



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 PRŮMYSLOVÉHO ROBOTU SE ŠESTI STUPNI VOLNOSTI

DESIGN OF AN INDUSTRIAL ROBOT WITH SIX DEGREES OF FREEDOM

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Ondřej Štefek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

| | |
|-------------------|--|
| Ústav: | Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky |
| Student: | Bc. Ondřej Štefek |
| Studijní program: | Výrobní stroje, systémy a roboty |
| Studijní obor: | bez specializace |
| Vedoucí práce: | doc. Ing. Radek Knoflíček, Dr. |
| Akademický rok: | 2023/24 |

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

Návrh průmyslového robotu se šesti stupni volnosti

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Při různých úkonech v průmyslu má zaměstnavatel na výběr lidskou, nebo strojní pracovní sílu. Někteří zaměstnavatelé progresivně žádají výrobu automatizovat, čímž nahrazují člověka v technologickém procesu výroby průmyslovým robotem. Zadání DP je řešeno ve spolupráci se společností ABB, s. r. o. v Mošnově.

Cíle diplomové práce:

Cílem je vypracovat detailní návrh průmyslového robotu se sériovou kinematickou strukturou, který bude po prototypové výrobě připraven pro implementaci do výroby a pro upevnění univerzálního koncového efektoru. Návrh se bude opírat o poznatky získané při stavbě první verze robotu na programovatelné vývojové desce Arduino. Robot bude dimenzován na celkovou nosnost 10 kg. DP bude obsahovat:

1. Rešerši v oblasti průmyslových robotů (typy, pohony, úchopné hlavice, energetická média).
2. Systémový rozbor řešené problematiky návrhu koncepce PR.
3. Analýza dostupných řešení koncepce a návrh dvou variant.
4. Vyhodnocení variant metodou multikriteriálního hodnocení.
5. Rozbor robotu z hlediska kinematiky a dynamiky
6. Vypracování konstrukční dokumentace (výkresy součástí, výkres sestavení, v případě realizace díla i fotografická dokumentace) a návrhu technologie výroby prototypu.
7. Návrh pohonů, schéma/zapojení elektrotechnické části.
8. Programování robotu.
9. Posouzení rizik dle EN ISO 12100
10. Cenová kalkulace navrženého řešení a porovnání finanční náročnosti realizace návrhu konstrukce s komerčně dostupnými roboty.
11. Kritické zhodnocení vlastního návrhu.
12. Závěr a doporučení pro praxi.

Seznam doporučené literatury:

KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně – nakladatelství VUT IUM, 2016, 787 stran: ilustrace (převážně barevné), portréty. ISBN 978-80-214-4828-5.

MAREK, J. a kol. Konstrukce CNC obráběcích strojů VI. Čtvrté vydání. Praha: MM publishing, s. r. o., 2018. ISBN- 978-80-606310-8-3.

SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS, VLK, Miloš (ed.). Konstruování strojních součástí. 1. vyd. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUT IUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 978-80-214-2629-0.

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

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá návrhem, výrobou a stavbou robotu se šesti stupni volnosti a sériovou kinematickou strukturou. V úvodu práce jsou přiblíženy jednotlivé druhy robotů, používané převodovky, energetická média a je zde nastíněn princip přímé a inverzní kinematiky robotů. V dalších kapitolách je rozebrán systémový přístup tvorby robotu, výběr optimální varianty a následně kinematika a dynamika robotu, která dále navazuje na princip tvorby odlitků, konstrukční uzly robotu a jeho elektrotechniku a programování řídicího systému. U pastorků a hřídele páté osy je provedena analýza bezpečnosti vzhledem k meznímu stavu pružnosti. Tento návrh robotu je pak finančně porovnán s komerčně dostupným průmyslovým robotem. Pro robot je, mimo další přílohy, vypracována výkresová dokumentace, schéma elektro zapojení a analýza bezpečnosti robotického pracoviště. Robot a navazující robotické pracoviště je fyzicky postaveno v dílnách Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky v Brně.

ABSTRACT

The diploma thesis deals with the design, production and construction of robots with six degrees of freedom and a serial kinematic structure. In the beginning of the thesis, the individual types of robots, used gearboxes, energy media are described, and the principle of direct and inverse robot kinematics is outlined here. In the next chapters, the system approach of the robot, the selection of the optimal variant of creation, and then the kinematics and dynamics of the robot, which further follows on from the principle of the creation of castings, the design nodes of the robot and its electrical engineering and the programming of the control system, are analyzed. For the pinions and the shaft of the fifth axis, a safety analysis is carried out with respect to the limit state of elasticity. This robot design is then financially compared with a commercially available industrial robot. For the robot, among other appendices, drawing documentation, an electrical wiring diagram and a safety analysis of the robotic workplace have been prepared. The robot and the related robotic workplace are physically built in the workshops of the Institute of Production Machines, Systems and Robotics in Brno.

KLÍČOVÁ SLOVA

Průmyslový robot, kinematika, dynamika, Ansys, MSC Adams, MKP, ePlan, analýza rizik

KEYWORDS

Industrial robot, kinematics, dynamics, Ansys, MSC Adams, FEM, ePlan, risk analysis

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ŠTEFEK, Ondřej. Návrh průmyslového robotu se šesti stupni volnosti. Brno, 2024. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky. Vedoucí práce Radek Knoflíček.

PODĚKOVÁNÍ

Na tomto místě bych chtěl poděkovat své přítelkyni, své rodině a všem, jež mě podporovali při studiu na vysoké škole. Zároveň bych zde chtěl poděkovat sponzorům, kteří mě podpořili a dodali potřebný materiál a prostředky pro uskutečnění této diplomové práce, hlavně pak Ing. Ivo Kratochvílovi z firmy ABB a Ing. Adamu Koncerovi z firmy Siemens. Speciální poděkování všem sponzorům je sepsáno za závěrem práce. Stejně tak bych chtěl poděkovat doc. Radku Knoflíčkovi a doc. Michalu Holubovi za pomoc a cenné rady při zpracovávání této práce.

ČESTNÉ PROHLÁŠ ENÍ

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

V Brně dne 24.5.2024

.....
Štefek Ondřej

OBSAH

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | ÚVOD | 17 |
| 2 | REŠERŠE V OBLASTI PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ | 19 |
| 2.1 | Robotizace a automatizace průmyslu | 19 |
| 2.2 | Dělení robotů..... | 20 |
| 2.3 | Typy úchopných hlavic | 22 |
| 2.3.1 | Technologické hlavice..... | 22 |
| 2.3.2 | Manipulační hlavice | 23 |
| 2.4 | Převodovky..... | 24 |
| 2.4.1 | Planetové převodovky | 24 |
| 2.4.2 | Cykloidní převodovky..... | 25 |
| 2.4.3 | Harmonické převodovky | 27 |
| 2.5 | Energetická média | 28 |
| 2.5.1 | Hydraulické pohony | 29 |
| 2.5.2 | Pneumatické pohony | 29 |
| 2.5.3 | Elektrické pohony | 30 |
| 2.6 | Kinematika robotů..... | 32 |
| 2.6.1 | Přímá kinematika..... | 32 |
| 2.6.2 | Inverzní kinematika..... | 36 |
| 3 | SYSTÉMOVÝ ROZBOR PROBLEMATIKY | 39 |
| 3.1 | Analýza problematiky | 39 |
| 3.2 | Formulace problematiky..... | 39 |
| 3.3 | Cíle práce..... | 39 |
| 3.4 | Popis řešené soustavy | 39 |
| 3.5 | Výběr a znázornění reprezentativních parametrů..... | 40 |
| 3.6 | Systém podstatných veličin | 40 |
| 4 | ANALÝZA DOSTUPNÝCH ŘEŠENÍ KONCEPCE A NÁVRH VARIANT .. | 43 |
| 4.1 | Verze 1..... | 44 |
| 4.2 | Verze 2..... | 45 |
| 4.3 | Verze 3..... | 45 |
| 4.4 | Verze 4..... | 46 |
| 5 | VYHODNOCENÍ VARIANT METODOU MULTIKRITERIÁLNÍHO HODNOCENÍ | 47 |
| 5.1 | Výsledky metody multikriteriálního hodnocení | 50 |
| 6 | ROZBOR ROBOTU Z HLEDISKA KINEMATIKY A DYNAMIKY | 51 |
| 6.1 | Kinematika robotu | 51 |
| 6.2 | Dynamika robotu a pevnostní výpočet odlitků..... | 54 |
| 7 | KONSTRUKCE A NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY PROTOTYPU ROBOTU | 59 |
| 7.1 | Konstrukce robotu | 59 |
| 7.1.1 | Konstrukční uzly robotu..... | 61 |
| 7.2 | Výroba prototypu robotu | 64 |
| 7.2.1 | Odlitky..... | 64 |
| 7.2.2 | Obrobky..... | 67 |
| 8 | VÝPOČTOVÁ ČÁST | 71 |
| 8.1 | Kontrola navržených motorů..... | 71 |

| | | |
|-----------|---|------------|
| 8.2 | Pastorky | 73 |
| 8.3 | Hřídel páte osy | 75 |
| 8.3.1 | Kontrola koncentrátoru napětí | 79 |
| 9 | ELEKTROTECHNIKA ROBOTU | 83 |
| 9.1 | Výběr motorů | 83 |
| 9.2 | Elektrické komponenty v rozvaděči..... | 84 |
| 9.2.1 | Hlavní vypínač | 84 |
| 9.2.2 | Pojistky | 84 |
| 9.2.3 | Jističe..... | 85 |
| 9.2.4 | Zdroj..... | 85 |
| 9.2.5 | Frekvenční měnič..... | 86 |
| 9.2.6 | Tlumivka a smart line modul (SLM) | 86 |
| 9.2.7 | Drive controller (CPU) | 87 |
| 9.3 | Bezpečnostní (safety) komponenty | 88 |
| 9.3.1 | Stykače..... | 88 |
| 9.3.2 | Bezpečnostní PLC..... | 88 |
| 9.3.3 | Souhlasné povelové zařízení..... | 89 |
| 9.3.4 | Bezpečnostní zámek..... | 89 |
| 9.4 | Chlazení rozvaděče | 90 |
| 10 | PROGRAMOVÁNÍ ROBOTU..... | 91 |
| 11 | POSOUZENÍ RIZIK DLE EN ISO 12100 | 95 |
| 12 | VYČÍSLENÍ NÁKLADŮ NA PROJEKT A POROVNÁNÍ S KOMERČNĚ DOSTUPNÝMI ROBOTY..... | 99 |
| 13 | ZHODNOCENÍ NÁVRHU | 101 |
| 14 | ZÁVĚR | 103 |
| 14.1 | Speciální poděkování | 104 |
| 15 | SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ..... | 105 |
| 16 | SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK | 111 |
| 16.1 | Seznam zkratk a symbolů..... | 111 |
| 16.2 | Seznam obrázků | 113 |
| 16.3 | Seznam tabulek | 115 |
| 17 | SEZNAM PŘÍLOH | 117 |

1 ÚVOD

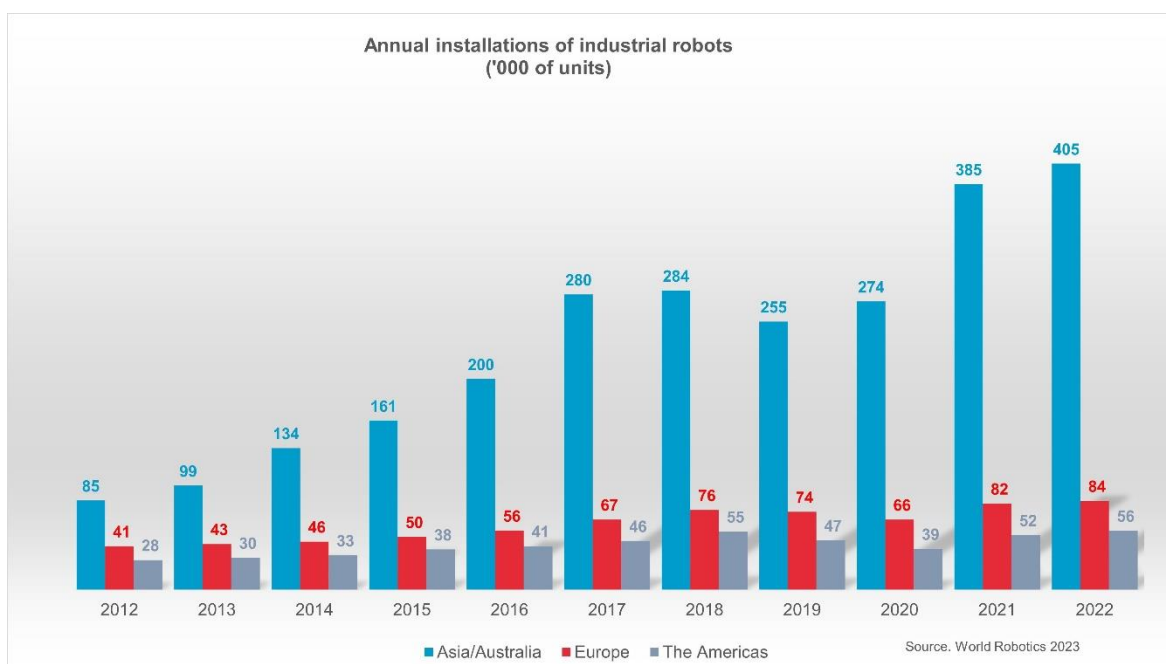
Člověk, nebo robot? To je otázka, kterou si pokládá mnoho zaměstnavatelů. Firmy na celém světě se snaží redukovat náklady na lidskou práci, zvyšovat kvalitu a flexibilitu svých výrob a toho dosahují díky robotizaci a automatizaci svých procesů. Tato práce se zaměřuje na jeden z nejdůležitějších aspektů automatizace a flexibility výroby, na průmyslový robot. Cíl této diplomové práce je navržení průmyslového robotu se šesti stupni volnosti a se sériovou kinematickou strukturou, tedy klasické robotické rameno. Hlavním záměrem této diplomové práce je komplexně pojmout celý návrh robotu a navazujícího pracoviště a robot nejen navrhnout, ale i postavit. Počínaje výběrem vhodné varianty řešení, přes konstrukci jednotlivých odlévaných částí, návrh elektrotechniky a řídicího hardwaru a softwaru robotu, přes zajištění výroby dohromady 42 dílců, obstarání nakupovaných částí, včetně nemalých finančních prostředků na úhradu a realizaci, a konče kompletací prototypu z hlediska mechanické i elektro části. Finálním krokem je uvedení do provozu a vyladění robotického pracoviště z hlediska bezpečnosti, tedy aplikací vhodných bezpečnostních prvků. Robot bude do budoucna zůstat na univerzitě a bude použit jako studijní pomůcka studentům pro ujasnění některých návazností mezi jednotlivými obory obsaženými ve stavbě robotu. Hlavně pak mezi elektrickým zapojením, programováním robotu a strojní bezpečností, dále ale také například mezi simulacemi (pevnostní analýzou) odlitků a výslednou mechanikou. Dalším důvodem vzniku této práce jsou, kromě výukových účelů, i výzkumné účely Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky (ÚVSSR). Jelikož je tento robot svým řízením na systému SIMATIC od firmy Siemens jedinečný, je možno jej porovnávat s řízením robotických ramen od renomovaných výrobců průmyslových robotů.

2 REŠERŠE V OBLASTI PRŮMYSLOVÝCH ROBOTŮ

V této kapitole bude popsáno základní dělení robotů. Budou zde zmíněny typy úchopných hlavic, typy pohonů robotů, používané převodovky a energetická média. Zároveň zde budou popsány i základní principy výpočtů kinematiky u průmyslových robotů.

2.1 Robotizace a automatizace průmyslu

Obecně je možno říct, že automatizace a robotizace je, stále rostoucím trendem. Toto tvrzení lze i doložit daty. Jak je možno vidět na Obr. 1, meziroční počet instalovaných robotů je rok od roku větší, v asijských zemích oproti roku 2012 dokonce čtyřnásobný. V roce 2022 byl počet instalovaných robotů zhruba půl miliónu, což je 31% navýšení oproti roku 2021. [1][2]



Obr. 1 Počet instalovaných robotů (2012-2022) [2]

Dle dat je Asie nejrobotizovanějším regionem světa. V roce 2021 bylo nasazeno 74 % všech robotů právě v Asii, konkrétně zde vede Čína, Japonsko a Korejská republika. Obecně se předpokládá, že robotizace a automatizace v příštích letech poroste přibližně o 7 % za rok. [1][2]

Právě poslední dvě zmíněné země patří obecně mezi nejrobotizovanější státy světa, společně se Singapurem. Hustota robotizace, která je měřena jako počet instalovaných robotů na 10 000 zaměstnanců, v jednotlivých státech je zobrazena v Tab. 1.

Tab. 1 Počet instalovaných robotů na 10 000 zaměstnanců [3]




| Země | Počet instalovaných robotů na 10 000 zaměstnanců |
|--------------------|--|
| Korejská republika | 932 |
| Singapur | 605 |
| Japonsko | 390 |
| Německo | 371 |
| Švédsko | 289 |
| ... | |
| Česká republika | 162 |
| Světový průměr | 126 |

2.2 Dělení robotů

Roboty je možno dělit podle mnoha faktorů. První možností, jak roboty dělit, je podle počtu stupňů volnosti. Rozdělení je přibliženo pod tímto odstavcem, přičemž jednotlivé reprezentanty je možno vidět v Tab. 2. [4]

1. Univerzální robot – se šesti stupni volnosti, které jednoznačně vymezují polohu a orientaci v kartézském souřadném systému
2. Redundantní robot – s více než šesti stupni volnosti, většinou mají více stupňů volnosti k překonání překážek
3. Deficitní robot – s méně než šesti stupni volnosti, klasicky např. SCARA roboty, které provádějí montáž prvků v rovině




Tab. 2 Dělení robotů podle počtu stupňů volnosti [5][6][7]

| Typ robotu | Univerzální robot | Redundantní robot | Deficitní robot |
|------------|---|---|--|
| |  |  |  |
| Popis | ABB – IRB 6700 | FANUC – R 1000iA/120F-7B | KUKA – KR 6 R500 Z200 SCARA |

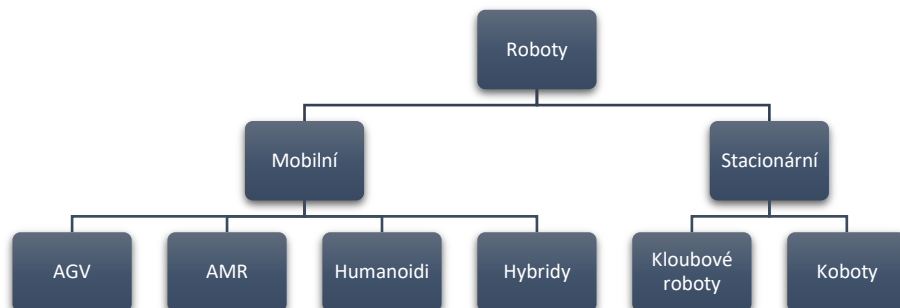
Druhou možností, jak roboty dělit, je podle jejich kinematické struktury, reprezentanti jsou opět znázorněni v tabulce níže - Tab. 3. [8]

1. Sériové roboty (Open chain manipulator) – otevřený kinematický řetězec – klasický šestiosý robot
2. Paralelní roboty (Closed chain manipulator) – uzavřený kinematický řetězec – např. „delta“ roboty
3. Hybridní roboty – kombinace obou typů řetězců – většinou paletizační roboty

Tab. 3 Dělení robotů podle kinematické struktury [9][10][11]

| Typ robotu | Sériový robot | Paralelní robot | Hybridní robot |
|------------|--|--|--|
| |  |  |  |
| Popis | YASKAWA – GP 88 | FANUC – M-3iA/6A | ABB – IRB 670 |



Další, a zcela jistě ne poslední, možností, jak dělit roboty, je podle jejich pohybu v prostředí. Toto rozdělení je možno vidět na Obr. 2. [12]



Obr. 2 Rozdělení robotů podle pohybu v prostředí [12]

V Tab. 4 jsou uvedeny příklady AGV (Automated guided vehicle) a kobotu.

Tab. 4 Příklady robotů dle pohybu v prostředí [13][14]

| Typ robotu | AGV | Kobot |
|------------|---|--|
| |  |  |
| Popis | ABB/ASTI – UniBOT, BidiBOT | ABB - YuMi |

Tato práce se zabývá stavbou průmyslového robotu se šesti stupni volnosti, tedy univerzálního kloubového robotu se sériovou strukturou.

2.3 Typy úchopných hlavic

Úchopnou hlavicí se myslí nástroj (akční člen) na konci robotického ramena, který slouží k manipulaci nebo jiné interakci s dalšími objekty. Tyto hlavice lze dělit podle operace, kterou vykonávají, na: [15][16]

1. Technologické
2. Manipulační
3. Kombinované
4. Speciální

Většinou se v angličtině označují jako „end effector“, neboli „koncový efektor“.

2.3.1 Technologické hlavice

Tento typ koncového efektoru je většinou používán pro operace vypsane níže, přičemž ukázky svařovacích kleští a efektoru pro leštění ploch je možno vidět v Tab. 5:

1. Svařování – buďto obloukové, nebo bodové
2. Lakování (stříkání ochranných nátěrových hmot)
3. Obrábění
4. Montážní práce
5. Lepení
6. Kontrolní operace

Tab. 5 Typy technologických hlavic [17][18]

| Typy hlavic | Svařovací kleště pro bodové svařování | Koncový efektor pro leštění ploch |
|-------------|---|--|
| |  |  |

2.3.2 Manipulační hlavice

Slouží k tzv. Pick&Place aplikacím, tedy aplikacím, kde hlavice objekt uchopí, přemístí a následně položí pro další manipulaci. Části hlavic, které objekt uchopují, se označují jako „úchopné prvky“. Podle druhu úchopného prvku se tyto hlavice rozdělují na: [15][16]

1. Mechanické
2. Magnetické
3. Podtlakové

Současně je úchopné prvky možno dělit na pasivní a aktivní, toto rozdělení je možno vidět v Tab. 6.

Tab. 6 Typy manipulačních hlavic [15]

| Manipulační hlavice | Typ | Popis |
|---------------------|---------|--------------------------------------|
| Mechanické | Pasivní | |
| | Aktivní | Pneumotor, hydromotor, elektromagnet |
| Magnetické | Pasivní | Permanentní magnet |
| | Aktivní | Elektromagnet |
| Podtlakové | Pasivní | Deformační přísavky |
| | Aktivní | S vývěvou, S ejektorem |

V Tab. 7 je možno vidět některé příklady manipulačních hlavic.

Tab. 7 Typy manipulačních hlavic [19][20]

| Typy hlavic | S elektromagnetem, ovládáno vzduchem | Podtlakový gripper |
|-------------|---|--|
| |  |  |

2.4 Převodovky

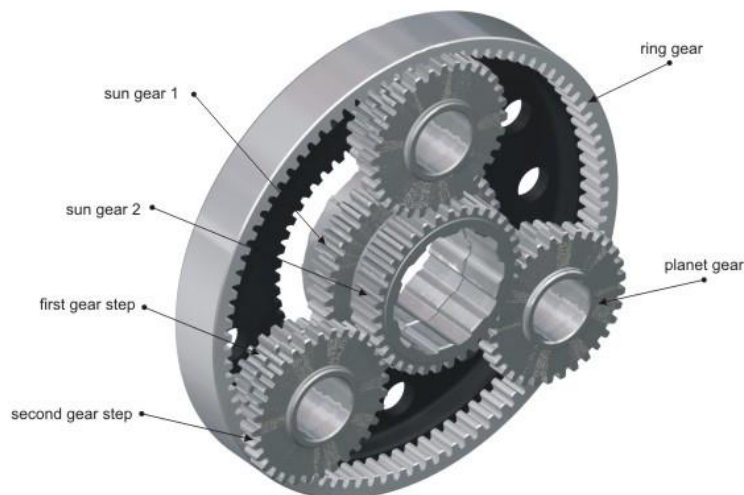
Na převodovky jsou u průmyslových robotů kladeny vysoké nároky, které spočívají především v: [15]

1. Co nejmenší vůli – myšlena je zde vůle v ozubení, v angličtině „backlash“
2. Co nejkompaktnějším designu
3. Vysoké účinnosti
4. Co nejmenší hmotnosti

Tyto nároky jsou velmi těžko dosažitelné použitím klasických převodovek a tedy jsou v robotice se používány převodovky cykloidní, harmonické, nebo planetové. Ve většině aplikací však převažuje použití cykloidních a harmonických převodovek.

2.4.1 Planetové převodovky

Klasická planetová převodovka se skládá ze tří částí, a to z centrálního kola, korunového kola a satelitů (planet). Aby se jednalo o planetový převod, musí být spojeno s rámem buďto centrální kolo, nebo korunové kolo. Pokud by byly všechny tři členy volné, nejednalo by se o planetový převod, ale o diferenciál. Na Obr. 3 je možno vidět schéma planetové převodovky. [15]



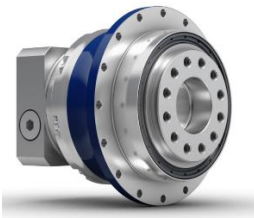

Obr. 3 Schéma planetové převodovky [21]

Kde:

| | |
|-------------|----------------|
| Planet gear | Planetové kolo |
| Sun gear | Centrální kolo |
| Ring gear | Korunové kolo |

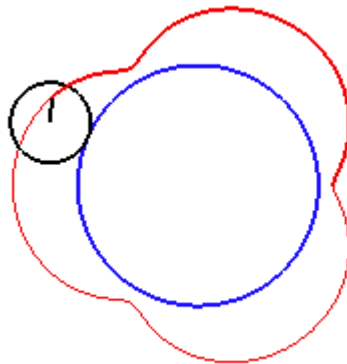
Mezi nejznámější prodejce vysoce přesných planetových převodovek patří např. německá firma Wittenstein alpha, nebo česká firma APEX Dynamics. Tyto převodovky se obvykle vyznačují přesností s vůlí od 1 do 5 úhlových minut (anglicky ‚arcmin‘, 1 úhlová minuta se rovná 1/60 stupně). V Tab. 8 je možno vidět planetové převodovky od zmíněných renomovaných výrobců.

Tab. 8 Výrobci planetových převodovek [22][23]

| Výrobce | Wittenstein alpha | APEX Dynamics |
|----------------------|---|---|
| Planetová převodovka |  |  |

2.4.2 Cykloidní převodovky

Na podobném principu jako planetové převodovky fungují také převodovky cykloidní. Cykloidní převodovka se skládá z několika hlavních částí. Hlavní částí cykloidních převodovek je cykloidní disk a válečky, po kterých se cykloidní disk odvaluje. Cykloidní disk je geometricky odvozen od epicykloidy, respektive její varianty, epitrochoidy. Epitrochoida (Obr. 4) je křivka, která vzniká pohybem bodu spojeného s kružnicí, která se pohybuje okolo základní kružnice. [24]



Obr. 4 Epitrochoida [24]

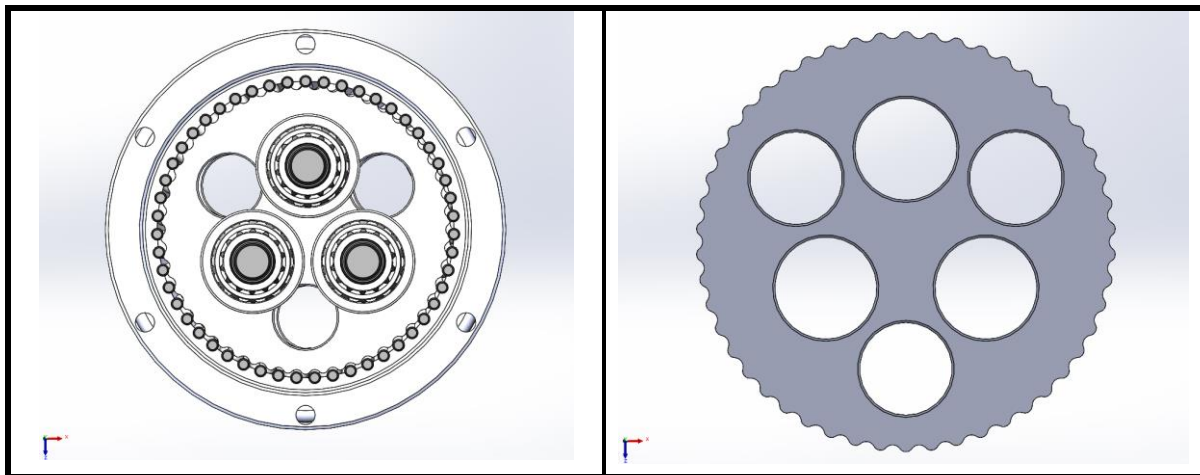
Tato křivka je matematicky popsatelná rovnicí (1).

$$\begin{aligned}
 X &= R \cos(\theta) - R_r \cos(\theta - \psi) - E \cos(N\theta) \\
 Y &= -R \sin(\theta) + R_r \sin(\theta - \psi) + E \sin(N\theta)
 \end{aligned}
 \tag{1}$$

Kde:

| | | |
|-------|------|--------------------------|
| X | [mm] | Souřadnice X |
| Y | [mm] | Souřadnice Y |
| R | [mm] | Poloměr díry pro válečky |
| E | [mm] | Excentricita hřídele |
| R_r | [mm] | Poloměr válečků |
| N | [-] | Počet válečků |

Na Obr. 5 je zobrazeno cykloidní kolo, jehož tvar vychází z křivky v rovnici (1). Dále je na Obr. 5 také ukázáno zasazení cykloidního kola do zbytku převodovky. Design této převodovky vychází z převodovek od společnosti Nabtesco, která je světovým lídrem v prodeji těchto převodovek.

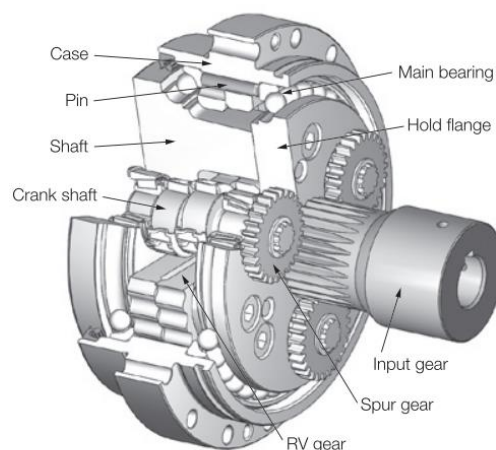


Obr. 5 Cykloidní disk

Cykloidní převodovky společnosti Nabtesco

Společnost Nabtesco je japonská společnost založena v roce 2003. Této společnosti patří přibližně 60 % světového trhu cykloidních převodovek, ty dodávají hlavně výrobcům průmyslových robotů. Jejich hlavním produktem jsou převodovky s označením RV, které fungují ve dvou etapách. Prvně je krouticí moment přiveden přes pastorek na „planetová“ ozubená kola, zde se již znásobí převodový poměr. Následně se pokračuje cykloidním převodem. Tento převod zajišťují dva disky, které jsou proti sobě otočeny o 180° . Excentrický pohyb tří hřídelí, na který je přiveden krouticí moment z pastorku, pak zajišťuje záběr (odvalování) cykloidních kol po válečcích. Celkový převodový poměr je pak stanoven dle rovnice (2). Řez cykloidní převodovkou typu RV-N je možno vidět na Obr. 6. [25][26]

Společnost Nabtesco udává, že jejich převodovky mají vůli menší než 1 úhlovou minutu. [27]



Obr. 6 Řez cykloidní převodovkou RV-N [26]

$$i_{celk} = \frac{Z_2}{Z_1} \cdot Z_4 \quad (2)$$

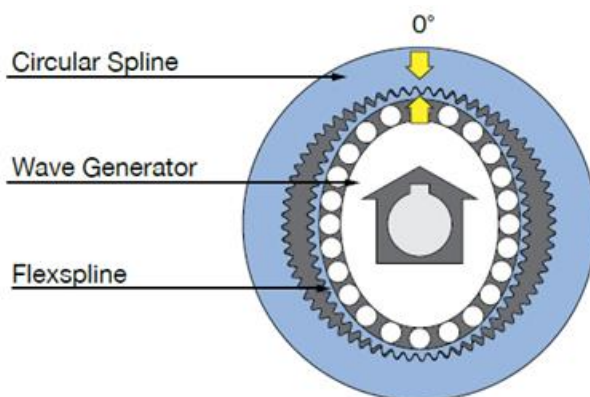
Kde:

| | | |
|------------|-----|-----------------------------|
| i_{celk} | [-] | Celkový převodový poměr |
| Z_1 | [-] | Počet zubů pastorku |
| Z_2 | [-] | Počet zubů planetového kola |
| Z_4 | [-] | Počet válečků |

2.4.3 Harmonické převodovky

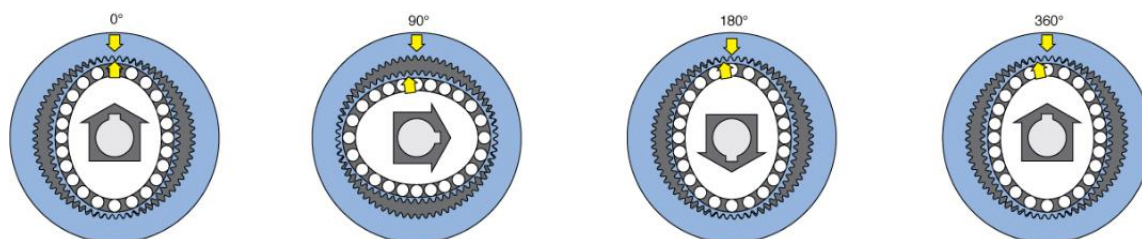
Harmonické převodovky jsou nejmodernějším typem reduktorů. Pro svou funkci využívají flexibility materiálů. Jsou složeny ze tří hlavních částí, které jsou ukázány na Obr. 7, a to jsou: [28]

1. Generátor vln (Wave generator)
2. Pružný člen (Flexspline)
3. Vnitřní prsteneček (Circular spline)



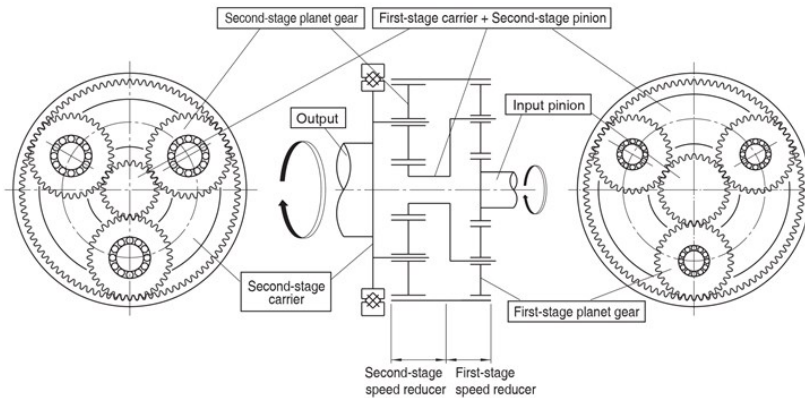
Obr. 7 Části harmonické převodovky [28]

Pružný člen je o něco menší v průměru než vnitřní prsteneček a má o dva zuby méně. Díky eliptickému provedení generátoru vln spolu zabírají pružný člen a vnitřní prsteneček na dvou místech. Při každé dokončené otáčce generátoru vln po směru hodinových ručiček se pružný člen posune proti směru hodinových ručiček o dva zuby ze svého původního místa. Znázornění tohoto principu je na Obr. 8. [28]



Obr. 8 Otáčení harmonické převodovky [28]

Stejně jako u cykloidních převodovek je zde možnost dvoufázového převodu, jehož princip je možno vidět na Obr. 9. [28]



Obr. 9 Dvoufázový převod harmonické převodovky [28]

Největším výrobcem těchto převodovek je společnost HarmonicDrive. Tento typ převodovky je díky své konstrukci oproti ostatním typům převodovek bezvúlový, má přesnost 1 úhlovou minutu a opakovatelnost ± 5 úhlových vteřin. Je tak možno říci, že tento typ převodovky je nejpřesnější. [29]

2.5 Energetická média

Energetická média působící na jednotlivé osy robotů jsou:

1. Hydraulické
2. Pneumatické
3. Elektrické

V Tab. 9 jsou sepsány výhody a nevýhody jednotlivých druhů pohonů.

