

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI  
**FAKULTA STROJNÍ**

Studijní program: N 2301 Strojní inženýrství  
Studijní obor: 2301T007 Průmyslové inženýrství a management

# **DIPLOMOVÁ PRÁCE**

Porovnání realizace procesu člověkem a kolaborativním robotem

Autor: **Bc. Akram RAGEH**

Vedoucí práce: **doc. Ing. Milan EDL, Ph.D.**

Akademický rok 2019/2020



ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

Fakulta strojní

Akademický rok: 2019/2020

## ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Bc. Akram RAGEH**  
Osobní číslo: **S19N0026K**  
Studijní program: **N2301 Strojní inženýrství**  
Studijní obor: **Průmyslové inženýrství a management**  
Téma práce: **Porovnání realizace procesu člověkem a kolaborativním robotem**  
Zadávací katedra: **Katedra průmyslového inženýrství a managementu**

### Zásady pro vypracování

1. Industry 4.0
2. Robotika
3. Popis experimentu
4. Měření
5. Vyhodnocení

Rozsah diplomové práce: **50 – 70 stran**  
Rozsah grafických prací: **0 výkresů**  
Forma zpracování diplomové práce: **tištěná**

Seznam doporučené literatury:

1. FORD, M. Roboti nastupují: automatizace, umělá inteligence a hrozba budoucnosti bez práce. Praha: Rybka Publishers, 2017. ISBN 978-80-87950-46-3.
2. GILCHRIST, A. Industry 4.0: The Industrial Internet of Things. New York: Springer Science+Business Media, 2016. ISBN 978-1-4842-2046-7.
3. CHLEBNÝ, Jan a kol. Automatizace a automatizační technika: Prostředky automatizační techniky. Brno: Computer Press, 2014. ISBN 978-80-251-3747-5.
4. SICILIANO, B., KHATIB, O. Springer handbook of robotics. 2nd edition. Berlin: Springer, 2016. ISBN 978-3-319-32550-7.

Vedoucí diplomové práce: **Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
Katedra průmyslového inženýrství a managementu

Konzultant diplomové práce: **Ing. Tomáš Broum, Ph.D.**  
Katedra průmyslového inženýrství a managementu

Datum zadání diplomové práce: **23. září 2019**  
Termín odevzdání diplomové práce: **28. května 2020**



---

**Doc. Ing. Milan Edl, Ph.D.**  
děkan



---

**Doc. Ing. Michal Šimon, Ph.D.**  
vedoucí katedry

## **Prohlášení o autorství**

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci sepsala samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu, který je součástí této práce.

V Plzni dne: .....

..... podpis autora



## **Poděkování**

Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucí diplomové práce doc. Ing. Milanu Edlovi, Ph.D. a Ing. Tomáši Broumovi, Ph.D. za odborné vedení mé práce, za podporu a trpělivost při jejím vytváření, a také za cenné poznámky a připomínky. Mé velké poděkování patří také Ing. Jedlička Františkovi, který mi věnoval svůj čas a dovolil nahlédnout do jeho osobních životů a zkušeností, taky děkuji Mgr. Lence Šindelářové za korektury českého jazyka.

Rád bych poděkoval také své rodině a všem přátelům, kteří mě při vytváření této práce podpořili, a bez jejichž pomoci by nebylo možné práci dokončit.





## ANOTAČNÍ LIST DIPLOMOVÉ PRÁCE

|                      |   |                       |  |
|----------------------|---|-----------------------|--|
| <b>AUTOR</b>         | Příjmení<br>Bc. Rageh   | Jméno<br>Akram        |  |
| <b>STUDIJNÍ OBOR</b> | 2301T007 Průmyslové inženýrství a management                  |                       |  |
| <b>VEDOUCÍ PRÁCE</b> | Příjmení (včetně titulů)<br>doc. Ing. EDL, Ph.D.              | Jméno<br>Milan        |  |
| <b>PRACOVÍŠTĚ</b>    | ZČU – FST – KPV   |                       |  |
| <b>DRUH PRÁCE</b>    | <b>DIPLOMOVÁ</b>  | <del>BAKALÁŘSKÁ</del> |  |
| <b>NÁZEV PRÁCE</b>   | Porovnání realizace procesu člověkem a kolaborativním robotem |                       |  |

|                |         |                |     |                    |      |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| <b>FAKULTA</b> | strojní | <b>KATEDRA</b> | KPV | <b>ROK ODEVZD.</b> | 2020 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

### POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

|               |    |                     |    |                      |    |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| <b>CELKEM</b> | 94 | <b>TEXTOVÁ ČÁST</b> | 82 | <b>GRAFICKÁ ČÁST</b> | 12 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

|                      |  |
|----------------------|--|
| <b>STRUČNÝ POPIS</b> | Práce se zabývá porovnání realizace procesu člověkem a kolaborativním robotem. V teoretické části jsou popsány průmyslové revoluce, průmysl 4.0, dále je popsána robotika, a zejména kolaborativní robot. V praktické části je popsáno experimentální pracoviště kolaborativního robota a jsou provedeny experimenty, dále jejich vyhodnocení a na závěr je uvedeno technicko – ekonomické zhodnocení. |
| <b>KLÍČOVÁ SLOVA</b> | Průmysl 4.0, robotika, kolaborativní robot, REFA, časový snímek  |

## SUMMARY OF DIPLOMA SHEET

|                          |  |               |
|--------------------------|--|---------------|
| <b>AUTHOR</b>            | Surname<br>Bc. Rageh   | Name<br>Akram |
| <b>FIELD OF STUDY</b>    | 2301T007 Industrial Engineering and Management                     |               |
| <b>SUPERVISOR</b>        | Surname (Inclusive of Degrees)<br>doc. Ing. EDL, Ph.D.             | Name<br>Milan |
| <b>INSTITUTION</b>       | ZČU – FST – KPV  |               |
| <b>TYPE OF WORK</b>      | DIPLOMA  | BACHELOR      |
| <b>TITLE OF THE WORK</b> | Comparison of process realization of human and collaborative robot |               |

|                |                        |                   |                                       |                     |      |
|----------------|------------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------|------|
| <b>FACULTY</b> | Mechanical Engineering | <b>DEPARTMENT</b> | Industrial Engineering and Management | <b>SUBMITTED IN</b> | 2020 |
|----------------|------------------------|-------------------|---------------------------------------|---------------------|------|

### NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

|                |    |                  |    |                       |    |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| <b>TOTALLY</b> | 94 | <b>TEXT PART</b> | 82 | <b>GRAPHICAL PART</b> | 12 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

|                          |   |
|--------------------------|---|
| <b>BRIEF DESCRIPTION</b> | The thesis deals with the comparison of process realization of human and collaborative robot. The theoretical part describes the industrial revolutions, Industry 4.0, and further described robotics, especially collaborative robot. The practical part describes the experimental workplaces of the collaborative robot and the experiments, their evaluation and technical economic evaluation. |
| <b>KEY WORDS</b>         | Industry 4.0, robotics, collaborative robot, REFA, time frame   |

## Obsah

|   |           |
|---|-----------|
| <b>Seznam obrázků .....</b>   | <b>13</b> |
| <b>Seznam tabulek.....</b>  | <b>15</b> |
| <b>Seznam grafu .....</b>   | <b>16</b> |
| <b>Seznam zkratk .....</b>  | <b>17</b> |
| <b>Úvod.....</b>  | <b>18</b> |
| <b>1 Průmysl 4.0 .....</b>  | <b>19</b> |
| 1.1 Popis – Průmysl 4.0 .....                                       | 19        |
| 1.2 Průmyslové revoluce .....                                       | 19        |
| 1.3 Průmysl 4.0 v praxi.....  | 21        |
| <b>2 Robotika .....</b>   | <b>24</b> |
| 2.1 Definice základních pojmů robotiky .....                        | 24        |
| 2.2 Historie robotiky .....   | 26        |
| 2.3 Klasifikace manipulačních zařízení .....                        | 31        |
| 2.4 Struktura robotů .....  | 34        |
| 2.5 Hlavní součásti robotů .....                                    | 37        |
| 2.6 Pohony průmyslových robotů a manipulátorů.....                  | 39        |
| <b>3 Kolaborativní robot.....</b>                                   | <b>43</b> |
| 3.1 Popis kolaborativního robota.....                               | 43        |
| 3.2 Funkce a parametry kolaborativních robotů .....                 | 44        |
| 3.3 Výhody a nevýhody kolaborativních robotů a jejich využití ..... | 47        |
| 3.4 Výrobci kolaborativních robotů.....                             | 51        |
| <b>4 Popis experimentu a experimentálního pracoviště .....</b>      | <b>53</b> |
| 4.1 Popis experimentu .....   | 53        |
| 4.2 Popis experimentálního pracoviště .....                         | 58        |
| 4.3 Popis jednotlivých komponentů pracoviště .....                  | 59        |
| <b>5 Statistické vyhodnocení měření.....</b>                        | <b>62</b> |
| 5.1 Souhrn výsledků z měření .....                                  | 62        |
| 5.2 Statistické vyhodnocení .....                                   | 64        |
| <b>6 Vyhodnocení experimentu .....</b>                              | <b>68</b> |
| 6.1 Vyhodnocení měření času .....                                   | 68        |
| 6.2 Vyhodnocení chybovosti.....                                     | 72        |
| 6.3. Ekonomické hodnocení .....                                     | 74        |
| 6.4 Výsledné vyhodnocení .....                                      | 78        |

|          |                                       |           |
|----------|---------------------------------------|-----------|
| <b>7</b> | <b>Závěr.....</b>                     | <b>81</b> |
| <b>8</b> | <b>Seznam použité literatury.....</b> | <b>82</b> |
|          | <b>Seznam příloh .....</b>            | <b>86</b> |
|          | <b>Příloha č.1 .....</b>              | <b>87</b> |
|          | <b>Příloha č.2 .....</b>              | <b>91</b> |

## Seznam obrázků

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 1-1: Revoluce v průmyslu [44] .....  | 20 |
| Obrázek 1-2: Inteligentní mobilní asistent optimalizuje výrobní procesy [9].....     | 21 |
| Obrázek 1-3: Čidla pro udržování stavu na bázi [9] .....                             | 22 |
| Obrázek 1-4: Humanoidní tovární dělník [9] .....                                     | 23 |
| Obrázek 2-1: Scéna ze hry R.U.R. se třemi roboty .....                               | 25 |
| Obrázek 2-2: Průmyslový robot Kuka KR16 [24] .....                                   | 26 |
| Obrázek 2-3: Robot ABB IRB6600 [24].....   | 27 |
| Obrázek 2-4: Shakey vybaven viděním [24].....  | 28 |
| Obrázek 2-5: Robot ASEA IRb6 [24] .....  | 28 |
| Obrázek 2-6: Robot ADEPT koncepce SCARA [24] .....                                   | 29 |
| Obrázek 2-7: Chirurgický robot Zeus [24].....  | 29 |
| Obrázek 2-8: Robot Sojourner [24].....   | 29 |
| Obrázek 2-9: Robot Asimo [24] .....  | 30 |
| Obrázek 2-10: Robot Robocoaster [24] .....   | 30 |
| Obrázek 2-11: NASA robot [24] .....  | 30 |
| Obrázek 2-12: Rozdělení manipulačních zařízení [28].....                             | 31 |
| Obrázek 2-13: Jednoúčelový synchronní manipulátor [30] .....                         | 32 |
| Obrázek 2-14: Univerzální synchronní manipulátor [30] .....                          | 32 |
| Obrázek 2-15: Synchronní manipulátor Master-Slave využívaný v lékařství [28].....    | 32 |
| Obrázek 2-16: Průmyslový robot 1. generace [30] .....                                | 33 |
| Obrázek 2-17: Průmyslový robot 2. generace [30] .....                                | 33 |
| Obrázek 2-18: Robot IRB1400 [24] .....   | 35 |
| Obrázek 2-19: Motoman SK16 manipulátor [24] .....                                    | 35 |
| Obrázek 2-20: Konfigurace sférického manipulátoru [24] .....                         | 35 |
| Obrázek 2-21: Rameno Stanford, jeden z nejznámějších sférických robotů [24].....     | 36 |
| Obrázek 2-22: Pracovní prostor sférického manipulátoru [24].....                     | 36 |
| Obrázek 2-23: SCARA [24] .....   | 36 |
| Obrázek 2-24: Epson E2L653S SCARA robot [24] .....                                   | 37 |
| Obrázek 2-25: Pracovní prostor manipulátoru SCARA [24] .....                         | 37 |
| Obrázek 2-26: LEGO Mindstorms – napájené baterií nebo stejnosměrné [33].....         | 40 |
| Obrázek 2-27: Kodér [33] .....   | 40 |
| Obrázek 2-28: Robot FANUC provozovaný servomotory [33].....                          | 41 |
| Obrázek 3-1: Spolupracující kolaborativní robot s člověkem [36] .....                | 43 |
| Obrázek 3-2: Společné úkoly a pracovní prostory mezi operátorem a robotem [38] ..... | 45 |
| Obrázek 3-3: Robot s užitečným zatížením [39].....                                   | 45 |
| Obrázek 3-4: Opakovatelnost pohybu robota [39].....                                  | 46 |
| Obrázek 3-5: Robot a bezpečnost vůči operátorovi [39].....                           | 46 |
| Obrázek 3-6: Dosah robota [39].....  | 46 |
| Obrázek 3-7: Stupně volnosti robota [39] .....                                       | 47 |
| Obrázek 3-8: Uchopení a uložení [40] .....   | 48 |
| Obrázek 3-9: CNC obrábění [40] .....   | 49 |
| Obrázek 3-10: Montáž sedaček u aut [40] .....  | 49 |
| Obrázek 3-11: Nalepení a skenování kódů [40].....                                    | 50 |
| Obrázek 3-12: Obsluha forem [40] .....   | 50 |
| Obrázek 3-13: Leštění komponenty sedaček u aut [40].....                             | 50 |
| Obrázek 3-14: Vstřikování u motoru vozidel [40] .....                                | 51 |
| Obrázek 3-15: Kontrola stavu předmětu [40].....                                      | 51 |

|  |    |
|--|----|
| Obrázek 4-1: Skladba časů dle metodiky REFA [45] ..... | 55 |
| Obrázek 4-2: Experimentální pracoviště [23] .....      | 59 |
| Obrázek 4-3: Zapěstí robotická paže .....              | 59 |
| Obrázek 4-4: Ovládací panel .....                      | 60 |
| Obrázek 4-5: Ovládací pendant [42] .....               | 60 |
| Obrázek 4-6: Indukční senzor [42] .....                | 61 |
| Obrázek 4-7: Optický senzor [42] .....                 | 61 |
| Obrázek 4-8: Kamera – robot .....                      | 62 |

