



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 KONSTRUKCE MĚNIČE NÁSTROJŮ PRO
ROBOTICKÉ RAMENO**

DESIGN OF TOOL CHANGER FOR ROBOTIC ARM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTORPRÁCE

AUTHOR

Vilém Ress

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Mikuláš Szabari

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	Vilém Ress
Studijní program:	Strojírenství
Studijní obor:	Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Mikuláš Szabari
Akademický rok:	2019/20

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 bakalářské práce:

Návrh konstrukce měniče nástrojů pro robotické rameno

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Student navrhne automatický měnič nástrojů určen pro robotické rameno s maximální hmotností nástrojů 20 kg. Měnič nástrojů bude vybaven konektory pro připojení a odpojení elektrické a pneumatické sítě.

Cíle bakalářské práce:

Rešerše v oblasti měniče nástrojů.

Rozbor řešené problematiky.

Vytvoření nejméně dvou návrhových variant, jejich hodnocení a výběr vhodné varianty na základě multikriteriální analýzy.

Konstrukční návrh vybrané varianty.

Návrhové výpočty.

Výkresová dokumentace vybraných dílů a výkres sestavy.

Ekonomické zhodnocení.

Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

KOLÍBAL, Zdeněk a Zdeněk KADLEC. Průmyslové roboty II. Konstrukce výstupních hlavic a periférií. Brno: PC DIR, 1993, 165 s. ISBN 80-214-0533-3.

SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

.....

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

.....

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

Specification Bachelor's Thesis

Department: Institute of Production Machines, Systems and Robotics
Student: **Vilém Röss**
Study programme: Engineering
Study branch: Fundamentals of Mechanical Engineering
Supervisor: **Ing. Mikuláš Szabari**
Academic year: 2019/20

Pursuant to Act no. 111/1998 concerning universities and the BUT study and examination rules, you have been assigned the following topic by the institute director Bachelor's Thesis:

Design of tool changer for robotic arm

Recommended bibliography:

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

KOLÍBAL, Zdeněk a Zdeněk KADLEC. Průmyslové roboty II. Konstrukce výstupních hlavic a periferií. Brno: PC DIR, 1993, 165 s. ISBN 80-214-0533-3.

SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Editor Martin Hartl, Miloš Vlk. Brno: VUTIUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

Deadline for submission Bachelor's Thesis is given by the Schedule of the Academic year 2019/20

In Brno,

L. S.

doc. Ing. Petr Blecha, Ph.D.
Director of the Institute

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
FME dean

ABSTRAKT

Teoretická část této bakalářské práce se zabývá rešerší v oblasti výměny koncových efektorů pro roboty. Cílem praktické části je návrh 2 konstrukčních variant systému výměny nástrojů a jejich zhodnocení na základě multikriteriální analýzy. Dále detailní konstrukční zpracování vybrané varianty s výpočtovým řešením zásadních míst, včetně výkresové dokumentace vybraných dílů.

ABSTRACT

Theoretical part of the bachelor thesis deals with research about changing end effectors for robots. The subject of practical part is to design two construction variants of the end effector changing mechanism and their comparison based on multicriterial analysis. Thesis also includes detail construction of the selected variant with necessary calculations and drawings of specific parts.

KLÍČOVÁ SLOVA

Robotické rameno, koncový efektor, systém výměny koncových efektorů, výměna nástrojů.

KEYWORDS

Robotic arm, end effector, end effector changing mechanism, tool changing.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

RESS, Vilém. *Návrh konstrukce měniče nástrojů pro robotické rameno*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124142>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Mikuláš Szabari.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval Ing. Mikuláši Szabarimu za ochotu, pomoc a cenné rady při zpracování této bakalářské práce. Také děkuji své rodině za neustálou podporu při studiu.

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

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

V Brně dne 28

.....
Vilém Ress

OBSAH

1	ÚVOD	17
2	ZÁKLADY ROBOTIKY	19
2.1	Historie robotů	19
2.2	Přehled současného stavu robotiky	19
2.3	Systémové rozdělení robotů.....	20
2.4	Posuzování průmyslových robotů a manipulátorů.....	20
2.4.1	Podle Stupňů volnosti	20
2.4.2	Podle kinematické struktury	20
2.4.3	Podle způsobu pohonu	20
2.4.4	Podle hmotnosti břemene	20
2.4.5	Podle přesnosti robota	21
2.4.6	Podle rychlosti	21
2.5	Konstrukční části robota	21
2.5.1	Pojezdové ústrojí	21
2.5.2	Polohovací ústrojí	22
2.5.3	Orientační ústrojí	22
2.5.4	Koncové efekторы	23
3	AUTOMATICKÁ VÝMĚNA KONCOVÝCH EFEKTORŮ	25
1.2	Princip a popis automatické výměny koncových efektorů	25
1.3	Schématický popis systému automatické výměny.....	25
1.4	Typy konstrukcí systémů automatické výměny.....	26
1.5	Kompenzační a kolizní prvky	27
1.5.1	Kompenzační prvky.....	27
1.5.2	Kolizní prvky	27
1.6	Průzkum trhu.....	28
1.6.1	SCHUNK GmbH & Co. KG (Německo)	28
1.6.2	ATI Industrial Automation	30
1.6.3	STÄUBLI International A.G.	30
1.6.4	Zimmer Group GmbH	30
1.6.5	Applied Robotics Inc.	31
1.6.6	Destaco	32
4	VLASTNÍ NÁVRHY SYSTÉMU VÝMĚNY KONCOVÝCH EFEKTORŮ ...	34
1.7	Systémový rozbor problematiky	34
1.7.1	Problémová situace.....	34
1.7.2	Formulace problému	34
1.7.3	Formulace cílů a řešení	34
1.8	Návrh 2 konstrukčních variant.....	34
1.8.1	1. Varianta	34
1.8.2	2. Varianta	36
1.9	Srovnání navržených variant	37
1.9.1	Srovnání opakovatelnosti upínání	37
1.9.2	Srovnání spolehlivosti	37
1.9.3	Srovnání bezpečnosti systému.....	38
1.9.4	Srovnání váhy a rozměrů	38
1.9.5	Výsledek porovnání	38

5	VÝPOČTOVÁ ČÁST	39
5.1	Výpočet síly působící na píst.....	39
5.2	Návrh pružiny	42
5.3	Výpočet Hertzova tlaku.....	43
5.4	Kontrola šroubu spojovacího písty	47
6	POPIS VLASTNÍ KONSTRUKCE.....	49
6.1	Přenos médií	49
6.2	Těsnící prvky	50
6.3	Čidla	50
7	EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ.....	51
8	ZÁVĚR.....	53
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	54
10	SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK.....	56
10.1	Seznam zkratk a symbolů	56
10.2	Seznam tabulek.....	57
10.3	Seznam obrázků.....	57
11	SEZNAM PŘÍLOH.....	59
11.1	Elektronická příloha	59

1 ÚVOD

Robotizované pracoviště je v této době důležitou součástí automatizované výroby. Příslušenství robotických ramen se čím dál více rozšiřuje. Mezi ně patří i systém automatické výměny koncových efektorů, který se zabývá rychlou a efektivní výměnou nástrojů na roboty v co nejkratším čase. Úkolem tohoto systému je správné upnutí nástroje a zajištění průchodu potřebných médií.

Předmětem bakalářské práce je rešerše v oblasti výměny nástrojů na robotická ramena, jejíž součástí je i průzkum aktuální nabídky na trhu. Dále bude obsahovat 2 konstrukční návrhy, z nichž bude na základě multikriteriální analýzy vhodnější varianta detailněji rozebrána, pevnostně napočítána a zkontrolována a budou vytvořeny výkresy vybraných součástí a výkres sestavy. Důležitou součástí měniče nástrojů je vhodný mechanismus zajišťující spolehlivost a opakovatelnost upnutí nástroje k robotu a zajištění bezproblémového průchodu pneumatické a elektrické sítě. V rámci praktické části této práce je i ekonomické zhodnocení vlastního návrhu.



2 ZÁKLADY ROBOTIKY

2.1 Historie robotů

Zmínku o prvních samohybných mechanismech můžeme nalézt už ve starověku, nejčastěji z Číny a antického Řecka. Dochované zprávy jsou často fantastické povídky, nicméně už tehdy vznikaly první pohyblivé mechanismy poháněné párou a další konstrukce sloužící pro pobavení diváků. V 1. století našeho letopočtu vyrobil Hérón Alexandrijský například dávkovač vody na mince a v 15. století Leonardo da Vinci mechanického lva. V 18. století se zvyšuje zájem o automaty především díky rozšíření orloje a mechanických hodin, vznikají mechanické hračky a fungující pohyblivé figuríny. Velice známý je například francouzský mechanik Jacques de Vaucanson a jeho robot – flétnista, nebo rakouský konstruktér Wolfgang von Kempelen, který sestrojil první stroj napodobující lidskou řeč. Slovo „robot“ se poprvé objevuje roku 1920 v dramatu R.U.R. od Karla Čapka, kterému toto slovo poradil jeho bratr, Josef. [1]

V meziválečném období roboty nechybí na žádné větší technické výstavě a díky elektrickému pohonu se vyvíjejí čím dál rychleji. Z této doby si můžeme připomenout robot TELEVOX, který dokázal na zapísknutí přijmout telefonní hovor. Již roku 1958 byl americkou firmou Unimation vyvinut první průmyslový robot UNIMATE, jenž je dodnes jedním z nejlepších typů průmyslových robotů. Tři roky na to předvedla firma AMF svého robota s názvem VERSATRAN. [1]

V této době jsou roboty – stroje, schopné plnit zadané úkoly s určitou mírou samostatnosti, denně využívány k nahrazení práce člověka, aby zrychlily, zlevnily a zpřesnily výrobu. [1]

2.2 Přehled současného stavu robotiky

Robotické zařízení v současnosti představují plně rozvinuté technické systémy, které výkonně a efektivně kooperují s výrobními systémy v průmyslových odvětvích a postupně nacházejí uplatnění i v nevýrobních a neprůmyslových odvětvích. Současná produkce průmyslových robotů dosáhla vysoké technické úrovně, která se rok od roku zvyšuje z důvodu vlivu dalšího vývoje jejich subsystémů. [2]

Výstižnou definici Průmyslových robotů můžeme připsat profesorovi P. N. Beljaninovi, jejíž znění je: „*Průmyslový robot je autonomně fungující stroj-automat, který je určen k reprodukci některých pohybových a duševních funkcí člověka při provádění pomocných a základních výrobních operací bez bezprostřední účasti člověka, a který je k tomuto účelu vybaven některými jeho schopnostmi (sluchem, zrakem, hmatem, pamětí a podobně), schopností samovýuky, samoorganizace a adaptace, tj. přizpůsobivosti k danému prostředí.*“ [1]

Pole působnosti průmyslových robotů je především v oblastech hromadné výroby, kde nahrazují lidský faktor. Nepostradatelné jsou také při fyzicky náročných činnostech, nebo v případech nečistého, nebo pro člověka nebezpečného prostředí. K jejich dalšímu využití dochází samozřejmě i z důvodu zvyšování produktivity a zlepšování kvality výroby. [3]

2.3 Systémové rozdělení robotů

Z tohoto pohledu můžeme rozdělit roboty na systém, skládající se ze 3 podsystémů. Jedním z nich je senzorický podsystém, ten má na starost vnímání robota. Obsahuje různá čidla a senzory, které posílají data do řídicího podsystému. Ten je v podstatě takovým „mozkem“ robota. reaguje na příchozí informace, zpracovává je a rozhoduje o úkonech, které má robot provést. Posledním podsystémem je motorický neboli akční podsystém, který slouží k zajištění pohybu robotu v prostoru. [1]

2.4 Posuzování průmyslových robotů a manipulátorů

Pro posouzení je potřeba si nejprve ujasnit pojmy průmyslový robot a manipulátor. Rozdíl mezi robotem a manipulátorem je v podstatě především v úrovni intelektu – tedy ve složitosti řídicího systému. Robot má složitější program (tedy i vyšší „inteligenci“) než manipulátor. Dále můžeme rozlišit manipulátor s pružným programem (robot), robot schopný reagovat na změnu pracovního prostředí (adaptivní robot) a robot s určitou mírou umělé inteligence (kognitivní robot). Také můžeme rozlišit pojmy manipulátor (operuje s pevným programem) a synchronní manipulátor (operuje se systémem MASTER-SLAVE, tento systém předává informace od operátora manipulátoru a není tak schopen fungovat v nepřítomnosti člověka). [1]

2.4.1 Podle Stupňů volnosti

- 6 stupňů volnosti – univerzální robot
- Více než 6 stupňů volnosti – redundantní robot
- Méně než 6 stupňů volnosti – deficitní robot

Počet stupňů volnosti neurčuje kvalitu robotu, určuje pouze rozsah manipulačních schopností. Běžné průmyslové roboty mívají 5–6 stupňů volnosti. [4]

2.4.2 Podle kinematické struktury

- Roboty se sériovou kinematikou – jejich výhodou je větší dosah
- Roboty s paralelní kinematikou – výhodou je vyšší rychlost
- Roboty s hybridní kinematikou – kombinuje předchozí typy [1]

2.4.3 Podle způsobu pohonu

- Mechanické
- Pneumatické
- Hydraulické
- Elektrické
- Kombinované

Toto posouzení je důležitý faktor při rozhodování mezi robotem a manipulátorem z hlediska potřeb a možností uživatele. V současnosti převažují elektrické pohony, nicméně pro vysoké zatížení jsou vhodné hydraulické a pro vysoké rychlosti pneumatické pohony. [1]

2.4.4 Podle hmotnosti břemene

Jeden ze základních aspektů posuzování využití robota. Hmotnosti se pohybují v řádech jednotek až stovek kilogramů. Do celkové hmotnosti výrobci započítávají také váhu koncového efektoru, tudíž hmotnost samotného břemene musí být nižší. [1]

2.4.5 Podle přesnosti robota

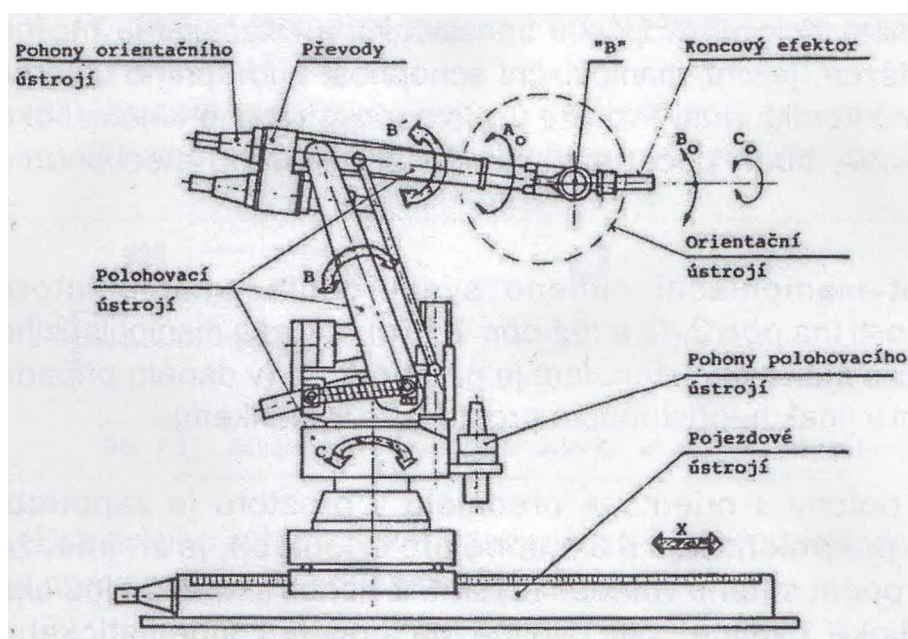
Stále platí, že přesnost robota v porovnání s obráběcími stroji je zhruba stokrát nižší. Jeho přesnost se také odvíjí od váhy břemene, se kterým je manipulováno – čím těžší břemeno, tím se přesnost snižuje. Nicméně i tak jsou některé roboty schopné provádět některé operace – například upnout součásti do sklíčidla soustruhu, s vysokou přesností, a to až $\pm 0,01$ mm. [1]