Tab. 9 Výhody a nevýhody jednotlivých druhů pohonů [15][30]

| | Výhody | Nevýhody |
|--------------------|--|---|
| Hydraulické pohony | -velká účinnost a spolehlivost -vysoká tuhost -možnost dosažení malých rychlostí a vysokých sil bez převodů | -potřeba samostatného a odděleného energetického bloku -hořlavost kapalin -změna viskozity na základě teploty |
| Pneumatické pohony | -využití vakua pro uchopovací hlavice (manipulace materiálu) -čistota provozu (vhodné pro potravinářství) -rychlost a možnost práce v prostředí s nebezpečím výbuchu | -vysoké náklady na stlačený vzduch -malá tuhost |
| Elektrické pohony | -dobrá říditelnost pomocí snímání stavových veličin -malá náročnost na údržbu, snadná vyměnitelnost | -je potřeba převod pro dosažení vyšších momentů -závislost na přívodu elektrické energie |

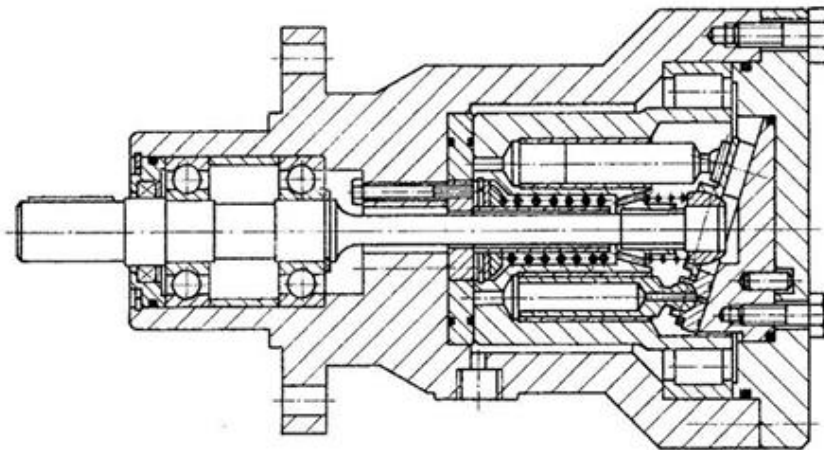
Jelikož tato diplomová práce nemá za cíl porovnání či konstrukci s různými energetickými médii, budou pneumatické a hydraulické pohony pouze zmíněny. Největší část této kapitoly tedy bude věnována elektrickým pohonům.

2.5.1 Hydraulické pohony

U hydraulických pohonů se používají následující typy hydromotorů:

1. Rotační: zubové, lamelové, šroubové nebo pístové
2. Přímočaré (lineární), neboli hydraulické válce
3. Kyvné

Z první skupiny jsou nejvíce využívány pístové axiální rotační hydromotory. Je zde přiváděna tlaková kapalina postupně k jednotlivým pístkům, které tlačí na šikmý, valivě uložený kotouč. Kotouč je pak uveden do rotačního pohybu s pomocí jeho rotačního unašeče. Tento typ rotačního hydromotoru je zobrazen na Obr. 10. [15]



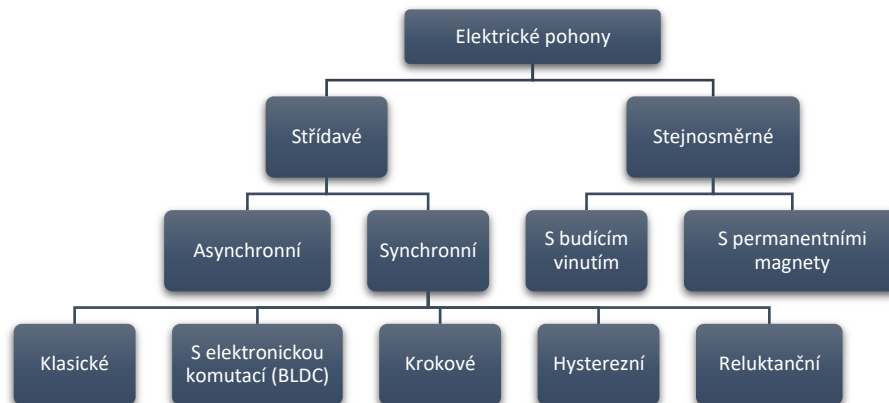
Obr. 10 Axiální pístový hydromotor s nakloněnou deskou [31]

2.5.2 Pneumatické pohony

Pneumatické pohony jsou vhodnější pro průmyslové roboty a manipulátory s jednoduššími pracovními cykly. Tento typ pohonu má omezený výkon kvůli provozním tlakům, které v centrálních rozvodech bývají do 0.6 MPa. Hlavní výhodou je umožnění dosažení rychlosti 2 až 3 ms^{-1} . Tuto rychlost je však obtížné v průmyslu využít kvůli velkým setrvačným silám a nutnosti brždění. [15]

2.5.3 Elektrické pohony

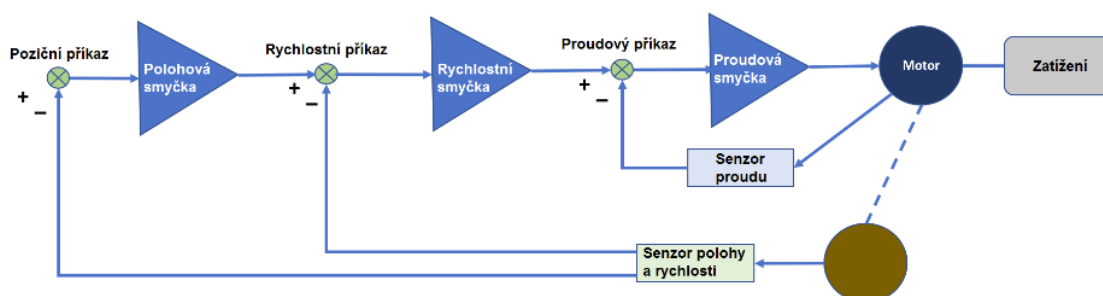
Elektrické pohony jsou druh pohonu, který mění elektrickou energii přivedenou na vstup na mechanickou práci odebíranou na výstupu. Obecně můžeme elektrické pohony dělit dle Obr. 11.



Obr. 11 Rozdělení elektrických pohonů [15]

Nejpoužívanějším typem elektrického pohonu v robotice jsou synchronní střídavé servopohony. Ty lze rozdělit na dvě části – stator a rotor. Stator synchronního servopohonu je podobný statoru asynchronního motoru, jedná se o válec, který obsahuje drážky, v nichž je uloženo trojfázové měděné vinutí. Rotor může mít dvě konstrukce, a to buďto rotor s vyniklými póly, nebo hladký rotor. Princip tohoto typu motoru je, že statorové vinutí je napájeno střídavým třífázovým proudem, díky němuž vzniká točivé magnetické pole. Při rozběhu jsou póly rotoru přitahovány protipóly statoru a zároveň odpuzovány statorovými póly stejného druhu. Jelikož má rotor svou vlastní setrvačnou hmotu, tak se neroztočí okamžitě synchronně s točivým polem statoru, ale jakmile se otáčky kotvy přiblíží díky rozběhovému systému otáčkám točivého pole, je kotva „přitáhnutá“ do synchronních otáček a dál již běží synchronně. [32][33]

Princip servo smyčky u tohoto druhu pohonu je následující. Servomotor je jednou ze součástí celého systému servomechanismu, který se skládá ze servopohonu, zpětnovazebního řízení a řídicí elektroniky. V robotice je u servopohonů ke zpětnovazebnímu řízení nejčastěji použit inkrementální nebo absolutní enkodér, který dává zpětnou vazbu o poloze a rychlosti, zároveň je na motoru měřen proud. Jako řídicí elektronika jsou většinou použity měniče frekvence, které napájí motor a porovnávají data ze zpětné vazby s povelovými daty. Princip zpětné vazby u servopohonu je pak možno vidět na Obr. 12. [34]



Obr. 12 Zpětnovazební řízení servopohonu [34]

Mezi nepoužívanější elektrické pohony v robotice patří tři základní druhy motorů:

a) Střídavé (AC) servopohony [35]

Jak již bylo řečeno na začátku této kapitoly, nepoužívanějším pohonem v robotice (zejména té průmyslové) jsou střídavé servopohony. Jsou používány především kvůli své přesnosti polohování, kompaktnosti a jednoduchému řízení.



Obr. 13 Střídavé synchronní servomotory IFT od firmy Siemens [36]

b) Stejnoseměrné (DC) servopohony [37]

Použití zejména v aplikacích, kde je potřeba mít co nejvyšší moment při nízkých otáčkách. Hlavní výhodou DC motorů je možnost jejich napájení z baterie a ne z distribuční sítě a tedy mají vynikající využití v mobilní a kolaborativní robotice.



Obr. 14 Stejnoseměrný motor používaný v robotice [38]

c) Krokové (stepper) motory [39]

Posledním druhem motoru používaného v robotice jsou krokové motory. Tento typ motoru je většinou použit na aplikace, kde není třeba zpětné vazby. Největší použití v dnešní době nacházejí ve 3D tiskárnách.



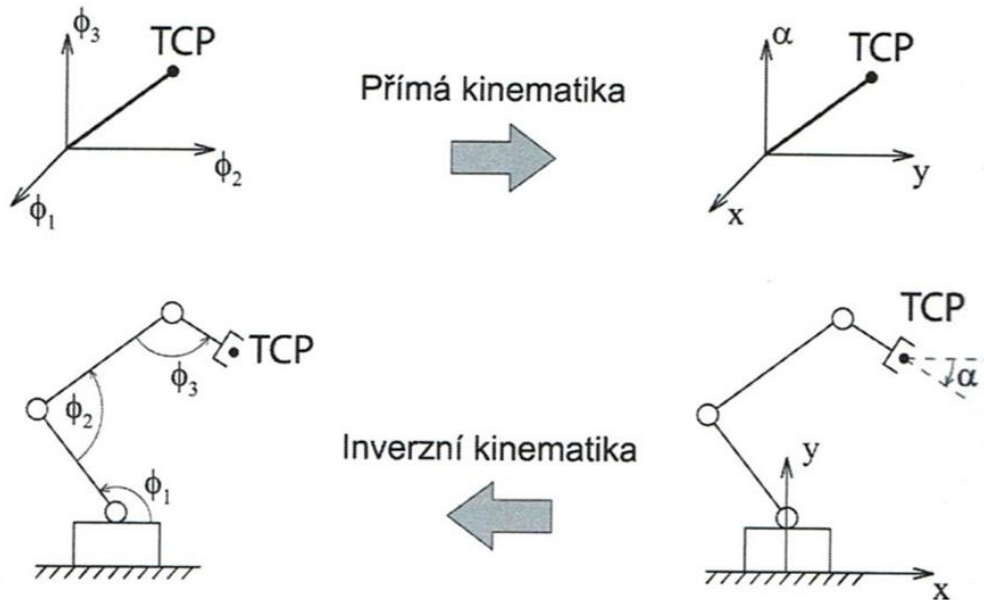
Obr. 15 Krokové motory NEMA [40]

2.6 Kinematika robotů

Kinematika je obecně část mechaniky, která se zabývá pohybem těles bez působení sil nebo momentů na tato těla. V této podkapitole jsou sepsány nástroje pro výpočet dvou základních druhů kinematiky u robotů a to:

1. Přímé kinematiky
2. Nepřímé (inverzní) kinematiky

Princip přímé a inverzní kinematiky je znázorněn na Obr. 16, detailní popis je v následujících podkapitolách. [41]



Obr. 16 Přímá a inverzní kinematika [15]

2.6.1 Přímá kinematika

Problém přímé kinematiky spočívá v nalezení polohy a orientace bodu koncového efektoru vzhledem k souřadnému systému báze. Obecně je potřeba transformovat souřadný systém přes všechny části mechanismu až ke koncovému efektoru. K popisu transformace mezi souřadnými systémy slouží transformační matice. Transformační matice vzniká postupným skládáním elementárních přeměn souřadného systému za sebe. Postupné skládání je znázorněno v rovnici (3), kde je provedena přeměna souřadného systému ze souřadného systému 1 do souřadného systému 6. [15][41][42]

$$T_6^0 = T_1^0 \cdot T_2^1 \cdot T_3^2 \cdot T_4^3 \cdot T_5^4 \cdot T_6^5 \quad (3)$$

Ke složení této transformační matice je možné použít mnoho nástrojů. [15][41][42]

- Rotační matice
- Eulerovy úhly
- Quaterniony
- Homogenní transformace
- DH parametry

Rotační matice

Nejjednodušší metodou popisu rotace v prostoru jsou rotační matice. Rotační matice pro 3D prostor vychází z rotační matice pro 2D prostor. Je-li rotace v 3D prostoru, bere se jako otáčení os x a y kolem osy z o úhel θ , jak je znázorněno v rovnici (4). [15][43]

$$Rot(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4)$$

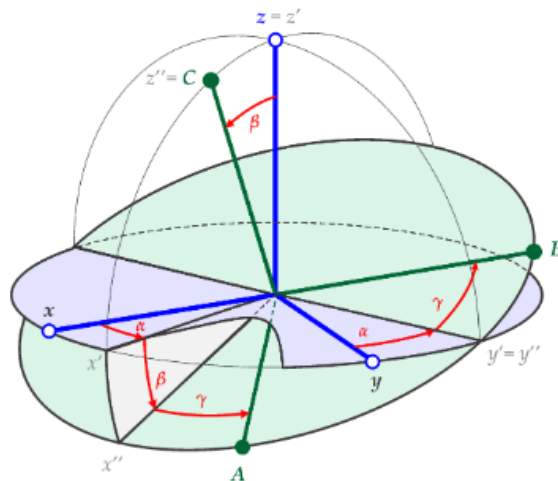
Rotační matice řeší pouze problém rotace, neřeší posunutí souřadného systému. Translace je vyřešena pomocí homogenní transformace, která bude více popsána v další podkapitole.

Eulerovy úhly

Jsou úhly, kde se koncový bod určuje pomocí tří natočení. Tato natočení jsou: [15][44]

- Prvně se otočí osa x , y a z okolo osy z o úhel α proti směru hodinových ručiček, čímž vznikne osa x' , y' , z'
- Následně se otočí osa x' , y' , z' okolo osy y' o úhel β proti směru hodinových ručiček, čímž vznikne osa x'' , y'' , z''
- Poslední rotace je rotace osy x'' , y'' , z'' kolem osy z'' o úhel γ protisměru hodinových ručiček, čímž vzniknou body A , B a C . Tedy finální poloha bodu.

Tento postup je znázorněn na Obr. 17.



Obr. 17 Natáčení pomocí Eulerových úhlů [6]

V rovnici (5) je znázorněna matice rotace pomocí Eulerových úhlů. Tato rotace je v konfiguraci x , y , z . [15][44]

$$R(\alpha, \beta, \gamma) = R_x(\alpha) \cdot R_y(\beta) \cdot R_z(\gamma) = \dots = \begin{bmatrix} c_\alpha c_\beta & c_\alpha s_\beta s_\gamma - s_\alpha c_\gamma & c_\alpha s_\beta c_\gamma + s_\alpha s_\gamma \\ s_\alpha c_\beta & s_\alpha s_\beta s_\gamma + c_\alpha c_\gamma & s_\alpha s_\beta c_\gamma - c_\alpha s_\gamma \\ -s_\beta & c_\beta s_\gamma & c_\beta c_\gamma \end{bmatrix} \quad (5)$$

Quaterniony

Na rozdíl od Eulerových úhlů netrpí quaterniony problémem singularit. Singulární bod je takový, kdy nelze získat konkrétní hodnoty natočení α, β, γ pro transformační matici, lze zde získat pouze vzájemné součty. Problém má tedy nekonečně mnoho řešení. Quaterniony používají například řídicí systémy firmy ABB. [15]

Quaternion se definuje ve formě zobrazené v rovnici (6): [46][47]

$$q = q_0 + q_1 \cdot i + q_2 \cdot j + q_3 \cdot k \quad (6)$$

Kde $q_0 \dots q_3$ jsou skaláry a i, j, k jsou komplexní čísla. Zápis quaternionu je pak dle rovnice (7): [46][47]

$$q = (q_0, q_1, q_2, q_3) \quad (7)$$

Quaterniony musí dodržovat následující konvenci:

$$\begin{aligned} ii = jj = kk = -1, \\ ij = k, jk = i, ki = j, \\ ji = -k, kj = -i, ik = -j \end{aligned}$$

Obr. 18 Konvence komplexních čísel u quaternionů [15]

Quaterniony se používají ve třech fázích: [45][46]

1. Bod se souřadnicemi (x, y, z) se přemění na quaternion, tedy dle rovnice (8):

$$p = (p_0, p_1, p_2, p_3) = (0, x, y, z) \quad (8)$$

2. Provedení rotace, podle rovnice (9).

$$p' = qpq^{-1} \quad (9)$$

3. Výpis otočených souřadnic z rotovaného quaternionu p' , ten je ve tvaru $(0, x', y', z')$

Homogenní transformace

Homogenní transformace řeší polohové vektory a rotační matice souřadného systému současně, tedy posunutí a natočení souřadného systému. Pro posunutí a rotaci jsou sestaveny matice. Rotace kolem osy \hat{z} o velikost θ je znázorněna v rovnici (10).

$$Rot(\hat{z}, \theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta) & -\sin(\theta) & 0 & 0 \\ \sin(\theta) & \cos(\theta) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (10)$$

Posunutí souřadného systému podél osy \hat{x} o přírůstek d je znázorněn v rovnici (11). [15]

$$Trans(\hat{x}, d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & d \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (11)$$

Tento druh řešení je však neefektivní, jelikož vytváří mnoho matic a pro jeho řešení v reálném čase je tedy zapotřebí větší výpočetní výkon.

Denavit–Hartenbergovy parametry

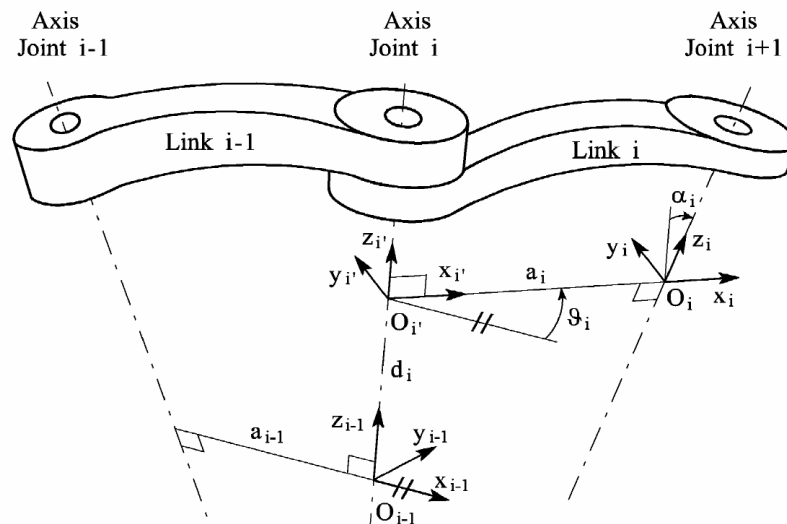
Tato notace využívá čtyř parametrů mezi dvěma souřadnými systémy, ty jsou vyjmenovány v Tab. 10. Tato notace má pro každý kloub tři z těchto čtyř parametrů konstantní a tak zbývá pouze jedna neznámá. U rotačního kloubu to je θ , u translačního to je d . [47][48]

Tab. 10 Popis jednotlivých DH parametrů

| Parametr | |
|----------|--|
| a | Kolmá vzdálenost os z_{i-1} a z , přes x_{i-1} |
| α | Úhel natočení mezi osami z_{i-1} a z , kolem x_{i-1} |
| d | Kolmá vzdálenost os x_{i-1} a x , přes z_{i-1} |
| θ | Úhel natočení mezi osami x_{i-1} a x , kolem z_{i-1} |

Tyto parametry mají svá pravidla, která se musí dodržovat při tvorbě souřadných systémů. Tato pravidla jsou:

1. Osa z je vždy v rotaci otočného kloubu
2. Osa x musí být kolmá k předchozí i k nynější ose z
3. Osa y je určena z pravidla pravé ruky díky osám x a z
4. Osa x se musí protínat s předchozí osou z



Obr. 19 Znázornění DH parametrů [48]

Po následném získání parametrů je třeba sestavit transformační matici. Jelikož tyto parametry pracují s dvěma translacemi a dvěma rotacemi, platí základní matice napsána v rovnici (12). (označení $s = \sin$, $c = \cos$). [47]

$$\begin{aligned}
 R_i &= R_{z,\theta_i} \text{Trans}_{z,d_i} \text{Trans}_{x,a_i} R_{x,\alpha_i} = \\
 &= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i} & 0 & 0 \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & c_{\alpha_i} & -s_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} c_{\theta_i} & -s_{\theta_i}c_{\alpha_i} & s_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i c_{\theta_i} \\ s_{\theta_i} & c_{\theta_i}c_{\alpha_i} & -c_{\theta_i}s_{\alpha_i} & a_i s_{\theta_i} \\ 0 & s_{\alpha_i} & c_{\alpha_i} & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (12)
 \end{aligned}$$

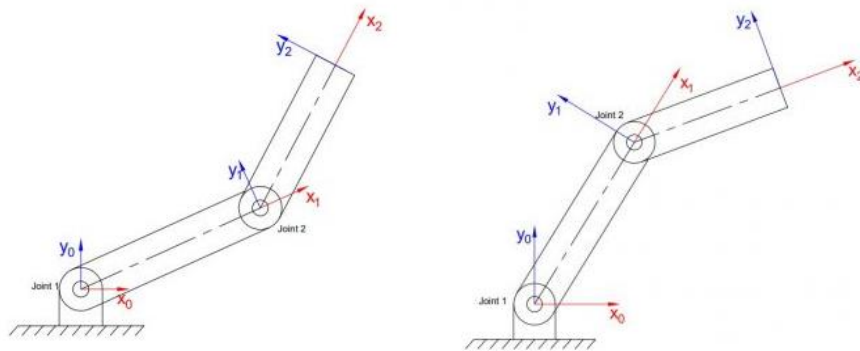
2.6.2 Inverzní kinematika

Problém inverzní kinematiky spočívá v nalezení natočení jednotlivých kloubů, když jsou známy posunutí a natočení koncového bodu. Při řešení inverzní kinematiky existují následující dva způsoby:

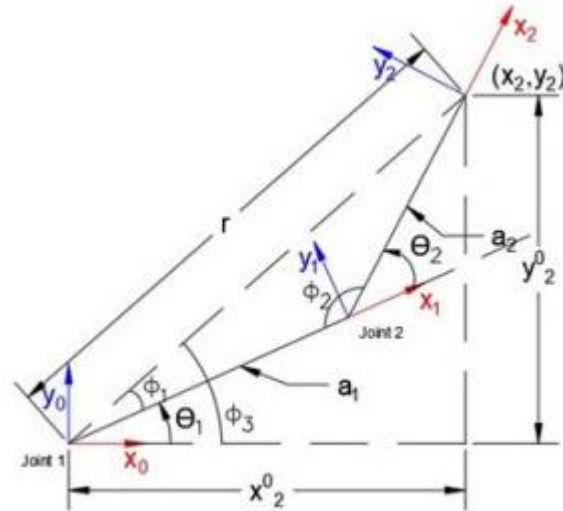
- Analytický způsob
- Numerický způsob

Analytický způsob, který je založený převážně na geometrii, je využíván například u rovinných manipulátorů a robotů do tří stupňů volnosti, jelikož zde nejsou geometrické vztahy mezi jednotlivými klouby tak náročné. U složitějších robotů s větším počtem stupňů volnosti je více využíván numerický způsob, zde jsou využívány numerické metody (algoritmy) jako např. sestup souřadnic nebo hledání kořenů (hledání nul) spojitých funkcí. [49][50]

Základní principy výpočtu inverzní kinematiky analytickým způsobem jsou přiblíženy na rovinném manipulátoru se dvěma stupni volnosti. Na Obr. 20 lze vidět dvě možné konfigurace manipulátoru při zadaných koncových souřadnicích, na Obr. 21 je pak možno vidět konfiguraci manipulátoru směrem dolů s vypsánými rozměry a úhly ramene. [50]



Obr. 20 Možné konfigurace manipulátoru [50]



Obr. 21 Konfigurace manipulátoru směrem dolů s rozměry [50]

Prvně je potřeba sepsat DH parametry tohoto manipulátoru dle pravidel sepsaných v předchozí kapitole. Pro tento manipulátor již hotovou transformační matici, z bodu 0 do bodu 2, je možno vidět v rovnici (13). Polohu bodu x a y je také možno vidět v rovnici (13).

$$H_0^2 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & a_1 c_1 + a_2 c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & a_1 s_1 + a_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

Tedy poloha x a y:

(13)

$$\begin{bmatrix} x_2^0 \\ y_2^0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_1 c_1 + a_2 c_{12} \\ a_1 s_1 + a_2 s_{12} \end{bmatrix}$$

Kde:

| | |
|----------|-----------------------------|
| c_1 | $\cos(\theta_1)$ |
| c_{12} | $\sin(\theta_1)$ |
| s_1 | $\cos(\theta_1 + \theta_2)$ |
| s_{12} | $\sin(\theta_1 + \theta_2)$ |

Dle Obr. 21 je možné sepsat vztahy pro výpočet chybějících uhlů θ_1 a θ_2 . V rovnici (14) je sepsán výpočet úhlu Φ_3 a délky ramene r.

$$\Phi_3 = \operatorname{tg}^{-1} \left(\frac{y_2^0}{x_2^0} \right)$$

$$r = \sqrt{(x_2^0)^2 + (y_2^0)^2}$$

(14)

Použitím kosinové věty je možno vyjádřit vztahy pro výpočet úhlů θ_1 a θ_2 , tyto vztahy jsou sepsány v rovnicích (15) a (16).

$$(a_2)^2 = (a_1)^2 + r^2 - 2a_1r\cos(\Phi_1)$$

$$\Phi_1 = \cos^{-1}\left(\frac{(a_1)^2 + r^2 - (a_2)^2}{2a_1r}\right)$$

Po úpravách (15)

$$\theta_1 = \Phi_3 - \Phi_1$$

Obdobně i pro druhý úhel.

$$r = (a_1)^2 + (a_2)^2 - 2a_1a_2\cos(\Phi_2)$$

$$\Phi_2 = \cos^{-1}\left(\frac{(a_1)^2 + (a_2)^2 - r}{2a_1a_2}\right)$$

Po úpravách (16)

$$\theta_2 = \pi - \Phi_2$$

Obdobně lze počítat inverzní kinematiku i pro konfiguraci ramene směrem nahoru. Ze zápisu pro tento rovinný manipulátor je zřejmé, že pro víceosé roboty tento druh výpočtu postrádá smysl a je třeba využít numerických metod.

3 SYSTÉMOVÝ ROZBOR PROBLEMATIKY

V této kapitole bude proveden systémový rozbor problematiky řešené v této práci. Tento přístup je aplikován na řešení složitějších problematik a je založen na definování atributů systémového přístupu pro efektivní vykonávání činností. Atribut je zde myšlen jako podstatná vlastnost, nebo rozlišovací rys daného objektu. [51]

3.1 Analýza problematiky

Průmyslové roboty jsou používány zejména pro automatizaci výrobních procesů. Tyto procesy mohou být jak manipulační, tak např. svařovací, lakovací atp. Tento typ robotů výrazně zkracuje strojní časy a tudíž snižuje finální náklady na produkt. V této diplomové práci bude navrhnout robot, který bude následně fyzicky postaven v laboratořích Ústavu výrobních strojů, systémů a robotiky.

3.2 Formulace problematiky

Návrh univerzálního průmyslového robotu se šesti stupni volnosti se sériovou kinematickou strukturou.

3.3 Cíle práce

Cílem této diplomové práce je navrhnout a sestavit průmyslový robot. Nejprve bude provedena rešerše v oblasti průmyslových robotů. Po rešerši bude následovat systémový rozbor řešené problematiky, po kterém bude na řadě analýza dostupných řešení a budou navrženy varianty provedení průmyslového robotu. Tyto varianty budou vyhodnoceny metodou multikriteriálního hodnocení. Po výběru nejoptimálnější varianty bude proveden rozbor robotu z hlediska kinematiky a dynamiky, kde mimo jiné budou zkontrolovány odlitky pomocí metody konečných prvků. Již ověřené odlitky pomocí MKP a obrobky (jako jsou adaptéry na motory atp.) budou zřesleny do konstrukční dokumentace, u odlitků pak bude sepsán postup technologie výroby prototypů. V další kapitole pak bude sepsán návrh elektrotechniky, tedy zapojení elektrického rozvaděče a popis jednotlivých komponent. Následující kapitolou je programování robotu, kde bude rozebrán řídicí program robotu v prostředí TIA portál. Jednou z posledních kapitol je posouzení rizik, kde bude provedena analýza rizik robotu a robotického pracoviště, které bude v této práci navrženo. Jako poslední je na řadě cenová kalkulace, kde bude porovnáno navržené řešení s řešeními, které jsou komerčně dostupné.

3.4 Popis řešené soustavy

Řešenou soustavou je v tomto případě průmyslový robot, který je složen z šesti os. Každá z os obsahuje pět hlavních dílců, jimiž jsou motor, adaptér motoru, převodovka, odlitek dané osy a pastorek. Jednotlivé osy je potřeba řešit z pohledu utěsnění oleje, jelikož převodovky je zapotřebí promazávat. Kvůli oleji je zapotřebí řešit vypouštěcí/napouštěcí otvory. Součástí této diplomové práce je i řešení robotizovaného pracoviště, které vznikne spojením průmyslového robotu, oplocení kolem robotu a elektrického rozvaděče.

3.5 Výběr a znázornění reprezentativních parametrů

Na myšlenkové mapě na Obr. 22 jsou zobrazeny reprezentativní parametry robotu. Jsou zde uvedeny všechny podstatné parametry, které jakýmkoli způsobem ovlivňují výsledný robot.



Obr. 22 Myšlenková mapa – znázornění reprezentativních parametrů

3.6 Systém podstatných veličin

Na základě myšlenkové mapy zobrazené na Obr. 22 byl vypracován systém podstatných veličin v podobě tabulky, kterou je možno vidět pod tímto odstavcem (Tab. 11). Tento systém je rozdělen do pěti hlavních charakteristik, k nimž jsou přiřazeny relevantní veličiny.

Tab. 11 Systém podstatných veličin

| Charakteristika | Veličiny/parametry | Doplňující informace |
|--|---|---|
| CH 1 – Struktura, geometrie, topologie | Zástavbové rozměry robotu | Výška, šířka |
| | Hmotnost sestavy | Součet hmotností jednotlivých prvků (převodovky, motory, odlitky atp.) |
| | Pracovní obálka robotu | Maximální možný dosah robotického ramene |
| | Poloha těžiště robotu | Parametr, který určuje stabilitu při přepravě i při provozu |
| CH 2 - Ovlivnění robotu okolím | Interakce robotického pracoviště s obsluhou | Náhlé zmáčknutí emergency stopu a zastavení robotu |
| CH 3 – Vlastnosti prvků robotu | Výkon a moment motorů | Vychází z požadované únosnosti a požadovaných dynamických vlastností |
| | Nosnost robotu | Závisí na zvolených motorech a převodovkách |
| | Hmotnost prvků | Hmotnosti každého z prvků robotu |
| | Rozmístění prvků v robotu | Propojení jednotlivých komponent |
| CH 4 – Procesy a stavy robotu | Robot je stacionární (klid) | Zabrzdné motory nesoucí hmotnost za danou osou |
| | Pohyb | Pohyb je zejména ovlivněn rychlostí a zrychlením motorů |
| CH 5 – Chování robotu | Maximální rychlost | Nutno dodržet kvůli dynamice a bezpečnosti pracoviště |
| | Maximální zrychlení | Závisí na požadovaných časech pro maximální rychlost |
| | Maximální čas zastavení e-stopem | Doba, během které dojde k úplnému zastavení robotu vlivem zmáčknutí emergency stopu |

4 ANALÝZA DOSTUPNÝCH ŘEŠENÍ KONCEPCE A NÁVRH VARIANT

Navrhovaný robot je dimenzován na 10kg nosnost. Pro tuto nosnost je na trhu mnoho ekvivalentních řešení od renomovaných výrobců. Pro srovnání byla vybrána řešení od hlavních globálních výrobců robotů, tedy ABB, Fanuc, Kuka, Yaskawa a Stäubli. Konkrétní řešení byla vždy vybrána podle nosnosti, tedy 10 kg. U výrobců Stäubli a Yaskawa nebyl nalezen průmyslový robot s nosností 10 kg, a byl tedy vybrán nejbližší vyšší ekvivalent. V Tab. 12 jsou vypsána dostupná řešení.

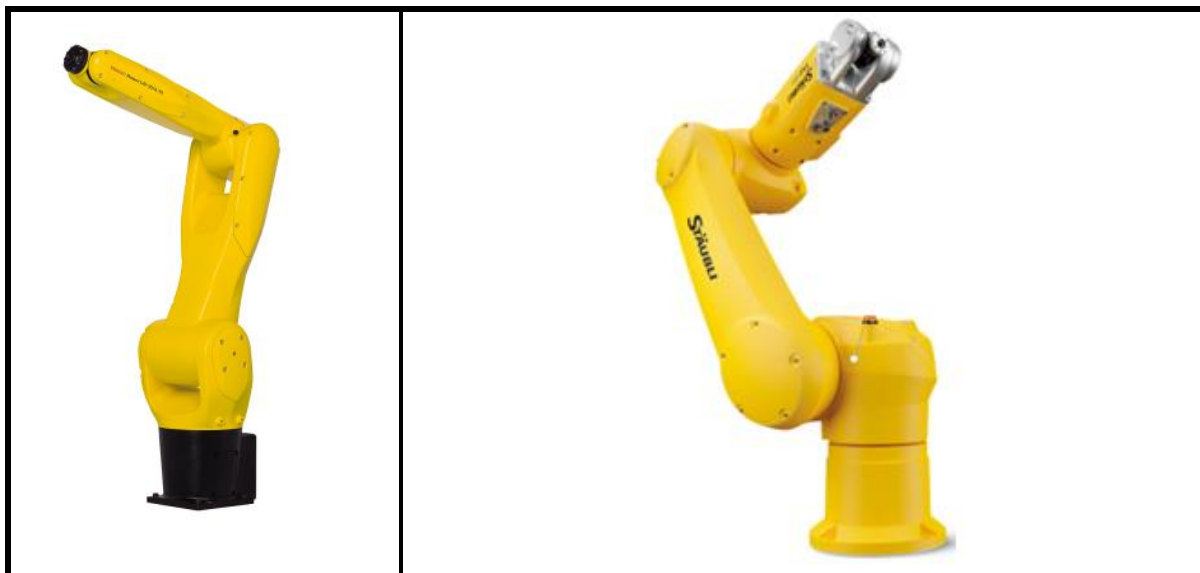
Tab. 12 Dostupná řešení na trhu [52][53][54][55][56]

| Výrobce | Typ | Parametry | |
|---------|------------------|--------------|------------|
| | | Nosnost [kg] | Dosah [mm] |
| ABB | IRB 1300 | 10 | 1150 |
| Fanuc | LR-10iA | 10 | 1101 |
| Kuka | KR10 R1420/R1440 | 10 | 1420/1440 |
| Yaskawa | GP12 FGG | 12 | 1440 |
| Stäubli | TX2-90 | 14 | 1200 |

Z hlediska ostatních parametrů jsou roboty velmi podobné. Jeden z nejdůležitějších parametrů, opakovatelná přesnost, je nejlepší u výrobce Fanuc, kde přesnost dosahuje $\pm 0,01$ mm. Další výrobci, ABB a Yaskawa, mají opakovatelnou přesnost 0,02 mm. U výrobců Kuka a Stäubli se přesnost pohybuje okolo 0,04 mm. V Tab. 13 je možno vidět popsané roboty. [52][53][54][55][56]

Tab. 13 Dostupná řešení robotů s nosností 10kg

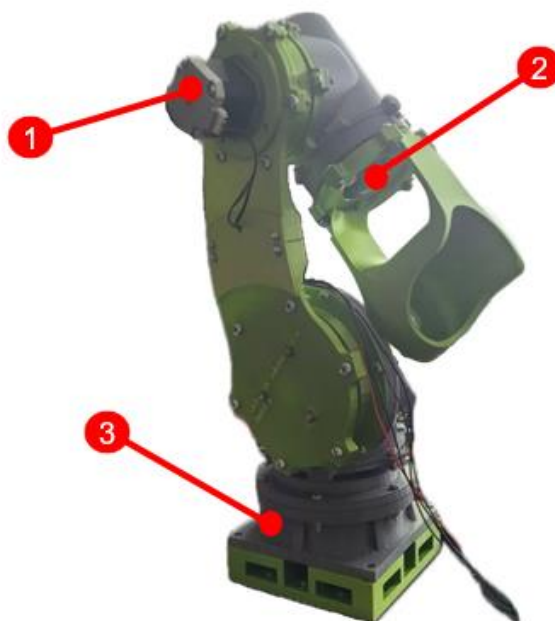




Z hlediska porovnávání s navrženým řešením v této diplomové práci je dalším relevantním parametrem hmotnost samotného robotu. Tento parametr má suverénně nejlepší firma Fanuc, jejíž řešení váží pouze 46 kg. Druhým nejlehčím řešením je robot od firmy ABB, který váží 77 kg, následuje firma Stäubli, jejíž robot váží 114 kg a jako poslední jsou firmy Kuka a Yaskawa, jejichž roboty váží 153 kg a 155 kg. [52][53][54][55][56]

4.1 Verze 1

V této části kapitoly budou popsány jednotlivá řešení navrhovaného robotu. Jak bylo řečeno v zadání, nynější návrh robotu vychází z první verze, která byla 3D tištěna a byla řízena z programovatelné desky Arduino. Tento návrh lze vidět na Obr. 23.



