



**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

**KONSTRUKCE PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU TYPU  
"SCARA" S ELEKTRICKÝMI POHONY ZÁKLADNÍHO  
KINEMATICKÉHO ŘETĚZCE, UMÍSTĚNÝMI NA  
ZÁKLADNĚ ROBOTU**

THE CONSTRUCTION OF THE INDUSTRIAL ROBOT TYPE "SCARA" WITH ELECTRICAL ACTUATORS  
BASIC KINEMATIC CHAIN LOCATED ON THE BASE OF THE ROBOT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Šimon Rybár**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.**

**BRNO 2016**

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Šimon Rybár</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	<b>prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.</b>
Akademický rok:	2015/16

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:

## **Konstrukce průmyslového robotu typu "SCARA" s elektrickými pohony základního kinematického řetězce, umístěnými na základně robotu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Jedná se o kreativní konstrukční práci, ve které se skloubí všechny výhody robotického systému typu "SCARA" s výhodou možné aplikace hlavních pohonů na stacionární části robotu.

### **Cíle diplomové práce:**

Výsledkem práce bude konstrukční návrh robotického systému "SCARA" s hlavními pohony na stacionární základně robotu. Nedílnou součástí bude technická zpráva a počítačová animace pohybu robotu.

### **Seznam literatury:**

- MATIČKA Robert a Jaroslav TALÁCKO. (1991): Mechanismy manipulátorů a průmyslových robotů. SNTL Praha
- KOLÍBAL Zdeněk a Radek KNOFLÍČEK. (2000): Morfologická analýza stavby průmyslových robotů, VIENALA, Košice, ISBN 80-88922-27-5

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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



**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

**KONSTRUKCE PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU TYPU  
"SCARA" S ELEKTRICKÝMI POHONY ZÁKLADNÍHO  
KINEMATICKÉHO ŘETĚZCE, UMÍSTĚNÝMI NA  
ZÁKLADNĚ ROBOTU**

THE CONSTRUCTION OF THE INDUSTRIAL ROBOT TYPE "SCARA" WITH ELECTRICAL ACTUATORS  
BASIC KINEMATIC CHAIN LOCATED ON THE BASE OF THE ROBOT

**DIPLOMOVÁ PRÁCE**

MASTER'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Bc. Šimon Rybár**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.**

**BRNO 2016**

# Zadání diplomové práce

Ústav:	Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky
Student:	<b>Bc. Šimon Rybár</b>
Studijní program:	Strojní inženýrství
Studijní obor:	Výrobní stroje, systémy a roboty
Vedoucí práce:	<b>prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc.</b>
Akademický rok:	2015/16

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:

## **Konstrukce průmyslového robotu typu "SCARA" s elektrickými pohony základního kinematického řetězce, umístěnými na základně robotu**

### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Jedná se o kreativní konstrukční práci, ve které se skloubí všechny výhody robotického systému typu "SCARA" s výhodou možné aplikace hlavních pohonů na stacionární části robotu.

### **Cíle diplomové práce:**

Výsledkem práce bude konstrukční návrh robotického systému "SCARA" s hlavními pohony na stacionární základně robotu. Nedílnou součástí bude technická zpráva a počítačová animace pohybu robotu.

### **Seznam literatury:**

- MATIČKA Robert a Jaroslav TALÁCKO. (1991): Mechanismy manipulátorů a průmyslových robotů. SNTL Praha
- KOLÍBAL Zdeněk a Radek KNOFLÍČEK. (2000): Morfologická analýza stavby průmyslových robotů, VIENALA, Košice, ISBN 80-88922-27-5

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

---

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

---

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

## **ABSTRAKT**

Témou diplomovej práce je návrh konštrukcie robotického systému SCARA. Práca úvodom objasňuje definíciu robotov a priemyselných robotov. Ďalej sa venuje stavbe ich kinematických štruktúr, počnúc základnými až po odvodené, vrátane robotov typu SCARA. Nasledujúca kapitola popisuje konštrukčné uzly priemyselných robotov. Vo štvrtej kapitole je v tabuľke uvedený prehľad súčasne dostupných robotov typu SCARA s ich parametrami. Zvyšok práce tvorí samotný návrh stroja od stanovenia požadovaných parametrov po 3D podobu návrhu. Táto časť obsahuje i rozsiahlu výpočtovú časť a zdôvodňuje výber jednotlivých komponent.

## **ABSTRACT**

The theme of the thesis is a structural design of the robotic system SCARA. Thesis at the start clarifies the definition of robots and industrial robots. Next it deals with kinematic structures, from basic to more advanced structures, including SCARA type robot. The next chapter describes parts used in design of industrial robots. In the fourth chapter, the table provides an overview of currently available SCARA robots and their attributes. The rest of the thesis itself consists of machine design from determining the required parameters to 3D design. This section also contains extensive computational parts and justifies the choice of the components.

## **KĽÚČOVÉ SLOVÁ**

SCARA, priemyselný robot, konštrukcia robotu, robotický systém

## **KEYWORDS**

SCARA, industrial robot, design of a robot, robotic system





## **BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA**

RYBÁR, Š. *Konstrukce průmyslového robotu typu "SCARA" s elektrickými pohony základního kinematického řetězce, umístěnými na základně robotu*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 57 s. Vedoucí diplomové práce prof. Ing. Zdeněk Kolíbal, CSc..



## **POĎAKOVANIE**

Ďakujem týmto vedúcemu mojej diplomovej práce profesorovi Ing. Zdeňku Kolíbalovi, CSc. za odborné rady a podnety pri tvorbe práce, za ochotu, ústretovosť a v neposlednom rade aj za jeho znalosti poskytnuté počas štúdia. Ďalej by som chcel poďakovať rodičom a všetkým, ktorí ma pri mojom štúdiu na vysokej škole podporovali.



## ČESTNÉ PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že je táto práca mojim pôvodným dielom, spracoval som ju samostatne, pod vedením prof. Ing. Zdeňka Kolíbala, CSc. a s použitím literatúry uvedenej v zozname.

V Brne dňa:

.....

Šimon Rybár



# OBSAH

<b>1</b>	<b>ÚVOD</b> .....	<b>15</b>
<b>2</b>	<b>ÚVOD DO PROBLEMATIKY PRIEMYSELNÝCH ROBOTOV</b> .....	<b>16</b>
2.1	Definícia robota .....	16
2.2	Priemyselný robot .....	16
2.3	Základná stavba priemyselných robotov .....	16
2.4	Kinematické štruktúry priemyselných robotov .....	17
2.5	Priemyselné roboty typu SCARA .....	18
<b>3</b>	<b>KONŠTRUKČNÉ UZLY PRIEMYSELNÝCH ROBOTOV</b> .....	<b>20</b>
3.1	Motory .....	20
3.1.1	EC motory .....	21
3.1.2	Krokové motory .....	21
3.1.3	Synchrónne motory .....	22
3.2	Reduktory .....	22
3.2.1	Planétové prevodovky .....	22
3.2.2	Harmonické prevodovky .....	23
3.2.3	Cykloidné prevodovky .....	23
3.2.4	Ďalšie reduktory .....	24
3.3	Transformačný mechanizmus .....	24
3.3.1	Reťazové prevody .....	24
3.3.2	Prevody s klinovými remeňmi .....	25
3.3.3	Prevody s ozubenými remeňmi .....	25
3.3.4	Skrutka a matica .....	25
3.3.5	Pastorok a ozubený hrebeň .....	26
3.4	Odmeriavanie polohy .....	26
3.4.1	Inkrementálne snímače polohy .....	26
3.4.2	Absolútne snímače polohy .....	27
<b>4</b>	<b>PREHĽAD SÚČASŤNÝCH RIEŠENÍ A MOTIVÁCIA</b> .....	<b>28</b>
<b>5</b>	<b>VLASTNÝ NÁVRH ROBOTY</b> .....	<b>31</b>
5.1	Stanovenie parametrov .....	31
5.2	Koncepty .....	31
5.2.1	Koncept č.1 .....	32
5.2.2	Koncept č.2 .....	32
5.2.3	Koncept č.3 .....	33
5.2.4	Koncept č.4 .....	33
5.2.5	Zhodnotenie .....	33
5.3	Dĺžky ramien .....	33
5.4	Výber motorov pre osi C a C' .....	35
5.4.1	Motor pre os C .....	35
5.4.2	Motor pre os C' .....	38
5.5	Výber reduktorov .....	39
5.5.1	Reduktor pre os C .....	39
5.5.2	Reduktor pre os C' .....	39
5.6	Prenos výkonu z motorov na ramená .....	41
5.7	Prevedenie osi Z a R .....	41
5.7.1	Prvý variant: Guličková skrutka a vodiaci hriadeľ .....	41

5.7.2	Druhý variant: Guličková skrutka s drážkami.....	42
5.7.3	Porovnanie.....	43
5.7.4	Výber pohonov osi Z a R .....	43
5.8	Výber odmeriavania .....	44
5.9	Prívod káblov.....	45
5.10	Konštrukčné prevedenie .....	45
<b>6</b>	<b>ZÁVER.....</b>	<b>51</b>
<b>7</b>	<b>ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV .....</b>	<b>53</b>
<b>8</b>	<b>ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK .....</b>	<b>55</b>
8.1	Zoznam tabuliek .....	55
8.2	Zoznam obrázkov .....	55
<b>9</b>	<b>ZOZNAM PRÍLOH.....</b>	<b>57</b>



# 1 ÚVOD

Cieľom práce je navrhnuť robotický systém s usporiadaním kinematickej štruktúry typu SCARA. Jedná sa o robot určený do priemyselnej prevádzky. Oproti súčasným komerčne dostupným modelom sa má odlišovať usporiadaním motorov. Tie majú byť uložené na základni a nie priamo na ramenách, ako je tomu vo zvyku. Súčasťou práce bude analýza takéhoto riešenia. Samotný návrh vyžaduje prehľad mechanizmov a komponent využívaných pri stavbe priemyselných robotov. Pre rozumnú voľbu parametrov je tiež potrebné spraviť prieskum trhu a porovnať vlastnosti súčasne dostupných modelov.

## 2 ÚVOD DO PROBLEMATIKY PRIEMYSELNÝCH ROBOTOV

Robot bol donedávna považovaný za symbol stroju budúcnosti. Vďaka rozvoju techniky, najmä v oblastiach elektroniky a informačných technológií začali roboty postupne prenikať do rôznych oblastí ľudskej činnosti. Výborné uplatnenie nachádzajú napríklad v oblasti priemyslu, kde zastupujú človeka pri náročných, monotónnych, či život ohrozujúcich úlohách. V dnešnej dobe sa roboty vo veľkej miere začínajú implementovať do každodenného života bežných ľudí a všetko nasvedčuje tomu, že tento trend bude pokračovať i naďalej. Širokým využívaním však dochádza k dezinterpretácii pojmu robot. Čo presne môžeme označiť ako robot a aké typy robotov existujú?

### 2.1 Definícia robota

*„Robot je automatický, alebo počítačom riadený integrovaný systém, schopný autonómnej, cieľovo orientovanej interakcie s prirodzeným prostredím, podľa inštrukcií od človeka. Táto interakcia spočíva vo vnímaní a rozpoznávaní tohto prostredia a v manipulovaní s predmetmi, prípadne v pohybovaní sa v tomto prostredí [1].“*

Do tejto definície spadajú všetky typy robotov. Môže jednať napríklad o roboty servisné, priemyselné, vojenské, či humanoidné. Ďalej sa bude diplomová práca zaoberať priemyselnými robotmi.

### 2.2 Priemyselný robot

Priemyselné roboty je teda nutné chápať ako podmnožinu robotov. Sú určené do konkrétneho prostredia priemyselných podnikov za účelom zvýšenia efektivity, skvalitnenia výroby, či pre ekonomické dôvody. Ich povahu dobre vyjadruje definícia priemyselného robota podľa P. N. Benjamina:

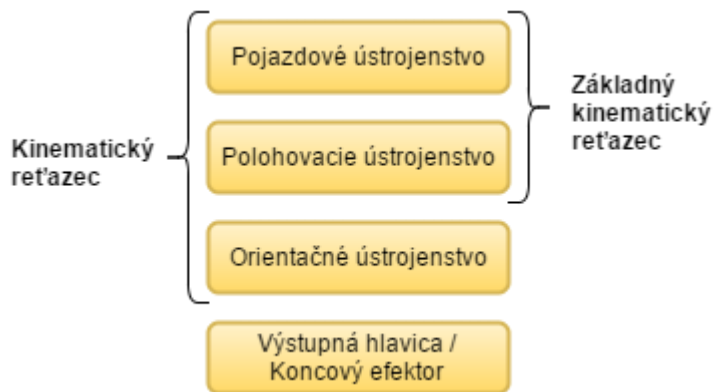
*„Priemyselný robot je autonómne fungujúci stroj-automat, ktorý je určený k reprodukcii niektorých pohybových a duševných funkcií človeka pri prevádzaní pomocných a základných výrobných operácií bez bezprostrednej účasti človeka, a ktorý je k tomuto účelu vybavený niektorým jeho schopnosťami (sluchom, zrakom, hmatom, pamäťou a pod.), schopnosťami samovýuky, samoorganizácie a adaptácie, t.j. prispôsobivosti danému prostrediu [1].“*

Z definície vyplýva, že priemyselný robot slúži na účelné nahradenie človeka vo výrobnom procese. V prostredí priemyselných podnikov sa však môžeme stretnúť i s inými zariadeniami s podobnou funkciou – manipulátormi. Hranica medzi manipulátorom a priemyselným robotom je veľmi tenká. Jednotlivé názory na to, čo je ešte manipulátor, a čo už robot, sa líšia. Obecne sa však dá povedať, že rozhoduje úroveň inteligencie, teda úroveň riadiaceho systému, ktorou sú zariadenia vybavené.

### 2.3 Základná stavba priemyselných robotov

Roboty možno rozdeliť podľa stavby ich kinematického reťazca na sériové, paralelné a kombinované. Paralelným štruktúram by sa dala nepochybné venovať samostatná kapitola, no vzhľadom na ciele práce budú nasledovné riadky venované sériovým štruktúram.

Každý robot má vlastnú kinematickú štruktúru, ktorej cieľom je dosiahnuť požadovanú polohu v priestore a v tejto polohe orientovať koncový efektor. Pohyb umožňujú väzby, inak nazývané aj kinematické dvojice, ktoré poskytujú mechanizmu stupne voľnosti. V zásade existujú rotačné (R) a translačné (T) kinematické dvojice. Rozdelenie akčného systému priemyselných robotov je možné vidieť na Obrázku 1.



Obrázok 1: Rozdelenie akčného systému priemyselných robotov [2]

Medzi polohovacie a orientačné ústrojenstvo môžeme vložiť pomyselný referenčný bod B. Tento bod zakončuje základný kinematický reťazec. Úlohou základného kinematického reťazca je pohybom referenčného bodu B obsiahnuť určitý požadovaný priestor, ktorý možno nazvať pracovným.

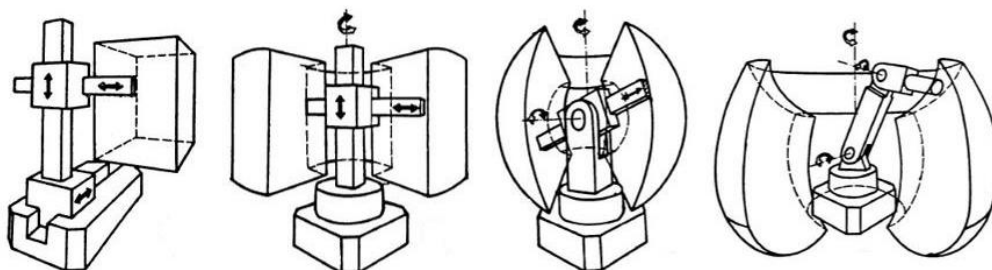
Pracovný priestor je závislý na spojení kinematických dvojíc v základnom kinematickom reťazci. Pre dosiahnutie akejkoľvek polohy v pracovnom priestore je nutné použiť minimálne 3 kinematické dvojice – translačné, či rotačné. Pre následné orientovanie koncového efektora sú potrebné ďalšie tri stupne voľnosti, tentokrát však už musia byť rotačné.