2.4.6 Podle rychlosti

Snaha vytvářet roboty schopné dosáhnout co nejvyšších rychlostí není překvapivá, nicméně rychlost je omezena vahou břemene a přesností robota. S čím těžší součástí bude robot operovat, tím pro něj bude obtížnější dosáhnout vyšší rychlosti a požadované přesnosti. Dalším důvodem omezení rychlosti je samozřejmě bezpečnost, v případě, že se robot vyskytuje v možné blízkosti člověka. [1]

2.5 Konstrukční části robota

Roboty můžeme z konstrukčního pohledu rozdělit na 4 hlavní části (Obr. 1), ústrojí pojezdové, polohovací, orientační a koncové efektor. Každá část má svůj specifický význam, proto je třeba je podrobněji rozebrat. [1]



Obr. 1) Konstrukční části robota [1]

2.5.1 Pojezdové ústrojí

Účel pojezdového ústrojí, zvaného též jako lokomoční, je přemísťovat celý robot, který bývá k pojezdovému ústrojí přimontován už jako celek. Stupně volnosti lokomočního ústrojí se v případě stacionárních robotů ne vždy počítají do celkového počtu stupňů volnosti, rozhodující je účel pojezdu robota. Příkladem, kdy se tyto stupně volnosti nepřičítají k celkovému počtu může být případ, kdy pojezdové ústrojí slouží jen k přesunu robota v rámci jediného pracovního místa. Stupně volnosti pojezdového ústrojí se započítávají především v případě, že robot obsluhuje větší počet pracovních míst se stroji, nebo více seskupení těchto pracovních míst (robotizovaná hnízda). [1]

Konstrukce pojezdového ústrojí není zvlášť složitá, může jít o pomocná kola, na kterých je robot postaven. Ty se mohou pohybovat po zemi, kolejnicích nebo po závěsné dráze. Závěsné dráhy jsou bezpečnější, protože se snižuje pravděpodobnost převrácení robotu. Nejpoužívanějším řešením je v této době lineární valivé vedení, které se skládá z vozíku s valivými tělísky (kuličky, válečky) pohybujícího se po kolejnici. Pohybu je pak docíleno vhodným konstrukčním řešením – například systémem s pastorkem a hřebenem. [1]

2.5.2 Polohovací ústrojí

Toto ústrojí slouží k ustavení polohy referenčního bodu „B“ a má zásadní vliv na architekturu robotu. Rozdělujeme rotační a translační kinematické dvojice, přičemž 1 stupeň volnosti daný rotační kinematickou dvojicí vymezuje kružnici a 1 stupeň volnosti daný translační kin. dvojicí vymezuje pohyb po úsečce. Pro pohyb v rovině, nebo ploše potřebujeme 2 kinematické dvojice. Pokud přidáme ještě třetí kin. dvojici, můžeme zajistit i pohyb v prostoru. Tím pádem nám můžou vzniknout 4 základní spojení kinematických dvojic: [1]

- TTT – 3 translační kinematické dvojice (výsledný prostor je kvádr)
- RTT – 2 translační a jedna rotační kin. dvojice (výsledný prostor je válcový)
- RRT – 2 rotační a jedna translační kin. dvojice (výsledný prostor je kulový)
- RRR – 3 rotační kinematické dvojice (výsledný prostor je oblounový)

Vývoj průmyslových robotů postupně nahrazoval translační kinematické dvojice za rotační. Od struktury RRT lze odlišit strukturu „SCARA“, s translací v ose z, která je zároveň osou obou rotací. [1]

Pro počet možných spojení kinematických dvojic m platí:

$$m = 2^n, \text{ kde } n \text{ je počet stupňů volnosti.}$$

2.5.3 Orientační ústrojí

Polohovací ústrojí dopraví referenční bod „B“ kamkoliv v prostoru dosahu tohoto ústrojí. K další orientaci s manipulovaným předmětem slouží orientační ústrojí. Toto ústrojí zajistí přesnou orientaci součásti po dosažení dané polohy. [1]

Orientační ústrojí je v podstatě vždy tvořeno rotačními kinematickými dvojicemi, většinou dvěma (aby nedošlo k natačení polohovacího ústrojí), případně třemi (pokud je třeba nastavit orientaci dané součásti – příkladem může být montáž čepu s perem do otvoru). [1]

Protože jde o značně pohyblivou soustavu, není jednoduché u orientačního ústrojí určit příslušnost k ose x, y, z. Proto se používá označování kinematických dvojic jako $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3$. [1]

Orientační ústrojí můžeme dělit na stavebnicové a integrované provedení. U stavebnicového provedení má každá kin. dvojice samostatný pohon s odměřováním, připojovacími prvky na vstupu i výstupu a podobně, je tedy složena ze samostatných autonomních modulárních jednotek. Z toho důvodu se nevyplatí spojovat dlouhé řetězce. Konstrukce integrovaného provedení je založena na ozubených převodech a pákových mechanismech, často zasahuje i do polohovacího ústrojí a není možné ji používat separovaně. [1]

2.5.4 Koncové efekторы

Na konci orientačního ústrojí je připevněn koncový efektor, který přímo realizuje příslušnou operaci. Volba koncového efektoru záleží na operaci, kterou má robot vykonávat. Může jít o manipulaci v rámci pracovních prostorů výrobních strojů, mezioperační manipulace, technologické operace, kontrolní operace nebo speciální práce. [1]

Mezi koncovým efektořem a orientačním ústrojím se může vyskytovat ještě kompenzátor, nebo měnič nástrojů. Kompenzátor slouží k vyrovnání polohy a orientace součásti, čímž eliminuje nepřesnosti při předávání součásti mezi robotem a výrobním strojem. [1]

Koncový efektor, nebo také výstupní hlavice, bývá často nazýván jako „chapadlo“. Tento termín není zcela přesný, označuje jen jednu skupinu z celkové množiny koncových efektoruů, jelikož chapadla slouží pouze k manipulaci s danými součástmi. [5]

Výstupní hlavice můžeme z konstrukčního pohledu rozdělit na: [5]

- Výstupní hlavice technologické
- Výstupní hlavice manipulační
- Výstupní hlavice kombinované
- Výstupní hlavice speciální

Postupující automatizace dala vzniknout další úrovni, kterou je automatická výměna koncových efektoruů během pracovního procesu. [5]

Technologické koncové efekторы

Typickou technologickou činností s využitím technologických výstupních hlavic může být elektrické svařování, nástřik ochranných a nátěrových hmot a montážní práce (například spojování, lepení). [1] Hlavním znakem těchto koncových efektoruů je právě nástroj, nebo celý systém nástrojů, určený k daným operacím. [3]

Při vyšším využití těchto hlavic se v budoucnu očekává aplikace senzorů pro činnost adaptivních řídicích systémů. [1]

Manipulační (úchopné) koncové efekторы

[3] Manipulační hlavice se používají k uchopení a manipulaci se součástmi. Převážně jsou konstruovány na míru pro konkrétní činnosti přímo uživateli robotů a manipulátorů. Části hlavic, které přichází do styku přímo s manipulovanými součástmi jsou takzvané „úchopné prvky“. Můžeme je dělit podle schopnosti řídit manipulovanou sílu na aktivní (chapadla) a pasivní (například kleštiny). Aktivní úchopné prvky jsou schopné ovládat úchopnou sílu, na rozdíl od pasivních. V případě pasivních úchopných prvků je možné uchopit předmět, ale pro uvolnění je třeba vnější zásah. Dále je možné tyto prvky dělit podle úchopné síly na: [1]

- Mechanické
 - Magnetické
 - Podtlakové
 - Speciální
- **Mechanické úchopné prvky [5]**

Mezi nejjednodušší mechanické úchopné prvky patří například prizmatické podložky, sloužící především pro odložení součásti. K mírně složitějším pak můžeme řadit prvky využívající kleštiny či čelisti s pružinami. V obou případech jde o úchopné prvky pasivní, není

tedy možné jejich úchopnou sílu měnit v průběhu operace a pro vyjmutí musí být použit například vyhazovač.

Mezi aktivní prvky můžeme zařadit chapadla s pohyblivými čelistmi, které jsou poháněny lineárními nebo rotačními motory. V největší míře se používají úchopné hlavice se dvěma aktivními prvky:

- Posuvný – posuvný
- Posuvný – rotační
- Rotační – posuvný
- Rotační – rotační

Ideálním příkladem aktivního úchopného prvku může být lidská ruka, která je schopná vykonávat rozsáhlý počet úkonů a má několik možností, jak uchopit předměty všech tvarů. Bohužel je její konstrukční řešení velmi obtížné.

- **Magnetické úchopné prvky [5]**

Pasivní magnetické úchopné prvky se používají především pro manipulaci s lehčími předměty s menšími rozměry. Takovými předměty mohou být plechové výlisky, podložky a jiné součástky. Výhodou je jejich snadná konstrukce, která spočívá v permanentních magnetech vložených v jejich držáku. Nevýhoda použití toho úchopného prvku je, že efektor zachycuje i ostatní magnetické objekty, což může mít špatný vliv na zajištění správné polohy součástí. K uvolnění součásti je pak použit pomocný mechanismus, nebo je předmět uvolněn tangenciálním pohybem robota, čímž je předmět stržen.

Aktivní úchopné prvky jsou vybaveny elektromagnety, nejčastěji napájenými stejnosměrným proudem. Pro uvolnění součástky v tomto případě není potřeba žádný mechanismus, stačí jen vypnout přívod proudu do elektromagnetu.

- **Podtlakové úchopné prvky [5]**

V případě pasivních podtlakových úchopných hlavic je hlavní částí hlavice pružná deformační přísavka. Jakmile se robot přiblíží k povrchu manipulované součásti, přitlačí přísavku na povrch, čímž dojde ke zmenšení prostoru přísavky, ten se při zdvihání zase zvětší a dojde ke vzniku podtlaku. Pro bezpečné uchopení je třeba zajistit dostatečnou hladkost povrchu součásti. K uvolnění je použit stejný princip jako u předchozích případů.

Činností vývěv nebo ejektorů k dosažení podtlaku využívají aktivní úchopné prvky. V případě použití vývěvy je možné připojit na odsávací vedení i více podtlakových komor. S využitím ejektoru je možné na něj připojit několik podtlakových komor, nebo může být každá komora zvlášť vybavena vlastním ejektorem. Hlavice využívající ejektorů jsou levnější, nicméně mají mnohem větší spotřebu stlačeného vzduchu.

- **Speciální úchopné prvky [5]**

Kromě obvyklých koncových hlavic se vyskytují i speciální konstrukce úchopných prvků, které jsou navrhovány pro konkrétní funkci. Příkladem mohou být hlavice pro manipulaci s křehkými objekty. Může jít o pryžové nesouměrné těleso, které se po zavedení pneumatického signálu zakřivuje, nebo o takzvané „měkké prsty“.

3 AUTOMATICKÁ VÝMĚNA KONCOVÝCH EFEKTORŮ

1.2 Princip a popis automatické výměny koncových efektorů

Některé použití robotů do automatizovaného procesu jsou založené na koncepci použití jediného robota, přičemž robot vykonává několik různých manipulačních a technologických operací, případně jejich kombinaci. Pro takový případ je možné využít systém automatické výměny výstupních hlavic, což rozšiřuje možnosti robota. [2]

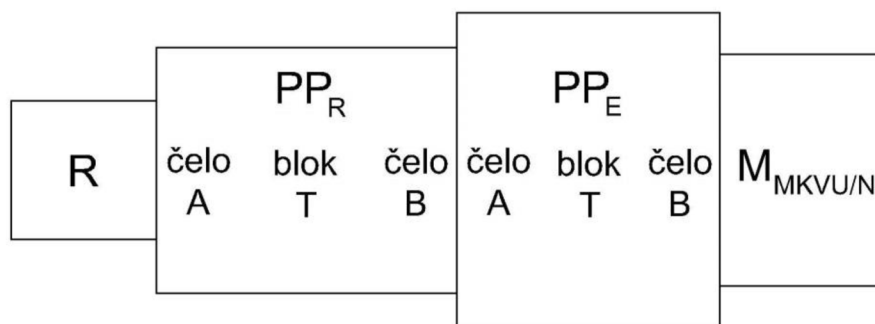
Schopnost automatické výměny koncových efektorů umožňuje robotu pružně reagovat na změnu velikosti i tvaru manipulovaných součástí a také na změnu technologických operací, aniž by došlo k přerušení jeho automatizovaného cyklu. [2]

Systém automatické výměny výstupních hlavic umožňuje flexibilní využití použitých robotů. Jejich výhodou je schopnost přizpůsobit se změně tvarů manipulovaných součástí nebo přechodu z jedné technologické operace na druhou bez přerušení pracovního cyklu. Robot je schopen si podle zadaného programu pro danou operaci sám upnout potřebný efektor a s ním provést požadovanou operaci. [1]

1.3 Schématický popis systému automatické výměny

Automatický měnič nástrojů se skládá ze dvou částí, části na robotu (Master) a na nástroji (Tool). Ke spojení dojde, jakmile se speciální příruba upne ke koncovému členu robota, to je zajištěno pomocí speciálního upínacího mechanismu. Požadavky na tento systém jsou spojené především s: [2]

- Vysokou funkční a provozní spolehlivostí.
- Minimalizací operačních časů, nutných pro automatickou výměnu hlavic.
- Velmi dobrou bezpečností provozu, především proti samovolnému uvolnění v případě výpadku pohonu.
- Zaručením silného mechanického spojení s dlouhodobou opakovatelností přesnosti zajištění vzájemné polohy měněných součástí.
- Zajištěním účinného přenosu energie z robota na efektor.
- Zabezpečením spolehlivého přenosu řídicích a kontrolních signálů.
- Se zvýšením hmotnosti koncové části robota.
- Se zvýšením obtížnosti řízení robota.