Obr. 23 První verze robotu (1 – krokový motor, 2 – planetová převodovka, 3 – uložení motoru první osy)

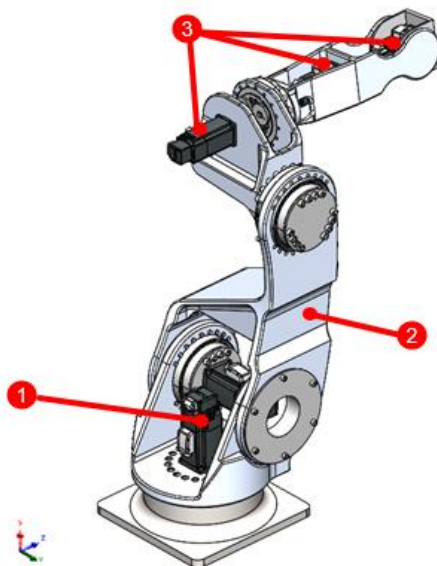
První verze robotu se podstatně lišila od ostatních verzí, jelikož místo servopohonů v ní byly použity krokové motory a místo cykloidních převodovek byly použity 3D tištěné planetové převody. Krokové motory v kombinaci s 3D tištěnými převody, které byly navrženy pouze s převodem 1:2, znamenají poměrně malé únosnosti, robot tedy neunesl ani svou vlastní váhu a od tohoto návrhu bylo upuštěno. Jak lze vidět na Obr. 23, motor je uložen zespodu robotu, této zástavby bylo možno využít díky kompaktnosti krokových motorů NEMA.

4.2 Verze 2

Druhá verze robotu už obsahovala cykloidní převody, ale pouze na prvních čtyřech osách. Na pátou a šestou osu byly vybrány silnější motory, které však kvůli zástavbovým možnostem robotu nebyly vhodné a musely být pro další verze robotu zmenšeny. V této verzi je již motor první osy nad převodovkou první osy a krouticí moment je tažen skrz převodovku. Další parametry robotu, od kterých bylo v dalších verzích upuštěno, jsou:

- Motory čtvrté až šesté osy v jedné ose
- Komplikovanost a objem odlitku 3
- Hliníková konstrukce (kvůli cenovým a pevnostním důvodům)

Tuto verzi je možno vidět na Obr. 24, kde jsou zvýrazněny i výše zmíněné parametry, které bylo nutno v dalších verzích robotu opustit.

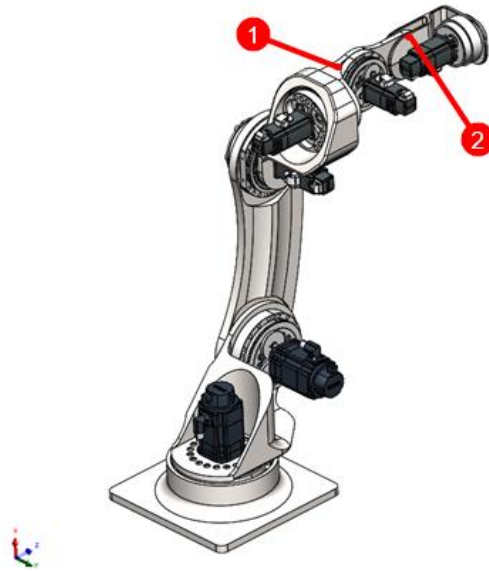


Obr. 24 Druhá verze robotu (1 – uložení motoru první osy, 2 – odlitek třetí osy, 3 – motory v jedné ose)

4.3 Verze 3

U třetí verze robotu byl výrazně upraven třetí odlitek, který je upnut pouze za jednu stranu, stejně tak byl oproti druhé verzi upraven i pátý a šestý odlitek, každý upnut také za jednu stranu. Třetí návrh má na páté a šesté ose už použity cykloidní převodovky a motory byly zmenšeny na vyhovující rozměry. Od tohoto návrhu pátého a šestého odlitku bylo upuštěno kvůli dynamice, jelikož by odlitky pevnostně nevyhovovaly. První až čtvrtý odlitek nebyly do poslední verze koncepčně změněny, byly pouze modelově změněny tak,

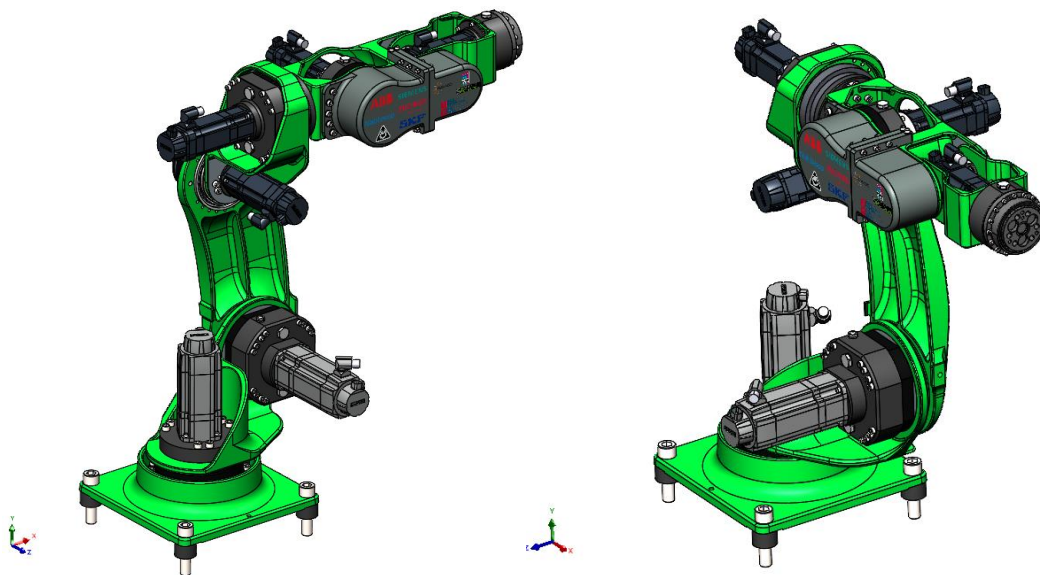
aby vyhovovaly pevnostně a vizuálně. Na Obr. 25 je možno vidět třetí verzi robotu se zvýrazněnými díly, od jejichž konceptu se v další verzi upustilo.



Obr. 25 Třetí verze robotu (1 – pátý odlitek, 2 – šestý odlitek)

4.4 Verze 4

Čtvrtá, poslední, verze si ponechala část konceptů z druhé a třetí verze. Odlitky 5 a 6 byly z hlediska pevnosti lepší ve verzi 2, ostatní pak ve verzi 3. V této verzi je krouticí moment veden skrz převodovku na osách 1, 3 a 4, ostatní osy jsou poháněny napřímo. Byl zde dopracován řemenový převod na ose 5, který byl zakrytován, aby splňoval bezpečnostní předpisy. Byly zde také dopracovány příruby pro motory, mazání, těsnění, vypouštění a napouštění oleje, uložení pastorků na hřídele servomotorů a byla dopracována výkresová dokumentace, která je součástí příloh. Konstrukce je dopodrobna rozebrána v kapitole 7. Dopracovaný robot je pak možno vidět na Obr. 26.



Obr. 26 Čtvrtá verze robotu

5 VYHODNOCENÍ VARIANT METODOU MULTIKRITERIÁLNÍHO HODNOCENÍ

V této kapitole bude vyčíslena nejvhodnější varianta konstrukce průmyslového robotu. Výhody a nevýhody jednotlivých variant jsou sepsány u každé z variant v předchozí kapitole. Pro vyhodnocení optimální varianty bude použita metoda párového srovnání, kde je výsledné pořadí určeno na základě součtu hodnot, které jsou součinem bodového hodnocení a váhy daného kritéria. Nejprve je zapotřebí určit relevantní parametry k porovnání. Tyto parametry vychází z myšlenkové mapy na Obr. 22 a jsou sepsány v Tab. 14. Těchto parametrů je celkem sedm. [57]

Tab. 14 Relevantní parametry

| | |
|----|----------------------|
| P1 | Vyrobitelnost dílců |
| P2 | Dynamika robotu |
| P3 | Tuhost konstrukce |
| P4 | Jednoduchost montáže |
| P5 | Ekonomičnost |
| P6 | Způsob řízení |
| P7 | Hmotnost konstrukce |

V dalším kroku je zapotřebí porovnat jednotlivá kritéria mezi sebou. Tento krok je potřeba pro zjištění pořadí jednotlivých kritérií. V Tab. 15 je možno vidět párové porovnání kritérií, kdy se každý řádek porovnává s každým sloupcem a následně se počítá, kolikrát se daný prvek nachází v trojúhelníkové matici, díky čemuž se určuje pořadí kritérií.

Tab. 15 Párové porovnání kritérií

| Parametr | P1 | P2 | P3 | P4 | P5 | P6 | P7 | Σ | Pořadí |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----------|-----------|
| P1 | P1 | P1 | P3 | P4 | P1 | P1 | P1 | 5 | 3. |
| P2 | | P2 | P3 | P4 | P2 | P2 | P2 | 4 | 4. |
| P3 | | | P3 | P3 | P3 | P3 | P3 | 7 | 1. |
| P4 | | | | P4 | P4 | P4 | P4 | 6 | 2. |
| P5 | | | | | P5 | P5 | P7 | 2 | 6. |
| P6 | | | | | | P6 | P7 | 1 | 7. |
| P7 | | | | | | | P7 | 3 | 5. |

Nyní je zapotřebí stanovit, jak k sobě mají jednotlivá kritéria blízko (jak na sobě jednotlivá kritéria závisí), to bude provedeno na základě Tab. 17. Před samotným hodnocením je nutné určit bodové hodnocení, jakým budou kritéria porovnávána, toto hodnocení je možné vidět v Tab. 16.

Tab. 16 Bodové hodnocení kritérií

| | |
|-----------------------|---|
| Kritéria jsou blízko | 1 |
| Kritéria jsou středně | 2 |
| Kritéria jsou daleko | 3 |

Celková váha je pak vypočtena dle rovnice (17):

$$q_n = \frac{BHV_n}{\sum_{i=1}^n BHV_n} \quad (17)$$

Kde:

BHV_n

Bodová hodnota významnosti pro každý parametr

n

Celkový počet parametrů

Kritéria, jejichž pořadí bylo určeno dle Tab. 15, jsou seřazena dle pořadí vzestupně v řádcích i ve sloupcích. Po bodovém ohodnocení vztahů mezi kritérii jsou sečteny jednotlivé řádky.

Tab. 17 Výpočet vah a stanovení blízkosti kritérií

| Parametr | P3 | P4 | P1 | P2 | P7 | P5 | P6 | Σ | Váha q_n |
|----------|----|----|----|----|----|----|----|----------|-------------|
| P3 | 1 | 3 | 2 | 1 | 2 | 3 | 3 | 15 | 0,28 |
| P4 | | 1 | 2 | 3 | 3 | 2 | 3 | 14 | 0,26 |
| P1 | | | 1 | 2 | 2 | 1 | 3 | 9 | 0,17 |
| P2 | | | | 1 | 3 | 1 | 3 | 8 | 0,15 |
| P7 | | | | | 1 | 1 | 3 | 5 | 0,09 |
| P5 | | | | | | 1 | 1 | 2 | 0,04 |
| P6 | | | | | | | 1 | 1 | 0,02 |
| Součet: | | | | | | | | 54 | 1,00 |

V dalším kroku je přistoupeno k samotnému bodování variant a hodnocení, jak dané varianty splňují sepsaná kritéria. Přidělené body jsou vynásobeny vahou kritéria, která byla vypočtena v Tab. 17. Varianty budou hodnoceny 1-5 podle toho, jak jsou vyhovující, tyto stupně jsou sepsány v Tab. 18. Je zde počítán součet vážených hodnot, přičemž varianta

s nejvyšším součtem je nevhodnější. Jednotlivá detailní hodnocení variant je možno vidět v Tab. 19, Tab. 20, Tab. 21, Tab. 22.

Tab. 18 Stupně hodnocení variant

| | |
|--------------|---|
| Nevyhovující | 1 |
| Dostatečné | 2 |
| Dobré | 3 |
| Nadprůměrné | 4 |
| Skvělé | 5 |

Tab. 19 Hodnocení varianty 1

| Parametr/Kritérium | Hodnocení | Váha kritéria | Vážená hodnota |
|--------------------|-----------|---------------|----------------|
| P1 | 4 | 0,28 | 1,12 |
| P2 | 1 | 0,26 | 0,26 |
| P3 | 2 | 0,17 | 0,34 |
| P4 | 1 | 0,15 | 0,15 |
| P5 | 5 | 0,09 | 0,45 |
| P6 | 2 | 0,04 | 0,08 |
| P7 | 4 | 0,02 | 0,08 |
| | | | Σ2,48 |

Tab. 20 Hodnocení varianty 2

| Parametr/Kritérium | Hodnocení | Váha kritéria | Vážená hodnota |
|--------------------|-----------|---------------|----------------|
| P1 | 2 | 0,28 | 0,56 |
| P2 | 4 | 0,26 | 1,04 |
| P3 | 4 | 0,17 | 0,68 |
| P4 | 1 | 0,15 | 0,15 |
| P5 | 2 | 0,09 | 0,18 |
| P6 | 5 | 0,04 | 0,2 |
| P7 | 3 | 0,02 | 0,06 |
| | | | Σ2,87 |

Tab. 21 Hodnocení varianty 3

| Parametr/Kritérium | Hodnocení | Váha kritéria | Vážená hodnota |
|--------------------|-----------|---------------|---------------------------------|
| P1 | 3 | 0,28 | 0,84 |
| P2 | 2 | 0,26 | 0,52 |
| P3 | 2 | 0,17 | 0,34 |
| P4 | 3 | 0,15 | 0,45 |
| P5 | 3 | 0,09 | 0,27 |
| P6 | 5 | 0,04 | 0,2 |
| P7 | 3 | 0,02 | 0,06 |
| | | | $\Sigma 2,68$ |

Tab. 22 Hodnocení varianty 4

| Parametr/Kritérium | Hodnocení | Váha kritéria | Vážená hodnota |
|--------------------|-----------|---------------|---------------------------------|
| P1 | 3 | 0,28 | 0,84 |
| P2 | 4 | 0,26 | 1,04 |
| P3 | 3 | 0,17 | 0,51 |
| P4 | 3 | 0,15 | 0,45 |
| P5 | 3 | 0,09 | 0,27 |
| P6 | 5 | 0,04 | 0,2 |
| P7 | 3 | 0,02 | 0,06 |
| | | | $\Sigma 3,37$ |

5.1 Výsledky metody multikritériálního hodnocení

Porovnání jednotlivých variant je možno vidět v Tab. 23.

Tab. 23 Výsledky multikritériálního hodnocení

| Varianta | Celková vážená hodnota | Pořadí |
|----------|------------------------|--------|
| 1 | 2,48 | 4. |
| 2 | 2,87 | 2. |
| 3 | 2,68 | 3. |
| 4 | 3,37 | 1. |

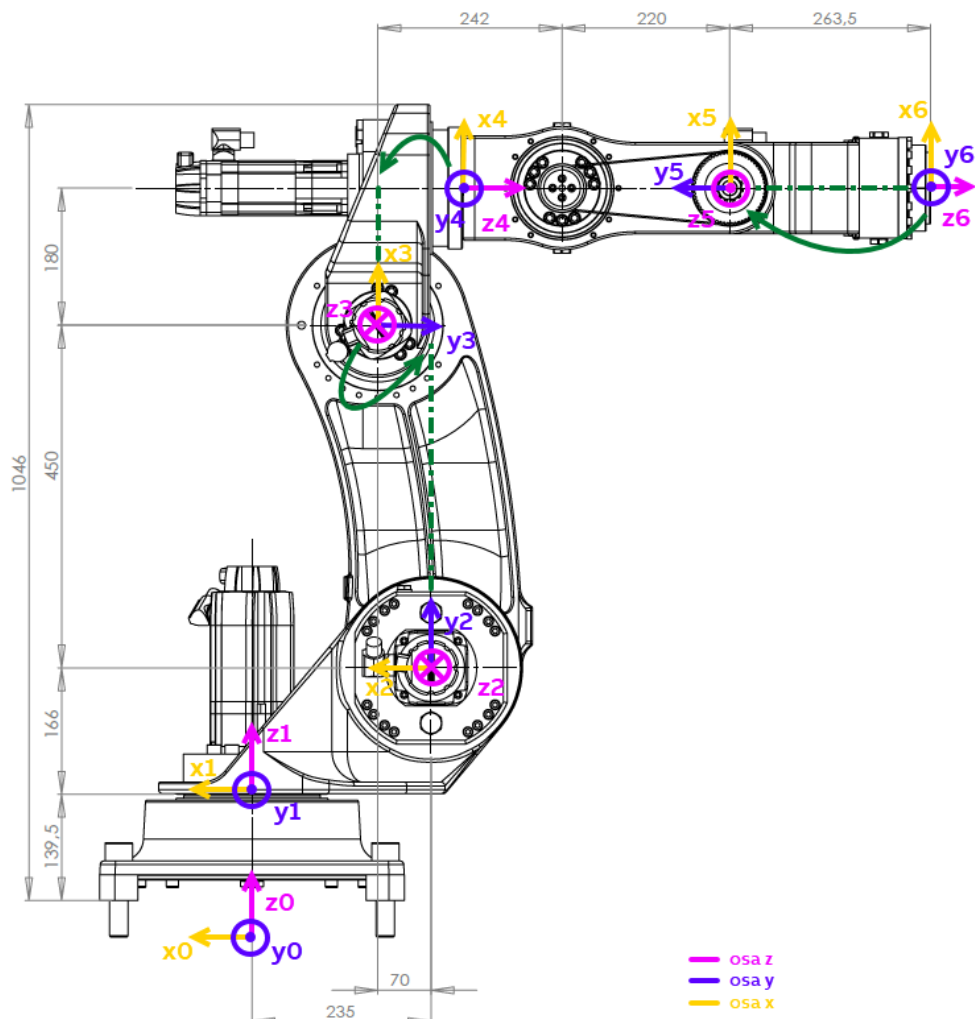
Z Tab. 23 je možno jasne vidět, že nevhodnější variantou je varianta 4. Ta má oproti ostatním lepší dynamiku, snadnější montáž, ale i tuhost konstrukce. Tato varianta je tedy dále zpracovávána a dopracována do detailu v této diplomové práci.

6 ROZBOR ROBOTU Z HLEDISKA KINEMATIKY A DYNAMIKY

V této kapitole bude sepsán návrh robotu z hlediska kinematiky a dynamiky. Prvně bude představen bokorys robotu s jeho rozměrovými řetězci a souřadnými systémy pro tvorbu přímé kinematiky. Na základě těchto řetězců bude vypracována přímá kinematika, následně bude popsán postup pro pevnostní analýzu odlitků.

6.1 Kinematika robotu

Na Obr. 27 jsou zobrazeny souřadné systémy jednotlivých os robotu, ty jsou vytvořeny na základě pravidel, která jsou popsána v kapitole 2.6 (Kinematika robotů) a podkapitole Denavit–Hartenbergovy parametry. Zelené šipky značí posunutí souřadného systému tak, aby byly splněny pravidla DH parametrů.



Obr. 27 Souřadné systémy u robotu

Na základě souřadných systémů a rozměrových řetězců lze určit parametrickou tabulku Denavit–Hartenbergerových parametrů, ta je vypsána v Tab. 24. Jelikož se jedná o robot, nebude zde nikde neznáma v podobě posunutí (parametru „d“), vždy zde bude jako neznámá řídicí úhel θ .

Tab. 24 Parametrická tabulka

| θ | α | d | a |
|----------------------------|------------------|--------|-------|
| θ_1 | $-\frac{\pi}{2}$ | 0,3055 | 0 |
| $\theta_2 + \frac{\pi}{2}$ | 0 | 0 | 0,450 |
| θ_3 | $-\frac{\pi}{2}$ | 0 | 0,180 |
| θ_4 | $-\frac{\pi}{2}$ | 0,462 | 0 |
| θ_5 | $+\frac{\pi}{2}$ | 0 | 0 |
| θ_6 | 0 | 0,2365 | 0 |

Na základě tabulky parametrů je možné sestavit transformační matice, těch je dohromady šest. Parametry je třeba dosadit do rovnice (18), tedy:

$$\begin{aligned}
 H_{0-1} &= \begin{bmatrix} c_{\theta_1} & -s_{\theta_1}c_{\alpha_1} & s_{\theta_1}s_{\alpha_1} & a_1c_{\theta_1} \\ s_{\theta_1} & c_{\theta_1}c_{\alpha_1} & -c_{\theta_1}s_{\alpha_1} & a_1s_{\theta_1} \\ 0 & s_{\alpha_1} & c_{\alpha_1} & d_1 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} = \\
 &= \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) & -\sin(\theta_1) \cdot \cos(-\frac{\pi}{2}) & \sin(\theta_1) \cdot \sin(-\frac{\pi}{2}) & 0 \cdot \cos(\theta_1) \\ \sin(\theta_1) & \cos(\theta_1) \cdot \cos(-\frac{\pi}{2}) & -\cos(\theta_1) \cdot \sin(-\frac{\pi}{2}) & 0 \cdot \sin(-\frac{\pi}{2}) \\ 0 & \sin(-\frac{\pi}{2}) & \cos(-\frac{\pi}{2}) & 0,3055 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (18)
 \end{aligned}$$

Stejně zapsané jako je matice v rovnici (18) by byly zapsány i ostatní transformace souřadných systémů. Výsledná transformační matice by pak byla součinem šesti matic, zapsaná v rovnici (19).

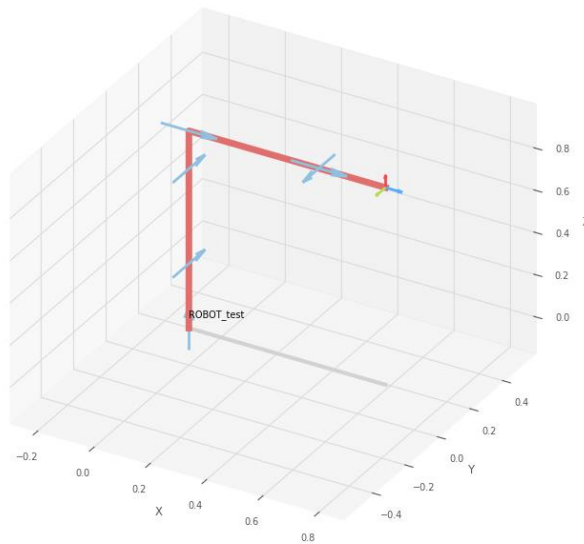
$$H_{0-6} = H_{0-1} \cdot H_{1-2} \cdot H_{2-3} \cdot H_{3-4} \cdot H_{4-5} \cdot H_{5-6} \quad (19)$$

Kde:

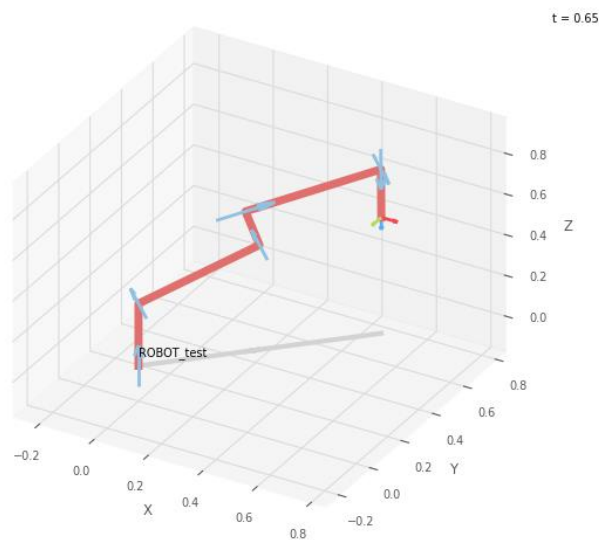
| | | |
|---------|-----|---|
| H_6^0 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 1 do SS 6 |
| H_1^0 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 0 do SS 1 |
| H_2^1 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 1 do SS 2 |

| | | |
|---------|-----|---|
| H_3^2 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 2 do SS 3 |
| H_4^3 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 3 do SS 4 |
| H_5^4 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 4 do SS 5 |
| H_6^5 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 5 do SS 6 |

Poznatky z této kapitoly byly následně uplatněny při vizualizaci kinematiky. Pro tuto vizualizaci byl využit Robotics toolbox, psaný v jazyce Python. V programu byla vytvořena jednoduchá trajektorie, která začíná polohou zobrazenou na Obr. 28 a končí polohou na Obr. 29.



Obr. 28 Začáteční poloha robotu

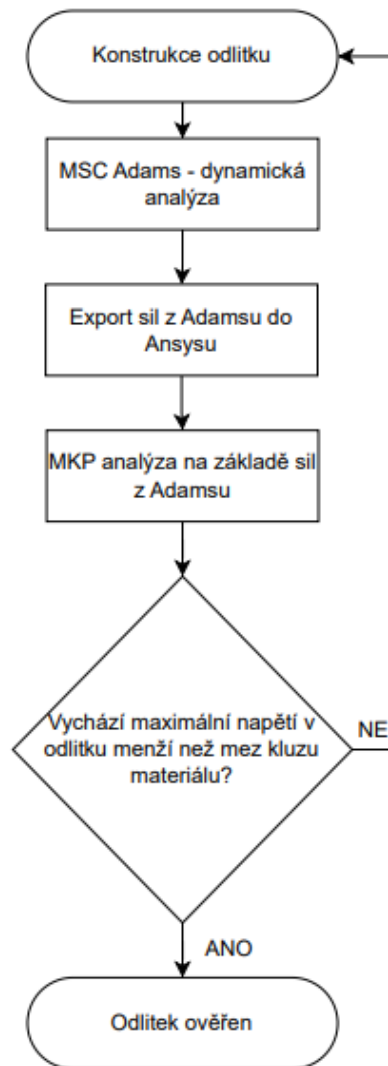


Obr. 29 Konečná poloha robotu

Tento program byl vytvořen pouze ověření některých návazností v rámci kinematiky a k vizualizaci parametrů stanovených v Tab. 24 a není nijak propojen s programováním fyzického robotu. Reálné ožívání robotu a propojení řídicího systému s kinematikou je popsáno v kapitole 10 Programování robotu.

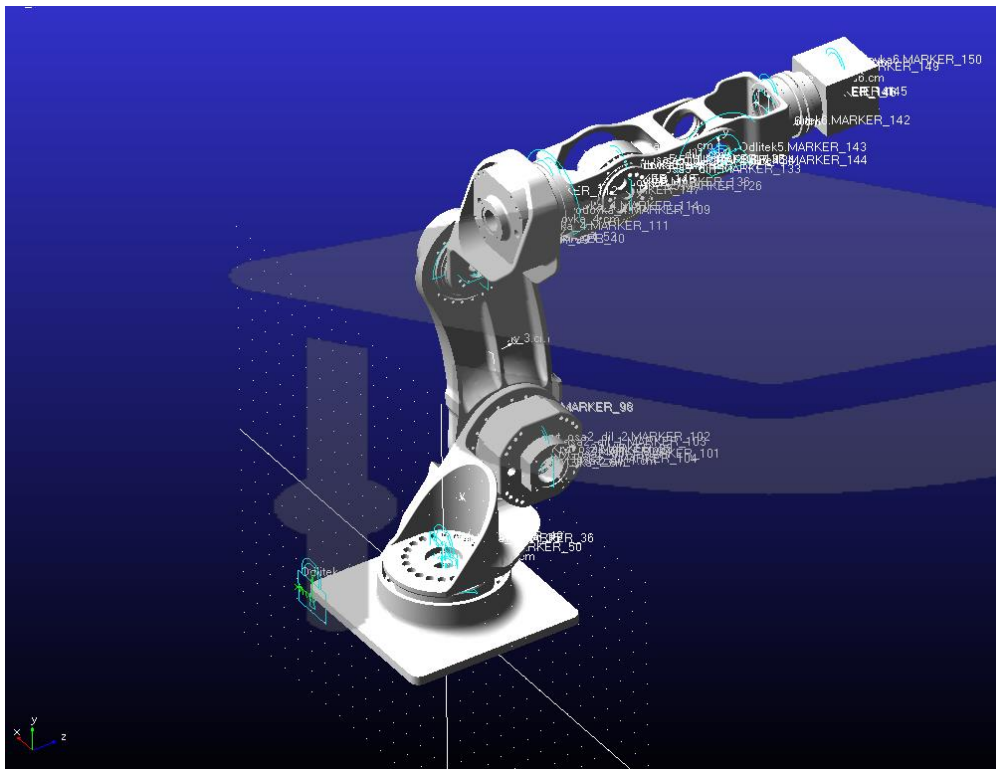
6.2 Dynamika robotu a pevnostní výpočet odlitků

V této podkapitole bude sepsán postup ověření pevnosti jednotlivých odlitků. Pro výpočet pevnosti byl použit program Ansys, do kterého byly převedeny data ze softwaru MSC Adams. Celkový postup je zobrazen na Obr. 30.



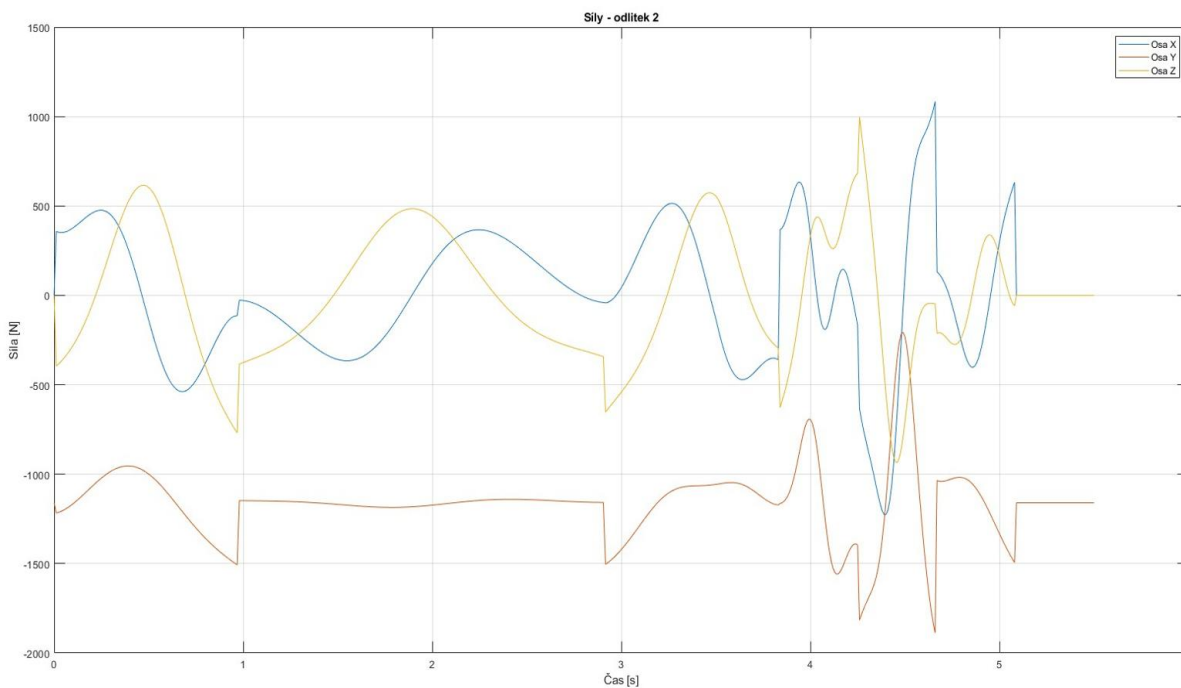
Obr. 30 Postup ověření odlitků

Dle postupu byly prvně nakonstruovány odlitky, které byly následně vyexportovány ve formátu .step do programu MSC Adams. Spolu s odlitky byly do softwaru vyexportovány také další relevantní součásti jako převodovky, adaptéry na motory a koncové závaží. Do softwaru nebyly vyexportovány motory a některé z obráběných součástí kvůli maximálnímu počtu součástí, které povoluje studentská licence. Všechny tyto součásti byly zavazbeny a byly jim přiděleny fyzikální vlastnosti. Hotový model je možno vidět na Obr. 31. Následně byly vytvořeny pohyby pomocí funkce STEP(), kde byl zadáván vždy počáteční a koncový úhel a čas.



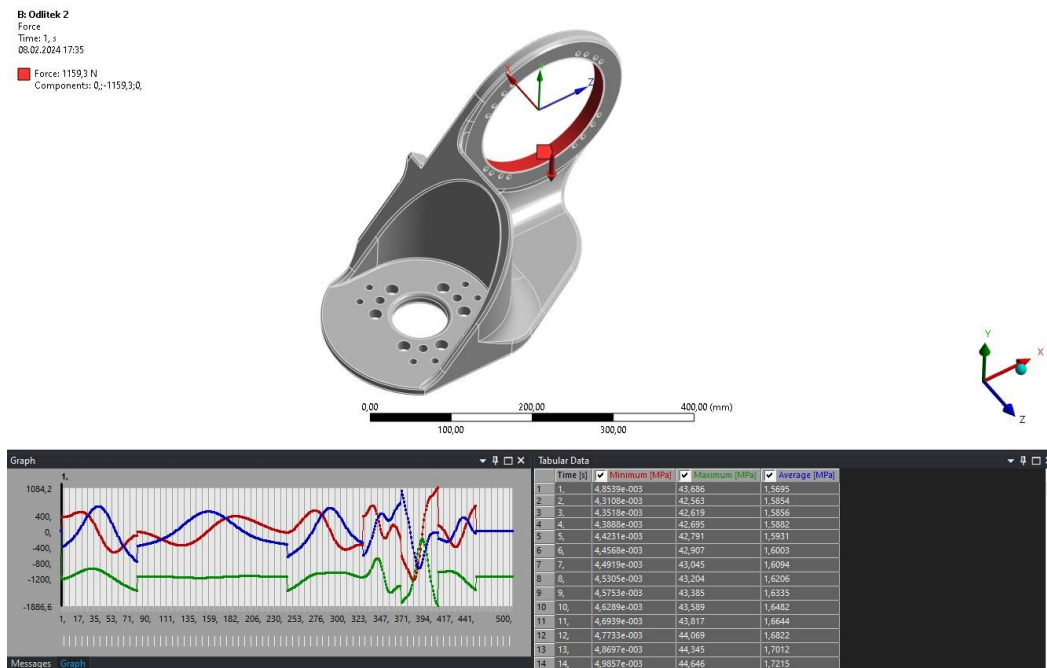
Obr. 31 Model v softwaru MSC Adams

Video z této simulace je obsaženo v přílohách, přičemž celkový čas simulace trval 7 sekund. Po simulaci byly v postprocesoru odečteny síly na jednotlivých odlitcích, jedná se vždy o síly ve všech třech osách – X, Y, Z. Excel s těmito silami je také součástí příloh. Průběh sil na odlitku č. 2 je zobrazen na Obr. 32.



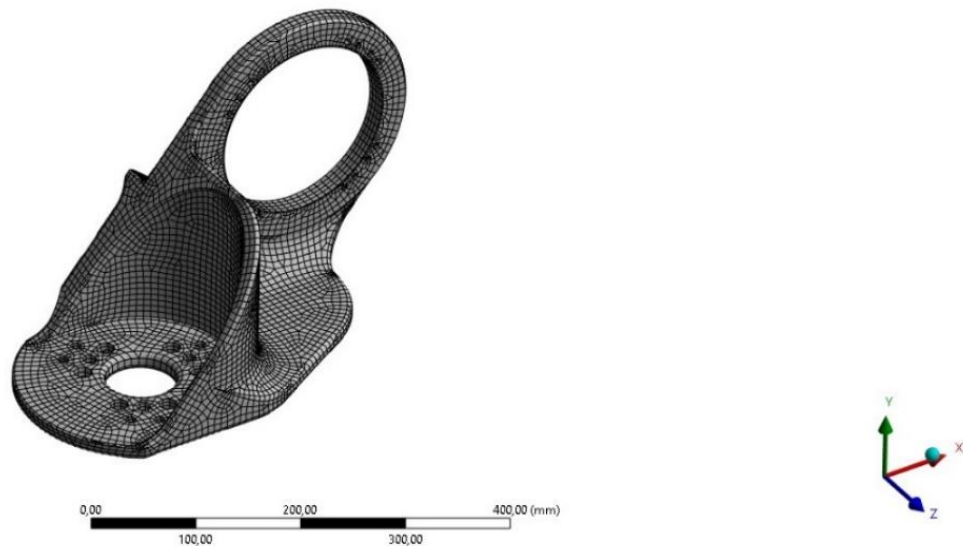
Obr. 32 Síly na odlitku č. 2

Průběh těchto sil v osách x, y a z byl následně zkopírován do průběhu sil v programu Ansys. Pro tyto síly byl v tomto programu vytvořen lokální souřadný systém, tak aby odpovídal souřadnému systému v programu Adams a síly tak měly stejné směry působení. Na Obr. 33 lze vidět plochu, která byla vybrána jako místo působení síly, a také lze vidět průběhy sil ve spodní části obrázku.



