until its final form. Subsequently, calculations are performed for the pneumatic circuit of the end effector, and safety requirements are outlined. The conclusion of the thesis includes an economic evaluation of the entire end effector, project assessment, and recommendations for further steps.

KLÍČOVÁ SLOVA

Speciální koncový efektor, automatizace rostlinného výzkumu, sběr rostlinných vzorků, ejektor

KEYWORDS

Specialized end effector, plant research automation, plant sample collection, ejector

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MED, Slavomír. *Návrh speciálního koncového efektoru autonomního robotu*. Brno, 2024. Dostupné také z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/157801>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Jan Pavlík.

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval svému vedoucímu diplomové práce panu Ing. Janu Pavlíkovi, Ph.D za odborné vedení, konzultace a podnětné návrhy k práci a svým kolegům ve společnosti PSI s. r. o. rovněž za podnětné návrhy k práci. Dále bych rád poděkoval svým rodičům za podporu, kterou mi po celou dobu mého studia poskytovali.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

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

V Březině dne 24. 5. 2024

.....

Med Slavomír

OBSAH

1	ÚVOD	15
2	ZADANÁ PROBLEMATIKA	17
3	REŠERŠE	19
3.1	Výzkum rostlin	19
3.2	Roboty [6; 7]	20
3.2.1	Průmyslové roboty	22
3.2.2	Kolaborativní roboty	22
3.3	Koncové efekторы	25
3.3.1	Úchopné hlavice	26
3.3.2	Technologické hlavice.....	27
3.3.3	Kombinované hlavice.....	27
3.3.4	Speciální výstupní hlavice.....	28
4	SYSTÉMOVÝ ROZBOR PRÁCE	29
4.1	Popis činnosti	29
4.2	Formulace cílů a řešení.....	29
4.3	Popis soustavy	29
4.4	Systém podstatných veličin	29
5	SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ	31
6	NÁVRHOVÉ VARIANTY	33
6.1	Varianta A	33
6.2	Varianta B.....	35
6.3	Varianta C.....	36
7	MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA	37
7.1	Stanovení parametrů multikriteriální analýzy a vah významnosti	37
7.2	Hodnocení variant	38
7.3	Výsledky multikriteriální analýzy	40
8	KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ	41
8.1	Ověření funkčnosti konceptu.....	41
8.1.1	Varianta C.1	41
8.1.2	Varianta C.2	43
8.1.3	Varianta C.3	45
8.2	Návrh spojovacích elementů	47
8.3	Návrh pouzdra	48
8.4	Pneumatické schéma efektoru	50
9	VÝPOČTY PNEUMATICKÉHO OBVODU	51
9.1	Spotřeba ejektorů pro přídržný element	53
9.2	Spotřeba ejektorů pro raznici	53
9.3	Spotřeba pneumotoru	54
9.4	Celková spotřeba stlačeného vzduchu.....	55
9.5	Výběr kompresoru	55
10	BEZPEČNOST	57
11	KOMENTÁŘ K VÝKRESOVÉ DOKUMENTACI	59

12	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	61
13	ZHODNOCENÍ A DISKUZE.....	63
13.1	Pokračování projektu	63
14	ZÁVĚR	65
15	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	67
16	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK	71
16.1	Seznam zkratk a symbolů.....	71
16.2	Seznam tabulek	72
16.3	Seznam obrázků	73
17	SEZNAM PŘÍLOH	75

1 ÚVOD

Stejně jako v průmyslovém odvětví je v současné době snaha automatizovat většinu procesů i ve výzkumu je tato snaha velmi patrná. Nezanedbatelnou částí rostlinných výzkumů, které se zabývají ději v tělech rostlin, je sběr rostlinných vzorků. Například pro listovou analýzu je třeba z listu vyrazit kruhový vzorek a ten je následně zkoumán. Sběr většího počtu vzorků, či opakované sběry vzorků je časově náročná aktivita, proto i zde je požadavek tuto akci automatizovat.

Cílem této diplomové práce je navrhnout speciální koncový efektor pro autonomní robot, pohybující se např. po skleníku, schopný právě tyto vzorky odebrat. Efektor má být schopný vzorek nejen odebrat, ale také ho umístit do připravené petriho misky. Tato práce se zabývá odběrem vzorku pouze z hlediska konstrukce a funkce efektoru. Nalezení listu a určení souřadnic místa pro odběr bude zajištěno pravděpodobně strojovým viděním společně s využitím umělé inteligence. Tato identifikace však není cílem této práce a bude navržena jako cíl některé z dalších prací.

Teoretická část začíná nastíněním rostlinného výzkumu, tedy důvodu vývoje tohoto nástroje pro robot. Dále práce pokračuje rozdělením a popisem průmyslových manipulátorů a koncových efektorů. Následně budou po prozkoumání dostupných řešení navrženy koncepční varianty a z nich bude pomocí multikriteriální analýzy vybráno nejlepší. Vybraný koncept bude podroben testování funkčnosti a poté navrženo finální konstrukční řešení spolu s výkresovou dokumentací.

Pro prototyp navrženého koncového efektoru bude vyhotovena finanční rozvaha a vypsány bezpečnostní požadavky na robot. Závěrem práce bude zhodnocení dosažených výsledků a doporučení pro další pokračování.

2 ZADANÁ PROBLEMATIKA

Cílem této diplomové práce je navrhnout a vyrobit koncový efektor na robota, který umožní automatizaci odebírání rostlinného vzorku z listu rostliny. Koncový efektor musí splňovat následující požadavky:

- musí být schopný odebrat z listu rostliny kruhový vzorek o průměru 6 mm,
- musí být schopný odložit vzorek do připravené nádoby,
- kompaktní rozměry koncového efektoru,
- musí být schopný fungovat na autonomním robotu.

3 REŠERŠE

3.1 Výzkum rostlin

V dnešní době je stále více prosazováno intenzivní zemědělství z důvodu nedostatku zemědělské půdy a narůstajícího množství potřebného pro uživení populace. Z tohoto důvodu se stále častěji sahá k nástrojům, které pomáhají určit, jak rostliny prospívají, jaké živiny jim je třeba dodat. Jak rostlina roste je dáno prostředím, ve kterém roste, a jejím fenotypem.

Během posledních let se v oblasti genomiky udělal velký pokrok a jsme tak schopni získat velké množství informací ohledně genů rostlin. Bohužel využití těchto informací pro vývoj nových genotypů je velmi obtížné. Fenotypizace umožňuje rychlé posouzení vztahu mezi výsledky sekvenování (genotypem) a prostředím. Každý organismus je vybaven geny, ze kterých se skládá genotyp. Jestliže zohledníme i vliv prostředí a náhodných událostí v průběhu vývoje dostáváme fenotyp, tj. projev fyzikálních a biochemických znaků. Pro určení fenotypu se používá mnoho metod, většinou však jejich kombinace. Příklady těchto metod jsou společně s přístroji pro tyto metody a získané snímky uvedeny na Obr. 1. [1]



Obr. 1 Metody fenotypizace. [1]

Nevýhodou většiny z těchto postupů je nutnost dopravit celou živou rostlinu do specifických světelných podmínek. Proto se tyto metody používají převážně v laboratorních podmínkách na rostliny menšího vzrůstu. Tyto citlivé přístroje bývají umístěny do zatemněných boxů, které bývají součástí většího systému. Takový systém může tvořit jen sestava dopravníků pro ulehčení průběhu měření, ale i komplexní systém skládající se z růstové plochy, vázicích segmentů, závlahových segmentů atd., kdy experiment probíhá zcela automaticky. Existují už také polní systémy, ty jsou však pouze ojedinělé a na počátku vývoje především kvůli vysokým požadavkům na osvětlení, respektive zatemnění přirozeného světla (Obr. 2). Jedním ze způsobů, jak určit část fenotypu velkých rostlin, je listová analýza.

Listová analýza spočívá v odběru vzorků z listu rostliny, z čepele nebo z řapíku, a následné analýzy v laboratoři. Rozborem listových řapíků lze získat přehled o příjmu živin z půdy. Společně s rozbořením půdy můžeme zjistit nepřijatelnost některé z živin z půdy, na základě čehož se určí vhodné hnojivo. Rozbor z listové čepele odhalí aktuální stav živin v rostlině. Oproti analýze listového řapíku se zde berou v potaz také živiny, které rostlina nepřijala z půdního prostředí ale pomocí listů – mimokořenová výživa rostliny. [2]

Analýza musí být prováděna periodicky, aby byla získána závislost mezi rozvojem půdních podmínek a stavem minerální výživy rostliny. Zároveň je třeba odebrat dostatečné množství vzorků, aby bylo možné eliminovat možné trendy v minerální výživě a snížit vliv fluktuace a předpojatých závěrů. [3]

Kvůli potřebě sběru velkého množství dat a časové náročnosti sběru dat proniká i do této oblasti výzkumu automatizace. Další výhodou automatizovaného systému je, že člověk nemusí vykonávat činnosti v nepříjemných podmínkách (vysoká vlhkost, vyšší teploty, nízké/přílišné osvětlení). Proto se do této oblasti dostává automatizace. Při manipulování s rostlinami se většinou používají dopravníkové systémy, manipuluje-li se s menšími rostlinami (např. řasy, velmi malé rostliny), rostlinami v uzavřených miskách nebo ve stísněném prostoru, lze použít i robot viz Obr. 3.



Obr. 2 Polní systém. [4]

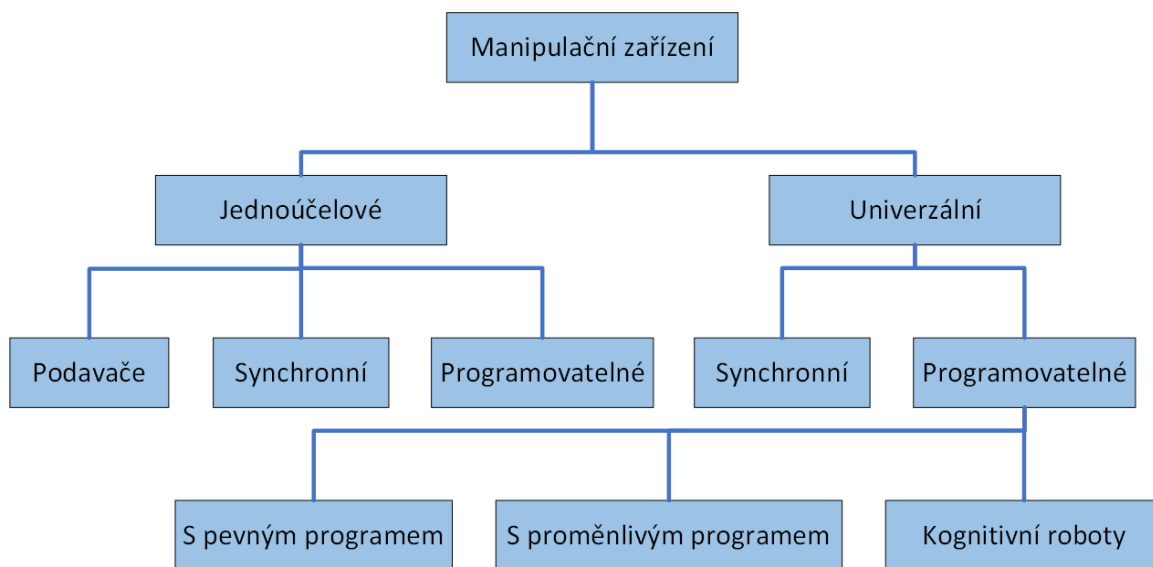


Obr. 3 Robotický systém. [5]

3.2 Roboty [6; 7]

Pro operaci získání vzorku z listu rostliny je třeba přistavit dané zařízení, koncový efektor, do správné pozice před list, čehož je nejjednodušší dosáhnout pomocí robotu. Na výběr je však více možností, který robot použít.

Průmyslové roboty a manipulátory (dále PRaM) se dělí podle funkce, provedení aplikačních možností, míry autonomnosti a úrovně řízení dle následujícího diagramu na Obr. 4. Jednotlivé skupiny budou charakterizovány v dalších odstavcích.



Obr. 4 Rozdělení PRaM. [6]

Prvotním rozdělením PRaM je podle koncepce na jednoúčelové a univerzální. **Jednoúčelové** PRaM se vyznačují konstrukčním provedením (pohony a pohybovými možnostmi) a úrovní řízení vyhovující danému účelu, dané technologii. Jejich použití pro jiný účel, než původní je velmi složité a v určitých případech není téměř proveditelné. Oproti tomu **univerzální** PRaM, jak název napovídá, jsou víceúčelová zařízení, která jsou schopna přizpůsobit se různým technologiím.

Nejjednoduššími manipulátory jsou **podavače**. Podavače jsou jednoduché mechanismy mající velký význam v automatizaci technologických procesů. Ve většině případů jsou součástí jiného stroje. Jsou jím řízeny a poháněny.

Synchronní PRaM, nazývané také teleoperátory, jsou dálkově řízené přímo pracovníkem, který má možnost reagovat na aktuální stav manipulátoru, a tedy vytváří spolu s manipulátorem uzavřenou regulační smyčku. Jedná se pouze člověkem řízený manipulátor, který slouží k zesílení silových a pohybových veličin. V dnešní době se používají teleoperátory např. pro manipulaci s nebezpečnými látkami nebo miniaturní teleoperátory v lékařství.

Programovatelné PRaM jsou řízené programovým ústrojím a jsou nezávislé na obsluhovaném stroji pohonem i funkcí. Tyto PRaM se dále dělí podle komplexnosti programu na PRaM s pevným programem, s proměnlivým programem a na kognitivní roboty.

Charakteristickým znakem PRaM s **pevným programem**, též zvané „jednoduché průmyslové manipulátory“, je neměnnost programu během činnosti manipulátoru, činnost je vykonávána stále stejně.

PRaM s **proměnlivými programy** omezení předchozí skupiny nemají. Disponují možností volby programu podle aktuální situace pracovní buňky a oboustranné komunikace

s nadřazeným (či podřadným) řídicím systémem. Tyto roboty jsou nejčastější při robotizaci výroby a označujeme je jako „průmyslové roboty“.

Poslední zmíněnou skupinou jsou **kognitivní roboty**, které jsou vybavené schopnostmi vnímání okolního prostředí a autonomní interakce s ním tak, aby bylo dosaženo vytyčeného cíle. Ze schopností, kterými tyto roboty disponují, lze vyzdvihnout například schopnost řešit nepředvídané události v prostředí, samostatně vykonávat plány činnosti v prostředí, komunikovat s ostatními činiteli působícími v prostředí včetně komunikace s člověkem). Kognitivní roboty s nejvyšší mírou schopností pak dokáží také formulovat vlastní cíle. U této skupiny robotů dochází v poslední době k velkým pokrokům díky vývoji umělé inteligence.

3.2.1 Průmyslové roboty

Průmyslové roboty lze dále dělit do generací podle míry „inteligence“ robotu: [8]

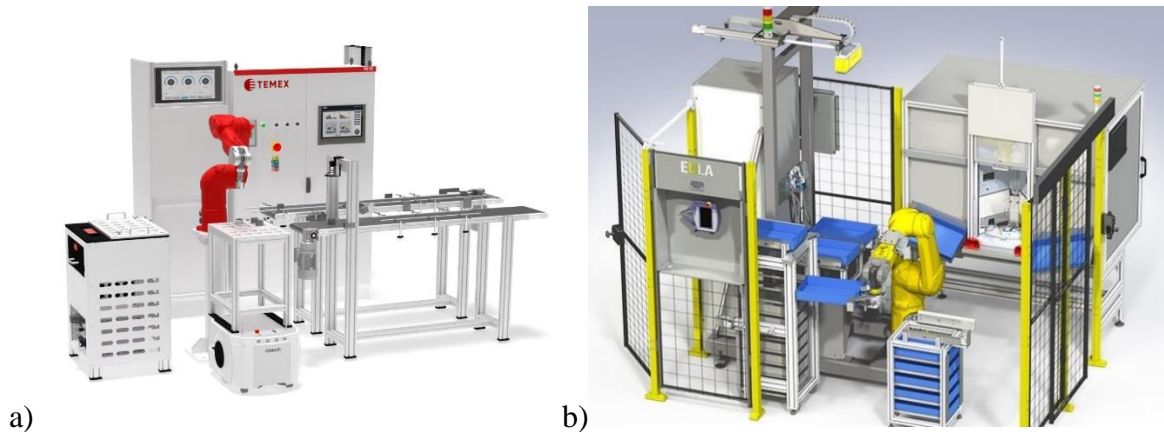
- **0. generace** robotů označuje PRaM bez zpětné vazby, veškeré příchozí signály (poruchy, signály z čidel) mají za následek zastavení činnosti a odpojení od zdroje energie. Pro resetování chyby a opětovné uvedení do provozu je nutný zásah obsluhy.
- **1. generace** robotů je již vybavena jednoduchou zpětnou vazbou. U této generace lze jednoduše přepínat mezi vytvořenými programy, což umožňuje použití robotu pro odlišné úkoly (obvykle však pouze operace označované jako PICK&PLACE, tedy uchop a umístí).
- roboty **2. generace** jsou schopny „vnímat“ – jsou vybaveny širokou škálou použitelných vnějších senzorů (optické, hmatové...) a vnitřních senzorů (snímač tlaku, polohy...). Jejich řízení vyžaduje řídicí počítač.
- **3. generací** robotů jsou inteligentní roboty, které se liší od robotů 2. generace složitostí řídicího systému, který obsahuje také prvky umělé inteligence. Příznačnou vlastností této generace robotů je schopnost učení a přizpůsobení během činnosti.

Volba generace robotu však velmi záleží na požadované funkci, jelikož čím vyšší generace, tím vyšší pořizovací náklady. Proto se i v dnešní době používají roboty nižších generací pro vykonávání jednoduchých opakujících se operací.