## 2.4 Kinematické štruktúry priemyselných robotov

V praxi sa na počiatku rozvoja robotiky najviac rozšírili štyri základné typy spojenia kinematických dvojíc:

- TTT
- RTT
- RRT
- RRR

V závislosti na použitej kombinácii väzieb sa mení tvar pracovného priestoru robota, čo je možno vidieť na Obrázku 2.



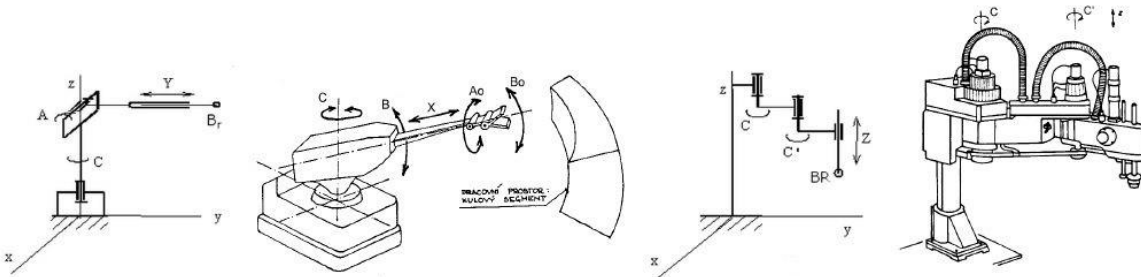
Obrázok 2: Tvar pracovného priestoru základných typov priemyselných robotov (zľava: TTT – kváder, RTT – valec, RRT – guľa, RRR – torus) [2]

Ďalšia prax však ukázala, že sa vyskytujú aj priemyselné roboty s inou štruktúrou, než sú spomínané štyri základné. Potvrdila tak teóriu, ktorá tvrdí, že pre  $n$  stupňov voľnosti je počet možných spojení kinematických dvojíc (T a R)  $2^n$ . Inak povedané, pri kombináciách záleží na poradí, v dôsledku čoho sa základné štruktúry rozrastajú o ďalšie, tzv. odvodené štruktúry, aby zaplnili počet kombinácii 8 pre 3 stupne voľnosti.

Každá z kinematických dvojíc, používaných v základnom kinematickom reťazci, môže byť situovaná v jednom z troch rôznych smerov daných kartézskym súradnicovým systémom XYZ nasledovne:

- translácie v smere osi: X, Y, Z
- rotácie okolo týchto osí: A, B, C

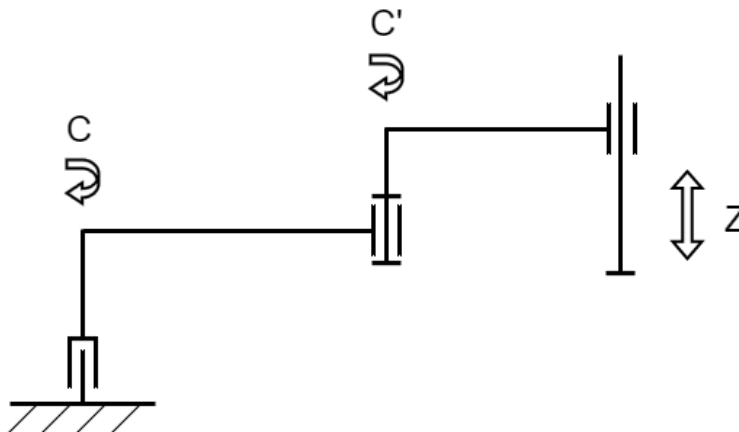
Tým vzniká priestor pre ďalšie možné usporiadania. Pre 3 stupne voľnosti ich je teoreticky 165. Prakticky sa ich však využíva približne 13. Príklad rozdielne situovaných kinematických dvojíc usporiadania RRT možno vidieť na Obrázku 3. Pracovný priestor robotu UNIMATE má guľovitý tvar, zatiaľ čo pracovný priestor robotu SCARA má tvar valcovito vysunutej plochy.



Obrázok 3: Dve možnosti usporiadania typu RRT (vľavo: UNIMATE – usporiadanie CAY; vpravo: SCARA – usporiadanie CC'Z) [2]

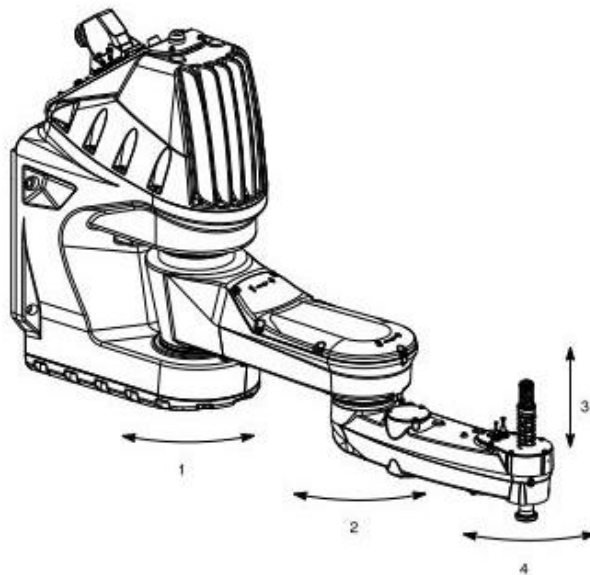
## 2.5 Priemyselné roboty typu SCARA

Obrázok 4 zobrazuje kinematickú štruktúru robotu typu SCARA. Jedná sa o štruktúru typu RRT, kedy sa polohovací ústrojenstvo skladá z dvoch rotačných väzieb okolo osi Z a jednej translačnej v smere osi Z. Pohon všetkých osí zabezpečujú rotačné elektromotory, pričom lineárny posuv v ose Z sa dosiahne použitím mechanizmu guľôčkovej skrutky.



Obrázok 4: Kinematická štruktúra robotov typu SCARA

Obečne sa dá povedať, že uplatnenie nachádzajú roboty tohto typu najmä pri aplikáciách, ktoré vyžadujú rýchlu a presnú automatizáciu, či už je to manipulácia s materiálom (tzv. „pick and place“ úlohy), kontrola súčiastok, ale aj drobná mechanická montáž. Ich oblasť využitia je napríklad v elektronickom a polovodičovom priemysle. V potravinárskom a farmaceutickom priemysle konkurujú svojou rýchlosťou najmä delta robotom.



Obrázok 5: TP80 „Fast picker“ - SCARA robot firmy STÄUBLI [3]

### 3 KONŠTRUKČNÉ UZLY PRIEMYSELNÝCH ROBOTOV

Pri konštruovaní priemyselného robota treba brať do úvahy to, že sa jedná o komplikovaný mechanizmus zložený z jednotlivých konštrukčných uzlov. V tejto kapitole budú podrobnejšie rozobrané jednotlivé konštrukčné uzly, z ktorých priemyselné roboty pozostávajú.

#### 3.1 Motory

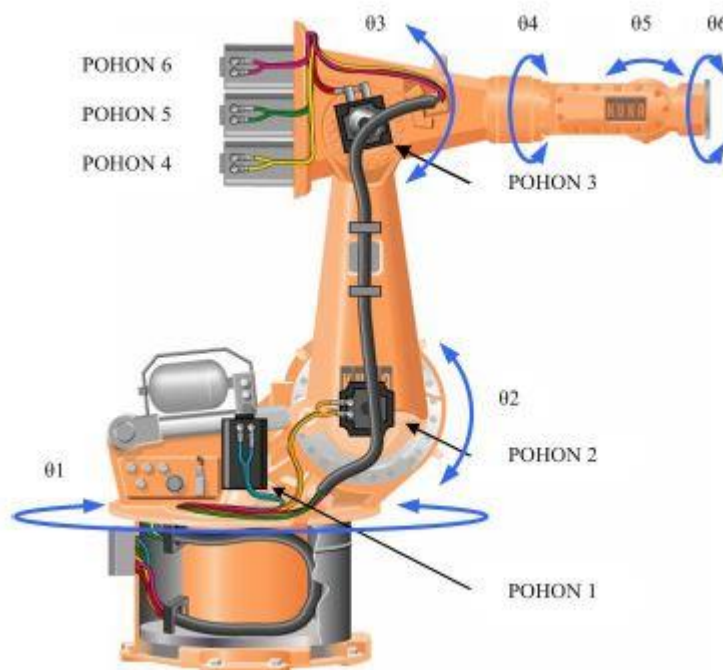
Na základe spôsobu umiestnenia motorov v robotoch by bolo možné hovoriť o koncepciách, kedy sú:

##### Motory umiestnené priamo vo väzbách

Jedna časť motoru je spojená s jedným členom, druhá s druhým. Výhodou je jednoduchosť väzieb medzi motormi a pohyblivými ramenami. Nevýhodou je zväčšenie pohybovanej hmotnosti ramien, teda i zhoršenie dynamiky a nosnosti.

##### Motory všetkých členov uložené na základni.

Prenos výkonu je uskutočňovaný pomocou prevodových mechanizmov. Výhodou tejto koncepcie je sústredenie ťažkých hmôt motorov na základňu robota, teda zlepšenie dynamických vlastností a nosnosti. Nevýhodou koncepcie je nutnosť prevodových mechanizmov. Je nutné dbať na presnosť prenosu výkonov.



Obrázok 6: Príklad umiestnenia pohonov: pohony 1, 2 a 3 umiestnené priamo vo väzbách; pohony 4, 5, 6 presunuté bližšie k základni [4]

V robotoch sa využívajú motory napájané jednosmerným aj striedavým prúdom. Z jednosmerných je možné použiť klasický DC motor s mechanickou komutáciou, alebo motor EC, tzv. bezkartáčový (BLDC), s elektronickou komutáciou. Z motorov napájaných striedavým prúdom sa využívajú krokové motory, alebo synchronne servomotory.

### 3.1.1 EC motory

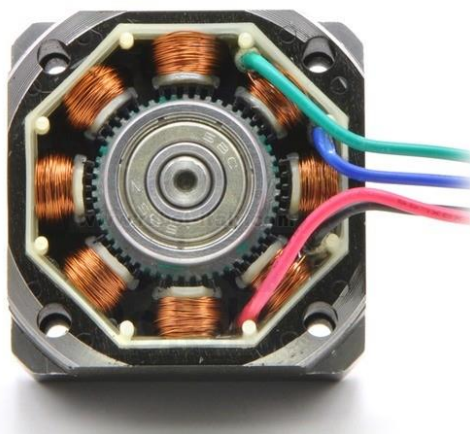
Elektricky komutované motory sú vo svojej podstate jednosmerné synchronné motory. Rozdiel pri porovnaní s klasickými jednosmernými motormi je v tom, že rotor EC motorov je zvyčajne tvorený permanentnými magnetmi a vinutia sú na statore. Funkciu komutátoru preberá tranzistorový menič, ktorý podľa polohy rotoru prepína prúd do jednotlivých statorových vinutí. Odpadá nám tak nutnosť pravidelnej údržby, ktorá vyplýva z klzného kontaktu komutátora a stieracích kartáčov (čistenie komutátoru, výmena a zabrusovanie kartáčov).



Obrázok 7: Rez EC motorom [5]

### 3.1.2 Krokové motory

Pracujú s využitím nespojitej zmeny zložiek elektromagnetického poľa. Túto diskretnú zmenu vyvodzuje impulzné budenie vinutia motora. Prúdové impulzy do priestorovo rozložených cievok vytvárajú nespojito sa otáčajúce magnetické pole. Rotor je roztočený pôsobením synchronizačného momentu. Poloha hriadeľa motoru závisí od počtu privedených impulzov a jeho rýchlosť od frekvencie týchto impulzov. Pre krokové motory je charakteristické, že dosahujú maximálny moment pri pomerne nízkych otáčkach. So zvyšujúcimi sa otáčkami krútiaci moment klesá. Z týchto dôvodov je možné použiť krokové motory k pohonu sústav menších výkonov bez použitia prevodovky. Výhodou krokových motorov je najmä jednoduché riadenie a nízka cena.



Obrázok 8: Krokový motor [6]

### 3.1.3 Synchronne motory

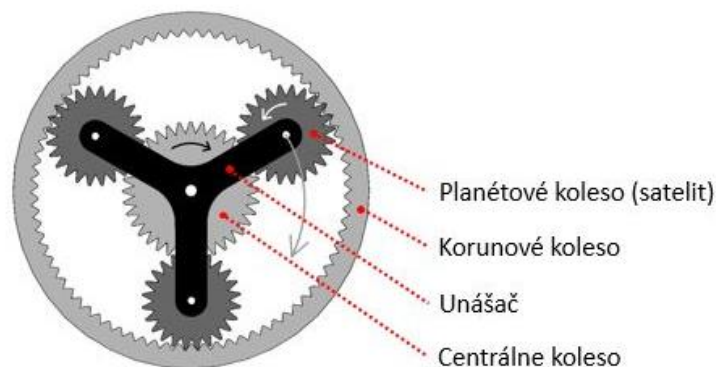
Synchronne servomotory s permanentnými magnetmi na rotore sú najrozšírenejším typom motorov používaných pre polohové servomechanizmy výrobných strojov a robotov [7]. Oproti asynchrónnym motorom sú pri rovnakom výkone menšie, ľahšie a lepšie sa chladia. Konštrukčne sa synchronný motor s permanentnými magnetmi na rotore podobá na jednosmerný EC motor. Zásadný rozdiel medzi nimi je v princípe získavania polohy rotoru. Kým EC motorom postačuje diskkrétne snímanie polohy vždy po 60 el. stupňoch, synchronný motor potrebuje trvalú informáciu o polohe rotoru. Vďaka tomu sa vyznačujú synchronne motory vyššou rovnomernosťou chodu bez momentových pulzácií. Najčastejšie sa využíva na snímanie polohy rotoru selsyn. Ten je možné využiť aj pre polohovú spätnú väzbu pri polohovom riadení servopohonu.

## 3.2 Reduktory

Otáčky elektromotoru je nutné redukovať za účelom zvýšenia krútiaceho momentu na ramene robotu. Jedná sa o prevod „do pomala“, preto sa takéto prevodovky často nazývajú aj reduktory. Požiadavky na reduktory v priemyselných robotoch sú kladené najmä na dosiahnutie vysokých prevodových pomerov, malé zástavbové rozmery a nízku hmotnosť. Najčastejšie používanými sú planétové cykloidné a harmonické prevodovky.

### 3.2.1 Planétové prevodovky

Názov dostali planétové prevodovky vďaka tomu, že pohyb ozubených kolies v jej vnútri pripomína obiehanie planét okolo Slnka. Vstupný výkon je privádzaný na centrálné koleso (Slnko). Korunové koleso je pevne uchytené k základni a má spoločnú os s centrálnym kolesom. Planétové kolesá sú navzájom spojené unášačom. Roztočením centrálného kolesa začnú obiehať planétové kolesá okolo centrálného, podobne ako planéty okolo Slnka, s rýchlosťou a momentom daným prevodovým pomerom. Výsledný výkon je menší o straty. Vstupný a výstupný hriadeľ sa otáčajú rovnakým smerom. Spojením viacerých prevodov za sebou vznikajú viacstupňové prevodovky, ktorými je možné docieľiť ešte vyšších prevodov. Planétové prevodovky dosahujú vzhľadom k svojim rozmerom vysoké prevodové pomery. Vďaka svojej konštrukcii dokážu prenášať relatívne veľké výkony. Vyrábajú vo viacerých vyhotoveniach, okrem rôznych prevodových pomerov aj podľa veľkostnej rady, či garantovanej presnosti. Oproti cykloidným a harmonickým prevodovkám je ich hlavnou devízou nízka cena. Použitie ozubených kolies má za následok, že tieto prevodovky nie sú bezvôľové. To sa prejavuje najmä pri zastavovaní a reverzácii pohybu.