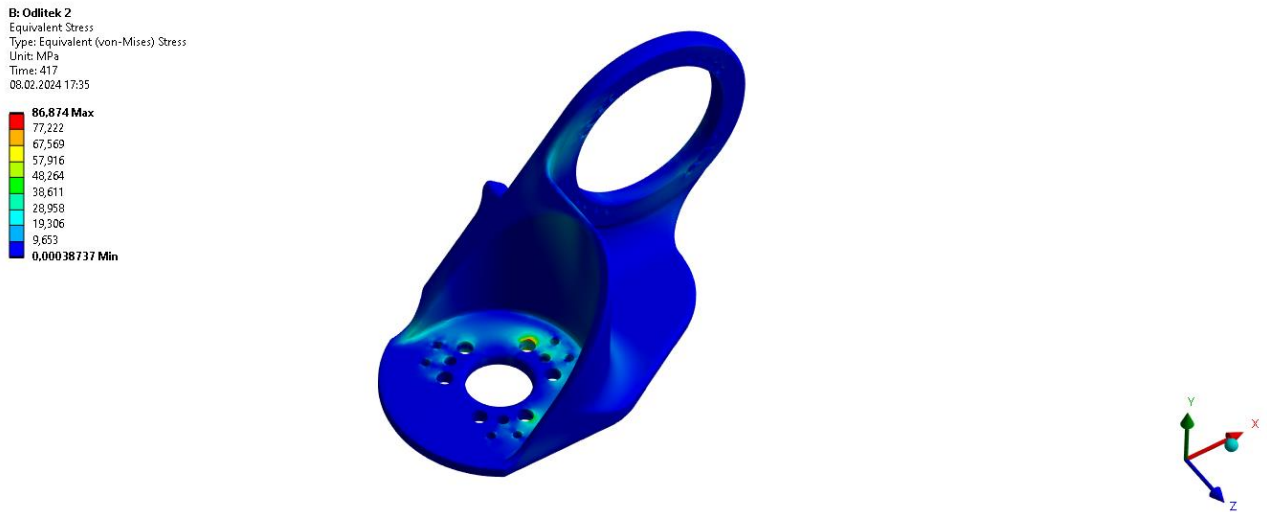
Obr. 33 Působení a průběh síly v programu Ansys

Po definování síly a fixní vazby bylo zapotřebí připravit na jednotlivé odlitky mesh. U všech odlitků byla zvolena metoda „Hex dominant“, která zaručuje, že v meshi na odlitku převládají hexaedrické prvky jak v počtu, tak v objemu. Každý z odlitků je pak podle potřeb upraven, na většině je použit na vybrané plochy „Face meshing“ a na některé hrany pak „Edge sizing“. U všech je pak vybráno Quadratické pořadí elementů. Finální mesh na odlitku 2 je zobrazen na Obr. 34.



Obr. 34 Mesh na odlitku 2

Při každém z šesti odlitek bylo zkoumáno napětí v pěti stech časových krocích, které odpovídají pěti stům záznamům síly vygenerovaných ze softwaru Adams. Rozložení výsledného napětí na odlitku 2 je zobrazeno na Obr. 35, výsledné napětí a průběhy metody konečných prvků jsou součástí příloh. V Tab. 25 jsou sepsána maximální napětí ve všech šesti odlitcích spolu s vypočítanou bezpečností vzhledem k meznímu stavu pružnosti, přičemž mez kluzu litiny, ze které jsou odlitky odlity (EN-GJS-500-7) je přibližně 320 MPa. Bezpečnost je spočítána dle rovnice (20). [58]



Obr. 35 Výsledné napětí v odlitku 2

$$\sigma_{skut\ odlitek} = \frac{R_{e\ odlitek}}{k_{odlitek}} \rightarrow k_{odlitek} = \frac{R_{e\ odlitek}}{\sigma_{skut\ odlitek}} \quad (20)$$

Kde:

| | | |
|--------------------------|-------|-----------------------------------|
| $\sigma_{skut\ odlitek}$ | [MPa] | Skutečné napětí v odlitku |
| $R_{e\ odlitek}$ | [MPa] | Mez kluzu litiny odlitku |
| $k_{odlitek}$ | [-] | Bezpečnost odlitku vzhledem k MSP |

Tab. 25 Maximální napětí a bezpečnost vzhledem k MSP

| Odlitek | Maximální napětí [MPa] | Bezpečnost vzhledem k MSP [-] |
|---------|------------------------|-------------------------------|
| 1 | 10,162 | 31,5 |
| 2 | 86,874 | 3,7 |
| 3 | 116,11 | 2,8 |
| 4 | 70,496 | 4,5 |
| 5 | 63,03 | 5,1 |
| 6 | 81,245 | 3,9 |

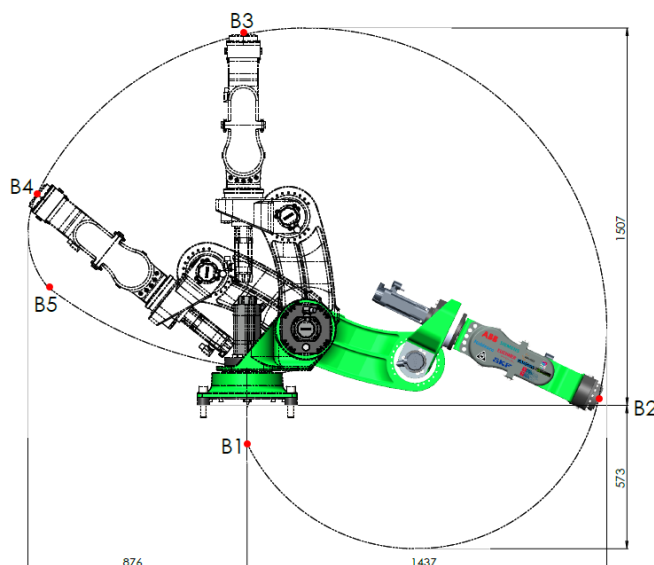
Dle Tab. 25 je možno konstatovat, že každý z odlitek pevnostně vyhovuje cyklu simulovanému v programu MSC Adams.

7 KONSTRUKCE A NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY PROTOTYPU ROBOTU

V této kapitole bude rozebrána konstrukce robotu a budou zmíněny jeho konstrukční uzly, zároveň bude sepsán i návrh prototypové výroby jednotlivých součástí, zejména pak odlitků. Budou zde popsány omezení rozsahu pohybů z pohledu natočení a dosahu jednotlivých os.

7.1 Konstrukce robotu

V této podkapitole budou rozebrány dosahy, rozměry, přeprava a jednotlivé konstrukční uzly robotu, které jsou u všech os podobné. Na Obr. 36 je vyobrazena pracovní obálka robotu, která je důležitá kvůli dvěma hlavním parametrům, a to maximálnímu dosahu robotu, tedy jak daleko se robot natáhne, a také z důvodu návrhu pracoviště z pohledu bezpečnosti. Na tomto obrázku lze vypočítat maximální dosah robotu, který se měří od svislé osy paty robotu a je 1437 mm.

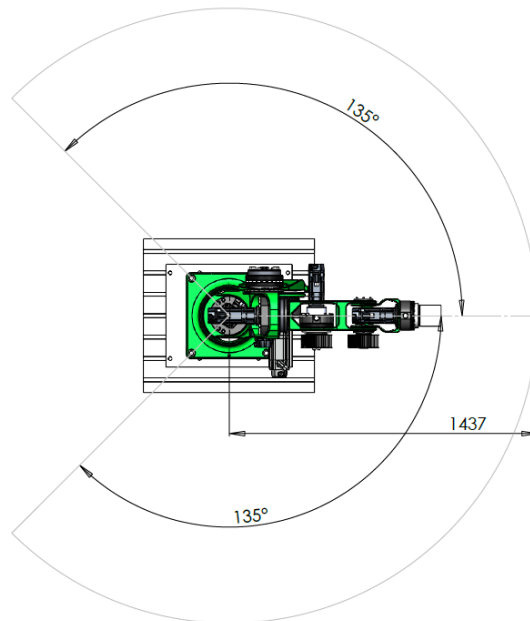


Obr. 36 Pracovní obálka robotu

Všechny osy mají omezené své maximální natočení, a to z důvodu ohybnosti a přetáčivosti signálových a silových kabelů jdoucím k motorům os, nebo kvůli kolizi motorů a odlitků. Maximální natočení první osy je zobrazeno na Obr. 37, ostatní limitní hodnoty natočení jsou sepsány v Tab. 26.

Tab. 26 Pracovní rozsahy robotu

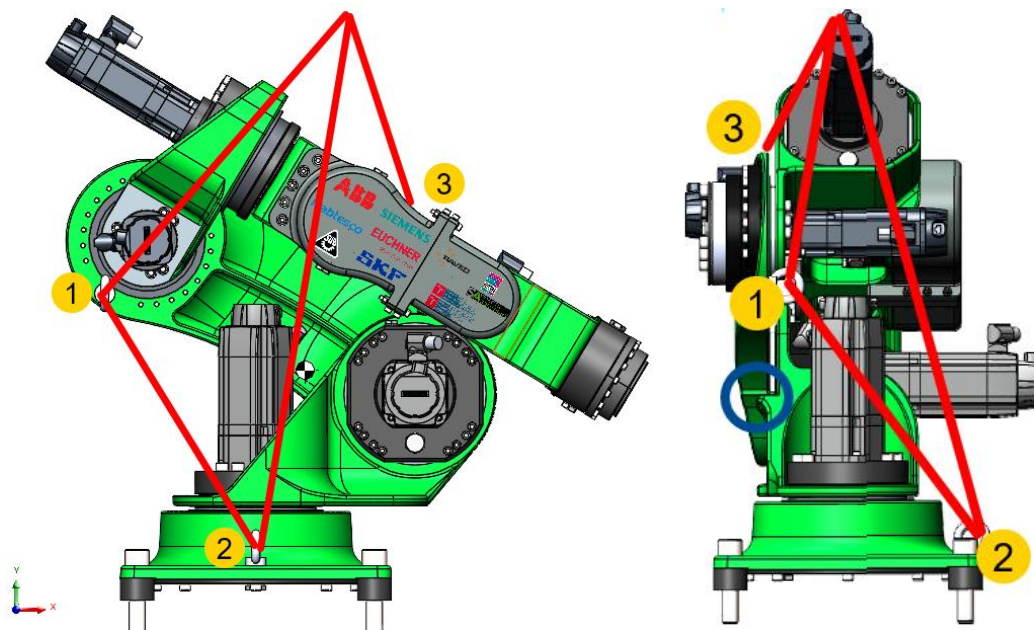
| Osa | Pracovní rozsah |
|-------|-------------------------|
| Osa 1 | $\pm 135^\circ$ |
| Osa 2 | $-50^\circ, +110^\circ$ |
| Osa 3 | $-30^\circ, +120^\circ$ |
| Osa 4 | $-25^\circ, +135^\circ$ |
| Osa 5 | $\pm 180^\circ$ |
| Osa 6 | $\pm 135^\circ$ |



Obr. 37 Maximální natočení první osy

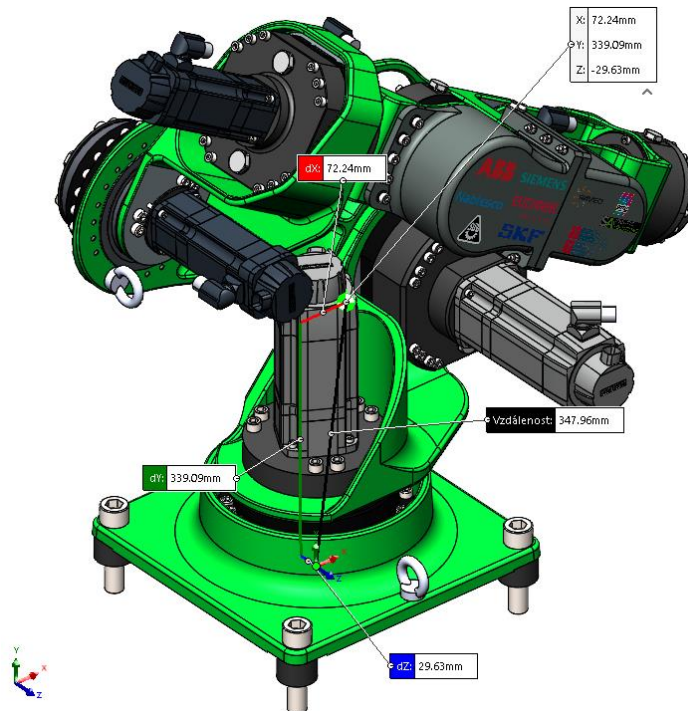
Přeprava robotu je řešena pomocí tří přepravních ok, na které jsou v odlitcích 1 a 3 připraveny závitové díry. Při manipulaci musí být dodržena následující pravidla:

- Osa č. 3 musí být položena na dorazu odlitku 2 (Obr. 38, modře zakroužkováno)
- Osa č. 5 musí být položena na krytu osy č. 2
- Přepravní oka 1 a 2 musí být svázána spolu (číslování ok je zobrazeno na Obr. 38)



Obr. 38 Vázání přepravních pásů na oka

Při transportu je podstatná poloha těžiště, která nesmí být mimo závěsné body, aby se těleso nepřeklopilo. Poloha těžiště v transportní pozici vzhledem k patě robotu je ukázána na Obr. 39.

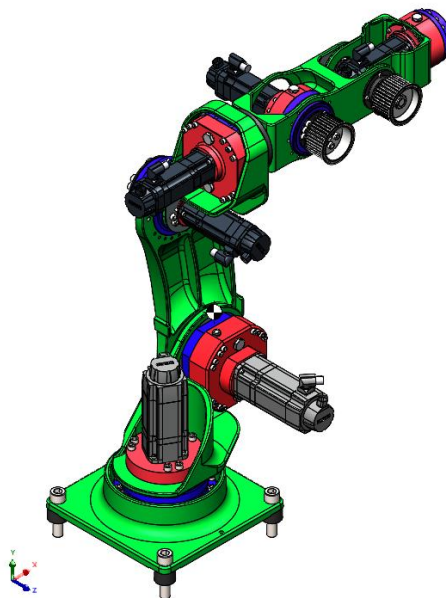


Obr. 39 Poloha těžiště

7.1.1 Konstrukční uzly robotu

Robot má z hlediska konstrukce pro všechny osy podobné konstrukční celky. Na Obr. 40 jsou zvýrazněny nejdůležitější celky a to:

- Zelená – odlitky
- Červená – adaptéry motorů. Kromě páté osy jsou všechny osy naháněny napřímo, pátá osa je řešena řemenovým převodem. Náhon převodovek os 1 a 3 je řešen hřídelí skrz převodovku, jelikož u obou z těchto os by bylo nevhodné mít motory na straně vstupu do převodovky.
- Fialová – převodovky motorů. Všechny použité převodovky jsou cykloidní od společnosti Nabtesco, jejich parametry jsou sepsány v Tab. 27.

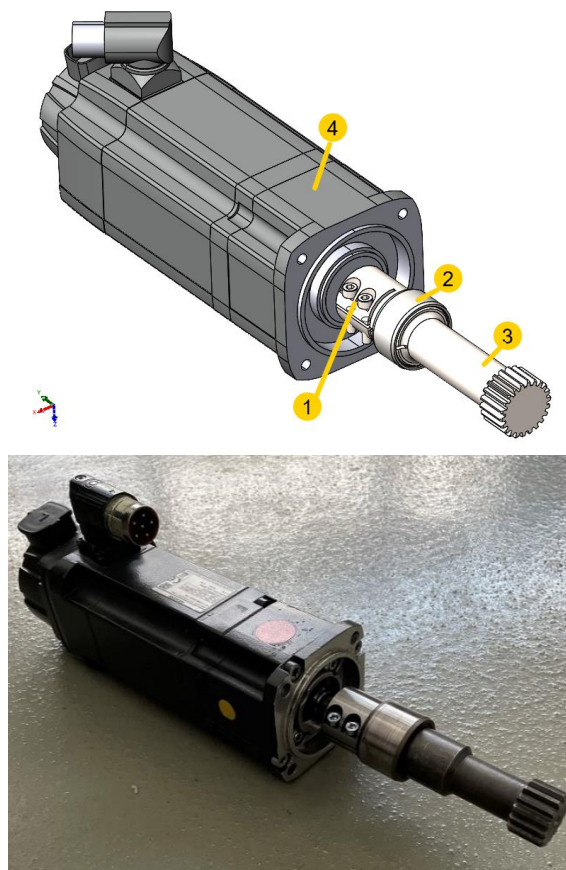


Obr. 40 Konstrukční celky robotu

Tab. 27 Parametry převodovek

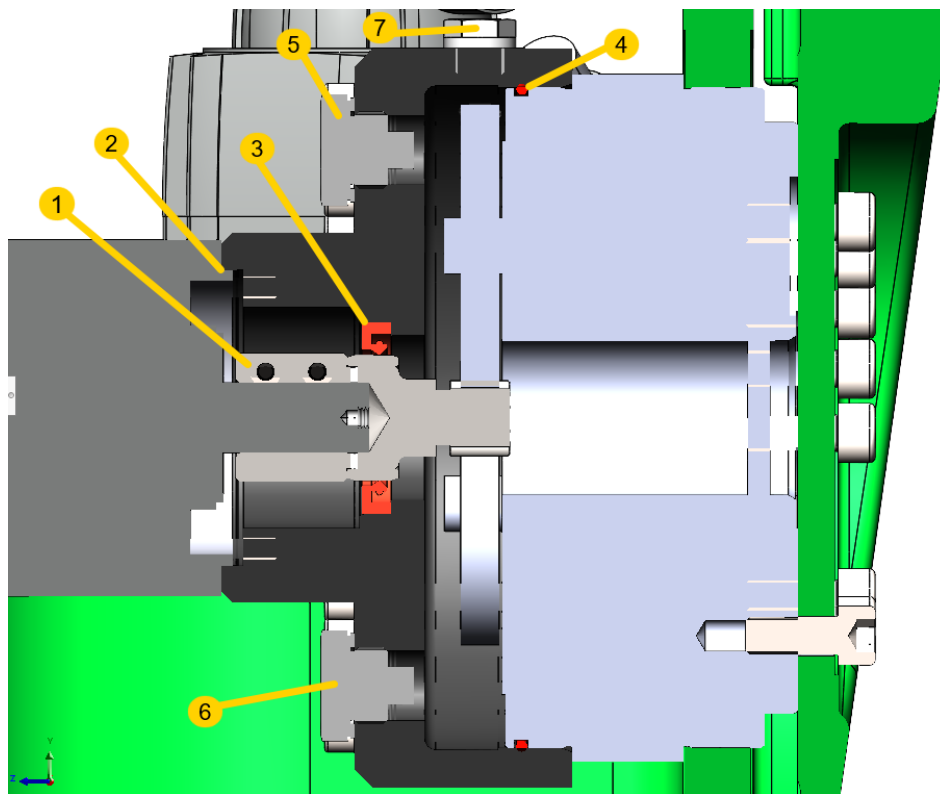
| Osa | Označení převodovky | Převodový poměr |
|-----|---------------------|-----------------|
| 1 | RV 127F | 97.5 |
| 2 | RV 100N | 161 |
| 3 | RV 70F | 125.8 |
| 4 | RV 70F | 125.8 |
| 5 | RV 42N | 126 |
| 6 | RV 25N | 107.66 |

Pohon každé z šesti převodovek je řešen pastorkem, který je v tomto projektu realizován jako svěrný spoj. Jelikož je stranu směrem k motoru třeba těsnit před olejem, je zde nutnost použít hřídelová těsnění. Kvůli technologii výroby svěrného spoje bylo zapotřebí navrhnout navíc lisované kroužky, které jsou broušeny kvůli dosedání hřídelového těsnění. Na Obr. 41 je zobrazen motor s pastorkem pro první osu robotu.



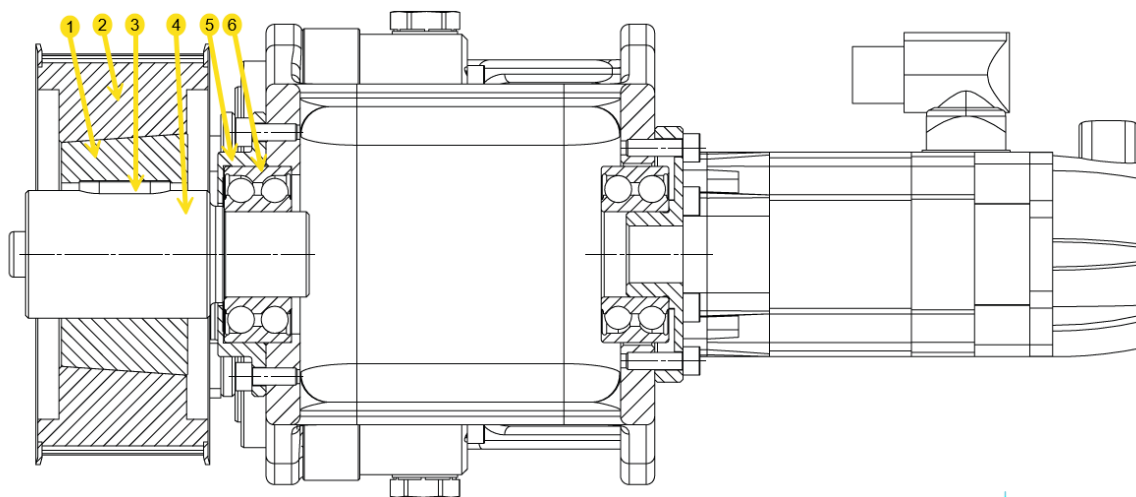
Obr. 41 Motor s pastorkem (1-svěrný spoj, 2-lisovaný kroužek, 3-pastorek, 4-motor)

Na Obr. 42 je možno vidět pohon druhé osy v řezu. Servomotor je středěn do příruby motoru (2), příruba je pak následně středěna do převodovky, krouticí moment je přenášen pomocí svěrného spoje (1). Těsnění je zde řešeno o-kroužkem (4) a hřídelovým těsněním (3). Olej je napouštěn pomocí zátka (5) a vypouštěn pomocí zátka (6), zátka (7) slouží jako kontrolní. Stejně jako na druhé ose je pohon, středění a těsnění řešeno na všech ostatních osách, jediné co se mění, je místo těsnění kvůli rozměrovým možnostem.



Obr. 42 Pohon druhé osy v řezu

Jak bylo zmíněno výše, pátá osa jako jediná nepřímě naháněná využívá k pohonu řemenový převod. Obě řemenice využívají taper-lock, který funguje na principu svěrného spoje. První řemenice je uložena na hřídeli, která je přišroubována k převodovce. Uložení druhé řemenice je možno vidět na Obr. 43. Zde je krouticí moment přenesen přes taper-lock (1) a (2) a přes těsné pero (3). Hřídel (4) je uložena v ložisku (6), které je uloženo v odlitku a v krytu ložiska (5).



Obr. 43 Uložení řemenice páté osy

7.2 Výroba prototypu robotu

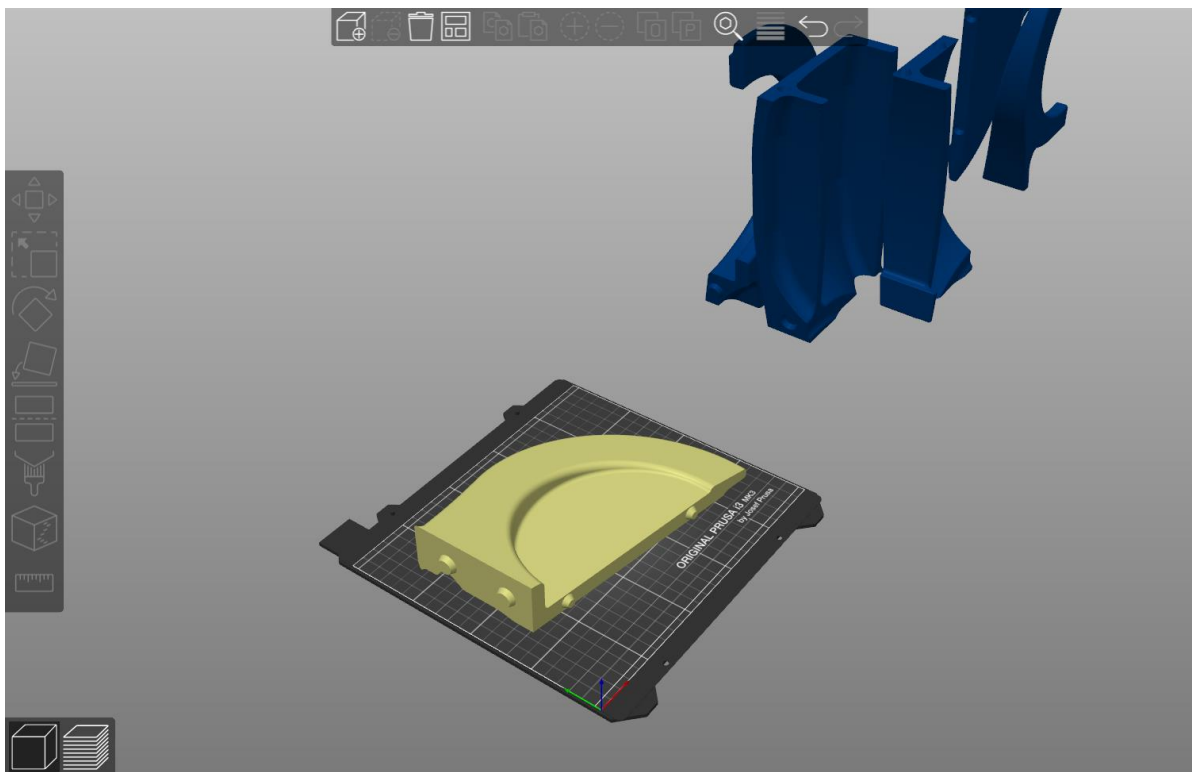
V této části budou sepsány jednotlivé kroky postupu tvorby dílů robotu, zejména odlitků.

7.2.1 Odlitky

Na základě výsledků napětí v MKP z kapitoly 6.2 (Dynamika robotu a pevnostní výpočet odlitků) byly odlitky upraveny a domodelovány. Jakmile byly odlitky hotovy a ověřeny, byl zvolen následující postup:

1. Tisk modelu odlitku na 3D tiskárně
2. Slepění a zavoskování slepených hran
3. Vytvoření skořepinové formy odlitku
4. Odlítí dílu
5. Obrobení a lakování dílu

Díly byly kvůli své velikosti rozděleny na části. Na Obr. 44 je ukázána jedna z šesti částí odlitku č. 3. Dílům byly vytvořeny středící body (lze vidět na Obr. 44 v dolní a pravé části) kvůli lepší návaznosti a přesnosti finálních ploch.



Obr. 44 Část modelu odlitku v prostředí 3D tiskového sliceru

Po vytištění a seskládání jednotlivých kusů modelu byl model odlitku slepen a následně zavoskován. Na Obr. 45 vlevo je možno vidět seskládaný a vystředěný model třetí osy, vpravo je pak možno vidět již slepený a zavoskovaný model. Voskování je provedeno kvůli zahlazení přechodů mezi lepenými částmi a ucpání mezer mezi jednotlivými částmi, aby se dobře vytvořil vytavitelný model odlitku. Kvůli podpěrám vzniklým při 3D tisku bylo potřeba některé z ploch také zahladit.



Obr. 45 Skládání, lepení a voskování 3D tištěného modelu

Jakmile byly modely slepeny a zavoskovány, následovalo vytváření vytavitelných modelů odlitků. Každý z vytavitelných modelů má minimálně 10 vrstev, tyto vytavitelné modely lze vidět na Obr. 46. Je možné si všimnout vtokových soustav (červeně zakroužkovány) a také technologických vzpěr u odlitků 5 a 6 (zeleně zakroužkovány).



Obr. 46 Vytavitelné modely

Po vytvoření vytavitelných modelů následuje samotné odlévání odlitek, to je možné vidět na Obr. 47 vlevo, vpravo je pak možno vidět již odlitý model třetí osy. Jak bylo již zmíněno, odlitky mají vtokové soustavy, které bylo potřeba po lití odstranit.



Obr. 47 Odlévání odlitek

V poslední řadě bylo odlité díly potřeba obrobit a nalakovat. Obrábění a lakování bylo provedeno na základě výkresové dokumentace, která je jednou z příloh, přičemž odlitky jsou vždy prvním dílem dané osy, tedy 010001, 020001 atp. Obrobený a lakovaný odlitek třetí osy je možno vidět na Obr. 48. Stejně jako odlitek 3 bylo zpracováno dalších pět odlitek.



Obr. 48 Obrobený a lakovaný odlitek

7.2.2 Obrobky

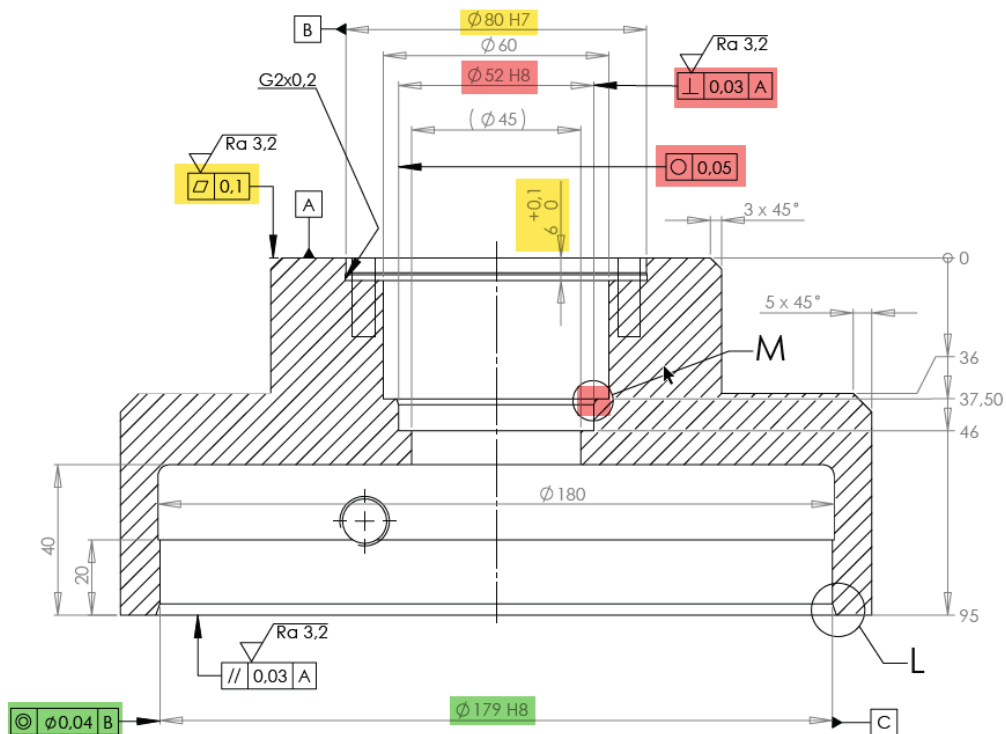
Na základě výkresové dokumentace byly vyrobeny ostatní, neodlévané, součásti. Obrobených součástí je v tomto projektu dohromady 36 a je možno je rozdělit do následujících kategorií:

- Adaptéry motorů
- Pastorky motorů
- Kryty převodů
- Ostatní

Obecně byla pro všechny obráběné součásti předepsána povrchová úprava černění.

Adaptéry motorů

Na Obr. 49 je možno vidět adaptér druhého motoru, na kterém budou objasněny základní úvahy nad konstrukcí těchto držáků motorů. Žlutě znázorněny jsou rozměry a tolerance týkající se motoru, zde je možno vidět díru H7, která středí motor se středícím průměrem j6, zároveň je předepsána rovinnost dosedací plochy pro motor. Zeleně je znázorněno středění tohoto adaptéru do převodovky, která má středící průměr 179 h7. Je předepsána souosost průměrů 80 a 179 kvůli přesnosti přenesení krouticího momentu z motoru na převodovku. Červeně znázorněny jsou parametry týkající se hřídelového těsnění této osy. Zde je od výrobce předepsána kolmost průměru, který přenáší moment, a zároveň je předepsána kruhovitost. Pro hřídelová těsnění je obecně vhodná díra vnějšího průměru H8, aby se zaručilo správné vystředění a těsnost hřídelového těsnění při jeho lisování. Jako poslední je znázorněna oblast detailu M, zde je možno vidět zkosení 1,5x20°, kvůli usnadnění lisování hřídelového těsnění.



Obr. 49 Adaptér motoru druhé osy

Pastorky motorů

Jak bylo zmíněno v kapitole 7.1.1, hřídelky jsou řešeny jako svěrné spoje kvůli nemožnosti úpravy hřídelí motorů. Všechny pastorky, kromě první osy, jsou dle výrobce převodovek, společnosti Nabtesco, s korekcí. Moduly, počty zubů a korekce jednotlivých pastorků jsou sepsány v Tab. 28.

Tab. 28 Ozubení jednotlivých os

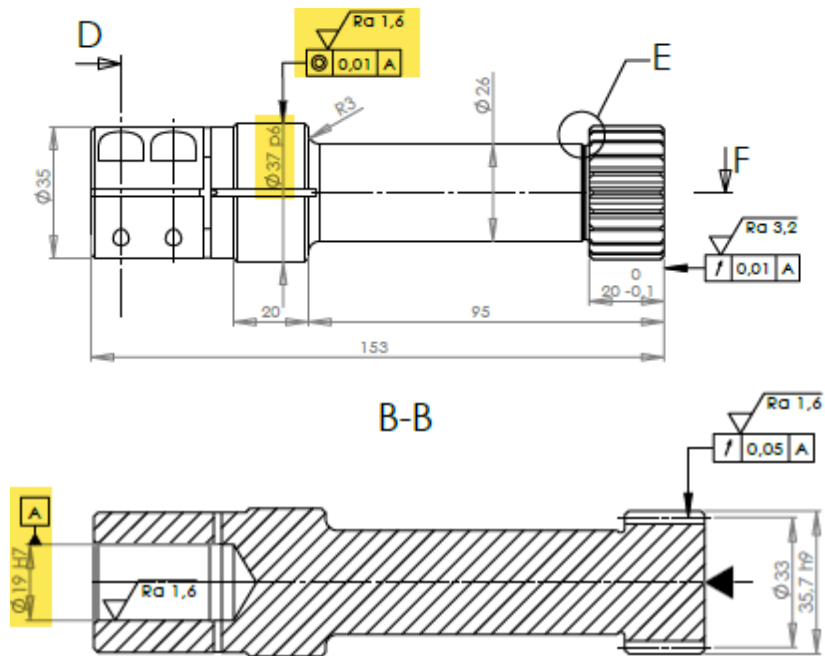
| Osa | Modul | Počet zubů | Korekce |
|-----|-------|------------|---------|
| 1 | 1.5 | 22 | 0 |
| 2 | 1.5 | 12 | +0.5 |
| 3 | 1.5 | 15 | +0.5 |
| 4 | 1.5 | 15 | +0.5 |
| 5 | 1 | 16 | +0.5 |
| 6 | 0.8 | 18 | +0.25 |

Třída přesnosti, stejně jako materiál, jsou také předepsány výrobcem. Materiál je dle výrobce předepsán SCM415, což je označení oceli dle japonské průmyslové normy JIS, tento materiál má v Evropě označení EN 1.7262 (dle DIN 15CrMo5), tedy ocel třídy 15. Byla použita ekvivalentní ocel třídy 15, a to EN 1.7707+QT (ČSN 15 330), což je ocel vhodná pro nitridaci, která byla u těchto hřídelí provedena. Porovnání parametrů těchto ocelí je zobrazeno v Tab. 29, kde je možno vidět větší maximální hodnoty meze kluzu a meze pevnosti u použité oceli.