## Seznam tabulek

|  |    |
|--|----|
| Tabulka 3-1: Výhody a nevýhody používání kolaborativních robotů [23] .....   | 48 |
| Tabulka 3-2: Přehled výrobců a typů kobotů [41] .....  | 52 |
| Tabulka 4-1: Formulář časového snímku REFA přední strana [45] .....  | 56 |
| Tabulka 4-2: Formulář časového snímku REFA zadní strana [45].....  | 57 |
| Tabulka 4-3: Technická specifikace – FANUC CR-7iA/L [23] .....   | 58 |
| Tabulka 5-1: Měření času – Nakládání palet člověkem [sec.] .....   | 62 |
| Tabulka 5-2: Měření času – Vykládání palet člověkem [sec.].....  | 63 |
| Tabulka 5-3: Měření času – Nakládání i vykládání palet robotem [sec.].....   | 63 |
| Tabulka 5-4: Počet měření chybivost Člověk – Robot.....  | 63 |
| Tabulka 5-5: Konkrétní příklad výpočtu statistické vyhodnocení měření času – část 1 .....  | 64 |
| Tabulka 5-6: Konkrétní příklad výpočtu statistické vyhodnocení měření času – část 2 .....  | 65 |
| Tabulka 5-7: Rozptyl – Nakládání palet člověkem [%] .....  | 66 |
| Tabulka 5-8: Rozptyl – Vykládání palet člověkem [%].....   | 66 |
| Tabulka 5-9: Rozptyl – Nakládání i vykládání palet robotem [%] .....   | 66 |
| Tabulka 5-10: Průměrná chybivost na 1 měření .....   | 67 |
| Tabulka 6-1: Nejrychlejší průměrný čas nakládání palet u člověka i robota [sec.] .....   | 68 |
| Tabulka 6-2: Nejrychlejší průměrný čas vykládání palet u člověka i robota [sec.] .....   | 68 |
| Tabulka 6-3: Míra rozptylu – nakládání palet u člověka i robota [%] .....  | 69 |
| Tabulka 6-4: Míra rozptylu – vykládání palet u člověka i robota [%].....   | 69 |
| Tabulka 6-5: Průměrný čas nakládání palet u člověka i robota [sec.].....   | 69 |
| Tabulka 6-6: Průměrný čas vykládání palet u člověka i robota [sec.] .....  | 69 |
| Tabulka 6-7: Míra rozptylu – nakládání palet u člověka i robota [%] .....  | 69 |
| Tabulka 6-8: Míra rozptylu – vykládání palet u člověka i robota [%].....   | 69 |
| Tabulka 6-9: Nejpomalejší průměrný čas nakládání palet u člověka i robota [sec.].....  | 70 |
| Tabulka 6-10: Nejpomalejší průměrný čas vykládání palet u člověka i robot [sec.] .....   | 70 |
| Tabulka 6-11: Míra rozptylu – nakládání palet u člověka i robota [%] .....   | 70 |
| Tabulka 6-12: Míra rozptylu – vykládání palet u člověka i robota [%].....  | 70 |
| Tabulka 6-13: Porovnání nejrychlejšího, průměrného a nejpomalejšího času nakládky u<br>člověka a robota [sec.].....                      | 71 |
| Tabulka 6-14: Porovnání nejrychlejšího, průměrného a nejpomalejšího měření času vykládky<br>u člověka a robota [sec.].....               | 72 |
| Tabulka 6-15: Náklady na robota i operátora (CZK).....   | 75 |
| Tabulka 6-16: Propočet návratnosti investice dle počtu směn .....  | 76 |
| Tabulka 6-17: Znázornění průběhu návratnosti při třisměnném provozu v jednotlivých letech<br>.....                                       | 76 |
| Tabulka 6-18: Zmetkovitost – Porovnání variant nákladů na chybivost u člověka<br>v třisměnném provozu při průměrném času nakládání ..... | 78 |
| Tabulka 6-19: Propočet doby návratnosti investice s uvažováním chybivosti.....   | 78 |
| Tabulka 6-20: Porovnání vhodnosti použití kolaborativního robota a člověka .....   | 80 |

## Seznam grafu

|  |    |
|--|----|
| Graf 6-1 Porovnání měření – nejrychlejšího, průměrného a nejpomalejšího času nakládky u člověka a robota [sec.]..... | 71 |
| Graf 6-2 Porovnání měření - nejrychlejšího a nejpomalejšího času vykládky u člověka a robota [sec.].....             | 72 |
| Graf 6-3 Vyhodnocení chybovosti na měření [%] .....  | 73 |
| Graf 6-4 Vyhodnocení chybovosti na operaci [%].....  | 73 |



## Seznam zkratk

|                     |   |
|---------------------|---|
| $\varepsilon$       | - míra rozptylu či přípustná chyba                  |
| t                   | - konstantní veličina 1.96 pro studentovo rozdělení |
| $cv = \frac{s}{tz}$ | - variační koeficient                               |
| s                   | - standardní odchylka                               |
| tz (příp. tg)       | - průměrná doba cyklu                               |
| n                   | - počet náměrů                                      |
| Lg                  | - výkon pracovníka                                  |
| DA                  | - doba amortizace                                   |

## Úvod

Technologie je pojem, který znamená souhrn výrobních prostředků pro danou pracovní činnost (k výrobě produktu nebo poskytnutí služby). Technologie může rovněž znamenat souhrn prostředků dané organizace, nebo její výrobní případně podpůrné know-how. [1]

Nové technologie rychle mění tvář naší ekonomiky i náš způsob života a stále se objevují ve všech oblastech a ve velké části světa. A proto vstupujeme do čtvrté průmyslové revoluce. Tři předcházející průmyslové revoluce byly vyvolány mechanickými výrobními zařízeními pohaněnými párou, zavedením hromadné výroby s využitím elektrické energie či využitím elektronických systémů a výpočetní techniky ve výrobě. U čtvrté se jedná o filozofii přinášející celospolečenskou změnu a zasahující celou řadu oblastí od průmyslu, přes oblast technické standardizace, bezpečnosti, systému vzdělávání, právního rámce, vědy a výzkumu až po trh práce nebo sociální systém. Nástup nových technologií mění cele hodnotové řetězce, vytváří příležitosti pro nové obchodní modely ale i tlak na flexibilitu moderní průmyslové výroby.

Neustále rostoucí tlak zákazníků na zvyšování produktivity, kvality, přesnosti a bezpečnosti výroby je jedním z hlavních důvodů rostoucího zájmu o využívání automatických výrobních zařízení. Automatizace přetváří strukturu celé výrobní základny nejen ve strojírenství, ale mění též výrobní technologii a působí na vývoj vlastního výrobního procesu. V rámci automatizace celé řady úkonů i celých procesů se v různých odvětvích čím dál tím více prosazují i manipulátory a roboti.

Termín robota existuje v několika slovanských jazycích a původní význam je těžká monotónní práce nebo otrocká práce. Slovo robot vytvořil český spisovatel Karel Čapek v roce 1920 a zazněl v názvu divadelní hry Rossum's Universal Robots (R.U.R.), která měla premiéru v Praze v roce 1921. Tím dostalo slovo robot jiný význam. V R.U.R. pracovní roboti slouží lidem tím, že vykonávají své zaměstnání, nemají potřebu pocitů nebo intelektuálního života. Po čase se však vzbouří a zabijí svého lidského mistra Rossuma a také zničí celý život na Zemi. Ve hře jsou roboty charakterizovány super lidskou silou a inteligencí. Je zajímavé, že se příběh R.U.R. odehrává v šedesátých letech, což se později ukázalo jako desetiletí, kdy byli do výroby zavedeni průmysloví roboti. [2, 3, 4, 5]

Práce je zaměřená na porovnání realizace procesu člověka s kolaborativním robotem. V první část jsou uvedeny základy průmyslu 4.0, v druhé části je popsána robotika a následuje experiment, popis měření a vyhodnocení.

# 1 Průmysl 4.0

Čtvrtá průmyslové revoluce s sebou přináší velké technické inovace. Industry 4.0 se zaměřuje na několika sektorů jako je třeba automatizaci, digitalizaci a robotizaci.

Následující podkapitoly krátce shrnují popis průmyslových revolucí, průmysl 4.0 a jeho aplikace.

## 1.1 Popis – Průmysl 4.0

V poslední době se mnoho hovoří o čtvrté průmyslové revoluci nebo „Internet of things (IoT)“ internetu věcí. Pojem Industrie 4.0 byl poprvé propagován před pár lety na veletrhu v Hannoveru. Co nám tato „revoluce“ přinese? Především to není „revoluce“, ale organická fáze ve vývoji průmyslové technologie. Nejdůležitějším cílem a prostředkem zároveň je změna v myšlení a chování celé společnosti. Internet se stává důležitým integračním prvkem, s jeho pomocí komunikují i stroje, zařízení čidla, a umožňuje tak, aby každý prvek procesu byl samostatný a soběstačný.

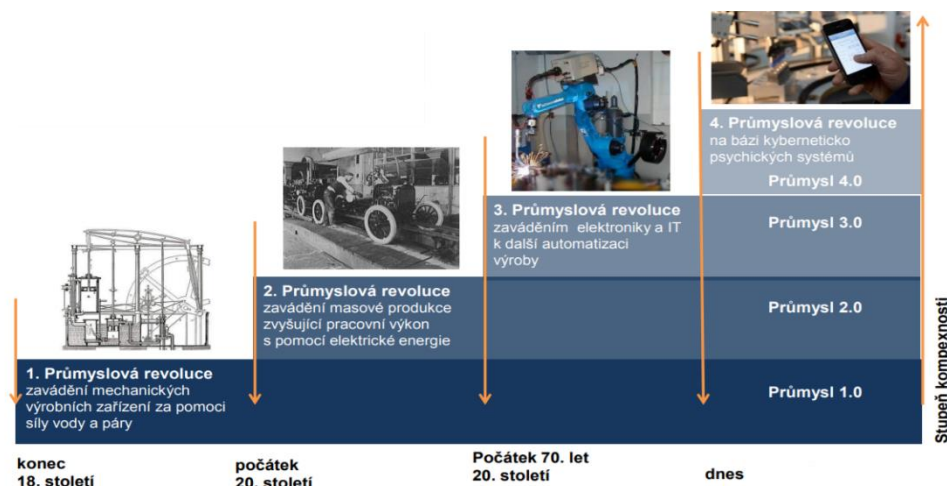
Internet je průlomová technologie, ale největší a nejsložitější síť na světě nosíme ve své nervové soustavě a dodnes je v podstatně nevyužitá. Digitalizace, umělá inteligence, automatizace a robotizace je přirozenou evoluční fází a označovat ji za čtvrtou průmyslovou revoluci je zavádějící.

Průmysl 4.0 je tedy charakterizován masovým rozšířením internetu a jeho průnikem do doslova všech oblastí lidské činnosti. K síti se připojují kromě lidí také stroje a věci obecně. Reálné a virtuální světy se začínají prolínat a do hry vstupují tzv. kyberfyzické systémy.[8]

## 1.2 Průmyslové revoluce

Němci za první průmyslovou revoluci označují období, kdy začala mechanizace a využití energie vody a páry. Po parním stroji přišla druhá průmyslová revoluce, která přinesla hromadnou výrobu, kde elektrina, výrobní pásy, dokonalá organizace a dělba práce umožnily obrovské zvýšení produktivity a snížení nákladů. Třetí průmyslová revoluce přichází s elektronikou, počítači a automatizací, které dodaly výrobě vysokou pružnost, rychlost a další zvyšování produktivity. Nestojíme před nekonečným řetězcem takových průmyslových „revolucí“, ale před dalším přesunem pracovní síly do nového sektoru, který smazává rozdíly mezi zemědělstvím, průmyslem a službami v lokálních a regionálních podmínkách, niž obrázek 1-1 jsou graficky znázorněné jednotlivé průmyslové revoluce.

Německé marketingové označování „Industrie 4.0“ tedy není revoluce, ale přirozená fáze technologického vývoje směrem k robotizaci, automatizaci, digitalizaci, internetu věcí atp. nejen v průmyslu, ale hlavně i v zemědělství a službách. Jejím klíčovým znakem je vyšší produktivita, snížená potřeba zaměstnanců a nižší náklady na jednotku. (Revoluce by to byla, kdyby potřeba zaměstnanců v novém sektoru byla vyšší, ne prudce nižší). „Revolučním“ se může jevit účelové německé lpění na průmyslu a průmyslové sféře. [6][7]



Obrázek 1-1: Revoluce v průmyslu [44]

## První průmyslová revoluce

Parní stroj. Klíčovým pojmem tohoto období je industrializace. Dopad průmyslové revoluce na společnost byl obrovský, zásadně se změnila všechny obory hospodářství. Co do významu je tento převrat srovnatelný s neolitickou revolucí, která znamenala proměnu společnosti od lovců a sběračů k zemědělské. S tím souviselo zakládání sídel, kompletní změna životního stylu a vznik soukromého vlastnictví. [8]

## Druhá průmyslová revoluce

Slovo „revoluce“ je dobré, poněvadž podněcuje zvědavost, vzbuzuje emoce a šokuje. Proto i další výraznější změny, ke kterým došlo v průmyslu, začaly být zpětně nazývány „revolucemi“. To je případ i tzv. 2. průmyslové revoluce, která je spojována s elektrifikací a se vznikem montážních linek. Toto období navazuje v podstatě bezprostředně na období 1. průmyslové revoluce, tzn., že se datuje na konec 19. století. Většinou se spojuje se dvěma daty: s rokem 1879, kdy T. A. Edison vynalezl žárovku, nebo s rokem 1870, kdy společnost Cincinnati instalovala ve svém závodě první montážní linku a začala s dělbou práce, později elektrifikovanou, která přinesla další prudký rozvoj masové výroby.

## Třetí průmyslová revoluce

Ta bývá nejčastěji spojována s automatizací, elektronikou a rozmachem informačních technologií. Její datování je však ještě spornější než u její předchůdkyně. Stejně jako byl přechod od uhlí a páry k elektřině poměrně spojitý a logický, tak i přechod od mechanismů k automatům byl spíše výsledkem přirozené evoluce než skutečnou revolucí. Za její počátek se nejčastěji uvádí rok 1969, kdy byl vyroben první programovatelný logický automat čili PLC. Jedná se vlastně o malý průmyslový počítač, řídicí jednotku, pro automatizaci procesů v reálném čase. Pro PLC je charakteristické, že program se vykonává v tzv. cyklech.

## Čtvrtá průmyslová revoluce

Tu prožíváme právě teď a trvat by měla dalších minimálně 10–30 let. Je charakterizována masovým rozšířením internetu a jeho průnikem do doslova všech oblastí lidské činnosti. Internet je tady ale již poměrně dlouho; dá se říct, že v podstatě od roku 1962, kdy vznikl projekt

počítačového výzkumu agentury ARPA, která dostala v souvislosti se studenou válkou v USA zadání, aby vyvinula komunikační síť pro počítače s decentralizovaným řízením. Resp. od roku 1969, kdy úkol splnila a do provozu byla uvedena první experimentální síť ARPANET. Pojem „Internet“ vznikl v roce 1987 a k jeho komercializaci došlo v roce 1994. Od konce 90. let pak sledujeme extrémní nárůst uživatelů internetu, který v dnešní době již dosahuje řádu miliard. Tím to ale nekončí. K síti se připojují kromě lidí také stroje a věci obecně. Reálné a virtuální světy se začínají prolínat a do hry vstupují tzv. kyberfyzické systémy.[8]

### 1.3 Průmysl 4.0 v praxi

Jako Průlomová či disruptivní technologie nebo inovace se označuje technologie nebo její radikální změna, která překonává a vytlačuje technologii stávající. Autorem tohoto pojmu je profesor Clayton M. Christensen. Průlomová inovace přináší nová řešení pro zákazníka, která zpočátku nemají výkonnost stávajících produktů, služeb nebo podnikatelských modelů, ale postupně je překonávají a snižují nebo úplně eliminují jejich význam a podíl na trhu.