Aktuální technická harmonizovaná norma ČSN EN ISO 10218-1 definuje průmyslový robot jako *automaticky ovládaný, reprogramovatelný víceúčelový manipulátor, programovatelný ve třech nebo více osách, který může být buď pevný nebo mobilní, určený k použití v průmyslové automatizaci*. [9] Tato norma obsahuje požadavky na strojní zařízení typu robot, včetně přísných bezpečnostních opatření pro robot samotný, ale také pro pracoviště obsahující robot.

3.2.2 Kolaborativní roboty

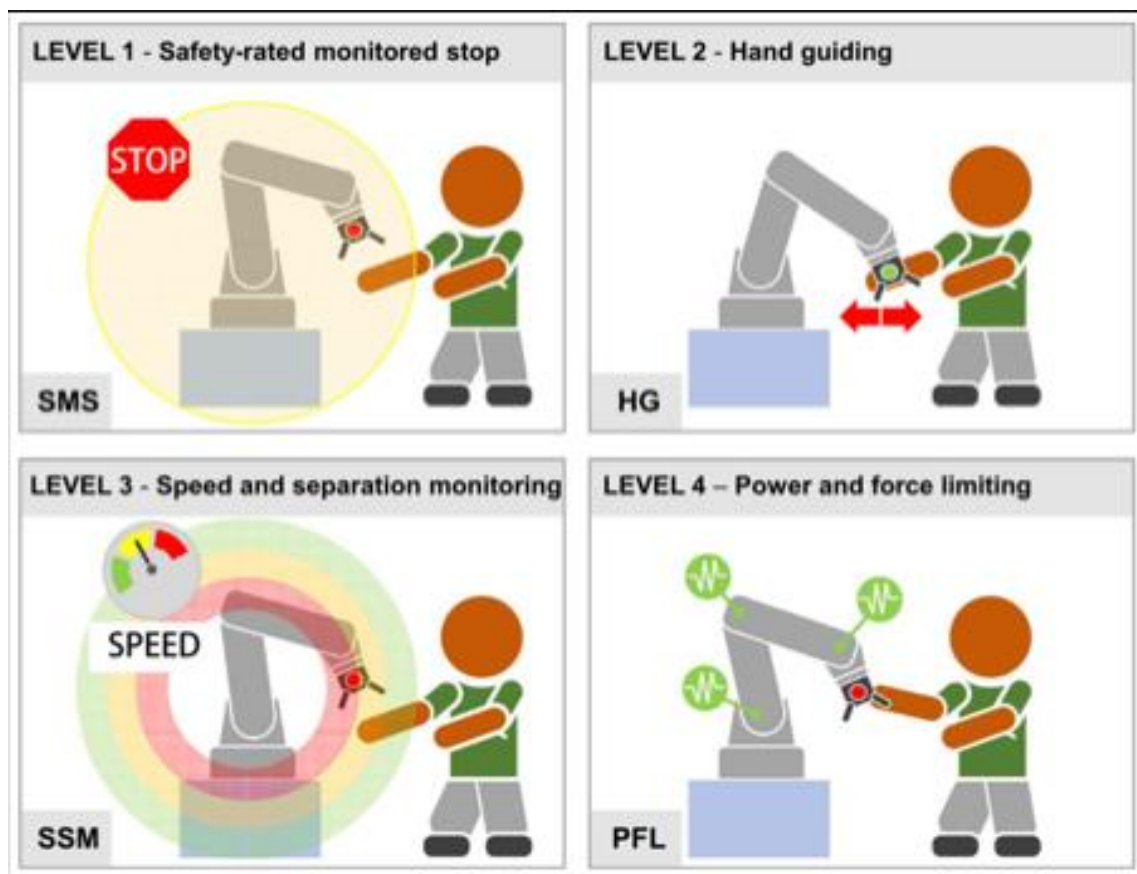
Kolaborativní roboty jsou zvláštní skupinou průmyslových robotů, které byly upraveny (navrženy) tak, aby byla možná bezprostřední kooperace mezi člověkem a robotem. Tato vlastnost s sebou nutně nese významné odlišnosti oproti standartním průmyslovým robotům. Rozdíly v robotických pracovištích jsou vidět na porovnání na Obr. 5.



Obr. 5 Porovnání robotických buněk – a) pracoviště s kolaborativním robotem, b) pracoviště se standartním průmyslovým robotem. [10; 11]

Z pohledu norem je největším rozdílem právě **bezpečnost** v okolí robotického pracoviště. Při použití standartního průmyslového robotu dříve citovaná norma ČSN EN ISO 10218-1 ukládá povinnost zajistit bezpečnost v okolí robotu v takové míře, že je přítomnost pracovníka při automatickém režimu robotu nemožná a robotické pracoviště musí být chráněno ochranným oplocením a bezpečnost potvrzována bezpečnostními senzory (světelná závora, LIDAR...). Kolaborativním robotům je činnost v přítomnosti osoby povolena díky technické specifikaci ISO/TS 15066, která definuje možnosti a rizika kolaborativní práce s roboty a udává hranice, při kterých je spolupráce dostatečně bezpečná. Technická specifikace z konstrukčního hlediska a použití kolaborativních robotů specifikuje [12]:

- důležité vlastnosti bezpečnostních řídicích systémů,
- faktory nutné k zohlednění při návrhu kolaborativních robotických systémů,
- integrované bezpečnostní systémy,
- pokyny pro implementaci uvedených technik spolupráce:
 - bezpečnostní monitorované zastavení (Obr. 6: level 1),
 - možnost ručního vedení (Obr. 6: level 2),
 - monitorování rychlosti a odstupu (Obr. 6: level 3) a
 - omezení výkonu a síly/momentu (Obr. 6: level 4).



Obr. 6 ISO/TS 15066 - techniky spolupráce. [12]

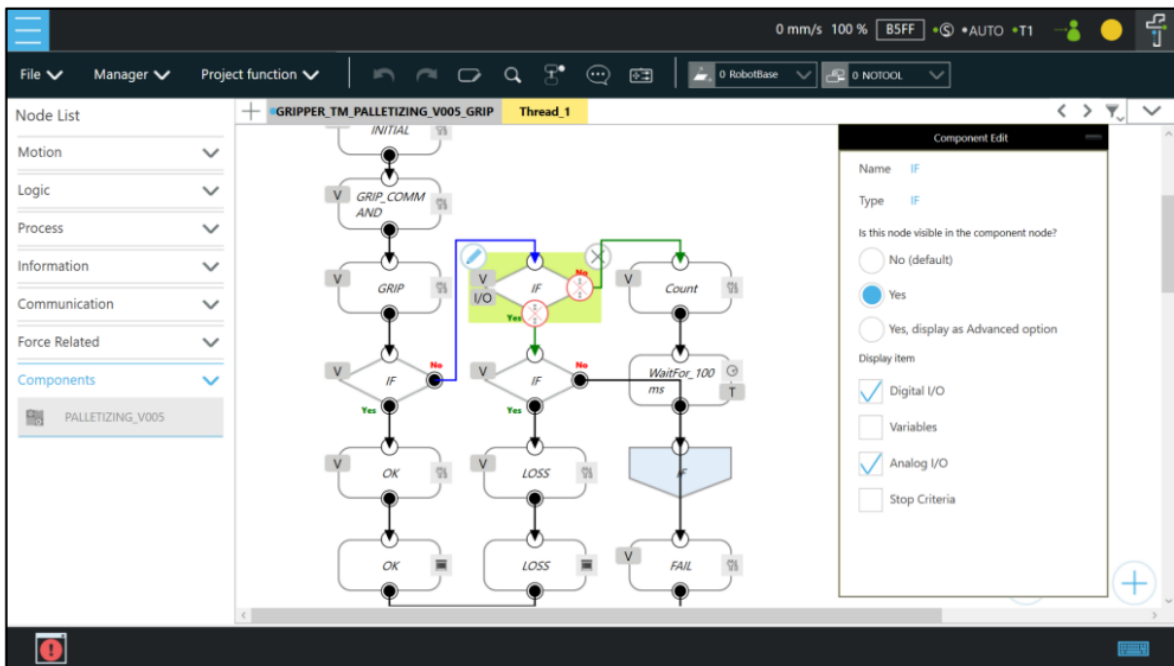
Z tohoto důvodu nemusí být u zařízení s technickou specifikací ISO/TS 15066 použity standartní ochranné kryty a ochranná zařízení. Úrovně omezení rychlostí a sil (momentů) vychází ze studie o prázích bolesti pro různé části lidského těl.

Pro snížení rizika zranění obsluhy bývají kolaborativní roboty vybaveny konstrukčními a bezpečnostními prvky:

- Rychlostní a momentové senzory umístěné v kloubech robotu, poskytují zpětnou vazbu do řídicího systému robotu. Při překročení nastavených limitů (náraz do překážky, do lidského těla) se robot „hned“ zastaví.
- Nízká hmotnost ramen robotu, a tedy nízká hybnost, díky které je robot schopen zastavit za kratší čas a zároveň způsobí menší náraz do překážky, do obsluhy.
- Pomalejší pohyb robotu stejně jako nízká hmotnost ramen robotu snižuje hybnost. Robot se pohybuje maximálně tak rychle, aby byl schopen „na místě“ zastavit.
- Zaoblené tvary robotu, díky kterým se při nárazu síla rozloží na větší plochu, vznikne tak menší tlak. Zároveň se tímto opatřením také snižuje riziko škrábnutí, či říznutí obsluhy.
- „Sensitive skin“ je povrchový kapacitní senzor na povrchu ramena robotu, který snímá přítomnost (přiblížování) objektu v blízkosti ramena robotu. Jestliže objekt překročí nastavený limit, řídicí systém robot zastaví.

- Kamery monitorující okolí robotu mohou sloužit k detekci přítomnosti obsluhy v okolí robotu. V případě, že v blízkosti robotu se obsluha nenachází, může robot fungovat při vyšších rychlostech. Jakmile se obsluha dostane do sledovaného prostoru, robot přejde do pomalejšího režimu. Druhým účelem těchto kamer může být hledání, rozpoznávání výrobních součástek a jejich následné podávání do rukou obsluhy.

Dalším podstatným rozdílem mezi běžnými průmyslovými roboty a kolaborativními roboty je způsob a náročnost **programování**. Tento rozdíl vychází hlavně z aplikací jednotlivých skupin. Průmyslové roboty jsou v naprosté většině případů implementovány do výrobní linky v automatizované výrobě. Vytváření programů pro robot probíhá v off-line prostředí, v prostředí simulace. Následně jsou do robotu programy nahrány a roboty se musí zprovoznit. Zprovoznění robotické linky trvá i několik týdnů. Kolaborativní roboty se naopak programují „online“, tj. přímo u robotu pomocí teach-pendantu nebo pomocí připojeného monitoru a klávesnice, přičemž pozice lze nastavit navedením robotu do dané pozice rukou a následně pozici zanést do programu stisknutím funkčního tlačítka přímo na těle robotu. Logický tok programu je ve většině případů reprezentovaný v podobě flow-chart. Díky intuitivnímu prostředí lze kolaborativní roboty jednoduše a rychle programovat. Jejich programování zvládne po krátkém zaškolení i obsluha neznalá programovacího jazyku na rozdíl od programování průmyslových robotů, které vyžaduje odborné znalosti v oblasti programování.



Obr. 7 Ukázka programovacího prostředí kolaborativního robotu. [13]

3.3 Koncové efekty

Koncovým efektem (pracovní hlavicí) se označuje ústrojí připevněné na konci kinematického řetězce PRA_M, díky kterému jsou PRA_M schopny vykonávat požadovanou funkci. PRA_M napolohuje koncový efektor do předepsané pozice s danou orientací a efektor vykoná svou činnost. Některé koncové efekty mohou potřebovat ke své funkci nejen

diskrétní pozici, ale taktéž pohyb po dané dráze. Koncových efektorů je mnoho typů, v základě je možné je rozdělit podle charakteristické operace [8]:

- vkládání objektů do pracovního prostoru výrobních zařízení a jejich vyjímání,
- mezioperační manipulace,
- technologické operace,
- kontrolní operace.

Podle charakteristických funkcí efektoru je lze rozdělit do těchto čtyř skupin:

- úchopné efektory,
- technologické, kontrolní a měřicí efektory,
- kombinované efektory,
- speciální efektory.

3.3.1 Úchopné hlavice

Úchopné hlavice zajišťují zachycení objektu při jeho manipulaci. Při zachycení objektu jsou vnější síly působící na objekt v rovnováze. Síly, díky kterým je objekt uchopen, se označují jako úchopné síly. Uchycení předmětu je ve většině případů spojeno s mechanickým kontaktem mezi uchopovací hlavicí a předmětem. Funkce těchto hlavic lze rozdělit na dva stavy: uchopení, uvolnění, přičemž úchopný mechanismus může být řízen přímo řídicím systémem manipulátoru, nebo na základě vnějšího působení. Podle toho rozlišujeme hlavice aktivní a pasivní. Úchopné hlavice se dělí na dvě skupiny podle uchopení předmětu na [8]:

- úchop s **oboustranným** mechanickým stykem s hlavicí, kdy jsou uchopovací síly vytvořeny mechanickými prostředky působícími proti sobě – jedná se o úchopné hlavice pohyblivými čelistmi,
- úchop s **jednostranným** mechanickým stykem s hlavicí, při kterém je využito gravitačních, magnetických a podtlakových sil.

Hlavní součástí úchopné hlavic jsou úchopné prvky, které zajišťují zachycení předmětu. Podle úchopné síly rozlišujeme tři základní druhy hlavic:

- mechanické,
 - pasivní (pevné podpěry, odpružené čelisti),
 - aktivní (pohyblivé čelisti s pohonem – elektromechanický, pneumatický) – Obr. 8 a),
- podtlakové,
 - pasivní (deformační přísavky),
 - aktivní (přísavky s řízeným vytvořením podtlaku pomocí ejektoru, nebo vývěvy) – Obr. 8 b),
- magnetické,
 - pasivní (permanentní magnet),
 - aktivní (elektromagnet, permanentní magnet s možností pohybu) – Obr. 8 c).



Obr. 8 Ukázky uchopovacích hlavic – a) mechanická [14], b) podtlaková [15], c) magnetická. [16]

3.3.2 Technologické hlavice

Technologické hlavice obsahují nástroj (sadu nástrojů) potřebný pro danou technologickou operaci, kterou musí být schopný robot vykonávat sám. Typickými operacemi jsou:

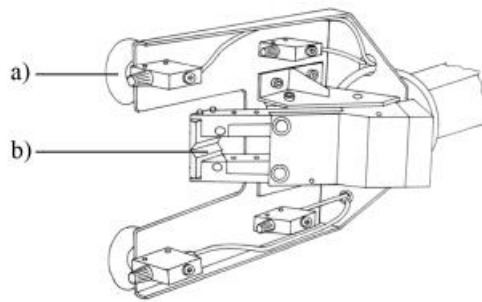
- svařování (tavné, elektrické, odporové) – viz Obr. 9,
- stříkání ochranných a nátěrových hmot,
- obrábění (frézování, broušení...),
- montážní práce.



Obr. 9 Efektor pro odporové svařování. [17]

3.3.3 Kombinované hlavice

Kombinované hlavice jsou konstruovány tak, aby mohly plnit více funkcí v rámci jedné konstrukce (např. uchopovací funkce spolu s technologickou funkcí). Na Obr. 10 je zobrazena kombinovaná hlavice, která je určena k manipulaci pomocí podtlakových přísavek (označeno a) a k technologické operaci odstrižení vtoku výlisku (označeno b)).



Obr. 10 Kombinovaná hlavice – a) podtlakové přísavky, b) pneumaticky ovládané nůžky. [8]

3.3.4 Speciální výstupní hlavice

Jedná se o koncové efekty, které plní funkce, které nelze při dodržení systémového přístupu zařadit do žádné z výše uvedených skupin. Jedná se např. o nekonvenční grippery, speciální efekty používané v medicíně nebo kamerové efekty.



Obr. 11 RGB kamera. [18]

4 SYSTÉMOVÝ ROZBOR PRÁCE

Problematickou, jejíž částí se zabývá tato diplomová práce, je automatizace sběru rostlinných vzorků z listů rostlin ve sklenících nebo růstových komorách a jejich následná manipulace do připravených nádob. Práce se zaměřuje pouze na efektor, který bude namontován na robotickém rameni, které jím bude manipulovat.

4.1 Popis činnosti

Robot umístí koncový efektor na místo odběru vzorku z listu, následně efektor vykoná akci pro oddělení vzorku. Vzorek listu zůstává v efektoru, ten je robotem přesunut nad volnou nádobu a poté je vzorek vložen do této nádoby. Po dokončení sběru vzorků, nebo po naplnění kapacity vzorků v připravených nádobách u robotu, jsou tyto nádoby vyloženy v příslušném místě. Obsluha tyto nádoby odebere a připraví vzorky pro požadovaná měření (chemické analýzy, vysoušení...).

Jednotlivé kroky činnosti efektoru lze tedy vyjádřit následovně:

1. Odebrání kruhového vzorku z listu rostliny,
2. Přenesení vzorku nad určenou nádobu,
3. Odložení vzorku.

4.2 Formulace cílů a řešení

Tato diplomová práce se dojí k následujícím cílům:

- systémový rozbor řešené problematiky,
- vytvoření více konstrukčních návrhů,
- výběr nejlepšího konstrukčního návrhu dle multikriteriální analýzy,
- detailní konstrukční zpracování vybraného návrhu,
- výkresová dokumentace,
- ekonomické zhodnocení,
- závěr a doporučení pro praxi.

Ze zadání diplomové práce vyplývá, že je třeba vybrat vhodný způsob extrakce vzorku z listu a navrhnout pro tento úkol vhodný koncový efektor. Ten musí být schopný vzorek nejen vyjmout, ale také ho přemístit do určené nádoby.