Tab. 29 Porovnání ocelí [59][60]

| Označení oceli | Mez pevnosti [MPa] | Mez kluzu [MPa] |
|----------------------|--------------------|-----------------|
| EN 1.7262 (15CrMo5) | 630-940 | 440 |
| EN 1.7707 (30CrMoV9) | min. 900 | 700 |

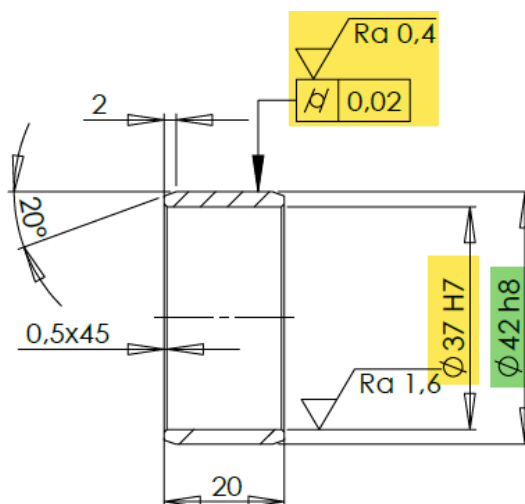
Kvůli technologické náročnosti výroby svěrného spoje bylo nutné přidat lisovaný kroužek, po kterém může jezdit hřídelové těsnění. Tyto kroužky jsou cementovány do hloubky 0,4-0,6 mm a kaleny na 58-61 HRC. Na Obr. 50 je možné vidět, že průměr hřídele pastorku, na který je kroužek lisován, je navrhnuto s tolerancí p6, přičemž díra v kroužku je navrhnuta jako H7, tedy uložení s přesahem. Na průměr 37 je přidána geometrická tolerance souososti k průměru 19, což je průměr hřídele elektromotoru. Všechny relevantní rozměry a tolerance ohledně hřídelového těsnění jsou na Obr. 50 zvýrazněny.



Obr. 50 Pastorek první osy

U těchto hřídelí byla provedena povrchová úprava nitridace, ta byla u všech hřídelí na stejnou tvrdost a do stejné hloubky, přičemž tvrdost nitridovaného povrchu byla navržena na 650 HV s tolerancí 0, +100 HV a hloubka FHD byla navržena do 0,3 mm s tolerancí 0, +0,2.

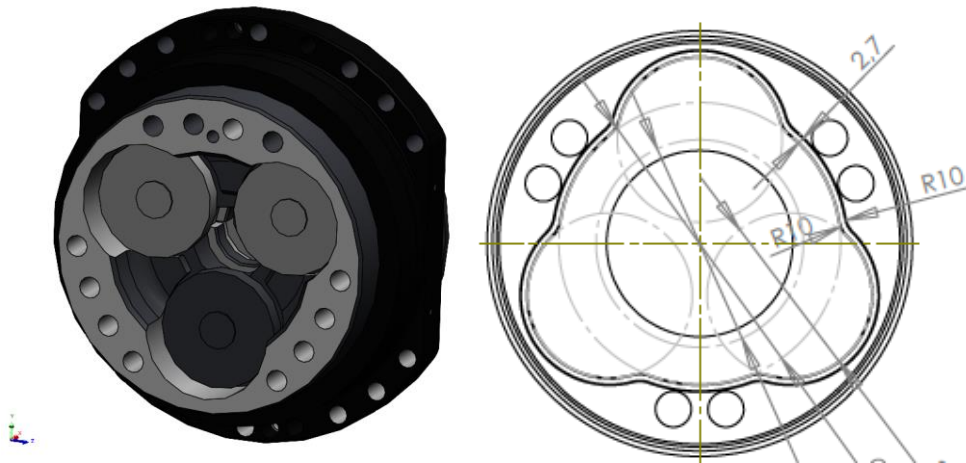
Na Obr. 51 je možno vidět kroužek, který je lisován na hřídel zobrazenou na Obr. 50. Jak bylo zmíněno, uložení s přesahem je navrženo p6/H7, zároveň zde byla zatolerována válcovitost, která vychází z dokumentace výrobce hřídelových těsnění. Stejně tak (podle katalogu výrobce) byla navržena i tolerance h8 u vnějšího průměru lisovaného kroužku. Dosedací plocha pro hřídelové těsnění je broušena na hodnotu drsnosti povrchu $Ra = 0,4$.



Obr. 51 Lisovaný kroužek na hřídel

Kryty motorů

V této kategorii jsou pouze dva obrobky, a to na třetí a čtvrtou osu. Na všech osách je těsnění nerotujících ploch provedeno pomocí o-kroužků, na zmíněných dvou osách to však bohužel provést nelze kvůli konstrukci čela převodovky. Byla proto navržena drážka, do které byla vložena o-kroužková těsnící nit'. Čelní plocha převodovky a finální tvar drážky pro o-kroužkovou těsnící nit' je možno vidět na Obr. 52.



Obr. 52 Čelní plocha převodovka a tvar drážky pro těsnění

8 VÝPOČTOVÁ ČÁST

V této části práce budou popsány kontrolní výpočty pro pastorky a hřídel páte osy, která přenáší i ohybový moment z ozubené řemenice. Pro kontrolní výpočty hřídeli je důležité znát vstupní síly a momenty, ty jsou vždy odvozeny od maximálního produkovatelného momentu motoru, výpočet těchto sil je tedy v této kapitole také popsán. V poslední řadě zde bude také provedena kontrola, zda motory v zabrzděném stavu udrží svým brzdným momentem hmotnost robota s koncovým závažím.

8.1 Kontrola navržených motorů

Princip výpočtu bude nastíněn na ose č. 2 a ose č. 5. Motory byly vybírány zejména tak, aby brzdný moment po převodu udržel váhu za danou osou. Tento výpočet je důležitý zejména u os 2, 3 a 5. U os 1, 4 a 6 působí síla v jiné rovině a je možno ji zanedbat. Na Obr. 53 je možno vidět plně natažený robot s maximálním, desetikilogramovým, závažím. Celková hmotnost, u níž musí být brzdný moment na ose 2 větší, je rovna součtu hmotností jednotlivých prvků za osou 2, celkově je tedy hmotnost rovna $m_{z2} = 118.9 \text{ kg}$. Tato hmotnost vyvolává sílu F_{z2} , jejíž velikost je vypočtena v rovnici (21).

$$F_{z2} = m_{z2} \cdot g = 118.9 \cdot 9.81 = 1\,166,4 \text{ N} \quad (21)$$

Kde:

| | | |
|----------|-------------|---|
| F_{z2} | [N] | Síla vyvolaná hmotností částí robota za druhou osou |
| m_{z2} | [kg] | Hmotnost částí robota za druhou osou |
| g | $[ms^{-2}]$ | Gravitační zrychlení |

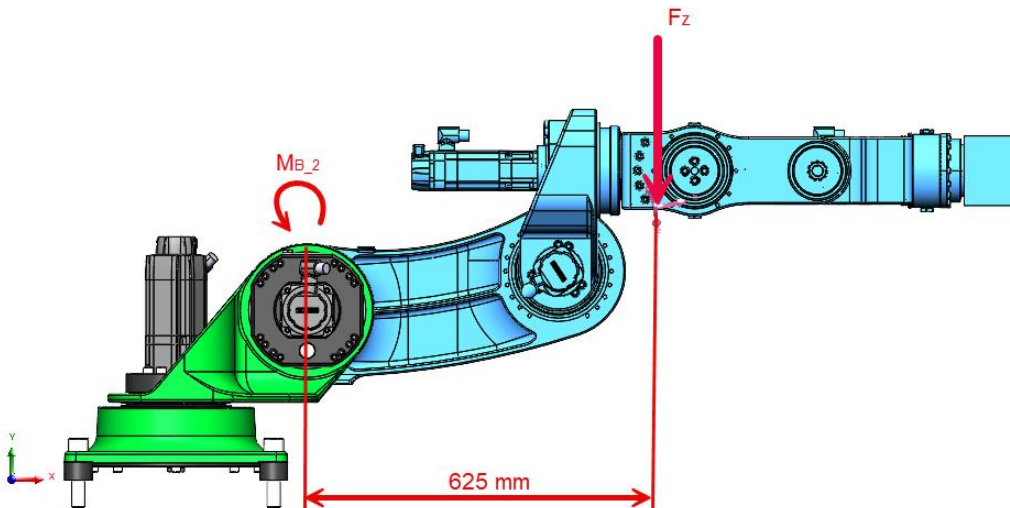
Síla F_z je umístěna v těžišti sečtených prvků, které je umístěno 625 mm za osou 2. Tato síla vyvolává vzhledem k ose 2 moment, který musí být menší, než brzdný moment. Výpočet momentu M_{z2} a porovnání s brzdným momentem na druhé ose M_{B_2} je možno vidět v rovnici (22).

$$M_{z2} = F_{z2} \cdot 0.625 = 1\,166,4 \cdot 0.625 = 729 \text{ Nm}$$

$$M_{B_2} = 1288 \text{ Nm} > M_{z2} \rightarrow \text{motor vyhovuje} \quad (22)$$

Kde:

| | | |
|-----------|------|--------------------------------|
| M_{z2} | [Nm] | Moment vyvolaný silou F_{z2} |
| M_{B_2} | [Nm] | Brzdný moment osy 2 |



Obr. 53 Působení síly F_z za osou dva

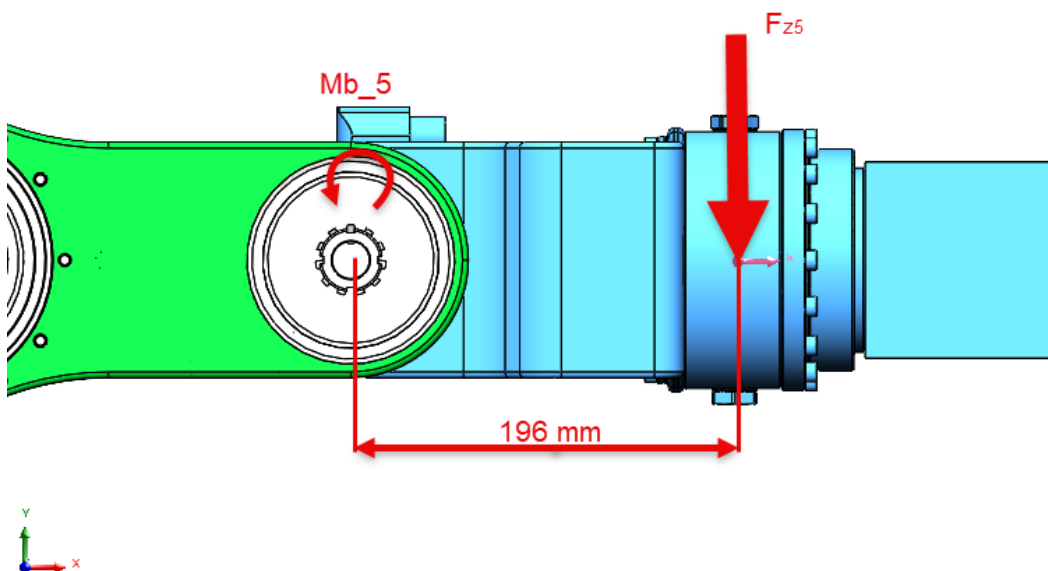
Stejně jako u osy 2 je proveden kontrolní výpočet brzdy u osy č. 5. Tento výpočet je možno vidět v rovnici (23). Na Obr. 54 je možno vidět působíště a rameno síly F_{z5} .

$$M_{z5} = F_{z5} \cdot 0.625 = (m_{z5} \cdot g) \cdot 0.196 = (22.28 \cdot 9.81) \cdot 0.196 = 42,83 \text{ Nm}$$

$$M_{B_5} = 239 \text{ Nm} > M_{z5} \rightarrow \text{motor vyhovuje} \quad (23)$$

Kde:

| | | |
|-----------|------|--|
| F_{z5} | [N] | Síla vyvolaná hmotností částí robotu za pátou osou |
| M_{z5} | [Nm] | Moment vyvolaný silou F_{z5} |
| M_{B_5} | [Nm] | Brzdňý moment osy 5 |
| m_{z5} | [kg] | Hmotnost částí robotu za pátou osou |



Obr. 54 Působení síly F_{z5} na osu pět

8.2 Pastorky

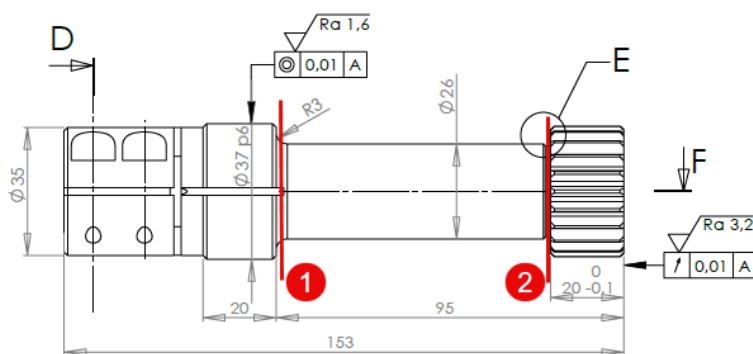
Pastorky jsou namáhány čistě na krut, jelikož konstrukce převodovky (planetový vstup na převodovku – popsáno v kap. 2.4.2 Cykloidní převodovky) vykrátí působící ohybové síly. Dovolené napětí v krutu je počítáno jako 0,6násobek dovoleného napětí v tahu, které je ekvivalentní mezi kluzu materiálu hřídele ponížené o bezpečnost (v tomto případě volena jako 2), tento výpočet je možno vidět v rovnici (24). V tomto výpočtu nebude brána v potaz nitridace hřídelí a bude počítáno čistě s mezí kluzu samotného materiálu. [60][61]

$$\tau_{Dk} = 0,6 \cdot \sigma_{Dt} = 0,6 \cdot \frac{R_{e_pastorek}}{k_{pastorek}} = 0,6 \cdot \frac{700}{2} = 210 \text{ MPa} \quad (24)$$

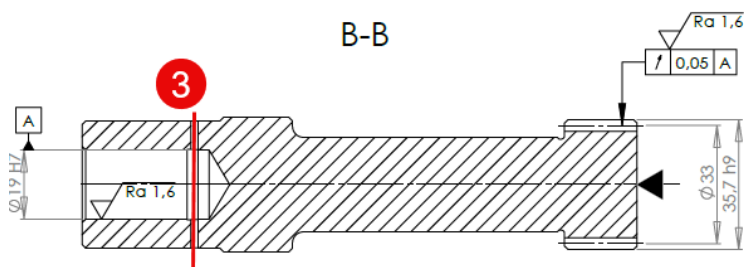
Kde:

| | | |
|-------------------|-------|--|
| τ_{Dk} | [MPa] | Dovolené napětí v krutu |
| σ_{Dt} | [MPa] | Dovolené napětí v tahu |
| $R_{e_pastorek}$ | [MPa] | Mez kluzu materiálu pastorku |
| $k_{pastorek}$ | [-] | Bezpečnost pro výpočet dovoleného napětí v krutu |

Následující výpočet bude proveden pro první osu robotu, tedy pro pastorek zobrazen na Obr. 50 a na Obr. 55/Obr. 56, kde je možno vidět nebezpečné průřezy, které byly počítány. Krouticí moment, který je na pastorek přiveden ze servopohonu, může být maximálně $M_{k_pastorek} = 23 \text{ Nm}$, tato hodnota bude více rozebrána (spolu s maximálními hodnotami dalších os) v kapitole 9 (Elektrotechnika robotu). Nejprve je zapotřebí vypočítat modul průřezu v krutu pro všechny nebezpečné průřezy, tento výpočet je možno vidět v rovnici (25).



Obr. 55 Nebezpečné průřezy pastorku první osy



Obr. 56 Nebezpečné průřezy pastorku první osy v řezu

$$W_{k1} = \frac{\pi \cdot d_1^3}{16} = \frac{\pi \cdot 26^3}{16} = 3451,04 \text{ mm}^3$$

$$W_{k2} = \frac{\pi \cdot d_2^3}{16} = \frac{\pi \cdot 25^3}{16} = 3067,97 \text{ mm}^3 \quad (25)$$

$$W_{k3} = \frac{\frac{\pi}{32}(D_3^4 - d_3^4)}{\frac{D_3}{2}} = \frac{\frac{\pi}{32}(35^4 - 19^4)}{\frac{35}{2}} = 7687,39 \text{ mm}^3$$

Kde:

| | | |
|----------------|--------------------|--|
| $W_{k1,k2,k3}$ | [mm ³] | Modul průřezu v krutu pro nebezp. průřez 1,2,3 |
| $d_{1,2,3}$ | [mm] | Průměr nebezpečného průřezu 1,2,3 |
| D_3 | [mm] | Velký průměr nebezpečného průřezu 3 |

Napětí v krutu je pak spočítáno podle rovnice (26), tedy dosazením krouticího momentu a modulu průřezu v krutu. Aby výsledné napětí vyšlo v jednotkách megapascal a ne pascal, byl krouticí moment převeden na newton milimetry.

$$\tau_{k1} = \frac{M_{k_pastorek}}{W_{k1}} = \frac{23\,000}{3451,04} = 6,66 \text{ MPa}$$

$$\tau_{k2} = \frac{M_{k_pastorek}}{W_{k2}} = \frac{23\,000}{3068,97} = 7,49 \text{ MPa} \quad (26)$$

$$\tau_{k3} = \frac{M_{k_pastorek}}{W_{k3}} = \frac{23\,000}{7687,39} = 3 \text{ MPa}$$

Kde:

| | | |
|-------------------|-------|---|
| $\tau_{k1,2,3}$ | [MPa] | Napětí v krutu v nebezp. průřezu 1,2,3 |
| $M_{k_pastorek}$ | [Nmm] | Max. krouticí moment elektromotoru, který je na hřídel přiveden |

V rovnici (27) jsou vypočítány poměry, díky kterým je možno určit koncentrátoři napětí. Tyto poměry jsou dva, poloměr ku malému průměru a velký ku malému průměru, a jsou počítány pouze pro první průřez, jelikož je nejkritičtější.

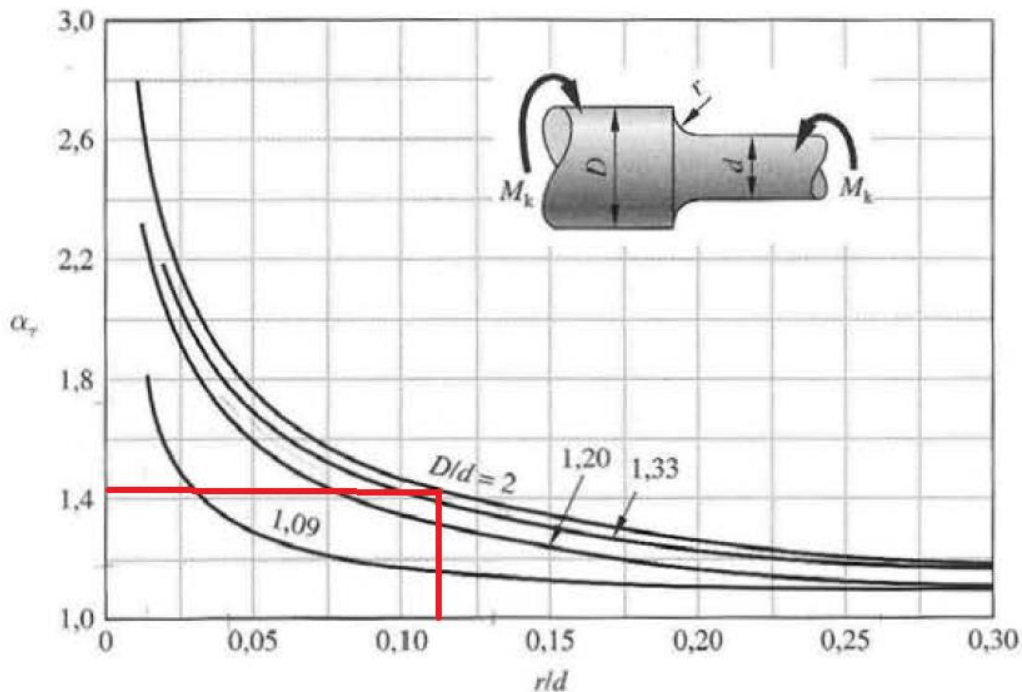
$$\frac{D_1}{d_1} = \frac{37}{26} = 1,42$$

$$\frac{r_1}{d_1} = 0,115 \quad (27)$$

Kde:

| | | |
|-------|------|-------------------------------------|
| D_1 | [mm] | Velký průměr nebezpečného průřezu 1 |
| d_1 | [mm] | Průměr nebezpečného průřezu 1 |

Na Obr. 57 je na základě poměrů vypočítaných v rovnici (27) možno určit součinitel koncentrace v krutu $\alpha_{k_pastorek}$. Po dosazení vychází tento součinitel přibližně 1,42.



Obr. 57 Graf pro určení součinitele koncentrace v krutu **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů.**

Výsledné napětí které je přítomno v přechodu mezi průměry 26 a 37 je tedy dle rovnice (28).

$$\tau_{kskut1} = \tau_{k1} \cdot \alpha_{k_pastorek} = 6,66 \cdot 1,42 = 9,46 \text{ MPa} < \tau_{Dk} \rightarrow \text{vyhovuje} \quad (28)$$

Kde:

| | | |
|------------------------|-------|---|
| τ_{kskut1} | [MPa] | Skutečné napětí v krutu v nebezp. průřezu 1 |
| $\alpha_{k_pastorek}$ | [-] | Tvarový součinitel pro krut pastorku |

Z poslední rovnice (28) je možno usoudit, že krut je pro tyto pastorky zanedbatelný.

8.3 Hřídel páté osy

Jelikož tato hřídel přenáší poměrně značný krouticí i ohybový moment od řemenového převodu, byla zkontrolována vzhledem k meznímu stavu pružnosti. Prvním krokem tohoto výpočtu je stanovit dovolené napětí v krutu a ohybu na základě meze kluzu materiálu. Mez kluzu nebude stejná jako u pastorků, jelikož hřídel je vyrobena z materiálu EN 1.1191 (C45E). Mez kluzu pro tento materiál je $R_{e_hřidelka} = 305 \text{ MPa}$. [63]

Před samotnou kontrolou vzhledem k MSP je potřeba určit ohybovou sílu, která bude působit na hřídel kvůli řemenovému převodu. Tato síla je dopočitatelná z momentu, který je tvořen elektromotorem a následně zpřevodován převodovkou páté osy. Maximální

velikost momentu je stejně jako u pastorku dána maximální velikostí momentu, který servomotor dokáže krátkodobě vygenerovat, v tomto případě je to $M_{k_hřidel_přiv} = 4,5 \text{ Nm}$. Jak již bylo řečeno u pastorků, tyto parametry motorů budou více probrány v kapitole 9. Maximální moment po převodu páté osy je dle rovnice (29):

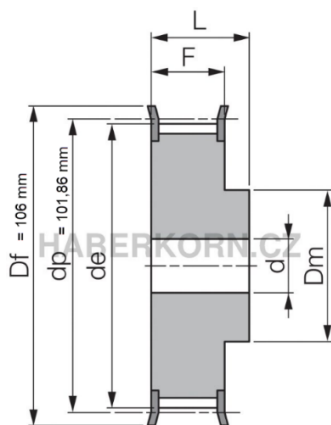
$$M_{k_hřidel_max} = M_{k_hřidel_přiv} \cdot i_5 = 4,5 \cdot 126 = 567 \text{ Nm} \quad (29)$$

Kde:

| | | |
|-----------------------|------|---|
| $M_{k_hřidel_max}$ | [Nm] | Max. krouticí moment vygenerovaný pátou osou |
| $M_{k_hřidel_přiv}$ | [Nm] | Max. krouticí moment, který je na hřídel přiveden |
| i_5 | [-] | Převod páté osy |

Jelikož je pátá osa významně předimenzovaná a není třeba využívat celých 567 Nm, které tato osa dokáže vygenerovat, byl stanoven maximální moment, který bude od převodovky páté osy působit. Tento moment je poloviční, tedy $M_{k_dim} = 284 \text{ Nm}$, a na tento moment byla dimenzována i hřídel páté osy.

Rozměry zvolených ozubených řemenic je možno vidět na Obr. 58. V této diplomové práci jsou zvoleny dvě řemenice stejného typu (tedy převod 1:1), jelikož není žádoucí krouticí moment měnit, ale pouze přenést. Výpočtový průměr, na kterém bude působit ohybová síla, je dle výrobce $d_p = 101,9 \text{ mm}$. [64]



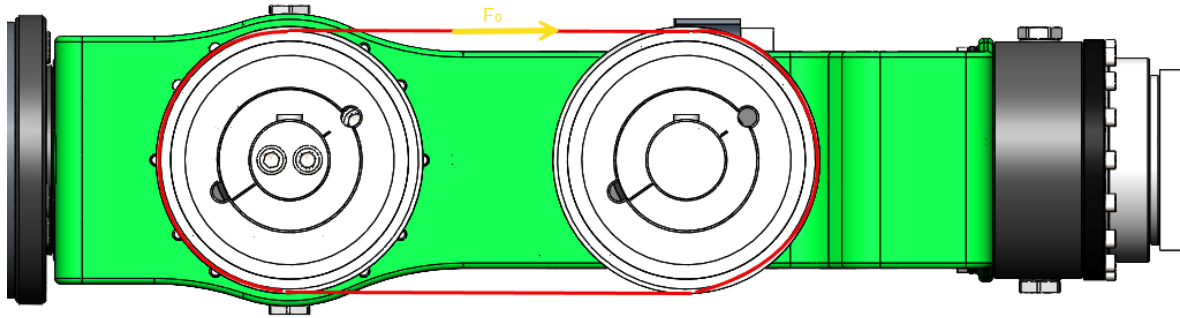
Obr. 58 Parametry ozubených řemenic [64]

Působení obvodové síly v řemenu je znázorněno na Obr. 59. Velikost této síly je spočítána v rovnici (30) a vychází z upraveného momentu spočítaného v rovnici (29). [64]

$$F_o = \frac{2 \cdot M_{k_dim}}{d_p} = \frac{2 \cdot 284}{0,102} = 5\,568,6 \text{ N} \quad (30)$$

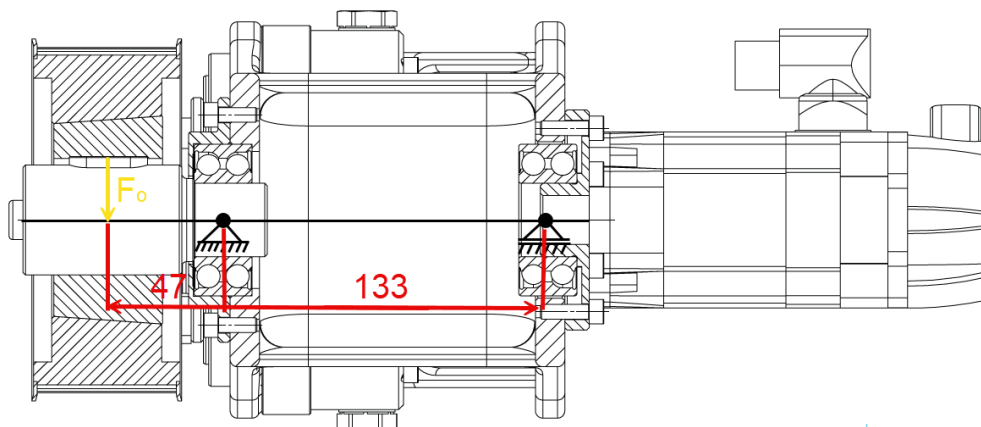
Kde:

| | | |
|--------------|------|--|
| F_o | [N] | Obvodová síla na ozubeném řemenu |
| M_{k_dim} | [Nm] | Krouticí moment, na který byla dimenzována hřídel páté osy |
| d_p | [m] | Výpočtový průměr ozubené řemenice |



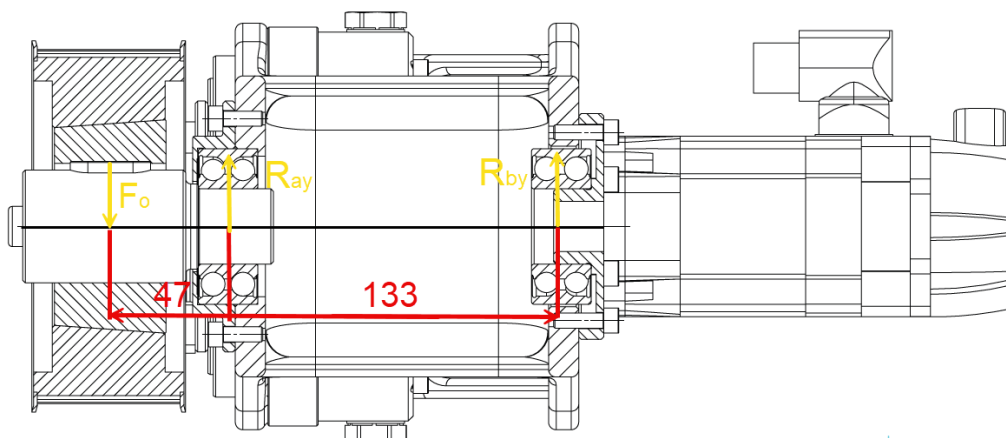
Obr. 59 Obvodová síla na ozubené řemenici

V dalším kroku je potřeba vyjádřit výsledné vnitřní účinky (VVÚ) na hřídeli. Působení síly F_o (jejíž velikost je spočtena v rovnici 30) na hřídel páté osy je zobrazeno na Obr. 60, kde je také možno vidět uložení hřídele. Hřídel je fyzicky uložena pouze v jednom ložisku, přičemž druhé ložisko uložení hřídele je na druhé straně odlitku 5. Tato dvě ložiska představují vazby, které omezují stupně volnosti hřídele.



Obr. 60 Uložení hřídele a působení obvodové síly

Uvolněné vazby je možno vidět na Obr. 61. Následně jsou na základě tohoto uvolnění určeny reakce v obou ložiscích, tento výpočet je možno vidět v rovnici (31) a rovnici (32). Souřadný systém os, hlavně osy y , je brán jako negativní směr síly F_o .



Obr. 61 Uvolněné vazby na hřídeli

$$\Sigma F_y = 0 : -F_O + R_{ay} + R_{by} = 0$$

$$R_{by} = F_O - R_{ay} = 5\,568,6 - 7\,536,5 = -1\,967,9 \text{ N} \quad (31)$$

$$\Sigma M_B = 0 : F_O \cdot 0,18 - R_{ay} \cdot 0,133 = 0$$

$$R_{ay} = \frac{F_O \cdot 0,18}{0,14} = \frac{5\,568,6 \cdot 0,18}{0,133} = 7\,536,5 \text{ N} \quad (32)$$

Kde:

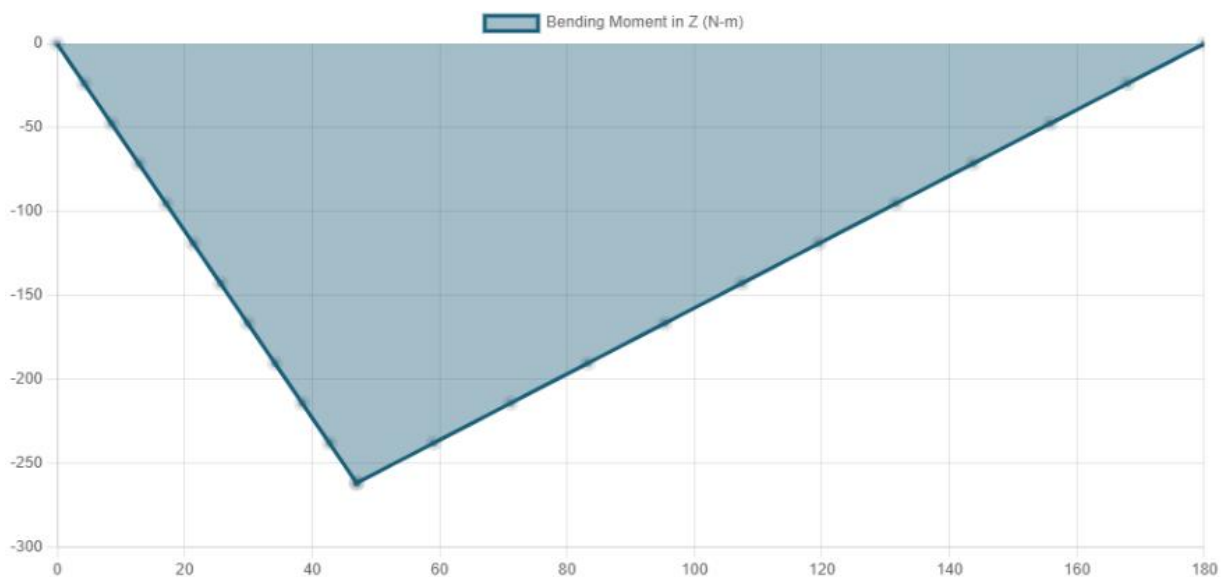
| | | |
|----------|-----|----------------------------------|
| F_O | [N] | Obvodová síla na ozubeném řemenu |
| R_{ay} | [N] | Reakce ložiska levého uložení |
| R_{by} | [N] | Reakce ložiska pravého uložení |

Jelikož vyšla reakce B záporně, bude síla působit opačným směrem. Výsledné vnitřní účinky (průběh ohybového momentu a sil) jsou zobrazeny na Obr. 62 a Obr. 63, přičemž maximální ohybový moment, který se nahází v působišti reakce R_{ay} , je vypočítán v rovnici (33).

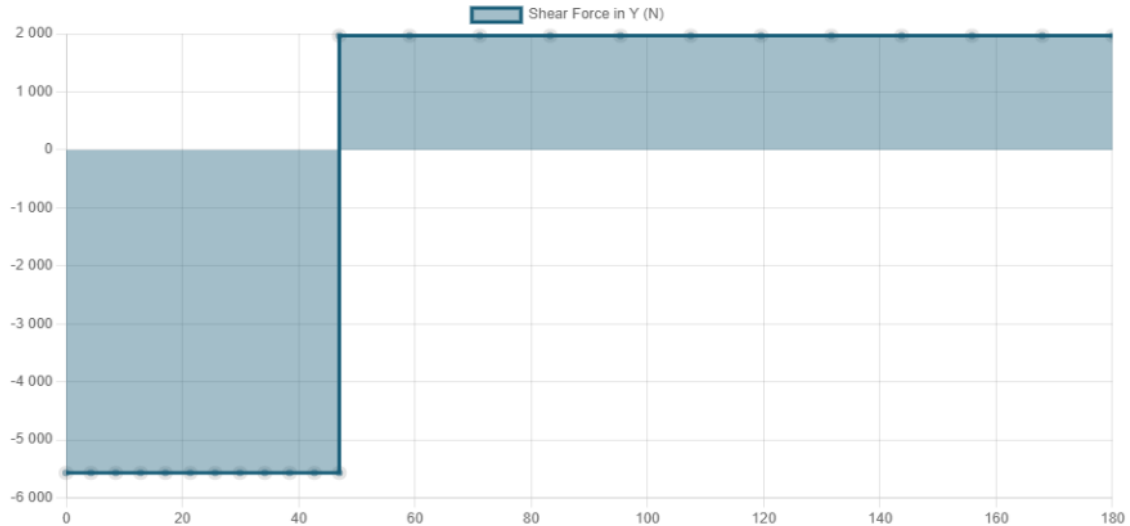
$$M_{O_{\text{hřídél}}} = R_{by} \cdot 0,133 = F_O \cdot 0,047 = 1\,967,9 \cdot 0,133 = 261,7 \text{ Nm} \quad (33)$$

Kde:

| | | |
|-------------------------|------|---|
| $M_{O_{\text{hřídél}}}$ | [Nm] | Max. ohybový moment v působišti síly R_{ay} |
|-------------------------|------|---|



Obr. 62 Průběh ohybového momentu



Obr. 63 Průběh sil

Jelikož je hřídel namáhána zároveň krutem i ohybem, je zapotřebí vypočítat redukované napětí, to je vypočítáno dle teorie HMH. Z tohoto redukovaného napětí je možno vypočíst nejmenší možný průřez hřídele. Tento výpočet je možno vidět v rovnici (34).

$$\sigma_{red} = \sqrt{\sigma_{O_max}^2 + 3\tau_{K_max}^2}$$

$$\frac{R_{e_hřidelka}}{k_{hřidelka}} = \sqrt{\left(\frac{M_{O_hřidel}}{W_O}\right)^2 + 3\left(\frac{M_{k_dim}}{W_k}\right)^2} = \sqrt{\left(\frac{32 \cdot M_{O_hřidel}}{\pi \cdot d_{min}^3}\right)^2 + \left(\frac{16 \cdot M_{k_dim}}{\pi \cdot d_{min}^3}\right)^2}$$

Po úpravách

(34)

$$d_{min} = \sqrt[6]{\frac{1024 \cdot M_{O_hřidel}^2 \cdot k_{hřidelka}^2 + 256 \cdot M_{k_dim}^2 \cdot k_{hřidelka}^2}{R_{e_hřidelka}^2 \cdot \pi^2}}$$

$$= \sqrt[6]{\frac{1024 \cdot 261700^2 \cdot 1.2^2 + 256 \cdot 284000^2 \cdot 1.2^2}{305^2 \cdot \pi^2}}$$

$$d_{min} = 22,85 \text{ mm} < 30 \text{ mm} \rightarrow \text{vyhovuje}$$

Kde:

| | | |
|-------------------|-------|--|
| $R_{e_hřidelka}$ | [MPa] | Max. ohybový moment v působišti síly R_{ay} |
| $k_{hřidelka}$ | [-] | Bezpečnost hřídele páte osy |
| $M_{O_hřidel}$ | [Nmm] | Max. ohybový moment v působišti síly R_{ay} |
| M_{k_dim} | [Nmm] | Krouticí moment, na který byla dimenzována hřídel páte osy |
| d_{min} | [mm] | Minimální průměr hřídele páte osy |

8.3.1 Kontrola koncentrátoru napětí

Podle rovnice (35) a rovnice (36) je možno určit nominální napětí v ohybu a krutu v místě přechodu průměrů, v tomto místě je ohybový moment dle VVU $M_{O_konc} = 194,9 \text{ Nm}$ a krouticí moment $M_{K_konc} = 284 \text{ Nm}$.