Industrie 4.0 představuje základní změnu ve výrobě. IT a internetové technologie se používají stále více a více zejména v produktech a továrnách. Lidé, stroje a výrobní prostředky komunikují po celém hodnotovém řetězci. Tyto změny se však nestávají přes noc. Vývoj směrem k Industrie 4.0 je mnohem více než revoluce. Společnost VDMA doprovází a podporuje své členy mnoha způsoby, jak zajistit úspěšnou realizaci krok za krokem. Mnoho malých kusů skládačky se shromáždí, aby vytvořili větší obrázek. Čtvrtá průmyslová revoluce 4.0, je odhodlána přeměnit vizi Industrie 4,0 do praktických doporučení pro činnost pro výrobu strojů a zařízení sektoru.[9]

#### Inteligentní mobilní asistent optimalizuje výrobní procesy

KUKA nabízí pokročilé řešení v automatizaci robotů svým zákazníkům po celém světě. Industrie 4.0 přináší digitalizaci továren. Požadavky na výrobu rostou a životní cyklus výrobku se zkracují, zatímco celá řada produktů se neustále zvyšuje. To vyžaduje flexibilní systémy schopné komunikovat mezi sebou a fungovat autonomně.

Modernizace vlastní výroby robotů v Augsburgu za použití efektivního štíhlého způsobu výroby, KUKA zavedla just-in-pořadí dodávku montážního materiálu a automatizovaných logistických procesů. [44] Na obrázku 1-2 je vidět inteligentní mobilní asistent.



Obrázek 1-2: Inteligentní mobilní asistent optimalizuje výrobní procesy [9]

### Výhody na první pohled:

- Maximální ekonomická účinnost
- "Internet věcí": obrobky, materiály a roboty rozpoznávají, kde jsou potřebné
- Spolupráce člověka s roboty kombinuje potenciál lidí a strojů

### **Čidla pro udržování stavu na bázi**

Jako celosvětový dodavatel má společnost Parker Hannifin řadu snímačů, elektroniky, pohonů a měřicí techniky pro sledování a řízení procesů v technologii tekutin, jakož i automatizační a řídicí technologie.

Touha po rychlém a snadném přístupu k těmto datům senzorů mohla být v minulosti realizována pouze v omezené míře pomocí stávajících systémů fieldbus. Mezitím, kromě kasických senzorů produkce se dostala na využití pokročilejších a stanovená pravidla jejich integrace a komunikace. Níže obrázek 1-3 ukazuje čidla pro udržování stavu na bázi.



Obrázek 1-3: Čidla pro udržování stavu na bázi [9]

### Výhody na první pohled:

Výhody přináší kromě čistého zaznamenávání údajů o měřených dat, interpretace založené na pravidlech:

- Údržbu lze provádět na vyžádání (Parker Total Health Management).
- Doby výpadku jsou minimalizovány, lze plánovat údržbu a optimalizovat intervaly údržby.

Díky kombinaci širokého spektra snímačů a širokého aplikačního know-how poskytuje společnost Parker svým zákazníkům základ pro vlastní "Prediktivní údržbu" pro své aplikace.

### **WORKRTBOT- Humanoidní tovární dělník**

Takzvaný „Internet of Things“ (internet věcí) představil éru „Industrie 4.0“ jako 4. průmyslové revoluce. Přeměna běžných závodů továren do společností Smart Factories je nyní nezastavitelným procesem, který představuje novou průmyslovou a technologickou revoluci.

Aby bylo možné v budoucnu efektivně pracovat a s vysokou produktivitou, musela být vytvořena robotická platforma, která trvale splňuje požadavky na efektivitu při využívání

zdrojů a schopnost přizpůsobit se, stejně jako ergonomické konstrukční potřeby. Níže obrázek 1-4 ukazuje humanoidní tovární dělník.



Obrázek 1-4: Humanoidní tovární dělník [9]

Výhody na první pohled:

- Plně propojitelný přes Ethernet s datovým přenosem Gigabitspeed
- Snadná integrace do stávajících strojních komunikačních systémů
- pi4\_controlV10 intuitivně ovládaný software pro ovládání pomocí dotykové obrazovky
- optické rozpoznávání polohy dílu a charakteristiky
- Integrovaná automatická kontrola síly
- Mobilní platforma

V předchozí kapitole byla popsána teoretická část o průmyslu 4.0 a jednotlivých průmyslových revolucích, v následující kapitole bude pokračování teorie o robotice, na kterou se vlastní práce soustředí.

## 2 Robotika

Vznik nového vědeckého oboru, nazvaného robotika, spadá do druhé poloviny dvacátého století, kdy vědecké týmy a celé výzkumné ústavy intenzivně studovaly a konstruovaly roboty, tj. stroje, které měly napodobit a ve větším či menším rozsahu, nahradit složité fyzické i mentální výkony člověka. Rozvíjí se nová vědecká disciplína, robotika, jejíž oblast zájmu sahá od základních otázek funkce inteligentních "kognitivních" robotů a jejich hlavních principiálních možností.

Protože robotika je odvětví vědy, nemá jasné hranice. To zasahuje tak v mnoha různých oblastech, vzájemně oddělených jak náplní, tak i přístupem. Slovo robotika použil jako první spisovatel Isaac Asimov ve svých krátkých příbězích o robotech. Asimov slovo robot převzal z dramatu Karla Čapka R. U. R. z roku 1920. Dále definoval tři základní zákony robotiky platné ve sci-fi literatuře.

- Robot nesmí ublížit člověka nebo jeho nečinností dopustit, aby mu bylo ublíženo.
- Robot musí poslouchat člověka, kromě případů, kdy je v rozporu s prvním zákonem.
- Robot musí být chráněn před poškozením, kromě případů, kdy je v rozporu s prvním či druhým zákonem. [12, 13, 14, 15, 16]

Robotizace průmyslových procesů se uplatňuje nejenom v hromadných výroбах, ale také ve výroбах malosériových a kusových. Robotizace je důležitým faktorem pro kultivaci práce lidstva. Osvobozuje člověka od fyzicky namáhavé a monotónní práce, čímž umožňuje únik z rizikových a riskantních pracovišť. Navíc umožňuje růst produktivity práce a otevření nových možností pro přerozdělování pracovního fondu společnosti ve prospěch intelektuálního využití lidí v tvůrčí práci a vytváření podmínek pro vyšší kvalitu způsobu života.

V České republice je podle Mezinárodní federace pro robotiku v současné době nasazeno 11 tisíc robotů a patříme tak mezi nejvíce automatizované země na světě. Počty robotů utěšeně narůstají a ve světovém měřítku jich pracují asi 2 miliony. Některé studie byly předpokládání, že se do roku 2019 jejich počet zvýší o půl milionu. Největší intenzita se projevuje v Asii, zvláště v Číně. Jistě není bez zajímavosti, že čínské roboty se už začínají nasazovat i v evropských provozech.

Příčinou zvyšujících se počtů průmyslových robotů je stále rostoucí výroba a požadavky na zvýšení kvality za snižování výrobních nákladů. K tomu přistupuje personifikace produkce podle konkrétních požadavků konkrétních zákazníků. Uspokojit tyto nároky umožňuje digitalizace, tedy integrace nových technologií do výrobních postupů. V tomto ohledu hrají roboty důležitou roli. [10]

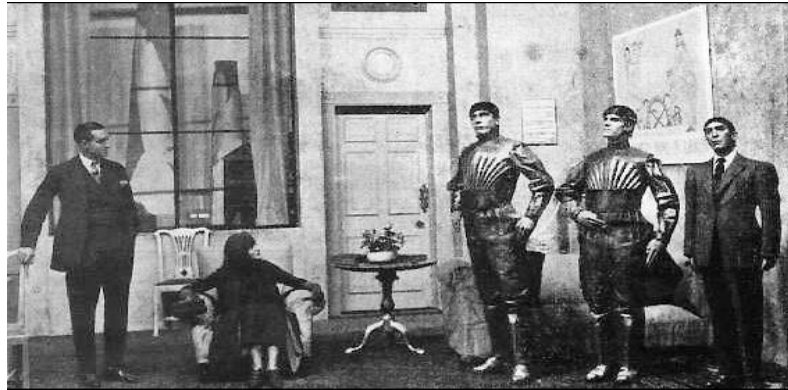
Dnes dokáže průmyslová robotika manipulovat s materiálem, zvládne obráběcí i další procesy, ale má některá omezení. Limitující jsou rychlost a nosnost, i když některé stroje dokážou zvedat součásti o hmotnosti 2,3 t.

### 2.1 Definice základních pojmů robotiky

Slovo robota bylo známo již v 17. století, ve významu otrocká práce poddaných. Mírně pozměněné jej poprvé ve významu stroj použil český spisovatel Karel Čapek v divadelním dramatu R.U.R. (Rossumovi Univerzální Roboti) Slovo mu poradil jeho bratr Josef Čapek,



když se ho Karel ptal, jak umělou bytost pojmenovat. Původně zamýšlený labor zněl autorovi příliš papírově. Ale já nevím,“ řekl autor, jak mám ty umělé dělníky nazvat. Řekl bych jim laboři, ale připadá mně to nějak papírové. “Tak jim řekni roboti,“ mumlal malíř se štětcem v ústech a maloval dál. Níže obrázek 2-1 ukazuje dramatu R.U.R.



Obrázek 2-1: Scéna ze hry R.U.R. se třemi roboty

**Robot** je stroj, který by měl být schopen manipulace s předměty a pohybu. Měl by být schopen získávat informace o svém prostředí a měl by ho být schopen sám ovlivňovat. Ne každý robot však tyto podmínky splňuje. Existuje řada různých definic robotů:

Mezinárodní organizace pro standardizaci definuje robota v normě ISO 8373 jako „automaticky řízený, opětovně programovatelný, víceúčelový manipulátor pro činnost ve třech nebo více osách, který může být buď upevněn na místě, nebo mobilní k užití v průmyslových automatických aplikacích.“ [17, 18, 19]

Definice publikována Doc. Ing. Ivanem Havlem, CSc.: [18]

„Robot je automatický nebo počítačem řízený integrovaný systém, schopný autonomní, cílově orientované interakce s přirozeným prostředím, podle instrukcí od člověka. Tato interakce spočívá ve vnímání a rozpoznávání tohoto prostředí a v manipulování s předměty, popř. v pohybování se v tomto prostředí.“

Definice publikována Prof. P. N. Beljaninem: [18]

„Průmyslový robot je autonomně fungující stroj – automat, který je určen k reprodukci některých pohybových a duševních funkcí člověka při provádění pomocných a základních výrobních operací bez bezprostřední účasti člověka a který je k tomuto účelu vybaven některými jeho schopnostmi (sluchem, zrakem, hmatem, pamětí apod.), schopností samo výuky, samoorganizace a adaptace, tj. přizpůsobivosti k danému prostředí.“

**Průmyslový robot** – Průmyslový robot ukazuje, že jde o složitější ústrojí a můžeme ho definovat jako autonomně fungující stroj-automat, který je určen k reprodukci některých pohybových a duševních funkcí člověka při provádění základních a pomocných výrobních operací bez bezprostřední účasti člověka a který je k tomuto účelu vybaven některými jeho schopnostmi (tj. sluchem, zrakem, hmatem, pamětí a podobně) a také schopností samo výuky, samoorganizace a adaptace, tj. přizpůsobivosti k danému prostředí. [13, 20, 21, 22]

Použití průmyslových robotů je pro výrobní firmy velice výhodné. Hlavní výhodou nasazení průmyslových robotů je ekonomická výhodnost. Vyšší náklady na pořízení a provoz robotu, respektive robotizovaného technologického pracoviště (RTP), mají dobu návratnosti 3 až 4 roky. Z toho vyplývají nižší náklady na provoz pracoviště jako takového. Je-li doba návratnosti delší, než je doba životnosti PR nebo RTP, pak se uvažuje o sociálních aspektech robotizace (humanizace práce člověka). Životnost průmyslových robotů je 12–15 let. [11] Na obrázku 2-2 je vidět robot Kuka KR16.



Obrázek 2-2: Průmyslový robot Kuka KR16 [24]

Další používané pojmy v souvislosti s robotikou jsou robotizované technologické pracoviště a manipulátor, ty jsou vysvětleny dále.

**Robotizované technologické pracoviště (RTP)** – Sestává se z jednoho nebo několika výrobních strojů pro danou technologii, u kterých je operační a mezioperační manipulace zabezpečována pomocí průmyslových robotů a manipulátorů.

**Manipulátor** – Zařízení s dvoupolohovými pohybovými jednotkami s vlastním pohonem a řízením pro automatickou operační a mezioperační manipulaci podle stanoveného programu a časového průběhu v souladu s činností výrobních strojů a ostatních doplňkových zařízení.

## 2.2 Historie robotiky

Značný rozvoj robotů se rozpoutal v 60. letech převážně v USA. V roce 1968 vytvořil Stanfordský výzkumný institut SRI (Stanford Research Institute) robota Shakeyho, který byl do určité míry schopen orientace v prostředí. Modely robotů se dále zdokonalovaly a v 70. letech již vstoupily do masové výroby. První oblastí, kde našly uplatnění, byl automobilový průmysl. Roboti prováděly činnosti jako svařování či lakování a jiné pro člověka nepříliš bezpečné operace. V 80. letech přebírá první místo ve využití robotů Japonsko. V této dekádě byly stroje vybavovány čidly hmatu a počítačovým viděním.

Roku 2000 představila Honda robota Asima a psího robota Aido. Tyto roboty se staly pop kulturními fenomény, ale od samostatně myslícího stroje dělí je a jejich následovníky ještě značná vzdálenost. Nadějně výsledky výzkumu robotů exoskeletony – robotické kostry, které

pomáhají handicapovaným v pohybu, se již začínají používat jako zdravotní pomůcky. Vyvíjejí se záchranné roboty. Ty jsou v současnosti spíše prototypy ovládané na dálku lidskou obsluhou, ale lze odhadovat, že míra jejich samostatnosti do budoucna poroste.[19]

V tomto textu termín robot bude znamenat počítačově řízený průmyslový manipulátor typu znázorněného na obrázku níže. Tento typ robota je v podstatě mechanické rameno pracující pod počítačovou kontrolou. Taková zařízení, ačkoli jsou daleko od robotů sci-fi, jsou nicméně extrémně složité elektromechanické systémy, jejichž analytický popis vyžaduje pokročilé metody a které představují mnoho náročných a zajímavých výzkumných problémů.[24] Na obrázku 2-3 je vidět Robot ABB IRB6600.



Obrázek 2-3: Robot ABB IRB6600 [24]

Oficiální definice takového robota pochází z Robot Institute of America (RIA): Robot je reprogramovatelný multifunkční manipulátor určený k přesunutí materiálu, dílů, nástrojů nebo specializovaných zařízení pomocí variabilních naprogramovaných pohybů pro provádění různých úkolů.

První úspěšné aplikace robotových manipulátorů se většinou týkaly určitého druhu přenosu materiálu, jako je vstřikování nebo lisování, kde se robot pouze zúčastnil lisu k vyložení a buď přenesl, nebo uložil hotovou součástku. Tyto první roboty mohly být naprogramovány tak, aby prováděly řadu pohybů, jako je přesun na místo A, zavření úchytu, přesun do místa B atd., ale neměly žádnou schopnost externího čidla.

Složitější aplikace, jako je svařování, broušení, odstraňování otřepů a montáž, vyžadují nejen složitější pohyb, ale také určitou formu vnějšího snímání, jako je vidění, hmatová nebo síla, díky zvýšené interakci robota s jeho prostředím.