4.3 Popis soustavy

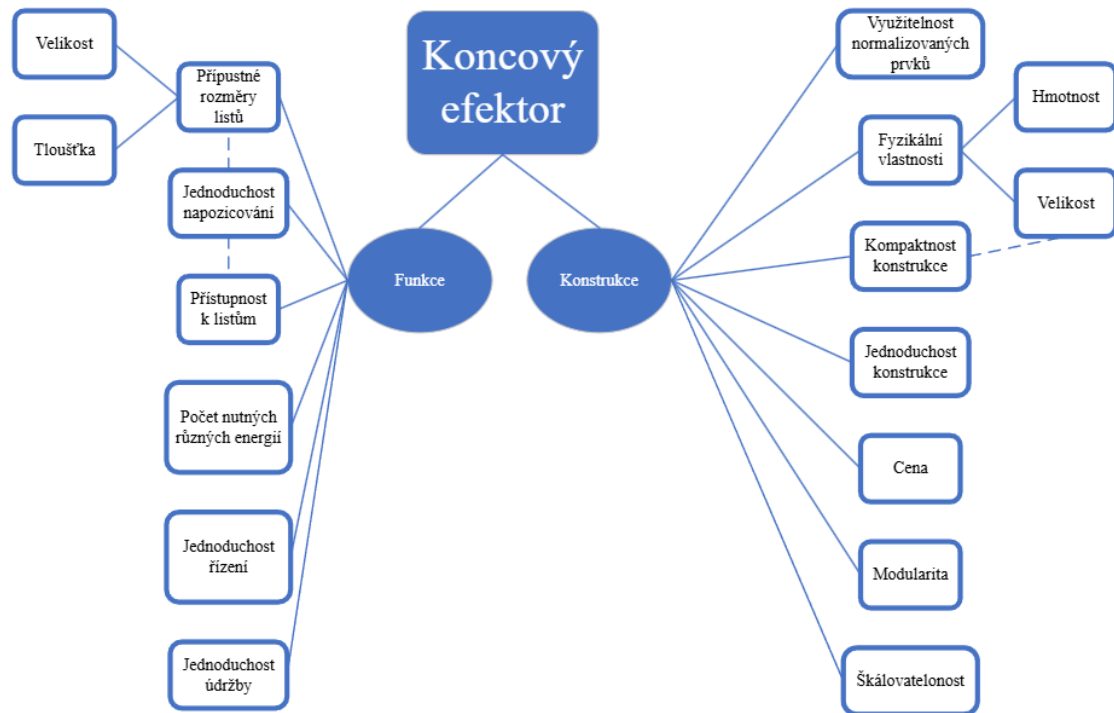
Koncový efektor se skládá z příruby pro upevnění na přírubu robotu, mechanismu pro odběr vzorků a těla, které spojuje všechny součásti. K nástroji je přivedena energie (pneumatická, elektrická pro ovládání mechanismu a zajištění manipulace se vzorkem).

4.4 Systém podstatných veličin

Systém podstatných veličin je základním kamenem pro aplikaci systémového přístupu. V systému podstatných veličin by měly být uvedeny veškeré podstatné veličiny interagující s koncovým efektozem, které ovlivňují i výslednou kvalitu požadovaného procesu. Z těchto

veličin se dále vychází při výběru parametrů pro multikriteriální výběr nejlepší varianty tak, jak bude uvedeno v následujících kapitolách.

Na Obr. 12 je vyobrazena myšlenková mapa s podstatnými veličinami. Tyto veličiny jsou rozděleny na dvě základní skupiny – na veličiny týkající se samotné konstrukce koncového efektoru a na veličiny ovlivňující funkci efektoru, tedy odběr vzorku z listu. Některé veličiny jsou spojeny přerušovanou čarou, která označuje souvislost mezi jednotlivými veličinami.

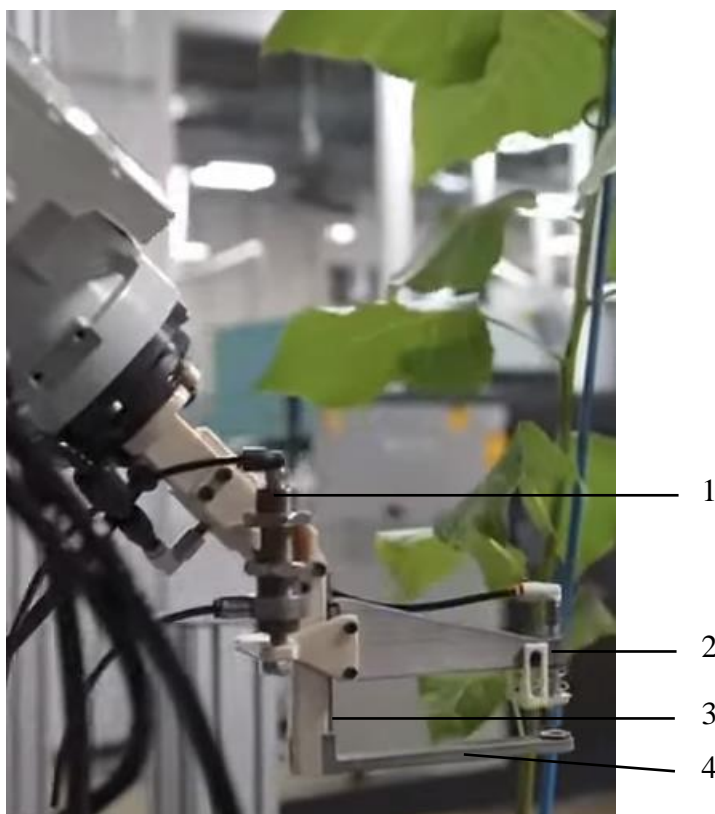


Obr. 12 Myšlenková mapa podstatných veličin.

5 SOUČASNÝ STAV POZNÁNÍ

V době vypracovávání této diplomové práce byl objeven pouze jeden projekt, který se zabývá automatizací odběru rostlinného vzorku z listu pomocí robota. Jedná se o projekt kanadské laboratoře *Energy's Oak Ridge National Laboratory*, který nese název SMART Plant 1.0. [19]

SMART Plant 1.0 je ucelený projekt z roku 2021, který je schopen vykonat celý proces odebrání vzorku. Pro provedení procesu odběru je rostlina umístěna do určeného prostoru před robot, kde je následně naskenována pomocí více metod. Vznikne tak počítačový prostorový model, který nese také informace o barvách. Poté jsou data zpracována a systém tedy získá informace o tvarech listů, jejich velikosti, barvě a jejich pozicích. Po získání přesné pozice a orientace listu přisune robotické rameno odebírací nástroj. Tento nástroj vychází z konstrukce děrovačky na papír, jedná se tedy o střížník, který se vsune do otvoru – střížnice, přičemž tak vznikne střížná hrana a vyrazí z listu kruhový vzorek. Tento lineární pohyb je vykonán pomocí lineárního pneumotoru, který pohybuje s horní čelistí nástroje obsahující střížník. Odebraný vzorek je ke střížnici přisátý podtlakem. Spodní čelist nástroje se opět vrátí do původní otevřené polohy a robot umístí nástroj nad petriho misku. Pro upuštění rostlinného vzorku je střížník i se vzorkem, opět zasunut do otvoru a následně je vzorek uvolněn přivedením pulzu stlačeného vzduchu.



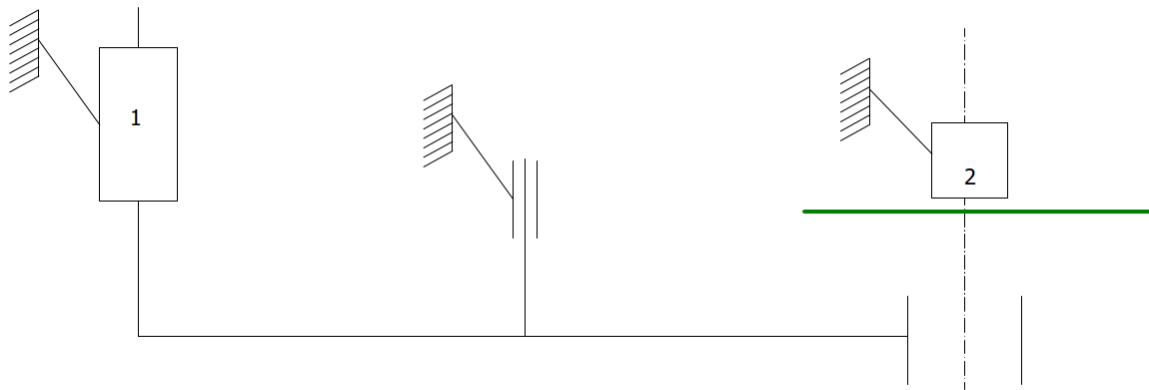
Obr. 13 Efektor laboratoře *Energy's Oak Ridge National Laboratory*. [19]

Na Obr. 13 je zobrazen zmíněný efektor společně s ukazateli na jednotlivé důležité prvky nástroje: 1 – lineární pneumotor, 2 – horní pohyblivá čelist se střížníkem, 3 – lineární

vedení pro pohyblivou čelist, 4 – spodní statická čelist s otvorem – střížnicí. Jak je patrné z obrázku, zdroj stlačeného vzduchu, případně podtlaku, není součástí koncového efektoru.

6 NÁVRHOVÉ VARIANTY

6.1 Varianta A

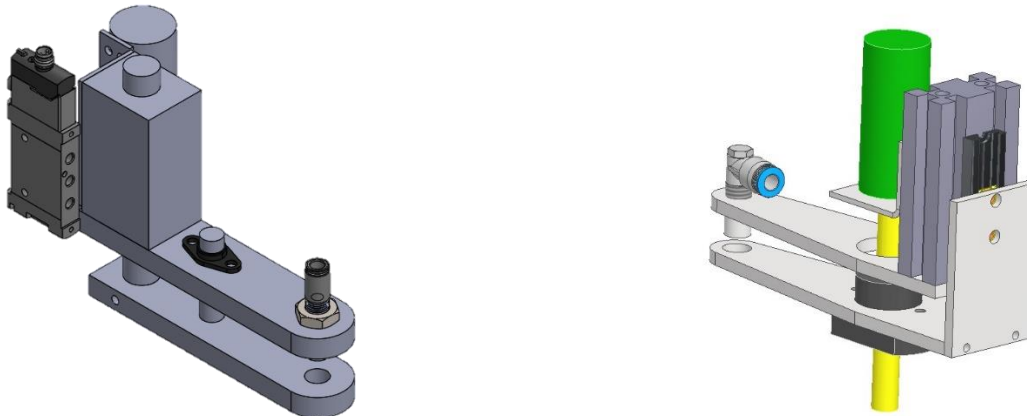


Obr. 14 Varianta A – kinematický řetězec.

Tato varianta vychází z objeveného řešení laboratoře Oak Ridge popsaného v předchozí kapitole. Základem efektoru je horní nepohyblivá čelist, na které jsou upevněny ostatní části nástroje. Dolní, pohyblivá, čelist je s ní spojena ústrojím zajišťujícím její pohyb (Obr. 14 – 1). Rotační pohyb je jistěn translační vazbou přibližně ve třetině délky čelistí, aby byla zachována co největší možnost nasunutí nástroje na list (reprezentovaný na obrázku zelenou čarou). Vyražení vzorku je provedeno zasunutím střížníku (Obr. 14 – 2) na horním rameni do střížnice na rameni spodním. Na střížníku je našroubována fitinka pro přivedení stlačeného vzduchu pro odložení vzorku, či podtlaku pro udržení vzorku v nástroji. Zdrojem stlačeného vzduchu je malý vzduchový kompresor umístěný vedle elektromagnetu. Oba vývody jsou připojeny do elektromagnetického ventilu umístěného naproti vzduchovému kompresoru. Tento ventil přepíná, který z vývodů kompresoru je spojen se střížníkem, tedy jestli je do střížníku přiváděn podtlak, nebo přetlak.

Akční mechanismus (Obr. 14 – 1) je zde ale nahrazen elektromagnetickou cívkou, případně kinematickou dvojicí matice a šroubu poháněného elektromotorem, která umožní větší prostor mezi čelistmi při otevřeném stavu. Potřebné pneumatické médium pro udržení vzorku a následné jeho odložení zajišťuje malý vzduchový kompresor na těle efektoru, čímž se stává nezávislým na vnějším přívodu stlačeného vzduchu.

Na následujícím obrázku jsou dva modely této varianty. Na obrázku vlevo je varianta s elektromagnetem včetně jednoduché reprezentace kompresoru na odvrácené straně efektoru a elektromagnetickým ventilem. Zamezení rotace u této varianty zajišťuje plastové kluzné vedení. Na pravém obrázku je zobrazena varianta s kinematickou dvojicí matice – šroub (žlutá a černá komponenta), rotačnímu pohybu spodní čelisti zde brání lineární kluzné vedení v zadní části efektoru.

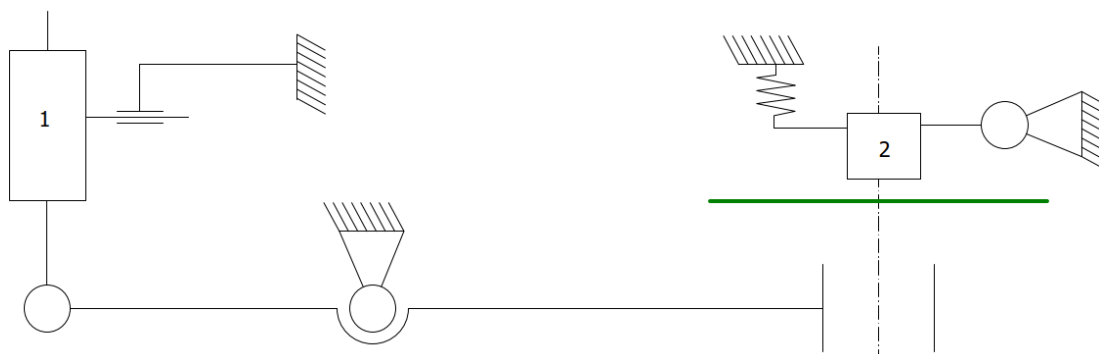


Obr. 15 Modely varianty A.

Nevýhodou této varianty je nutnost umístění listu mezi čelisti a malý zdvih elektromagnetu. Z těchto vlastností vyplývá, že ustavit takovýto nástroj do vhodné polohy bude vyžadovat nejen velmi přesné informace o pozici a orientaci vybraného listu, ale také informace o okolí tohoto listu. Další nevýhodou je poměrně vysoký proud nutný k napájení elektromagnetu.

Princip varianty A: Po získání informace o pozici listu a jeho natočení je efektor umístěn mimo list, tak aby střední rovina mezi čelistmi byla koplanární s proloženou rovinou listu. Efektor je nasunut na list. Dojde k vytvoření podtlaku ve střížníku a následnému stlačení čelistí proti sobě, čímž dojde k odebrání vzorku. Čelisti jsou opět rozevřeny, efektor je v rovně proložené povrchem listu vysunut mimo tento list a následně umístěn nad určenou nádobu. Čelisti jsou opět stlačeny a podtlak ve střížníku je nahrazen přetlakem, který vzorek vyfoukne do nádoby. Nakonec je přetlak ve střížníku zrušen, čelisti jsou uvedeny opět do otevřené pozice.

6.2 Varianta B



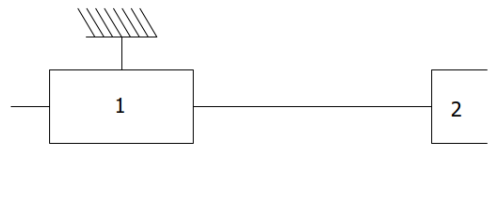
Obr. 16 Varianta B – kinematický řetězec.

Varianta B využívá principu páky. Horní čelist je opět pevná, střížný pohyb vykonává spodní čelist pomocí kyvného pohybu kolem čepu umístěného přibližně ve třetině délky spodní čelisti. Akčním mechanismem může být opět elektromagnet, či elektromotor společně s kinematickou dvojicí (šroub – matice, ozubené kolo – hřeben). Díky mechanismu páky je však získán větší prostor pro manipulaci efektoru na list (reprezentovaný na obrázku zelenou čarou). Akční člen musí být však uložen pohyblivě, jelikož čep spojující spodní čelist a akční mechanismus vykonává pohyb po oblouku. Ze stejného důvodu musí být také střížník (Obr. 16 – 2) uložen pohyblivě. To umožňuje čep, přičemž udržení plunžru v základní pozici je zajištěno pružinou. Odebraný vzorek drží v nástroji pomocí podtlaku a při odkládání je z nástroje vyfouknut přetlakem. Vzduchové médium je dodáváno, stejně jako u varianty A pomocí malého kompresoru a elektromagnetického ventilu, který ve střížníku vytváří podtlak, nebo přetlak podle aktuální činnosti efektoru.

Princip odebrání vzorku touto metodou je zcela stejný jako u varianty A. Změnou je pouze nahrazení lineárního pohybu střížné části, což ovšem na funkci nemá vliv.

Výraznou nevýhodou této varianty je složitá konstrukce kvůli pohybu střížníku po kružnici. Tento pohyb také zapříčiňuje změnu střížné vůle v závislosti na zdvihu. Ze stejného důvodu nesmí být ani akční mechanismus uložen pevně.

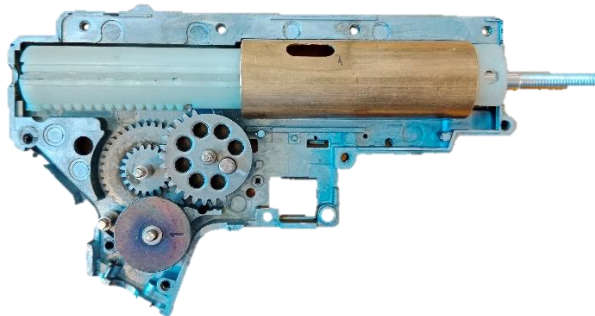
6.3 Varianta C



Obr. 17 Varianta C – kinematický řetězec.