Obr. 2) Schéma automatické výměny koncových efektorů. Překresleno podle: [2]

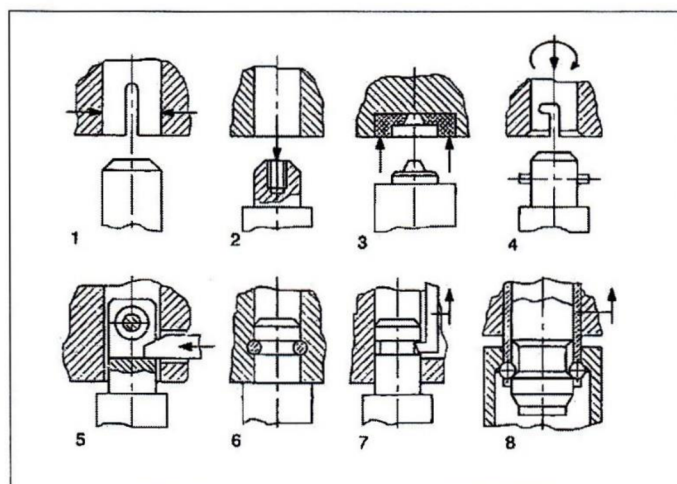
Na konci ramene robotu – označeno R – je pevně připevněna přípojovací příruba pro upevnění na robot – označena PP_R – přes čelo A (viz Obr. 2). Tato příruba dále zajišťuje, přes čelo B, upnutí přípojovací příruby koncového efektoru – označena PP_E – díky upínacímu mechanismu, který se nachází v transformačním bloku T. Příruba pro upevnění na robot je na robotu uchycena pevně, většinou pomocí šroubového spoje. Musí zajistit přívod potřebných médií, jako například tlakových, hydraulických nebo elektrických, pro potřeby funkce automatického upínání a funkce koncového efektoru. Proto je čelo A vybaveno konektory pro připojení těchto médií a čelo B vybaveno automatickými spojkami pro přívod médií do přípojovací příruby koncového efektoru. Transformační blok T plní funkci pohybového mechanismu, který zaručuje translační nebo rotační pohyby funkčních prvků mechanismu automatického upínání příruby PP_E . [2]

Přípojovací příruba koncového efektoru – označena PP_E – je pevně připojena ke koncovému efektoru – značen $E_{MKVU/N}$ – přes čelo B, které je vybaveno konektory pro připojení médií potřebných pro funkci výstupní hlavice. Transformační blok T v tomto případě obsahuje doplňující mechanismus automatické výměny koncových efektorů a tvoří tak dohromady s transformačním blokem příruba pro upevnění na robot jeden funkční celek. Díky tomu je zajištěno spojení přírub, nicméně aby byl zajištěn přívod médií, musí být čelo A příruby pro připojení na koncový efektor řešené jako „protikus“ k čelu B příruby pro připojení na robot. [2]

Koncový efektor – značen $E_{MKVU/N}$ – je pevně připojen na přípojovací přírubě koncového efektoru většinou pomocí šroubového spoje a plní funkci koncového efektoru ve smyslu jeho systémového modelu. [2]

1.4 Typy konstrukcí systémů automatické výměny

Můžeme spojit několik principů spojování přírub s využitím způsobu pohonu a konstrukčního provedení aretace. Kuličkové adaptéry využívají pneumatický, nebo hydraulický pohon a jako u většiny ostatních principů je aretace zajištěna vlastní činností. Při upínání mechanickém (zaháknutím, čepem, klínem nebo kolíkem) je využíván pneumatický pohon. Magnetické upínání využívá pohon elektrický stejně jak bajonetové adaptéry, které jako jediné mohou využít aretace jak vlastní činností, tak činností robotu. [1]



Obr. 3) Funkční principy systémů automatické výměny. [1]

Dále je možné rozdělit prvky podle funkčních skupin na prvky přidržovací, středící a vázací adaptéry. Je třeba také myslet na správné konstrukční řešení nejen z důvodu ideálního mechanického spojení, ale také, aby byl umožněn přenos informací a energie. [1]

Příklady konstrukčních řešení systémů automatické výměny (viz Obr. 3):

- 1) Stahovací kleště,
- 2) tažný šroub,
- 3) silové magnetické pole,
- 4) bajonetový závit,
- 5) posuvný klín a válcová zarážka,
- 6) kolíky v kruhové srážce,
- 7) tažná klika,
- 8) kuličkový mechanismus.

1.5 Kompenzační a kolizní prvky

1.5.1 Kompenzační prvky

Velice důležitým prvkem při automatické výměně nástrojů je také kompenzace odchylek. Ve chvíli, kdy si robot upíná koncový efektor je potřeba, aby byl efektor ve správné poloze vůči robotu, tedy, aby byly správně připojeny všechna přivedená média – silová i ovládací. O to se starají mechanismy ke kompenzaci odchylek, které mohou být aktivní, nebo pasivní. [1]

Pasivní kompenzační mechanismy fungují na principu tvarového vystředění spojovaných součástí. Po dostatečném přiblížení k upínanému nástroji dojde ke kontaktu těchto kompenzačních prvků a vznikne silové působení, které zajistí vymezení správné polohy. Nejpoužívanějším tělesem používaným k zajištění polohy bývají jehlanovité útvary. Pasivní kompenzační mechanismy jsou v praxi používány častěji. [1]

Aktivními prvky jsou myšleny senzory, které rozpoznávají vzájemnou polohu nástroje a ramene. Řídicí systém robota tyto signály zpracovává a následně upravuje pohyby při ustavování vzájemné polohy. Tyto prvky se používají především v případech, kdy jsou pasivní prvky nespolehlivé. [1]

1.5.2 Kolizní prvky

Mezi efektor a rameno robotu se často montují ochranné prvky, sloužící pro ochranu efektoru v případě kolize. Protože se s rostoucí složitostí výstupní hlavice zvyšují také škody utrpěné kolizí, tyto prvky zajišťují přerušování spojení hlavice s robotem při překročení hraniční hodnoty zatížení. Díky tomu je poškozen a vyměněn pouze ochranný člen, což zajistí finanční úsporu. Kolizní jednotky můžeme rozdělit na mechanické, lomové a elektronické. [1]

Mechanické kolizní prvky fungují na jednoduchém principu. Efektor drží na svém místě silou pružiny, jakmile dojde ke kolizi a tato síla je překonána, dojde k vypojení efektoru. Tento systém je nejjednodušší díky snadné konstrukci a výpočtu síly pružiny. [1]

Princip lomových kolizních prvků je založen, jak už je z názvu patrné na lomu místa mezi hlavicí a robotem. Dojde-li v případě kolize k překročení navržené únosné síly, dojde k lomu v předem navrženém místě. Toto místo má průřez a lomové charakteristiky navržené přímo pro danou situaci. Díky ulomení se efektor značně nepoškodí a je snadno opravitelný. [1]

Posledním a složitějším kolizním prvkem jsou systémy elektronické kolizní ochrany. Tento systém neodpojí koncový efektor od robotu, nýbrž ihned pošle signál k vypnutí robotu. K tomu dojde, pokud je překročena nastavená hodnota axiální výchylky, nebo ohybového, či krouticího momentu. Člen elektronické kolizní ochrany se nachází buď mezi robotem a efektozem, nebo je v podobě „pláště“ s citlivým povrchem, který obklopuje robotické rameno. [1]

1.6 Průzkum trhu

Systémy automatické výměny koncových efektorů se zabývá mnoho firem. Většinou jsou to firmy vyrábějící roboty (jako například Stäubli), nebo firmy zabývající se výrobou upínacích mechanismů a příslušenství pro roboty (například firma SCHUNK). Každý výrobce využívá svůj systém výměny, a tedy i mechanismus, který zajišťuje pevné upnutí. Jelikož se trh stále rozrůstá, nabízí měniče nástrojů čím dál více firem. Proto je v tomto průzkumu vybráno jen několik nejnámějších.

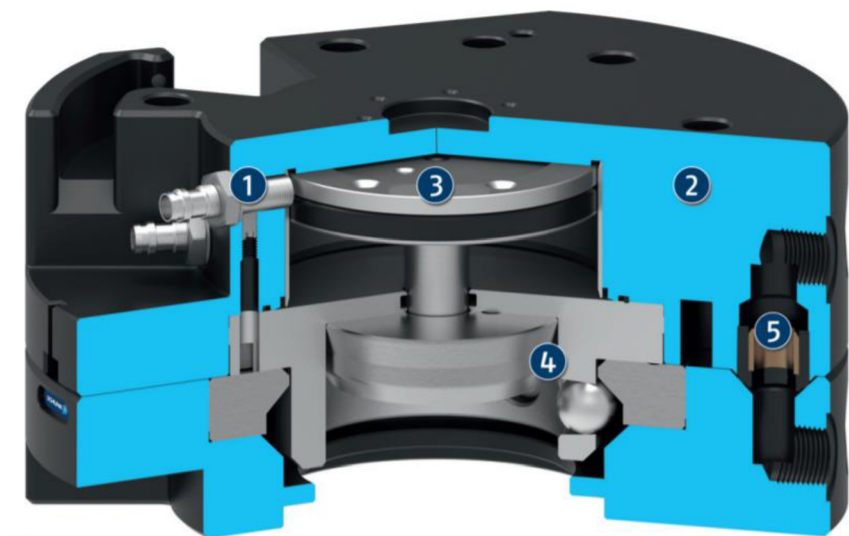
1.6.1 SCHUNK GmbH & Co. KG (Německo)

SCHUNK je německá firma vyrábějící uchopovací systémy a upínací techniku založena roku 1945. Společnost nabízí součásti a příslušenství pro obráběcí stroje a průmyslové roboty, univerzální upínací systémy, sklíčidla, různé sensorické a energetické přípojky, systémy kolizní ochrany, silové senzory a další produkty.

Z oblasti měničů nástrojů pro průmyslové roboty nabízí několik typů. Pro automatickou výměnu slouží systémy SWS, GWS a EWS. Pro manuální výměnu jsou to systémy SHS a HWS. Kromě těchto typů jsou v nabídce také systémy pro výměnu palet, ploché systémy, kompaktní systémy nebo miniaturní systémy výměny.

- *Systém SWS [6]*

První jmenovaný systém výměny koncových efektorů využívá pneumatický pohon (o tlaku v rozmezí 4,5 – 6,9 bar) k pohybu pístu, který posouvá kuličkový mechanismus. Kvůli úspoře hmotnosti je pouzdro (2) vyrobeno z vysokopevnostní hliníkové slitiny. Připojovací rozměry příruby se řídí normou ISO, sedí tedy na většinu robotů bez nutnosti použití dalších mezipřírub. Volitelnou možností je přidání bezdotykového uzamykání „no-Touch-Locking“, které zajišťuje, aby bylo SWS zajištěno i když se příruby nedotýkají.



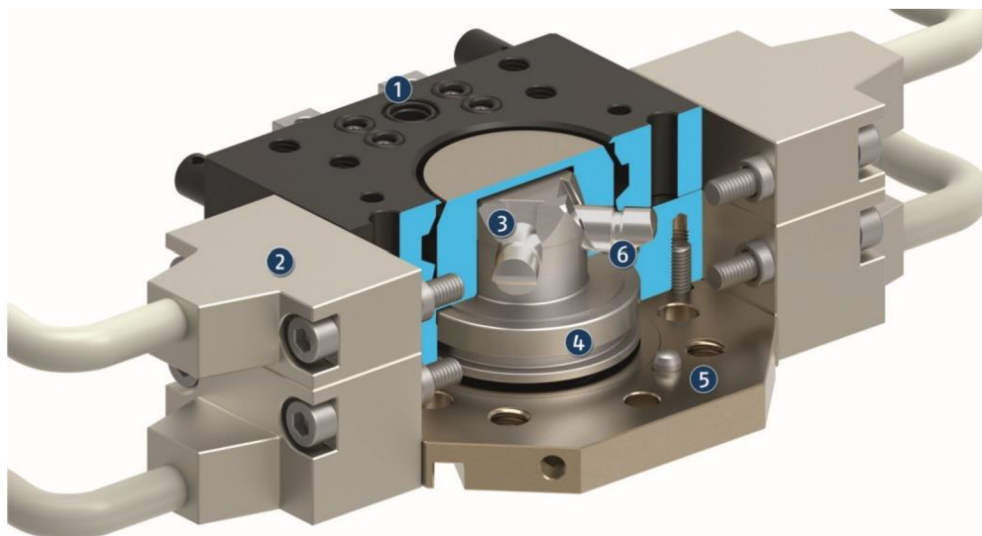
Obr. 4) Řez systémem SWS [7]

K uzamknutí systému dochází tak, že píst (3) je tlakem posunut směrem dolů, píst je spojen s rozpěrným členem (4), který zatlačí kuličky do drážky. Díky technologii „no-Touch-Locking“ je síla, kterou musí vyvinout robot, aby spojil příruby, nulová. Robot se tedy v praxi dostatečně přiblíží ke koncovému efektoru, a samotné přitlačení je už zajištěno upínacím mechanismem. Člen (4) je tvarován tak, že v případě ztráty tlaku v pneumatické soustavě nedojde k uvolnění efektoru díky tření. Polohu pístu je možné kontrolovat pomocí senzorů (1) v pouzdře (2) (funkci systému je možno vidět na Obr. 4).

- **Systém GWS [8]**

Dalším systémem využívajícím pneumatický pohon k zajištění je systém GWS sloužící pro průmyslové manipulátory. Pneumatický pohon ovládá uzamykací mechanismus na bázi klínových háků zapadajících do drážky. Jako předchozí systém je velmi univerzální, nicméně používané koncové efektoru jsou především chapadla a podtlakové úchopné hlavice. Systém je složen z hlavy pro výměnu chapadla namontované na robotu a adaptéru pro výměnu chapadla, která je namontována na nástroji. Provozní tlak pneumatického pohonu se pohybuje v rozmezí 4,5-6 bar a rozmezí okolní teploty je 5-60 stupňů Celsia.

Proces upnutí koncového efektoru začíná najetím robotu do dané polohy k nástroji a nasunutím příruby robotu do příruby efektoru, přičemž čela stykových ploch měniče od sebe nesmí být vzdáleny více jak 2 milimetry. Jakmile robot dosáhne toho bodu, je tlakem posunut pneumatický píst, který zasune klíny do drážky v přírubě efektoru. Rozpojení je možné provést pouze pneumaticky. Proti uvolnění efektoru v případě ztráty tlaku v soustavě je systém zabezpečen integrovanými pružinami. Mechanismus je znázorněn na obrázku (5).



Obr. 5) Řez systémem GWS [9]

- **Systém EWS [10]**

Toto řešení výměny koncových efektorů slouží pro použití v aplikacích, kde není k dispozici pneumatický pohon ovládání upínacího mechanismu. Konstrukční řešení způsobu upínání je zase kuličkový mechanismus, nicméně v tomto případě je ovládán integrovaným elektromotorem. Systém je samozřejmě vybaven mechanismem pro zabezpečení proti výpadku. Doporučená manipulační hmotnost uváděná výrobcem je 18 kg.

1.6.2 ATI Industrial Automation

Tato americká firma sídlící v Apexu se zabývá výrobou koncových efektorů, měničů efektorů, kolizních systémů, různých druhů senzorů a dalším příslušenstvím pro roboty přes 30 let. Nabízí více než 30 variant svého měniče nástrojů s názvem QC. Většina měničů využívá kuličkový mechanismus upínání s pneumatickým nebo elektrickým pohonem, podobný systému SWS firmy SCHUNK. [11]

- **Systém QC**

Jak už bylo zmíněno, firma vyrábí přes 30 modelových variant toho systému výměny výstupních hlavic. Rozměry a tvar měničů se mění podle únosnosti, uzamykací síly, momentů a dalších parametrů, nicméně princip upínání zůstává stejný. Pouzdro s kuličkami (v případě měničů nástrojů pro těžkou automatizaci i více pouzder) na jedné části měniče je zasunuto do protikusu, mechanicky, nebo elektricky ovládaný píst zatlačí kuličky do drážky v tomto protikusu a tím dojde ke spojení. Upínání je tedy velice podobné jako u systému SWS firmy Schunk. [11]

1.6.3 STÄUBLI International A.G.

Stäubli je Švýcarská mezinárodní firma s bohatou minulostí a roky zkušeností v oblasti robotiky. Má více než 5500 zaměstnanců a pobočky má v 50 zemích. V této době se specializuje na 3 oblasti – textilní stroje, robotiku a fluidní a elektrické konektory. V oblasti konektorů můžeme najít také systémy výměny výstupních hlavic MPS. [12]

- **Systémy MPS**

Stäubli je další firmou, která postupem času začala používat kuličkový mechanismus upínání koncových efektorů. Ten už není potřeba dál popisovat, jelikož je stejný, jako v předchozích případech. Měniče nástrojů ze série MPS jsou působivé, díky jejich multifunkčním technologickým aplikacím. U systémů je možnost vybrat si moduly pro přenos potřebných dat a tím si konkrétně navolit příslušenství měniče pro vlastní potřebu. Společnost nabízí 7 variant systémů MPS, podle nosnosti, ohybových a krouticích momentů. Zabezpečení proti samovolnému uvolnění v případě výpadku energie je zajištěno pomocí pružiny uvnitř mechanismu. [12]