Je třeba zdůraznit, že důležité aplikace robotů nejsou v žádném případě omezeny na ty průmyslové úlohy, kde robot přímo nahrazuje člověka. Existuje mnoho dalších aplikací robotiky v oblastech, kde je použití člověka nepraktické nebo nežádoucí. Mezi ně patří podmořské a planetární průzkumy, vyhledávání a opravy družic, zneškodňování výbušných zařízení a práce v radioaktivním prostředí. Konečně, protézy, jako jsou umělé končetiny, jsou samy o sobě robotickými zařízeními, které vyžadují metody analýzy a konstrukce podobné metodám průmyslových manipulátorů.[24] Souhrnně lze historii robotiky shrnout v následujících bodech:

## MINULOST

- Název „robot“ použil poprvé v roce 1920 Karel Čapek ve své hře R.U.R. pro uměle vytvořené bytosti vykonávající lidské činnosti
- Termín velice rychle zakořeněn a začal se používat pro pojmenování různých automatických a mechanických strojů a zařízení
- 1940–1947 praktické aplikace – teleoperátory (pro manipulaci s radioaktivním a nebezpečným odpadem)
- 1949 zahájen výzkum numericky řízených obráběcích strojů
- 1961 v provozu první průmyslový robot UNIMATE
- 1964 otevřeny laboratoře umělé inteligence na M.I.T. a S.R.I.
- 1968 postaven na S.R.I. mobilní robot Shakey (vybaven viděním). Obrázek 2-4 znázorňuje tohoto zmíněného robota.



Obrázek 2-4: Shakey vybaven viděním [24]

- 1977 prodej robotů firmou ASEA. Obrázek 2-5 znázorňuje tohoto zmíněného robota.



Obrázek 2-5: Robot ASEA IRb6 [24]

- 1979 prodej robotů SCARA (Selective Compliant Articulated Robot Arm). Obrázek 2-6 znázorňuje tohoto zmíněného robota.



Obrázek 2-6: Robot ADEPT koncepce SCARA [24]

- 1980 průmyslový robot vybaven PC viděním, čidly hmatu, atd.

## SOUČASNOST

- 1995 první chirurgický robotický systém Zeus (pro min. invazivní chirurgii).  
Obrázek 2-7 znázorňuje tohoto zmíněného robota.



Obrázek 2-7: Chirurgický robot Zeus [24]

- 1997 na Marsu vysazen robot Sojourner. Obrázek 2-8 znázorňuje tohoto zmíněného robota.



Obrázek 2-8: Robot Sojourner [24]

- 2000 firma Honda uvádí humanoidního robota ASIMO a firma SONY uvádí zooidy AIBO. Obrázek 2-9 znázorňuje tohoto zmíněného robota.



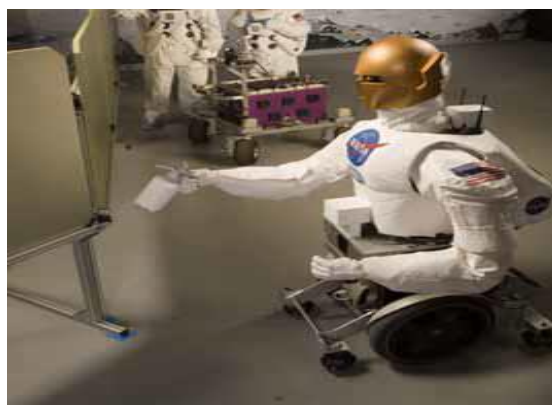
Obrázek 2-9: Robot Asimo [24]

- 2003 firma KUKA první zábavné roboty Robocoaster (simulace jízdy, letu, atd.). Obrázek 2-10 znázorňuje tohoto zmíněného robota.



Obrázek 2-10: Robot Robocoaster [24]

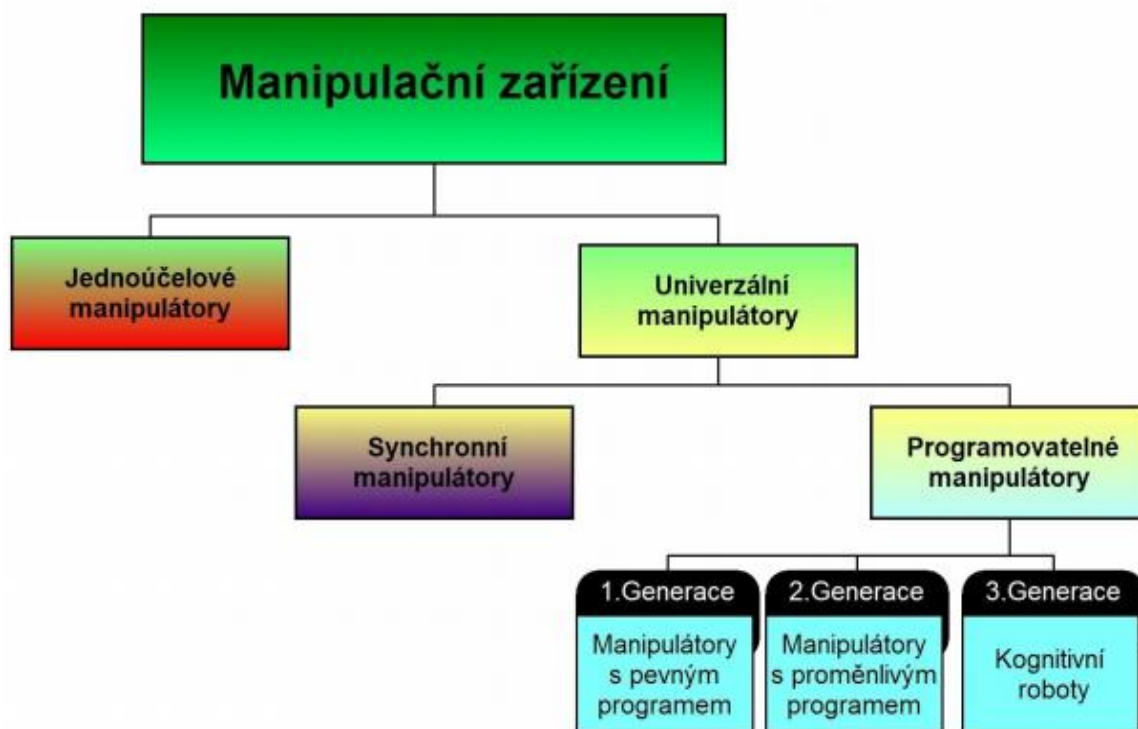
- 2006 italská firma Comau představuje první bezdrátové ruční ovládní Pendant
  - 2008 firma FANUC Robotics největší a nejsilnější robot M-2000iA (unesl 1200 kg)
  - 2011 do vesmíru vyslán první humanoidní robot Robonaut R2B
- Obrázek 2-11 znázorňuje tohoto zmíněného robota.



Obrázek 2-11: NASA robot [24]

## 2.3 Klasifikace manipulačních zařízení

Manipulátory (teleoperátory) jsou jednoúčelová i univerzální manipulační jsou zařízení ovládané člověkem. Jejich úkolem je násobit síly, respektive moment a pohybové možnosti operátora. Do jedné z podskupin manipulačních zařízení patří průmyslové roboty. Rozdíl mezi roboty jednoúčelovými a univerzálními je v konstrukčním provedení. Obrázek 2-12 znázorňuje rozdělení průmyslových robotů a manipulátorů.



Obrázek 2-12: Rozdělení manipulačních zařízení [28]

- **Jednoúčelové manipulátory**

Nacházejí své uplatnění při automatizaci manipulačních prací u jednoúčelových strojů a linek pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Vyskytují se málokdy jako samostatný automatizační prvek. Nejčastěji jsou součástí obsluhovaného stroje, kde vykonávají jednu předem stanovenou funkci (pohyb), nemají vlastní druh pohonu.

Mají omezenou funkci. Nazývají se často „podavači“ nebo „autooperátory“. Název „jednoúčelové“, že jsou určeny pro manipulaci s jedním určitým předmětem při malém rozsahu změn rozměrů, jako příklad lze použít jednoúčelové teleoperátory (balancéry) pro zvedání těžkých předmětů. [28, 29]. Obrázek 2-13 znázorňuje jednoúčelový manipulátor.



Obrázek 2-13: Jednouúčelový synchronní manipulátor [30]

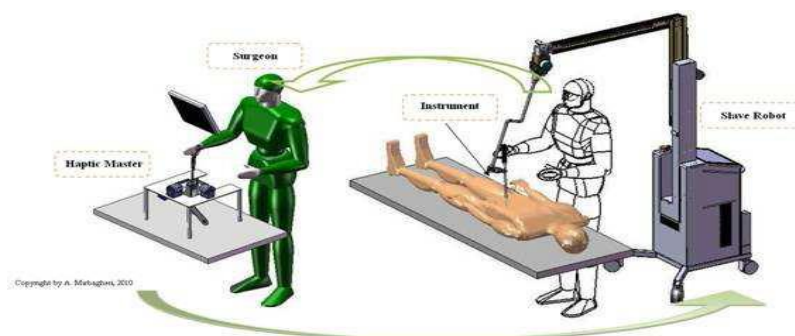
- **Univerzální manipulátory**

Jsou konstrukčně složitější, kopírují pohyby člověka (řídícího pracovníka). Manipulátor a člověk tvoří vlastně uzavřenou regulační smyčku. Obrázek 2-14 znázorňuje univerzální manipulátor.



Obrázek 2-14: Univerzální synchronní manipulátor [30]

Synchronní manipulátory „master – slave“ řízení provádí průběžně řídící pracovník, tyto manipulační mechanismy představují vlastně zesilovací ústrojí pro zesílení silových a pohybových veličin na základě popudů vyvolaných řídícím pracovníkem. Na obsluhovaném stroji jsou nezávislé. Manipulátor a člověk (řídící pracovník) "tvoří" uzavřenou regulační smyčku. Tato zařízení přenáší na dálku příkazy člověka. [28] Obrázek 2-15 znázorňuje synchronní manipulátor v lékařství.

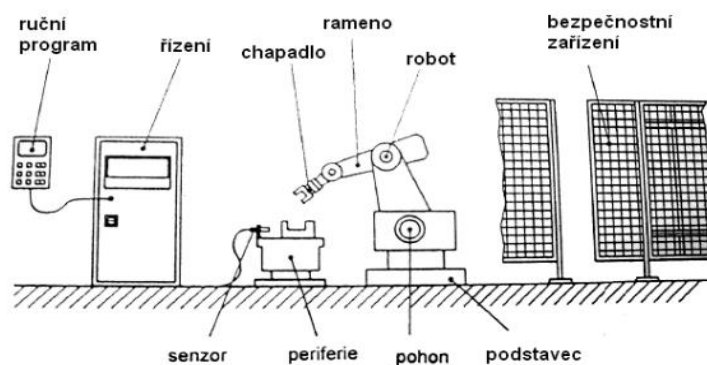


Obrázek 2-15: Synchronní manipulátor Master-Slave využívaný v lékařství [28]



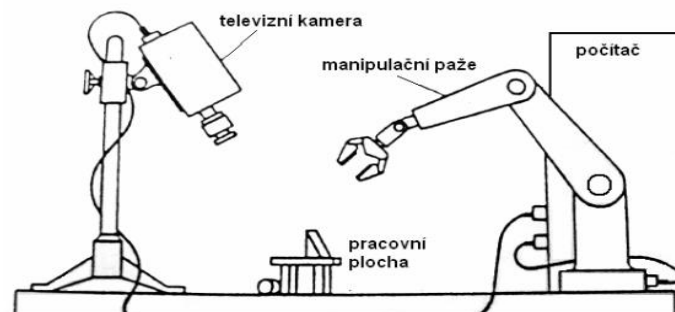
Univerzální manipulátory se nazývají také programovatelné, protože jejich ustrojí je funkčně závislé na řídicím programu. Tyto manipulátory, často už označovány jako roboty jsou plně nezávislé na obsluhovaném stroji, jsou svým provedením, pohonem a funkcí nezávislé. Vlastnost přizpůsobení usnadňuje rychlejší reakce na změny požadavků na trhu, a tak jsou tyto roboty stále více uplatňovány u pružných výrobních linek. [31]

- Manipulátory s pevným programem roboty 1. Generace – program se nemění během činnosti manipulačního mechanismu. Řídicí ústrojí má jednoduché provedení. Tento typ manipulátorů je velmi rozšířen z důvodů, že je jednoduchý a spolehlivý a nazývá se "jednoduché průmyslové roboty" nižší úroveň, případně průmyslový robot 1. generace. [13, 29, 30] Tento typ průmyslový robot 1. generace zobrazuje Obrázek 2-16.



Obrázek 2-16: Průmyslový robot 1. generace [30]

- Manipulátory s proměnlivými programy roboty 2. Generace – je automatický nebo počítačem řízený integrovaný systém, mají možnost přepínání nebo měnit volby programu, většinou podle scény, ve které se manipulační mechanismy právě nacházejí, a tím reagovat na určité změny ve výrobním procesu. Jsou vybaveny velkým počtem senzoru (optické, hmatové, snímače tlaku, polohy, zrychlení). Zvládají koordinaci označovanou „oko-ruka“. Tímto způsobem projevují již značnou samostatnost a představují v současné době špičku konstrukčního provedení a nazýváme je "průmyslovými roboty" vyšší úrovně, případně průmyslovými roboty 2. generace. Tento typ průmyslový robot 2. generace je vidět na Obrázek 2-17.



Obrázek 2-17: Průmyslový robot 2. generace [30]

- Kognitivní roboty 3. Generace – jsou to roboty vybavené možností vnímání a racionálního myšlení (kognitivní proces = proces vnímání a racionálního myšlení), bez možnosti citového vnímání a volního jednání, Jedná se o mechatronické systémy

(mechanické systémy s vyšším stupněm integrované elektroniky). Často bývají označovány jako inteligentní roboty, jednou z charakteristických vlastností inteligentních robotů je schopnost učit se a adaptace (autonomnost) v procesu řešení úloh. Je to důležitý například v kosmickém výzkumu, kde řídicí systém má rozhodovat samostatně. Průmyslové roboty 3. generace má mít i základní inteligenci pro manipulaci s díly, hlavně při montáži. [32]

## 2.4 Struktura robotů

V této podkapitole budou popsány metody řízení, geometrie a společné kinematické uspořádání průmyslových robotů.

### Metoda řízení

Roboti jsou klasifikováni řídicí metodou do robotů s servo a non-servo roboty. První roboty nebyli servo řízení. Tyto roboty jsou v podstatě zařízení s otevřenou smyčkou, jejichž pohyb je omezen na předem stanovené mechanické zastávky a jsou užitečné především pro přenos materiálů. Servo roboty používají počítačové ovládání s uzavřenou smyčkou k určení jejich pohybu a jsou tedy schopny být opravdu multifunkčními, re programovatelnými zařízeními.

### Geometrie

Většina průmyslových manipulátorů má v současné době šest nebo méně stupňů volnosti. Tyto manipulátory jsou obvykle klasifikovány kinematicky na základě prvních tří kloubů ramene, přičemž zápěstí je popsáno samostatně. Většina těchto manipulátorů spadá do jednoho z pěti geometrických typů: kloubový (RRR), sférický (RRP), SCARA (RRP), válcový (RPP) nebo kartézský (PPP). [24]

### Společné kinematické uspořádání

Nyní budou popsány jednotlivé typy konfigurací kinematického uspořádání.

#### Kloubová konfigurace (RRR)

Kloubový manipulátor je také nazýván revolučním nebo antropomorfním manipulátorem jako je například kloubové rameno ABB IRB1400. Na obrázku 2-18 je vidět robot ABB IRB1400.