Obrázok 9: Planétová prevodovka



### 3.2.2 Harmonické převodovky

Existují dva typy harmonických převodoviek: hrnčkový a plochý.

Oba typy sa skladajú s eliptického generátoru vln, pružného ozubeného kola a tuhého ozubeného kola. Základom oboch typov je eliptický generátor vln. Je to eliptická vačka s nalisovaným pružným ložiskom. Za úlohu má deformovať pružný ozubený člen. Generátor vln je (väčšinou priamo) spojený s hriadeľom motoru. Ozubené koleso je tuhý oceľový krúžok s vnútorným ozubením a s počtom zubov o dva menším, než má pružný člen. V hrnčkovom type prevodovky je celé stacionárne, v plochom type je axiálne rozdelené na stacionárnu a otočnú časť. Pružný ozubený člen býva vyrábaný z pružinovej ocele. V závislosti od typu prevodovky má formu pružného valca s vonkajším ozubením a pevným dnom (hrnčkový typ), alebo pružného prstenca s vonkajším ozubením (plochý typ). Zuby vonkajšieho ozubenia v dôsledku deformovania generátorom vln zaberajú v mieste hlavnej eliptickej osi do zubových medzier tuhého ozubeného kola. V dôsledku rozdielneho počtu zubov dochádza k relatívnemu pohybu medzi pružným členom a tuhým kolesom, čo umožňuje dosiahnuť vysoký prevodový pomer.



Obrázok 10: Harmonická prevodovka [8]

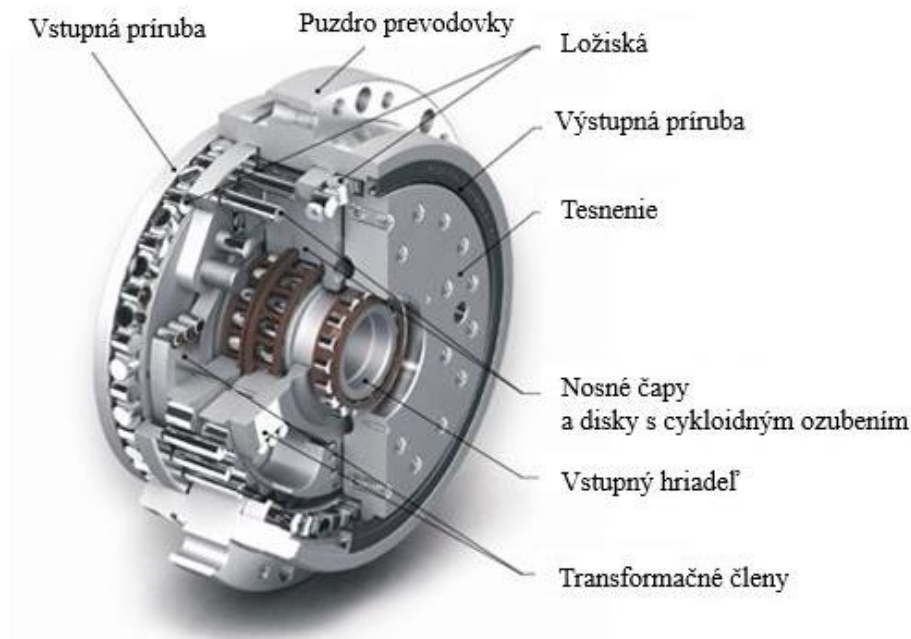
Vďaka prirodzenému predpätiu a radiálnemu pohybu zubov sa dajú považovať za bezvôľové [3]. Výhodou je aj ich kompaktný tvar s nízkou hmotnosťou, takže po konštrukčnej stránke ich je možné jednoducho integrovať do pohonového systému. Dokážu zabezpečiť vysoký prevodový pomer (30 – 160) a prenášať veľké momenty. Pracujú s vysokou účinnosťou aj pri nízkych otáčkach (až 85%). Absolútna presnosť polohovania je nižšia než jedna uhlová minúta a opakovaná presnosť činí len niekoľko uhlových sekúnd. Vyznačujú sa tiež vysokou životnosťou a bezporuchovým chodom.

### 3.2.3 Cykloidné prevodovky

Prevod je tvorený niekoľkými členmi. Na hnacom hriadeľi sú uložené dve excentrické vačky, ktoré sú voči sebe pootočené o 180°. Na nich sú rotačne uložené disky s vonkajším ozubením cykloidného tvaru. Vačky spôsobujú, že sa disky odvalujú po vnútornom „ozubení“ korunového kola. Toto ozubenie je tvorené valčekovými elementmi pravidelne rozmiestnenými v kruhu. Disky majú v sebe vyvrtané otvory, do ktorých zapadajú nosné čapy výstupnej príruby.

Princíp cykloidných prevodoviek spočíva v tom, že excentrické vačky svojim otáčaním nútia cykloidné disky k odvalovaniu po ozubení korunového kola. Odvalovaním dochádza

k rotácii diskov. Toto rotovanie je prevádzané na výstupnú prírubu pomocou nosných čapov. Tie sú uložené otočne a zapadajú do otvorov vyvrtaných na diskoch. Dôležité je, aby boli disky voči sebe pootočené presne o  $180^\circ$ , aby sa otvory v nich vyvrtané prekrývali presne o dvojnásobok excentricity vačiek. To zaručí, že bude medzi nimi vždy priestor pre nosné čapy.



Obrázok 11: Cykloidná prevodovka prešovskej firmy SPINEA [9]

Cykloidné prevodovky sú považované za takmer bezúdržbové. Dobre znášajú rázové zaťaženia a vyznačujú sa tiež dlhou životnosťou. Vzhľadom k tomu, že je vždy v zábere naraz niekoľko zubov, umožňujú dosiahnuť prenos vysokých momentov. Rovnako ako harmonické prevodovky sa vyznačujú dobrou kinematickou presnosťou a malou mechanickou vôľou. Oproti nim majú z princípu vyššiu torznú tuhosť. Pomerne zložitá výroba, sa zákonite prejavuje vo vyššej cene.

### 3.2.4 Ďalšie reduktory

V priemyselných robotoch a manipulátoroch je samozrejme možné využiť aj iné typy reduktorov. Vzhľadom však na potrebu dosiahnuť pomerne vysoké prevodové pomery by bolo nutné zapájať viac stupňov takýchto prevodoviek. Tým by sa znižovala presnosť, klesala účinnosť, zväčšovala vôľa a zástavbový priestor. Preto sa tieto prevodovky v priemyselných robotoch využívajú len sporadicky.

## 3.3 Transformačný mechanizmus

Ak motory nie sú umiestnené priamo vo väzbách, je potrebné ich výkon prenášať na určitú vzdialenosť. Okrem toho je často žiaduce meniť formu pohybu (rotačný pohyb na lineárny), či jeho orientáciu (kuželové súkolesie). K týmto účelom sa využívajú transformačné mechanizmy, z ktorých najpoužívanejšie sú popísané nižšie.

### 3.3.1 Reťazové prevody

Využívajú sa pre prenos výkonu do vzdialeného miesta, či pre vloženie prevodového pomeru. Krútiaci moment sa prenáša tvarovým stykom z hnacieho hriadeľa na hnaný nepriamo, pomocou reťaze. Výhodou reťazových prevodov je tvarová väzba, ktorá zaisťuje stály

prevodový pomer. V porovnaní s klinovým remeňom je tu menšie namáhanie hriadeľov a ložísk, pretože reťaz nevyžaduje predpätie. Prevody majú dobrú odolnosť, môžu pracovať pri krátkodobých preťaženíach a majú dobrú mechanickú účinnosť (až 98%) [10]. Nevýhodou reťazových prevodov je hlučnosť chodu a obmedzená obvodová rýchlosť (približne  $15 \text{ m s}^{-1}$ ). Dôležité je mazanie a správne napnutie reťazi.

### 3.3.2 Prevody s klinovými remeňmi

Klinové remene majú profil rovnoramenného lichobežníka s vrcholovým uhlom  $40^\circ$ . Vyrábajú sa z gummy, vystužené niekoľkými vrstvami textilných pásov, vďaka čomu sú schopné tlmiť rázy. Sú vhodné na prenos veľkých výkonov, hlavne pri malej vzdialenosti hriadeľov. Výkon sa prenáša pomocou trecej väzby, ktorá pri preťažení plní tiež funkciu poistky. K prednostiam klinových remeňov patria nízke výrobné náklady, či tichý chod. Remeňové prevody sa ľahko udržiavajú, nevyžadujú presnú výrobu ani precíznu montáž. Nevýhodou týchto prevodov sú väčšie nároky na priestor. Vplyvom nutného predpätia remeňa viac zaťažujú ložiská a hriadele.

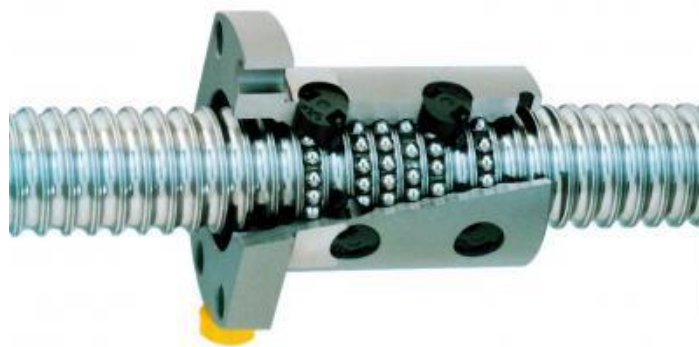
### 3.3.3 Prevody s ozubenými remeňmi

Ozubené remene v sebe spájajú výhody reťazových prevodov s klinovými remeňmi. Tvarová väzba zabezpečuje presný prenos krútiaceho momentu bez sklzu. Môžu prenášať veľké zaťaženia pri malých nárokoch na priestor. Nevyžadujú predpätie, čím znižujú namáhanie ložísk. Vyznačujú sa tichým chodom a považujú sa za bezúdržbové. Proti bočnému sklzu remeňa musia byť remenice opatrené prírubami. Chrbát a zub remeňa sú tvorené z gumou, odolnou voči oderu a vysokým teplotám. Nosná časť, vo forme oceľovej vložky, zabezpečuje vysokú pevnosť a nepriťažnosť remeňov.

### 3.3.4 Skrutka a matica

Jedná sa o najčastejší spôsob náhonu lineárnych osí. Rotačný pohyb hriadeľa motora je transformovaný na priamočiary pohyb osi. Rotačne môže byť poháňaná buď skrutka, alebo matica. V závislosti od toho sa druhý člen pohybuje lineárne.

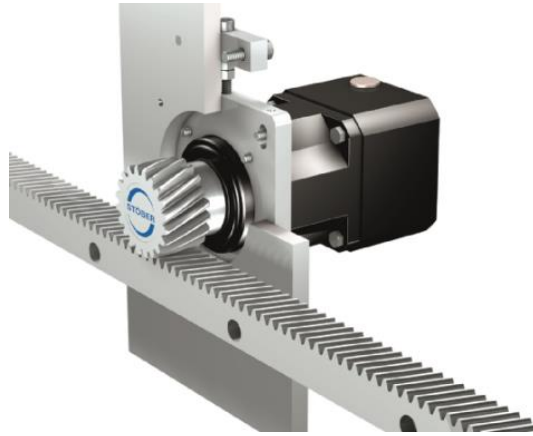
Pre málo zaťažované osi, kde nie je vyžadovaná vysoká presnosť, je možné použiť trapézovú skrutku. Kontakt medzi skrutkou a maticou je trecí. Častejšie sa však využíva princíp valivého vedenia guľčikovej skrutky v matici. V záвите medzi maticou a skrutkou obiehajú kalené guľčičky, ktoré minimalizujú trenie, zvyšujú účinnosť a životnosť. Výhodou tohto riešenia je aj možnosť vymedzenia vôle priamo v matici [11].



Obrázok 12: Matica guľčikovej skrutky v reze [12]

### 3.3.5 Pastorok a ozubený hrebeň

Tento variant sa využíva k pohonu lineárnych osí s dlhým posuvom, kde už nie je možné použiť guľčkovú skrutku. Vhodné využite nájde tento mechanizmus aj pri aplikáciách, kde je vyžadované presúvanie veľkých hmotností. Pri robotoch sa jedná predovšetkým o pojazďové ústrojenstvo. V zrovnaní s guľčkovou skrutkou má pastorok a hrebeň menší prevod, lepšiu účinnosť a nižšiu tuhosť. Presnosť je obvykle menšia než u guľčkovej skrutky.



Obrázok 13: Pohon osi použitím pastorku a ozubeného hrebeňa [13]

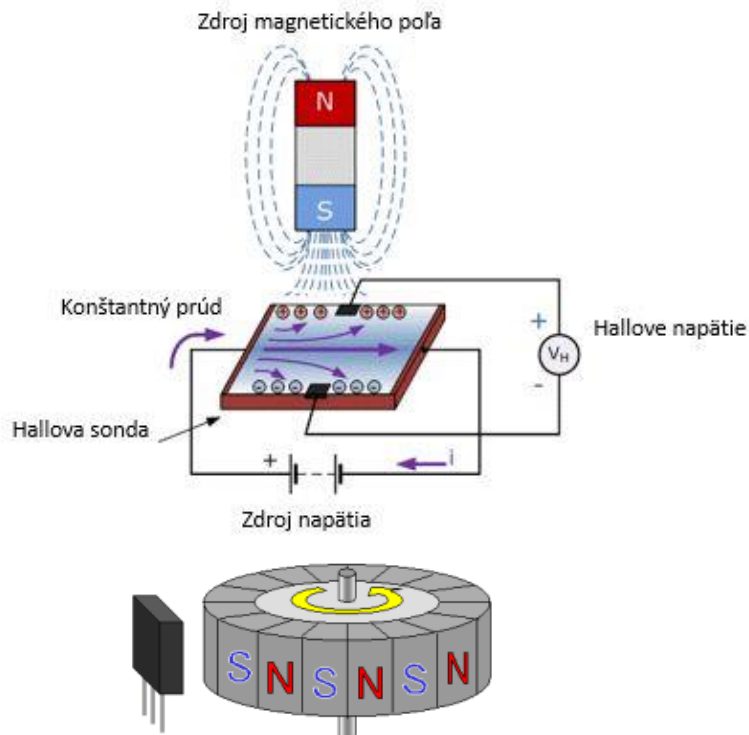
## 3.4 Odmeriavanie polohy

Stručný úvod, prečo je to potrebné.

Odmeriavanie polohy môže byť buď priame, alebo nepriame. Pri nepriamom odmeriavaní sa poloha objektu získava výpočtom z natočenia elektromotora. Pre aplikácie, kde je žiadaná vysoká presnosť odmeriavania je vhodnejšie použiť odmeriavanie priame. Pri ňom je meraná skutočná poloha objektu a nie je nutný prepočet, ako pri nepriamom odmeriavaní. Ďalej sa snímače pre získanie polohy delia na inkrementálne a absolútne.