1.6.4 Zimmer Group GmbH

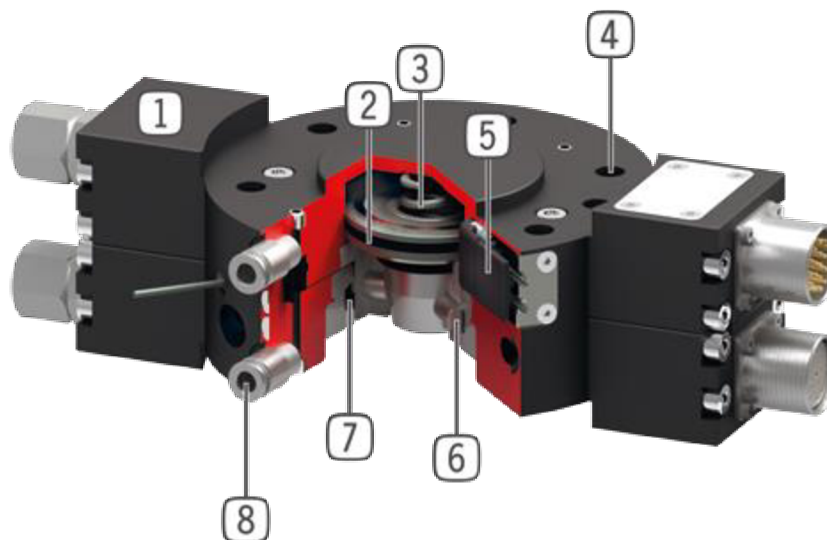
Tato německá společnost s více než 1200 zaměstnanci se zabývá technologiemi pro obráběcí stroje, automatizaci, výrobou lineárního vedení a jinými produkty v oblasti strojírenství. Součástí jejich nabídky tvoří pneumatické a elektrické manipulační komponenty a příslušenství pro roboty, mezi nimiž je také systém výměny koncových efektorů. Tyto produkty jsou v jejich nabídce především díky spojení s firmou Sommer-automatic GmbH. [13]

V nabídce jsou 2 typy systémů výměny výstupních hlavic, jimiž jsou série WWR pro menší zátěže a série WWR1000 pro větší zátěže. [13]

- **Série WWR**

V sérii WWR je 7 provedení. Podle provedení se nosnost pohybuje od 20 do 300 kg a počet přívodů pneumatické energie (4) je 4, 6, nebo 10. Uzamčení mechanismu je zajištěno pneumaticky, pomocí posuvných západek (6) nacházejících se v přírubě na robotu, které jsou zasunuty do drážky (7) v protikusu pohybem pístu (2). Pojistnou funkci pro případ výpadku pneumatické energie zajišťuje integrovaná pružina (3). Element (1) slouží k přenosu elektrické

energie a čidla (5) slouží k monitorování polohy pístu. Čelo příruby (4) je navrženo podle normy EN ISO 9409-1. 3D model upínacího mechanismu je znázorněn na Obr. (6). [13]



Obr. 6) Série WWR [14]

- **Série WWR1000**

Větším systémem výměny koncových efektorů je Série WWR1000, která obsahuje 2 provedení o nosnostech 500 nebo 1000 kg. Princip upnutí efektoru je v podobný jako v případě série WWR, posuvné západky zajistí polohu pístu, který se tím pádem nepohne a nedovolí odjištění efektoru. Posuv pístu je znovu zajištěn pneumaticky. V případě ztráty pneumatické energie zajistí setrvání v upnuté poloze integrované pružiny.

1.6.5 Applied Robotics Inc.

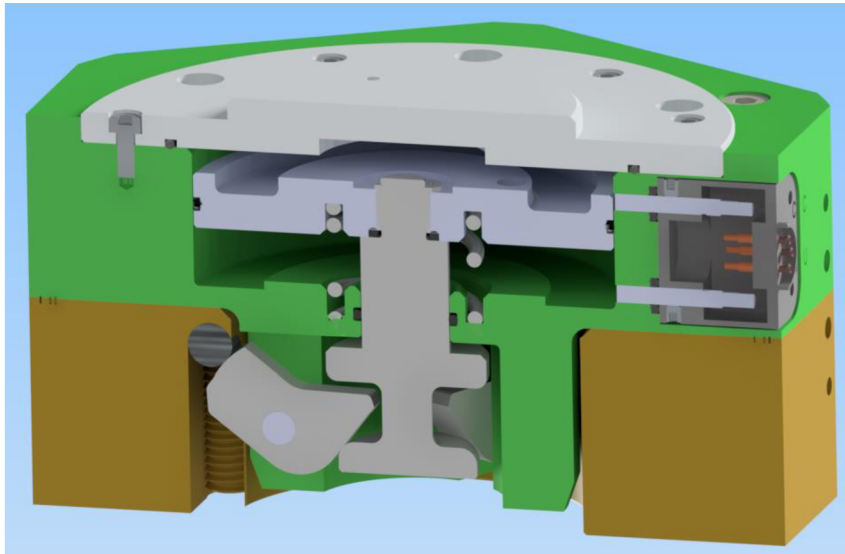
Společnost Applied Robotics je globální poskytovatel řešení pro průmyslovou automatizaci a robotiku, především v oblasti koncových efektorů. Mezi další produkty patří systémy automatické výměny koncových efektorů, kolizní bezpečnostní jednotky a další příslušenství pro robotiku. [15]

V nabídce systémů výměny koncových efektorů je manuální systém CRM a automatický systém EPSILON. [15]

- **EPSILON**

Série automatických měničů koncových efektorů EPSILON obsahuje 11 provedení s nosností 10 až 1500 kg. Ty pracují s operačním tlakem 5-7 bar, v prostředí o okolní teplotě v rozmezí 5-60 °C a se znečištěním hlukem menším než 70 dB. [15]

Upínací mechanismus se skládá z pístu a 3 upínacích kolíků. K upnutí dochází tak, že pneumaticky ovládaný píst nacházející se v přírubě na robot se posune a otočí s kolíky, které zapadnou do drážek v přírubě na nástroj. Modely EPSILON nahradily trojici dřívějších modelů CXC, Omega a Sigma. Na obrázku (7) můžeme vidět řez modelem EPSILON E100. [15]



Obr. 7) Řez modelem EPSILON E100, model stažen z oficiálních webových stránek Applied Robotics [15]

1.6.6 Destaco

Firma Destaco spadá pod americkou společnost Dover company, která je světovým obchodníkem s průmyslovým zbožím. Hlavní nabídku firmy Destaco tvoří upínací systémy, dopravníky a příslušenství pro roboty. Má několik poboček v Severní Americe, Evropě i Asii. [16]

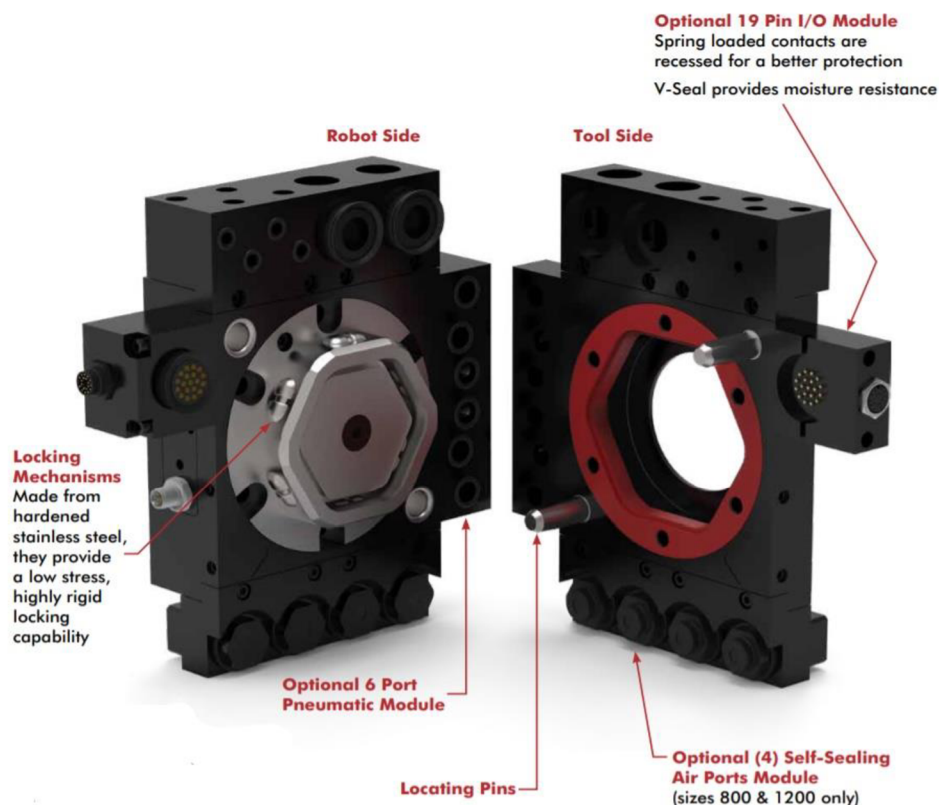
Mezi nabídkou příslušenství pro roboty jsou také automatické měniče nástrojů. Konkrétně to jsou série QC/TP a série RQC/RTP. Každá se vyznačuje jiným mechanismem upínání a jinými vlastnostmi. Oba systémy umožňují přenos pneumatické energie, vody a elektrické energie pro svařovací operace nebo servomotory. [16]

- **Série QC/TP**

Tyto modely se vyznačují jednoduchým kuličkovým mechanismem, obdobným jako u již dříve zmíněných systémů výměny. Tyto modely firma dodává s doživotní zárukou jako důkaz, že jsou spolehlivé a vydrží neomezený počet cyklů výměn. Únosnost nejvyššího modelu ze série je 68 kg. [16]

- **Série RQC/RTP**

Větší a mohutnější měniče koncových efektorů série RQC/RTP s maximální únosností 550 kg mají upínací mechanismus fungující na obdobném principu jako SWS firmy Schunk, s tím rozdílem, že kuličky jsou nahrazeny válečky, pro zajištění větší únosnosti (viz obr. 8). [16]



Obr. 8) Série RQC/RTP [17]

Firem zabývajících se řešením problematiky výměny koncových efektorů je čím dál více, proto v tomto shrnutí nejsou zmíněny všechny. Dalšími jsou například Gimatic, IQM, Effecto atd.

Tab 1) Shrnutí používaných mechanismů pro automatickou výměnu nástrojů

Upínací mechanismus	Počet použití	typy
kuličkový	5	SWS, EWS, QC, MPS, QC/TP
Klíny zapadající do drážky	3	GWS, WWR, WWR1000
Otočné háky	1	EPSILON
Válečky zapadající do drážky	1	RQC/RTP

Z průzkumu trhu shrnutém v tabulce 1 je očividné, že kuličkový mechanismus je nepoužívanějším mechanismem v oblasti automatické výměny koncových efektorů. Ukázal se tedy pravděpodobně jako nejvýhodnější.

4 VLASTNÍ NÁVRHY SYSTÉMU VÝMĚNY KONCOVÝCH EFEKTORŮ

1.7 Systémový rozbor problematiky

1.7.1 Problémová situace

V automatizované výrobě může nastat situace, že robot bude muset vykonávat operace vyžadující použití více koncových efektorů. V takovém případě je nutné použít systém výměny nástrojů. Z ekonomických a časových důvodů bude tento systém automatizovaný, výměna bude tedy probíhat bez zásahu člověka.

Příkladem potřeby takového systému může být situace, kdy bude robot umístěn v malém prostoru, přes který budou projíždět na automatizované lince 2 druhy dílců, se kterými bude robot manipulovat. Druhy dílců by se zásadně lišily tvarem i velikostí, a proto by k manipulaci s každým z nich byl potřeba jiný koncový efektor. Efektory by v tomto případě byly 2 chapadla. Jestliže nosnost robotu je 20 kg, tak maximální hmotnost každé hlavice i s hmotností součásti a hmotností měniče nástrojů bude pod 20 kg.

1.7.2 Formulace problému

Je třeba navrhnout systém automatické výměny koncových efektorů s umožněním přívodu elektrické a pneumatické sítě. Nosnost robota je 20 kg.

1.7.3 Formulace cílů a řešení

Cíle bakalářské práce jsou následující:

- Návrh 2 variant konstrukce automatické výměny koncových efektorů
- Na základě multikriteriální analýzy vybrat vhodnou variantu
- Výpočtové řešení klíčových součástí vybrané varianty
- Tvorba výkresové dokumentace vybraných dílů
- Ekonomické zhodnocení

1.8 Návrh 2 konstrukčních variant

Úkolem je vytvořit dvě návrhové varianty konstrukce měniče nástrojů pro robotické rameno. Tyto návrhy jsou zjednodušené a neobsahují všechny požadované funkce. Jde především o znázornění principu upínání. Součásti jako například elektrické kontakty, těsnění nebo šrouby jsou uvažovány jako nakupované zboží, proto budou jejich modely staženy z oficiálních stránek zvoleného prodejce přímo pro konkrétní rozměry navrženého systému automatické výměny koncových efektorů.

Obě varianty budou zhodnoceny a konkrétněji bude zpracována varianta, která bude vycházet z porovnání jako vhodnější.

1.8.1 1. Varianta

Princip upínání v tomto případě spočívá ve využití kuličkového mechanismu. Ovládání je zajištěno pneumaticky a bezpečnostní prvek pro případ ztráty pneumatické energie je pružina. Důvod použití kuličkového mechanismu vychází z průzkumu trhu, protože se vyskytoval nejčastěji, a to především u variant s nižší nosností. Pro tento případ by tedy mohl být vhodným kandidátem.

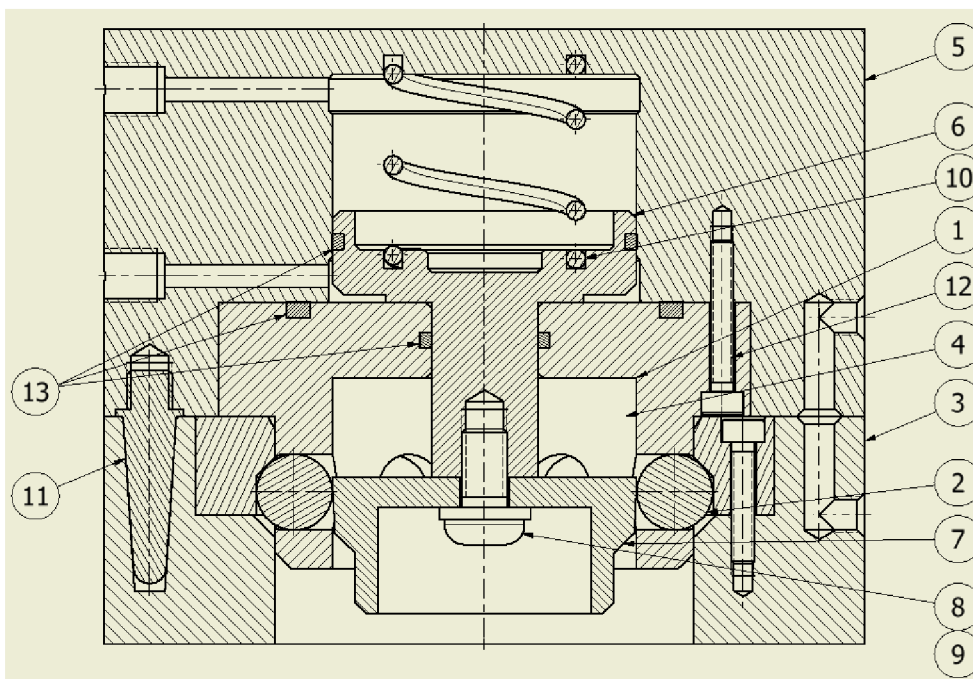
Na obrázku 9 je znázorněna příruba připevněná k robotu (5), ve které je vložen a přišroubován kroužek (1) několika šrouby (12), těleso (3) je příruba připevněná na nástroji a

v ní je nalisován kroužek (4). Konstrukční řešení připojení přírub k robotu/nástroji bude realizováno pro konkrétní rameno robota/nástroj ve zvolené výhodnější variantě.

K upnutí dochází pomocí stlačeného vzduchu, který je dopraven horním otvorem v tělese (5) do dutiny, kde pohne s pístem (6), jehož dolní část (7) zatlačí kuličky (2) umístěné v kroužku do drážky tvořené tělesy (3) a (4). Kuličky jsou v dírách uloženy s malou vůlí, aby se mohly posouvat a proti samovolnému vypadnutí v rozpojeném stavu jim brání mírné zmenšení průměru ve vnější části díry a tvar dolní části pístu v části vnější. Díry budou tedy vytvořeny frézováním pomocí správně zvolené frézy (její průměr bude menší než průměr díry). Dolní část pístu je spojena s horní částí šroubem (8) s podložkou (9). Díky tomu, že drážka je tvořena 2 tělesy, je možné vyrobít přírubu (3) z levnějšího, méně kvalitního materiálu. Pouze kroužek (4) tedy bude z materiálu tvrdšího nebo kaleného, jelikož se o něj opírají kuličky. Je nutné, aby byl kontakt kuliček s kroužkem uskutečněn v šikmé ploše kroužku (nikoli ve svíslé), jinak by nedošlo k přitlačení.