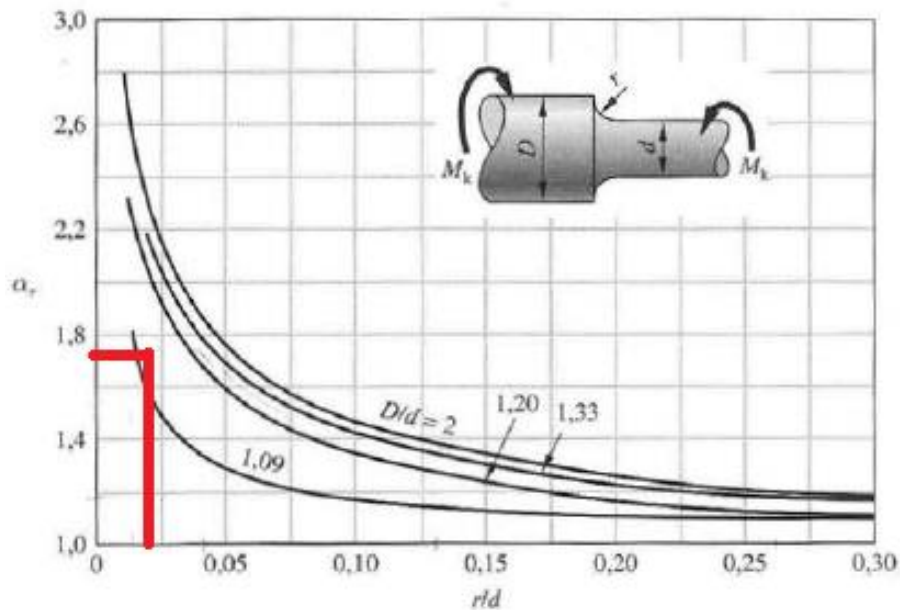
$$\sigma_{O_nom,hřidelka} = \frac{M_{O_konc}}{W_{O_konc}} = \frac{32 \cdot M_{O_konc}}{\pi d_{hřidelka}^3} = \frac{32 \cdot 194\,900}{\pi \cdot 30^3} = 73,5 \text{ MPa} \quad (35)$$

$$\tau_{K_nom,hřidelka} = \frac{M_{K_konc}}{W_{K_konc}} = \frac{16 \cdot M_{K_dim}}{\pi d_{hřidelka}^3} = \frac{16 \cdot 284\,000}{\pi \cdot 30^3} = 53,6 \text{ MPa} \quad (36)$$

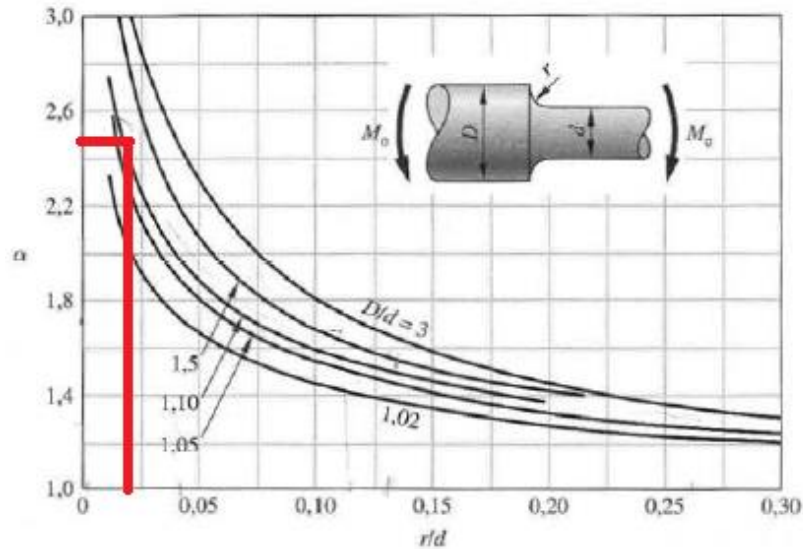
Kde:

| | | |
|----------------------------|-------|---|
| $d_{hřidelka}$ | [mm] | Průměr hřídele páte osy v nebezpečném průřezu |
| $\sigma_{O_nom,hřidelka}$ | [MPa] | Nominální napětí v ohybu hřídele páte osy v nebezp. průřezu |
| $\tau_{K_nom,hřidelka}$ | [MPa] | Nominální napětí v krutu hřídele páte osy v nebezp. průřezu |
| M_{O_konc} | [Nmm] | Ohybový moment v nebezpečném průřezu |
| M_{K_dim} | [Nmm] | Krouticí moment, na který byla dimenzována hřídel páte osy |

Jelikož je hřídelka namáhána kombinovaně, je pro koncentrátor napětí třeba určit tvarové součinitele jak pro ohyb, tak pro krut, tyto součinitele jsou určeny dle grafu na Obr. 64 a Obr. 65. Pro určení součinitelů jsou zapotřebí poměry, které jsou určeny dle rovnice (37) a rovnice (38).



Obr. 64 Grafické určení tvarového součinitele pro nahání krutem



Obr. 65 Grafické určení tvarového součinitele pro nahání ohybem

$$\frac{d_{\text{horní_hřidelka}}}{d_{\text{hřidelka}}} = \frac{34}{30} = 1,13 \quad (37)$$

$$\frac{r_{\text{hřidelka}}}{d_{\text{hřidelka}}} = \frac{0,5}{30} = 0,017 \quad (38)$$

Kde:

| | | |
|------------------------------|------|--|
| $d_{\text{horní_hřidelka}}$ | [mm] | Větší průměr nebezpečného průřezu hřídele páté osy |
| $d_{\text{hřidelka}}$ | [mm] | Průměr hřídele páté osy v nebezpečném průřezu |
| $r_{\text{hřidelka}}$ | [mm] | Poloměr zaoblení hřídele páté osy |

Podle rovnice (37) a rovnice (38) byl určen tvarový součinitel $\alpha_{O_hřidelka} = 2,5$ pro ohyb a $\alpha_{K_hřidelka} = 1,6$ pro krut, a je tedy nyní možné určit skutečné napětí, to je určeno dle rovnice (39) a rovnice (40).

$$\sigma_{O_skut,hřidelka} = \sigma_{nom,hřidelka} \cdot \alpha_{O_hřidelka} = 73,5 \cdot 2,5 = 183,8 \text{ MPa} \quad (39)$$

$$\tau_{K_skut,hřidelka} = \tau_{K_nom,hřidelka} \cdot \alpha_{K_hřidelka} = 53,6 \cdot 1,6 = 85,8 \text{ MPa} \quad (40)$$

Kde:

| | | |
|-----------------------------|-------|---|
| $\sigma_{O_skut,hřidelka}$ | [MPa] | Skutečné napětí v ohybu hřídele páté osy v nebezp. průřezu |
| $\tau_{K_skut,hřidelka}$ | [MPa] | Skutečné napětí v krutu hřídele páté osy v nebezp. průřezu |
| $\sigma_{nom,hřidelka}$ | [MPa] | Nominální napětí v ohybu hřídele páté osy v nebezp. průřezu |
| $\tau_{K_nom,hřidelka}$ | [MPa] | Nominální napětí v krutu hřídele páté osy v nebezp. průřezu |
| $\alpha_{O_hřidelka}$ | [-] | Tvarový součinitel pro ohyb hřídele páté osy |
| $\alpha_{K_hřidelka}$ | [-] | Tvarový součinitel pro krut hřídele páté osy |

Redukované napětí je vypočítáno dle teorie HMM v rovnici (41).

$$\sigma_{red_hřidelka} = \sqrt{\sigma_{O_{skut,hřidelka}}^2 + 3\tau_{K_{skut,hřidelka}}^2} = \sqrt{183,8^2 + 3 \cdot 85,8^2} = 236,4 \text{ MPa} \quad (41)$$

Kde:

$\sigma_{red_hřidelka}$ [MPa] Redukované napětí hřídele páté osy v nebezp. průřezu

Podle rovnice (42) je pak možno určit bezpečnost hřídele vzhledem k MSP. Byla zvolena bezpečnost $k_{hřidelka} = 1,2$.

$$k_{MSP_hřidelka} = \frac{R_{e_hřidelka}}{\sigma_{red_hřidelka} \cdot k_{hřidelka}} = \frac{305}{288,1 \cdot 1,2} = 1,23 \quad (42)$$

Kde:

$k_{MSP_hřidelka}$ [-] Bezpečnost hřídele páté osy vzhledem k MSP

$R_{e_hřidelka}$ [MPa] Mez kluzu materiálu hřídele páté osy

$k_{hřidelka}$ [-] Bezpečnost hřídele páté osy

Je možno konstatovat, že hřídelka vyhovuje danému zatížení.

9 ELEKTROTECHNIKA ROBOTU

V této části práce budou popsány součásti, ze kterých je sestavena elektrotechnika robotu, do této kategorie spadají součásti v rozvaděči pracoviště, ale i motory na robotu. Pro tuto diplomovou práci byla vypracována elektrotechnická dokumentace, která je součástí příloh. V této dokumentaci je popsáno celkové zapojení rozvaděče ovládajícího jak robot, tak bezpečnostní okruhy robotizovaného pracoviště.

9.1 Výběr motorů

Motory, které byly použity na robotu, jsou sepsány v Tab. 30. Jak již bylo řečeno a spočítáno v kapitole 8, motory vždy musí unést hmotnost tvořenou díly za danou osou a závaží. Je možno konstatovat, že jak navržené motory, tak převodovky jsou předimenzované na robot s nosností 10 kg. Motory mají až na motor čtvrté osy vždy 24bitový absolutní enkodér. Motor na čtvrté ose má pouze 20bitový, dynamika motoru je však stejná jako u motoru stejné řady na třetí ose. U každého z vybraných motorů jsou v Tab. 30 zapsány tři momenty, a to točivý moment v klidu, jmenovitý a maximální. Jak implikuje název, točivý moment v klidu je moment, který je potřeba vyvinout k otočení hřídele v klidovém stavu motoru. Tyto motory jsou však opatřeny brzdami, tudíž je pro roztočení motoru v klidovém stavu potřeba vyvinout moment větší než držící moment brzdy, který je v Tab. 30 také zahrnut. Jmenovitý moment je točivý moment, který je měřen při jmenovitých otáčkách, a poslední, maximální točivý moment, je moment, který je maximálně motor schopen vyvinout. V Tab. 31 jsou pak zapsány čtyři zmíněné momenty na výstupu z převodovky, tudíž zvýšené o převodový poměr.

Tab. 30 Použité motory a jejich parametry [65][66][67][68]

| Osa | Motor | Převodovka | Převodový poměr [-] | Moment v klidu [Nm] | Jmenovitý moment [Nm] | Maximální moment [Nm] | Brzdny moment [Nm] |
|-----|--------------------|---------------|---------------------|---------------------|-----------------------|-----------------------|--------------------|
| 1 | 1FT7044-1AF71-1CH1 | RV 127F/97.5 | 97.5 | 5 | 4.3 | 23 | 8 |
| 2 | 1FT7044-1AF71-1CH1 | RV 100N/161 | 161 | 5 | 4.3 | 23 | 8 |
| 3 | 1FK7034-2AK71-1CH1 | RV 70F/125.8 | 125.8 | 1.6 | 1 | 6.5 | 1,9 |
| 4 | 1FK7034-2AK71-1RH1 | RV 70F/125.8 | 125.8 | 1.6 | 1 | 6.5 | 1,9 |
| 5 | 1FK7032-2AK71-1CH1 | RV 42N/126 | 126 | 1.1 | 0.8 | 4.5 | 1,9 |
| 6 | 1FK7032-2AK71-1CH1 | RV 25N/107.66 | 107.66 | 1.1 | 0.8 | 4.5 | 1,9 |

Tab. 31 Momenty na výstupu z převodovek

| Moment na výstupu v klidu | Moment na výstupu maximální | Moment na výstupu jmenovitý | Moment brzdny |
|--|--|---|--|
| $M_{0,1} = 4.4 \cdot 97.5 = 429 \text{ Nm}$ | $M_{MAX,1} = 23 \cdot 97.5 = 2243 \text{ Nm}$ | $M_{J,1} = 4.3 \cdot 97.5 = 419 \text{ Nm}$ | $M_{B,1} = 8 \cdot 97.5 = 780 \text{ Nm}$ |
| $M_{0,2} = 4.4 \cdot 161 = 708 \text{ Nm}$ | $M_{MAX,2} = 23 \cdot 161 = 3703 \text{ Nm}$ | $M_{J,2} = 4.3 \cdot 161 = 692 \text{ Nm}$ | $M_{B,2} = 8 \cdot 161 = 1288 \text{ Nm}$ |
| $M_{0,3} = 1.6 \cdot 125.8 = 201 \text{ Nm}$ | $M_{MAX,3} = 6.5 \cdot 125.8 = 818 \text{ Nm}$ | $M_{J,3} = 1 \cdot 125.8 = 126 \text{ Nm}$ | $M_{B,3} = 1.9 \cdot 125.8 = 239 \text{ Nm}$ |
| $M_{0,4} = 1.6 \cdot 125.8 = 201 \text{ Nm}$ | $M_{MAX,4} = 6.5 \cdot 125.8 = 818 \text{ Nm}$ | $M_{J,4} = 1 \cdot 125.8 = 126 \text{ Nm}$ | $M_{B,4} = 1.9 \cdot 125.8 = 239 \text{ Nm}$ |
| $M_{0,5} = 1.1 \cdot 126 = 139 \text{ Nm}$ | $M_{MAX,5} = 4.5 \cdot 126 = 567 \text{ Nm}$ | $M_{J,5} = 0.8 \cdot 126 = 101 \text{ Nm}$ | $M_{B,5} = 1.9 \cdot 126 = 239 \text{ Nm}$ |
| $M_{0,6} = 1.1 \cdot 107.7 = 118 \text{ Nm}$ | $M_{MAX,6} = 4.5 \cdot 107.7 = 485 \text{ Nm}$ | $M_{J,6} = 0.8 \cdot 107.7 = 86 \text{ Nm}$ | $M_{B,6} = 1.9 \cdot 107.7 = 205 \text{ Nm}$ |

9.2 Elektrické komponenty v rozvaděči

V této podkapitole budou okomentovány komponenty, které jsou použity v elektrickém rozvaděči.

9.2.1 Hlavní vypínač

Na základě normy ČSN EN IEC 60204-1 musí být použit hlavní vypínač, aby mohl odpojit elektrické zařízení od zdroje elektrické energie. Tato norma také specifikuje, že nulový vodič musí být součástí hlavního vypínače, tento vypínač musí tedy být čtyřpólový. Fyzicky byl použit vypínač od firmy ABB, který je možno vidět na Obr. 66.



Obr. 66 Hlavní vypínač elektrického rozvaděče

9.2.2 Pojistky

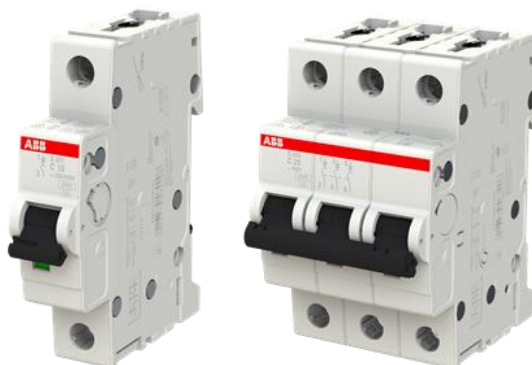
V této práci jsou z hlediska zapojení použity dva pojistkové odpínače a dvojice pojistky. Hlavní pojistky jsou připojeny za hlavním vypínačem a druhé pojistky jsou připojeny před tlumivkou. V zapojení jsou použity pojistkové odpínače od firmy ABB, které se liší pouze velikostí instalovaných pojistek, kde hlavní pojistkový odpínač E93/50 má velikost pojistek 14x51, druhý pojistkový odpínač, před tlumivkou, E93/32 má velikost pojistek 10x38. Hlavní pojistkový odpínač a do něj vložené pojistky je možno vidět na Obr. 67.



Obr. 67 Pojistkový odpínač a pojistka [69]

9.2.3 Jističe

Jsou zapojeny celkem tři jističe, všechny od firmy ABB. Hlavní, třífázový jistič, který je použit před stykači, je dimenzován na 25 A s vypínací charakteristikou typu C, která znamená možnost větších proudových rázů, jmenovitě 6- až 10násobek jmenovitého proudu jističe. Před zdrojem je použit 10A jistič, opět s vypínací charakteristikou typu C, a jako poslední je použit jistič k ochraně zdroje, který je dimenzován na jmenovitý proud 10 A s charakteristikou typu B, která znamená vypnutí pomocí zkratové spouště jističe při 3- až 6násobku jmenovitého proudu. Dva z použitých jističů je možno vidět na Obr. 68.



Obr. 68 Jističe ABB (vlevo 10 A pro jednu fázi, vpravo 25 A pro tři fáze) [70][71]

9.2.4 Zdroj

Jelikož je v obvodu potřeba napájet některé prvky jiným zdrojem napájení, než jaký jde ze sítě, je použit zdroj napájení. V obvodu je potřeba vždy 24 V stejnosměrného proudu a vždy jedna fáze. Byl vybrán zdroj, který má výstupní proud 10 A, který musí pokrýt činnost všech připojených zařízení, v tomto případě drive controlleru, tří měničů, smart line modulu, bezpečnostního PLC, bezpečnostního zámku a souhlasného povelového zařízení a dvou stykačů. Bezpečnostní PLC a stykače však mají zanedbatelnou hodnotu odběrového proudu, nebude s nimi tedy počítáno. Zdroj je možno vidět na Obr. 69. Součet odběru proudu zmíněných součástí je možno vidět v rovnici (43). [72][73][74][75][76][77]

$$\begin{aligned}
 I_{celk} &= I_{DrCont} + 3 \cdot I_{m\acute{e}ni\acute{c}h} + I_{SLM} + I_{Bezpz\acute{a}m} + I_{SouhlPovZa\acute{r}} \\
 I_{celk} &= 0.65 + 3 \cdot 0.9 + 0.8 + 0.375 + 0.1 = 4.625 \text{ A}
 \end{aligned}
 \tag{43}$$

Kde:

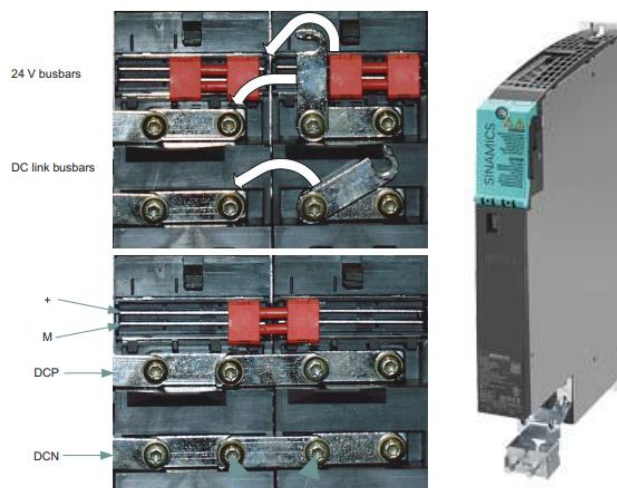
| | | |
|------------------------------|-----|---|
| I_{celk} | [A] | Celkový proud odebíraný všemi součástmi v rozvaděči |
| I_{DrCont} | [A] | Proud odebíraný drive controllerem |
| $I_{m\acute{e}ni\acute{c}h}$ | [A] | Proud odebíraný měničem |
| I_{SLM} | [A] | Proud odebíraný smart line modulem |
| $I_{Bezpz\acute{a}m}$ | [A] | Proud odebíraný bezpečnostním zámekem |
| $I_{SouhlPovZa\acute{r}}$ | [A] | Proud odebíraný souhlasným povelovým zařízením |



Obr. 69 Zdroj Murr elektronik [72]

9.2.5 Frekvenční měnič

V rozvaděči jsou dohromady tři měniče frekvence, které jsou použity k polohování motorů a řízení jejich výstupních otáček, kdy na každý měnič jsou připojeny dva motory. Díly od firmy Siemens, konkrétně měniče a smart line modul (v katalogích Siemens označovány jako „booksize komponenty“), jsou mezi sebou vnitřně propojeny přípojnicemi. Tyto přípojnice vedou po dvou linkách stejnosměrné napětí ze smart line modulu, které se na první lince (DC link busbar) pohybuje okolo 510–750 V a na druhé lince 24 V. Tento způsob zapojení spolu s měničem je možno vidět na Obr. 70.



Obr. 70 Propojení přípojnic a frekvenční měnič [73][78]

9.2.6 Tlumivka a smart line modul (SLM)

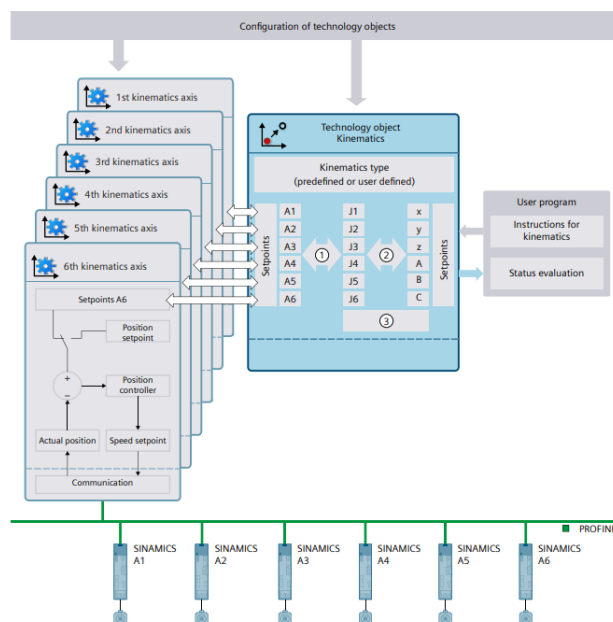
Smart line modul je zařízení generující stejnosměrné napětí pro měniče. Na tento modul je tedy připojen střídavý proud, který je následně přeměněn na stejnosměrný, jehož velikost, která byla již zmíněna u měničů, je 510–750 V. Jelikož je SLM schopen odesílat napětí zpět do sítě, je u něj nutnost tlumivky, aby nedocházelo k rozrušování sítě. Tlumivka slouží k omezení harmonických zkreslení (anglicky „harmonic distortion“), která vznikají v důsledku nelineárních zátěží distribuční sítě. Tyto nelineární zátěže vznikají kvůli frekvenčním měničům. Tento díl je konstrukčně složen ze železného jádra obmotaného měděnými cívkami. Tlumivku i SLM je možno vidět na Obr. 71. [79]



Obr. 71 Smart line modul (vlevo) a tlumivka (vpravo) [77][80]

9.2.7 Drive controller (CPU)

Součástí rozvaděče je také řízení motorů jednotlivých os, pro tuto funkci byl vybrán drive controller 1507D TF. Toto technologické CPU bylo vybaveno opcí pro vícosou manipulaci (u firmy Siemens označována jako „Motion Control KinPlus“) a může tedy najednou interpolovat více než čtyři osy, které jsou bez této opce maximem, v tomto případě je potřeba interpolovat šest os. Princip komunikace mezi CPU a motory je zobrazen na Obr. 72, kde je možno vidět, že na základě uživatelského programu jsou předepsány souřadnice x, y a z a natočení A, B, C koncového bodu, které jsou přepočítány na natočení hřídelí motorů. Ty jsou následně přepočítány na jednotlivé offsety motorů, které jsou poslány do motorů. Z opačné strany je pak odečítána aktuální pozice, která je kontrolována zpět v CPU. Komunikace mezi CPU a motory je provedena pomocí signálových kabelů drive-cliq (ethernet), která běží na komunikačním protokolu Profinet, stejně tak je provedena komunikace i mezi měniči, CPU a SLM..



Obr. 72 Princip komunikace CPU s motory [81]

9.3 Bezpečnostní (safety) komponenty

V této podkapitole budou okomentovány bezpečnostní prvky elektrického rozvaděče použitého v této diplomové práci.

9.3.1 Stykače

Prvním z řady bezpečnostních prvků jsou stykače. Ty slouží ke spínání nebo rozepínání elektrického spojení. Jak lze vidět v příloženém elektro schématu, v této práci jsou použity dva stykače, které jsou zapojeny sériově za sebou. Použití dvou stykačů za sebou je potřeba kvůli dvoukanálové ochraně obvodu, tedy v případě, že by jeden stykač ztratil svou funkci, druhý stykač spolehlivě vypne obvod. Jsou použity stykače od firmy ABB, které lze vidět na Obr. 73.



Obr. 73 Stykač [82]

9.3.2 Bezpečnostní PLC

Jelikož v tomto projektu není využito bezpečnostních funkcí technologického CPU, musí být bezpečnostní funkce vykonávány jiným druhem programovatelného kontroléru. Pro tento druh činnosti bylo vybráno bezpečnostní PLC od firmy Euchner. Dle dokumentace toto bezpečnostní PLC dostává signály od bezpečnostního zámku, souhlasného povelového zařízení a z e-stopů, a následně vyhodnocuje a posílá zpětnou vazbu do měničů a CPU pomocí bezpečnostních výstupů. V případě porušení bezpečnosti (zmáčknutí e-stopu, otevření dveří atp.) bude poslán signál ve dvou kanálech do měničů a CPU, kanál jedna přímo do CPU a kanál dva do měničů a následně do PLC. Při nesplnění bezpečnosti budou motory odpojeny funkcí STO (safety torque off), případně SS1 (safe stop 1), tedy zastavení kategorie 0 nebo 1, které jsou dle ČSN EN IEC 60204-1 povoleny. V rozvaděči je k tomuto bezpečnostnímu PLC také přidán rozšiřující modul z důvodu zvýšení počtu vstupů a výstupů. Jak PLC, tak rozšiřující modul je možno vidět na Obr. 74.



Obr. 74 Bezpečnostní PLC (vlevo) a rozšiřující modul (vpravo) [83][84]

9.3.3 Souhlasné povelové zařízení

Souhlasné povelové zařízení bylo přidáno z toho důvodu, aby bylo možno ovládat základní funkce robotu (pohyby jednotlivých os, provedení programu atp.) i ručně. Toto zařízení obsahuje kromě programovatelných tlačítek, které budou využity pro ovládání robotu, také emergency stop a tlačítko pro potvrzení obsluhy (tzv. enabling switch/deadman). Je použito souhlasné povelové zařízení od firmy Euchner se 14 tlačítky, tento přístroj je možno vidět na Obr. 75.



Obr. 75 Souhlasné povelové zařízení [76]

9.3.4 Bezpečnostní zámek

Kvůli bezpečnosti a ochraně obsluhy je použit bezpečnostní zámek, rovněž od firmy Euchner. Při vstupu do prostoru pracoviště je rozpojen kontakt zámku a bezpečnost je vyhodnocena v bezpečnostním PLC jako „NOT OK“ a robot, popřípadě cyklus robotu je zastaven. Bezpečnostní zámek je možno vidět na Obr. 76.



Obr. 76 Bezpečnostní zámek [75]

9.4 Chlazení rozvaděče

Výpočet, jestli a jak je potřeba chladit rozvaděčovou skříň, byl proveden pomocí programu Rittal Therm, který je komerčně dostupný na stránkách firmy Rittal. Nejprve je zapotřebí spočítat celkový ztrátový výkon, který byl určen na základě datových listů jednotlivých komponent, s tím, že největší ztrátový výkon mají měniče, SLM a CPU. Výpočet ztrátového výkonu je možno vidět v rovnici (44).

$$P_{celk} = 3 \cdot P_{měnič} + P_{SLM} + P_{CPU}$$
$$P_{celk} = 3 \cdot 100 + 80 + 17 = 397 \text{ W} \sim 400 \text{ W} \quad (44)$$

V programu Rittal Therm byla vybrána rozvaděčová skříň, která byla pro tento projekt navržena (AX 1059000) a byl zadán ztrátový výkon z rovnice (44), následně bylo zadáno prostorové uspořádání rozvaděče (volně stojící). Byla také nastavena maximální teplota okolí a teplota uvnitř rozvaděče (30 a 35 °C). Na Obr. 77 je možno vidět nastavení, jež bylo výše popsáno.

| | | | |
|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|----------------|
| Enclosure model | Dimensions (WxHxD) | Material (k-Factor) | Heatloss (W) |
| AX 1059000 | 600 x 800 x 400 | Sheet Steel (5.5) | 400 |
| Covering type | | | |
| Floor standing | | | |
| Set internal temperature (°C) | Max. ambient temperature (°C) | Voltage [V] | Frequency [Hz] |
| 35 - + | 30 - + | 400 v | 50 v |

Obr. 77 Nastavení programu Rittal Therm

Na základě těchto parametrů bylo programem dopočítáno, že teplota bez chlazení by uvnitř rozvaděče byla 71 °C, přičemž 49 W bude disipováno povrchem rozvaděče a ztrátový výkon, který je potřeba odvést, je tedy 351 W. Tyto výsledky je možno vidět na Obr. 78.

| | | |
|-------------------------------|--------------------------|----------|
| Temp. without climate control | Set internal temperature | Heatloss |
| ⚠ 71 °C | 35 °C | 351 W |

Obr. 78 Výsledek výpočtu Rittal Therm

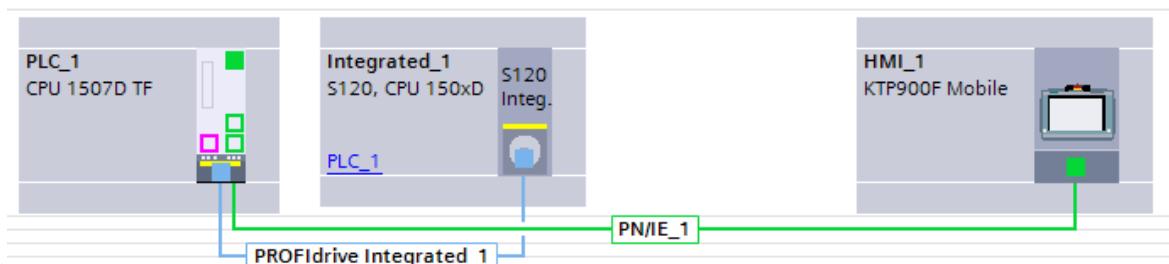
Program na základě výsledků vybral možnosti chlazení, přičemž jednou z těchto možností byla kombinace ventilátoru 3241100 a výfukové mřížky 3240200, kterou je možno vidět na Obr. 79.



Obr. 79 Ventilátor a výfuková mřížka [85][86]

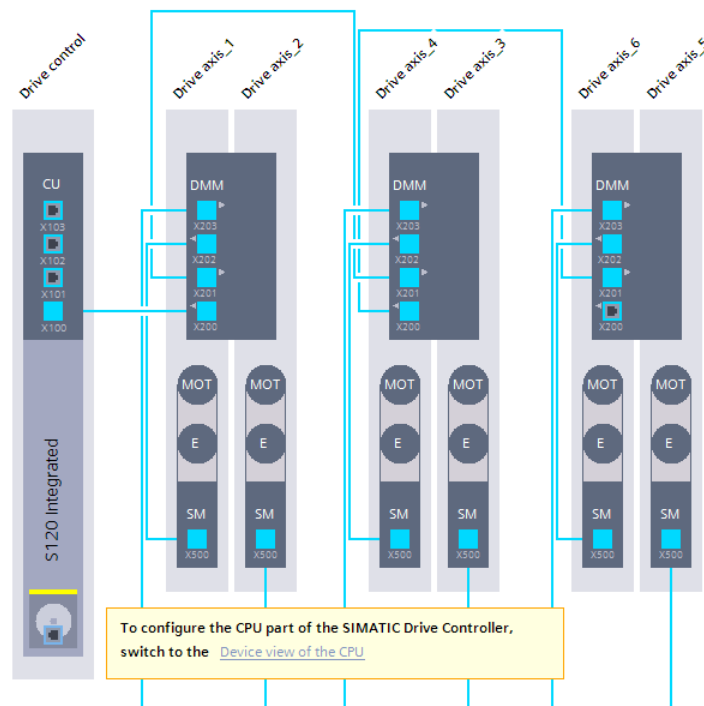
10 PROGRAMOVÁNÍ ROBOTU

V této kapitole bude sepsán především postup oživení robotu a jeho základní programování. Jak již bylo sepsáno v kapitole 8, řízení robotu se skládá z komponent od firmy Siemens, přičemž se jedná o řízení univerzální, na rozdíl od řídicích systémů průmyslových robotů od renomovaných výrobců. Základní struktura komponent v programu TIA portál je zobrazena na Obr. 80, kde je možno vidět technologické CPU 1507D TF se vstupy a výstupy a v něm integrovaný S120 Drive Controller, který ovládá motory. Tyto dva objekty mezi sebou komunikují pomocí komunikačního protokolu Profibus s fixním cyklem 4 ms. Do technologického CPU je pak zapojeno ještě HMI, které slouží jako periferie k ovládání robotu jinak než z PC.



Obr. 80 Vnitřní struktura komponent robotu

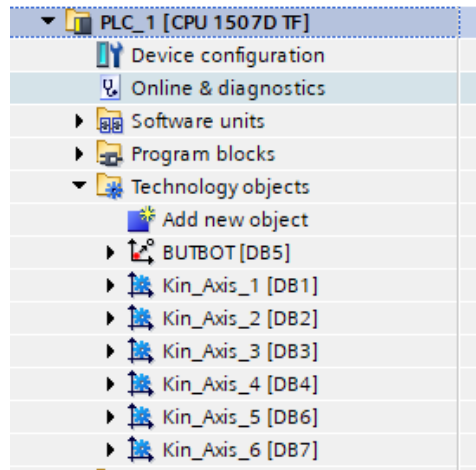
Po připojení technologického CPU k programu TIA portál byla zjištěna vnitřní topologie (vzájemné propojení) CPU a měničů a byly vygenerovány jednotlivé osy (motory). Vzájemné propojení měničů a technologického CPU je možno vidět na Obr. 81.



Obr. 81 Vzájemné propojení CPU a měničů

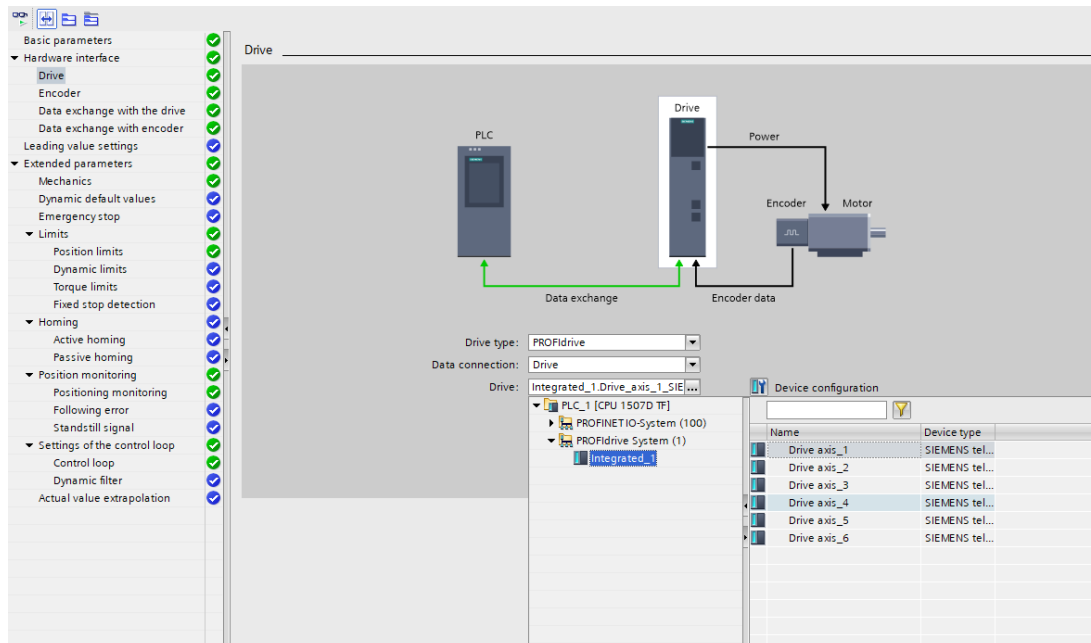
Jednotlivé osy (parametry motorů) je po tomto nastavení možno měnit a je možno s motory rotovat. Následně je možno vytvořit kinematickou strukturu a vzájemně tak propojit

všechny motory (osy). Kinematická struktura byla vytvořena v technologickém CPU, kde byly vytvořeny technologické objekty TO_Kinematics pro samotnou kinematiku a TO_PositioningAxis pro jednotlivé řízené osy. Následná struktura technologických objektů je pak zobrazena na Obr. 82.