### 3.4.1 Inkrementálne snímače polohy

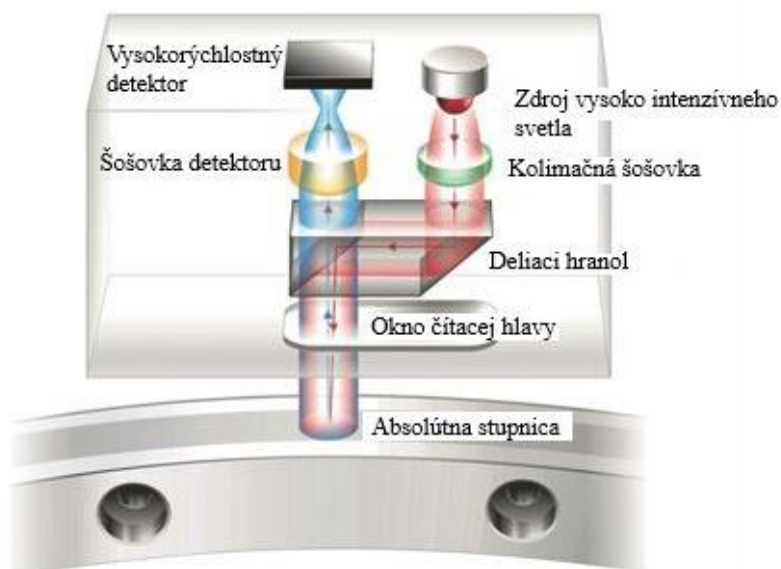
Inkrementálne snímače, nazývané tiež relatívne, neposkytujú informáciu o presnej polohe, v ktorej sa objekt v danej chvíli nachádza, ale o relatívnom posunutí. Jedná sa v podstate o elektromechanické prevodníky, ktoré prevádzajú pohyb (lineárny, alebo rotačný) na sekvencie elektrických digitálnych impulzov. Prevod sa uskutočňuje na princípe optickej závery (priebeh – odraz), alebo magnetickým snímačom s Hallovou sondou. Enkodér generuje väčšinou dva obdĺžnikové signály, posunuté voči sebe o 90°, čo umožňuje detekovať rýchlosť a smer otáčania. Snímače sú spravidla opatrené nulovacím bodom. Ten slúži ako referenčná poloha, do ktorej stroj po zapnutí musí zájsť, aby zistil, kde sa nachádza.



Obrázok 14: Princíp inkrementálneho odmeriavania magnetickým snímačom [14] [15]

### 3.4.2 Absolútne snímače polohy

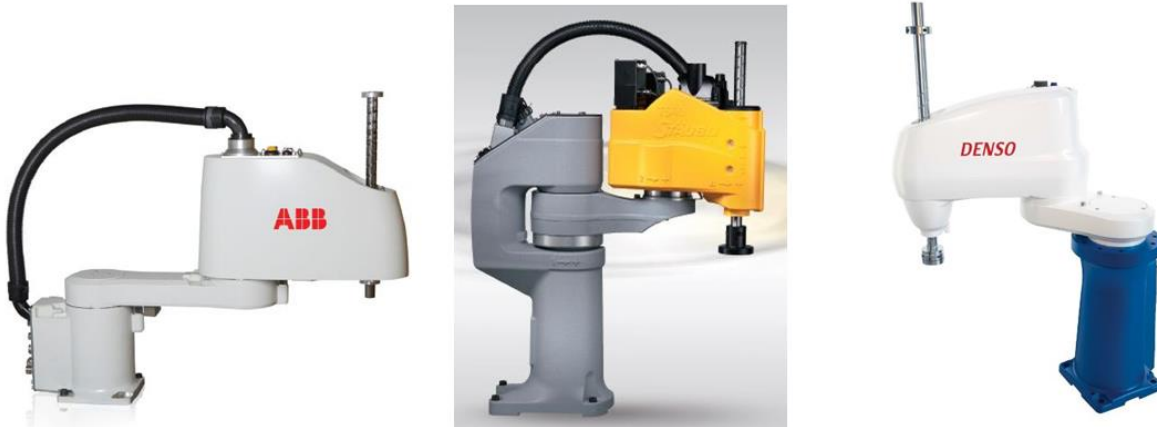
Absolútne snímače poskytujú na rozdiel od inkrementálnych presnú informáciu o polohe, a to ihneď po zapnutí. Tým odpadá nutnosť nájazdu do referenčnej polohy. Pri absolútnom odmeriavaní založenom na fotoelektrickom princípe funguje čítacia hlava ako vysokorýchlostný fotoaparát, ktorý robí snímky stupnice. Stupnica pozostáva z čiarového kódu, ktorý je obsahuje pre každú polohu jedinečnú informáciu. Merací systém snímky následne spracuje a určí polohu. Informáciu potom odošle do riadiaceho systému.



Obrázok 15: Princíp snímania meracieho systému RESOLUTE [16]

## 4 PREHĽAD SÚČASNÝCH RIEŠENÍ A MOTIVÁCIA

SCARA roboty má vo svojom portfóliu väčšina firiem zaoberajúca sa výrobou priemyselných robotov. Typické prevedenie je so štyrmi stupňami voľnosti. Štvrtá os slúži na orientovanie výstupnej hlavice rotovaním okolo osi Z. Konštruujú sa pre malé maximálne zaťaženia (0,5kg až 8kg), aby vynikol ich dynamický potenciál. Dosah ramien býva v rozmedzí 200 až 1000 mm. V tabuľke sú uvedené parametre komerčne dostupných robotov rôznych firiem s dosahom ramien približne 400 mm.



Obrázok 16: Komerčne dostupné SCARA roboty  
(zľava: ABB 910-3/0.45, STAUBLI TS40, DENSO HS-4545) [17] [18] [19]

Všetky modely, ktoré boli dohľadované v dobe písania práce, mali pohony základného kinematického reťazca umiestnené priamo na ramenách. Ako je však vidno z kinematickej štruktúry, robot typu SCARA je predurčený k tomu, aby boli motory jeho pohonov umiestnené čo najbližšie k základnému členu. Znížil by sa tým moment zotrvačnosti, ktorý v tomto prípade zásadne ovplyvňuje dynamické vlastnosti robota. Presunutím motorov by sa tiež zmenšilo zaťaženie ramien. Výkon by bol prenášaný do ramien pomocou prevodov. Takáto koncepcia by mala potenciál vykazovať výhodné dynamické vlastnosti.

Tabuľka 1

Robot		ABB IRB 910SC-3/0.45	Staubli TS40	DENSO HS -4545*G	EPSON G6 -45x	Omron XGL400	KUKA KR5 scara R350
Dosah [mm]		450	400	450	450	400	350
Dĺžka ramien [mm]	Rameno 1	200	230	225	200	250	125
	Rameno 2	250	170	225	250	150	225
Hmotnosť robota [kg]		24,5	50	25	27	15,5	20
Nosnosť [kg]	Nominálna	3	2	-	3	-	5
	Maximálna	6	8	5	6	4	5
Čas cyklu [s]	? Kg	-	0,6	-	-	-	-
	1 kg	0,38	-	-	0,33	-	-
	2 kg	-	-	0,35	-	0,49	-
Opakovateľnosť	X, Y [mm]	± 0,015		± 0,02	± 0,015	± 0,01	
	Z [mm]	± 0,01	± 0,01**	± 0,01	± 0,01	± 0,01	± 0,015**
	R [°]	± 0,005		± 0,05	± 0,005	± 0,004	
Rozsah pohybu	C [°]	± 140	± 105	± 155	± 152	± 140	± 155
	C' [°]	± 150	± 143	± 145	± 147,5	± 144	± 145
	Z [mm]	180	200*	200*	180*	150	200*
	R [°]	± 400	± 500	± 360	± 360	± 360	± 358
Maximálna rýchlosť	C [°/s]	415	650	-	-	-	525
	C' [°/s]	659	800	-	-	-	525
	Z [m/s]	1,02	2,22	-	-	-	2
	R [°/s]	2400	1929	-	-	-	2400
Celková maximálna rýchlosť	C+C' [m/s]	6,13	-	6,3	6,4	6,1	-
	Z [m/s]	1,02	-	2	1,1/2,35	1,1	-
	R [°/s]	2400	-	2400	2400	1020	-
Výkon motorov [W]	C	-	-	-	400	200	-
	C'	-	-	-	400	150	-
	Z	-	-	-	200	50	-
	R	-	-	-	100	100	-

pozn.: \* dostupné sú aj iné rozmery; \*\* uvedená len jedna hodnota





## 5 VLASTNÝ NÁVRH ROBOTY

Zadanie diplomovej práce jasne stanovuje, že konštruovaný priemyselný robot má mať kinematickú štruktúru typu SCARA. Ďalej je pri konštrukcii nutné zohľadniť, že pohon bude zabezpečovaný elektrickými motormi, ktoré majú byť uložené pevne na základni robotu. Zadanie neuvádza konkrétne miesto, ani účel, kde by mal byť robot nasadený.

Z rešerše vyplýva, že roboty so štruktúrou typu SCARA uprednostňuje zákazník, ktorý očakáva zefektívnenie monotónnych úloh typu „zodvihni a polož“. Roboty tohto typu konkurujú paralelným robotom, ktoré pracujú vo vysokých rýchlostiach, ale aj šesťosím angulárnym, či iným paletizačným robotom. Náš imaginárny zákazník bude očakávať dynamický robotický systém, ktorý bude môcť v závislosti od aktuálnej potreby opatriť rôznymi senzormi. Je preto nutné robot vybaviť motormi, ktoré zabezpečia dobrú dynamiku a počítat' s priestorom pre prívod energetických, či pneumatických káblov priamo na výstupnú hlavicu. Použité mechanizmy musia vykazovať minimálne vôle pre presný prenos výkonu.

### 5.1 Stanovenie parametrov

Cieľom bolo navrhnuť robot menšej veľkosti s dosahom ramien približne 400 mm. Dynamické vlastnosti a presnosť robotu boli preto zvolené porovnateľné s komerčne dostupnými modelmi. Závaž použíť vo výpočtoch bola zvolená na základe predmetov s ktorými by robot mohol potenciálne pracovať. Môže sa jednat' napríklad o paletu s doskou plošného spoja určenú na spájkovanie.

Tabuľka 2

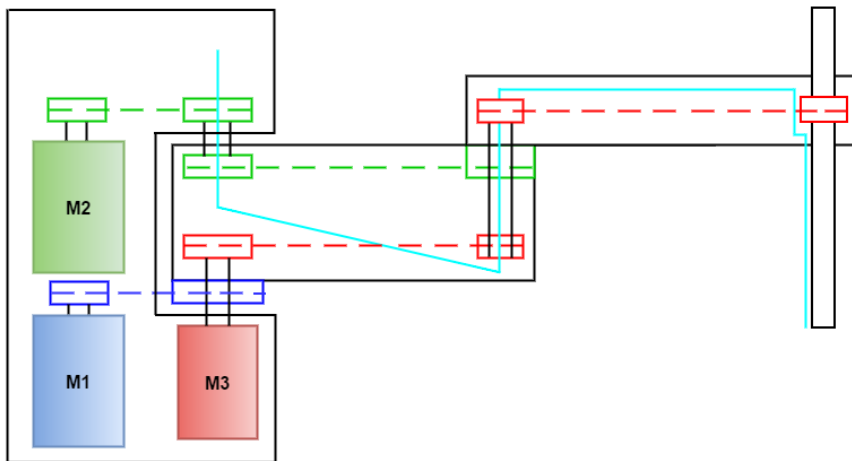
Dosah robota			400 – 450 mm
Nominálna záťaž			1 kg
Rozsah väzby	C	$rozsah_C$	$\sim 270^\circ$
	C'	$rozsah_{C'}$	$\sim 270^\circ$
	Z	$s_z$	$\sim \text{mm}$
Maximálna rýchlosť	C	$n_{maxR1}$	$70 \text{ min}^{-1}$
	C'	$n_{maxR1}$	$110 \text{ ms}^{-1}$
	Z	$v_z$	$1 \text{ ms}^{-2}$
Maximálne celkové zrýchlenie (s 1kg)		$a_{maxTCP}$	$60 \text{ ms}^{-2}$
Maximálne zrýchlenie v ose Z			$25 \text{ ms}^{-2}$

### 5.2 Koncepty

Jediné možné riešenie, ako preniesť výkon z motorov na základni do ramien robota je pomocou prevodov spomenutých v kapitole 3.3. Na Obrázku 17 je schematicky znázornený prvý zvažovaný návrh robota, z ktorého sa ďalej vychádzalo. Ďalšie varianty sa potom líšili predovšetkým umiestnením jednotlivých motorov a remení.

### 5.2.1 Koncept č.1

Pohon ramena R1 je realizovaný motorom M1, z ktorého je výkon prenášaný pomocou ozubeného remeňa na remenicu R11. Obdobne je realizovaný aj prenos výkonu z motora M2, sústavou remeníc a ozubeného remeňa až na rameno R2. Lineárny posuv v ose Z zabezpečuje motor M3, z ktorého je výkon prenášaný sústavou remeníc až na remenicu R34. Tá je pevne spojená s maticou guľicovej skrutky a rotačný pohyb hriadeľa motora transformuje na translačný pohyb v ose Z.

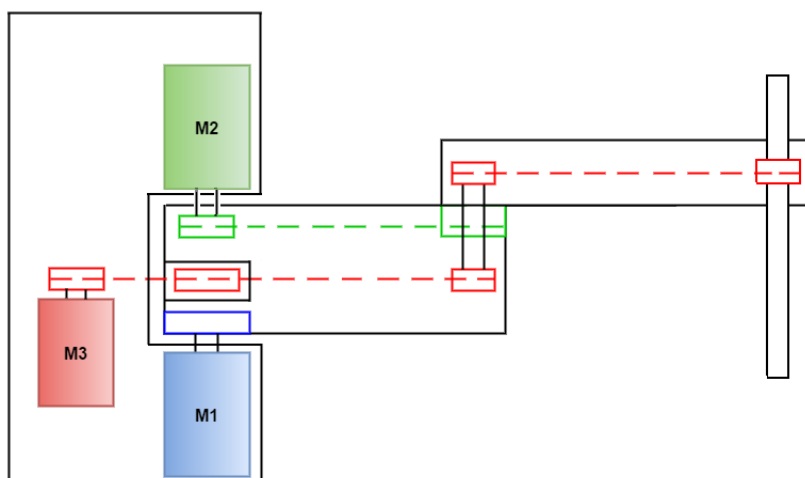


Obrázok 17: Prvý variant

Tento koncept má výhodu v tom, že duté remenice umožňujú prechod káblov a hriadeľov. Nevýhodou je množstvo mechanizmov zabezpečujúcich prenos výkonu. Každý člen navyše zhoršuje presnosť a znižuje účinnosť pohonu.

### 5.2.2 Koncept č.2

Snaha odstrániť nedostatky predchádzajúceho variantu vyústili vytvorením druhej verzie. Motor M2 je umiestnený navrchu a priamo na jeho hriadeľi je umiestnená remenica. Motor M1 poháňa rameno 1 priamo. Motor M3 bol presunutý zospodu do strany a odtiaľ poháňal sústavu remeníc. Počet remeníc by sa znížil o 2, no nastali by problémy s prívodom remeňa stredom ramena 1. Utesnenie by bolo ťažko realizovateľné a preto bol návrh zamietnutý.



Obrázok 18: Schéma konceptu č.2

### 5.2.3 Koncept č.3

Jediná možnosť, ako previezť výkon z motora M3 cez prvú väzbu a vyhnúť sa použitiu dutých remeníc, je použitie motoru z dutým hriadeľom, kadiaľ by bolo možné viesť hriadeľ motora M3. Prevedením prieskumu trhu bolo takéto riešenie nájdené. Oproti prvému variantu boli odstránené dva remene a remenice.

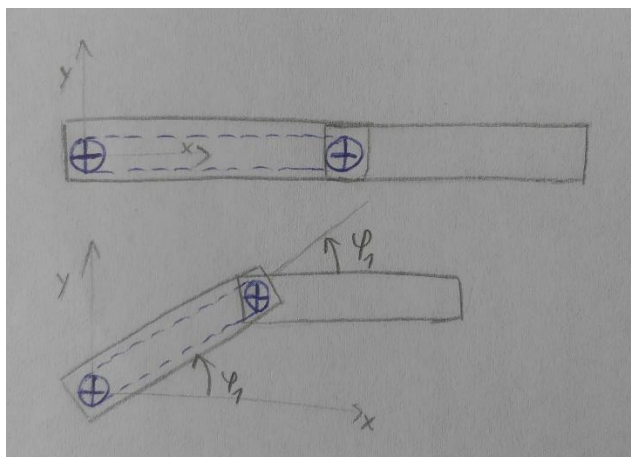
### 5.2.4 Koncept č.4

Po dôkladnej analýze kinematiky robota bolo zistené, že pohyby jednotlivých osí sú pri prvých troch riešeniach na sebe závislé. Jediný spôsob, ako učiniť pohyby aspoň nezávislými, je uložiť motory na základňu otočne. Motor M1 by potom zároveň s ramenom točil aj ostatnými dvoma motormi a motor M2 motorom M3. Otázne je, aká by bola náročnosť takéhoto riešenia na výkony prvých dvoch motorov a samotnú konštrukciu robota.