Varianta C je zcela odlišná od předchozích variant jakožto i od řešení laboratoře Oak Ridge. Základem tohoto efektoru je mechanismus (zjednodušeně znázorněný objektem 1 na Obr. 17) umožňující prudké vysunutí válce s ostrou hranou (Obr. 17 – 2), čímž dojde k vyražení kruhového rostlinného vzorku, přičemž nehybnost listu je zajištěna díky své setrvačnosti a přidržení přísavkami, mezi kterými prochází razící válec. Udržení a odložení listu je opět zajištěno pomocí stlačeného vzduchu či podtlaku vytvořeném stejně jako v předešlých řešeních malým kompresorem společně s elektromagnetickým ventilem.

Výchozím akčním mechanismem pro tuto variantu je mechanismus užívaný u airsoftových zbraní. Elektromotor pohání ozubený převod složený ze tří ozubených kol, kdy poslední kolo natahuje píst proti pružině pomocí kinematické dvojice ozubené kolo – hřeben a má ozubení pouze na části obvodu. Zpětný pohyb soukolí je jištěný západkou. Jakmile se poslední ozubené kolo dostane do natočení, kde již není ozubené spojení s pístem, píst je pružinou vystřelen vpřed. Unikající vzduch při stlačení udělí hybnou energii plastové kuličce. Při použití tohoto mechanismu pro účel odebírání vzorku je na píst připevněno prodloužení, na jehož konci se nachází razící válec.



Obr. 18 Varianta C – akční mechanismus.

Princip funkce tohoto efektoru je následující: Po získání informace o pozici listu a jeho natočení je efektor umístěn kolmo k listu do vzdálenosti větší než vzdálenost pro odběr vzorku. Odebírací válec je zatažen pomocí ozubeného soukolí a elektromotoru, čímž je stlačena pružina. Následně se celý efektor posouvá vpřed, dokud v přísavkách nevznikne vakuum přikrytím listem. Poté je vytvořen podtlak v odebíracím válci a dojde k pootočení posledního ozubeného ozubeného kola do pozice, aby ozubení nebránilo vysunutí pístu a ten je díky uvolnění pružinou vystřelen vpřed. Tímto je vzorek oddělen od listu. Efektor je povytažen z listu a umístěný kolmo nad místo, kam má být odebraný vzorek umístěn. Elektromagnetický ventil je přesunut do pozice, aby podtlak v odebíracím válci byl nahrazen přetlakem, čímž je vzorek upuštěn.

7 MULTIKRITERIÁLNÍ ANALÝZA

Z variant navržených v předchozí kapitole je teď potřeba vybrat variantu, která se bude následně detailně rozpracovávat. Pro výběr nejlepší varianty je použita multikriteriální analýza, která je nástrojem systémového přístupu. Touto analýzou je vyhodnocena nejlepší varianta na základě kritérií, které jsou voleny autorem této analýzy. Každé z těchto kritérií má určitou váhu, součet těchto vah bývá roven jedné. Váha kritéria určuje, jak důležitý je daný parametr pro autora při výběru dále rozvíjeného řešení. Pokud by bylo žádáno potlačit subjektivitu určení těchto vah a parametrů, a zvýšit tak přesnost analýzy, je možné zvýšit počet respondentů se značnými zkušenostmi a vědomostmi v daném oboru.

7.1 Stanovení parametrů multikriteriální analýzy a vah významnosti

Pro potřeby posouzení konstrukčních variant a výběru nejlepší z nich pomocí multikriteriální analýzy byl zvolen výpočet hodnoty variant. Jedná se o metodu, která umožní seřadit varianty na základě součtu hodnot, které vznikly součinem váhy daného kritéria a jeho bodového ohodnocení u příslušné varianty. Pro určení vah kritérií byla zvolena „metoda párového srovnání dle Dobřického“ [20]. Metoda bude popsána při vykonávání jednotlivých kroků.

V prvním kroku je třeba zvolit kritéria pro multikriteriální analýzu. Při výběru těchto kritérií, je vycházeno z myšlenkové mapy podstatných veličin uvedené na Obr. 12. Vybrané parametry jsou vypsány v následující tabulce společně s jejich označením pro usnadnění práce během analýzy.

Tab. 1 Vybraná kritéria pro multikriteriální analýzu.

Označení parametru	Název parametru
P1	Využitelnost normalizovaných prvků
P2	Jednoduchost konstrukce
P3	Škálovatelnost
P4	Jednoduchost údržby
P5	Počet nutných energií
P6	Jednoduchost napozicování

Druhým krokem je určení vah pro jednotlivá kritéria. V tomto kroku se využije uvedená metoda párového srovnání dle Dobřického. Tato metoda je rozdělena na několik částí, kterými je třeba postupně projít. První částí je vzájemné porovnání kritérií mezi sebou, posouzení je pouze kvalitativní, tedy který parametr je důležitější. Postup je takový, že jsou parametry vypsány do sloupce a následně se parametr v daném řádku porovnává s každým ostatním a zapisuje se do příslušné buňky důležitější z nich. Takto vznikne trojúhelníková matice. Na konec této části se spočítá počet umístění jednotlivých parametrů ve vzniklé matici a určí se jejich pořadí (viz Tab. 2, poslední sloupec).

Tab. 2 Párové porovnání.

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	Suma	Pořadí
P1	P1	P1	P3	P1	P5	P6	3	4.
P2		P2	P3	P4	P2	P6	2	6.
P3			P3	P4	P5	P6	3	4.
P4				P4	P5	P4	4	2.
P5					P5	P6	4	2.
P6						P6	5	1.

Ve druhé části párového srovnání dle Dobřického jsou parametry opět vypsány do sloupce tabulky podle jejich získaného pořadí v předchozí části. Poté se parametry opět hodnotí mezi sebou, hodnotí se však, jak jsou si dva různé parametry „blízké“. Bodové hodnocení tohoto vztahu je uvedeno v Tab. 3. Tyto hodnoty jsou opět pro každý parametr sečteny a zapsány na konec řádku. Vycházejí z těchto hodnot se za použití vzorce (1) vypočítají váhy významnosti q_j pro jednotlivé parametry, kde BHV_j je bodová hodnota významnosti daného parametru, k je celkový počet parametrů. Součet vah významnosti je roven 1. Jednotlivá porovnání včetně vypočtených vah významností jsou uvedena v

Tab. 4.

$$q_j = \frac{BHV_j}{\sum_{j=1}^k BHV_j} \quad (1)$$

Tab. 3 Bodové hodnocení vztahu mezi parametry.

Slovní hodnocení	Bodové hodnocení
Blízko	1
Středně	2
Daleko	3

Tab. 4 Stanovení vah významnosti.

	P6	P5	P4	P3	P1	P2	Součet	Váha q_j
P6	1	3	3	3	3	2	15	0,38
P5		1	2	3	2	3	11	0,28
P4			1	2	1	1	5	0,13
P3				1	2	2	5	0,13
P1					1	1	2	0,05
P2						1	1	0,03

Touto částí již byly získány váhy významnosti pro jednotlivé parametry a lze přistoupit ke třetímu kroku multikriteriální analýzy, kterým je samotné hodnocení jednotlivých variant.

7.2 Hodnocení variant

U každé varianty jsou jednotlivé parametry ohodnoceny, jak splňují požadavky, podle škály bodového hodnocení uvedené v Tab. 5. Následně jsou vynásobením váhou parametru

získané vážené hodnoty a jejich součtem je získáno ohodnocení dané varianty. Výsledky tohoto kroku jsou uvedeny v následujících tabulkách.

Tab. 5 Bodové hodnocení parametrů.

Slovní hodnocení	Bodové hodnocení
Nejvíce vyhovující	5
Více vyhovující	4
Průměrně vyhovující	3
Méně vyhovující	2
Nejméně vyhovující	1

Tab. 6 Souhrnné hodnocení variant.

Označení parametru	Název parametru	Varianta A	Varianta B	Varianta C
P1	Využitelnost normalizovaných prvků	4	2	3
P2	Jednoduchost konstrukce	5	3	3
P3	Škálovatelnost	3	4	5
P4	Jednoduchost údržby	5	3	4
P5	Počet různých energií	5	5	5
P6	Jednoduchost napozicování	4	4	5

Tab. 7 Hodnocení varianty A.

Varianta A	Hodnota	Váha q_j	Vážená hodnota
P1	4	0,05	0,21
P2	5	0,03	0,13
P3	3	0,13	0,38
P4	5	0,13	0,64
P5	5	0,28	1,41
P6	4	0,38	1,54
Součet			4,31

Tab. 8 Hodnocení varianty B.

Varianta B	Hodnota	Váha q_j	Vážená hodnota
P1	2	0,05	0,10
P2	3	0,03	0,08
P3	4	0,13	0,51
P4	3	0,13	0,38
P5	5	0,28	1,41
P6	4	0,38	1,54
Součet			4,03

Tab. 9 Hodnocení varianty C.

Varianta C	Hodnota	Váha q_j	Vážená hodnota
P1	3	0,05	0,15
P2	3	0,03	0,08
P3	5	0,13	0,64
P4	4	0,13	0,51
P5	5	0,28	1,41
P6	5	0,38	1,92
Součet			4,72

7.3 Výsledky multikriteriální analýzy

Výsledná hodnocení koncepčních variant jsou pro přehlednost zapsány do Tab. 10. Rozdíly v hodnocení jednotlivých variant nejsou nikterak výrazné, což značí, že jsou varianty srovnatelné a jejich výhody jsou vyvažovány nevýhodami oproti ostatním návrhům. Nicméně z multikriteriální analýzy vychází jako nejlepší varianta C.

Tab. 10 Výsledné hodnocení koncepčních variant.

Koncepční varianta	Celkové vážené hodnocení	Výsledné pořadí variant
Varianta A	4,31	2.
Varianta B	4,03	3.
Varianta C	4,72	1.

8 KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

Po výběru konceptu konstrukční varianty bylo možné přistoupit k detailní konstrukci. Před návrhem celého efektoru bylo nejprve třeba ověřit funkčnost tohoto konceptu. V první části konstrukčního řešení byl tedy zanedbán návrh mechanického a elektrického připojení k robotu. Práce se v této části zaměřila pouze na akční mechanismus a pneumatický obvod.

8.1 Ověření funkčnosti konceptu

8.1.1 Varianta C.1

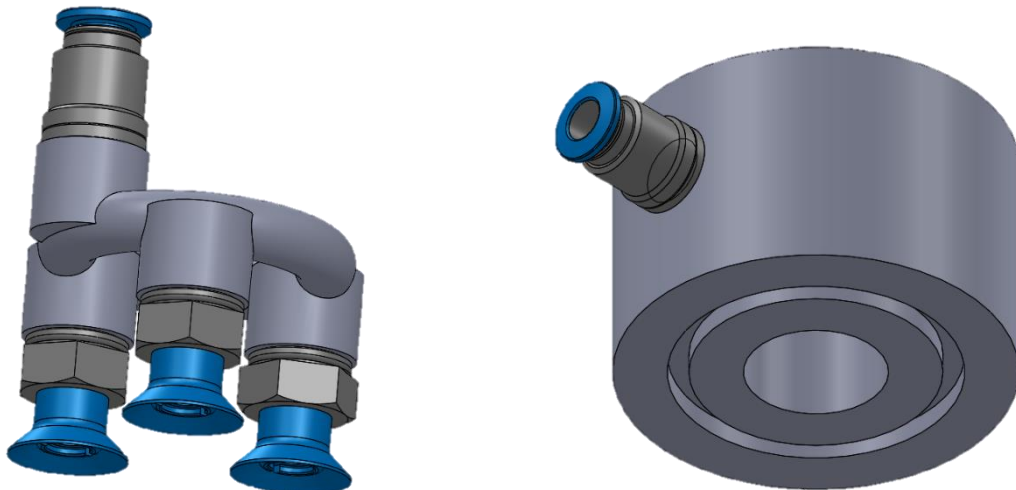
Mechanismus používaný jako upgrade u airsoftových pušek (mechabox pro M4, CYMA [21]) byl upraven pro potřeby testování následujícím způsobem. Byla odstraněna trubice urychlující vzduch ze vzduchového pístu a těsnící čelo pístu bylo nahrazeno hliníkovou kulatinou opatřenou na koncích závity (pro upevnění tyče k pístu a razného elementu k tyči). Dráha pístu byla zkrácena na 100 mm pomocí hliníkového distančního kroužku. Byla demontována původní elektronická část včetně elektromotoru, jehož funkce byla nahrazena ručním natahováním pro zjednodušení ovládání mechanismu. Razným elementem byl tenkostěnný nerezový válec se zkosením cca 30° pro vytvoření rezné hrany. Vnitřní části upraveného akčního mechanismu lze vidět na Obr. 19, razný element zde není osazený.



Obr. 19 Upravený akční mechanismus.

Dále sestavu doplnil přídržný člen listu. Jako tento člen byly navrženy dvě varianty. První variantu tvořily tři standartní přísavky (VAS-15-1/8-PUR-B) našroubované do kruhového dutého těla, které rozvádí vytvořený podtlak jedním ejektorem (VN-10-L-T3-PQ2-VQ2-RO1-A) – Obr. 20 a).

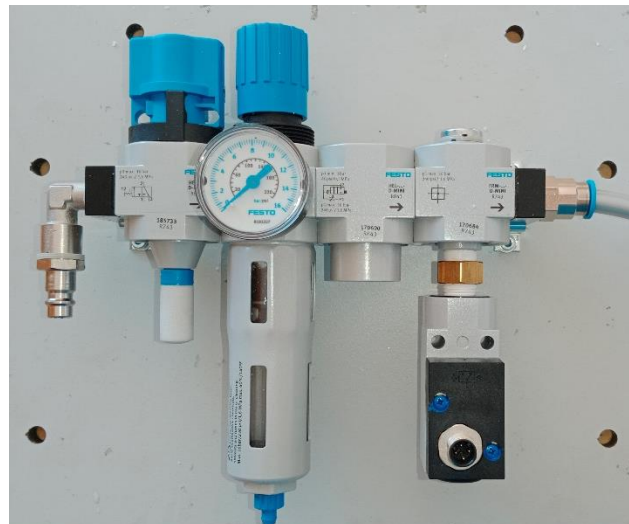
Druhou variantou byl plastový válec vyrobený metodou 3D tisku. Jeho středním otvorem prochází razný element a ve spodní části je dutina ve tvaru mezikruží, do které je přiveden podtlak tvořený stejným ejektorem jako u první varianty – Obr. 20 b). Tato druhá varianta měla za cíl zvětšit přísávanou plochu a tím zvýšit přídržnou sílu. Pro potřebu testování byl použit místo malého kompresoru, které je v konceptu navrženo jako součást efektoru, centrální rozvod stlačeného vzduchu, do kterého byla připojena jednotka pro úpravu vzduchu (viz Obr. 21) a výše zmíněný ejektor. Tato jednotka se skládá z hlavního uzávěru, redukčního ventilu s filtrem, ventilu s pomalým náběhem tlaku a tlakovým spínačem, který v této části není používán.



a)

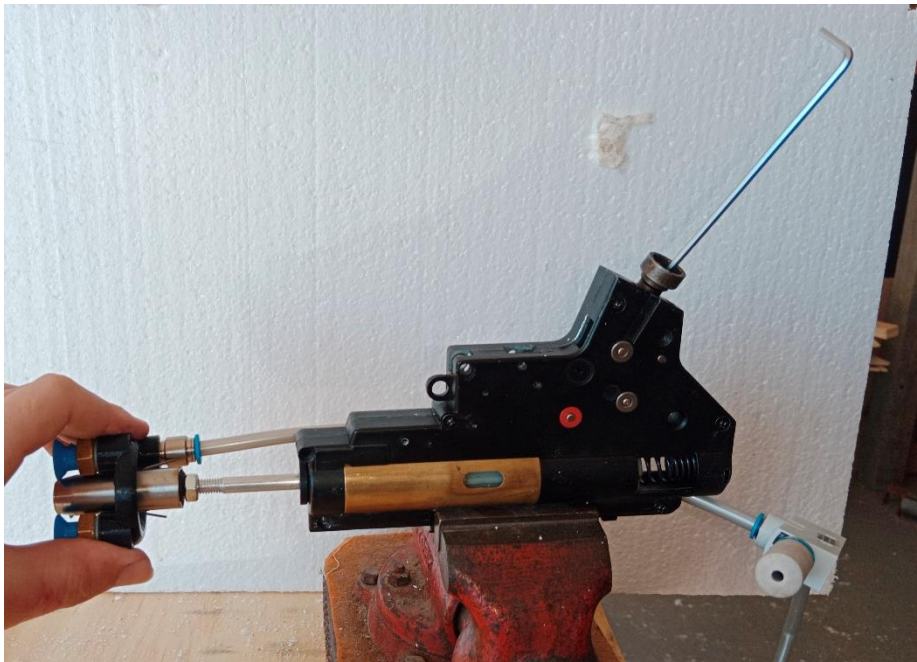
b)

Obr. 20 První varianty přídržného elementu.



Obr. 21 Jednotka pro úpravu vzduchu.

Testování bylo provedeno s listy různých tloušťek a velikostí (listy muškátu vzpřímeného, papriky seté a kalisie voňavé). Vstupní tlak do ejektoru byl nastaven na hodnotu 4 bar, při které je, podle katalogu výrobce daného ejektoru [22], maximalizována velikost podtlaku (0,85 bar). Testovací sestava je na Obr. 22. Přídržný element byl vždy umístěn tak, aby raznice procházela jeho středem a konec dráhy razného elementu byl přibližně 1 cm za plochou listu. List byl vždy přikládán k přísavnému elementu vrchní stranou.



Obr. 22 Testovací sestava pro variantu C.1.