Obrázek 2-18: Robot IRB1400 [24]

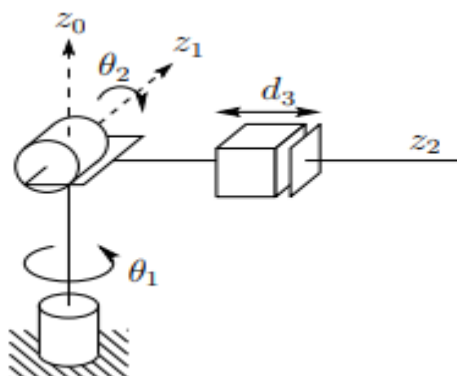
Běžným otočným kloubem konstrukce je rovnoběžník vazba, jako je například Motoman SK16. Na obrázku 2-19 je vidět tohoto zmíněného robota.



Obrázek 2-19: Motoman SK16 manipulátor [24]

### Sférická konfigurace (RRP)

Nahrazením třetího nebo kolenního kloubu v otočné konfiguraci prismatickým spojem získáme sférickou konfiguraci, která je lze vidět na obrázek 2-20.



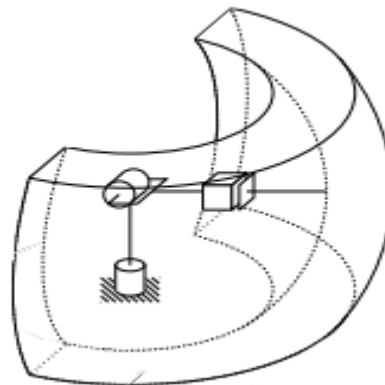
Obrázek 2-20: Konfigurace sférického manipulátoru [24]

Termín sférická konfigurace vychází ze skutečnosti, že sférické souřadnice definující polohu koncového efektoru vzhledem k rámu, jehož původ leží v průsečíku osy  $z_1$  a  $z_2$ , jsou stejné jako první tři proměnné kloubů. Obrázek 2-21 znázorňuje Rameno Stanford.



Obrázek 2-21: Rameno Stanford, jeden z neznámějších sférických robotů [24]

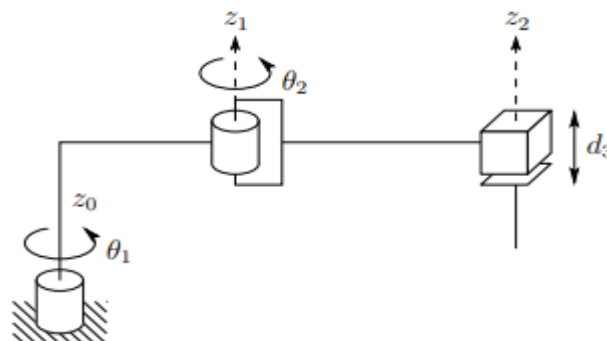
Pracovní prostor sférického manipulátoru je vidět na obrázek 2-22.



Obrázek 2-22: Pracovní prostor sférického manipulátoru [24]

### Konfigurace SCARA (RRP)

Takzvaný SCARA (selektivní kompatibilní kloubový robot pro montáž), znázorněný, na níž obrázku, je populární konfigurace, která, jak naznačuje jeho název, je přizpůsobena pro montážní operace. Schéma lze vidět na obrázek 2-23.



Obrázek 2-23: SCARA [24]

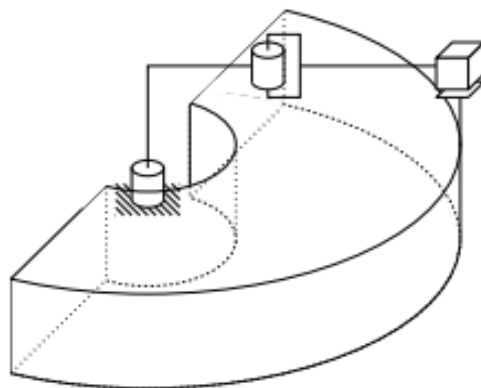
Ačkoli SCARA má strukturu RRP, je zcela odlišná od sférické konfigurace jak ve vzhledu, tak ve svém rozsahu aplikací. Na rozdíl od sférického vzoru, který má  $z_0$ ,  $z_1$ ,  $z_2$  vzájemně

kolmý, má SCARA z0, z1, z2 paralelu. Niž Obrázek 2-24 ukazuje Epson E2L653S, manipulátor tohoto typu.



Obrázek 2-24: Epson E2L653S SCARA robot [24]

Níže na obrázku 2-25 je znázorněno pracovní prostor manipulátoru SCARA.



Obrázek 2-25: Pracovní prostor manipulátoru SCARA [24]

## 2.5 Hlavní součásti robotů

Struktura robota je většinou převážně mechanická a nazývá se kinematickým řetězcem (jeho funkční podoba kostry lidského těla). Řetěz je tvořen linkami (kosti), pohony (svaly) a spoje, které umožňují jeden nebo více stupňů volnosti.

Někteří robotové používají otevřené sériové řetězce, v nichž každý odkaz spojí jeden předtím na jeden po něm. Roboty používané jako manipulátory mají konečné efekty namontované na posledním spojení. Tyto koncové efekty mohou být jakékoliv od svařovacího zařízení až po mechanickou ruku, která se používá k manipulaci s prostředím. [25, 26, 27]

- **Kontrolní systém**

Nezákladnější úroveň, lidské bytosti a další zvířata přežívají prostřednictvím principu nazvaného zpětná vazba. Lidské bytosti cítí, vnímají, co se děje kolem nich, a reagují podle

toho. Použití zpětné vazby ke kontrole fungování stroje se datuje nejméně do roku 1745, kdy vlastník anglického řeziva Edmund Lee použil princip ke zlepšení funkce svého větrného mlýna. Pokaždé, když vítr změnil směr, museli jeho pracovníci přesunout větrný mlýn, aby kompenzovali. Lee přidal do větších větrných mlýnů dva menší větrné mlýny. Tyto menší větrné mlýny poháněly nápravu, která automaticky otočila větší, aby čelila větru.

Řídicí systém robota používá zpětnou vazbu stejně jako lidský mozek. Nicméně místo mozku neuronů se mozek robota skládá z křemíkového čipu nazývaného centrální procesorovou jednotkou nebo CPU, který je podobný čipu, který váš počítač provozuje. Naše mozky rozhodují, co dělat a jak reagovat na svět na základě zpětné vazby z našich pěti smyslů. Robot CPU, dělá to samé na základě dat shromážděných zařízeními nazývanými senzory.

- **Pohony**

Aby byl robot považován za robota, musí mít zařízení, které se může pohybovat v reakci na zpětnou vazbu ze svých snímačů. Těla robotů se skládají z kovu, plastu a podobných materiálů. Uvnitř těchto těles jsou malé motory, které se nazývají pohony. Pohony napodobují působení lidského svalu, aby mohly pohybovat částmi těla robota. Nejjednodušší roboty tvoří rameno s nástrojem připojeným k určitému úkolu. Vyspělejší roboty se mohou pohybovat po kolech nebo běhácích. Humanoidní roboty mají ruce a nohy, které napodobují lidský pohyb.

- **Senzory**

Roboty obdrží zpětnou vazbu ze snímačů, které napodobují lidské smysly, jako jsou videokamery nebo zařízení nazývané odpory závislé na světle, které fungují jako oči nebo mikrofony, které fungují jako uši. Někteří roboty mají dokonce schopnost zaznamenat dotek, chuť a vůni. CPU robota interpretuje signály z těchto snímačů a odpovídajícím způsobem upravuje své činnosti.

- **Napájecí zdroj**

Aby mohl robot fungovat, musí mít robot sílu. Lidské bytosti dostávají energii z jídla. Poté, co se najíme, je jídlo přeměněno na energii našich buněk. Většina robotů získá energii z elektřiny. Stacionární robotické, jako jsou ty, které pracují v automobilech, mohou být zapojeny jako všechny ostatní spotřebiče. Roboty, které se pohybují, jsou obvykle napájeny bateriemi. Naše robotické sondy a satelity jsou často navrženy tak, aby sbíraly solární energii.

- **Koncové efekторы**

Aby bylo možné pracovat s prostředím a provádět zadané úkoly, jsou roboty vybaveny nástroji nazvanými koncové efekторы. Ty se liší v závislosti na úkolech, které má robot provádět. Robotičtí pracovníci mají například vyměnitelné nástroje, jako jsou například postřikovače barvy nebo svařovací hořáky. Mobilní roboty, jako jsou sondy posílané jiným planetám nebo robotům pro odstraňování bomb, mají často univerzální chapadla, které napodobují funkci lidské ruky. [25, 26, 27]

## 2.6 Pohony průmyslových robotů a manipulátorů

Robotové manipulátory mohou být klasifikovány podle několika kritérií, jako je jejich zdroj energie nebo způsob, jakým jsou spoje aktivovány, jejich geometrie nebo kinematická struktura, jejich zamýšlená aplikační oblast nebo jejich způsob ovládní. Tato klasifikace je užitečná zejména proto, aby bylo možné zjistit, který robot je pro daný úkol správný. Například, hydraulický robot by nebyl vhodný pro manipulaci s potravinami nebo pro použití v čistých prostorách, zatímco robot SCARA by nebyl vhodný pro práci ve slévárně.

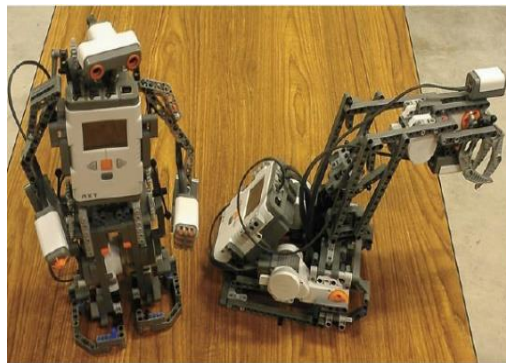
Typicky jsou roboty buď elektrické, hydraulické, pneumaticky poháněné, jaderné nebo green. Hydraulické pohony jsou bezkonkurenční díky své rychlosti odezvy a schopnosti vytvářet točivý moment. Proto se hydraulické roboty používají především pro zvedání těžkých břemen. Nevýhody hydraulických robotů spočívají v tom, že mají tendenci k úniku hydraulické kapaliny, vyžadují mnohem více periferních zařízení, jako jsou čerpadla, což také vyžaduje větší údržbu a jsou hlučné. Roboty poháněné stejnosměrnými nebo střídavými servomotory jsou stále oblíbenější, protože jsou levnější, čistší a tišší. Pneumatické roboty jsou levné a jednoduché, ale nemohou být přesně řízeny. Výsledkem je, že pneumatické roboty mají omezenou nabídku aplikací a popularitu.

## Elektrický pohon

Jsou standardní pro průmyslové roboty. Dvě hlavní pododdíly této kategorie jsou střídavé nebo stejnosměrné systémy. Systémy stejnosměrného proudu často poskytují větší točivý moment, ale mohou vyžadovat větší údržbu motorů.

- Kartáčové stejnosměrné motory mají vysoké rozběhový moment, při konstantní rychlosti mají různé zatížení a životnost až 30000 hodin.
- DC je často volbou pro robotický svět hobby, jelikož mnoho z těchto systémů jsou mobilní roboty s bateriemi. [46]

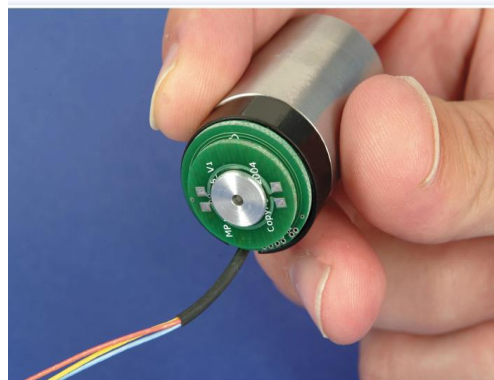
Níže je uveden obrázek 2-26, na kterém je vidět LEGO Mindstorms s elektrickým pohonem.



Obrázek 2-26: LEGO Mindstorms – napájené baterií nebo stejnosměrné [33]

AC je běžná volba pro průmysl a pro tyto systémy se často používá servomotor:

- Krokové motory jsou náchylné na vibrace, méně nákladné a při přetížení se zahřívají. Servomotory mají kodéry, což jsou zařízení, které v některých případech posílají informace o směru otáčení, rychlosti a specifické pozici. Na obrázku 2-27 je vidět kodér.



Obrázek 2-27: Kodér [33]

Na obrázku 2-28 je vidět servomotor Robot FANUC.





Obrázek 2-28: Robot FANUC provozovaný servomotory [33]

## Hydraulický pohon

Hydraulický výkon je známý pro generování velkého množství síly a je stále používán v robotice pro těžké náklady. [33]

- S vylepšenými servomotory se hydraulický robot ztrácí na srovnávacích elektrických modelech.
- Tento systém používá jinou formu energie k vytvoření hydraulického tlaku, ale robot se bude pohybovat hydraulikou.

Existují nějaké záporné stránky hydraulických robotů:

- Hydraulické netěsnosti
- Náklady na oleje
- Nebezpečí požáru (většinou jako mlha)
- Zvýšená údržba
- Zvýšený šum

## Pneumatický pohon

Hlavní charakteristiky pneumatického pohonu jsou následující:

- Vzhledem k tomu, že plyn je stlačitelný, zastavení středního zdvihu nebo středního pohybu vede k unášení
- Jediný jistý způsob, jak udržet pozici, je použít nějaký pevný doraz a stálý tlak
- Hluk a úniky jsou dalším problémem
- Pozitivní je, že jsou velmi rychlé a většina průmyslových odvětví má připravené dodávky levného pneumatického tlaku

## Jaderný pohon

Roboti s jadernou energií nesou vlastní jaderný reaktor, i když jsou menší než jaderné elektrárny nebo subsystémy. [33]

- Tyto roboty obvykle používají NASA nebo podobné agentury k hlubokému průzkumu vesmíru.

- Tyto systémy mohou běžet po celá léta nebo dokonce desetiletí bez lidské interakce, a tak je dokonale přizpůsobí kosmické mise.
- Pokud se použijí na zemi, musí být jaderný materiál po jeho vyčerpání řádně odstraněn.

### 3 Kolaborativní robot

Čtvrtá průmyslová revoluce není jen o průmyslové výrobě. Společnost prochází změnou, která je způsobena propojením tří světů: fyzického, virtuálního a sociálního světa. Jednou z největších výhod implementace průmyslů 4.0 je použití kolaborativních robotů. [23]

V této kapitole bude popsáno fungování kolaborativních robotů, jejich výhody či nevýhody, jejich využití, funkce a parametry a také, kteří výrobci je vyrábějí.

#### 3.1 Popis kolaborativního robota

Rozdíl mezi spolupracujícími roboty a tradičními průmyslovými roboty je v jejich spolupráci s lidmi a jejich umístění na pracovišti.

Spolupracující robot („cobot“) je robot, průmyslový robot, který je navržen tak, aby spolupracoval s lidskými operátory a vytvářel hodnoty společně. Například kolaborativní robot je schopen vyzvednout předmět z krabice, vložit jej do zařízení (tisk atd.), Poté jej vyjmout a položit na paletu nebo jej předat přímo lidskému operátorovi. [23]

V oblasti kolaborativních robot se v posledních deseti letech výrazně rozšířila a je nyní zdaleka nejrychleji rostoucím segmentem globálního trhu průmyslové robotiky. [34]

Spolupracující robot, ve své nejzákladnější definici je robot, který má schopnost bezpečně pracovat přímo vedle lidských pracovníků při plněních úkolu. [37] Obrázek 3-1 ukazuje spolupracujícího robota s člověkem.