### 5.2.5 Zhodnotenie

Z prvých troch riešení sa ako najvhodnejšie zdá to posledné. Oproti štvrtému konceptu má toto riešenie nevýhodu v tom, že pohyby osí sú na sebe závislé. Závislosť je znázornená na Obrázku .

Záverečné rozhodnutie padlo na vytvorenie konštrukčného návrhu podľa konceptu č.3. Riadenie takéhoto systému by potom mohlo byť témou ďalších prác.



Obrázok 19: Závislosť pohybu ramien načrtnutá na papieri  
(ak sa natočí prvé rameno o uhol  $\varphi_1$ , musí sa o rovnaký uhol natočiť i druhé rameno, ak má ich relatívna poloha ostať nezmenená)

### 5.3 Dĺžky ramien

Dĺžka prvých dvoch ramien určuje charakter pracovného priestoru v rovine XY. To, v akom pomere sú voči sebe, má vplyv na výsledné zrýchlenia, tým pádom i na efektívne využitie motorov. Závislosť zrýchlení na dĺžkach ramien bola vyjadrená v príslušných rovniciach.

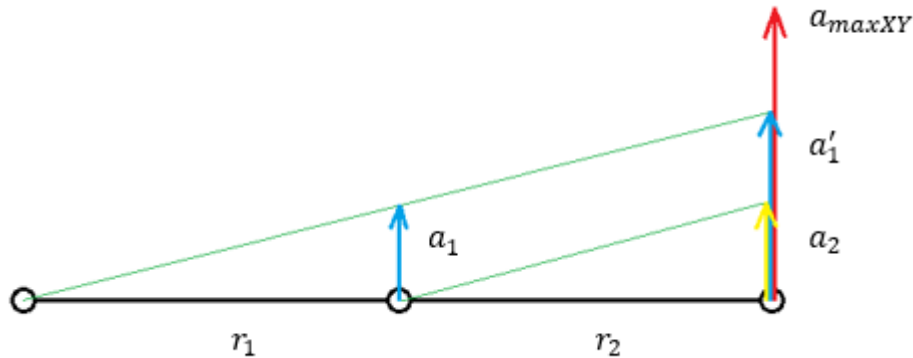
Mojim cieľom bolo, aby sa obe ramená pohybovali rovnakým uhlovým zrýchlením voči predchádzajúcemu členu.

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 \quad (1)$$

$$\frac{a'_1}{r_1 + r_2} = \frac{a_2}{r_2} \quad (2)$$

Vychádzajúcou hodnotou bolo zvolené maximálne zrýchlenie výstupnej hlavice  $a_{maxTCP}$ . Od toho bolo vektorovo odčítané zrýchlenie v ose Z. Výsledné maximálne zrýchlenie v rovine XY je rovné súčtu zrýchlení oboch ramien.

$$a_{maxXY} = a'_1 + a_2 \quad (5.3)$$



Obrázok 20: Zrýchlenia v rovine XY

Vyjadrením zrýchlenia  $a'_1$  z rovnice (2) a následným dosadením do rovnice (3) sme dostali vzťah:

$$a_{maxXY} = \frac{a_2(r_1 + r_2)}{r_2} + a_2 \quad (4)$$

Ďalšími úpravami bolo vyjadrené zrýchlenie  $a_2$  a požadované uhlové zrýchlenia  $\varepsilon_1$  a  $\varepsilon_2$ .

$$a_2 = \frac{a_{maxXY} \cdot r_2}{2r_2 + r_1} \quad (5)$$

$$\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \frac{a_{maxXY}}{2r_2 + r_1} \quad (6)$$

To, ako vplýva dĺžka ramien na zrýchlenie, možno vidieť po dosadení do vzťahu (6) v Tabuľke 3. Súčet dĺžok bol v tomto prípade vždy rovný požadovanému dosahu robota.

Tabuľka 3

$r_1$ [mm]	$r_2$ [mm]	$\varepsilon$ [s <sup>-2</sup> ]
220	190	83,33
205	205	81,30
195	215	80,00
185	225	78,74
170	240	76,92

Výber bol prevádzaný tak, aby nevznikol veľký nepomer ramien, a tiež s prihliadnutím na použité prevodové mechanizmy. Zvolené dĺžky sú:

$$r_1 = 182,5 \text{ mm}$$

$$r_2 = 227,5 \text{ mm}$$

## 5.4 Výber motorov pre osi C a C'

Rýchlosť a zrýchlenie ramien charakterizuje dynamické správanie robota. Vychádzajúc zo stanovených parametrov bolo nutné vybrať motory, ktoré by zabezpečili požadované vlastnosti. Ako prvé bolo nutné spočítať krútiaci moment potrebný k rozpohybovaniu ramien. Na tento účel bola použitá metóda redukcie.

Metóda redukcie spočíva v redukovaní sústavy pohybujúcich sa hmôt na jednoduchšiu sústavu, pričom sa dynamické vlastnosti zachovávajú. Vychádza sa z rovnosti kinematických energií skutočnej a redukovanej sústavy (7) a z rovností výkonov (8).

$$E_{k_{red}} = E_{k_{skut}} \quad (7)$$

$$P_{red} = P_{skut} \quad (8)$$

Moment zotrvačnosti jednotlivých telies je potrebné presunúť do osi rotácie pomocou Steinerovej vety (9), kde  $m$  je hmotnosť telesa,  $I$  moment zotrvačnosti k ose otáčania,  $I_0$  moment zotrvačnosti k ose prechádzajúcej ťažiskom, a  $d$  vzdialenosť oboch osí.

$$I = I_0 + m \cdot d^2 \quad (9)$$

Redukovaný moment zotrvačnosti sa zistí zo vzťahu:

$$\frac{1}{2} I_{red} \omega^2 = \sum_{j=1}^m \frac{1}{2} I_j \omega_j^2 \quad (10)$$

Pohybová rovnica sústavy redukovanej na hriadeľ motora má nasledujúci tvar:

$$M_{red} = I_{red} \cdot \varepsilon \quad (11)$$

Z používaných motorov, uvedených v kapitole 3.1, sa ako najvhodnejšie javili synchronné servomotory. EC motory neposkytovali požadované výkony. Krokové motory nedosahovali pri požadovaných otáčkach potrebné momenty.

Výhodou synchronných servomotorov je, že ich možno krátkodobo preťažovať. To je žiaduce najmä pri strojoch, ktoré pracujú v cykloch s veľkými výkonovými špičkami. Voľba motoru v takom prípade vychádza z výpočtu účinného momentu a priemerných otáčok. Ak sa výsledné hodnoty nachádzajú v grafe v oblasti nepretržitej prevádzky, motor je pre pohon vhodný.

### 5.4.1 Motor pre os C

Maximálny moment  $M_1$  pôsobí v momente, keď obe ramená ležia v jednej priamke. Všetky telesá konajú rotačný pohyb okolo tej istej osi. Výpočet redukovaného momentu zotrvačnosti  $I_{rhm1}$  bol príliš rozsiahly, preto je tu uvedený iba zjednodušený vzťah, kde  $I_{mot1}$  predstavuje moment zotrvačnosti hriadeľu motora a  $I_{ps1}$  moment zotrvačnosti pohybujúcej sa sústavy telies.  $I_{ps1}$  tvorí súčet momentov zotrvačností ramien, remení, guľčkovej skrutky, matíc, efektora a presúvaných hmôt, vzťahnutých k ose rotácie.

$$I_{rhm1} = I_{mot1} + I_{ps1} \quad (12)$$

$$M_1 = I_{rhm1} \cdot \varepsilon_1 \quad (13)$$

Motor bude poháňať rameno priamo, bez ďalších vložených mechanizmov, preto nie je nutné uvažovať straty vplyvom trecích momentov a účinností mechanizmov (pozn. motor má vstavaný reduktor, ktorého vlastnosti sú už zahrnuté v charakteristike motoru).

Na základe požadovaného pohybu bol zvolený pracovný cyklus motoru (Obrázok 20). Motor musí v prvej fáze cyklu vyvodzovať vypočítaný krútiaci moment  $M_1$ . Doba tejto fázy je úmerná dobe rozbehu na maximálne otáčky.

$$t_1 = \frac{n_{maxR1}}{2\pi\varepsilon_1} \quad (14)$$

Dráha, ktorú vykoná rameno zodpovedá uhlu:

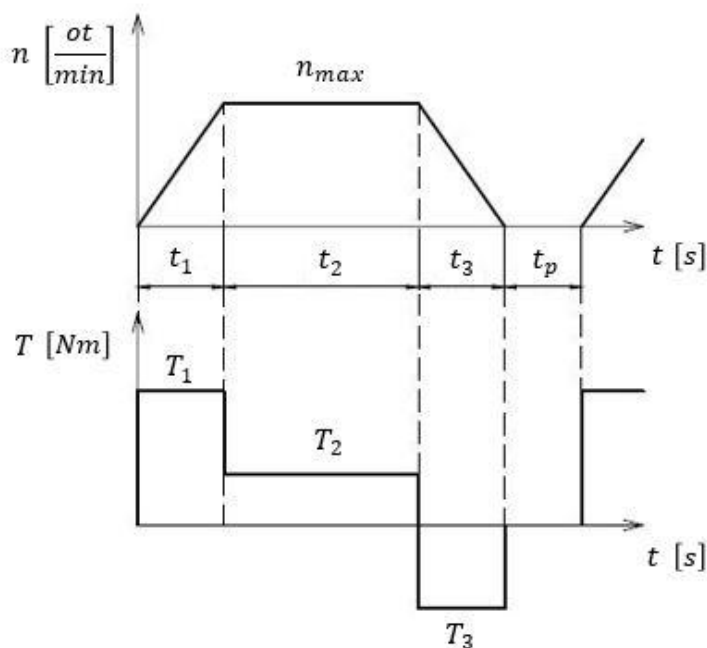
$$\theta_1 = \varepsilon_1 \frac{t_1^2}{2} \quad (15)$$

Spomalenie motora prebieha rovnako, ako jeho zrýchlenie, preto je krútiaci moment, doba brzdenia i dráha rovnaká ako pri zrýchľovaní.

$$t_3 = t_1 \quad (16)$$

V druhej fáze motor pracuje s konštantnými otáčkami. Napriek tomu je však potrebný krútiaci moment, ktorý kompenzuje straty v reduktore. Veľkosť momentu bola stanovená odhadom, prihliadnuc na poskytnuté informácie od výrobcu. Odhad bol prevedený tak, aby sa nemohlo stať, že skutočný krútiaci moment bude väčší. Doba cyklu závisí od rozsahu ramena a rýchlosti, s akou sa pohybuje:

$$t_2 = \frac{2\pi(\text{rozsah}_C - 2\theta_1)}{n_{maxR1}} \quad (17)$$



Obrázok 21: Pracovný cyklus motoru

Z pracovného cyklu bol vypočítaný účinný moment a priemerné otáčky motoru. Doba pauzy medzi cyklami  $t_p$  bola zvolená primerane k ostatným časom. Hodnoty boli vynesené do grafu pracovnej charakteristiky a nasledovalo posúdenie vhodnosti vytipovaného motoru.

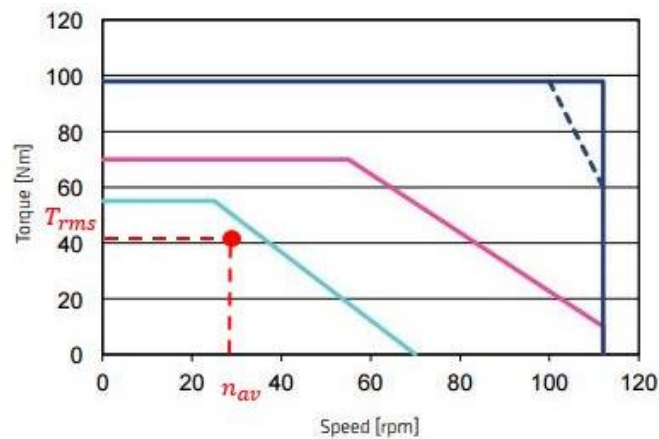
$$T_{rms} = \sqrt{\frac{T_1^2 \cdot t_1 + T_2^2 \cdot t_2 + T_3^2 \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_p}} \quad (18)$$

$$n_{av} = \frac{\frac{n_{maxR1}}{2} \cdot t_1 + n_{maxR1} \cdot t_2 + \frac{n_{maxR1}}{2} \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_p} \quad (19)$$

Po dosadení:

$$T_{rms} = 41,86 \text{ Nm}$$

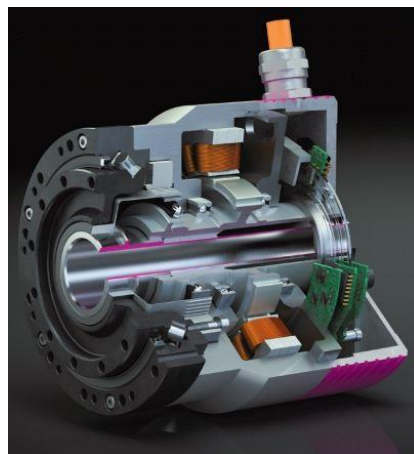
$$n_{av} = 26,86 \text{ min}^{-1}$$



Obrázok 22: Pracovná charakteristika motora zvoleného pre os C

Tabuľka 4: Parametre zvoleného motora s prevodovkou

	CHA-C 25	Požadované parametre
Prevodový pomer [–]	50	50
Maximálny výstupný moment [Nm]	98	94
Maximálne výstupné otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ]	112	70
Hmotnosť motora [kg]	6,1	–
Priemer dutého hriadeľa [mm]	27	14



Obrázok 23: Zvolený motor CHA-C 25 [20]

### 5.4.2 Motor pre os C'

Cyklus motoru je obdobný ako pri prvom motore. Je však nutné počítať s tým, že pohyb ramien je na sebe závislý. Ak sa napríklad prvé rameno pohybuje a druhé má byť relatívne k prvému v pokoji, motor musí pracovať. Kritický stav je preto, ak sa majú obe ramená pohybovať maximálnou rýchlosťou, či zrýchľovať maximálnym zrýchlením. To ovplyvní požadovaný moment  $M_2$  a maximálne otáčky  $n_{maxM2}$  motora pre os C'.