Uvolnění je realizováno stejným způsobem. Píst přestává být tlačěn směrem dolů a dolní dírou je přiveden stlačený vzduch, který zatlačí píst zpět do horní polohy. Tím jsou uvolněny kuličky, které při oddělení součástí zajedou směrem dovnitř a umožní vysunutí. V odemčené poloze se dolní část pístu dotkne kroužku dříve, než se horní část dotkne plochy na přírubě. Tím je zajištěna mezera, kterou projde stlačený vzduch při dalším upnutí.

Pružina (10) zasazená v drážkách plní princip bezpečnostního prvku. Pokud dojde ke ztrátě pneumatické energie, pružina udrží píst v upnuté poloze, díky čemuž nedojde k uvolnění nástroje. Z toho vyplývá, že pružina musí být tlačná. Na obrázku je také naznačen kužel (11) připevněný k přírubě na robotu, který zajišťuje přesnou vzájemnou polohu, těsnění (13) v drážkách a díry pro přívod vzduchu na pravé straně. Díry musí být minimálně 2 na obou tělesech (pokud uvažujeme použití pneumatického chapadla se 2 čelistmi), nebo více (3 díry pro chapadlo se třemi čelistmi nebo několik děr pro větší univerzálnost).



Obr. 9) Řez 1. navrženou variantou systému automatické výměny

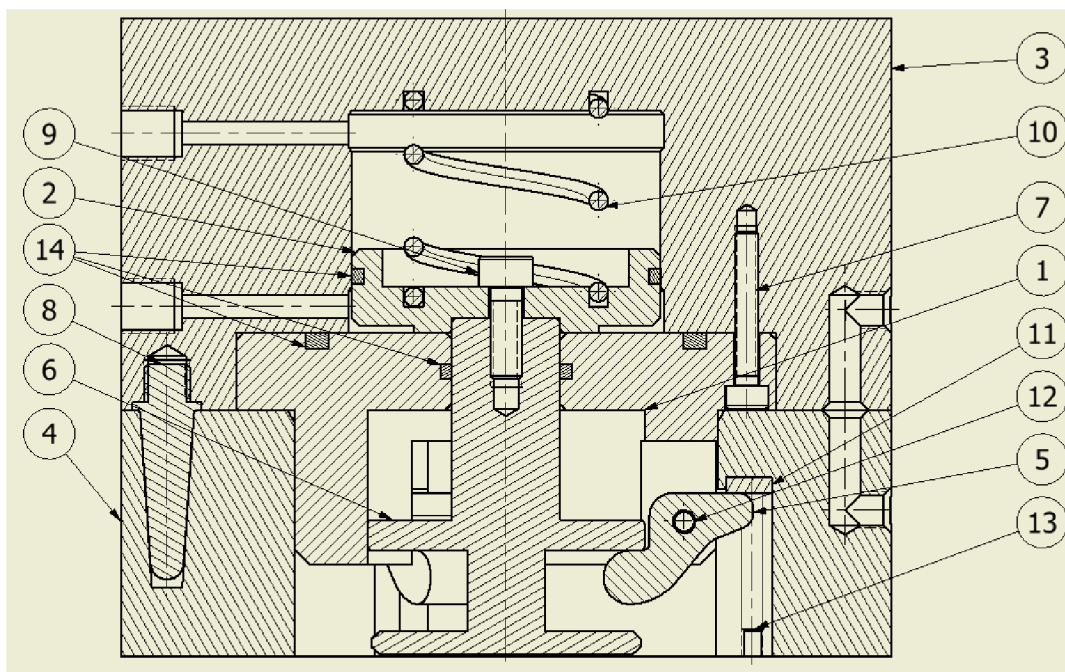
Při montáži bude horní část pístu vložena do kroužku a následně nasunuta do příruby na robot i s pružinou a těsněními. Poté bude kroužek přitlačen a přišroubován k přírubě. Do kroužku budou vnitřkem naskládány kuličky a jako poslední se přišroubuje dolní část pístu k horní.

1.8.2 2. Varianta

V tomto případě je způsob upínání zajištěn pomocí 3 otočných háků, k upnutí dochází díky přívodu stlačeného vzduchu. Bezpečnostním prvkem je opět pružina. Tento způsob jsem zvolil jako alternativu k 1. variantě, posuvný pohyb pístu zůstává, ale na něj navazuje rotační pohyb háků. Konstrukce částečně vychází ze systému EPSILON.

Princip upínání je dobře viditelný na obrázku 10. Na obrázku je také možné si povšimnout, že se příruba pro připojení na robot (3) v podstatě nezměnila. Přírubou je veden stlačený vzduch pro pohon koncového efektoru přes díry na pravé straně. Na levé straně jsou díry se šroubením, kterými je přiváděn stlačený vzduch sloužící k pohonu pístu (2).

Změna naopak proběhla u několika součástí. Jednou z nich je prsten (1), přišroubovaný k přírubě pro připevnění k robotu šroubem s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem (7). Díry pro kuličky nahradily 3 drážky pro vhodně tvarované háky (5), které jsou uloženy rotačně na čepu (11). Čep je zvenku vsunut do děr s ložisky, nacházejících se v prstenu a zajištěn pojistným kroužkem proti axiálnímu posuvu. K pootočení háků dochází díky posuvu pístu. Rotační součást (6) spojená s pístem šroubem s válcovou hlavou a vnitřním šestihranem (9) je tvarovaná tak, aby při posuvu dolů natočila hák do uzamčené polohy (tedy tak, že hák přitiskne obě příruby k sobě) a při posuvu nahoru hákem pootočila do otevřené polohy (háček nebude vyčnívat z prstenu a umožní opakování cyklu výměny efektoru, aniž by zavazal při vsunutí prstenu do příruby). Z důvodu úspory kvalitnějšího materiálu jsou v drážkách příruby pro upevnění na koncový efektor (4) vloženy plechy (11) určité tloušťky, které budou méně náchylné na otláčení. Každý plech je v drážce připevněn pomocí dvou šroubů bez hlavy s vnitřním šestihranem (13).



Obr. 10) Řez 2. navrženou variantou systému automatické výměny

Pojistným prvkem je znovu pružina (10), jejíž funkce zůstává stejná jako v minulém návrhu – při ztrátě pneumatické energie pružina zajistí setrvání háků v uzamčené poloze. Ustavení vzájemné polohy přírub znovu zajišťuje kužel (8) připevněný k přírubě pro připojení na robot, který zapadá do kuželové díry v protikusu. Na obrázku je také naznačeno těsnění (13), nutné pro správnou funkci systému.

Montáž tohoto konstrukčního řešení bude probíhat tak, že nejprve nasuneme dolní část pístu do prstenu s těsněním a spojíme s částí horní šroubem. Následně do příruby na robot vložíme pružinu a hned za ní nachystaný píst s prstenem, který se k přírubě přišroubuje. Po vhodném nastavení polohy pístu vložíme na místo háky tak, aby jejich výstupek byl v mezeře mezi rozšířenými průměry. Zvenku vsuneme čepy, které zajistí jejich polohu a čepy samotné zajistíme pojistným kroužkem (v případě potřeby by k zajištění mohl být použit šroub). Do příruby na nástroj vsuneme plechy a zajistíme je pomocí dvou šroubů dotažených imbusovým klíčem.

1.9 Srovnání navržených variant

Úkolem je vybrat vhodnější konstrukční variantu na základě multikriteriální analýzy. Kritéria jsou především opakovatelnost, bezpečnost a spolehlivost, dále pak například váha. Jelikož žádná z konstrukcí není zatím početně zkontrolována, tvary a rozměry jsou volené a v realitě by se mohly měnit podle výsledků výpočtů.

Metoda použitá pro srovnání je DMM – metoda rozhodovací matice (Decision matrix method). Metoda je jednoduchá, intuitivní a pro tento případ srovnání dostačující. Nevýhodou může být vysoký podíl subjektivity. Srovnávací metoda je zpracována v tabulce 2.

Tab 3) Multikriteriální analýza metodou DMM

Kritérium	Váha	Hodnocení mechanismu	
		Varianta 1	Varianta 2
Opakovatelnost upínání	9	7	7
Spolehlivost systému	9	9	8
Bezpečnost mechanismu	7	8	5
Váha a rozměry	5	7	6
Vážený součet		235	200
Pořadí		1	2

1.9.1 Srovnání opakovatelnosti upínání

Opakovatelnost by u obou systémů měla být poměrně vysoká a z tohoto pohledu jsou obě konstrukce na stejné úrovni.

1.9.2 Srovnání spolehlivosti

Oba systémy považují za poměrně spolehlivé. 1. variantu s kuličkami však považují za jednodušší, porovná-li počet menších součástek, které by teoreticky bylo časem třeba měnit, nebo které by se mohly poškodit. V případě 1. varianty jsou to jen kuličky, v případě 2. varianty jsou to otočné háky, čepy, ložiska a pojistné kroužky. To je důvod rozdílu v hodnocení.

1.9.3 Srovnání bezpečnosti systému

Z pohledu bezpečnosti se jeví první varianta, tedy kuličkový mechanismus, jako velice bezpečné řešení. Nejenže při ztrátě tlaku drží píst v dolní poloze pružina, ale také síla od kuličky, která se jej bude snažit posunout bude rozložena do dvou složek, z nichž větší bude působit na píst směrem k ose pístu a jen menší se jej bude snažit zdvihát.

V případě druhé varianty bude při ztrátě tlaku píst působit téměř plnou silou na pružinu. Jen malá část síly se ztratí díky tření. Tuto variantu tedy považuji za méně bezpečnou.

1.9.4 Srovnání váhy a rozměrů

Vzhledem k faktu, že příruba na robot má pro obě varianty stejné rozměry a většina ostatních součástí také, je rozhodující především rozměr pístu. Jeho délka je ve druhé variantě větší a váha nepatrně vyšší. Nevelký rozdíl váhy je také mezi kuličkami (předpokládaný počet je 6) a otočnými háky s čepy a ložisky (počet je 3 kusy). Odhadovaný rozdíl je ale zanedbatelný. Můžeme tedy říct, že váha a rozměry se příliš neliší, nicméně i tento faktor naznačuje, že výhodnější je varianta 1 díky kratšímu pístu.

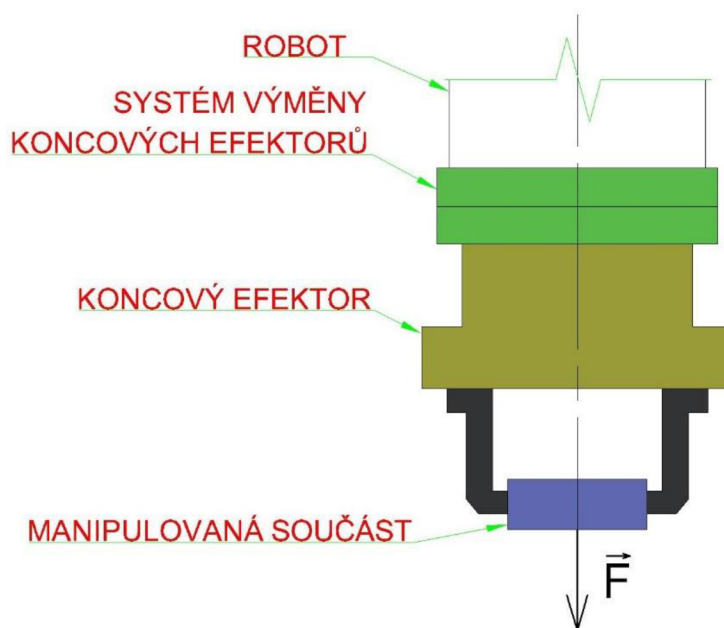
1.9.5 Výsledek porovnání

Výsledkem srovnání je konečný počet bodů získaný každou variantou za zhodnocené kritéria. Výhodnější je varianta s vyšším počtem bodů. První varianta má 235 bodů, druhá rovných 200. Z toho vyplývá, že 1. varianta s kuličkovým mechanismem je v tomto případě vhodnější řešení.

5 VÝPOČTOVÁ ČÁST

Základním předpokladem, udávajícím několik základních rozměrů je robot, na kterého bude měnič konstrukčně uzpůsoben. Ve své práci volím robota Kuka KR 20 R1810, jehož nosnost je právě 20 kg. K připevnění systému výměny koncových efektorů je v tomto případě nachystáno 7 děr M6 na roztečné kružnici o průměru 50 mm.

Předpokládaný provozní tlak může dosahovat 5 bar.



Obr. 11) Schéma působící síly

Na obrázku 11 je vidět síla působící ve směru osy měniče nástrojů. Za klidu (ve svislé poloze) je to jen síla tíhová, nicméně pokud dojde k pohybu robota, tato síla se zvětší. Největší velikosti dosáhne při maximálních otáčkách každého ramene robota ve chvíli, když jsou tyto ramena v jedné ose. V uzamčeném stavu přenáší tuto sílu i měnič nástrojů. Síla, kterou přenáší při pohybu bude tedy součet velikostí tíhové a dostředivé síly.

Aby nedošlo k uvolnění nástroje při dosažení mezních podmínek, je potřeba maximální hodnotu této síly vyčíslit.

5.1 Výpočet síly působící na píst

Z katalogu robota KUKA KR 20 R1810 je možné vyčíst rozměry ramen a rychlosti jejich otáčení. Tyto hodnoty jsou znázorněny v tabulce 4.

Tab 4) Rozměry a hodnoty rychlostí z katalogu Kuka [18]

Rameno	Hodnota [mm]	Úhlová rychlost	Hodnota [°/s]	Rychlost otáčení (přepočet)	Hodnota [otáčky/s]
R_2	780	A_2	175	$n_2 = \frac{A_2}{360}$	0,486
R_3	860	A_3	190	$n_3 = \frac{A_3}{360}$	0,528
R_5	153	A_5	430	$n_5 = \frac{A_4}{360}$	1,194

Tíhová síla se pak počítá podle vzorce (1):

$$F_G = m * g = 20 * 9,81 = 196,2 \text{ N} \quad (1)$$

Kde m je maximální hmotnost zátěže a g je gravitační zrychlení země.