Obrázek 3-1: Spolupracující kolaborativní robot s člověkem [36]

Spolupráce člověka a robota je aplikace, která potenciálně zvyšuje produktivitu a komfort při různých výrobních úlohách. Roboti a lidé se tradičně pracují v oddělených prostředích, což jim neumožňuje provádět stejný úkol současně. Nyní „nové“ standardy a zařízení usnadňují implementaci kooperativních aplikací a legálně. Díky tomu je možné realizovat automatizaci

do nových oblastí výrobních a montážních úkolů, které vyžadují souběžnou flexibilitu a kreativitu lidí. [36]

Přestože spolupracující roboty jsou navrženy v mnoha různými způsoby, existuje společný konsenzus v technologickém průmyslu o tom, jaké druhy základních konstrukčních provedení a funkcí se používají k jejich vybudování.

### 3.2 Funkce a parametry kolaborativních robotů

Ve společném pracovním prostoru je zajištěna bezpečnost a každý kolaborativní robot má své parametry a musí před porovnáním jednotlivých robotů jasně definován. Tyto parametry jsou jedním z hlavních aspektů při navrhování robotizovaného pracoviště. Základní funkce a parametry lze dělit na: [34, 39]

- **Zastavení monitorované z hlediska bezpečnosti**

Nejjednodušší metoda umožňující operátorovi vstoupit do společného pracovního prostoru bez uvolnění nouzového zastavení. Když operátor vstoupí do pracovního prostoru pro spolupráci a robot je v pracovním prostoru, robot se zastaví s bezpečnostním hodnoceným monitorovaným zastavením (funkce ovladače robota). Poté, co operátor opustí pracovní prostor, může robot pokračovat ve své práci. Přítomnost obsluhy musí být detekována pomocí bezpečnostního kontrolního systému. [36]

- **Ruční vedení**

Operátor může řídit robota s ručním ovládaným zařízením, které zahrnuje funkci nouzového zastavení. Operátor proto může pomocí robota odlehčit své úkoly. Při přechodu mezi různými druhy provozních režimů musí být zajištěna bezpečnost.

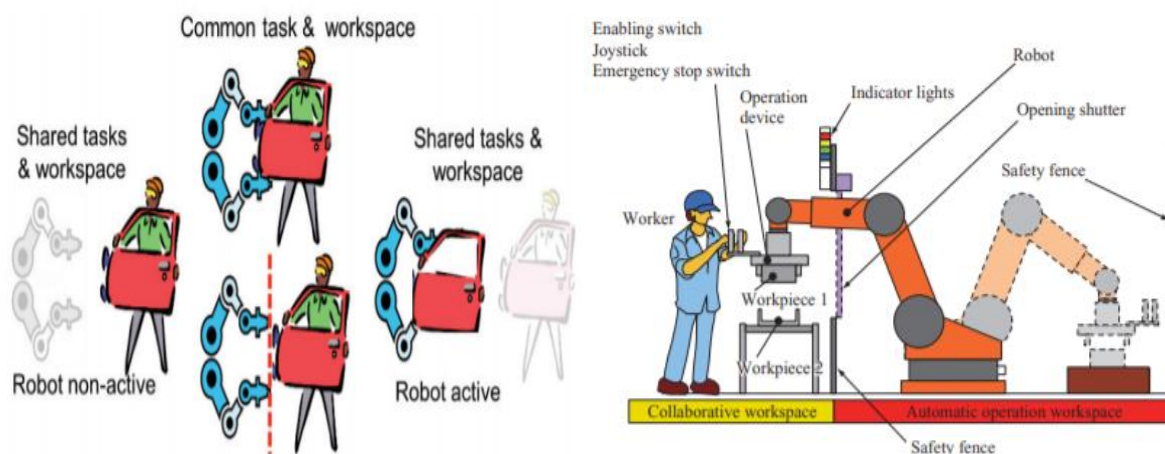
- **Monitorování rychlosti a separace**

V případě bodu a. že kolaborativní robot nemusí být zastaven, když je operátor ve společném pracovním prostoru. V tomto bodě c. ve společném pracovním prostoru jsou povoleny souběžné pohyby robota a operátora. Systém udržuje ochranné oddělení nebezpečných částí a obsluhy.

- **Omezující síla a energie**

V případě bodu a. i c. separace mezi robotem a obsluha je zajištěna. V tomto bodě d. k fyzickému kontaktu mezi operátorem a robotem (včetně chapadla a obrobku) může dojít úmyslně nebo neúmyslně. Kontakt může být statický (sevření nebo drcení) nebo dynamický (náraz).

Pro zajištění bezpečnosti musí robot zahrnovat pasivní a / nebo aktivní opatření. Pasivní opatření může znamenat například zaoblené a měkké hrany (žádné ostré nebo špičaté předměty) robota a chapadla. Aktivní opatření znamená například, že síly a krouticí momenty robota jsou aktivně omezeny. Je lze vidět na obrázku 3-2. [36]



Obrázek 3-2: Společné úkoly a pracovní prostory mezi operátorem a robotem [38]

- **Užitečné zatížení**

Užitečné zatížení je hmotnost, kterou může robot nést. Všechny roboty mají dané užitečné zatížení, které se počítá bez hmotnosti koncového efektoru nebo nástroje robota. To znamená, že skutečné užitečné zatížení, které může robot nést, je nominální užitečné zatížení po odečtení hmotnosti koncového efektoru robota znázorněno na obrázku 3-3.



Obrázek 3-3: Robot s užitečným zatížením [39]

- **Hmotnost robota**

Hmotnost robota udává, zda můžete robota snadno přemístit, nebo zda k tomu budete potřebovat vysokozdvizný vozík. Na některých podlažích bude robot přemísťován téměř neustále, aby vykonával různé úkoly. Pokud je robot příliš těžký, bude potřeba celého týmu, aby ho našrouboval / opravil na jeho novém místě.

- **Opakovatelnost**

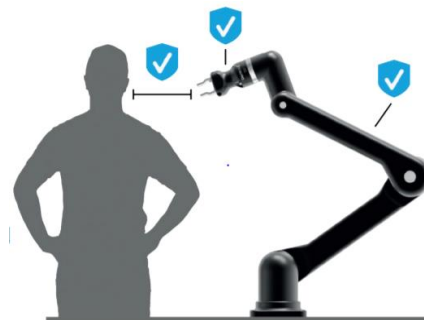
Kolaborativní roboty jsou obvykle programovány pomocí výuky / vedení rukou, kdy robot má schopnost znovu vytvořit přesně stejný pohyb. V technické specifikaci většiny robotů je uváděna nejvyšší opakovatelnost je znázorněno na obrázku 3-4.



Obrázek 3-4: Opakovatelnost pohybu robota [39]

- **Bezpečnost**

Dodržování bezpečnosti je neuvěřitelně složitý úkol, který je jedním z hlavních aspektů při výběru kolaborativního robota. Každý robot musí obdržet certifikaci podle ISO 10218 nebo TS 15066. Tyto certifikace jsou jediným důkazem bezpečnosti kolaborativního robota je znázorněno na obrázku 3-5.



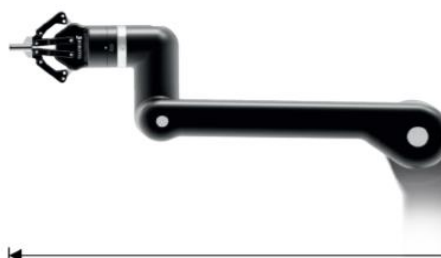
Obrázek 3-5: Robot a bezpečnost vůči operátorovi [39]

- **Programování**

Existuje několik způsobů, jak lze programovat: od jednoduchého programování, které zvládne i málo kvalifikovaná obsluha, až po složité programování ve speciálních programech vyžadujících kvalifikovaného programátora. Samotné programování však vždy závisí na dovednosti osoby, a proto není možné jasně definovat stupně obtížnosti programování.

- **Dosah**

Dosah robota je měření vzdálenosti, kterou může robot dosáhnout. Dosah je obvykle uveden v milimetrech a je maximální vzdáleností, ve které může robot pracovat. Rozsah pohybu je uveden ve stupních nebo v radiánech je znázorněno na obrázku 3-6. [35]



Obrázek 3-6: Dosah robota [39]

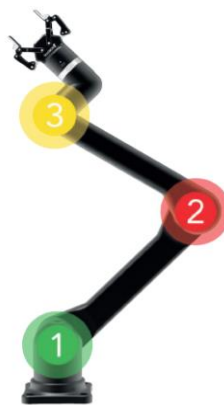
- **Maximální rychlost**

Maximální rychlost je nejvyšší rychlost, při které se může koncový efektor robota pohybovat. To se liší v závislosti na výkonových specifikacích a velikosti robota, protože i kolaborativní roboti mohou v některých situacích jít velmi rychle a v určitých situacích být nebezpeční. Spousta robotů má „kolaborativní režim“, kde je rychlost omezena na 250 mm / s, ale jejich skutečná maximální rychlost je často mnohem vyšší.

- **Stupně volnosti**

Stupně volnosti jsou počet os, kolem nichž se robot může pohybovat. Robot s mnoha stupni volnosti může provádět mnoho různých pohybů.

Většina robotů má šest stupňů volnosti, jeden pro každou ze tří hlavních os (X, Y a Z) a rotaci kolem nich. Pokud má robot více než šest stupňů volnosti, znamená to, že může dosáhnout polohy se dvěma různými konfiguracemi. Jinými slovy, čím větší stupeň volnosti, tím větší možnosti je znázorněno na obrázku 3-7.



Obrázek 3-7: Stupně volnosti robota [39]

- **Komunikace**

Roboti mají často mnoho způsobů, jak komunikovat s dalšími komponenty robotické buňky. Většina robotů má k dispozici alespoň komunikační protokol založený na ethernetu, jako je Ethernet / IP, Modbus TCP nebo Profinet. Některé roboty mají také k dispozici sériovou komunikaci pro komunikaci s určitými nástroji.

Jedním z nejpobulárnějších způsobů komunikace je Modbus RTU, který mnoho modelů nástrojů pro roboty používá k přijímání příkazů a odesílání dat do robota.

### 3.3 Výhody a nevýhody kolaborativních robotů a jejich využití

Následující tabulka 3-1 ukazuje výhody a nevýhody spolupracujících robotů oproti tradičním průmyslovým robotům.

Tabulka 3-1: Výhody a nevýhody používání kolaborativních robotů [23]

| Výhody   | Nevýhody   |
|--|--|
| Snadnější programování                               | Relativně vysoká cena  |
| Snadnější ovládání a spolupráce                      | Pro dosažení maximálního využití potenciálu je nutné zakoupit relativně drahé komponenty a příslušenství |
| Snadnější údržba a opravy                            | Nižší odolnost přístroje   |
| Vyšší citlivost při kontaktu s lidmi                 | Robot se zastaví uprostřed operace v důsledku kontaktu s lidmi   |
| Není nutné používat ochranné klece nebo kryty        | Není příliš přesná a jasná legislativa pro tento typ robota  |
| Zahrnuje kamery a senzory pro detekci objektů a osob | Průmyslové použití je ve srovnání s tradičními průmyslovými roboty pouze 10 %                            |
| Relativně malé rozměry                               |  |
| Snadnější manipulace                                 |  |
| Větší potenciál v současném průmyslu                 |  |
| Algoritmy v reálném čase pro řešení cest bez kolize  |  |
| Možnost dokoupení dalšího příslušenství              |  |

Tyto výhody a nevýhody pak předurčují využití kolaborativních robotů. Kolaborativní roboty se uplatňují v různých sektorech, níže je uvedeno několik příkladu jejich využití: [40]

- **Uchopení a uložení**

Šest kloubů může přenášet produkty v různých úhlech a polohách. Kolaborativní robot pro opakující se úkoly se zvyšuje provozní efektivitu výrobní linky. Příklad uchopení a uložení je znázorněn na obrázku 3-8.



Obrázek 3-8: Uchopení a uložení [40]

- **CNC obrábění**

Obsluha strojů je stereotypní, ale nebezpečná úloha, která zahrnuje nakládání a vykládání zpracovaných předmětů při frézování, lisování a dalších strojních procesech. Díky tomu se



zvýší bezpečnost zaměstnanců při zachování vysoké produktivity a kvality. Příklad CNC obrábění je znázorněn na obrázku 3-9.



Obrázek 3-9: CNC obrábění [40]

- **Montáž**

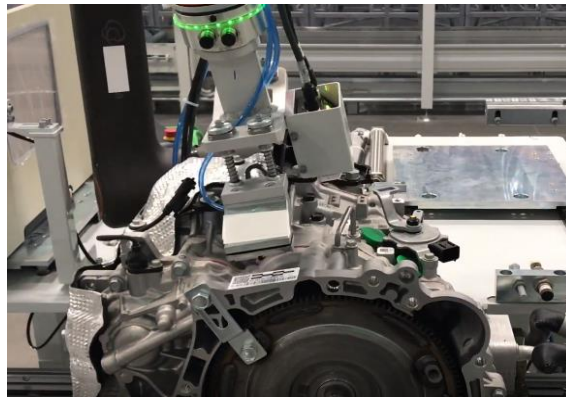
Montáž je zahájena v různých průmyslových odvětvích, včetně šroubování a montáže součástí. Kobot umožňuje nakonfigurovat ho tak, aby vyhovoval různým procesům montáže. Díky vynikajícím a vyváženým hodnotám dosahují vysoké kvality i komplexních sestav. Příklad montáže sedaček u aut je znázorněn na obrázku 3-10.



Obrázek 3-10: Montáž sedaček u aut [40]

- **Balení**

Kobot může spolupracovat s operátorem, přesné umístění v balení a vytlačování pomocí senzoru síly a zároveň umístění kamery pro kontrolu kvality a čtení kódu. Může rychle a přesně zabalit produkty různých rozměrů, aby se zvýšila produktivita a kvalita. Tím se zvyšuje stabilitu a efektivitu balící linky. Příklad je znázorněn na obrázku 3-11.



Obrázek 3-11: Nalepení a skenování kódů [40]

- **Obsluha forem**

Aplikováním na nakládání a vykládání forem mohou být operátoři ušetřeni nebezpečné práce, kdy operátoři do formovacího stroje vkládají své ruce. Díky tomu se zvýší bezpečnost pracovního prostředí a předvídatelnost rychlosti výroby. Příklad obsluha forem je znázorněn na obrázku 3-12.



Obrázek 3-12: Obsluha forem [40]

- **Leštění**

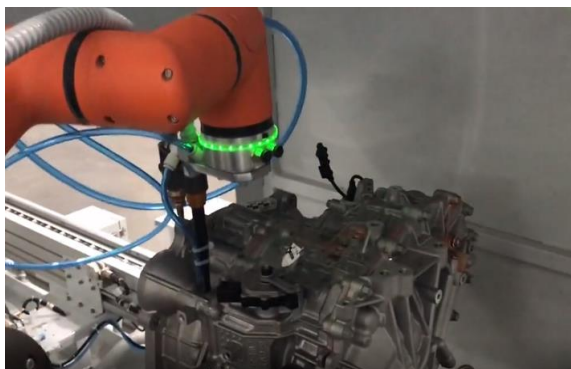
Leštění určuje kvalitu povrchové úpravy v obrábění kovů a ve výrobě nábytku. Kobot provádí leštění v jednotné poloze a tlaku, což přispívá k dosažení konstantní a vysoké kvality. Díky funkci přímého učení robota lze rychle a snadno aplikovat na všechny dostupné produktů. Příklad leštění je znázorněn na obrázku 3-13.