$$\varepsilon_2' = \varepsilon_1 + \varepsilon_2 \quad (20)$$

$$n_{maxM2} = n_{maxR1} + n_{maxR2} \cdot i_{p2} \quad (21)$$

Do momentu zotrvačnosti redukovaného na hriadeľ motora bolo v tomto prípade nutné rátať aj prevodový pomer reduktora  $i_{p2}$ , ktorý zapríčiňuje, že časť pohybujúcej sa sústavy telies má inú rýchlosť. Vzťahy majú nasledovný tvar:

$$I_{rhm2} = I_{mot2} + I_{ps2} + \frac{I_{ps2}'}{i_{p2}^2} \quad (22)$$

$$M_2 = I_{rhm2} \cdot \varepsilon_2' \quad (23)$$

$$t_1 = \frac{n_{maxR2}}{2\pi\varepsilon_2} \quad (24)$$

$$t_3 = t_1 \quad (25)$$

$$\theta_1 = \varepsilon_2 \frac{t_1^2}{2} \quad (26)$$

$$t_2 = \frac{2\pi(\text{rozsah}_{C'} - 2\theta_1)}{n_{maxR2}} \quad (27)$$

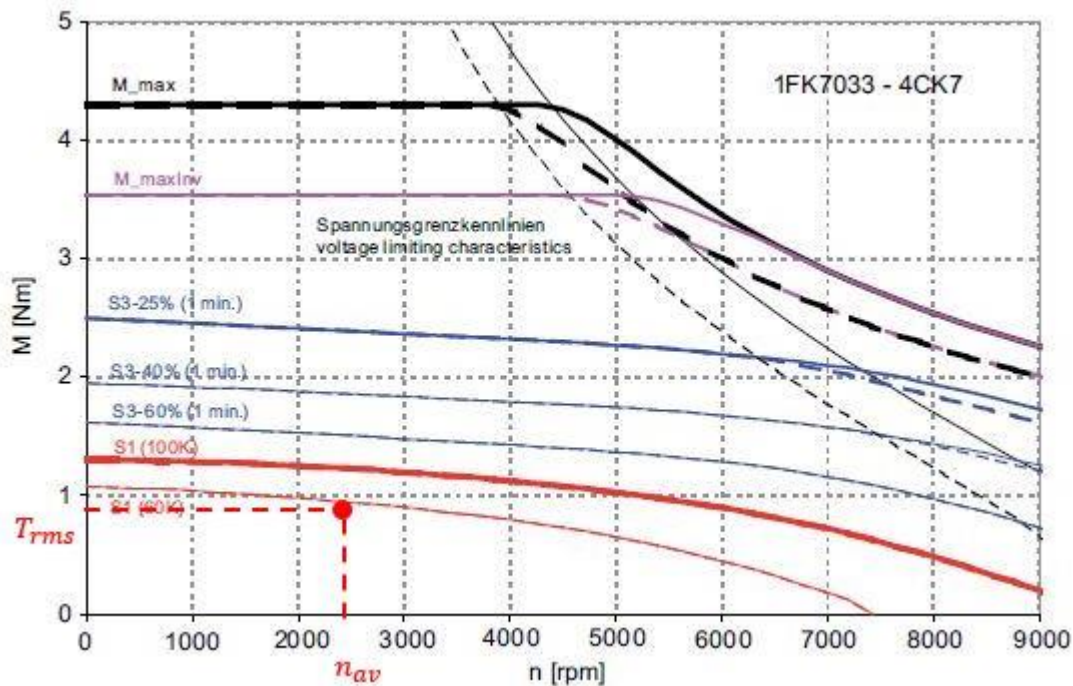
Metóda redukcie nezahŕňa trecie sily a účinnosť mechanizmov. Na rozdiel od predchádzajúceho prípadu, rameno 2 je poháňané nepriamo. Je preto nutné rátať so stratami výkonu vplyvom trecích síl a účinností prevodových mechanizmov. V praxi sa motory zvyknú mierne predimenzovať. Prevedie sa približný odhad stratového momentu. Potrebný krútiaci moment je potom rovný súčtu stratového a vypočítaného momentu.

Podľa informácií od výrobcu reduktorov je moment potrebný k pohybu s konštantnou rýchlosťou približne 8 Nm. Po odhade trecích momentov a účinností transformačného mechanizmu formou výpočtu „na hrubo“ som dospel k záveru, že tento moment nemôže byť väčší než 10 Nm. Moment  $M_2$  bol o túto hodnotu navýšený ( $T_1 = M_2 + 10Nm$ ). Hoci by mal byť brzdný moment  $T_3$  o túto hodnotu menší (pretože trecie sily v mechanizmoch pomáhajú pri brzdení), bol ponechaný na vypočítanej hodnote momentu  $M_2$ .

$$T_{rms} = 0,93 Nm$$

$$n_{av} = 2389 \text{ min}^{-1}$$





Obrázok 24: Hodnoty účinného momentu a priemerných otáčok vynesené v pracovnej charakteristike motora osi C'

Pozn.: Oba zvolené motory dokážu komunikovať s rovnakým riadiacim systémom, preto môžu byť kombinované.

## 5.5 Výber reduktorov

Z dôvodu vyššej presnosti, ale najmä pre bezvôľový chod boli zvažované cykloidné a harmonické prevodovky. Oba typy prevodoviek sú konštruované s integrovanými ložiskami do jedného kompaktného celku. To ich umožňuje montovať priamo do väzieb, čo celú konštrukciu zjednoduší v porovnaní s použitím planétových prevodoviek. Cykloidné prevodovky dokážu prenášať vyššie výstupné momenty a zvládajú vyššie axiálne zaťaženia. Na druhej strane porovnateľné harmonické prevodovky majú menšiu hmotnosť sú schopné pracovať s vyššími vstupnými otáčkami. Práve vysoké vstupné otáčky sa v tomto prípade ukázali ako kritické. Vychádzajúc z toho boli zvolené harmonické prevodovky. Z dostupných informácií vyplýva, že i výrobcovia SCARA robotov uprednostňujú skôr tento typ reduktorov.

### 5.5.1 Reduktor pre os C

Keďže pre os C bol zvolený motor so vstupnou harmonickou prevodovkou, výpočet vhodnosti reduktora bol zahrnutý vo výpočte motora. Charakteristiky reduktora sú uvedené v rovnakej tabuľke (Tabuľka 4).

### 5.5.2 Reduktor pre os C'

Pri výbere bol zohľadňovaný maximálny výstupný moment a maximálne vstupné otáčky, ktoré je potrebné dosiahnuť. Veľkosť momentu  $T_1$  je preto tentokrát bez trecích síl. Moment  $T_2$  bude nulový a brzdný moment ostal nezmenený ( $T_3 = M_2$ ). Vzorce pre výpočet účinného momentu a priemerných vstupných otáčok boli prebraté z literatúry od výrobcu.

$$T_a = \sqrt[3]{\frac{T_1^3 \cdot \frac{n_{maxM2}}{2} \cdot t_1 + T_2^3 \cdot n_{maxM2} \cdot t_2 + T_3^3 \cdot \frac{n_{maxM2}}{2} \cdot t_3}{\frac{n_{maxM2}}{2} \cdot t_1 + n_{maxM2} \cdot t_2 + \frac{n_{maxM2}}{2} \cdot t_3}} \quad (28)$$

$$n_{av} = \frac{\frac{n_{maxM2}}{2} \cdot t_1 + n_{maxM2} \cdot t_2 + \frac{n_{maxM2}}{2} \cdot t_3}{t_1 + t_2 + t_3 + t_p} \quad (29)$$

Po dosadení:

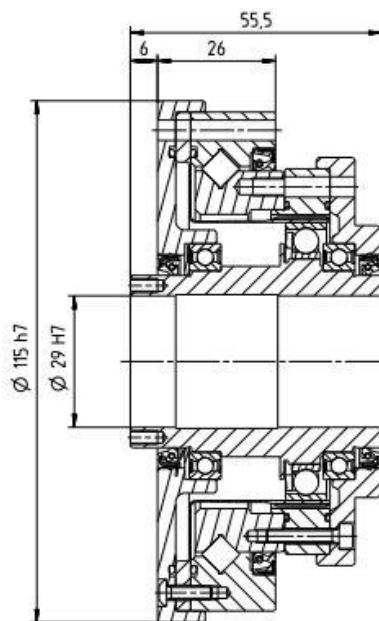
$$T_a = 30,09 \text{ Nm}$$

$$n_{av} = 2378 \text{ min}^{-1}$$

Na základe výsledkov výpočtov bol zvolený reduktor HFUS-25-2UH. Jedná sa o harmonickú prevodovku, mazanú tukom, s dutým hriadeľom. Parametre sú uvedené v Tabuľke 5.

Tabuľka 5

	HFUS-25-2UH	Požadované
Prevodový pomer	30	30
Maximálny opakujúci sa moment	50 Nm	46,52 Nm
Priemerný moment	38 Nm	31,73 Nm
Maximálne otáčky (mazanie tukom)	5600 min <sup>-1</sup>	5400 min <sup>-1</sup>
Priemerné vstupné otáčky (mazanie tukom)	3500 min <sup>-1</sup>	2378 min <sup>-1</sup>
Hmotnosť	2,1 kg	–
Priemer dutého hriadeľa	29 mm	14 mm

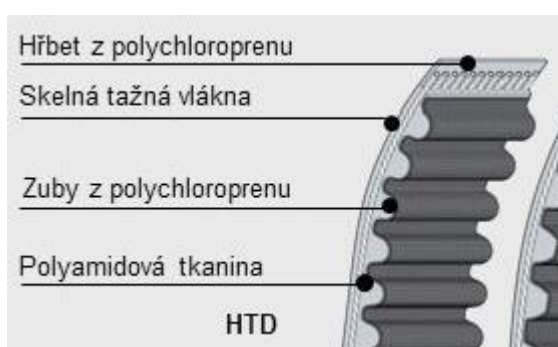


Obrázok 25: Vybraný reduktor s integrovanými ložiskami pre os C' v reze [21]

## 5.6 Prenos výkonu z motorov na ramená

Pre prenos výkonu z motorov na ramená boli ako najlepšie vyhodnotené prevody s ozubenými remeňmi. V ich prospech hrá najmä bezúdržbovosť, jednoduchá montáž nenáročná na presnosť a dobrý prenos výkonu. Pre výpočet bol použitý softvér od výrobcu (ContiTech Suite 7.1).

Do programu boli zadané pracovné otáčky a moment, ktorý musí remeň prenášať. Ďalej bol zadaný priemer remenic, ich osová vzdialenosť, požadovaný súčiniteľ chodu a podmienky prevádzky. Na základe výpočtov bolo posúdené, že je možné zvoliť pre všetky prevody rovnakého typu. Zvolené boli ozubené remene CONTI SYNCHROBELT štandardného profilu HTD so šírkou 9 mm. Rozteč zubov je 5 mm. Tieto remene sú určené pre spodnú a strednú oblasť výkonov. Remenice k nim boli zvolené rovnakého priemeru. Bolo tak učené pre univerzálnosť náhradných dielov v prípade servisu.



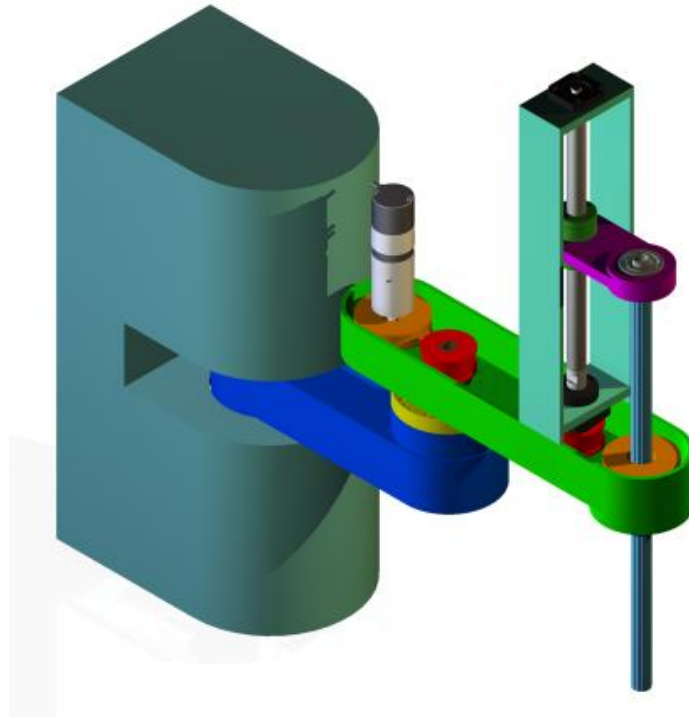
Obrázok 26: Stavba remeňov SYNCHROBELT [22]

## 5.7 Prevedenie osi Z a R

Z rešerše vychádza, že pre posuv v ose Z sa pre SCARA roboty používa mechanizmus guľikovej skrutky. Existujú dva varianty založené na tomto princípe. Rozdiel medzi nimi spočíva v tom, ako je zabezpečené orientovanie výstupnej hlavice. Oba varianty boli rozpracované do podoby 3D modelu.

### 5.7.1 Prvý variant: Guľiková skrutka a vodiaci hriadeľ

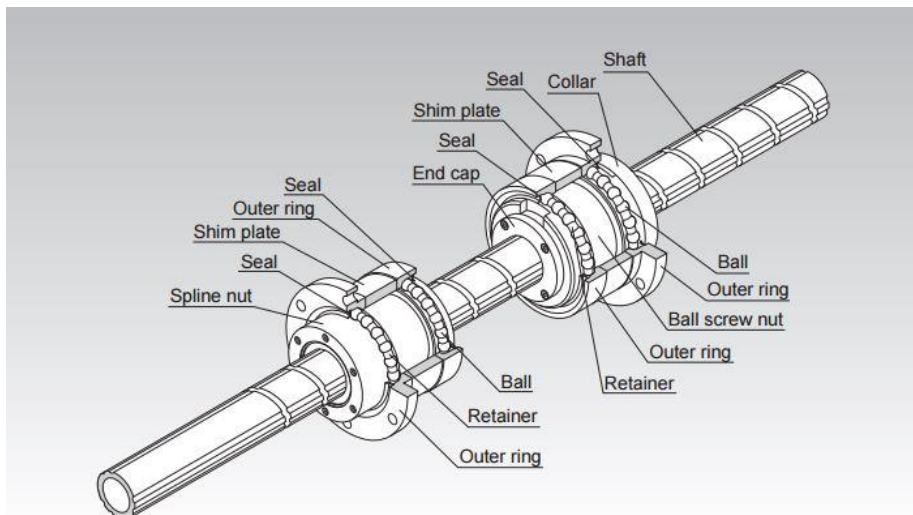
V prvom variante je guľiková skrutka uložená rotačne v ložiskových domčekoch. Poháňaná je pomocou remeňového prevodu, sústavou remenic, vyznačených na Obrázku 27 červenou farbou. Rotáciou skrutky sa matica pohybuje vo zvislom smere a cez držiak, v ktorom je rotačne uložený vodiaci hriadeľ zabezpečuje pohyb v ose Z. Matica vodiaceho hriadeľa slúži primárne ako vedenie. Zároveň je možné jej rotovaním pomocou sústavy remenic (znázornených oranžovou farbou) orientovanie výstupnej hlavice.



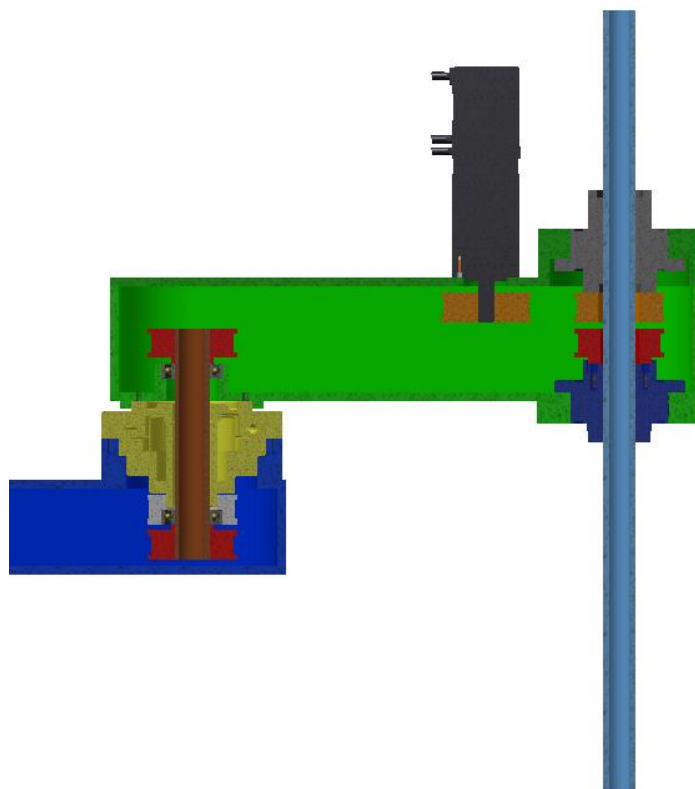
Obrázok 27: Prevedenie prvého variantu uloženia

### 5.7.2 Druhý variant: Guličková skrutka s drážkami

Druhý variant spočíva v spojení guličkovej skrutky a vodiaceho hriadeľa do jedného celku. Klasická guličková skrutka obsahuje pozdĺžne vyfrézované drážky. Na hriadeľi sú umiestnené dve matice, pričom jedna zodpovedá za lineárny pohyb v ose Z a druhá za orientovanie výstupnej hlavice. Pohyby sú od seba závislé, na čo je potrebné myslieť pri riadení takéhoto mechanizmu.