Pro výpočet dostředivé síly F_D je potřeba si spočítat úhlové rychlosti jednotlivých ramen ω :

$$\omega_2 = 2 * \pi * n_2 = 2 * \pi * 0,56 = 3,05 \text{ rad/s} \quad (2)$$

$$\omega_3 = 2 * \pi * n_3 = 2 * \pi * 0,49 = 3,32 \text{ rad/s} \quad (3)$$

$$\omega_5 = 2 * \pi * n_5 = 2 * \pi * 0,53 = 7,51 \text{ rad/s} \quad (4)$$

$$F_{D1} = m_1 * (R_1 + R_2 + R_3) * \omega_1^2 = 20 * (0,78 + 0,86 + 0,153) * 3,05^2 = 334,5 \text{ N} \quad (5)$$

$$F_{D2} = m_2 * (R_2 + R_3) * \omega_2^2 = 20 * (0,86 + 0,153) * 3,32^2 = 222,8 \text{ N} \quad (6)$$

$$F_{D3} = m_3 * R_3 * \omega_3^2 = 20 * 0,153 * 7,51^2 = 172,4 \text{ N} \quad (7)$$

Pro maximální dostředivou sílu F_D pak platí:

$$F_D = F_{D1} + F_{D2} + F_{D3} = 729,8 \text{ N} \quad (8)$$

Maximální síla působící na systém výměny F tedy bude:

$$F_{max} = F_G + F_D = 196,2 + 729,8 = 925,8 \text{ N} \quad (9)$$

Maximální síla nepůsobí směrem do středu kuličky, rozložíme ji tedy na síly s indexy A a N, viz obrázek 12 a). Síla A působí kolmo, do středu kuličky - s touto silou budeme dále počítat. Síla N působí tečně k povrchu kuličky a snaží se jí rotovat. Předpokládám, že v uzamčeném stavu tomu bude zabráněno třením, proto tuto sílu zanedbávám. Síla F_A pak bude:

$$F_A = F_{max} * \sin(\alpha) = 925,8 * \sin(45^\circ) = 654,65 \text{ N} \quad (10)$$

Uvolníme-li kuličku v uzamčeném stavu, vzniknou nám síly s indexy A, B a C viz obrázek 12 b). Síla A zobrazuje působení příruby na nástroj na kuličku, síla B nahrazuje silové působení pístu a síla C znázorňuje silové působení kroužku na kuličku. Jednoduchým výpočtem přes goniometrické funkce pak můžeme síly F_A a F_B rozložit do os x a y .

$$\Sigma F_y = 0: -F_A * \cos(\alpha) - F_B * \sin(\beta) + F_C = 0 \quad (11)$$

$$\Sigma F_x = 0: F_A * \sin(\alpha) - F_B * \cos(\beta) = 0 \quad (12)$$

$$F_{Ax} = F_{Ay} = F_A * \sin(\alpha) = 654,65 * \sin(45^\circ) = 462,91 \text{ N} \quad (13)$$

$$F_B = \frac{F_A * \cos(\alpha)}{\cos(\beta)} = \frac{654,65 * \cos(45^\circ)}{\cos(2,5^\circ)} = 463,35 \text{ N} \quad (14)$$

$$F_{By} = F_B * \sin(\beta) = 463,35 * \sin(2,5^\circ) = 20,21 \text{ N} \quad (15)$$

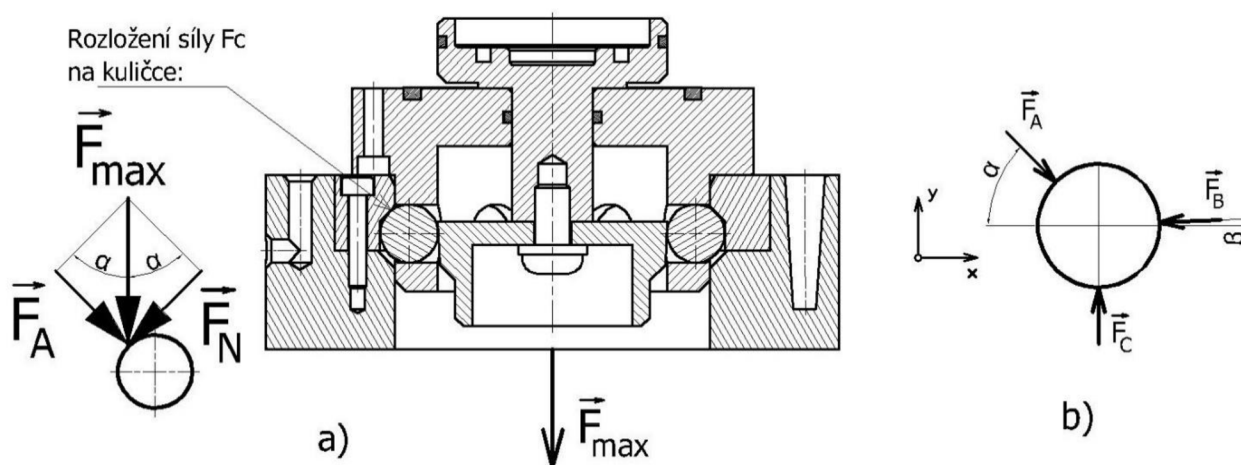
$$F_{Bx} = F_B * \cos(\beta) = 463,35 * \cos(2,5^\circ) = 462,91 \text{ N} \quad (16)$$

$$F_C = F_A * \cos(\alpha) + F_B * \sin(\beta) = 654,65 * \cos(45^\circ) + 463,35 * \sin(2,5^\circ) = 483,12 \text{ N} \quad (17)$$

$$F_v = p * S = p * \left(\frac{\pi * D_p^2}{4} - \frac{\pi * d_p^2}{4} \right) = 600\,000 * \left(\frac{\pi * 0,032^2}{4} - \frac{\pi * 0,014^2}{4} \right) = 390,2 \text{ N} \quad (18)$$

Z toho jednoduše spočítáme maximální sílu působící kolmo na jednu kuličku pro zvolené $n=4$ kuličky:

$$F_k = \frac{F_A}{n} = \frac{654,65}{4} = 231,5 \text{ N} \quad (19)$$



Obr. 12) a) znázornění a rozložení maximální síly působící na kuličku v řezu, b) Uvolnění kuličky upínacího mechanismu

Znamé hodnoty jsou $\alpha = 45^\circ$, $\beta = 2,5^\circ$, $F_A = F = 866,1 \text{ N}$, $\varnothing D_p = 22 \text{ mm}$, $\varnothing d_p = 10 \text{ mm}$ a $p = 6 \text{ bar}$. Kde F_v je síla od stlačeného vzduchu působícího na píst. Dále α je úhel sklonu plochy příruby opírající se o kuličku, β je úhel sklonu dolní části pístu, $\varnothing D_p$ je průměr pístu a $\varnothing d_p$ je průměr opěrné části pístu. Tlak působící na píst je pak značen p . F_{By} je maximální síla působící na píst směrem nahoru (v y ose).

5.2 Návrh pružiny

Celkový průměr pružiny volím $\varnothing D_e = 22,5 \text{ mm}$, průměr drátu $\varnothing d = 2,5 \text{ mm}$, návrh pak sestává z několika rovnic, z nichž první je určení středního průměru pružiny $\varnothing D$ (viz. Obr. 13):

$$D = D_e - d = 22,5 - 2,5 = 20 \text{ mm} \quad (20)$$

Pro další výpočty je třeba si určit poměr vinutí C_p a Bergsträsserův součinitel K_B :

$$C_p = \frac{D}{d} = \frac{22,5}{2,5} = 8 \quad (21)$$

$$K_B = \frac{(4 * C_p) + 2}{(4 * C_p) - 3} = \frac{(4 * 8) + 2}{(4 * 8) - 3} = 1,172 \quad (22)$$

Teď už je možné spočítat sílu vyvinutou pružinou v mezním stavu, pružina bude vyrobena z drátu kruhového průřezu ČSN EN 10270-1 třídy SH. [19]

$$F_p = \frac{R_{se} * \pi * d^3}{8 * K_B * D} = \frac{1048,5 * \pi * 2,5^3}{8 * 1,172 * 22,5} = 274,37 \text{ N} \quad (23)$$

Pro mez kluzu ve smyku R_{se} platí, že $R_{se} = 0,45 * R_m$. Zvolený materiál má mez pevnosti v tahu $R_m = 2330 \text{ MPa}$ a modul pružnosti ve smyku $G = 81,5 \text{ GPa}$. Jelikož víme, že pružina bude působit silou maximálně 274 N, nemůže dojít k situaci, kdy by píst pohybující se do odemčené polohy (stlačení pružiny) pružinu nepřetlačil (při nevhodné konstrukci ji může zlomit). [19]

Pro další návrhové výpočty je třeba si zvolit počet činných závitů $n_a = 2,5$. Pro oba konce pružiny uzavřené a neobrobené platí celkový počet závitů $n_t = n_a + 2 = 4,5$. Teď už je možné spočítat délku pružiny v mezním stavu:

$$L_s = (n_t + 1) * d = (4,5 + 1) * 2,5 = 13,75 \text{ mm} \quad (24)$$

Jelikož předpokládaná délka pohybu pístu je $y_p = 9 \text{ mm}$, je možné spočítat délku pružiny ve volném stavu L_0 . Protože nechceme, aby při maximální deformaci došlo k napětí na mezi kluzu, vynásobíme délku pružiny ve volném stavu zvoleným bezpečnostním koeficientem $k=1,2$.

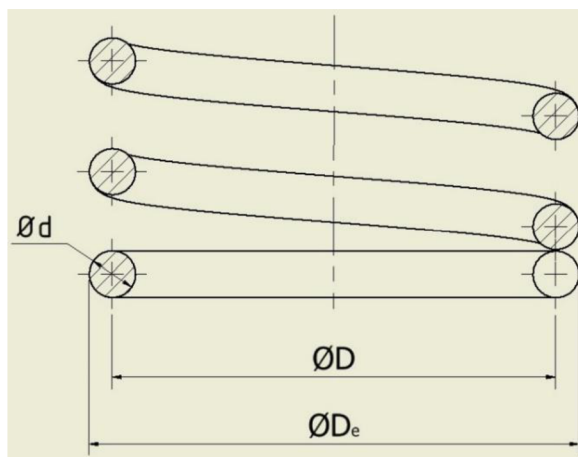
$$L_0 = (y_p + L_s) * k = (9 + 13,75) * 1,2 = 27,3 \text{ mm} \quad (25)$$

Bude-li těmto předpokladům uzpůsobena konstrukce, pružina bude správně plnit svou funkci, aniž by došlo k jejímu porušení.

Pro kontrolu stability pružiny můžeme použít podmínku stability kdy je nutné splnit $L_0 < L_s$. Pro oba konce vetknuté je součinitel $\alpha=0,5$. [19]

$$L_s = 2,63 * \frac{D}{\alpha} = 2,63 * \frac{22}{0,5} = 102,57 \text{ mm} \quad (26)$$

Podmínka je splněna a pružina tím pádem vyhovuje.



Obr. 13) Okótování pružiny

Z důvodu úspory ceny nechci vyrábět pružinu na zakázku, a proto vybírám z rozměrů, které dodavatelé nabízí na svých webových stránkách. Nalezená pružina z nabídky se liší pouze délkou ve volném stavu $L_0 = 27,5 \text{ mm}$. Prostor pro pružinu v předepjatém stavu je v sestavě 23,5 mm, tedy deformace vyvolávající sílu předpětí bude $y_d = 4 \text{ mm}$. Síla od předpětí tedy nakonec bude:

$$F_{pp} = \frac{y_d * d^4 * G}{8 * n_a * D^3} = \frac{4 * 0,0025^4 * 81,5 * 10^9}{8 * 2,5 * 0,02^3} = 79,6 \text{ N} \quad (27)$$

Síla od předpětí vyšla větší než maximální síla, která by mohla píst tlačit nahoru při ztrátě tlaku ($F_{pp} > F_{By}$). Tímto je tedy zajištěna pojistná funkce pružiny proti vypadnutí nástroje při ztrátě tlaku působícího na píst.

5.3 Výpočet Hertzova tlaku

Ke styku kuličky s jiným povrhem dochází ve třech místech. Ve všech je potřeba spočítat tlak působící na kuličku a dotýkající se součásti. Pro výpočet je potřeba zjistit materiálové konstanty. Kulička bude vyrobena z nerezové kalené oceli ČSN 17 042. [20]. Modul pružnosti v tahu kalené oceli je $E_1 = 190 \text{ GPa}$ a Poissonovo číslo $\mu_1 = 0,305$. Zbylé součásti, které jsou ve styku s kuličkou budou z uhlíkové oceli s modulem pružnosti $E_2 = E_3 = E_4 = 207 \text{ GPa}$ a Poissonovým číslem $\mu_2 = \mu_3 = \mu_4 = 0,3$. [19]

- a) Výpočet sférického kontaktu v místě působení síly F_C . Průměr kuličky $d_1 = 12 \text{ mm}$, průměr díry volím $d_2 = 12,2 \text{ mm}$ (do vzorce pro výpočet poloměru a se vnitřní průměr zadává se záporným znaménkem). Pro výpočet průměru styčné plochy je potřeba spočítat ještě sílu působící na 1 kuličku F_{Ck} v tomto místě:

$$F_{Ck} = \frac{F_C}{n} = \frac{483,1}{4} = 120,8 \text{ N} \quad (28)$$

Pak už je možné spočítat poloměr styčné plochy a_c [19]:

$$\begin{aligned}
 a_c &= \sqrt[3]{\frac{3}{8} * F_{Ck} * \frac{\frac{(1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \mu_2^2)}{E_2}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2}}} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{3}{8} * 120,8 * \frac{\frac{(1 - 0,305^2)}{190 * 10^9} + \frac{(1 - 0,3^2)}{207 * 10^9}}{\frac{1}{0,012} + \frac{1}{0,0125}}} = 0,672 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{29}$$

Maximální tlak se spočítá [19]:

$$p_{maxc} = \frac{3 * F_{Ck}}{2 * \pi * a_c^2} = \frac{3 * 120,8}{2 * \pi * (0,672 * 10^{-3})^2} = 127,5 \text{ MPa} \tag{30}$$

Hlavní napětí v osách x, y, z pak budou (za z dosazují $z = 0,5 * a$, protože v této vzdálenosti je největší smykové napětí) [19]:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{1c} &= \sigma_{2c} = \sigma_{xc} = \sigma_{yc} \\
 &= -p_{maxc} * \left[\left(1 - \left| \frac{z}{a_c} \right| * \arctg \frac{1}{\left| \frac{z}{a_c} \right|} \right) * (1 + \mu_2) - \frac{1}{2 * \left(1 + \frac{z^2}{a_c^2} \right)} \right] \\
 &= -127,5 * \left[\left(1 - \left| \frac{0,5 * 0,672 * 10^{-3}}{0,672 * 10^{-3}} \right| * \arctg \frac{1}{\left| \frac{0,5 * 0,672 * 10^{-3}}{0,672 * 10^{-3}} \right|} \right) * (1 + 0,3) - \frac{1}{2 * \left(1 + \frac{(0,5 * 0,672 * 10^{-3})^2}{(0,672 * 10^{-3})^2} \right)} \right] = -23 \text{ MPa}
 \end{aligned} \tag{31}$$

$$\sigma_{3c} = \sigma_{zc} = \frac{-p_{maxc}}{1 + \frac{z^2}{a_c^2}} = \frac{-127,5}{1 + \frac{(0,5 * 0,672 * 10^{-3})^2}{(0,672 * 10^{-3})^2}} = -102 \text{ MPa} \tag{32}$$

Smykové napětí spočítáme:

$$\tau_{maxc} = \tau_{1/3c} = \frac{\sigma_{1c} - \sigma_{3c}}{2} = \frac{-23 - (-102)}{2} = 39,5 \text{ MPa} \tag{33}$$

- b) Výpočet sférického kontaktu v místě působení síly F_B . Průměr kuličky zůstává stejný, průměr pístu je $d_3 = 22 \text{ mm}$. Výpočet je stejný jako v předchozím případě, liší se jen některé dosazené hodnoty.

$$F_{Bk} = \frac{F_B}{n} = \frac{463,3}{4} = 115,8 \text{ N} \tag{34}$$

Výpočet poloměru styčné plochy a_B :

$$\begin{aligned}
 a_B &= \sqrt[3]{\frac{3}{8} * F_{Bk} * \frac{\frac{(1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \mu_3^2)}{E_3}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_3}}} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{3}{8} * 115,8 * \frac{\frac{(1 - 0,305^2)}{190 * 10^9} + \frac{(1 - 0,3^2)}{207 * 10^9}}{\frac{1}{0,012} + \frac{1}{0,022}}} = 0,146 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{35}$$

Maximální tlak v místě působení síly B:

$$p_{maxB} = \frac{3 * F_{Bk}}{2 * \pi * a_B^2} = \frac{3 * 115,8}{2 * \pi * (0,146 * 10^{-3})^2} = 2605,5 \text{ MPa} \tag{36}$$