Postup testování:

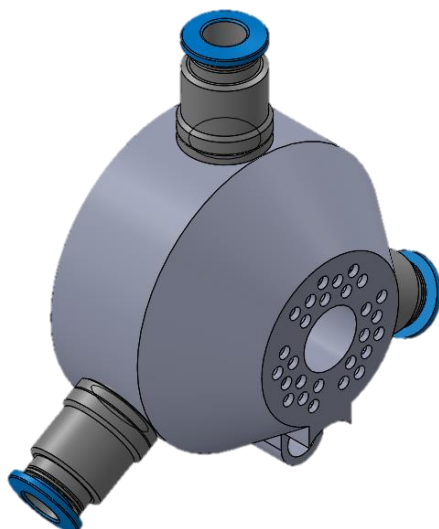
1. Natažení akčního členu,
2. Přísátí listu a umístění listu před razný element,
3. Uvolnění akčního členu, tedy vystřelení razného elementu do listu,
4. Vypnutí podtlaku v přísavkách.

Opakovaným testováním bylo dosaženo následujících dílčích závěrů:

- Pokud byl list proražen (nepovedlo se prorazit dužnatý list kalisie), vzorek stále zůstává z části spojen se zbytkem listu, odebrání tedy nebylo úspěšné.
- Pro udržení listu na odebrací pozici a zároveň proražení listu je třeba poměrně velká síla, tedy velký vstupní tlak ejektoru.
- Při použití přísavky ve tvaru mezikruží dochází u tenkých listů k výrazné deformaci, případně k poničení listu.
- Při uvolnění listu z části přísavných elementů je ztracena celková přídržná síla, proto je třeba doplnit pro každý přídržný element vlastní ejektor a mezikruží rozdělit na více segmentů.

8.1.2 Varianta C.2

Na základě poznatků z prvních testů byla vytvořena druhá varianta přídržného elementu – Obr. 23. Jako výchozí stav byla zvolena přísavka ve tvaru mezikruží. Mezikruží bylo rozděleno na tři samostatné části, podtlak bude tvořen pro každou část samostatným ejektorem. Pokud se tedy vyskytne netěsnost při přísátí listu v jednom segmentu, zbylé dva stále drží list původní silou. Dále, aby se zabránilo nadměrné deformaci listu přísátím, byl sací otvor mezikruží nahrazen děrovaným vzorem. Tímto způsobem se výrazně zmenšily jednotlivé sací otvory, nicméně celková plocha byla z velké míry zachována.



Obr. 23 Příkladný element - 2. verze.

Druhou úpravou oproti předchozí variantě bylo přivedení podtlaku do raznice, viz Obr. 24. To by mělo pomoci k přidržení z části již vyraženého vzorku a jeho následnému celkovému vyrazení – vzorek by se měl zcela oddělit, a ne se pouze „vyklopit“. Zároveň tento podtlak bude sloužit k udržení odebraného vzorku v nástroji při přenosu vzorku do petriho misky. Pro tento účel byla raznice rozdělena na dvě části – plastovou a nerezovou. Plastová část zajišťuje spojení s akčním mechanismem, je do ní přiveden podtlak. Plastová část je zakončena čelem s kruhovými otvory, na které se přisaje odebíraný vzorek. Na tento konec je upevněna ostrá nerezová část, která zajišťuje vyrazení samotného vzorku. Nerezová část je umístěna tak, aby bylo umožněno ostří průchod celým listem a teprve poté se dostalo děrované čelo na úroveň roviny listu.



Obr. 24 Razný element uzpůsobený pro podtlak.

Opět bylo přistoupeno k testování se stejným postupem jako s variantou C.1. Jediným rozdílem v postupu bylo zapnutí podtlaku v raznici před uvolněním akčního mechanismu a jeho následné vypnutí. Během druhé fáze tohoto testování bylo zjišťováno,

zda snížení vstupního tlaku do ejektorů má za následek snížení přísavací síly natolik, že místo k proražení listu dojde k uvolnění listu z přísavek.

Toto testování přineslo následující poznatky:

- Úprava tvaru přísavky (segment mezikruží na děrovaný segment mezikruží) zmenšila deformační účinky na list.
- Při tomto testování již byla některá odebrání úspěšná, nicméně poměr úspěšných pokusů ku celkovému počtu, při odebrání vzorku z tenkého listu (list papriky nebo muškátu), byly 3/20. Zbylé pokusy skončily „vyklopením“ vzorku stejně jako tomu bylo v předchozím testování. Pokusy o odběr z dužnatého listu kalisie byly všechny neúspěšné – list byl vždy raznicí odstrčen.
- 2. fáze tohoto testu prokázala, že není možné výrazně snížit vstupní tlak do ejektorů (pod 3,8 bar), jinak dochází pokaždé k odstrčení listu z přísavek střížníkem, a nikoliv k odebrání vzorku.

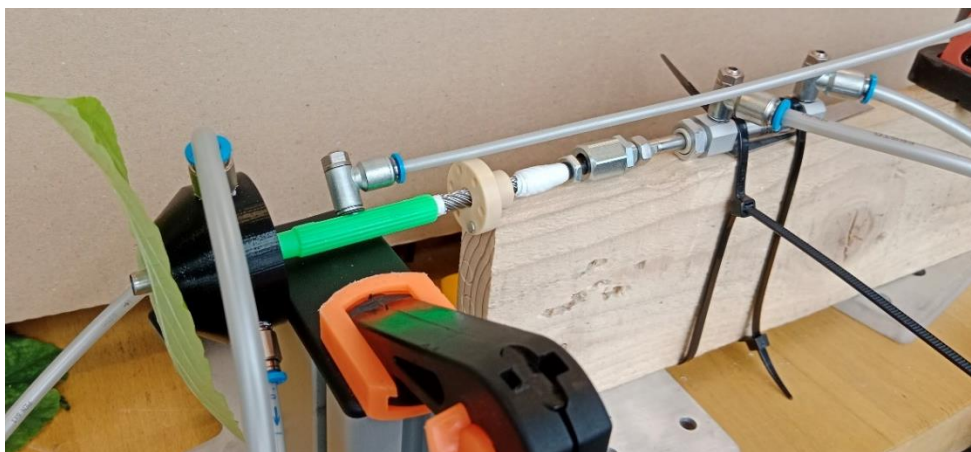
Bohužel malá vakuová čerpadla dostupná v tuto dobu na trhu dosahují nižších hodnot vytvořeného podtlaku. Při použití větších vakuových čerpadel či vývěv, která dokáží vytvořit dostatečný podtlak, by bylo nutné jej umístit u paty robotu kvůli jeho rozměrům místo na těle efektoru. Další nevýhodou řešení s použitím vývěvy je její vyšší pořizovací cena. Z tohoto důvodu bylo rozhodnuto potlačit požadavek na nezávislost na stlačeném vzduchu a součástí efektoru bude zásobník stlačeného vzduchu nebo malý kompresor zvolený podle výpočtů v kapitole zabývající se výpočty pro pneumatický obvod. Tato komponenta bude umístěna u paty robotu.

8.1.3 Varianta C.3

Změna zdroje podtlaku umožnila nahradit složitý mechanismus ozubeného soukolí a pružiny lineárním pneumotorem s krátkým zdvihem, čímž dojde k výraznému zjednodušení celého efektoru. Tímto pneumotorem byl zvolen *kruhový válec DSNU-S-12-P-A-MQ*, jelikož při odebrání na válec působí malé síly a pro vykonání odběru vzorku je zdvih válce 10 mm dostačující. Spotřeba stlačeného vzduchu pneumotoru je zanedbatelná v poměru s objemem vzduchu spotřebovávaného pro vytvoření podtlaku. Pohyb pneumotoru je řízen elektromagnetickým monostabilním 5/2 ventilem *VUVG-LK10-M52-AT-M5-1R8L-S*.

Razný pohyb, který byl u předchozích variant pouze translační, byl u této varianty doplněn o pohyb rotační. Rotační pohyb zajišťuje kinematická dvojice matice se šroubem, jehož stoupání je dostatečně veliké, aby závit nebyl samosvorný. Tato komponenta je umístěna mezi pístnicí pneumotoru a razným elementem. Části byly pro potřebu testování spojeny provizorně. Celá sestava je zobrazena na následujícím obrázku. Mezi šroub a pístnici je vložena pružná spojka *FK-M6*, která zajišťuje volnost otáčení šroubu nezávisle na pístnici a vyrovnává jejich nesouososti.

Poslední změnou bylo nahrazení razného elementu zhotoveného z tenkostěnné nerezové trubky komerčně vyráběnou bioptickou jehlou. Ta má oproti předchozí střížnici tenčí stěnu, zároveň je zde předpoklad, že trvanlivost řezné hrany by měla být delší než u dříve použitého razného elementu. Jedinou úpravou této koupené jehly bylo vytvoření otvoru pro přívod podtlaku.

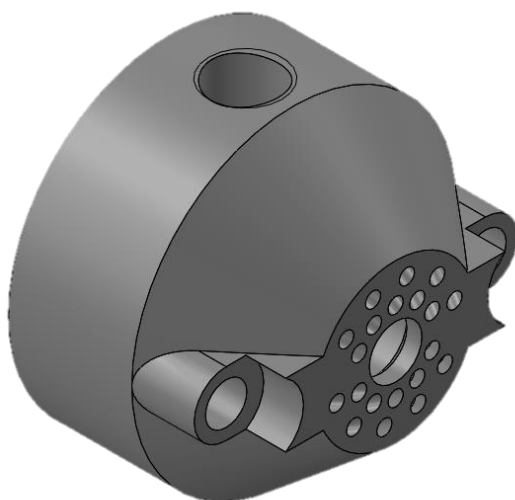


Obr. 25 Sestava varianty C.3.

Postup testování byl stejný jako u předchozí varianty, vyjma nahrazení akčního mechanismu, který se u této varianty aktivoval sepnutím elektromagnetického ventilu. Díky testům bylo dosaženo následujících závěrů:

- Tento mechanismus prorazí list všech tří testovaných rostlin. U muškátu a papriky však ve většině případů stále dochází k odklopení, a nikoliv celkovému odebrání. Odebrání vzorků z listů kalisie, byly všechny úspěšné.
- Rotační pohyb je zvláště přínosný při odebrání vzorku z dužnatého listu kalisie.

Aby bylo zabráněno odklápění listu, byl upraven přísavný element tak, aby otvory, na které je list přisáván, byly co nejbližše rezné hraně. Tohoto bylo docíleno zmenšením poloměru mezikruží a vyklonění osy otvorů. S takto upravenou přísavkou bylo opět provedeno opakované testování na listech všech tří zvolených rostlin.



Obr. 26 Přísavka se zmenšeným poloměrem mezikruží.

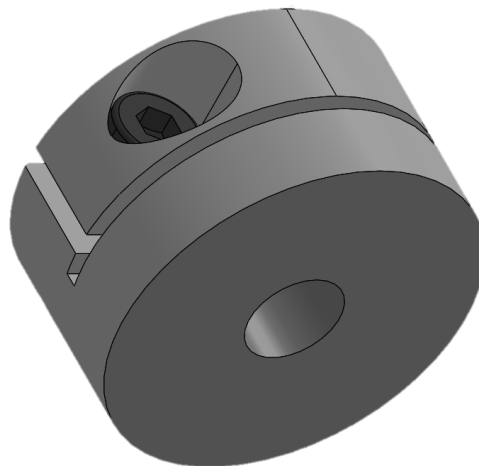
Testování přineslo následující výsledky:

- Odebírání bylo úspěšné na 90 % u tenkých listů (18 úspěšných ku 20 celkovým pokusům)
- Odebírání bylo 100% úspěšné u listů kalisie (10 pokusů)

Tyto poměry úspěšných pokusů byly vyhodnoceny jako dostačující, jelikož pomocí podtlaku bude taktéž snímáno, zda odebrání bylo provedeno úspěšně, či nikoliv. V tuto chvíli bylo možné přistoupit k řešení konstrukce pouzdra, do kterého budou všechny komponenty vloženy a poté pneumatickou část efektoru.

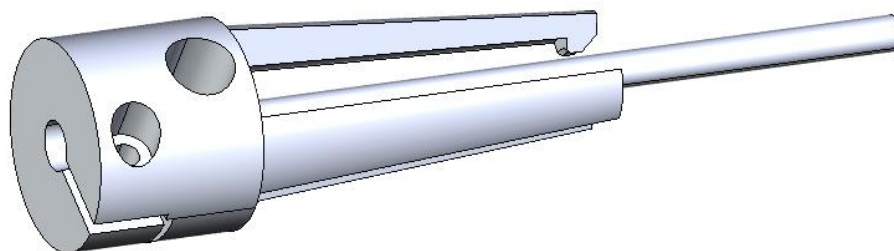
8.2 Návrh spojovacích elementů

Pro spojení šroubu s plovoucím kloubem byla navržena jednoduchá válcová součást, která je zobrazena na Obr. 27. Tuto součást lze pomyslně rozdělit na dvě půlky. 1. část – určená pro spojení s plovoucím kloubem – má středem vedený závit M6, kterým je našroubována na vnější závit pružné spojky. 2. část – spojení se šroubem – je tvořena dírou v ose válce o průměru šroubu. Obvodová část je na jedné straně rozdělena drážkou. Tato část může být stažena šroubem procházejícím skrz tuto mezeru, čímž je šroub ve spojení pevně sevřen.



Obr. 27 Spojka pro plovoucí kloub a šroub.

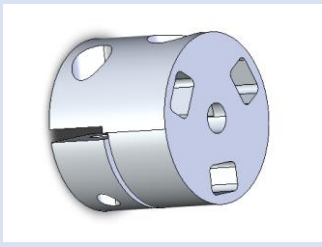
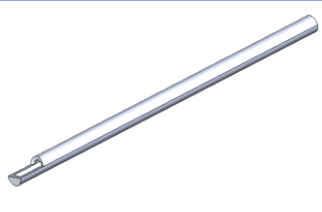
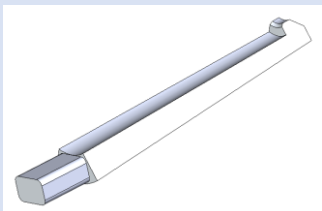
Pro spojení bioptické jehly se šroubem byla vytvořena následující součást (Obr. 28). Kromě tohoto spojení taktéž zajišťuje přívod podtlaku k razné hraně pro přidržení odebraného vzorku. Bioptická jehla se na součást nasune bez jakékoliv úpravy, což umožní jednoduchou výměnu. Tato spojka je složená ze tří funkčních částí. 1. částí je opět spojení se šroubem, které je realizováno stejně jako u předchozí spojky. Poté jsou zde elementy pro přívod vakua k razné hraně – otvor se závitem pro pneumatické šroubení a dutý válec na něj napojený. Čelo válce je osazeno mřížkou, na kterou je během odebírání vzorek přisátý. Posledním elementem jsou háčky pro zajištění bioptické jehly nasunuté na dutém válci.



Obr. 28 Spojka pro šroub a bioptickou jehlu.

Vzhledem ke složitosti této součástky a různým směrům namáhání jednotlivých dílů bylo nutné součást pro technologii 3D tisku rozložit. Součást byla rozložena na 5 dílů, které jsou vypsány v následující tabulce i s počtem potřebných kusů a náhledem dílu. Po vytisknutí se jednotlivé díly složí a slepí.

Tab. 11 Rozdělení spojky pro 3D tisk.

Náhled	Název	Počet
	spojka	1
	trubice	1
	háček	3

8.3 Návrh pouzdra

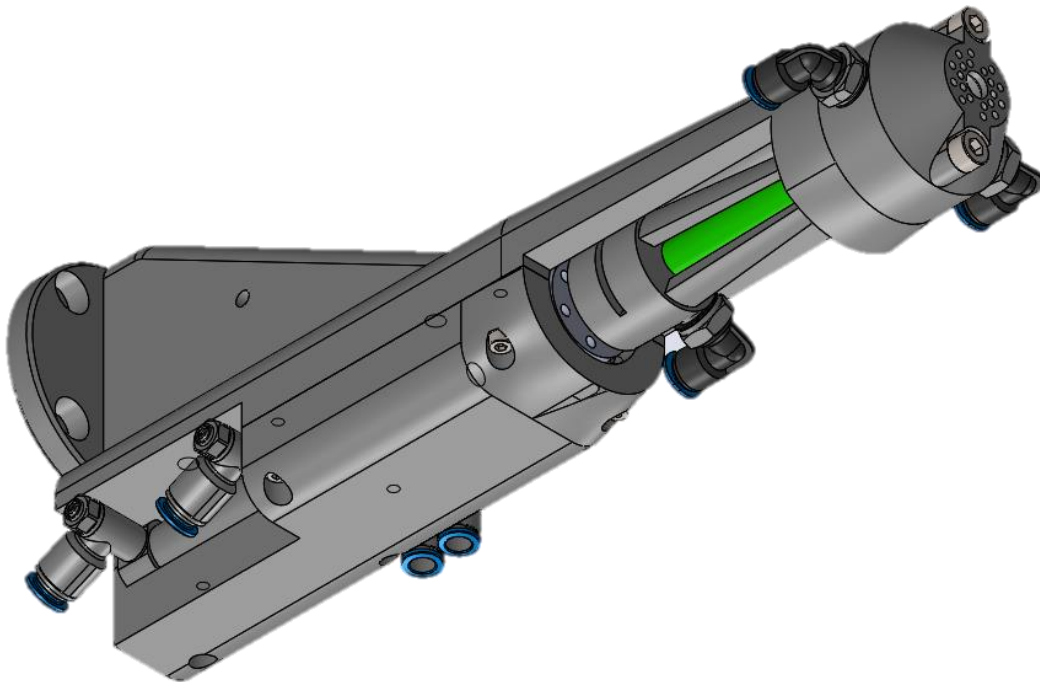
Pro prvek pouzdra byly určeny následující požadavky:

- sestavitelnost,
- možnost jednoduché údržby mechanismu,
- modularita,
- ochrana komponent mechanismu,
- kompaktní rozměry.