Obrázok 28: Guličková skrutka s drážkami [23]



Obrázok 29: Druhý variant, zobrazenie v reze

### 5.7.3 Porovnanie

Prvý variant je náročnejší na počet súčiastok, ktoré by bolo nutné dodatočne vyrobiť. Dĺžka ramena sa predĺži a zvýši sa jeho hmotnosť. Druhé riešenie je kompaktnejšie a nezaťažuje natoľko rameno. Po konzultácii s vedúcim diplomovej práce bol nakoniec zvolený druhý variant.

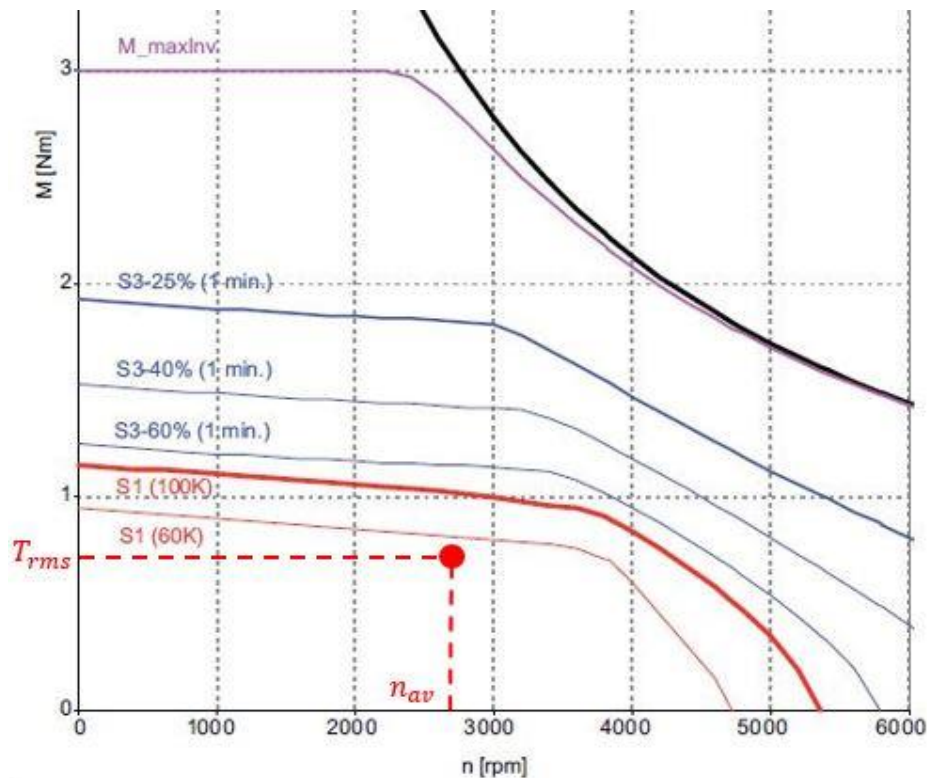
### 5.7.4 Výber pohonov osi Z a R

Výpočty pohonov pre obe osi prebiehali principiálne rovnakým spôsobom ako pre predchádzajúce motory. Pre výpočet pohonu guličkovej skrutky boli použité vzorce z knihy pána profesora Marka: „*Konstrukce CNC obráběcích strojů III*“. Z dôvodu ich rozsiahlosti v práci nebudú uvedené v písomnej forme. Všetky výpočty, vrátane tých predchádzajúcich, sú k dispozícii v prílohe práce vo formáte programu Mathcad.

#### Zvolené motory:

Motor 3: SIEMENS 1FK 7032

Motor 4: HarmonicDrive RSF-11B



Obrázok 30: Pracovná charakteristika vybraného motoru M3

## 5.8 Výber odmeriavania

Synchrónne servomotory sú sami o sebe vybavené odmeriavaním polohy hriadeľa. Pre množstvo prevodových mechanizmov by však presnosť takéhoto odmeriavania nebola postačujúca. Z tohto dôvodu boli snímače implementované priamo do väzieb.

Vybraný bol merací systém RESOLUTE od firmy RENISHAW, ktorý umožňuje absolútne odmeriavanie polohy. Jedná sa o bezkontaktné snímače založené na fotoelektrickom princípe. Merací systém sa do istej miery dokáže vysporiadať aj s miernym znečistením stupnice. Odosielané dáta navyše prechádzajú kontrolou, aby sa predišlo potenciálnym chybám. Prstencový tvar sa ľahko integruje do rotačných väzieb, nie je teda nutné radikálne meniť konštrukciu. Optika zaisťuje toleranciu vybočenia, sklonu a naklonenia  $\pm 0,5^\circ$  a toleranciu výšky dráhy pohybu  $\pm 0,5 \mu\text{m}$ . Zariadenie je schopné komunikovať s riadiacim systémom zvolených motorov a jeho presnosť je pre naše potreby dostačujúca.



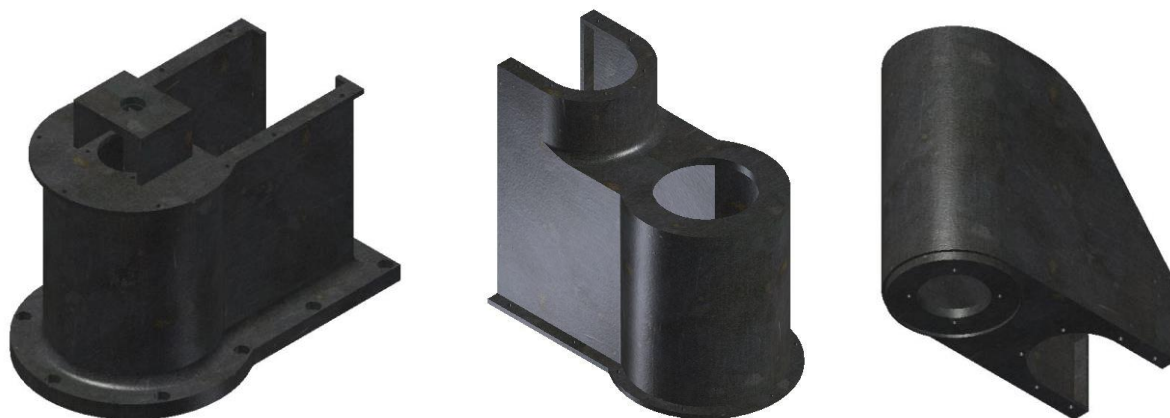
Obrázok 31: Prstencové prevedenie absolútneho snímača [14]

## 5.9 Prívod káblov

Spočiatku bola snaha viesť kabeláž vnútrom ramien. Táto snaha však komplikovala konštrukčný návrh celého robota. Vyžadovalo použitie rozmernejších dutých remeníc a hriadeľov v osách C a C'. Zásadný problém bol v tom, že takto vedené káble prispievali k robustnosti ramien (najmä výška osi C') a konštrukčnej zložitosti. Po zhodnotení kladov a záporov, ktoré vedenie káblov ramenami obnáša, bolo rozhodnuté, že sa konštrukcia ponechá čo najkompaktnejšia a káble budú vedené zvonka priamo do ramena 2.

## 5.10 Konštrukčné prevedenie

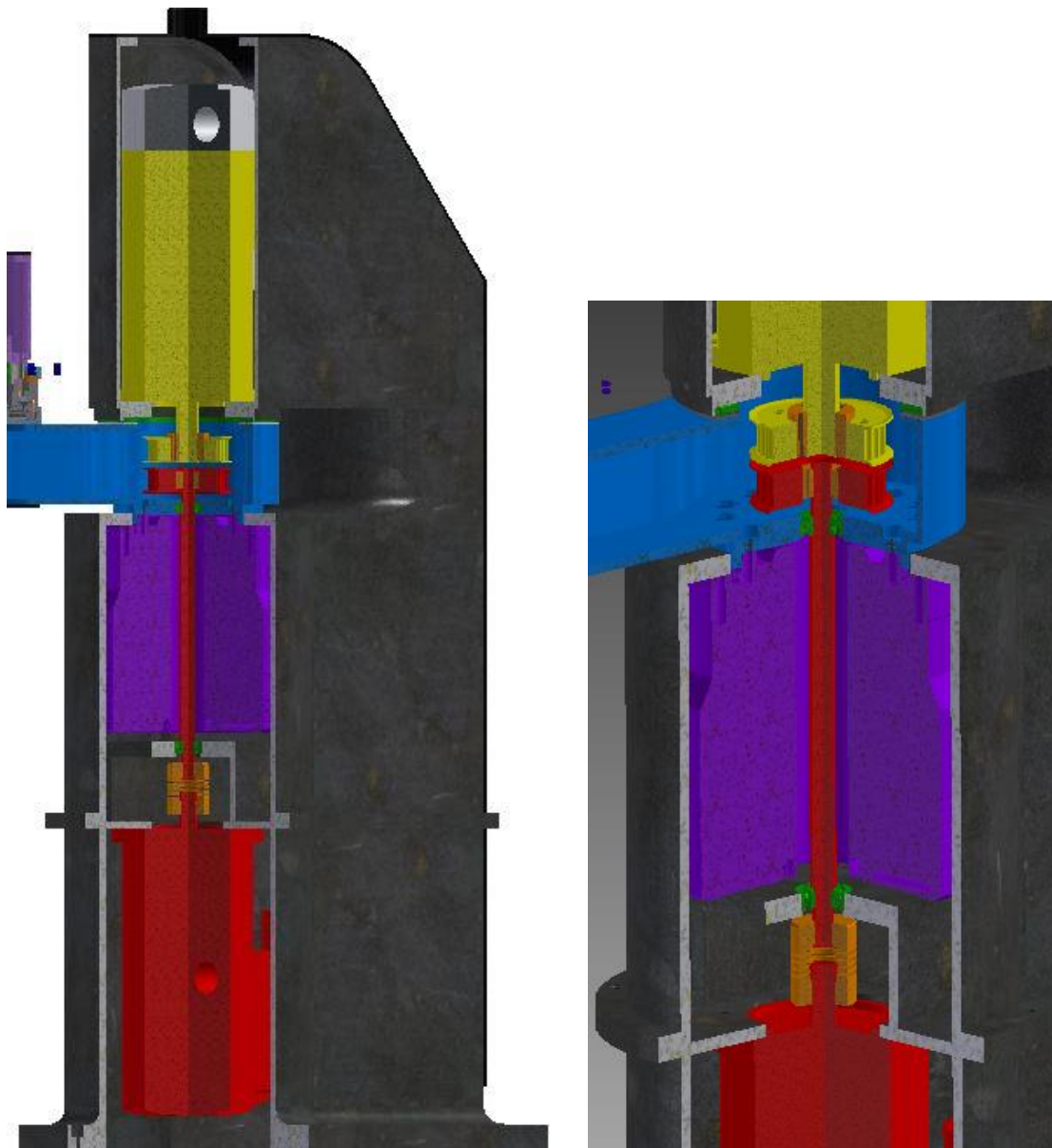
Základňa robota sa skladá z troch častí, ktoré sú spojené skrutkovými spojmi. Bolo to nutné z hľadiska prevedenia montáže, keďže motory sú na základni uložené pod sebou v jednej ose.



Obrázok 32: Časti z ktorých pozostáva základňa (zľava: Z1, Z2, Z3)

Motor M1 poháňajúci osu C je pripojený k prírubu základni Z2 a k ramenu R1. Jeho stredom vedie hriadeľ, uložený vo dvoch ložiskách. Jedno z nich je umiestnené v uložení vrchnej príruby základni Z1, druhé v ramene R1. Ložiská sa predopnú priskrutkovaním základni Z1 k základni Z2. Hriadeľ je spojený s hriadeľom motora osi Z (M3) pomocou pružnej spojky. Tá kompenzuje nesúososť oboch hriadeľov a plní funkciu poistky pri preťažení. S remenicou R31 je hriadeľ spojený pomocou pružnej hriadeľovej spojky.

Motor osi C' (M2) je pevne spojený so základňou Z3. Na jeho hriadeľi je pomocou zvernej spojky uchytená ozubená remenica R21. Priskrutkovaním základni Z3 k základni Z2 sa motor ustaví do polohy a zároveň sa vymedzí vôľa axiálneho ložiska medzi ramenom R1 a základňou Z3.

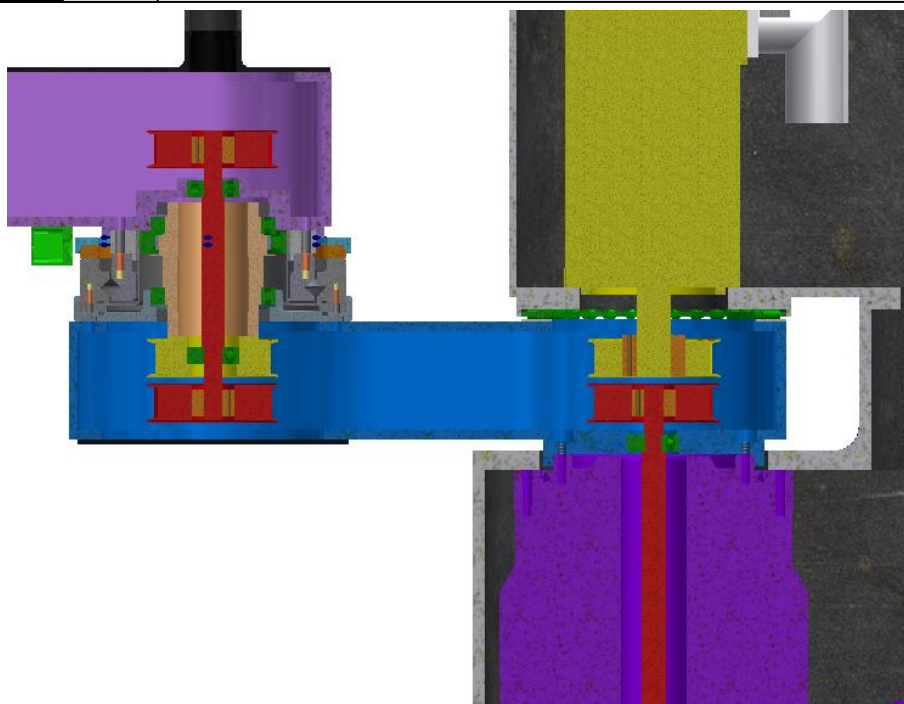


Obrázok 33: Uloženie motorov na základni

(červenou: motor M3, hriadeľ, remenica R31; oranžovou: pružná spojka, zverné spojky; zelenou: ložiská; fialovou: motor M1; modrou: rameno R1; žltou: motor M2, zosrodu navrch: Z1, Z2 a Z3)