Hlavní napětí v osách x, y, z budou:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{1B} &= \sigma_{2B} = \sigma_{xB} = \sigma_{yB} \\
 &= -p_{maxB} * \left[\left(1 - \left| \frac{z}{a_B} \right| * \operatorname{arctg} \frac{1}{\left| \frac{z}{a_B} \right|} \right) * (1 + \mu_2) - \frac{1}{2 * \left(1 + \frac{z^2}{a_B^2} \right)} \right] \\
 &= -2340,5 * \left[\left(1 - \left| \frac{0,5 * 0,154 * 10^{-3}}{0,146 * 10^{-3}} \right| * \operatorname{arctg} \frac{1}{\left| \frac{0,5 * 0,154 * 10^{-3}}{0,146 * 10^{-3}} \right|} \right) * (1 + 0,3) - \frac{1}{2 * \left(1 + \frac{(0,5 * 0,154 * 10^{-3})^2}{(0,146 * 10^{-3})^2} \right)} \right] = -469,9 \text{ MPa}
 \end{aligned} \tag{37}$$

$$\sigma_{3B} = \sigma_{zB} = \frac{-p_{maxB}}{1 + \frac{z^2}{a_B^2}} = \frac{-2340,5}{1 + \frac{(0,5 * 0,146 * 10^{-3})^2}{(0,146 * 10^{-3})^2}} = -411,9 \text{ MPa} \tag{38}$$

Výpočet smykové napětí:

$$\tau_{maxB} = \tau_{1/3B} = \frac{\sigma_{1B} - \sigma_{3B}}{2} = \frac{-469,9 - (-411,7)}{2} = -29 \text{ MPa} \tag{39}$$

- c) Výpočet sférického kontaktu v místě působení síly F_A . Průměr kuličky zůstává stejný, průměr pístu je $d_4 = 40 \text{ mm}$. Jelikož se jedná o vnitřní průměr, jeho hodnota bude ve výpočtu znovu se záporným znaménkem. Výpočet je opět stejný.

$$F_{Ak} = \frac{F_A}{n} = \frac{654,6}{4} = 163,7 \text{ N} \tag{40}$$

Výpočet poloměru styčné plochy a_A :

$$\begin{aligned}
 a_A &= \sqrt[3]{\frac{3}{8} * F_{Ak} * \frac{\frac{(1 - \mu_1^2)}{E_1} + \frac{(1 - \mu_4^2)}{E_4}}{\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_4}}} \\
 &= \sqrt[3]{\frac{3}{8} * 115,8 * \frac{\frac{(1 - 0,305^2)}{190 * 10^9} + \frac{(1 - 0,3^2)}{207 * 10^9}}{\frac{1}{0,012} + \frac{1}{-0,04}}} = 0,213 \text{ mm}
 \end{aligned} \tag{41}$$

Maximální tlak v místě působení síly A:

$$p_{maxA} = \frac{3 * F_{Ak}}{2 * \pi * a_A^2} = \frac{3 * 163,7}{2 * \pi * (0,213 * 10^{-3})^2} = 1724,3 \text{ MPa} \tag{42}$$

Hlavní napětí v osách x, y, z budou:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{1A} &= \sigma_{2A} = \sigma_{xA} = \sigma_{yA} \\
 &= -p_{maxA} * \left[\left(1 - \left| \frac{z}{a_A} \right| * \arctg \frac{1}{\left| \frac{z}{a_A} \right|} \right) * (1 + \mu_2) - \frac{1}{2 * \left(1 + \frac{z^2}{a_A^2} \right)} \right] \\
 &= -1724,3 * \left[\left(1 - \left| \frac{0,5 * 0,213 * 10^{-3}}{0,213 * 10^{-3}} \right| * \arctg \frac{1}{\left| \frac{0,5 * 0,213 * 10^{-3}}{0,213 * 10^{-3}} \right|} \right) * (1 + 0,3) - \frac{1}{2 * \left(1 + \frac{(0,5 * 0,213 * 10^{-3})^2}{(0,213 * 10^{-3})^2} \right)} \right] = -311 \text{ MPa}
 \end{aligned} \tag{43}$$

$$\sigma_{3A} = \sigma_{zA} = \frac{-p_{maxA}}{1 + \frac{z^2}{a_A^2}} = \frac{-1724,3}{1 + \frac{(0,5 * 0,213 * 10^{-3})^2}{(0,213 * 10^{-3})^2}} = -493,5 \text{ MPa} \tag{44}$$

Výpočet smykové napětí:

$$\tau_{maxA} = \tau_{1/3A} = \frac{\sigma_{1A} - \sigma_{3A}}{2} = \frac{-311 - (-493,5)}{2} = 91,3 \text{ MPa} \tag{45}$$

Jako maximální přípustné napětí uvažuji napětí na mezi kluzu. Jak už bylo zmíněno, kulička je vyrobena z kalené oceli ČSN 17 042 o tvrdosti 57–65 HRC. [20] Dále tedy předpokládám tvrdost 60 HRC, což je zhruba 650 HB. Pro výpočet meze pevnosti R_{mk} kalené kuličky platí:

$$R_{mk} = 3,41 * HB = 3,41 * 560 = 2216,5 \text{ MPa} \tag{46}$$

Pak už je možné určit mez kluzu R_s . Pro kalenou ocel platí [19]:

$$R_{sk} = 0,5 * R_{mk} = 0,5 * 2216,5 = 1108,25 \text{ MPa} \tag{47}$$

[21] Pro sférický kontakt dále platí, že dovolené napětí σ_D je rovno:

$$\sigma_D = 2,8 * R_{sk} = 2,8 * 1108,25 = 3103,1 \text{ MPa} \quad (48)$$

Pro úplnou kontrolu je potřeba určit mez kluzu pro ostatní součásti, které s kuličkou budou ve styku. Všechny budou ze stejného materiálu. Bude se jednat o ocel 11 420, která má mez kluzu $R_{st} = 230 - 260 \text{ MPa}$. [22] Budeme-li počítat s mezí kluzu $R_{st} = 230 \text{ MPa}$, dovolené napětí má hodnotu:

$$\sigma_D = 2,8 * R_{st} = 2,8 * 230 = 644 \text{ MPa} \quad (49)$$

Tab 5) Vyhodnocení kontroly pro sférický styk

Těleso	Maximální působící napětí na tělese		Dovolené napětí
	$ \sigma_{max} \text{ [MPa]}$	$ \tau_{max} \text{ [MPa]}$	$\sigma_D \text{ [MPa]}$
Kulička	493,5	91	3103,1
Prsten pro kuličky	102	40	644
Těleso s drážkou	493,5	91	644
Dolní část pístu	470	29	644

Z tabulky 4 je vidět, že maximální napětí na všech součástech je menší než dovolené. Tím pádem všechny tyto součásti vyhovují.

5.4 Kontrola šroubu spojovacího pístu

Pro spojení horní a dolní části pístu volím šroub DIN 912 M4 a podložku din 125-1 o vnějším průměru 9 mm. Jelikož horní část pístu se v horní poloze neopře až o materiál příruby, bude šroub namáhán na tah. Výpočet spočívá v určení napětí ve šroubu a kontroly, zda toto napětí vydrží. Nejprve je ale potřeba si určit účinnou svěrnou délku l'_s .

$$l'_s = \frac{t + d}{2} = \frac{5 + 4}{2} = 4,5 \text{ mm} \quad (50)$$

Za t dosazují tloušťku pístu pod šroubem. Dále je potřeba určit minimální délku šroubu:

$$l > t + 1,5 * d = 5 + 1,5 * 4 = 11 \text{ mm} \quad (51)$$

Délku šroubu pro další výpočty volím 14 mm. Zvolený šroub má délku závitu $b = 12,6 \text{ mm}$. Délka válcové části dřívku bez závitu je $l_g = l - b = 1,4 \text{ mm}$ a délka části dřívku se závitem nacházející se v sevření je $l_b = l'_s - l_g = 3,1 \text{ mm}$. Výpočtový průřez šroubu je $A_s = 8,78 \text{ mm}^2$ a materiál šroubu je ocel, tedy $E = 207 \text{ GPa}$. S těmito hodnotami je možné spočítat tvrdost šroubu k_s . [19]

$$k_s = \frac{S_d * A_s * E}{S_d * l_b + A_s * l_g} = \frac{\frac{\pi * d^2}{4} * 8,78 * 207 * 10^3}{\frac{\pi * d^2}{4} * 3,1 + 8,78 * 1,4} = 446 \text{ kN/mm} \quad (52)$$

Následuje výpočet tuhosti spojovaných součástí k_p (pro šroubové spojení platí $\alpha = 30^\circ$, za d_p dosazují vnější průměr podložky) [19]:

$$k_p = \frac{\pi * E * d * tg(\alpha)}{2 * \ln \left[\frac{(l'_s * tg(\alpha) + d_p - d) * (d_p + d)}{(l'_s * tg(\alpha) + d_p + d) * (d_p - d)} \right]} \quad (53)$$

$$= \frac{\pi * 207 * 10^3 * 4 * tg(30^\circ)}{2 * \ln \left[\frac{(4,5 * tg(30^\circ) + 9 - 4) * (9 + 4)}{(4,5 * tg(30^\circ) + 9 + 4) * (9 - 4)} \right]} = 3141,7 \text{ kN/mm}$$

Tyto konstanty jsou potřebné pro výpočet tuhostní konstanty spoje C:

$$C = \frac{k_s}{k_s + k_p} = \frac{446}{446 + 3141,7} = 0,124 \quad (54)$$

Sílu předpětí ve šroubu volím $F_i = 3000 \text{ N}$, pak napětí od síly předpětí bude:

$$\sigma_i = \frac{F_i}{A_s} = \frac{3000}{8,78} = 342 \text{ MPa} \quad (55)$$

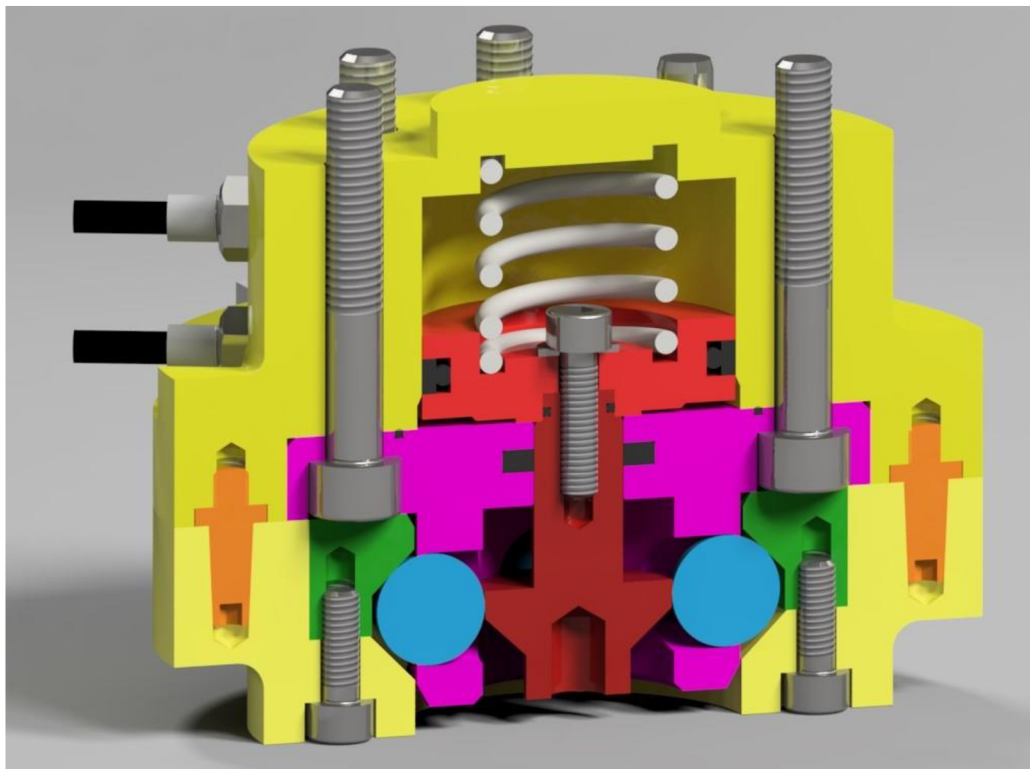
Konečně je možné spočítat napětí ve šroubu v provozním stavu (za F je dosazena síla od pístu):

$$\sigma_s = \frac{F_s}{A_s} = C * \frac{F}{A_s} + \sigma_i = 0,124 * \frac{390,2}{8,78} + 342 = 347,5 \text{ MPa} \quad (56)$$

Toto napětí je značně menší než mez pevnosti šroubu $R_m=800 \text{ MPa}$, šroub tedy vyhovuje. V případě, že by byly hodnoty napětí ve šroubu a dovoleného napětí podobné, bylo by možné ještě upravit výpočet zmenšením velikosti síly od pístu o velikost síly vyvolanou pružinou, která je opačného směru. Jelikož ale výpočet už teď vyhovuje, nejsou tyto úpravy zapotřebí.

6 POPIS VLASTNÍ KONSTRUKCE

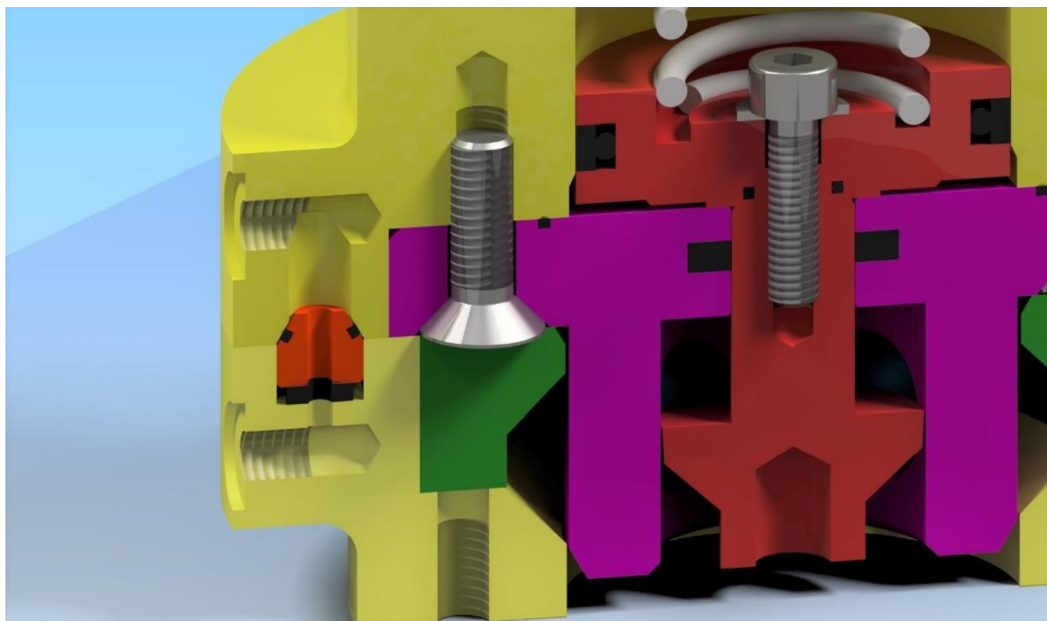
V porovnání s původní navrženou konstrukcí došlo k několika změnám. Z důvodu snahy snížení rozměrů a hmotnosti byl pozměněn píst, který je nyní rozdělen na 2 části v jiném místě. Píst je spojen šroubem M4 zkontrolovaným ve výpočtové části. Dále bylo vyřešeno připevnění k robotu pomocí 6 šroubů procházejících tělesem pro kuličky a přírubou na robot, tyto šrouby také částečně pomáhají spojení příruby s tělesem. Spojení příruby na robot a tělesa pro kuličky je realizováno dvěma zápustnými šrouby M5. Pro přesnou a správnou orientaci vůči robotu je v přírubě na robot ještě díra pro kolík. Veškeré změny jsou vidět na obrázku 14.



Obr. 14) Model systému výměny

6.1 Přenos médií

Pro přenos vzduchového média bylo po radách vedoucího vytvořeno konstrukční řešení (viz obrázek 15), obsahující duté těleso zašroubované v přírubě na nástroj a sedící na X-kroužku, na jehož vystupující části je O-kroužek. Pokud by toto řešení nefungovalo, bylo by potřeba navrhnout jiné řešení. Takovým by mohlo být použití rychlospojek, což by ale zvýšilo hmotnost. Další možností je navržení vlastního těsnění. Nicméně obě možnosti jsou finančně nákladnější.