Obr. 82 Struktura technologických objektů

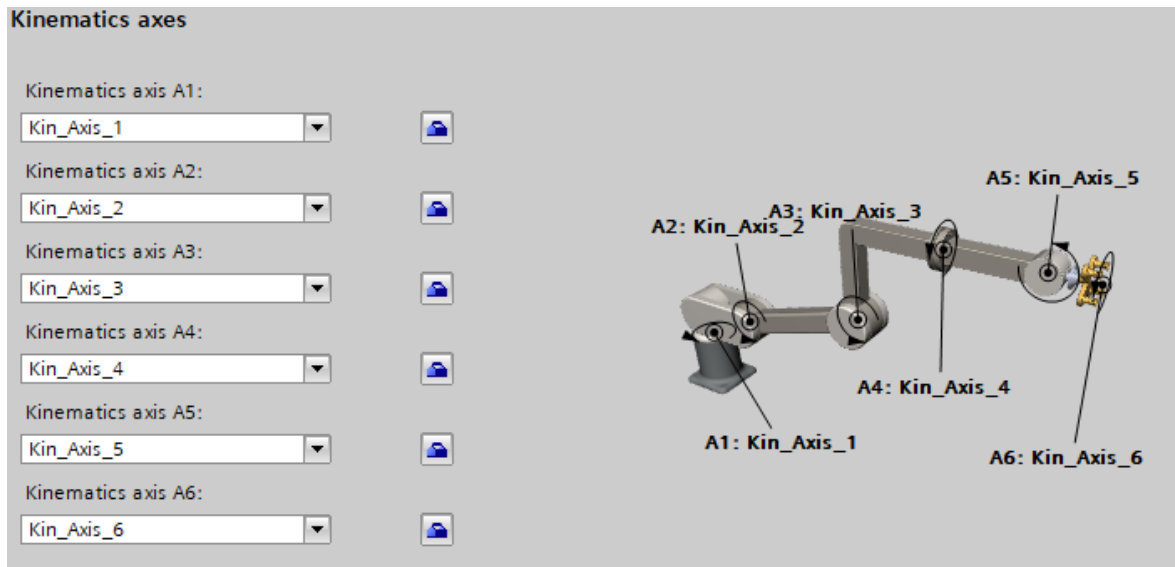
Každý z technologických objektů je ve svém nastavení připojen k reálnému motoru, tento proces je možno vidět na Obr. 83, kde se k technologickému objektu Kin_Axis_1 přiřazuje Drive_axis_1.



Obr. 83 Přiřazení motoru k technologickému objektu

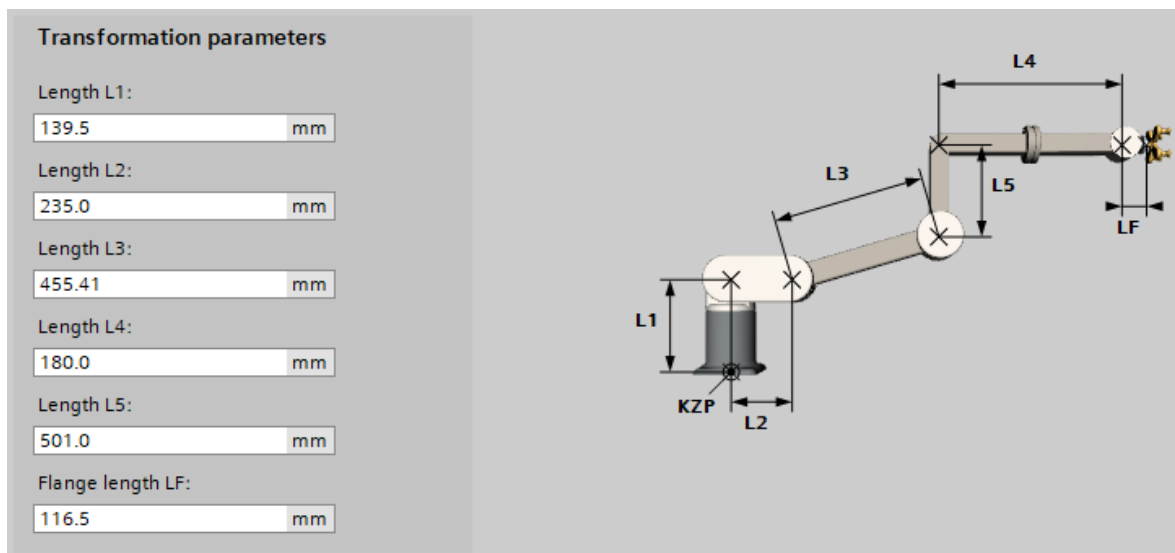
Jakmile byly přiřazeny všechny technologické objekty ke správným fyzickým osám, bylo zapotřebí nakonfigurovat technologický objekt kinematické struktury (technologický objekt TO_Kinematics). V tomto objektu je možno vybírat mezi předem nastavenými kinematickými konfiguracemi, mezi nimi například Scara, Delta, kartézské roboty atp. V případě tohoto projektu je vybrána kinematická konfigurace „6 axis articulated arm with

centerhand“, která slouží pro definici sériového robotu se šesti stupni volnosti. Těto konfiguraci byly přiděleny technologické objekty os. Přidělení je možno vidět na Obr. 84.



Obr. 84 Přidělení technologických objektů vybrané kinematice

Jakmile byly přiřazeny kinematice jednotlivé pohybové osy, bylo zapotřebí přiřadit rozměry mezi jednotlivými osami tak, aby software reprezentoval a počítal rozměry reálného, fyzického robotu.

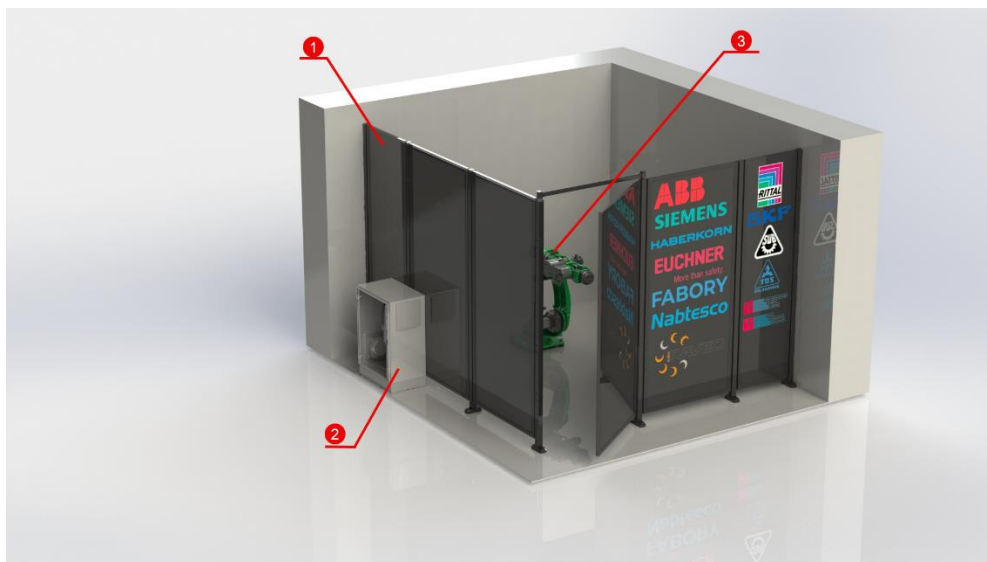


Obr. 85 Rozměry mezi jednotlivými osami robotu

Po tomto přiřazení jednotlivých rozměrů je nyní možno s robotem hýbat jako s celkem a interpolovat polohu koncového bodu pomocí všech šesti os. Tento pohyb je vždy pouze manuální, automatické pohyby, učení bodů a realizace cyklů nebudou v této práci řešeny.

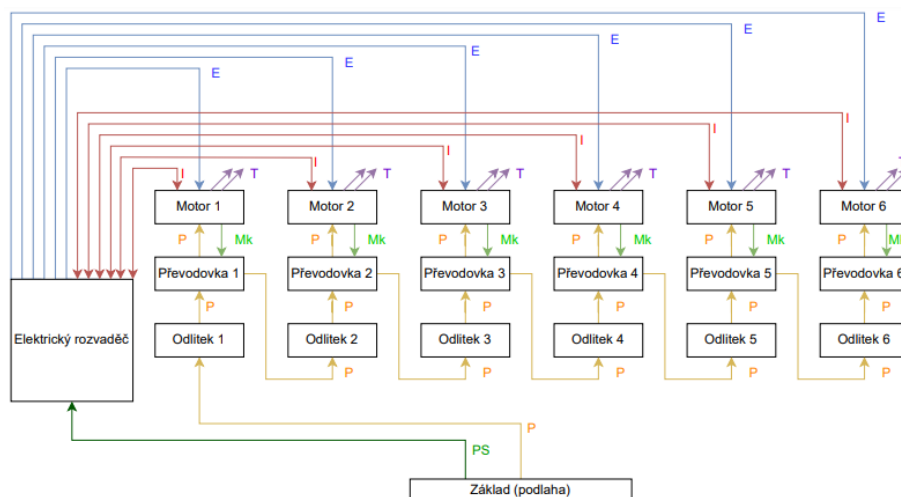
11 POSOUZENÍ RIZIK DLE EN ISO 12100

V rámci této diplomové práce byla také vytvořena analýza rizik, která je součástí příloh a má za úkol zanalyzovat a snížit rizika spojená se stavěným robotickým pracovištěm UVSSR v Brně. Tato kapitola přiblíží, co vše je součástí přílohy ohledně analýzy rizik. Nejprve je zapotřebí přiblížit a popsat robotizované pracoviště UVSSR, které obsahuje robot, který je oplocen bezpečnostním oplocením od firmy Haberkorn, vedle tohoto pracoviště se nachází elektrický rozvaděč. Na Obr. 86 je ukázáno robotizované pracoviště vyrendrované ze 3D programu Solidworks.



Obr. 86 Robotizované pracoviště UVSSR (1 – oplocení robotizovaného pracoviště, 2 – elektrický rozvaděč, 3 – robot)

Ve zpracované analýze rizik, která je součástí příloh, jsou nejprve sepsány požadavky právních předpisů EU, kde jsou sepsány legislativní a normativní požadavky, které souvisí s bezpečností navrhovaného strojního zařízení. Po sepsání těchto požadavků byla provedena analýza nebezpečí, kde byly vytvořeny blokové diagramy popisující robot a pracoviště z pohledu vazeb mezi jednotlivými komponentami. Jeden z těchto blokových diagramů je možno vidět na Obr. 87.



Obr. 87 Blokový diagram robotu

Jakmile byly zpracovány blokové diagramy, byl na jejich základě definován nebezpečný prostor robotu a robotizovaného pracoviště. Následně byla identifikována nebezpečí na základě blokových diagramů vytvořených v předchozím kroku, kde jsou sepsány typy nebezpečí dle ČSN EN ISO 12100:2011, je zde napsáno jejich umístění a ID nebezpečí. Po této identifikaci následuje analýza významných nebezpečí, kde jsou rozebrány fáze životního cyklu robotu a robotizovaného pracoviště a jsou zde stručně popsány typy nebezpečí a nebezpečných událostí. Na Obr. 88 je možno vidět část analýzy významných nebezpečí z první životní fáze robotu, tedy dopravy.

| ANALÝZA VÝZNAMNÝCH NEBEZPEČÍ BĚHEM ŽIVOTNÍHO CYKLU | | | | Typ strojního zařízení: Robot | |
|---|--------------------------------|--|---|--|--|
| | | | | Model: 3HCZDIP000_000000 | |
| Poř. číslo | Fáze životního cyklu | Typ nebezpečí (dle ČSN EN ISO 12100:2011) | | Popis nebezpečné události | |
| | | Stručný popis | ID číslo | | |
| 1.1 | DOPRAVA | | | | |
| 1.1.1 | Nakládání, přeprava, vykládání | -Mechanická nebezpečí, konkrétně pak (Stlačení, odření, naražení, zakopnutí a pád, námaha, pořezání) -Ergonomická nebezpečí -Nebezpečí spojená s prostředím, kde je stroj užíván | 1.2.1 1.2.2 1.2.3 1.2.4 1.3.3 1.4.3 1.4.4 8.2.1 8.2.2 9.1.1 9.2.1 | Během procesu nakládání a vykládání může dojít k převržení celku a stlačení člověka, to může mít za následek udušení a další zranění. Při neopatrném zvedání může dojít k namáhání vlivem tíhy komponent. Při nakládání, přepravě a vykládání může dojít k pořezání o ostré hrany komponenty. Zároveň může u obsluhy dojít k námaze vlivem hmotnosti jednotlivých komponent. | |
| 1.1.2 | Balení, rozbalování | -Mechanická nebezpečí, konkrétně pak (Stlačení, odření, naražení, zakopnutí a pád, námaha, pořezání) -Ergonomická nebezpečí -Nebezpečí spojená s prostředím, kde je stroj užíván | 1.2.1 1.2.2 1.2.3 1.2.4 1.3.3 1.4.3 1.4.4 8.2.1 8.2.2 9.1.1 9.2.1 | Při procesu balení nebo rozbalování může dojít k pořezání, odření nebo stlačení člověka vlivem ztráty stability komponenty. Vlivem neopatrnosti může dojít k zakopnutí a pádu během balení i rozbalování. Zároveň může u obsluhy dojít k námaze vlivem hmotnosti jednotlivých komponent. | |

Obr. 88 Analýza významných nebezpečí první fáze životního cyklu robotu

Jakmile byla dokončena analýza významných nebezpečí, bylo zapotřebí vytvořit přehled identifikovaných nebezpečí a odhad jejich počátečního rizika. Tento odhad je stanoven na základě grafu pro odhad velikosti rizika, kde se na základě kategorií přiděluje riziku jeho počáteční velikost. Tyto kategorie jsou blíže (i s grafem) popsány v příloze této diplomové práce. Výsledné již odhadnuté počáteční riziko je možno vidět na Obr. 89, stejně se postupuje i u dalších rizik.

| Pořadové číslo | Název nebezpečí | Kategorie | | | | Odhadnuté počáteční riziko |
|-------------------------------|-------------------------------|-----------|----|----|----|----------------------------|
| | | S | A | E | W | |
| 1 Mechanická nebezpečí | | | | | | |
| 1.1 Nebezpečí stlačení | | | | | | |
| 1.1.1 | Nebezpečí stlačení od robotu | S3 | A2 | E2 | W2 | 17 |
| 1.1.2 | Nebezpečí stlačení o oplocení | S3 | A2 | E2 | W2 | 17 |

Obr. 89 Odhad velikosti počátečního rizika

Posledním bodem přílohy bylo vypracování formulářů pro snížení rizika. Zde bylo ve třech krocích sníženo riziko na přijatelnou hodnotu s tím, že u každého s těchto kroků bylo popsáno opatření a následně sníženo riziko. Takovýto formulář je možno vidět v Tab. 32.

Tab. 32 Formulář pro snížení rizika

| | | | | | |
|---|--|--|---|---|--|
| VUT v Brně, FSI ÚVSSR | | Formulář pro snížení rizika Zpracoval: Ondřej Štefek | | Strojní zařízení: Robotické pracoviště ÚVSSR VUT v Brně | |
| | | | | Datum: 1.12.2023 | |
| Číslo nebezpečí | Identifikační číslo | Označení nebezpečí dle ČSN EN ISO 12100:2011 | | | |
| | | 1. Mechanická nebezpečí | | | |
| 1.1.1 | 1 | Nebezpečí stlačení od robotu | | | |
| Životní etapa stroje: | Provoz, seřizování | Nebezpečný prostor: | Pracovní prostor | | |
| Ohrožené osoby: | Obsluha, programátor, seřizovač | Provozní stav stroje: | Za provozu, mimo provoz | | |
| Popis nebezpečné události: | Nebezpečí stlačení těla při pohybu robotu, tento stav může nastat při programování drah robotu, nebo např. při seřizování robotu. Může dojít ke smrtelným nebo vážným zraněním. | | | | |
| Počáteční riziko | Závažnost možné škody na zdraví | S3 – Smrt | Velikost rizika 17 | | |
| | Četnost a doba trvání ohrožení | A2 – Často až trvale | | | |
| | Možnost vyvarování nebezpečí | E3 – Nemožné | | | |
| | Pst. výskytu nebezpečné události | W2 - Střední | | | |
| KROK 1: Opatření zabudovaná v konstrukci | | | | | |
| Popis opatření | Robot, včetně řídicího systému robotu, splňuje požadavky na bezpečnost průmyslových robotů dle ČSN EN ISO 10218-1 (2012). Také jsou splněny požadavky na integraci průmyslových robotů dle ČSN EN ISO 10218-1 (2011). Jsou dále splněny požadavky funkční bezpečnosti dle normy ČSN EN ISO 13849. Souhlasné povelové zařízení je umístěno mimo nebezpečný prostor podle normy ČSN EN ISO 10218-1. | | | | |
| Počáteční riziko | Závažnost možné škody na zdraví | S3 – Smrt | Velikost rizika 12 | | |
| | Četnost a doba trvání ohrožení | A1 – Zřídka až častěji | | | |
| | Možnost vyvarování nebezpečí | E2 – Možné za určitých okolností | | | |
| | Pst. výskytu nebezpečné události | W1 - Malá | | | |
| KROK 2: Bezpečnostní ochrana a doplňková ochranná opatření | | | | | |
| Popis opatření | Oplocení robotického pracoviště je v souladu s normou ČSN EN ISO 14120:2017 o ochranných krytech. Při návrhu bezpečných vzdáleností oplocení byla dodržena norma ČSN EN ISO 13857:2021. Nejmenší mezery k zamezení stlačení lidského těla jsou splněny dle normy ČSN EN ISO 13854:2021. Implementace funkce nouzového zastavení splňuje normu ČSN EN ISO 13850 a blokovacího zařízení (MGB zámek) splňuje normu ČSN EN ISO 14119:2014. Snížená rychlost a omezení pohybu při seřizování pohybu v ručním režimu je splněno dle ČSN EN ISO 10218-1:2011. Implementace souhlasného povelového zařízení bylo splněno dle stejné normy ČSN EN ISO 10218-1:2011. | | | | |

| | | | |
|--------------------------------------|--|--------------------------------------|-----------------|
| Snížené riziko po opatření | Závažnost možné škody na zdraví | S2 – Těžké zranění (trvalé následky) | Velikost rizika |
| | Četnost a doba trvání ohrožení | A1 – Zřídka až častěji | 6 |
| | Možnost vyvarování nebezpečí | E2 – Možné za určitých okolností | |
| | Pst. výskytu nebezpečné události | W1 - Malá | |
| KROK 3: Informace pro použití | | | |
| Popis opatření | <p>Vypracování návodu k použití dle normy ČSN EN ISO 82079-1. Tento návod je k dispozici na pracovišti v ovládacím prostoru stroje.</p> <p><u>Školení o bezpečnosti práce na pracovišti, které sestává z:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Proškolení, že zařízení může obsluhovat pouze osoba tím pověřená. -Proškolení, že je zákaz vstupu do pracovního prostoru při práci robotického pracoviště. -Proškolení, že je nutnost opuštění nebezpečného prostoru před spuštěním robotického pracoviště. -Proškolení, že je zákaz spuštění programu, jestliže je uvnitř robotického pracoviště člověk. -Proškolení o dodržování bezpečné vzdálenosti při seřizování robotického pracoviště. -Proškolení o dodržování bezpečné vzdálenosti při chodu pracoviště. -Proškolení, že je nutnost programování drah a seřizování robotu z bezpečného místa. -Proškolení, že je nutnost použití bezpečných rychlostí při seřizování robotického pracoviště. -Proškolení, že je nutnost zavření všech vstupních míst do pracoviště a zajištění vstupů bezpečnostními prvky. -Proškolení, že spuštění pracovního cyklu smí provádět pouze osoba proškolená a s potvrzením o přečtení a porozumění návodu k obsluze, který je umístěn v ovládacím prostoru stroje. <p><u>Bezpečností sdělení na oplocení pomocí piktogramů a tabulek:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> -Zařízení smí obsluhovat jen osoba tím pověřená. -Zařízení smí seřizovat pouze proškolená osoba. -Spouštět a ovládat zařízení je možné pouze podle návodu k obsluze. -Zákaz spuštění robotické buňky bez zajištění přístupových cest. -Zákaz vstupu do pracovního prostoru při práci robotické buňky. <p>-Použití signální věže pro informaci stavu robotického pracoviště, které indikuje chod zařízení.</p> <p>-Označení tlačítek nouzového zastavení.</p> | | |
| Zbytkové riziko | Závažnost možné škody na zdraví | S1 – Lehké zranění | Velikost rizika |
| | Četnost a doba trvání ohrožení | A1 – Zřídka až častěji | 0 |
| | Možnost vyvarování nebezpečí | E1 – Možné | |
| | Pst. výskytu nebezpečné události | W1 - Malá | |
| Validace: Opatření jsou dostatečná | | Ondřej Štefek | 1.12.2023 |

12 VYČÍSLENÍ NÁKLADŮ NA PROJEKT A POROVNÁNÍ S KOMERČNĚ DOSTUPNÝMI ROBOTY

V této kapitole bude porovnáno navržené řešení prototypu šestiosého robotu s robotickými řešeními, které jsou komerčně dostupné. K porovnání byla zjištěna cena průmyslového robotu od společnosti KUKA, jejíž sériově prodávané řešení je možno pořídit za 24 000 eur, tedy v přibližně 607 000 Kč. [87]

Prvně je zapotřebí určit celkovou cenu robotu navrženého v této diplomové práci. Zde bude cena rozdělena do úseků podle jednotlivých dodavatelů a to:

- Elektrotechnika (součásti od společnosti Siemens, Rittal, Euchner)
- Zpracování obrobků a odlitků (zpracování polotovarů firmou TOS Čelákovice a tvorba odlitků)
- Mechanika (součásti od společnosti Haberkorn, Raveo, SKF a Fabory)
- Převodovky (převodovky od společností ABB a Nabtesco)

V Tab. 33 je možno vidět součet cen od jednotlivých dodavatelů.

Tab. 33 Součet cen od jednotlivých dodavatelů

| Součet cen jednotlivých dodavatelů | | |
|------------------------------------|----------------------|--------------|
| Robot | | |
| Elektrotechnika | Siemens | 665 660 Kč |
| | Rittal | 10 400 Kč |
| | Euchner | 34 518 Kč |
| Zpracování obrobků a odlitků | TOS Čelákovice | 405 099 Kč |
| | VUT (tvorba odlitků) | 80 000 Kč |
| Mechanika | Raveo, SKF a Fabory | 38 030 Kč |
| Převodovky | ABB + Nabtesco | 246 733 Kč |
| SUMA | | 1 480 440 Kč |
| Robotické pracoviště | | |
| Elektrotechnika | Euchner | 14 694 Kč |
| Mechanika | Haberkorn | 55 000 Kč |
| SUMA | | 69 694 Kč |

V Tab. 33 jsou sepsány celkové ceny jak pro robot, tak pro vytvořené robotizované pracoviště. Dělení cen je zde z důvodu férového porovnání robotu s komerčně dostupným řešením od firmy KUKA. Je třeba brát v potaz, že prototypová výroba je mnohem nákladnější než sériové řešení robotu. V tomto případě je prototyp robotu řešený v této diplomové práci přibližně 2,4x dražší než komerčně dostupné řešení.

13 ZHODNOCENÍ NÁVRHU

V rámci této diplomové práce byl navrhnout průmyslový robot se šesti stupni volnosti. Práce se na svém začátku věnuje systémovému rozboru a návrhu variant, a jasně stanovuje, jakým směrem robot konstrukčně směřuje. V kapitole 4 (Analýza dostupných řešení koncepce a návrh variant) jsou představeny různé koncepce konstrukce robotu se zaměřením zejména na odlitky. Finální odlitky byly konstruovány s přihlédnutím na hmotnost, tuhost a vizuální stránku, ale také na cenu, jelikož odlitky byly při zpracování této práce fyzicky vyrobeny. Ze všech vypsanych parametrů byla tuhost spíše v ústraní a byl více brán zřetel na hmotnost, cenu a vizuální stránku, a to z toho důvodu, že robot nebude nikdy v automatickém provozu a bude sloužit spíše jako učební pomůcka. Odlitky by tedy bylo možno udělat robustnější a tužší, aby robot získal větší dynamiku a byl tedy přizpůsoben cyklickým zatížením automatických provozů.

Další součásti robotu, které by bylo možno upravit pro zavedení robotu do automatického provozu, jsou převodovky a motory. Převodovky jsou na tomto robotu velice předimenzované a šlo by je využít na roboty s větší únosností, řádově kolem 30 kg. Velikost převodovek se poměrně zásadně promítá i do celkových rozměrů robotu, tudíž s použitím menších převodovek by bylo možné robot i celkově zmenšit. Bylo by možné buď využít kompaktnější převodovky od stejného výrobce, společnosti Nabtesco, nebo převodovky od slovenské společnosti Spinea, která má obecně kompaktnější řešení. Druhou ze zmíněných součástí, motory, by šlo také změnit, ale pouze u vybraných os. Motory na osách 3 a 4 by bylo možno o něco zvětšit (hlavně na ose 3), jelikož únosnost jejich brzd je malá. U zbývajících čtyř os je situace opačná. U os 5 a 6 by šlo motory zmenšit spíše zástavbově, jelikož jejich parametry jsou vyhovující, ale v navržené koncepci robotu jsou poměrně velké. Tento problém je ale řešitelný použitím převodů místo přímého náhonu os. Motory na osách 1 a 2 by bylo možno zmenšit momentově přibližně o třetinu.

Problematikou, která v této práci nebyla zcela dořešena, je vedení kabelů a obecně „cable management“, což je jedna z nejdůležitějších věcí, které se musí konstruktér věnovat hned ze začátku návrhu. Vedení kabelů pro první až čtvrtou osu je srovnatelné s konkurencí, ale pro pátou a šestou osu není ideální a robota poměrně hodně omezuje. Stejně jako u motorů by šel tento problém vyřešit použitím převodů a přesunutím motorů k sobě, na stejné místo, jako to dělá například firma Kuka, nebo ABB. Použití převodů by ovšem znamenalo poměrně velké finanční náklady u už tak velice nákladného projektu.

Jak bylo řečeno na konci dvanácté kapitoly, sériová výroba bude vždy levnější než prototypová. Bylo by tedy určitě na místě se zamyslet nad další redukcí nákladů tohoto prototypového robotu pro sériovou výrobu. Optimalizace odlitků z hlediska zvýšení tuhosti již byla probrána v odstavci výše. Kromě zvýšení tuhosti je však odlitky nutno optimalizovat pro proces sériové výroby a zamyslet se více nad jejich vyrobiteľností bez použití skořepinových forem, které jsou pro sériovou výrobu nevhodné. Proces optimalizace na sériovou výrobu neplatí pouze pro odlitky, ale i pro obráběné součásti. V poslední řadě by pro sériovou výrobu byla potřebná racionalizace kompletačních operací odstraněním nadbytečných činností, které byly odhaleny při montáži, a tedy obecné zjednodušení montáže.

14 ZÁVĚR

Hlavním cílem této diplomové práce bylo navrhnout, vyrobit a sestavit a oživit robot se šesti stupni volnosti a sériovou kinematickou strukturou. Robot byl navržen na maximální únosnost 10 kg. Práce se nejprve věnuje systémovému rozboru navrhovaného řešení a obsahuje vypracovanou myšlenkovou mapu s vizualizací návazností, které ovlivňují výsledný robot.

V další kapitole byla analyzována dostupná řešení na trhu, kde byly uvedeny roboty od renomovaných výrobců a byla zde představena a okomentována čtyři navržená řešení robotu. Tyto čtyři navržené varianty byly v další kapitole mezi sebou porovnány metodou multikriteriálního hodnocení a byla vybrána nejvhodnější varianta s váženou hodnotou 3,37, přičemž na druhém místě byla varianta s váženou hodnotou 2,87.

Následující kapitola popsala a rozebrala robot z hlediska kinematiky a dynamiky, přičemž v kinematice byla vytvořena tabulka Denavit–Hartenbergerových parametrů a byla sepsána matice pro transformaci souřadných systémů z bodu 0 do bodu 6. U dynamiky robotu byl představen postup ověření odlitků, který sestává z dynamické analýzy a následného ověření pevnosti pomocí metody konečných prvků. Jakmile byla napětí v odlitcích známa, ověřily se odlitky vzhledem k MSP, přičemž nejmenší bezpečnost odlitku vyšla 2,8. V následující kapitole pak byly představeny konstrukční uzly robotu, jeho pracovní obálka a rozsahy, a jeho přeprava. Druhá část této kapitoly se věnuje popsání výroby odlitků a obrobků a také popisu tolerancí a rozměrů obrobků.

Kapitola 8 se zabývá ověřením navržených motorů. Bylo zde ověřeno, zda jsou brzdy motorů schopny udržet hmotnost robotu a zátěže za danou osou, a také pevnosti pastorků a hřídele páté osy vzhledem k MSP. U pastorků se počítalo pouze se zatížením od krutu, jelikož se ohyb kvůli konstrukci vstupu do převodovky vykrátí, krut zde vychází zanedbatelně 9,42 MPa, přičemž dovolené napětí v krutu dosahuje 210 MPa. Hřídel páté osy je počítána na kombinované namáhání krut + ohyb vzhledem k MSP, přičemž nejmenší průměr pro tento typ namáhání vyšel 22,85 mm a bezpečnost vzhledem k MSP v místě koncentrátoru napětí vyšla 1,23.

Devátá kapitola se zabývá popisem jednotlivých komponent uvnitř rozvaděče a jsou zde popsány jak silové komponenty (měniče, SLM, jističe, pojistky atp.), tak bezpečnostní komponenty (stykače, bezpečnostní PLC, souhlasné povelové zařízení atp.). Konec této kapitoly je věnován chlazení rozvaděče z důvodu ztrátového výkonu měničů a jiných komponent. Zde vyšlo, že je zapotřebí chlazení, jelikož by teplota uvnitř rozvaděče dosáhla přibližně 71 °C, přičemž komponenty jsou dimenzovány na 30°C.

Desátá kapitola je věnována programování robotu, je v ní tedy popsán postup oživení robotu, vzájemné signálové propojení řídicího systému s měniči, a propojení fyzických motorů s technologickými objekty v programu TIA portál.

Předposlední, jedenáctá, kapitola se zabývá popisem vypracované analýzy rizik. V této příloze je vytvořen blokový diagram pro robot a robotizované pracoviště, na základě kterého byla identifikována nebezpečí a určena jejich významnost během životního cyklu robotu a robotizovaného pracoviště. Poté byl stanoven odhad velikosti jednotlivých rizik a k vybraným deseti rizikům byl vypracován formulář pro snížení rizika.

Poslední kapitola se zabývá cenovým porovnáním navrženého stroje s komerčně dostupným robotem KUKA KR10, který stojí přibližně 607 000 Kč. U navrženého řešení byla stanovena cena na základě cen jednotlivých dodavatelů, která se pohybuje okolo jednoho a půl milionů Kč, tedy je možno konstatovat, že je navržený robot skoro 2,4x dražší.

Na základě návrhu a výpočtů byla vypracována konstrukční a elektrotechnická výkresová dokumentace.

14.1 Speciální poděkování

Na tomto místě bych chtěl individuálně poděkovat všem firmám a jejich zástupcům, kteří mě podpořili a tento projekt tak mohl vzniknout.

Za firmu ABB bych chtěl poděkovat svým kolegům Ondru Švástovi, Aleši Severinovi a Janu Šubrovi, kteří mi pomohli s některými záležitostmi v oblasti konstrukce a s elektrotechnikou robotu, a také svému vedoucímu Ivo Kratochvílovi za skvělé vedení a celkovou pomoc na diplomové práci.

Za firmu Siemens bych chtěl poděkovat zejména Adamu Koncerovi, který v tuto práci věřil a zařídil potřebné elektrické komponenty (motory, řídicí systém, měniče), a také Radku Novotnému, který pomáhal s finálním oživením robotu.

Za firmy TOS Čelákovice/Slovácké strojírný bych chtěl poděkovat panu řediteli Jiřímu Rosenfeldovi, který tento projekt podpořil, a tyto firmy tedy dodali potřebné zázemí pro obrábění odlitků a výrobu obráběných součástí. Zároveň bych chtěl poděkovat i Radku Marešovi za pomoc ohledně doladění výkresů po technologické stránce.

Za Ústav strojírenské technologie VUT v Brně bych chtěl poděkovat zejména panu doc. Antonínu Záděrovi, který dodal potřebné zázemí pro tvorbu a výrobu odlitků. Také bych chtěl poděkovat panu Radimu Jelínkovi, který pomáhal a odléval jednotlivé dílce.

Za firmu Haberkorn bych chtěl poděkovat panům Ivo Bierhausovi a Lukáši Beňkovi za dodání potřebného oplocení a panu Jiřímu Kovaříkovi za dodání ozubených řemenic a ozubeného řemene.

Za firmu Nabtesco bych chtěl poděkovat panu Rado Reisovi, který pomohl dodat převodovku šesté osy.

Za firmu Euchner bych chtěl poděkovat panu Františku Blažkovi za dodání bezpečnostních prvků, jako je programovatelné bezpečnostní PLC nebo bezpečnostní zámek, a také panu Ondru Hudákovi za potřebné konzultace ohledně bezpečnosti robotizovaného pracoviště.

Za firmu SKF bych chtěl poděkovat paní Evě Myškové za dodání potřebných ložisek pro uskutečnění páté a šesté osy robotu.

Za firmu Raveo bych chtěl poděkovat ředitelům Aleši Zapletalovi a Radku Kaňovskému za dodání potřebných dílů k přenosu kroutícího momentu z motorů, a také za potřebné informace ohledně převodovek značky Nabtesco.

Za firmu Rittal bych chtěl poděkovat panu Dušanu Slaninovi za poskytnutí rozvaděčové skříně a potřebného chlazení uvnitř rozvaděče.

Za firmu Fabory bych chtěl poděkovat panu Patriku Zoucharovi za poskytnutí potřebného spojovacího materiálu pro fyzickou stavbu robotu.

Za Ústav výrobních strojů, systémů a robotiky VUT v Brně bych chtěl ještě jednou poděkovat svému vedoucímu, panu doc. Radku Knoflíčkovi, za skvělé vedení diplomové práce. Také bych chtěl poděkovat doc. Michalu Holubovi za pomoc ohledně logistiky a stavby robotu a panu doktoru Janu Vetiškovi za pomoc při stavbě a elektrickém zapojení.

15 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Světová zpráva o robotice. Vše o průmyslu. [online]. 02.10.2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://www.vseoprumsly.cz/robotizace/prumyslove-roboty/ifr-predstavila-svetovou-zpravu-o-robotice-za-rok-2022.html>
- [2] World robotics 2023 report. International Federation of robotics. [online]. 02.10.2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/world-robotics-2023-report-asia-ahead-of-europe-and-the-americas>
- [3] Roboty nastupují do práce. Vše o průmyslu. [online]. 02.10.2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: https://www.industryindependent.cz/rubriky/automatizace/roboty-nastupuji-do-prace-zejmena-v-asii-co-by-mela-evropa-dohnat_942.html
- [4] Ing. Jan Vetiška, Ph.D. Tematické okruhy Robotika [online]. In: https://moodle.vut.cz/pluginfile.php/526676/mod_resource/content/1/GPZ_T%C3%A9matick%C3%A9Okruhy.pdf
- [5] R1000-iA. fanucamerica.com [online]. 18.12.2023 [cit. 2023-18-12]. Dostupné z: <https://www.fanucamerica.com/products/robots/series/r-1000ia/r-1000ia-120f-7b-7-axis-robot>
- [6] IRB 6700. new.abb.com [online]. 18.12.2023 [cit. 2023-18-12]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/roboty/prumyslove-roboty/irb-6700>
- [7] KR 6 R500 Z200. my.kuka.com [online]. 18.12.2023 [cit. 2023-18-12]. Dostupné z: https://my.kuka.com/s/product/detail/01t1i000000sTI3AAE?language=en_US&requestform=true
- [8] Prof. Ing. Václav Hlaváč, CSc. Robot kinematics [online]. In: <http://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresEn/55AutonomRobotics/020KinematicsEn.pdf>
- [9] IRB 760. new.abb.com [online]. 18.12.2023 [cit. 2023-18-12]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/roboty/prumyslove-roboty/irb-760>
- [10] M-3iA/6A. fanuc.eu [online]. 18.12.2023 [cit. 2023-18-12]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/delta-robots/%C5%99ada-m3/m-3ia-6a>
- [11] GP88. cz.yaskawa.eu.com [online]. 18.12.2023 [cit. 2023-18-12]. Dostupné z: https://www.cz.yaskawa.eu.com/produkty/roboty/handling-mounting/productdetail/product/gp88_702
- [12] Types of robots: How Robotics Technologies are shaping today's world. intel.com [online]. 18.12.2023 [cit. 2023-18-12]. Dostupné z: <https://www.intel.com/content/www/us/en/robotics/types-and-applications.html>
- [13] Dual-arm YuMi – IRB 14000. new.abb.com [online]. 18.12.2023 [cit. 2023-18-12]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/robots/collaborative-robots/yumi/dual-arm>
- [14] ASTI AGV mobilní roboti. automatizace.hw.cz [online]. 18.12.2023 [cit. 2023-18-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/asti-agv-mobilni-robotika.html>
- [15] KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTIUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.