Obrázek 3-13: Leštění komponenty sedaček u aut [40]

- **Nanášení**

Aplikace nanášení a dávkování se týká procesu sprejování a vstřikování lepidel, silikonu, barev a jiných typů látek na určené oblasti. Nanášení vzduchem, práškem, stříkáním a ponořením, tato aplikace chrání zaměstnance před toxickým prostředím, škodlivým látkám a zároveň se zvyšuje přesnost. Příklad nanášení je znázorněn na obrázku 3-14.



Obrázek 3-14: Vstřikování u motoru vozidel [40]

- **Kontrola kvality**

Kontrola stavu produktů a odstranění vad mezi procesy. Je užitečný pro různé kontrolní procesy, od zkoumání, měření, třídění a umístění produktu do řídicí oblasti vybavené kamerami, senzory nebo přesouvání do části pro vadné produkty. Příklad kontroly je znázorněn na obrázku 3-15.



Obrázek 3-15: Kontrola stavu předmětu [40]
























### 3.4 Výrobci kolarobativních robotů

Níže tabulka 3-2 kde je přehled výrobců kolaborativních robotů z celého světa a označení jednotlivých typů cobotů, které vyrábějí.

Společnost Fanuc spadá mezi největší výrobce s více než 450 000 ks průmyslovými roboty, které podle magazínu Robotics and Automation News nainstalovala do roku 2017. Tento nárůst byl způsoben rostoucím zájmem o kolaborativní roboty. Další globální značkou robotů je společnost ABB, která stejně jako společnost Yaskawa dosáhla hranice 300 000 ks nainstalovaných průmyslových robotů. Společnost KUKA je světový výrobce s celkovým počtem cca 80 000 ks nainstalovaných robotů. Společnost Universal Robots A/S se zaměřením

výroby pouze na kolaborativní roboty a na světovém trhu patří mezi špičky ve svém oboru. Roboty UR jsou instalovány po celém světě. Dále se kolaborativní robotikou zabývají společnosti Stäubli, Epson, Kawasaki, Rethink Robotics či Denso Wave. [43]

Tabulka 3-2: Přehled výrobců a typů kobotů [41]

| Výrobce   | Sídlo společnosti   | Kolaborativní roboty   | Označení       |
|---|---|--|----------------|
|    |  Zurich, Switzerland         |    | YuMi Roberta   |
|    |  Kitakyushu, Japan           |    | Motoman HC 10  |
|    |  Bavaria, Germany            |    | IIWA – 7 R 800 |
|    |  Yamanashi Prefecture, Japan |   | CR-7iA/L       |
|  |  Tokyo, Japan              |  | duAro          |
|  |  Tokyo, Japan              |  | C3 6-Axis      |
|  |  Pfäffikon, Switzerland    |  | TX2-40         |
|  |  Toyama, Japan             |  | CZ10           |
|  |  Turin, Italy              |  | Smart5 NJ      |
|  |  California, U.S.          |  | eCobra         |

Nyní byly popsány kolaborativní roboty, následující kapitola se pak bude soustředit na vlastní experiment, kde se s konkrétním kolaborativním robotem bude pracovat.

## 4 Popis experimentu a experimentálního pracoviště

Praktická část této práce byla prováděna v rámci zkušebního pracoviště v laboratoři průmyslu 4.0 na západočeské univerzitě a jsou zde popsány: experiment, experimentální pracoviště a jednotlivé komponenty pracoviště.

### 4.1 Popis experimentu

V rámci experimentu bude porovnávána realizace procesu při provádění člověkem a robotem. Cílem je vyhodnotit jejich rozdílnou časovou náročnost na provedení tohoto procesu spolu s vyhodnocením chybovosti. Očekáváme, že kolaborativní robot bude pravděpodobně pomalejší, ale samozřejmě nás zajímají i další konkrétní naměřená data. Tato komparace nás zajímá vzhledem k rozdílným způsobům práce člověka, které by mohly v praxi teoreticky nastat. V případě člověka bude řešena činnost nakládání a vykládání puků do a z paletky. Nejprve byly navrženy druhy činností, které by mohl člověk provádět a ty byly následně zkontrolovány s odborníkem z katedry průmyslového inženýrství a managementu. Navržené druhy činností vycházejí z následujících podmínek:

Každá činnost bude provedena dominantní rukou a oběma rukama. Další alternativou je možnost uchopení pouze jednoho puků oproti více pukům nebo plnění paletky v určitém pořadí (po pořadí) nebo po určitých barvách (po barvách). Celkem tedy bude pro člověkem provedeno 16 experimentů, 8 pro nakládání a 8 pro vykládání. Níže je popsána série experimentů pro nakládání a vykládání.

1. Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem
2. Hlavní ruka po pořadí s více puků
3. Dvě ruce po pořadí s jedním pukem
4. Dvě ruce po pořadí s více puků
5. Hlavní ruka po barvách s jedním pukem
6. Hlavní ruka po barvách s více puků
7. Dvě ruce po barvách s jedním pukem
8. Dvě ruce po barvách s více puků

V případě robota bude řešena opět činnost nakládání a vykládání puků do a z paletky. Činnost se v tomto případě řídí pouze stanoveným programem, a proto je zde realizován pouze jeden experiment pro nakládání po pořadí s jedním pukem a pro vykládání po pořadí s jedním pukem.

#### **Měření času bude provedeno dle metodiky REFA:**

Společnost REFA (Reichsausschuss für Arbeitszeitermittlung) byla založena v roce 1924, patří k největším evropským soukromým organizacím. Sídli v Německu, ale má zastoupení i v dalších státech.

REFA má 17.000 jednotlivých členů a nabízí školení a rekvalifikaci v oblasti pracovních studií. Metodika REFA je založena na schopnosti posoudit intenzitu a účinnost prováděné práce podle článku výkonové normy, která se používá k posouzení výkonnosti pracovníků. Popisuje konkrétní metodologický přístup k přímému měření času pomocí stopek. Rozdílly metody

REFA od ostatních jsou ve specifickém časovém dělení, výpočtu celkového času, stanovení úrovně výkonu nebo ve speciálních časových jednotkách zvaných hunderte minuty.

Jednotlivé moduly a nástroje podle metodiky REFA je možné se podívat na pracovní procesy systematickým a holistickým přístupem, aby bylo možné analyzovat a optimalizovat celý řetězec přidané hodnoty organizace. Pozoruhodnou metodikou REFA je její neutralita v tarifní politice a díky své systematickosti a reprodukovatelnosti nasazení ve všech oblastech výrobních procesů. Před zveřejněním metody je obsah zkontrolován Svazem německých svazů zaměstnavatelů a německou konfederací odborových svazů. [48, 49]

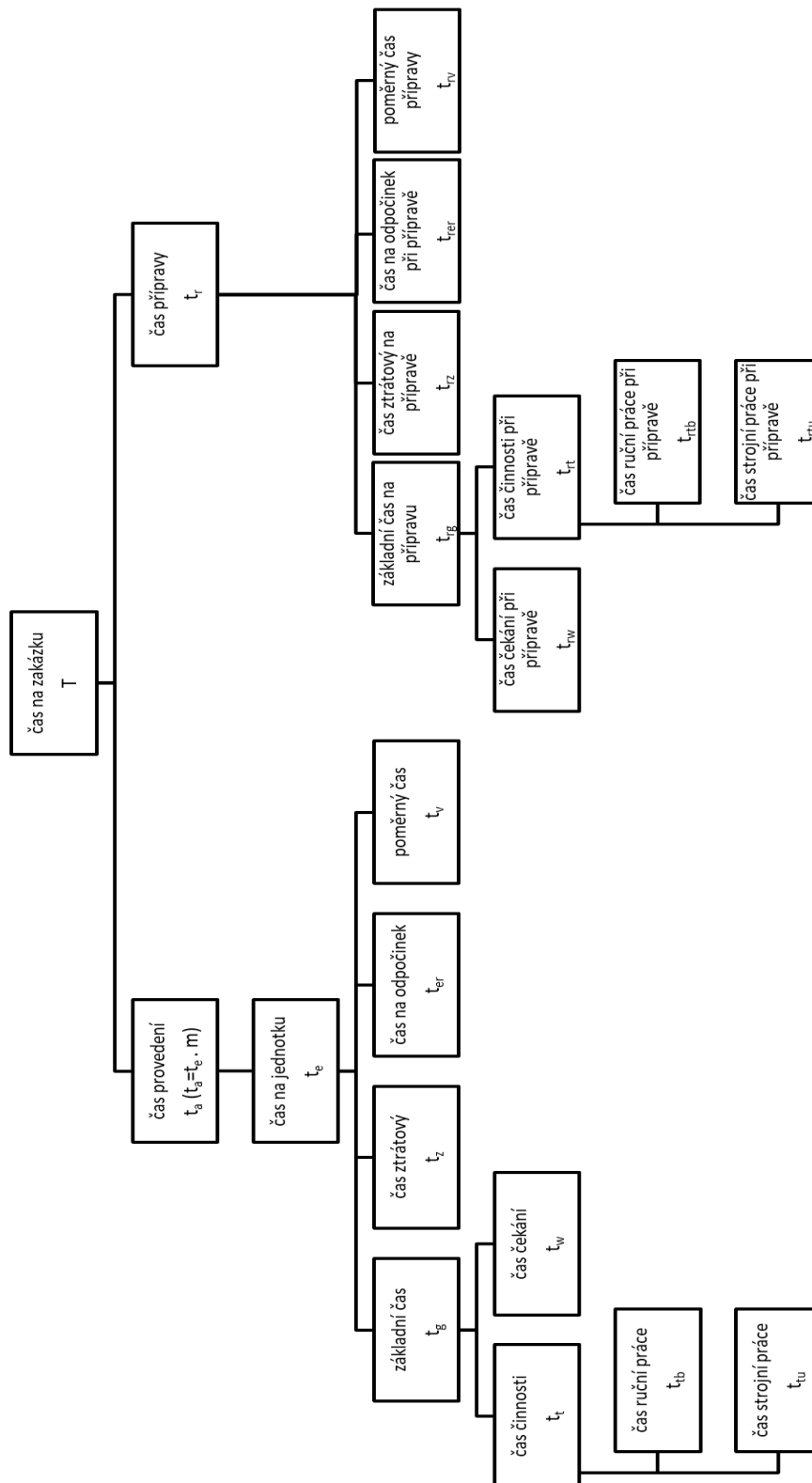
Oblasti využití metodiky REFA jsou:

- průmyslové inženýrství
- optimalizace pracovních procesů
- vyhodnocení provozních dat
- časové studie
- odměňování a ve mzdová politika
- plánování a řízení
- systémy pro řízení kvality
- Logistika (prodej, výroba, nákup)
- výdaje a náklady a cílové výpočty nákladů
- obchodní a technické zpracování dat a datové řízení

V rámci metodiky REFA je pracováno s časem na zakázku. Čas na zakázku (zpracování) se skládá z přesně určitelných procesů (automatický chod stroje, předepsaná technologická pauza atd.) a z nepřesně určitelných procesních úseků – stanovené časy:

- stanovené časy jsou podle metodiky REFA časy určené pro pracovní procesy vykonávané člověkem
- obsahují u člověka základní časy, časy na odpočinek a poměrné časy

Stanovení času na zakázku – na základě nejčastějšího případu v praxi = zakázka se skládá z přípravy a provedení a provedení obsahuje opakování stejného postupu. Níže obrázek 4-1 ukazuje skladbu časů dle metodiky REFA. [45, 47]



Obrázek 4-1: Skladba časů dle metodiky REFA [45]

Měření metodikou REFA je prováděno do speciálních formulářů, lze je vidět na tabulka 4-1 i 4-2.

Tabulka 4-1: Formulář časového snímku REFA přední strana [45]

| Formulář časového snímku                |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     | Schránka č.               |                    |  |
|---|---------------|--|-----------------------------|------------------|--|----------------|-----------------------|-------------|-----------|------------------------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|--|
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     | List č:      z      listu |                    |  |
| Pracovní úkol:                          |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Zakázka č.                              |               |  | Množství m pracovní zakázky |                  |  |                |                       | Oddělení    |           |                                    | Nákladové středisko |                           |                    |  |
| Datum časového snímku                   |               |  |                             | začátek          |  | čas            |                       | konec       |           | čas                                |                     | Doba trvání               |                    |  |
|   |               |  |                             | Množství         |  | Množství       |                       | Množství    |           | Množství                           |                     |                           |                    |  |
| Skladba času na jednotku                |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           | Čas v minutách                     |                     | původ                     |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Základní čas $t_g$                      |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Čas na oddech $t_{er}$ Zer = %          |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Poměrný čas $t_v$ Zv = 8 %              |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Ostatní přírážky                        |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Čas na jednotku $t_{e1}$                |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| $T_{e1} / t_{e100} / t_{e1000}$ v min/h |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Přípravný čas $t_r$ v min/h             |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Pracovní postup a pracovní metoda:      |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Předmět práce<br>(vstup)                | Označení      |  | Materiál                    |                  |  | Stav na vstupu |                       |             | Výkres č. |                                    | Materiál č.         |                           | Rozměry, hmotnosti |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Člověk                                  | Jméno         |  | Osobní číslo                |                  |  | muž            | žena                  | věk         |           | Doba provádění                     |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           | Podobných úkolů z kóum aného úkolu |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Provozní prostředek                     | Označení, typ |  | Počet                       | Číslo pracoviště |  |                | Technické údaje, stav |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Vlivy okolí                             |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           | Odměňování                         |                     |                           |                    |  |
| Poznámky:                               |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
|   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Jakost výsledku práce                   |               |  |                             |                  |  |                |                       |             |           |                                    |                     |                           |                    |  |
| Zpracoval                               |               |  | Přezkoušel                  |                  |  |                |                       | Platnost od |           |                                    |                     | do                        |                    |  |






## 4.2 Popis experimentálního pracoviště

Model používaný v Laboratoři průmyslu 4.0 na západočeské univerzitě je kolaborativní robot CR-7iA/L vyráběným japonskou společností FANUC, níže lze vidět technickou specifikaci tohoto robota v tabulce 4-3.

Robot CR-7iA je malý, flexibilní, 6-osý kloubový robot, maximální dosah 911 mm, opakovatelná přesnost je  $\pm 0,01$  mm, hmotnost 55 kg a může zvedat předměty až do hmotnosti 7 kg.