Nejprve byl vytvořen vnitřní prostor pro mechanismus. Prostor byl navržen tak, aby umožňoval volný pracovní pohyb mechanismu. Zároveň zde jsou také příčky a tvarové prvky, které souží k uchycení statických součástí mechanismu. Vnější plocha byla navržena jako hranol se zaoblenými hranami, který v přední části přechází do válce. Na takto vzniklé čelo bude možné přišroubovat přídržný element pomocí dvou šroubů. Posledním krokem bylo vytvoření otvorů pro přívod stlačeného vzduchu (podtlaku) do razného elementu (vykonává složený pohyb) a do lineárního pneomotoru.

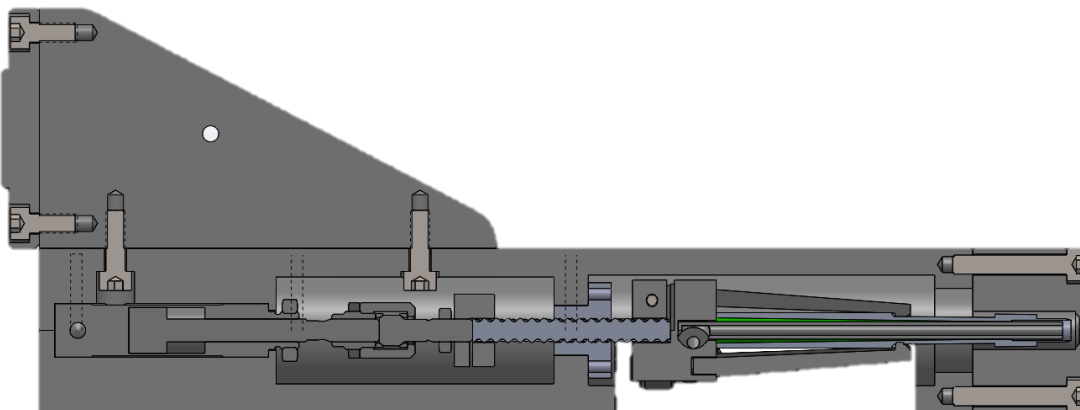
Podle datasheetu výrobce robotu (prvotně je tento nástroj určený na robota TM12) byla vytvořena příruba pro mechanické spojení efektoru s robotem. Příruba a tělo vytvořené

v předchozím kroku jsou propojeny jednoduchou vzpěrou. Výsledný model včetně mechanismu a přídržného elementu je na Obr. 29.



Obr. 29 Pouzdro mechanismu.

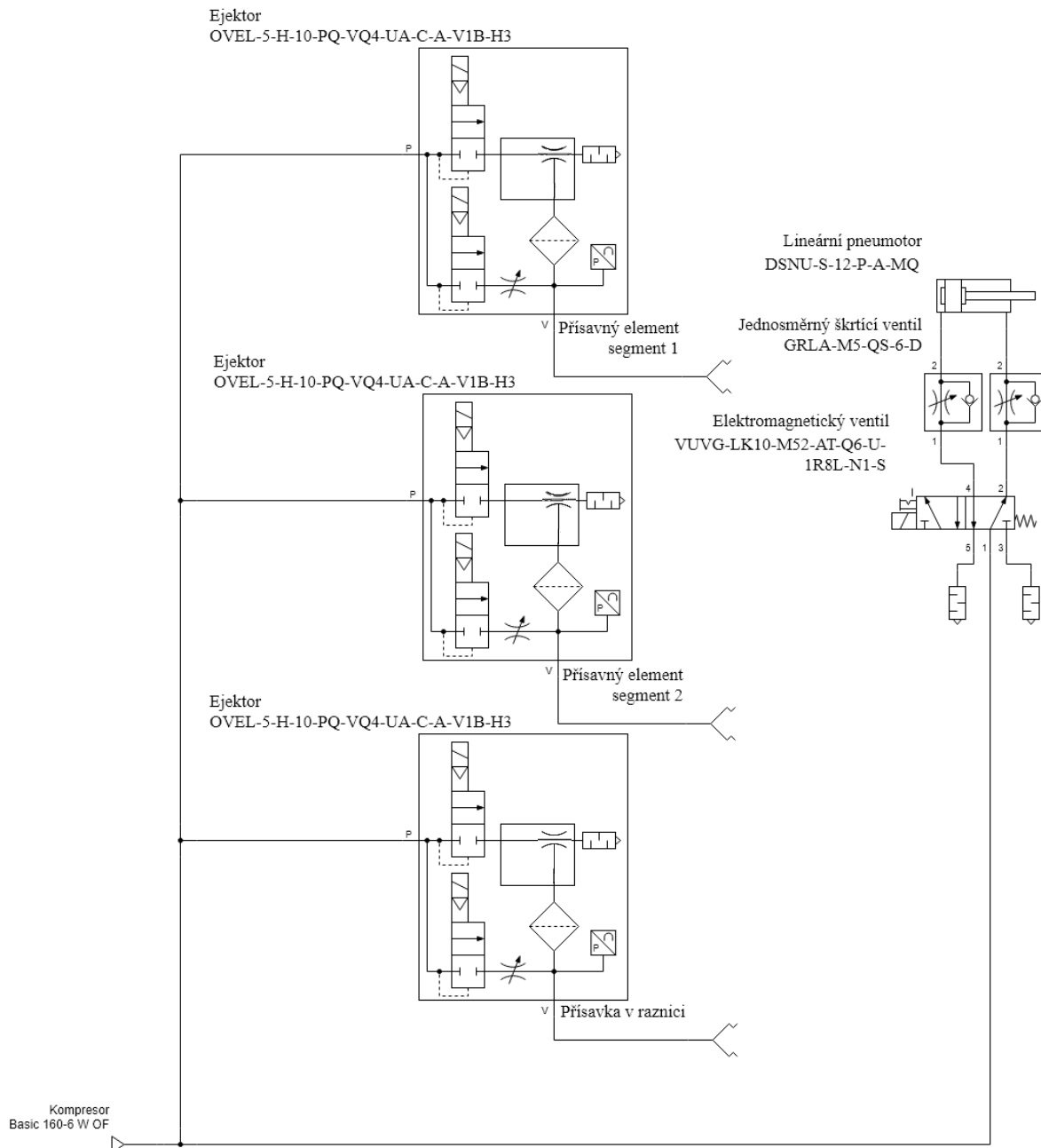
Základní tělo pouzdra bylo rozděleno na poloviny, aby bylo možné mechanismus do pouzdra vložit a případně na něm provádět servisní úkony. Toto spojení je realizováno šroubovým spojem. Pro vhodné podmínky při tisku součástí a také dodržení požadavku modularity byla také oddělena vzpěra a příruba. Oba spoje (vzpěra – pouzdro, vzpěra – příruba) jsou taktéž realizovány šroubovým spojem. Tím je zajištěna snadná výměna příruby pro použití efektoru na jiném robotu. Takto rozdělené tělo je vidět na Obr. 30.



Obr. 30 Rozdělené tělo efektoru.

8.4 Pneumatické schéma efektoru

Finální pneumatické schéma je zobrazeno na Obr. 31. Jsou zde popsány jednotlivé komponenty. Zdroj stlačeného vzduchu je zde zobrazen velmi zjednodušeně. Kompressor jako takový obsahuje kompresor, vzdušník, filtr a redukční ventil.



Obr. 31 Pneumatické schéma efektoru.

9 VÝPOČTY PNEUMATICKÉHO OBVODU

Jak již bylo zmíněno v kapitole 8.1.2, malé vakuové čerpadlo bylo nahrazeno ejektorem spolu s nádobou na stlačený vzduch (případně kompresorem) kvůli vysoké potřebné hodnotě podtlaku přidržující list. Proto je třeba určit objem této tlakové nádoby společně s maximální možným aktuální spotřebou. Následující výpočty také pomohou určit, zda je nezbytné použít ejektor s funkcí *energy saving*, nebo bude dostačující ejektor bez této funkce, ale s menší nominální spotřebou. Toto rozhodnutí je třeba udělat kvůli téměř dvojnásobné ceně efektoru se jmenovanou funkcí oproti ejektoru pouze s čidlem vakua. Výpočty se budou lišit v parametrech ejektorů a aktivních časech. Nejprve je třeba určit spotřebu vzduchu pro jeden cyklus. Tato spotřeba je získána podle následující rovnice:

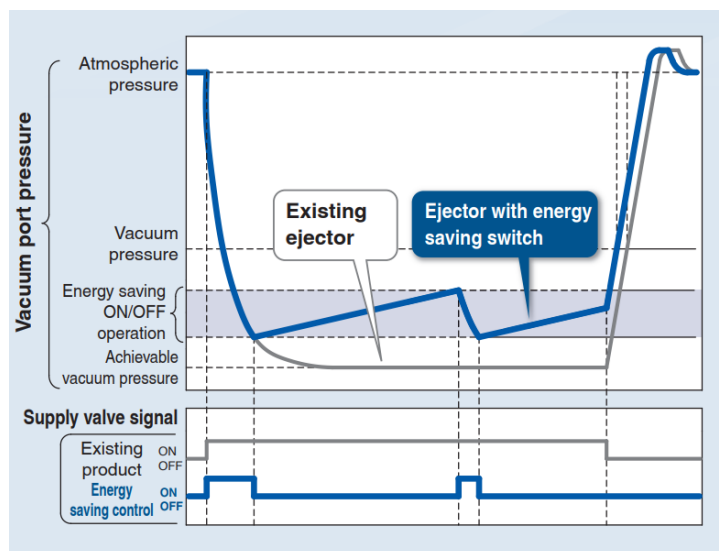
$$V = V_{EP} + V_{ER} + V_P \quad (2)$$

Kde:	V	– celkový objem vzduchu spotřebovaný při jednom cyklu [l]
	V_{EP}	– objem vzduchu spotřebovaný ejektory pro vytvoření podtlaku v přídržném elementu [l]
	V_{ER}	– objem vzduchu spotřebovaný ejektorem pro vytvoření podtlaku v ravném elementu [l]
	V_P	– objem vzduchu spotřebovaný pro pohyb lineárního pneumotoru [l]

Aby bylo možné určit jednotlivé objemy, je třeba detailně popsat cyklus s časovými údaji a zda ejektory proudí vzduch. Tyto informace jsou uvedeny v Tab. 12. Pro porovnání byly vybrány ejektory ZZQ1A-B od výrobce SMC s funkcí *energy saving*, která při dosažení nastavené hodnoty podtlaku zastaví přívod stlačeného vzduchu (při definovaném snížení podtlaku je opět přívod vzduchu otevřen) – viz Obr. 32. Druhými ejektory jsou ejektory OVEL-5-H od výrobce FESTO, který dosahuje srovnatelných hodnot podtlaku a je taktéž vybaven snímačem podtlaku. Detekce podtlaku je využita taktéž pro zastavení dopředného pohybu efektoru. Stav ejektorů je v tabulce popsán následovně:

- 0 – ejektor je deaktivovaný,
- 1 – ejektor je aktivovaný a není zde předpoklad dosažení nastaveného podtlaku,
- 0,5 – ejektor je aktivovaný, ale podtlaku by mělo být již dosaženo (pro ejektor s funkcí *energy saving*, pro druhý ejektor má tato hodnota stejný význam jako 1)

Jestliže se efektor ZZQ1A nachází ve stavu popsáném hodnotou 0,5 je předpokládáno, že podtlaku bylo dosaženo. V takovém případě ejektorem neprochází kontinuálně vzduch, vzduch prochází, pouze pokud se hodnota podtlaku sníží. Výrobce ve svém katalogu uvádí úsporu stlačeného vzduchu až 90 %. Tato hodnota je však měřena v ideálních podmínkách, proto není pro výpočty brána pouze desetina času, ale polovina.



Obr. 32 Funkce ejektorů energy saving. [23]

Tab. 12 Časový rozvrh odebracího cyklu.

Krok cyklu	Aktivovaný člen			čas [s]
	Ejektor přídržného elementu	Ejektor razného elementu	Pohyb pneumotoru	
Ustavení efektoru	0	0	0	
Zapnutí podtlaku v přídržném elementu	1	0	0	0,5
Dopředný pohyb efektoru	1	0	0	3
Dosáhnutí podtlaku v přídržném elementu	0,5	0	0	0
Zapnutí podtlaku v razném elementu	0,5	1	0	0,5
Pauza	0,5	1	0	0,5
Aktivace pneumotoru	0,5	1	1	0,5
Pauza	0,5	0,5	0	1
Vypnutí podtlaku v přídržném elementu	0	0,5	0	1
Přesun efektoru nad petriho miskou	0	0,5	0	20
Vypnutí podtlaku v razném elementu	0	0	0	1
Deaktivace pneumotoru	0	0	1	0,5
Přesun efektoru na začátek dalšího cyklu	0	0	0	

Celkové časy, kdy jsou dané ejektory aktivní (se započtenými koeficienty), a celkový počet operací pneumotoru jsou uvedeny v Tab. 13.

Tab. 13 Celkové aktivní časy ejektorů.

Komponent	Celkový čas/Počet operací	
	ZZQ1A-B	OVEL-5-H
Ejektory pro přídržný element	4,75 s	6 s
Efektory pro razný element	11,5 s	23 s
Pneumotor	2	

9.1 Spotřeba ejektorů pro přídržný element

Z konstrukce vyplývá použití pro přídržný element dvou ejektorů, celkové časy, kdy jsou tyto ejektory aktivní je v předchozí tabulce. (4,75 s a 6 s). Z datasheetů daného ejektoru [23] bylo zjištěno, že nejvyššího podtlaku (0,8 bar) je ejektor ZZQ1A-B schopný dosáhnout při vstupním tlaku 3,5 bar. Spotřeba vzduchu jedním ejektorem v těchto podmínkách je 15 l/min. Ejektor OVEL-5-H je schopný dosáhnout podtlaku 0,89 bar při vstupním tlaku 4,2 bar se spotřebou vzduchu 10 l/min [24]. Celkové objemy vzduchu potřebného pro ejektory pro jeden cyklus jsou vypočítány podle vzorců (3) a (4).

$$V_{EP1} = n \times Q_{n1} \times \frac{t_{a1}}{60} = 2 \times 15 \times \frac{4,75}{60} = 2,4 \text{ l} \quad (3)$$

$$V_{EP2} = n \times Q_{n2} \times \frac{t_{a2}}{60} = 2 \times 10 \times \frac{6}{60} = 2 \text{ l} \quad (4)$$

- Kde: V_{EP2} – objem vzduchu spotřebovaný ejektory ZZQ1A-B pro vytvoření podtlaku v přídržném elementu [l]
 V_{EP2} – objem vzduchu spotřebovaný ejektory OVEL-5-H pro vytvoření podtlaku v přídržném elementu [l]
 n – počet ejektorů []
 Q_{ni} – nominální spotřeba ejektoru [l/min]
 t_{ai} – aktivní čas ejektorů [s]

9.2 Spotřeba ejektorů pro raznici

Zde se jedná opět o spotřebu ejektoru, spotřeba se vypočítá stejně jako v předchozí podkapitole pomocí vzorce (3) s tím rozdílem, že je zde použitý pouze jeden efektor, zjednodušené rovnice vypadají následovně:

$$V_{ER1} = Q_{n1} \times \frac{t_{a1}}{60} = 15 \times \frac{13}{60} = 3,3 \text{ l} \quad (5)$$

$$V_{ER2} = Q_{n2} \times \frac{t_{a2}}{60} = 10 \times \frac{23}{60} = 3,8 \text{ l} \quad (6)$$

- Kde: V_{EPi} – objem vzduchu spotřebovaný ejektorem pro vytvoření podtlaku v razném elementu [l]
 Q_{ni} – nominální spotřeba ejektoru [l/min]
 t_{ai} – aktivní čas ejektorů [s]

9.3 Spotřeba pneumotoru

Jelikož pneumotorem stlačený vzduch neproudí, je výpočet spotřeby závislý na počtu pohybů daného pneumotoru, jeho vnitřních rozměrech a objemu přívodních hadic mezi pneumotorem a elektromagnetickým ventilem.

Objem v jedné větvi, tj. objem pístu a pneumatického vedení se vypočítá podle rovnice (7). Pro snížení objemu nutného pro přesun válce byl elektromagnetický pneuventil umístěn přímo na tělo efektoru, čímž byla minimalizována délka pneumatického vedení mezi ventilem a pneumotorem.

$$V_{Pi} = S_p \times h + S_h \times l \quad (7)$$

- Kde: V_{Pi} – objem jedné větve (píst + pneumatické vedení) [mm³]
 S_p – průřez válce [mm²]
 h – zdvih [mm]
 S_h – světlost pneumatického vedení [mm²]
 l – délka pneumatického vedení [mm]

Dosazením průměrů do vzorce za plochy byla získána rovnice v upraveném tvaru:

$$V_{Pi} = \frac{\pi \times (D_p^2 - d_p^2)}{4} \times h + \frac{\pi \times D_h^2}{4} \times l \quad (8)$$

- Kde: V_{Pi} – objem jedné větve (píst + pneumatické vedení) [mm³]
 D_p – průměr válce [mm]
 d_p – průměr pístnice [mm]
 h – zdvih [mm]
 D_h – vnitřní průměr pneumatického vedení [mm]
 l – délka pneumatického vedení [mm]

Dosazením do tohoto vzorce byly vypočteny objemy obou větví (1. větev pro vysunutí pístnice, 2. větev pro zasunutí pístnice, délky pneumatického vedení jsou pro obě větve stejné. Výpočty pro jednotlivé větve jsou uvedeny níže:

$$V_{P1} = \frac{\pi \times (12^2 - 0^2)}{4} \times 10 + \frac{\pi \times 4^2}{4} \times 200 \quad (9)$$

$$= 3644 \text{ mm}^3 \approx 0,0036 \text{ l}$$

$$V_{P2} = \frac{\pi \times (12^2 - 6^2)}{4} \times 10 + \frac{\pi \times 4^2}{4} \times 200 \quad (10)$$

$$= 3362 \text{ mm}^3 \approx 0,0034 \text{ l}$$

Jelikož během cyklu se pneumotor pouze jednou vysune a zasune celkový objem potřebný během jednoho cyklu je získán prostým součtem těchto dvou hodnot. Tento objem označený V_P , převedený na litry, se rovná 0,007 l.