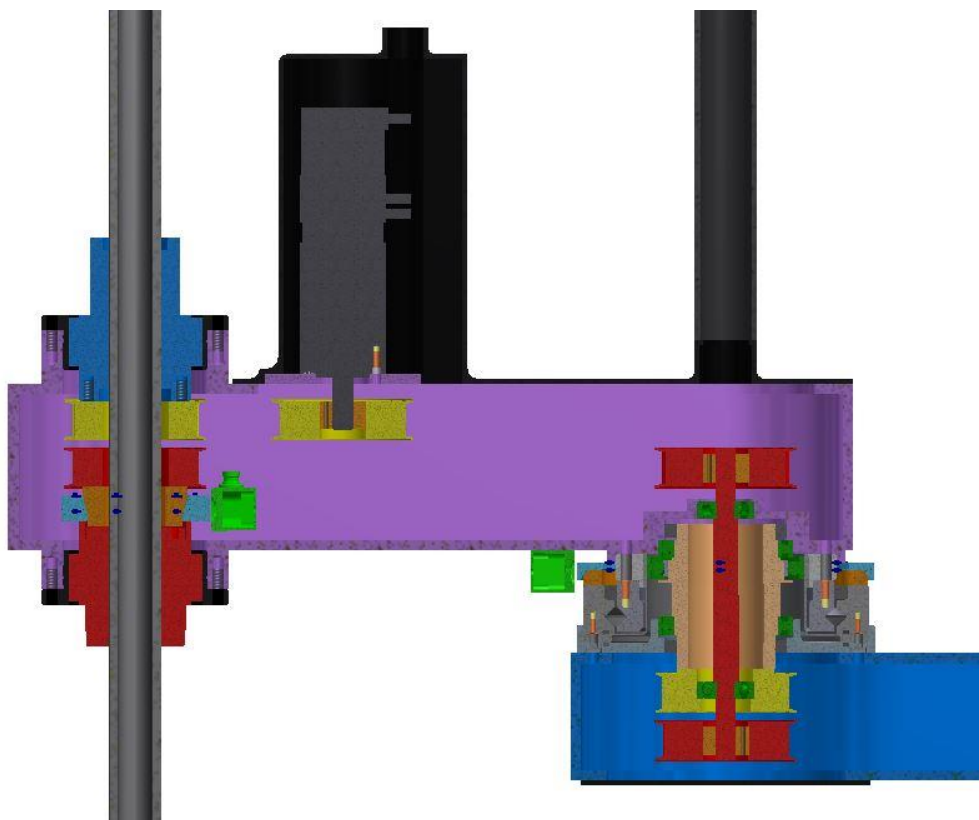
Prenos výkonu z motora M2 zabezpečuje ozubený remeň, ktorý spája remenice R21 a R22. Druhá spomínaná remenica je pripojená k vstupnej prírubu harmonickej prevodovky. V prevodovke sa redukujú otáčky motora a cez výstupnú prírubu sa ďalej prenášajú na rameno R2 (na Obrázku 34 bledofialovou). Stredom reduktora vedie hriadeľ, prenášajúci výkon z motora M3. Na ňom sú upevnené remenice R32 a R33 (zdola nahor) opäť pomocou zverných spojok. Hriadeľ je uložený v ložiskách, ktoré sa nachádzajú v remenici R22 a ramene R2. Predopnuté sú priskrutkovaním remenice R22 na vstupnú prírubu reduktora.





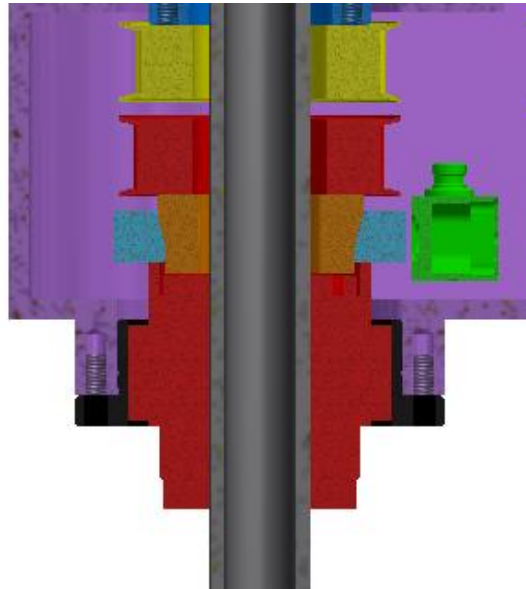
Obrázok 34: Prevedenie osi C'

Rez ramenom R2 je zobrazený na Obrázku 35. Výkon motora M3 vedie ďalej pomocou ozubeného remeňa na remenicu R34. Tá je cez distančný člen upevnená na maticu guľčkovej skrutky, ktorá je zodpovedná za lineárny posuv v ose Z. Orientáciu výstupnej hlavice zabezpečuje motor M4, ktorého je výkon prenášaný ozubeným remeňom a maticami R41 a R42 na maticu vodiaceho hriadeľa. Tá slúži aj ako vedenie guľčkovej skrutky.



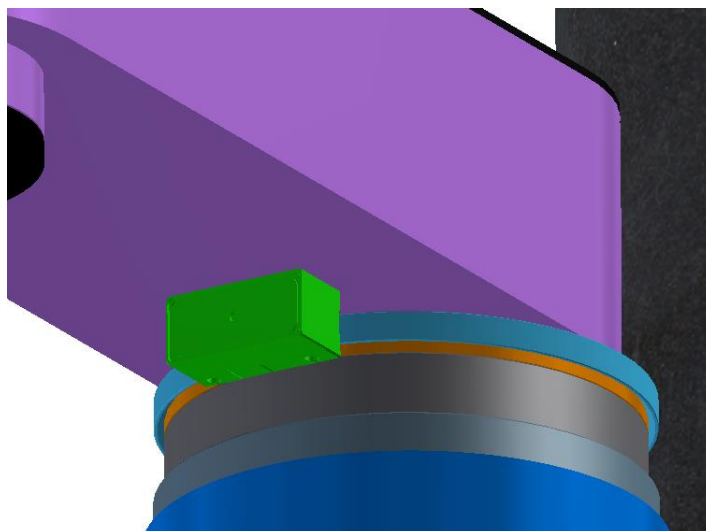
Obrázok 35: Rez ramenom R2

Odmeriací systém bol implementovaný do rotačných častí vo forme absolútnej stupnice prstencovitého tvaru a čítacej hlavy. Aby bolo možné snímače upevniť, bolo potrebné vytvoriť medzikusy. Snímač osi Z sa upína pomocou tvarového spoju. Kuželovitá časť distančného člena je vťahovaná do prstenca. Sila je vyvodzovaná uťahovaním skrutiek, spájajúcich remenicu R34 a maticu guľicovej skrutky. Čítacia hlava je stacionárna, pripevnená k ramenu R2.



Obrázok 36: Upevnenie odmeriavania osi Z  
(tyrkysovou: prstenc so stupnicou; zelenou: čítacia hlava; oranžovou: distančný člen; červenou: matica guľicovej skrutky a remenica R34)

Odmeriavanie osi C' je pripevnené na vyrobenom medzikuse skrutkovým spojom. Prstenc je umiestnený na ramene R1 a čítacia hlava na ramene R2, čím je možné snímať vzájomné natočenie ramien. Prívod čítacej hlavy je riešený otvorom v ramene R2.



Obrázok 37: Odmeriavanie vzájomného natočenia ramien R1 a R2 - pohľad zospodu

Zväzok káblov k motoru M4, snímačom a výstupnej hlavici je vedený z vonkajšej strany, pomocou na to určených plastových trubíc. Tie sú dostatočne pružné, aby sa dokázali vysporiadať s rýchlymi pohybmi ramien, a zároveň zabraňujú zamotaniu káblov. Pripájajú sa

na plastové kryty základni Z3 a ramena R2. Prípoj na rameno R2 je umiestnený v ose rotácie. Do dutého hriadeľa guľčikovej skrutky je prívod riešený tiež pomocou plastovej trubice, ktorá sa uchytí na vrchnej prírubе skrutky.



Obrázok 38: Plastová trubica a kryt motoru M4 s vývodom pre káble



## 6 ZÁVER

Cieľom práce bolo vytvoriť návrh priemyselného robota typu SCARA. V úvode bolo jasne definované, čo to robot je a aké špecifiká má priemyselný robot. Ďalej bol prevedený popis kinematických štruktúr priemyselných robotov a ich konštrukčných uzlov. Na základe prevedeného prieskumu trhu boli stanovené požadované parametre. Návrh bol silne podporený výpočtami. Záverom bol vytvorený 3D model robota.



Obrázok 39: Finálna podoba konštruovanej SCARY



## 7 ZOZNAM POUŽITÝCH ZDROJOV

- [1] HAVEL, I.M.: Robotika. Úvod do teorie kognitivních robotů. SNTL, Praha, 1980
- [2] KOLÍBAL CSC., Prof. Ing. Zdeněk. *PRŮMYSLOVÉ ROBOTY*. Brno, 2014. Základní učební text. Vysoké učení technické v Brně.
- [3] *FAST picker TP80 robot* [online]. 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.staubli.com/cz/robotics/6-axis-scara-industrial-robot/low-payload-6-axis-scara-robot/tp80/>
- [4] SEMJON, Ján, Rudolf JÁNOŠ a Marek VAGAŠ. *PRESNÉ Polohovacie reduktory a aktuátory v pohonoch robotov*. Technická univerzita v Košiciach. Košice, 2015. ISBN 978-80-553-2501-9.
- [5] Das Fachmedium der TGA-Branche: EC-Motoren auf dem Vormarsch. *Das Fachmedium der TGA-Branche* [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: [http://www.tab.de/artikel/tab\\_Ventilatortechnik\\_2.0\\_1380933.html](http://www.tab.de/artikel/tab_Ventilatortechnik_2.0_1380933.html)
- [6] *Robot Italy* [online]. 2015 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.robot-italy.com/it/stepper-motor-unipolar-bipolar-200-steps-rev-57-76mm-4-5v-2-a-phase.html>
- [7] SKALICKÝ Csc., Prof. Ing. Jiří. *Elektrické servopohony*. Studijní text. Vysoké učení technické v Brně.
- [8] *Harmonic Drive AG: Harmonic Drive® Strain Wave Gears* [online]. 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://harmonicdrive.de/en/technology/harmonic-drive-strain-wave-gears/>
- [9] TWINSPIN. In: *SPINEA: Reduction gears* [online]. 2011 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.spinea.sk/products/twinspin/>
- [10] SVOBODA, Pavel, Jan BRANDEJS a František PROKEŠ. *Výběry z norem pro konstrukční cvičení*. Vyd. 4. Brno: CERM, 2011. ISBN 978-80-7204-751-2.
- [11] MAREK, Jiří. *Konstrukce CNC obráběcích strojů III*. Praha: MM publishing, s.r.o. ISBN 978-80-260-6780-1.
- [12] *SKF: Precision rolled ball screws* [online]. 2015 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.skf.com/group/products/linear-motion/ball-and-roller-screws/ball-screws/index.html>
- [13] *REM: Pohyb, pohony, převody* [online]. 2015 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.rem-technik.cz/pohyb-pohony-prevody/pohon-s-ozubenym-hrebenem/system-pridavneho-pastorku-zv-a-hrebenu-844.html>
- [14] *Electronic Tutorials: Hall Effect Sensor Principals* [online]. 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.electronics-tutorials.ws/electromagnetism/hall-effect.html>
- [15] Detection of rotation speed: Configuration examples. *ASAHI KASEI MICRODEVICES CORPORATION* [online]. [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: [http://www.akm.com/akm/en/product/add/magnetic\\_sensors/0029/](http://www.akm.com/akm/en/product/add/magnetic_sensors/0029/)
- [16] *Absolutní optický lineární a absolutní optický rotační (úhlový) snímací systém RESOLUTE* [online]. 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.renishaw.cz/cs/absolutni-opticky-linearni-a-absolutni-opticky-rotacni-uhlovy-snimaci-system-resolute--10852>
- [17] *IRB 910SC SCARA* [online]. 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://new.abb.com/products/robotics/industrial-robots/irb-910sc>

- [18] *TS40 SCARA robot* [online]. 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://www.staubli.com/cz/robotics/6-axis-scara-industrial-robot/low-payload-6-axis-scara-robot/ts40/>
- [19] *Řada HS - HS-4545\*G* [online]. 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <https://www.densorobotics-europe.com/cs/product/hs-4545g>
- [20] *Engineering Data: AC Servo Actuators CHA-C* [online]. Limburg, 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: [http://harmonicdrive.de/mage/media/catalog/category/ED\\_CHA\\_C\\_E\\_1019461\\_03\\_2016\\_V02.pdf](http://harmonicdrive.de/mage/media/catalog/category/ED_CHA_C_E_1019461_03_2016_V02.pdf)
- [21] *Engineering Data: HFUS-2A Component sets* [online]. Limburg, 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <http://harmonicdrive.de/en/products/component-sets/hfus-2a.html>
- [22] *ContiTech AG: Product information CONTI DRIVE SYSTEMS* [online]. 2016 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: [http://www.conti-drive-system.com/pages/downloads/downloads\\_en.html](http://www.conti-drive-system.com/pages/downloads/downloads_en.html)
- [23] *Linear-Rolling Motion Model BNS* [online]. 2015 [cit. 2016-05-27]. Dostupné z: <https://tech.thk.com/en/products/thkdlinks.php?id=360>



## 8 ZOZNAM OBRÁZKOV A TABULIEK

### 8.1 Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 .....	29
Tabuľka 2 .....	31
Tabuľka 3 .....	34
Tabuľka 4 .....	37
Tabuľka 5 .....	40

### 8.2 Zoznam obrázkov

Obrázok 1: Rozdelenie akčného systému priemyselných robotov [3].....	17
Obrázok 2: Tvar pracovného priestoru základných typov priemyselných robotov .....	17
Obrázok 3: Dve možnosti usporiadania typu RRT .....	18
Obrázok 4: Kinematická štruktúra robotov typu SCARA .....	18
Obrázok 5: TP80 „Fast picker“ - SCARA robot firmy STÄUBLI [4].....	19
Obrázok 6: Príklad umiestnenia pohonov .....	20
Obrázok 7: Rez EC motorom .....	21
Obrázok 8: Krokový motor .....	21
Obrázok 9: Planétová prevodovka .....	22
Obrázok 10: Harmonická prevodovka [7].....	23
Obrázok 11: Cykloidná prevodovka prešovskej firmy SPINEA [8].....	24
Obrázok 12: Matica guličkovej skrutky v reze .....	25
Obrázok 13: Pohon osi použitím pastorku a ozubeného hrebeňa .....	26
Obrázok 14: Princíp inkrementálneho odmeriavania magnetickým snímačom .....	27
Obrázok 15: Princíp snímania meracieho systému RESOLUTE .....	27
Obrázok 16: Komerčne dostupné SCARA roboty .....	28
Obrázok 17: Prvý variant .....	32
Obrázok 18: Schéma konceptu č.2.....	32
Obrázok 19: Závislosť pohybu ramien načrtnutá na papieri.....	33
Obrázok 20: Zrýchlenia v rovine XY.....	34
Obrázok 21: Pracovný cyklus motoru.....	36
Obrázok 22: Pracovná charakteristika motora zvoleného pre os C .....	37
Obrázok 23: Zvolený motor CHA-C 25 [7].....	37
Obrázok 24: Hodnoty účinného momentu a priemerných otáčok vynesené v pracovnej charakteristike motoru osi C'.....	39
Obrázok 25: Vybraný reduktor s integrovanými ložiskami pre os C' v reze .....	40
Obrázok 26: Stavba remeňov SYNCHROBELT .....	41
Obrázok 27: Prevedenie prvého variantu uloženia .....	42
Obrázok 28: Guličková skrutka s drážkami .....	42
Obrázok 29: Druhý variant, zobrazenie v reze.....	43
Obrázok 30: Pracovná charakteristika vybraného motoru M3 .....	44
Obrázok 31: Prstencové prevedenie absolútneho snímača .....	44

Obrázok 32: Časti z ktorých pozostáva základňa .....	45
Obrázok 33: Uloženie motorov na základni .....	46
Obrázok 34: Prevedenie osi C' .....	47
Obrázok 35: Rez ramenom R2.....	47
Obrázok 36: Upevnenie odmeriavania osi Z .....	48
Obrázok 37: Odmeriavanie vzájomného natočenia ramien R1 a R2.....	48
Obrázok 38: Plastová trubica a kryt motoru M4 s vývodom pre káble .....	49
Obrázok 39: Finálna podoba konštruovanej SCARY.....	49

## 9 ZOZNAM PRÍLOH

CD