- [16] End effector for Robot – Definition/types/applications. hvr magnet.com [online]. 22.12.2023 [cit. 2023-22-12]. Dostupné z: <https://www.hvr magnet.com/blog/end-effector-for-robot-definition-types-applications/>
- [17] Svařovací bodovací kleště. prospot.cz [online]. 22.12.2023 [cit. 2023-22-12]. Dostupné z: <https://www.prospot.cz/svarovaci-stroje/svarovaci-bodovaci-kleste/>
- [18] Typizovaná robotická řešení Amtech. automatizace.hw.cz [online]. 22.12.2023 [cit. 2023-22-12]. Dostupné z: <https://automatizace.hw.cz/typizovana-roboticka-reseni-amtech.html>
- [19] Magnetic grippers for manufacturers. universal-robots.com [online]. 22.12.2023 [cit. 2023-22-12]. Dostupné z: <https://www.universal-robots.com/blog/magnetic-grippers-for-manufacturers/>
- [20] Lightweight gripping systems SLG. marek.eu [online]. 22.12.2023 [cit. 2023-22-12]. Dostupné z: <https://www.marek.eu/schmalz-vse-pro-vakuum/vakuova-technologie-pro-automatizaci/vakuove-komponenty/velkoplosne-grippers-a-uchopovace/34332/lightweight-gripping-systems-slg.html#konfigurator>
- [21] Planetary gear system. rolhoff.de [online]. 25.01.2024 [cit. 2024-25-01]. Dostupné z: <https://www.rolhoff.de/en/experience/technology-in-detail/planetary-gear-system>
- [22] Přímé planetové převodovky APEX – Řada AP/APC. raveo.cz [online]. 25.01.2024 [cit. 2024-25-01]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/apex-rada-ap-apc>
- [23] TP+ planetary gearbox. alpha.wittenstein.de [online]. 25.01.2024 [cit. 2024-25-01]. Dostupné z: <https://alpha.wittenstein.de/en-en/products/servo-gearboxes/low-backlash-planetary-gearboxes/tp-planetary-gearbox/>
- [24] Epitrochoid. mathcurve.com [online]. 25.01.2024 [cit. 2024-25-01]. Dostupné z: <https://mathcurve.com/courbes2d.gb/epitrochoid/epitrochoid.shtml>
- [25] Nabtesco's precision reduction gears: #1 in the world. nabtesco-ventures.com [online]. 25.01.2024 [cit. 2024-25-01]. Dostupné z: <https://nabtesco-ventures.com/precision-reduction-gears/>
- [26] RV-N series product catalog. precision.nabtesco.com [online]. 25.01.2024 [cit. 2024-25-01]. Dostupné z: <https://precision.nabtesco.com/en/download/>
- [27] Component RV-N. precision.nabtesco.com [online]. 25.01.2024 [cit. 2024-25-01]. Dostupné z: <https://precision.nabtesco.com/en/products/detail/RV-N>
- [28] Harmonic drive. harmonicdrive.net [online]. 25.01.2024 [cit. 2024-25-01]. Dostupné z: <https://www.harmonicdrive.net/technology>
- [29] Gear units. harmonicdrive.net [online]. 25.01.2024 [cit. 2024-25-01]. Dostupné z: <https://www.harmonicdrive.net/products/gear-units>
- [30] Hydraulické a pneumatické pohony ve strojírenství. mmspektrum.com [online]. 25.01.2024 [cit. 2024-25-01]. Dostupné z: <https://www.mmspektrum.com/clanek/hydraulicke-a-pneumaticke-pohony-ve-strojirenstvi>
- [31] PIVOŇKA, Josef. Tekutinové mechanismy. Praha: SNTL, 1987, 623 s.
- [32] Synchronní motory. projekty.osu.cz [online]. 26.02.2024 [cit. 2024-26-02]. Dostupné z: <https://projekty.osu.cz/irp2016/synchronni.html>
- [33] Synchronní stroje. spzengrova.cz [online]. 26.02.2024 [cit. 2024-26-02]. Dostupné z: https://www.spszengrova.cz/wp-content/uploads/2020/04/Ele-1-synchronn%C3%AD-stroje-rozd%C4%9Blen%C3%AD-v%C3%BDznam-princip-%C4%8Dinnosti_UT.pdf

- [34] Jak funguje servomotor a zpětnovazební řízení. raveo.cz [online]. 26.02.2024 [cit. 2024-26-02]. Dostupné z: <https://www.raveo.cz/aktualita/jak-funguje-servomotor-a-zpetnovazebni-rizeni/>
- [35] Simotics motors for industry. siemens.com [online]. 09.05.2024 [cit. 2024-09-05]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/products/drives/electric-motors.html>
- [36] Simotics S-1FT7 Servomotors. siemens.com [online]. 09.05.2024 [cit. 2024-09-05]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/global/en/products/drives/electric-motors/motion-control-motors/simotics-s/simotics-s-1ft7.html>
- [37] Technology with a future. siemens.com [online]. 09.05.2024 [cit. 2024-09-05]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/in/en/products/drives/electric-motors/dc-motors.html>
- [38] Benefits of DC motors and why they're great for robotics. automate.org [online]. 09.05.2024 [cit. 2024-09-05]. Dostupné z: <https://www.automate.org/motion-control/blogs/benefits-of-dc-motors-and-why-they-re-great-for-robotics>
- [39] How stepper motors are used in robotics applications. telcointernon.com [online]. 09.05.2024 [cit. 2024-09-05]. Dostupné z: <https://www.telcointercon.com/blog/stepper-motor-applications-in-robotics/>
- [40] What kind of applications are best for stepper motors. automate.org [online]. 09.05.2024 [cit. 2024-09-05]. Dostupné z: <https://www.automate.org/motion-control/blogs/what-kinds-of-applications-are-best-for-stepper-motors>
- [41] Springer Handbook of Robotics, edited by Bruno Siciliano, and Oussama Khatib, Springer International Publishing AG, 2016. ProQuest Ebook Central, <https://ebookcentral.proquest.com/lib/vutbrno/detail.action?docID=6212326>.
- [42] Ing. Vojtěch Štěpánek, Ph.D. Přímá a nepřímá úloha kinematiky [online]. In: <https://moodle.vut.cz/mod/resource/view.php?id=258063>
- [43] Three-dimensional rotation matrices. scipp.ucsc.edu [online]. 02.10.2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: http://scipp.ucsc.edu/~haber/ph216/rotation_12.pdf
- [44] Rotations and Euler angles. easyspin.org [online]. 02.10.2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://easyspin.org/documentation/eulerangles.html>
- [45] Rotation quaternions and how to use them. danceswithcode.net [online]. 02.10.2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://danceswithcode.net/engineeringnotes/quaternions/quaternions.html>
- [46] Quaternions and rotations. graphics.stanford.edu [online]. 02.10.2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://graphics.stanford.edu/courses/cs348a-17-winter/Papers/quaternion.pdf>
- [47] Forward kinematics: The Denavit-Hartenberg convention. users.cs.duke.edu [online]. 02.10.2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://users.cs.duke.edu/~brd/Teaching/Bio/asmb/current/Papers/chap3-forward-kinematics.pdf>
- [48] Ing. Martin Švejda, Ph.D. Úmluvy pro popis kinematiky manipulátorů [online]. In: z: https://home.zcu.cz/~msvejda/URM/prednasky/prednaska_3/prezentace.pdf
- [49] Inverse kinematics. motion.cs.illinois.edu [online]. 02.10.2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://motion.cs.illinois.edu/RoboticSystems/InverseKinematics.html#6R-manipulator-IK>

- [50] Inverse kinematics. opentextbooks.clemson.edu [online]. 02.10.2023 [cit. 2023-02-10]. Dostupné z: <https://opentextbooks.clemson.edu/wangrobotics/chapter/inverse-kinematics/>
- [51] Systémový přístup. os.fme.vutbr.cz [online]. 02.03.2024 [cit. 2024-02-03]. Dostupné z: <https://www.os.fme.vutbr.cz/KompendiumZnalosti/ev-1/SystemovyPristup>
- [52] KR cybertech nano. kuka.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://www.kuka.com/en-de/products/robot-systems/industrial-robots/kr-cybertech-nano>
- [53] GP12 FGG. cz.yaskawa.eu.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: https://www.cz.yaskawa.eu.com/produkty/roboty/food-lab/productdetail/product/gp12-fgg_689
- [54] Řada LR-10iA. fanuc.eu [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%c3%a1nka-filtru-robot%c5%af/lr-10-series>
- [55] TX2-90 industrial robot range. Staubli.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://www.staubli.com/cz/en/robotics/products/industrial-robots/tx2-90.html>
- [56] IRB 1300. new.abb.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/robotics/cs/roboty/prumyslove-roboty/irb-1300>
- [57] MAREK, Jiří. Systémový přístup a rozhodování v konstrukčním procesu: Metodika brněnské konstrukční školy. Brno, 2021.
- [58] EN-GJS-500-7, tvárná litina GGG50. cs.spironcasting.com [online]. 16.03.2024 [cit. 2024-16-03]. Dostupné z: <https://cs.spironcasting.com/news-show-4175.html>
- [59] 1.7262 low-carbon steel. kipp.com [online]. 16.03.2024 [cit. 2024-16-03]. Dostupné z: <https://www.kipp.com/th/en/Service/Material-overview/Steel/pid.1097.1108.1244.9839.9879/1-7262-mild-steel.html>
- [60] 30CrMoV9 (1.7707). steelnumber.com [online]. 16.03.2024 [cit. 2024-16-03]. Dostupné z: https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=858
- [61] Ing. Martin Hendrych. Namáhání na krut, pevnostní rovnice v krutu, dovolené napětí v krutu [online]. In: <https://slideplayer.cz/slide/3190004/>
- [62] SHIGLEY, Joseph Edward; MISCHKE, Charles R.; BUDYNAS, Richard G. (Richard Gordon); HARTL, Martin a VLK, Miloš. Konstruování strojních součástí. V Brně: VUTIUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [63] C45E (1.1191). steelnumber.com [online]. 16.03.2024 [cit. 2024-16-03]. Dostupné z: https://www.steelnumber.com/en/steel_composition_eu.php?name_id=186
- [64] Ozubená řemenice HTD 8M (rozteč 8,0 mm). eshop.haberkorn.cz [online]. 16.03.2024 [cit. 2024-16-03]. Dostupné z: <https://eshop.haberkorn.cz/ozubena-remenice-htd-8m-roztec-8-0-mm-ozubena-remenice-htd-8m-roztec-8-0-mm-1-34.html>
- [65] 1FT7044-1AF71-1CH1 synchronous motor. mall.industry.siemens.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/1FT70441AF711CH1>
- [66] 1FK7034-2AK71-1CH1 synchronous motor. mall.industry.siemens.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/1FK70342AK711CH1>
- [67] 1FK7032-2AK71-1CH1 synchronous motor. mall.industry.siemens.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/1FK70322AK711CH1>

- [68] 1FK7034-2AK71-1RH1 synchronous motor. mall.industry.siemens.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/1FK70342AK711RH1>
- [69] E93/50 fuse disconnecter. new.abb.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/cs/2CSM277962R1801/e-93-50>
- [70] S201-C10 circuit braker. new.abb.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/cs/2CDS251001R0104/s201-c10>
- [71] S203-C25 circuit braker. new.abb.com [online]. 01.03.2024 [cit. 2024-1-03]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/cs/2CDS253001R0254/s203-c25>
- [72] Emparro spinany zdroj, 1-fazovy. shop.murrelektronik.cz [online]. 01.03.2024 [cit. 2024-1-03]. Dostupné z: <https://shop.murrelektronik.cz/cs/Elektronika-v-rozvad-i/Nap-jen-DC/Sp-nan-zdroje/Emparro-spinany-zdroj-1-fazovy-85441.html>
- [73] 6SL3120-2TE13-0AD0 double motor module. mall.industry.siemens.com [online]. 01.03.2024 [cit. 2024-1-03]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/cs/cz/Catalog/Product/6SL3120-2TE13-0AD0>
- [74] 6ES7615-7DF10-0AB0 drive controller. mall.industry.siemens.com [online]. 29.02.2024 [cit. 2024-29-02]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/WW/Catalog/Product/6ES7615-7DF10-0AB0>
- [75] MGB2-L1HE-BR-U-S0-DY-R-164393 multifunctinoal gate box MGB2. euchner.de [online]. 01.03.2024 [cit. 2024-1-03]. Dostupné z: <https://www.euchner.de/de-de/a/164393/>
- [76] HBA-123208 ruční ovladač. euchner.de [online]. 01.03.2024 [cit. 2024-1-03]. Dostupné z: <https://www.euchner.de/cs-cz/vyrobky/rucni-ovladace-a-rucni-kolecka/rucni-ovladac-hba/hba-123208/?#techdata-tab>
- [77] 6SL3130-6AE15-0AB1 smart line module. mall.industry.siemens.com [online]. 01.03.2024 [cit. 2024-1-03]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/cs/cz/Catalog/Product/6SL3130-6AE15-0AB1>
- [78] Simatics S120 Booksize power selection manual. cache.industry.siemens.com [online]. 05.03.2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: https://cache.industry.siemens.com/dl/files/713/103189713/att_60920/v1/GH2_1204_en.pdf
- [79] Harmonic distortion. sciencedirect.com [online]. 05.03.2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/harmonic-distortion>
- [80] 6SL32030DE218AA0 line reactor. mall.industry.siemens.com [online]. 05.03.2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://mall.industry.siemens.com/mall/en/us/Catalog/Product/6SL32030CE218AA0>
- [81] SIMATIC S7-1500 STEP 7: S7-1500T kinematics functions V7.0. support.industry.siemens.com [online]. 05.03.2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://support.industry.siemens.com/cs/document/109812058/simatic-s7-1500-step-7-s7-1500t-kinematics-functions-v7-0-as-of-step-7-v18?dti=0&lc=en-DE>
- [82] AF40-30-00-11 contactor. new.abb.com [online]. 05.03.2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://new.abb.com/products/1SBL347001R1100/af40-30-00-11>
- [83] MSC-CE-AC-F04-121295 rozšiřující modul MSC-CE. euchner.de [online]. 05.03.2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.euchner.de/cs-cz/a/121295/>

[84] MSC-CB-AC-FI8FO4S-166057 základní modul MSC-CB-S. euchner.de [online]. 05.03.2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.euchner.de/cs-cz/a/166057/?#techdata-tab>

[85] Ventilátor s filtrem TopTherm. rittal.com [online]. 05.03.2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.rittal.com/de-de/products/PG0168KLIMA1/PGR1932KLIMA1/PG0201KLIMA1/PRO0299?variantId=3241100>

[86] Výstupní filtr standartní. rittal.com [online]. 05.03.2024 [cit. 2024-05-03]. Dostupné z: <https://www.rittal.com/de-de/products/PG0168KLIMA1/PGR1953KLIMA1/PGR2010KLIMA1/PRO0301?variantId=3240200>

[87] VELEBIL, Radek. Cena robota [elektronická pošta]. Message to: ondra.stefek@seznam.cz. 20.3.2024, 8:28 [cit. 2024-20-03]

16 SEZNAM ZKRATEK, SYMBOLŮ, OBRÁZKŮ A TABULEK

16.1 Seznam zkratk a symbolů

| | | |
|------------------------|-------------|---|
| MSP | | Mezní stav pružnosti |
| MKP | | Metoda konečných prvků |
| SS | | Souřadný systém |
| $\alpha_{k_pastorek}$ | [-] | Tvarový součinitel pro krut pastorku |
| $\alpha_{O_hřidelka}$ | [-] | Tvarový součinitel pro ohyb hřídele páté osy |
| $\alpha_{k_hřidelka}$ | [-] | Tvarový součinitel pro krut hřídele páté osy |
| d_1 | [mm] | Průměr nebezpečného průřezu 1 |
| d_2 | [mm] | Průměr nebezpečného průřezu 2 |
| d_3 | [mm] | Průměr nebezpečného průřezu 3 |
| D_1 | [mm] | Velký průměr nebezpečného průřezu 1 |
| D_3 | [mm] | Velký průměr nebezpečného průřezu 3 |
| $d_{hřidelka}$ | [mm] | Průměr hřídele páté osy v nebezpečném průřezu |
| $d_{horní_hřidelka}$ | [mm] | Větší průměr nebezpečného průřezu hřídele páté osy |
| d_{min} | [mm] | Minimální průměr hřídele páté osy |
| d_p | [mm] | Výpočtový průměr ozubené řemenice |
| E | [mm] | Excentricita hřídele |
| F_O | [N] | Obvodová síla na ozubeném řemenu |
| F_{Z2} | [N] | Síla vyvolaná hmotností částí robotu za druhou osou |
| F_{Z5} | [N] | Síla vyvolaná hmotností částí robotu pátou osou |
| g | $[ms^{-2}]$ | Gravitační zrychlení |
| H_6^0 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 1 do SS 6 |
| H_1^0 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 0 do SS 1 |
| H_2^1 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 1 do SS 2 |
| H_3^2 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 2 do SS 3 |
| H_4^3 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 3 do SS 4 |
| H_5^4 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 4 do SS 5 |
| H_6^5 | [-] | Transformace souřadného systému ze SS 5 do SS 6 |
| i_5 | [-] | Převod páté osy |
| i_{celk} | [-] | Celkový převodový poměr |
| $I_{BezpečZám}$ | [A] | Proud odebíraný bezpečnostním zámekem |
| I_{celk} | [A] | Celkový proud odebíraný všemi součástmi v rozvaděči |
| I_{DrCont} | [A] | Proud odebíraný drive controllerem |
| $I_{měnič}$ | [A] | Proud odebíraný měničem |
| I_{SLM} | [A] | Proud odebíraný smart line modulem |

| | | |
|-----------------------------|-------|---|
| $I_{SouhlPovZař}$ | [A] | Proud odebíraný souhlasným povelovým zařízením |
| $k_{hřidelka}$ | [-] | Bezpečnost hřídele páté osy |
| $k_{MSP_hřidelka}$ | [-] | Bezpečnost hřídele páté osy vzhledem k MSP |
| $k_{odlitek}$ | [-] | Bezpečnost odlitku vzhledem k MSP |
| $k_{pastorek}$ | [-] | Bezpečnost pro výpočet dovoleného napětí v krutu |
| m_{Z2} | [kg] | Hmotnost částí robotu za druhou osou |
| m_{Z5} | [kg] | Hmotnost částí robotu za pátou osou |
| M_{B_2} | [Nm] | Brzdňý moment osy 2 |
| M_{B_5} | [Nm] | Brzdňý moment osy 5 |
| M_{k_dim} | [Nm] | Krouticí moment, na který byla dimenzována hřídel páté osy |
| $M_{k_hřidel_přiv}$ | [Nm] | Max. krouticí moment elektromotoru, který je na hřídel přiveden |
| $M_{k_hřidel_max}$ | [Nm] | Max. krouticí moment vygenerovaný pátou osou |
| $M_{k_pastorek}$ | [Nm] | Max. krouticí moment elektromotoru, který je na pastorek přiveden |
| $M_{K_{hřidel}}$ | [Nm] | Krouticí moment v nebezpečném průřezu |
| $M_{O_{hřidel}}$ | [Nm] | Max. ohybový moment hřídele v působišti síly R_{ay} |
| $M_{O_{konc}}$ | [Nm] | Ohybový moment v nebezpečném průřezu |
| M_{Z2} | [Nm] | Moment vyvolaný silou F_{Z2} |
| M_{Z5} | [Nm] | Moment vyvolaný silou F_{Z5} |
| N | [-] | Počet válečků |
| P_{celk} | [W] | Celkový ztrátový výkon |
| P_{CPU} | [W] | Ztrátový výkon drive controlleru |
| $P_{měnič}$ | [W] | Ztrátový výkon měniče |
| P_{SLM} | [W] | Ztrátový výkon smart line modulu |
| r_1 | [mm] | Poloměr zaoblení nebezpečného průřezu 1 |
| $r_{hřidelka}$ | [mm] | Poloměr zaoblení hřídele páté osy |
| R | [mm] | Poloměr díry pro válečky |
| R_{ay} | [N] | Reakce ložiska levého uložení |
| R_{by} | [N] | Reakce ložiska pravého uložení |
| $R_{e_hřidelka}$ | [MPa] | Mez kluzu materiálu hřídele páté osy |
| $R_{e_odlitek}$ | [MPa] | Mez kluzu litiny odlitku |
| $R_{e_pastorek}$ | [MPa] | Mez kluzu materiálu pastorku |
| R_r | [mm] | Poloměr válečků |
| σ_{Dt} | [MPa] | Dovolené napětí v tahu |
| $\sigma_{O_nom,hřidelka}$ | [MPa] | Nominální napětí v ohybu hřídele páté osy v nebezpečném průřezu |
| $\sigma_{O_skut,hřidelka}$ | [MPa] | Skutečné napětí v ohybu hřídele páté osy v nebezpečném průřezu |
| $\sigma_{red_hřidelka}$ | [MPa] | Redukované napětí hřídele páté osy v nebezpečném průřezu |
| $\sigma_{skut_odlitek}$ | [MPa] | Skutečné napětí v odlitku |
| τ_{Dk} | [MPa] | Dovolené napětí v krutu |
| τ_{k1} | [MPa] | Napětí v krutu v nebezpečném průřezu 1 |
| τ_{k2} | [MPa] | Napětí v krutu v nebezpečném průřezu 2 |

| | | |
|---------------------------|--------------------|---|
| τ_{k3} | [MPa] | Napětí v krutu v nebezpečném průřezu 3 |
| τ_{kskut1} | [MPa] | Skutečné napětí v krutu v nebezpečném průřezu 1 |
| $\tau_{k_nom,hřídélka}$ | [MPa] | Nominální napětí v krutu hřídele páté osy v nebezpečném průřezu |
| $\tau_{k_skut,hřídélka}$ | [MPa] | Skutečné napětí v krutu hřídele páté osy v nebezpečném průřezu |
| W_{k1} | [mm ³] | Modul průřezu v krutu pro nebezpečný průřez 1 |
| W_{k2} | [mm ³] | Modul průřezu v krutu pro nebezpečný průřez 2 |
| W_{k3} | [mm ³] | Modul průřezu v krutu pro nebezpečný průřez 3 |
| X | [mm] | Souřadnice X |
| Y | [mm] | Souřadnice Y |
| Z_1 | [-] | Počet zubů pastorku |
| Z_2 | [-] | Počet zubů planetového kola |
| Z_4 | [-] | Počet válečků |

16.2 Seznam obrázků

| | |
|--|----|
| Obr. 1 Počet instalovaných robotů (2012-2022) [2] | 19 |
| Obr. 2 Rozdělení robotů podle pohybu v prostředí [12] | 21 |
| Obr. 3 Schéma planetové převodovky [21] | 24 |
| Obr. 4 Epitrochoida [24] | 25 |
| Obr. 5 Cykloidní disk | 26 |
| Obr. 6 Řez cykloidní převodovkou RV-N [26] | 26 |
| Obr. 7 Části harmonické převodovky [28] | 27 |
| Obr. 8 Otáčení harmonické převodovky [28] | 27 |
| Obr. 9 Dvoufázový převod harmonické převodovky [28] | 28 |
| Obr. 10 Axiální pístový hydromotor s nakloněnou deskou [31] | 29 |
| Obr. 11 Rozdělení elektrických pohonů [15] | 30 |
| Obr. 12 Zpětnovazební řízení servopohonu [34] | 30 |
| Obr. 13 Střídavé synchronní servomotory 1FT od firmy Siemens [36] | 31 |
| Obr. 14 Stejnsměrný motor používaný v robotice [38] | 31 |
| Obr. 15 Krokové motory NEMA [40] | 31 |
| Obr. 16 Přímá a inverzní kinematika [15] | 32 |
| Obr. 17 Natáčení pomocí Eulerových úhlů [6] | 33 |
| Obr. 18 Konvence komplexních čísel u quaternionů [15] | 34 |
| Obr. 19 Znázornění DH parametrů [48] | 35 |
| Obr. 20 Možné konfigurace manipulátoru [50] | 36 |
| Obr. 21 Konfigurace manipulátoru směrem dolů s rozměry [50] | 37 |
| Obr. 22 Myšlenková mapa – znázornění reprezentativních parametrů | 40 |
| Obr. 23 První verze robotu (1 – krokový motor, 2 – planetová převodovka, 3 – uložení motoru první osy) | 44 |
| Obr. 24 Druhá verze robotu (1 – uložení motoru první osy, 2 – odlitek třetí osy, 3 – motory v jedné ose) | 45 |
| Obr. 25 Třetí verze robotu (1 – pátý odlitek, 2 – šestý odlitek) | 46 |
| Obr. 26 Čtvrtá verze robotu | 46 |
| Obr. 27 Souřadné systémy u robotu | 51 |
| Obr. 28 Začáteční poloha robotu | 53 |
| Obr. 29 Konečná poloha robotu | 53 |
| Obr. 30 Postup ověření odlitků | 54 |
| Obr. 31 Model v softwaru MSC Adams | 55 |

| | |
|--|----|
| Obr. 32 Síly na odlitku č. 2 | 55 |
| Obr. 33 Působení a průběh síly v programu Ansys..... | 56 |
| Obr. 34 Mesh na odlitku 2..... | 56 |
| Obr. 35 Výsledné napětí v odlitku 2..... | 57 |
| Obr. 36 Pracovní obálka robotu..... | 59 |
| Obr. 37 Maximální natočení první osy | 60 |
| Obr. 38 Vázání přepravních pásů na oka | 60 |
| Obr. 39 Poloha těžiště | 61 |
| Obr. 40 Konstrukční celky robotu | 61 |
| Obr. 41 Motor s pastorkem (1-svěrný spoj, 2-lisovaný kroužek, 3-pastorek, 4-motor) | 62 |
| Obr. 42 Pohon druhé osy v řezu | 63 |
| Obr. 43 Uložení řemenice páte osy | 63 |
| Obr. 44 Část modelu odlitku v prostředí 3D tiskového sliceru | 64 |
| Obr. 45 Skládání, lepení a voskování 3D tištěného modelu | 65 |
| Obr. 46 Vytavitelné modely | 65 |
| Obr. 47 Odlévání odlitků..... | 66 |
| Obr. 48 Obrobený a lakovaný odlitek..... | 66 |
| Obr. 49 Adaptér motoru druhé osy..... | 67 |
| Obr. 50 Pastorek první osy | 69 |
| Obr. 51 Lisovaný kroužek na hřídel | 69 |
| Obr. 52 Čelní plocha převodovka a tvar drážky pro těsnění | 70 |
| Obr. 53 Působení síly F_z za osou dva..... | 72 |
| Obr. 54 Působení síly F_{z5} na osu pět..... | 72 |
| Obr. 55 Nebezpečné průřezy pastorku první osy | 73 |
| Obr. 56 Nebezpečné průřezy pastorku první osy v řezu | 73 |
| Obr. 57 Graf pro určení součinitele koncentrace v krutu [62] | 75 |
| Obr. 58 Parametry ozubených řemenic [64]..... | 76 |
| Obr. 59 Obvodová síla na ozubené řemenici | 77 |
| Obr. 60 Uložení hřídele a působení obvodové síly | 77 |
| Obr. 61 Uvolněné vazby na hřídeli..... | 77 |
| Obr. 62 Průběh ohybového momentu..... | 78 |
| Obr. 63 Průběh sil | 79 |
| Obr. 64 Grafické určení tvarového součinitele pro nahání krutem | 80 |
| Obr. 65 Grafické určení tvarového součinitele pro nahání ohybem..... | 81 |
| Obr. 66 Hlavní vypínač elektrického rozvaděče..... | 84 |
| Obr. 67 Pojistkový odpínač a pojistka [69] | 84 |
| Obr. 68 Jističe ABB (vlevo 10 A pro jednu fázi, vpravo 25 A pro tři fáze) [70][71]..... | 85 |
| Obr. 69 Zdroj Murr elektronik [72]..... | 86 |
| Obr. 70 Propojení přípojnic a frekvenční měnič [73][78]..... | 86 |
| Obr. 71 Smart line modul (vlevo) a tlumivka (vpravo) [77][80] | 87 |
| Obr. 72 Princip komunikace CPU s motory [81]..... | 87 |
| Obr. 73 Stykač [82] | 88 |
| Obr. 74 Bezpečnostní PLC (vlevo) a rozšiřující modul (vpravo) [83][84] | 89 |
| Obr. 75 Souhlasné povelové zařízení [76]..... | 89 |
| Obr. 76 Bezpečnostní zámek [75] | 89 |
| Obr. 77 Nastavení programu Rittal Therm | 90 |
| Obr. 78 Výsledek výpočtu Rittal Therm..... | 90 |
| Obr. 79 Ventilátor a výfuková mřížka [85][86]..... | 90 |
| Obr. 80 Vnitřní struktura komponent robotu | 91 |
| Obr. 81 Vzájemné propojení CPU a měničů | 91 |
| Obr. 82 Struktura technologických objektů | 92 |

| | |
|---|----|
| Obr. 83 Přiřazení motoru k technologickému objektu..... | 92 |
| Obr. 84 Robotizované pracoviště UVSSR (1 – oplocení robotizovaného pracoviště, 2 – elektrický rozvaděč, 3 – robot)..... | 95 |
| Obr. 85 Blokový diagram robotu..... | 95 |
| Obr. 86 Analýza významných nebezpečí první fáze životního cyklu robotu..... | 96 |
| Obr. 87 Odhad velikosti počátečního rizika | 96 |

16.3 Seznam tabulek

| | |
|---|----|
| Tab. 1 Počet instalovaných robotů na 10 000 zaměstnanců [3] | 20 |
| Tab. 2 Dělení robotů podle počtu stupňů volnosti [5][6][7] | 20 |
| Tab. 3 Dělení robotů podle kinematické struktury [9][10][11]..... | 21 |
| Tab. 4 Příklady robotů dle pohybu v prostředí [13][14] | 22 |
| Tab. 5 Typy technologických hlavic [17][18] | 22 |
| Tab. 6 Typy manipulačních hlavic [15]..... | 23 |
| Tab. 7 Typy manipulačních hlavic [19][20] | 23 |
| Tab. 8 Výrobci planetových převodovek [22][23]..... | 25 |
| Tab. 9 Výhody a nevýhody jednotlivých druhů pohonů [15][30]..... | 28 |
| Tab. 10 Popis jednotlivých DH parametrů | 35 |
| Tab. 11 Systém podstatných veličin | 41 |
| Tab. 12 Dostupná řešení na trhu [52][53][54][55][56] | 43 |
| Tab. 13 Dostupná řešení robotů s nosností 10kg | 43 |
| Tab. 14 Relevantní parametry | 47 |
| Tab. 15 Párové porovnání kritérií..... | 47 |
| Tab. 16 Bodové hodnocení kritérií | 48 |
| Tab. 17 Výpočet vah a stanovení blízkosti kritérií | 48 |
| Tab. 18 Stupně hodnocení variant | 49 |
| Tab. 19 Hodnocení varianty 1 | 49 |
| Tab. 20 Hodnocení varianty 2 | 49 |
| Tab. 21 Hodnocení varianty 3 | 50 |
| Tab. 22 Hodnocení varianty 4 | 50 |
| Tab. 23 Výsledky multikriteriálního hodnocení | 50 |
| Tab. 24 Parametrická tabulka | 52 |
| Tab. 25 Maximální napětí a bezpečnost vzhledem k MSP | 57 |
| Tab. 26 Pracovní rozsahy robotu..... | 59 |
| Tab. 27 Parametry převodovek..... | 62 |
| Tab. 28 Ozubení jednotlivých os..... | 68 |
| Tab. 29 Porovnání ocelí [59][60] | 68 |
| Tab. 30 Použité motory a jejich parametry [65][66][67][68]..... | 83 |
| Tab. 31 Momenty na výstupu z převodovek..... | 83 |
| Tab. 32 Formulář pro snížení rizika | 97 |
| Tab. 33 Součet cen od jednotlivých dodavatelů | 99 |

17 SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 – Výkresová dokumentace
- Příloha 2 – Schéma elektrického zapojení
- Příloha 3 – Analýza rizik robotického pracoviště UVSSR
- Příloha 4 – FEM analýza odlitků
- Příloha 5 – Síly pro metodu konečných prvků
- Příloha 6 – Emailová komunikace
- Příloha 7 – 3D model ve formátu .STEP
- Příloha 8 – Fotografická dokumentace
- Příloha 9 – Video simulace MSC Adams

Hierarchie výkresů

- 3HCZDIP000_000000 – Sestava robota
- 3HCZDIP000_000000 – Dosahy robota
- 3HCZDIP000_000000 – Převrva robota
- 3HCZDIP000_010000 – Sestava první osy
 - 3HCZDIP000_010001 – Rozměry odlitku 1
 - 3HCZDIP000_010001 – Obrábění odlitku 1
 - 3HCZDIP000_010001 – Lakování odlitku 1
 - 3HCZDIP000_010002 – Kryt první osy
 - 3HCZDIP000_010003 – Spodní sloupek
- 3HCZDIP000_020000 – Sestava druhé osy
 - 3HCZDIP000_020001 – Rozměry odlitku 2
 - 3HCZDIP000_020001 – Obrábění odlitku 2
 - 3HCZDIP000_020001 – Lakování odlitku 2
 - 3HCZDIP000_020002 – Hřídel RV 100N 161
 - 3HCZDIP000_020003 – Hřídel RV 125F 97,5
 - 3HCZDIP000_020006 – Lisovaný kroužek
 - 3HCZDIP000_020007 – Lisovaný kroužek
 - 3HCZDIP000_020100 – Kryt RV 100N 161
 - 3HCZDIP000_020200 – Kryt RV 125F 97,5
- 3HCZDIP000_030000 – Sestava třetí osy
 - 3HCZDIP000_030001 – Rozměry odlitku 3
 - 3HCZDIP000_030001 – Obrábění odlitku 3
 - 3HCZDIP000_030001 – Lakování odlitku 3
 - 3HCZDIP000_030002 – Kryt RV 70F 125,8

3HCZDIP000_030003 – Rozpěrný kroužek
3HCZDIP000_040000 – Sestava čtvrté osy
3HCZDIP000_040001 – Rozměry odlitku 4
3HCZDIP000_040001 – Obrábění odlitku 4
3HCZDIP000_040001 – Lakování odlitku 4
3HCZDIP000_040002 – Kryt RV 70F 125,8
3HCZDIP000_040003 – Kryt RV 70F 125,8
3HCZDIP000_040004 – Hřídel RV 70F 125,8
3HCZDIP000_040007 – Kryt RV 70F 125,8
3HCZDIP000_040008 – Lisovaný kroužek
3HCZDIP000_040009 – Těsnící kroužek
3HCZDIP000_050000 – Sestava páté osy
3HCZDIP000_050001 – Rozměry odlitku 5
3HCZDIP000_050001 – Obrábění odlitku 5
3HCZDIP000_050001 – Lakování odlitku 5
3HCZDIP000_050003 – Kryt ložiska
3HCZDIP000_050004 – Spojovací plech
3HCZDIP000_050005 – Hřídel RV 42N 126
3HCZDIP000_050006 – Kryt ložiska
3HCZDIP000_050008 – Lisovaný kroužek
3HCZDIP000_050010 – Hřídel páté osy
3HCZDIP000_050011 – Nastavňový hřídel
3HCZDIP000_050100 – Kryt RV 42N 126
3HCZDIP000_060000 – Sestava šesté osy
3HCZDIP000_060001 – Rozměry odlitku 6
3HCZDIP000_060001 – Obrábění odlitku 6
3HCZDIP000_060001 – Lakování odlitku 6
3HCZDIP000_060002 – Přípojňový plech
3HCZDIP000_060003 – Připojovací plech
3HCZDIP000_060004 – Připojovací plech
3HCZDIP000_060005 – Hřídel RV 25N 107,66
3HCZDIP000_060006 – Lisovaný kroužek
RV-25N 107,66 – Lakování šesté osy
RV-42N 126 – Lakování páté osy
RV-70F 125,8 – Lakování čtvrté osy
RV-70F 125,8 – Lakování třetí osy
RV-100N-161 – Lakování druhé osy
RV-125N-97,9 – Lakování první osy