9.4 Celková spotřeba stlačeného vzduchu

Posledním krokem k získání celkového objemu stlačeného vzduchu spotřebovaného během jednoho cyklu při tlaku 3,7 bar pro ejektor ZZQ1A-B a při tlaku 4,2 bar pro ejektory OVEL-5-H je vypočten pomocí vztahu (2):

$$V1 = 2,4 + 3,3 + 0,007 = 5,707 \text{ l} \quad (11)$$

$$V2 = 2 + 3,8 + 0,007 = 5,807 \text{ l} \quad (12)$$

Odhadovaný objem vzduchu na jeden cyklus tedy činí 5,7 l při tlaku 3,5 bar, nebo 5,8 l při tlaku 4,2 bar pro různé ejektory. Doba pro samotný cyklus odebrání je odhadnuta na 28,5 s, přičemž do tohoto času nejsou započteny akce před cyklem odběru (příjezd robotu, ustavení efektoru do výchozí pozice), ani akce po tomto cyklu (přesun efektoru od petriho misky, přesun robota/příjezd nové rostliny). Z toho jasně vyplývá, že robot není schopný provést více jak dvě odebrání za minutu. I tento takt (2 odběry/min) je velmi nadhodnocený a vnáší tedy do výpočtu koeficient bezpečnosti. Průměrná spotřeba vzduchu je v tomto případě cca 11,4 l/min pro ejektory ZZQ1A-B a 11,6 l/min pro ejektory OVEL-5-H. Použití ejektoru s funkcí energy saving tedy přináší úsporu 0,2 l/min, což odpovídá 2 %, ale dosahuje o 9 % menšího podtlaku. S přihlédnutím k dvojnásobné ceně tohoto ejektoru, byly zvoleny pro další pokračování ejektory OVEL-5-H výrobce FESTO.

Maximální možný okamžitý průtok vzduchu – vzduch proudí všemi třemi ejektory zároveň, spotřeba pro pohyb pneumotoru je zanedbatelná – je 30 l/min (3×10 l/min).

9.5 Výběr kompresoru

Na základě předchozích výsledků je nyní možné vybrat zdroj stlačeného vzduchu. Jako typ byl zvolen malý kompresor se vzdušníkem. Kompresor dodává kontinuálně vzduch, vzdušník slouží pro pokrytí špiček odběru stlačeného vzduchu. Maximální průtok kompresoru musí být vyšší než maximální možný okamžitý. Sací výkon kompresoru musí být dostatečný pro naplnění potřeby průměrné spotřeby stlačeného vzduchu efektoem, jeho minimální hodnota je odvozena vztahem (13). Posledním parametrem tohoto kompresoru je maximální tlak, který musí být vyšší než tlak použitý pro efektor. Minimální požadavky jsou pro přehlednost uvedeny do Tab. 14.

$$Q_s = \frac{Q_e \times (P_e + P_a)}{P_a} = \frac{11,6 \times (4,2 + 1)}{1} \quad (13)$$

$$= 60,3 \text{ l/min}$$

- Kde: Q_s – sací výkon [l/min]
 Q_e – průměrná spotřeba ejektoru [l/min]
 P_e – tlak použitý pro efektor [bar]
 P_a – atmosférický tlak [bar]

Tab. 14 Minimální požadavky na kompresor.

Parametr	Hodnota
Maximální průtok [l/min]	30
Sací výkon [l/min]	60,3
Maximální tlak [bar]	4,2

Po průzkumu trhu byl zvolen kompresor Basic 160-6 W OF od výrobce Metabo. Tento kompresor splňuje veškeré požadavky s koeficientem bezpečnosti větším než 1,5. Kompresor je jedním z nejmenších splňujících všechny požadavky včetně přítomnosti vzdušníku. Jeho parametry jsou vypsány v příručce pro použití [25].

10 BEZPEČNOST

Každé zařízení musí splňovat příslušné bezpečnostní normy, aby mohlo být provozováno. Zařízení musí být navrženo tak, aby byla rizika škody odstraněna, minimalizována, nebo alespoň snížena na přípustnou hodnotu. Koncový efektor jako samostatná součást je označován jako neúplné strojní zařízení a je definován jako *zařízení specificky navržené pro připojení k mechanickému propojení, které umožní robotu provádět své úkoly* [26]. Proto je třeba klást bezpečnostní požadavky na celý systém robota. Z tohoto důvodu jsou kladeny na robot, na který bude efektor připevněn, požadavky popsané v následujících odstavcích.

Předně je třeba vždy řešit požadavky na bezpečnost. Principiální funkcí efektoru je prudké vysunutí ostré bioptické jehly. Vzniká tu tedy nebezpečí **pořezání nebo uříznutí** při kontaktu bioptické jehly s lidskou pokožkou, kdy může dojít od lehkého zranění až ke smrtelnému v závislosti na postižené části lidského těla a původní vzdálenosti mezi ústím efektoru a povrchem lidského těla. Z tohoto důvodu je vznešen požadavek, aby byl robot vybavený zařízením pro detekci přítomnosti osob v okolí robota. Řešením může být vybavení robota zařízením pro toto sledování (např. lidar), nebo zabezpečení pracovního prostoru robota mechanickou zábranou (ochranné oplocení). Při vstupu a výstupu do takto zabezpečené oblasti musí pracovník potvrdit svůj vstup (odchod). Toto opatření zajistí, že v automatickém režimu efektor nesmí pracovat v přítomnosti osob.

V rámci minimalizace nebezpečí **pořezání nebo uříznutí**, musí být v programu zajištěno, že základní pozice pneumotoru je se zataženou pístnicí, bioptická jehla je tedy ukryta v těle efektoru. V automatickém režimu robota se smí vysunout, pouze pokud čidla podtlaku integrovaných v ejektorech pro přísavný element hlásí dosažení nastavené hodnoty. V tomto případě může dojít k ucpání přísavného elementu částí lidského těla, tato varianta je však řešená předchozím opatřením.

Nebezpečí **stlačení** efektozem je řešeno bezpečnostními opatřeními robota. Pravděpodobně budou opatření shodná s opatřeními v prvním bodě.

Pozice lineárního pneumotoru není hlídána magnetickými čidly na povrchu pneumotoru. Jestliže elektromagnetický ventil ovládající tento pneumotor nemění svůj stav po stanovenou dobu (určeno 1,5 s), je předpokládáno, že pneumotor je v žádané poloze.

11 KOMENTÁŘ K VÝKRESOVÉ DOKUMENTACI

Vyráběné díly jsou navrženy pro 3D tisk, k tomu jsou přizpůsobené informace v popisových polích. Vstupem pro tuto metodu výroby jsou modely ve formátu s příponou step. Na základě těchto modelů jsou v příslušném programu („sliceru“) připraveny programy pro 3D tiskárnu. Výkresová dokumentace v tomto případě slouží pro kontrolu rozměrů, zadání, ve kterých otvorech má být zhotoven závit, případně pro rekonstrukci modelu. Důležitou informací, která je zanesena do výkresů, je plocha, na které má být model položen během tisku. Tato plocha je označena v popisovém poli jako *Základna pro tisk*.

Výkresová dokumentace začíná výkresem celkové sestavy efektoru (DP_MED_00). Jsou zde označeny jednotlivé díly, případně podsestavy a maximální rozměry efektoru. Každému vyráběnému dílu je přiřazeno číslo výkresu.

Výkres DP_MED_01 zobrazuje základní nosnou část efektoru *telo_1*. Na hlavním pohledu jsou označeny závity M3 pro spojení s druhou částí těla efektoru a díry se zahloubením pro šrouby M5 pro spojení se vzpěrou držící přírubu pro robot. Na tomto pohledu jsou vidět jednotlivé segmenty těla. První část je určena pro uložení lineárního pneumotoru a je zakončena přepážkou pro jeho aretaci. Ve druhé části se pohybuje plovoucí kloub spojující pístnici a šroub. Tato část je zakončena přepážkou pro uložení a zajištění matice s přírubou. Ve třetí části se pohybuje *nástrčka* nesoucí bioptickou jehlu. V této části je tělo efektoru sníženo, aby byl umožněn rotační pohyb razného elementu. Efektor je zakončen „přírubou“ pro připevnění *přísavky 2* šrouby. Pro udání tvarů jednotlivých segmentů jsou v horní části výkresu umístěny řezy jednotlivými částmi. Na bokorysu v dolní části výkresu jsou důležité otvory pro závity M3 pro připevnění elektromagnetického ventilu.

Na výkrese DP_MED_02 je zobrazen protikus pro předchozí díl. Tento díl kryje první dva řečené segmenty a je spojen s protikusem pomocí 5 šroubů M3, pro které jsou připraveny průchozí díry se zahloubením. V segmentu pro lineární pneumotor je část dílce odebrána pro přivedení pneumatických hadic k pneumotoru. Z výkresu je také patrné zúžení tělesa směrem k raznému elementu vykonávající rotační pohyb. Toto zúžení umožňuje volný pohyb hadičky přivádějící podtlak, či přetlak do razného elementu.

Následující výkres DP_MED_03 udává tvar a rozměry vzpěry mezi tělem efektoru a přírubou pro mechanické spojení nástroj s robotem. Na boční ploše vzpěry je umístěn otvor pro závit M5, do které je našroubován držák pneumatických hadic a kabelu pro ovládání elektromagnetického pneuventilu. Na užších plochách jsou zakótovány otvory pro závity M5 pro spojení vzpěry s tělem efektoru a přírubou.

Posledním velkým dílem efektoru je *příruba* na výkrese DP_MED_04. Příruba je navržena na základě datasheetu robotu. Příruba je na robot umístěna pomocí tvarového prvku o průměru 31,3 mm a 4 šroubů M6, pro které jsou připraveny díry se zahloubením viz pohled v horní části výkresu. Natočení přírubu vůči robotu je jištěno kolíkem. Pro ten je na spodním pohledu neprůchozí díra průměru 6 s tolerancí H7. Rozměr této díry bude třeba po skončení tisku upravit pomocí výstružníku. Pro spojení přírubu se vzpěrou jsou připraveny dvě díry se zahloubením pro šrouby M5.

Dalším výkresem je výkres sestavy *nastrcka_celek*. Jedná se o podsestavu nosného elementu bioptické jehly, přívodu stlačeného vzduchu k ostří a spojení se šroubem. Jak již bylo zmíněno, podsestava byla rozdělena kvůli různým směrům zatížení jednotlivých částí.

První částí této podsestavu je na výkrese DP_MED_05_1 element pro spojení ostatních částí a spojení se šroubem. Tuto součást lze opět rozdělit na několik částí podle funkce. První částí je díra průměru 6,4 mm kolineární s osou dílu, která společně s otvorem pro šroub zajišťuje spojení se šroubem. Dále je na bokorysu dílu vidět díra pro závit G1/8 pro pneumatické šroubení. Toto šroubení pak přivádí stlačený vzduch do dutiny s průměrem 5,2 mm, kam je vsunut a zafixován díl *nastrcka_trubice*. Posledním elementem jsou tři čelní otvory, do kterých jsou následně vlepeny díly pro zachycení bioptické jehly. Pro přehlednost rozměrů je tento otvor zobrazen v detailu B.

Dílem s názvem *nastrcka_trubice* je jednoduchá trubice, která je na jedné straně otevřena, otvor je poté překryt plastovou mřížkou. Na druhé straně je válec seříznut, aby byl umožněn přístup stlačeného vzduchu přivedeného šroubením do této trubice.

Třetím dílem této sestavy je díl *nastrcka_hacek*. Tento díl je vlepen do dílu *nastrcka_spojka*. Pomocí předpětí pak drží nastrčenou bioptickou jehlu, ale zároveň tyto díly umožňují jednoduchou výměnu této jehly.

Posledním dílem propojení jednotlivých částí mechanismu je *spojka*. Z jedné strany je v ose dílu díra pro závit M6, kterým je tato spojka namontována na plovoucí kloub a zajištěna kontramaticí. Druhá část je obdobná jako u spojení šroubu s nástrčkou. Pomocí šroubu se stáhnou dva půlměsíce kolem šroubu a ten tak pevně drží ve spojení.

Výkresovou dokumentaci uzavírá přísavný element na výkrese DP_MED_10. Pro spojení se zbytkem efektoru slouží dvě díry se zahloubením pro šrouby M5. Středem celé přísavky vede otvor pro průchod razného elementu. Podtlak je přiváděn šroubeními v otvorech pro závity G1/8. Následně jsou vnitřkem dílu vedeny kanály do rozvodných půlměsíců. Tyto půlměsíce jsou zakončeny polem děr, kterými je přísáván list. Zobrazené řezy zobrazují podrobněji tvar vnitřních kanálků. Jelikož tento díl rozvádí podtlak, je požadována vyšší vzduchotěsnost. Proto je v popisovém poli předepsán vyšší počet perimetrů než u ostatních dílů.

12 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

Ekonomické zhodnocení koncového efektoru je rozděleno následujících dvou tabulek. V Tab. 15 jsou uvedeny ceny nakupovaných dílů. Tyto ceny byly nalezeny na webových stránkách příslušného výrobce (prodejce). V Tab. 17 jsou uvedeny ceny vyráběných dílů. Tyto ceny jsou součtem odhadů ceny materiálu a ceny elektrické energie, jelikož jsou vyráběné díly navrženy pro metodu 3D tisku. Náklady na tisk dílů byly spočítány pomocí vzorců (14) a (15). Pomocné hodnoty pro výpočet nákladů jsou vypsány v Tab. 16, odhadované časy a množství spotřebovaného materiálu bylo zjištěno programem PrusaSlicer 2.7.4.

Tab. 15 Odhad ceny nakupovaných dílů.

Komponenta	Označení	Počet	Cena/kus (Cena/m)	Cena [Kč]
Lineární pneumotot	DSNU-S-12-P-A-MQ	1	580,36	580,36
Šroub	DST-LS-6.35X25.4-R-ES	1	534,65	534,65
Matic	DST-RFRM- 1315DS6.35X25.4	1	569,59	569,59
Ejektor	OVEL-5-H-10-PQ-VQ4-UA- C-A-V1B-H3	3	2 938,20	8 814,60
Elektromagnetický ventil s kabelem	VUVG-LK10-M52-AT-Q6- U-1R8L-N1-S	1	1 221,42	1 221,42
Pneumatické šroubení	QSML-G1/8-6	3	56,74	170,22
Jednosměrný škrťící ventil	GRLA-M5-QS-6-D	2	256,72	513,44
Pružná spojka	FK-M6	1	302,72	302,72
Bioptická jehla		1	43,00	43,00
Spojovací materiál		4	0,97	3,88
Pneumatické hadice	PUN-H-6X1-NT-500	8	16,48	131,84
Kompresor	Basic 160-6 W OF	1	2 999,00	2 999,00
Celkem				15884,72

Tab. 16 Pomocné parametry.

Parametr	
Cena filamentu PETG 1 kg [27]	525 Kč
Spotřeba 3D tiskárny [28]	120 W
Cena za 1 kWh [29]	8,12 Kč

$$Cena\ materiálu = \frac{Cena\ filamentu \times Materiál}{1000} \quad (14)$$

$$Cena\ tisk = \frac{Doba\ tisku \times Spotřeba\ 3D\ tiskárny \times Cena\ za\ 1\ kwh}{1000} \quad (15)$$

Tab. 17 Odhad ceny vyráběných dílů.

Díl	Počet	Materiál [g]	Doba tisku [h:m]	Cena materiálu [Kč]	Cena tisku [Kč]	Cena celkem [Kč]
Telo_1	1	70.17	9:34	36.84	9.32	46.16
Telo_2	1	41.25	5:27	21.66	5.31	26.97
Telo_vzpera	1	21.14	2:21	11.10	2.29	13.39
Tělo_priruba	1	12.72	1:44	6.68	1.69	8.37
Prisavka	1	16.54	2:32	8.68	2.47	11.15
Nastrcka_trubka	1	1.68	0:17	0.88	0.28	1.16
Nastrcka_spojka	1	6.85	1:06	3.60	1.07	4.67
Nastrcka_hacek	3	1.65	0:15	0.87	0.24	1.11
Spojka	1	2.08	0:22	1.09	0.36	1.45
Celkem		174.08	23:38:00	91.39	23.03	114.42

Celková cena efektoru je získána součtem těchto dvou dílčích sum a je rovna 15 999,14 Kč. Tato cena zahrnuje i kompresor, který by při použití efektoru na stacionárním robotickém rameni s přívodem stlačeného vzduchu z centrálního rozvodu nebyl třeba. Nejdražšími komponenty jsou ejektory pro tvorbu vakua, následně pak elektromagnetický ventil. Náklady na výrobu dílů metodou 3D tisku je oproti zbytku zanedbatelná, vyznačuje se však časovou náročností.

13 ZHODNOCENÍ A DISKUZE

Diplomová práce se zabývala problémem automatizace odběru rostlinných vzorků z listů rostlin. Za tímto účel měl být navržen prototyp koncového efektoru pro autonomní robot.

Po rozboru jediného nalezeného řešení tohoto problému na univerzitě Oak Ridge byly navrženy tři koncepční varianty. Multikriteriální analýzou byla vybrána nejlepší varianta podle vybraných parametrů. Největší výhodou tohoto řešení byla nutnost přístupu k listu pouze z jedné strany. Tento fakt následně výrazně usnadní manévrování efektoru do vhodné pozice pro odběr. Po několika iteračních krocích testování zvoleného mechanismu bylo zjištěno, že podtlak nutný k udržení listu při odebrání vzorku je poměrně velký a malá vzduchová čerpadla by nebyla schopna této přisávací síly dosáhnout. Proto byl do konceptu přidán kompresor se vzdušníkem a ejektory schopnými dosáhnout dostatečného podtlaku. Kompresor je kvůli svým rozměrům a hmotnosti umístěn u paty robotu.