Obr. 15) Zobrazení průchodu vzduchu

Pro přenos elektrické sítě byly použity moduly SWO-E20-011 od firmy Schunk (viz obrázek 16). Moduly přenášejí střídavý proud o 50 V AC a 3 A. Typ přenosu je signál.



Obr. 16) Schunk SWO-E20-011 [23]

6.2 Těsnící prvky

Pístní a pístnicové těsnění bylo použito od firmy Hennlich. Pístní těsnění je typu PK 6N, pístnicové typu PS 2.

Pro utěsnění trvalých nepohyblivých spojení byly použity O-kroužky a v jednom případě X-kroužek. Všechny tyto těsnění jsou uvažovány od firmy Kovaz.

6.3 Čidla

Součástí měniče nástrojů jsou i 2 bezdotykové indukční spínače IN 50-S od firmy Schunk. Tyto snímače slouží k monitorování aktuální polohy pístu. Maximální dosah čidel je 1 mm.

7 EKONOMICKÉ ZHODNOCENÍ

V této kapitole jsou uvedeny náklady na výrobu a sestavení jednoho navrženého měniče nástrojů. V nákladech jsou započítány odhadované ceny výroby jednotlivých dílů, ceny nakupovaných součástí (šrouby, matky...) a odhad ceny montáže. Nacenění nakupovaných součástí pochází přímo od dodavatelů, cena výroby jednotlivých součástí je pouze hrubě odhadovaná. Po konzultacích s odborníky uvažují cenu programování 500 Kč/h a 1000 Kč/h cenu CNC obráběcího centra, v případě že by byly díly vyrobeny a dodány externí firmou.

V tabulce 5 jsou uvedeny ceny všech komponent nacházejících se v navrženém měniči a celková cena tohoto systému při výrobě pouze jednoho kusu.

Tab 6) Odhadovaná cena jednotlivých součástí a cena celková

Název součásti	Počet kusů	Cena [kč]
Příruba na robot	1	8620
Příruba na nástroj	1	6620
Těleso s kuličkami	1	5510
Kulička	4	14,6
Píst horní	1	2510
Píst dolní	1	3102
Pružina	1	214,05
Těleso s drážkou	1	4510
Průchod	6	1421
Schunk SWO E20-011 A	1	5018 (bez daně)
Schunk SWO E20-011 K	1	5018 (bez daně)
Schunk IN 50-S	2	1730 (bez daně)
Hennlich PK 6N (D=35 mm)	1	149,9
Hennlich PS 2 (d=10 mm)	1	51,4
O-kroužek 39x1 [mm]	1	5,68
O-kroužek 6,2x1 [mm]	1	1,0
O-kroužek 4,5x1 [mm]	6	1,08
X-kroužek 1,78x1,78 [mm]	6	12,18
DIN 912 M6x40	6	0,99
DIN 912 M4x16	1	0,41
DIN 912 M4x12	4	0,36
DIN 7991 M5x16	2	0,48
CSN EN ISO 2338 6 h8x12	1	1,55
DIN 125-A 4,3	1	0,03
DIN 934 M5	2	0,26
Montáž	1	250
Celková cena měniče nástrojů		53709,16

Celková cena systému výměny při výrobě 1 kusu vychází na 53 709 Kč. Vysoká cena je dána především výdaji na programování nebo časem na přípravu centra. Při velkosériové výrobě může cena výroby jednotlivých dílů klesnout až o 90 %. V takovém případě by celková cena mohla být zhruba 18 250 Kč. K této ceně by ve výrobě bylo potřeba připočítat například ještě výdaje za dovoz nebo opotřebení nástrojů.

8 ZÁVĚR

V první části práce byla provedena rešerše v oblasti měničů koncových efektorů pro robotická ramena, jejíž součástí je i základní popis a rozdělení průmyslových robotů a manipulátorů. Systém výměny byl popsán a byly vzpomenuty možné konstrukční řešení upnutí. Dále bylo zmíněno několik firem zabývajících se těmito systémy včetně popisu a srovnání konstrukčního řešení jejich výrobků.

V další části práce jsou popsány 2 konstrukční návrhy systému výměny nástrojů, kde je kladen důraz především na upínací mechanismus. Oba tyto návrhy využívají pneumatický pohon k pohybu pístu, který pohne buď kuličkami, nebo otočnými háky. Byla vysvětlena konstrukce včetně postupu při montáži a tyto varianty byly srovnány pomocí multikriteriální analýzy. Po srovnání byla vybrána jako vhodnější 1. varianta s kuličkovým mechanismem, která je následně kompletně zpracována.

Práce dále pokračuje výpočtovou částí, kde jsou zásadní místa vhodně výpočteně navrhována, nebo pevnostně kontrolována. Jedná se především o výpočet působících sil při upnutí, návrh pružiny, kontrolu kuliček pomocí Hertzova tlaku a kontrolu šroubu spojujícího dvoudílný píst. Kontroly napětí v kuličce a součástí s ní v kontaktu vyšly jako vyhovující, stejně tak i šroub pro spojení pístů.

Následuje popis vlastní konstrukce systému, který je řešen pro připojení na robot Kuka KR 20 R1810. Je rozebrán finální tvar měniče, detailní popis klíčových částí (například přenos médií) a provedené změny oproti původnímu návrhu.

Nakonec proběhlo ekonomické zhodnocení celého systému. Cena jednotlivých součástí byla hrubě odhadnuta, cena nakupovaných součástí je přesná díky poptání od dodavatelů. Byla odhadnuta i cena montáže a celkový součet dal náklady na výrobu jednoho měniče. Je třeba zdůraznit že cena za jediný vyrobený kus se velice liší od ceny 1 kusu z velkosériové výroby.

Výstupem bakalářské práce je pak výkresová dokumentace vybraných dílů a sestavy.

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KOLÍBAL, Zdeněk. *Roboty a robotizované výrobní technologie*. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-802-1448-285.
- [2] PALKO, Anton a Juraj SMRČEK. *Robotika: koncové efektory pre priemyselné a servisné roboty : navrhovanie - konštrukcia - riešenie*. Vyd. 1. Košice: [Technická univerzita], 2004. ISBN 8080732183.
- [3] FAJT, Petr. *Návrh konstrukce modulárního úchopného zařízení jako koncového efektoru pro manipulaci se součástkami pomocí robotu* [online]. Brno, 2018 [cit. 2019-10-18]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/81422>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Radek Knoflíček.
- [4] HAVRLANT, Oldřich. *Konstrukční řešení uchopovacích prvků průmyslového robotu v Kovárně VIVA a.s. Zlín*. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, 2014.. Diplomová. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně, Fakulta technologická, Ústav výrobního inženýrství. Vedoucí práce David Sámek.
- [5] KOLÍBAL, Zdeněk. *Průmyslové roboty II: Konstrukce výstupních hlavíc a periférií : <<Určeno pro posl. fak. stroj. Vys. učení techn. v Brně>>*. Brno: PC-DIR, 1993. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-0533-3.
- [6] SWS. *SCHUNK GmbH & Co. KG* [online]. Brno [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/series/sws/
- [7] Řez systémem SWS. In: *SCHUNK GmbH & Co. KG* [online]. [cit. 2019-11-05]. Dostupné z: https://schunk.com/fileadmin/_processed_/csm_IM0004642_bb473a05c5.jpg
- [8] GWS. *SCHUNK GmbH & Co. KG* [online]. [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/series/gws/
- [9] Řez systémem GWS. In: *SCHUNK GmbH & Co. KG* [online]. [cit. 2020-02-04]. Dostupné z: https://schunk.com/fileadmin/_processed_/csm_IM0005591_1818d39561.jpg
- [10] EWS. *SCHUNK GmbH & Co. KG* [online]. [cit. 2019-11-06]. Dostupné z: https://schunk.com/cz_cs/uchopovaci-systemy/series/ews/
- [11] *ATI Industrial Automation* [online]. Apex, USA, 2019 [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.ati-ia.com/index.aspx>
- [12] *Stäubli International A.G. Stäubli International A.G.* [online]. Pfäffikon, 2019 [cit. 2019-11-11]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/cs-cz/>
- [13] *Zimmer-group* [online]. Rheinau, 2019 [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: <https://www.zimmer-group.de/us>

- [14] Series WWR. In: *Zimmer-group* [online]. [cit. 2019-11-13]. Dostupné z: https://www.zimmer-group.com/fileadmin/_processed_/9/a/csm_SOM_SCH_FUN_WWR__SALL__AIN__V3_483c3863e5.png
- [15] *Applied Robotics Inc.* [online]. Glenville, USA, 2016 [cit. 2019-11-19]. Dostupné z: <https://www.appliedrobotics.com/>
- [16] *Destaco* [online]. 2016 [cit. 2020-02-01]. Dostupné z: <https://www.destaco.com/products/tool-changers>
- [17] RQC/RTP series. In: *Destaco* [online]. [cit. 2020-05-29]. Dostupné z: <https://media.destaco.com/assetbank-destaco/assetfile/2615.pdf>
- [18] KUKA KR 20 R1810. *KUKA KR 20 R1810* [online]. [cit. 2020-03-11]. Dostupné z: https://www.kuka.com/-/media/kuka-downloads/imported/6b77eecacfe542d3b736af377562ecaa/0000262123_en.pdf?rev=0230c115dc5d4349a99580dcad427ded&hash=43B8A8AD4262704F68EF17335A17D276
- [19] SHIGLEY, Joseph, Charles MISCHKE, Richard BUDYNAS, Martin HARTL a Miloš VLK. *Konstruování strojních součástí*. 1. vyd. V Brně: VUTIUM, 2010, xxv, 1159 s. : il. ; 26 cm. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [20] Katalog kuliček firmy Midol. *Katalog kuliček firmy Midol* [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <http://tempwebmiumusersrecovery.blob.core.windows.net/users/103484/assets/5cba87f10f31dd622eca4d6a5860ab75/kulicky.pdf>
- [21] HEARN, E. *Mechanics of materials 2* [online]. 3. edition. Boston: Butterworth-Heinemann, 1997 [cit. 2020-05-29]. ISBN 0750632666. Dostupné z: <http://www4.hcmut.edu.vn/~vinhbd/Documents/Mechanic%20of%20Materials%202.pdf>
- [22] Hodnoty mezi pevnosti, kluzu, únavy a dovolených napětí pro ocel. *Hodnoty mezi pevnosti, kluzu, únavy a dovolených napětí pro ocel* [online]. [cit. 2020-03-26]. Dostupné z: <https://e-konstrukter.cz/prakticka-informace/hodnoty-mezi-pevnosti-kluzu-unavy-a-dovolenych-napeti-pro-ocel>
- [23] SWO E20-011. In: *SCHUNK GmbH & Co. KG* [online]. [cit. 2020-05-13]. Dostupné z: https://schunk.com/fileadmin/_processed_/csm_IM0027810_dfac894226.jpg

10 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

10.1 Seznam zkratek a symbolů

F_G	[N]	Tíhová síla
ω	[rad/s]	Úhlová rychlost
F_D	[N]	Dostředivá síla
m	[kg]	Maximální hmotnost zátěže
g	[m ² /s]	Gravitační zrychlení
F_{max}	[N]	maximální síla působící na systém výměny
F_v	[N]	Síla od stlačeného vzduchu působící na píst
F_A	[N]	Síla od zátěže působící kolmo na kuličky
F_N	[N]	Síla od zátěže působící tečně na kuličku
F_{Ax}	[N]	Síla F_A rozložená do osy x
F_{Ay}	[N]	Síla F_A rozložená do osy y
F_B	[N]	Síla působící mezi kuličkou a spodním pístem
F_{Bx}	[N]	Síla F_B rozložená do osy x
F_{By}	[N]	Síla F_B rozložená do osy y
F_C	[N]	Síla působící mezi kuličkou a tělesem, ve kterém je uložena
$\varnothing D$	[mm]	Střední průměr pružiny
$\varnothing D_e$	[mm]	Vnější průměr pružiny
$\varnothing d$	[mm]	Průměr drátu pružiny
C_p	[-]	Poměr vinutí
K_B	[-]	Bergsträsserův součinitel
F_p	[N]	Síla pružiny v mezním stavu
R_{se}	[MPa]	Mez kluzu ve smyku
R_m	[MPa]	Mez pevnosti v tahu
L_s	[mm]	Délka pružiny v mezním stavu
n_t	[-]	Celkový počet závitů
n_a	[-]	Počet činných závitů
y	[mm]	Deformace pružiny
F_{pp}	[N]	Síla předpětí
L_0	[mm]	Délka pružiny ve volném stavu
y_p	[mm]	Délka pohybu pístu
E	[MPa]	Modul pružnosti v tahu
μ	[-]	Poissonovo číslo

d_1	[mm]	Průměr kuličky
d_2	[mm]	Průměr díry pro kuličku
F_{ck}	[N]	Síla F_{ck} působící na 1 kuličku
a	[mm ²]	Poloměr styčné plochy
p_{max}	[MPa]	Maximální tlak
σ_1	[MPa]	Hlavní napětí v ose x
σ_2	[MPa]	Hlavní napětí v ose y
σ_3	[MPa]	Hlavní napětí v ose z
τ_{max}	[MPa]	Maximální smykové napětí
F_{Bk}	[N]	Síla F_B působící na 1 kuličku
R_{mk}	[MPa]	Mez pevnosti materiálu kuličky
R_{sk}	[MPa]	Mez kluzu materiálu kuličky
σ_D	[MPa]	Dovolené napětí
l'_s	[mm]	Účinná svěrná délka
l	[mm]	Minimální délka šroubu
b	[mm]	Délka závitu šroubu
l_b	[mm]	Délka části dříku se závitem nacházející se v sevření
l_g	[mm]	Délka dříku bez závitu
k_s	[kN/mm]	Tvrdomost šroubu
A_s	[mm ²]	Výpočtový průřez šroubu
S_d	[mm ²]	Průřez šroubu
k_p	[kN/mm]	Tvrdomost spojovaných součástí
C	[-]	Tuhostní konstanta spoje
F_i	[N]	Síla předpětí ve šroubu
σ_i	[MPa]	Napětí od síly předpětí
σ_s	[MPa]	Napětí ve šroubu v provozním stavu

10.2 Seznam tabulek

Tab 1)	Shrnutí používaných mechanismů pro automatickou výměnu nástrojů.....	33
Tab 3)	Multikriteriální analýza metodou DMM	37
Tab 4)	Rozměry a hodnoty rychlostí z katalogu Kuka [16].....	40
Tab 5)	Vyhodnocení kontroly pro sférický styk	47
Tab 6)	Odhadovaná cena jednotlivých součástí a cena celková	51

10.3 Seznam obrázků

Obr. 1)	Konstrukční části robota [1]	21
Obr. 2)	Schéma automatické výměny koncových efektorů. Překresleno podle: [2]25	
Obr. 3)	Funkční principy systémů automatické výměny. [1].....	26
Obr. 4)	Řez systémem SWS [7].....	28
Obr. 5)	Řez systémem GWS [9]	29

Obr. 6)	Série WWR	31
Obr. 7)	Řez modelem EPSILON E100, model stažen z oficiálních webových stránek	
Applied Robotics [14]	32
Obr. 8)	Série RQC/RTP [15]	33
Obr. 9)	Řez 1. navrženou variantou systému automatické výměny	35
Obr. 10)	Řez 2. navrženou variantou systému automatické výměny	36
Obr. 11)	Schéma působící síly	39
Obr. 12)	a) znázornění a rozložení maximální síly působící na kuličku v řezu, b)	
Uvolnění kuličky upínacího mechanismu	41
Obr. 13)	Okótování pružiny	43
Obr. 14)	Model systému výměny	49
Obr. 15)	Zobrazení průchodu vzduchu	50

11 SEZNAM PŘÍLOH

11.1 Elektronická příloha

- Příloha 1: Výkresová dokumentace vybraných dílů a sestavy (pdf).
Vybrané díly: Pist horní, příruba na nástroj, těleso pro kuličky.
- Příloha 2: 3D model systému výměny koncových efektorů (step).