Přidání dostatečně velkého zdroje stlačeného vzduchu umožnilo změnit poměrně složité ozubené soukolí s pružinou pro urychlení lineárního pohybu střížníku na jednoduchý malý pneumatický lineární motor. Tato změna přinesla výrazné zjednodušení celkové konstrukce efektoru a jeho ovládání.

Posledním krokem bylo navržení mechanického spojení efektoru s robotem. K tomuto účelu bylo navrženo tělo efektoru, které rovněž zajišťuje jednotlivé součásti efektoru v daných vzájemných polohách. Tělo bylo rozděleno na několik částí, aby bylo možné jej vytisknout při dodržení požadavků na pevnost v daném směru a následně také celý mechanismus složit.

13.1 Pokračování projektu

Cílem tohoto projektu byl pouze efektor – tedy nástroj pro odebrání vzorků. K fungování celého robotického systému pro odběr rostlinných vzorků je třeba, aby byl daný list nalezen a určeny jeho souřadnice. Toho lze docílit použitím kamery (soustavy kamer) a strojového vidění. Bohužel listy nabývají rozmanitých tvarů a barev a odebrání pravděpodobně nebude probíhat vždy za stejného osvětlení. Z těchto důvodů nelze použít jednoduchou identifikaci na základě obrysu. Je třeba použít například neuronové sítě. Naprogramování, lépe řečeno vytvoření a naučení, neuronové sítě je poměrně složitý a časově náročný úkol, proto tato část nebyla součástí tohoto diplomového projektu, ale je námětem na další pokračování v projektu.

14 ZÁVĚR

Výsledkem diplomové práce bylo vytvoření konstrukčního návrhu speciálního koncového efektoru pro autonomní robot pro sběr rostlinných vzorků. Efektor je schopný odebrat kruhovitý vzorek z listu rostliny a umístit ho do připravené nádoby.

V první části práce je vypracována rešerše v oblasti průmyslových manipulátorů a koncových efektorů, podle jejich funkce. Rovněž jsou zde krátce popsány některé z metod pro výzkum rostlin. Právě tato oblast výzkumu je cílem tohoto koncového efektoru, který má umožnit automatizaci, a tedy zefektivnění sběru rostlinných vzorků.

Dále byl proveden systémový rozbor, kde byla problematika rozebrána detailněji. Poté byly stanoveny dílčí cíle tohoto projektu a určen systém podstatných veličin. Na tento rozbor navazuje analýza stávajícího řešení od kanadské laboratoře Oak Ridge.

Vycházejí z určených cílů systémovým rozbohem a poznatků získaných z objeveného řešení, byly navrženy tři koncepční varianty. Každá varianta je konstrukčně nastíněna společně s popisem její funkce. Tato kapitola je následována multikriteriální analýzou, kde jsou nejprve určeny výběrové parametry a metodou podle Dobříckého jsou určeny váhy jednotlivých parametrů. Jednotlivé konstrukční varianty jsou ohodnoceny podle těchto parametrů a byla vybrána nejlepší z nich. Zvolena byla varianta, která k listu přistupuje pouze z jedné strany, mechanismem je přidržení vzduchovými přísavkami a proražení listu razným elementem.

Osmá kapitola, kapitola konstrukční, začíná ověřením funkčnosti vybraného konceptu. Testování probíhalo s listy různých velikostí a tlouštěk. V několika iteračních krocích je zde vyvinutý funkční mechanismus. Proběhly zde poměrně zásadní změny v užitých komponentech zvláště u akčního mechanismu lineárního pohybu raznice, kterým bylo nejprve mechanicky složité soukolí s pružinou. Byl zde zamýšlen kvůli elektrickému pohonu. Udržení listu přísavkami je však velmi náročné na médium stlačeného vzduchu, proto bylo třeba malé vzduchové čerpadlo umístěné na efektoru nahradit větším zdrojem stlačeného vzduchu u paty robotu. Díky této změně bylo možné nahradit zmíněný mechanismus jednoduchým lineárním pneumotorem. Kapitola je uzavřena konstrukčním modelem těla efektoru pro mechanické připojení efektoru k robotu.

Na konstrukční kapitolu navazuje kapitola zabývající se pneumatickými výpočty. Tyto výpočty spotřeby stlačeného vzduchu umožnili následně vybrat vhodný kompresor se vzdušníkem. Práce pokračuje vypsáním bezpečnostních požadavků na robot a software.

Poslední částí jsou komentáře k výkresové dokumentaci koncového efektoru, která je přiložena k práci. Práce pokračuje ekonomickým zhodnocením, které stanovuje odhad výrobních nákladů na efektor na 15 999,14 Kč včetně kompresoru. Na závěr této diplomové práce je projekt zhodnocen a nastíněn další postup tohoto projektu.

15 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KLEM, K. a kol. Metody fenotypizace se zaměřením na odolnost k chorobám a suchu. online. CZECHGLOBE. 2018. Dostupné z: http://www.rostlinolekari.cz/sites/default/files/2018-04/Klem_Metody%20fenotypizace_Dunajovice_2018.pdf. [cit. 2024-01-30].
- [2] *Listová analýza a zjištění výživového stavu révy*. online. In: Vinařské potřeby. 2019. Dostupné z: <https://www.vinarskepotreby.cz/clanky/detail/listova-analyza-a-zjisteni-vyzivoveho-stavu-revy-bs-vinarske-potreby.htm>. [cit. 2023-12-18].
- [3] *Listová analýza*. online. In: Výzkumný ústav lesního hospodářství a myslivosti, v. v. i. 2020. Dostupné z: <https://www.vulhm.cz/monitoring-stavu-lesa/icp-forests/ii-uroven/listova-analyza/>. [cit. 2023-12-18].
- [4] PlantScreen Field System. online. In: *Photon system instruments*. 2016. Dostupné z: <https://plantphenotyping.com/products/plantscreen-field-system/#gallery>. [cit. 2024-01-30].
- [5] PHOTON SYSTEMS INSTRUMENTS. *HADES - The Agar Root Phenotyping System*. online. 2023. Dostupné z: https://www.youtube.com/watch?v=RegwOP3chl4&ab_channel=PhotonSystemsInstruments. [cit. 2024-01-30].
- [6] RUMÍŠEK, P. *Automatizace (roboty a manipulátory)*. online. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. Dostupné z: http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/emm_mechanizace_a_automatizace_roboty_rumisek.pdf. [cit. 2024-01-30].
- [7] HLAVÁČ, V. *Kognitivní robotika*. přednáška. Praha: Fakulta elektrotechnická ČVUT, katedra kybernetiky, Centrum strojového vnímání, 2005. Dostupné z: <https://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/51Robotika/71KognitivniRobotika.pdf>. [cit. 22. 2. 2024].
- [8] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [9] ČSN EN ISO 10218-1. *Roboty a robotická zařízení - Požadavky na bezpečnost průmyslových robotů - Část 1: Roboty*. Praha: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2012.
- [10] Malé robotické pracoviště. online. In: *TEMEX*. 2019. Dostupné z: <https://www.temex.cz/reference/automatizace-vyrobnich-procesu/male-roboticke-pracoviste/>. [cit. 2024-01-31].

- [11] Univerzální robotická buňka pro zakládání/vyjímání výrobků do výrobních strojů. online. In: *EOLA*. 2021. Dostupné z: <https://eola.cz/cs/reference/49-univerzalni-roboticka-bunka-pro-zakladani-vyjimani-vyrobku-do-vyrobnich-stroju>. [cit. 2024-01-31].
- [12] VOJÁČEK, A. Problematika bezpečnosti kolaborativních rototů - ISO/TS 15066. online. In: *Automatizace.hw.cz*. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/problematika-bezpecnosti-kolaborativnich-robotu-isots-15066.html>. [cit. 2024-01-31].
- [13] TECHMAN ROBOT INC. *Omron TM Collaborative Robot: Software Manual TMFlow Version 2*. online. 2023. Dostupné z: https://assets.omron.eu/downloads/latest/manual/en/i689_tm_collaborative_robot_software_manual_tmflow_version_2_operation_manual_en.pdf. [cit. 2024-01-31].
- [14] PNEUMATIC GRIPPING BY SCHUNK. online. In: *Universal robots*. 2024. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/fi/plus/products/schunk/pneumatic-gripping-by-schunk/>. [cit. 2024-05-04].
- [15] SUCTION CUPS VACUUM GRIPPER, CVGL335XA50C1. online. In: *Universal robots*. 2024. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/fi/plus/products/coval/suction-cups-vacuum-gripper-cvgl335xa50c1/>. [cit. 2024-05-04].
- [16] Magnet Gripper Unit for Collaborative Robots. online. In: *TM*. 2019. Dostupné z: <https://test.tm-robot.com/en/product/smc-magnet-gripper-unit-for-collaborative-robots/>. [cit. 2024-05-04].
- [17] ABB. *GWT C9: Electrically Driven Servo Weld Gun*. [online]. 2022. Dostupné z: <https://search.abb.com/library/Download.aspx?DocumentID=9AKK107680A4035&LanguageCode=en&DocumentPartId=&Action=Launch>. [cit. 2024-05-04].
- [18] TMEJOVÁ, Kristýna. Algae in a reactor. *Forbes Next*. 2024, s. 72-73. ISSN 2570-486.
- [19] BOWER, A. E. *Automated plant manipulation system speeds up bioscience research*. online. In: Oak Ridge National Laboratory. 2021. Dostupné z: <https://www.ornl.gov/organization-news/automated-plant-manipulation-system-speeds-bioscience-research>. [cit. 2024-04-03].
- [20] MAREK, J. *Systémový přístup a rozhodování v konstrukčním procesu: Metodika Brněnské konstrukční školy*. online. 1. vydání. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2021. Dostupné z: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/833110/mod_resource/content/3/Syst%C3%A9mov%C3%BD%20p%C5%99%C3%ADstup%20a%20rozhodov%C3%A1n%C3%AD%20v%20konstruk%C4%8Dn%C3%ADm%20procesu.pdf. [cit. 2024-04-25].

- [21] *Kompletní mechabox verze 2 pro M4 - kabely do předpažbí + motor, CYMA.* online. In: Airsoft-online.cz. 2024. Dostupné z: <https://www.airsoft-online.cz/kompletni-mechaboxy/kompletni-mechabox-verze-2-pro-m4-kabely-do-predpazbi-motor--cyma/>. [cit. 2024-05-04].
- [22] *Vakuové ejektory VN.* online. Festo, 2016. Dostupné z: <https://www.festo.com/media/pim/238/D15000100153238.PDF>. [cit. 2024-04-28].
- [23] SMC. *Compact Vacuum Unit.* online. 2024. Dostupné z: https://content2.smcetech.com/pdf/ZQ_A-Aa_EU.pdf. [cit. 2024-05-05].
- [24] FESTO S. R. O. *Vacuum generators OVEL.* online. In: Festo. 2024. Dostupné z: <https://www.festo.com/media/pim/930/D15000100122930.PDF>. [cit. 2024-05-21].
- [25] METABOWERKE GMBH. *Basic 160-6 W OF.* online. 2024. Dostupné z: https://www.metabo.com/cz/index.php?cl=details&aid=26_601501000&anid=26_601501000&fnc=outputSpecSheet&am=1&cnid=26_22817&listtype=list&actcontrol=oxwarticledetails&stoken=. [cit. 2024-05-13].
- [26] ÚŘAD PRO TECHNICKOU NORMALIZACI, METROLOGII A STÁTNÍ ZKUŠEBNICTVÍ. *Roboty a robotická zařízení - Slovník.* Druhé vydání. Praha, 2013.
- [27] *PET-G filament 2,85 mm černý Devil Design 1 kg.* online. In: MATERIALPRO3D. 2024. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/2-85-3-00-mm/pet-g-filament-2-85-mm-cerny-devil-design-1-kg/>. [cit. 2024-05-21].
- [28] *3D tiskárna Original Prusa MK4.* online. In: Prusa research by Josef Prusa. 2024. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/cs/produkt/original-prusa-mk4-2/#specs>. [cit. 2024-05-21].
- [29] *Cena elektřiny 2024 - srovnání E.ON, PRE, ČEZ.* online. In: Tzbinfo. 2024. Dostupné z: <https://www.tzb-info.cz/ceny-paliv-a-energi/14-ceny-elektřiny#D02d>. [cit. 2024-05-24].

16 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

16.1 Seznam zkratk a symbolů

Název	Jednotka	Význam
BHV _j	[-]	bodová hodnota významnosti daného parametru
D _h	[mm]	vnitřní průměr pneumatického vedení
D _p	[mm]	průměr válce
d _p	[mm]	průměr pístnice
h	[mm]	zdvih
k	[-]	celkový počet parametrů
l	[mm]	délka pneumatického vedení
LIDAR	[-]	Light Detection And Ranging
n	[-]	počet ejektorů
P _a	[bar]	atmosférický tlak
P _e	[bar]	tlak použitý pro efektor
PRaM	[-]	Průmyslové roboty a manipulátory
Q _e	[l/min]	průměrná spotřeba ejektoru
q _j	[-]	váha významnosti parametru
Q _{ni}	[l/min]	nominální spotřeba ejektoru
Q _s	[l/min]	sací výkon
S _h	[mm ²]	světlost pneumatického vedení
S _p	[mm ²]	průřez válce
t _{ai}	[s]	aktivní čas ejektorů
V	[l]	celkový objem vzduchu spotřebovaný při jednom cyklu
V _{EP}	[l]	objem vzduchu spotřebovaný ejektory pro vytvoření podtlaku v přídržném elementu
V _{EP2}	[l]	objem vzduchu spotřebovaný ejektory ZZQ1A-B pro vytvoření podtlaku v přídržném elementu
V _{EP2}	[l]	objem vzduchu spotřebovaný ejektory OVEL-5-H pro vytvoření podtlaku v přídržném elementu
V _{EPi}	[l]	objem vzduchu spotřebovaný ejektorem pro vytvoření podtlaku v razném elementu
V _{ER}	[l]	objem vzduchu spotřebovaný ejektorem pro vytvoření podtlaku v razném elementu
V _P	[l]	objem vzduchu spotřebovaný pro pohyb lineárního pneumotoru
V _{Pi}	[mm ³]	objem jedné větve (píst + pneumatické vedení)

16.2 Seznam tabulek

Tab. 1 Vybraná kritéria pro multikriteriální analýzu.....	37
Tab. 2 Párové porovnání.....	38
Tab. 3 Bodové hodnocení vztahu mezi parametry.	38
Tab. 4 Stanovení vah významnosti.....	38
Tab. 5 Bodové hodnocení parametrů.....	39
Tab. 6 Souhrnné hodnocení variant.....	39
Tab. 7 Hodnocení varianty A.	39
Tab. 8 Hodnocení varianty B.....	40
Tab. 9 Hodnocení varianty C.....	40
Tab. 10 Výsledné hodnocení koncepčních variant.....	40
Tab. 11 Rozdělení spojky pro 3D tisk.	48
Tab. 12 Časový rozvrh odebíracího cyklu.....	52
Tab. 13 Celkové aktivní časy ejektorů.	53
Tab. 14 Minimální požadavky na kompresor.....	56
Tab. 15 Odhad ceny nakupovaných dílů.	61
Tab. 16 Pomocné parametry.....	61
Tab. 17 Odhad ceny vyráběných dílů.....	62

16.3 Seznam obrázků

Obr. 1 Metody fenotypizace. [1].....	19
Obr. 2 polní systém. [4]	20
Obr. 3 Robotický systém. [5].....	20
Obr. 4 Rozdělení PRaM. [6]	21
Obr. 5 Porovnání robotických buněk – a) pracoviště s kolaborativním robotem, b) pracoviště se standartním průmyslovým robotem. [10; 11].....	23
Obr. 6 ISO/TS 15066 - techniky spolupráce. [12].....	24
Obr. 7 Ukázka programovacího prostředí kolaborativního robotu. [13].....	25
Obr. 8 Ukázky uchopovacích hlavic – a) mechanická [14], b) podtlaková [15], c) magnetická [16].	27
Obr. 9 efektor pro odporové svařování. [17]	27
Obr. 10 Kombinovaná hlavice – a) podtlakové přísavky, b) pneumaticky ovládané nůžky. [8]	28
Obr. 11 RGB kamera. [18]	28
Obr. 12 Myšlenková mapa podstatných veličin.	30
Obr. 13 Efektor laboratoře Energy's Oak Ridge National Laboratory. [19].....	31
Obr. 14 Varianta A – kinematický řetězec.	33
Obr. 15 Modely varianty A.....	34
Obr. 16 Varianta B – kinematický řetězec.....	35
Obr. 17 Varianta C – kinematický řetězec.....	36
Obr. 18 Varianta C – akční mechanismus	36
Obr. 19 Upravený akční mechanismus.	41
Obr. 20 První varianty přídržného elementu.	42
Obr. 21 Jednotka pro úpravu vzduchu.	42
Obr. 22 Testovací sestava pro variantu C.1.	43
Obr. 23 Přídržný element - 2. verze.....	44
Obr. 24 Rzný element uzpůsobený pro podtlak.....	44
Obr. 25 Sestava varianty C.3.	46
Obr. 26 Přísavka se zmenšeným poloměrem mezikruží.....	46
Obr. 27 Spojka pro plovoucí kloub a šroub.....	47
Obr. 28 Spojka pro šroub a bioptickou jehlu.....	47
Obr. 29 Pouzdro mechanismu.....	49
Obr. 30 Rozdělené tělo efektoru.....	49
Obr. 31 Pneumatické schéma efektoru.....	50
Obr. 32 Funkce ejektorů energy saving. [23]	52

17 SEZNAM PŘÍLOH

3D model koncového efektoru (formát STEP)

- DP2024_MED_model

Výkresová dokumentace (formát PDF)

- DP2024_MED_vykresova_dokumentace