Tabulka 4-3: Technická specifikace – FANUC CR-7iA/L [23]

| Technická specifikace – Fanuc CR-7iA/L |  |
|--|--|
| Hmotnost: 55 kg                        |  |
| Max. nosnost zápěstí: 7 kg             |  |
| Max. dosah: 911 mm                     |  |
| Stupně volnosti: 6 otočných kloubů     |  |
| - osa 1: 340°                          |  |
| - osa 2: 166°                          |  |
| - osa 3: 383°                          |  |
| - osa 4: 380°                          |  |
| - osa 5: 240°                          |  |
| - osa 6: 720°                          |  |
| Max. rychlost: 1000 mm/s               |  |
| Klasifikace IP: IP67                   |  |
| Opakovatelnost: $\pm 0,01$ mm          |  |

Spolupracující či kolaborativní roboty se vhodně používají v aplikacích, kde je vyžadována spolupráce s člověkem, to je případ i tohoto kolaborativního robota CR-7iA/L, tedy robot nemusí být uzavřen v ochranném oplocení. Hlavní výhodou spolupracujících robotů (a tedy i typu CR-7iA/L) je jejich schopnost zastavit svůj pohyb při kontaktu s cizím předmětem nebo člověkem. Robot je vybaven silovým senzorem, který je k dispozici v základně robotické paže. Senzor je schopen identifikovat vnější síly a zastavit tak robotickou paži. Aby režim modu spolupráce fungoval správně, je nutné zajistit velmi přesné nastavení funkce (Contact – Stop), tato funkce je podmíněna správnou definicí zátěže zápěstí v situacích, kdy se paže pohybuje s prázdným chapadlem a s uchopeným pukem, pracoviště je znázorněno na obrázku 4-2. [42]



Obrázek 4-2: Experimentální pracoviště [23]

Spolupracující robot CR-7iA/L na experimentálním pracovišti je schopný provádět různé druhy manipulací a zjištění umístění barevných hliníkových puků na paletách, přičemž barevná diference vždy vypadala jinak. Pracoviště se skládá z mobilní blokové buňky, na které je instalován pásový dopravník, čtyřbarevné zásobníky puků a robotický systém. Robotické rameno je vybaveno chapadlem a kamerou schopnou rozpoznat barevné odstíny.

### 4.3 Popis jednotlivých komponentů pracoviště

Zde budou popsány jednotlivé komponenty pracoviště.

#### Robotická paže

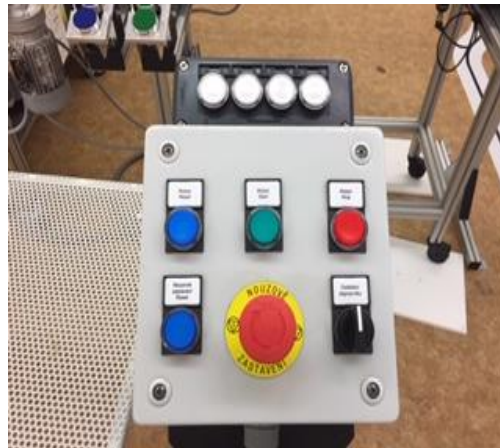
Robotická paže či rameno se skládá z výše popsaného silového senzoru, který je součástí základny, šestiosého mechanismu, jehož pohyb je prováděn pomocí servomotorů umístěných v každém kloubu a zápěstí, na kterých je namontováno kolaborativní chapadlo a kamera. Uchopovací prsty jsou vyrobeny z mosazi a jsou určeny k uchopení kulatých puků o průměru 50 mm. Celá komunikace mezi řídicí jednotkou s chapadlem a kamerou probíhá prostřednictvím konektorů umístěných na předloktí paže. Robotická paže je zobrazena na obrázku 4-3.



Obrázek 4-3: Zápěstí robotická paže

## Ovládací panel

Ovládací panely jsou dva typy, první je jednoduchý ovládací panel, obsahuje několik tlačítek, jako je start, stop, nouzové zastavení a jsou čtyři programy k nastavování celého systému, z toho byl použit program naplnění a vyprázdnění paletky. Ovládací panel je zobrazen na obrázku 4-4.



Obrázek 4-4: Ovládací panel

Druhý je ovládací pendant pomocí, který je ovládán veškeré nastavení a programování celého systému, je vybaven dotykovým displejem i tlačítkovou klávesnicí. Příklad ovládacího pendantu je zobrazen na obrázku 4-5. [42]



Obrázek 4-5: Ovládací pendant [42]

Display je rozdělen na třech malých okénkách, který je díky tomu ovládání a nastavování parametry a specifikace je velmi rychlé.

## Kamera a senzory

Na experimentálním pracovišti jsou nainstalovány senzory jak indukční i optické. Indukční senzory mají schopnost zkontrolovat přítomnost puků v zásobnících. Když některé z puků chybí v tomto zásobníku, tak na ovládacím pendantu se objeví na vyhlášce na prázdný zásobník a program se nespustí, na obrázku 4-6 je lze vidět indukční senzor. [42]



Obrázek 4-6: Indukční senzor [42]

Optické senzory jsou na experimentálním pracovišti za účelem kontroly pozice paletek, jsou tam několik senzorů první senzor nainstalován na pozici, tak aby pásový dopravník zastavil s paletkou uprostřed délky pásového dopravníku, druhý senzor za účelem zkontrolovat odjezd paletky z pásového dopravníku, na obrázku 4-7 je lze vidět optický senzor.



Obrázek 4-7: Optický senzor [42]

Kamera reprezentuje vlastně oči robota, aby mohl řídit nastavení výrobní linky rychlejším a chytřejším způsobem, díky tomu se zvyšuje flexibilitu a efektivitu práce na pracovišti. Kamera je zabezpečena na zapěstí robota, když přijde paleta k robotovi, zastaví se pomocí senzorů, které vyhodnotí, že je na správném místě, robot vyfotí paletu a pomocí senzorů robot hledá polohu a orientace předmětu, detekuje překážky a chybové stavy je lze vidět na obrázku 4-8.



Obrázek 4-8: Kamera – robot

## 5 Statistické vyhodnocení měření

V této kapitole bude uvedeno statistické vyhodnocení a souhrn výsledků z měření nakládání i vykládání člověka i robota.

### 5.1 Souhrn výsledků z měření

V této podkapitole jsou popsány výsledky měření času, jak nakládání, tak i vykládání, dále jsou zde také výsledky měření chybovosti.

#### Měření času

Níže jsou uvedeny tabulky 5-1 i 5-2 s časy pro činnost nakládání i vykládání člověkem a robotem. Celkem bylo při experimentu změřeno 7 osob. U každé osoby bylo provedeno 10 náměrů na pěti různých paletkách dle série osmi dříve uvedených experimentů. Celkem tedy bylo provedeno 560 měření u člověka. V tabulce jsou vždy uvedeny průměrné naměřené časy tg. Podrobné náměry jsou uvedeny v elektronické příloze této práce. Tabulka 5-1 jsou uvedeny hodnoty měření času nakládky člověkem.

Tabulka 5-1: Měření času – Nakládání palet člověkem [sec.]

| Jméno měřené osoby | Typ měření                           |                                   |                                   |                                |                                       |                                    |                                    |                                 |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|                    | Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem | Hlavní ruka po pořadí s více puků | Dvě ruce po pořadí s jedním pukem | Dvě ruce po pořadí s více puků | Hlavní ruka po barvách s jedním pukem | Hlavní ruka po barvách s více puků | Dvě ruce po barvách s jedním pukem | Dvě ruce po barvách s více puků |
| Tomáš              | 34.65                                | 29.39                             | 28.26                             | 25.86                          | 29.48                                 | 27.68                              | 22.47                              | 25.29                           |
| Akram              | 29.69                                | 28.66                             | 24.71                             | 26.36                          | 27.92                                 | 24.96                              | 21.92                              | 20.90                           |
| Honza              | 24.93                                | 24.64                             | 24.36                             | 22.34                          | 22.42                                 | 21.60                              | 20.63                              | 21.10                           |
| Míša               | 25.53                                | 22.85                             | 22.73                             | 21.38                          | 24.85                                 | 22.79                              | 19.20                              | 19.45                           |
| Patrik             | 24.88                                | 23.39                             | 22.93                             | 20.13                          | 21.64                                 | 20.37                              | 19.57                              | 18.91                           |
| Pavel              | 26.56                                | 23.98                             | 24.75                             | 21.84                          | 23.50                                 | 21.73                              | 18.66                              | 18.60                           |
| Richard            | 26.05                                | 25.91                             | 25.02                             | 20.98                          | 21.88                                 | 24.18                              | 18.22                              | 19.53                           |
| <b>Průměr</b>      | 27.47                                | 25.54                             | 24.90                             | 22.69                          | 24.52                                 | 23.33                              | 20.09                              | 20.54                           |

V následující tabulce 5-2 jsou uvedeny hodnoty měření času vykládky člověkem.

Tabulka 5-2: Měření času – Vykládání palet člověkem [sec.]

| Jméno měřené osoby | Typ měření                           |                                   |                                   |                                |                                       |                                    |                                    |                                 |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|                    | Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem | Hlavní ruka po pořadí s více puků | Dvě ruce po pořadí s jedním pukem | Dvě ruce po pořadí s více puků | Hlavní ruka po barvách s jedním pukem | Hlavní ruka po barvách s více puků | Dvě ruce po barvách s jedním pukem | Dvě ruce po barvách s více puků |
| Tomáš              | 36.47                                | 28.19                             | 27.73                             | 24.44                          | 29.67                                 | 22.67                              | 23.79                              | 22.14                           |
| Akram              | 34.72                                | 28.58                             | 28.31                             | 28.12                          | 30.01                                 | 23.47                              | 23.20                              | 19.42                           |
| Honza              | 24.21                                | 22.17                             | 25.61                             | 23.61                          | 28.07                                 | 21.35                              | 22.29                              | 20.43                           |
| Míša               | 28.79                                | 25.42                             | 25.93                             | 23.06                          | 27.79                                 | 20.30                              | 19.34                              | 17.51                           |
| Patrik             | 27.20                                | 24.98                             | 24.52                             | 19.21                          | 22.84                                 | 18.89                              | 21.90                              | 17.85                           |
| Pavel              | 25.95                                | 26.45                             | 19.95                             | 20.18                          | 23.56                                 | 20.61                              | 21.79                              | 17.34                           |
| Richard            | 28.48                                | 23.90                             | 24.52                             | 20.07                          | 25.61                                 | 22.24                              | 18.92                              | 17.20                           |
| <b>Průměr</b>      | 29.40                                | 25.67                             | 25.22                             | 22.67                          | 26.79                                 | 21.36                              | 21.60                              | 18.84                           |

U robota byla měřena jen jedna metoda hlavní ruka po pořadí s jedním pukem, protože robot v době provádění experimentu ještě nedokáže rozlišovat barvy, nemá ani dvě zápěstí či ramena. Jediné, co umí, je vybrat jeden puk po pořadí. V tabulce 5-3 jsou uvedené průměrné hodnoty z deseti měření času robota, ukázka podrobně zpracovaných hodnot je uvedena v příloze č. 1.

Tabulka 5-3: Měření času – Nakládání i vykládání palet robotem [sec.]

| Typ měření | Nakládání po pořadí s jedním pukem | Vykládání po pořadí s jedním pukem |
|------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Robot      | 84.65                              | 232.09                             |

### Měření chybovosti

Tabulka 5-4 níže ukazuje počet měřených operací u nakládky člověkem 560 z nich 14 chyb, u vykládky člověkem počet měření také 560 z nich 10 chyb. Chyba u nakládky člověkem je uvazovaná tím že bylo špatně umístěny barvy puku na paletku jinými slovy nesprávné barvy puku na paletky, u vykládaného chyba byla umístěn puk z paletky do špatného zásobníku. U robota počet měřených operací u nakládky 10 a u vykládky také 10, chybovost je nulová. Robot nemá žádnou chybovost naopak člověk má určitou chybovost.

Tabulka 5-4: Počet měření chybovost Člověk – Robot

|        | Počet měření Nakládka | Počet měření Vykládka | Počet chyb Nakládka | Počet chyb Vykládka |
|--------|-----------------------|-----------------------|---------------------|---------------------|
| Člověk | 560                   | 560                   | 14                  | 10                  |
| Robot  | 10                    | 10                    | 0                   | 0                   |

## 5.2 Statistické vyhodnocení

Zde jsou popsáno statistické vyhodnocení měření času nakládání i vykládání a také vyhodnocení měření chybovosti.

### Měření času

U všech dříve uvedených měření bylo provedeno statistické vyhodnocení přesnosti náměrů. Dle metodiky REFA byl použit níže uvedený vzorec pro výpočet míry rozptylu  $\varepsilon$ . Pro činnost člověka a potřeby mzdového odměňování stanovuje REFA  $\varepsilon = \pm 5\%$ , což je jinými slovy přesnost měření:

$$\varepsilon = \frac{t}{\sqrt{n}} \times \frac{s}{tz} \times 100 \quad (1)$$

- $\varepsilon$  - míra rozptylu či přípustná chyba
- $t$  - konstantní veličina 1.96 pro studentovo rozdělení
- $cv = \frac{s}{tz}$  - variační koeficient
- $s$  - standardní odchylka
- $tz$  (příp.  $t_g$ ) - průměrná doba cyklu
- $\sqrt{n}$  - počet naměřených hodnot (počet náměru)

Standardní odchylka se dále počítá dle uvedeného vzorce.

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum (X_i - \bar{X})^2} \quad (2)$$

- $n$  - počet náměrů
- $\sum (X_i - \bar{X})^2$  - výběrový rozptyl –  $\sum$  (čas náměru [sec] – průměr všech náměrů [sec])<sup>2</sup>
- $L_g$  - výkon pracovníka

Níže v tabulkách 5-5 a 5-6 je uveden jeden konkrétní příklad výpočtu u prvního měření (nakládání palet člověkem). Podrobné hodnoty výpočtu míry rozptylu jsou pro jednoho pracovníka ukázány v příloze č.2.

**Tabulka 5-5: Konkrétní příklad výpočtu statistické vyhodnocení měření času – část 1**

| Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |                         |          |       |       |
|--------------------------------------|-------------------------|----------|-------|-------|
| Začátek                              | uchopení 1. puku        |          |       |       |
| Konec                                | puštění posledního puku |          |       |       |
|                                      | čas [sec]               | množství | $L_g$ | $t_g$ |
| 1                                    | 33.56                   | 1        | 100 % | 33.56 |
| 2                                    | 35.56                   | 1        | 100 % | 35.56 |
| 3                                    | 33.85                   | 1        | 100 % | 33.85 |
| 4                                    | 35.00                   | 1        | 100 % | 35.00 |
| 5                                    | 34.12                   | 1        | 100 % | 34.12 |
| 6                                    | 34.32                   | 1        | 100 % | 34.32 |
| 7                                    | 34.71                   | 1        | 100 % | 34.71 |
| 8                                    | 35.78                   | 1        | 100 % | 35.78 |
| 9                                    | 34.87                   | 1        | 100 % | 34.87 |
| 10                                   | 34.73                   | 1        | 100 % | 34.73 |



|       |       |
|-------|-------|
| $t_g$ | 34.65 |
|-------|-------|

Tabulka 5-6: Konkrétní příklad výpočtu statistické vyhodnocení měření času – část 2

|   |               |
|---|---------------|
| $\sum (X_i - \bar{X})^2$  |               |
| <i>(čas náměru [sec] – průměr všech náměrů [sec])<sup>2</sup></i> |               |
| $(33.56 - 34.65)^2 = 1.1881$                                      |               |
| $(35.56 - 34.65)^2 = 0.8281$                                      |               |
| $(33.85 - 34.65)^2 = 0.64$  |               |
| $(35.00 - 34.65)^2 = 0.1225$                                      |               |
| $(34.12 - 34.65)^2 = 0.2809$                                      |               |
| $(34.32 - 34.65)^2 = 0.1089$                                      |               |
| $(34.71 - 34.65)^2 = 0.0036$                                      |               |
| $(35.78 - 34.65)^2 = 1.2769$                                      |               |
| $(34.87 - 34.65)^2 = 0.0484$                                      |               |
| $(34.73 - 34.65)^2 = 0.0064$                                      |               |
| <b>Suma</b>   | <b>4.5038</b> |

$$s = \sqrt{\frac{1}{n-1} \times \sum (X_i - \bar{X})^2}$$

$$s = \sqrt{\frac{1}{10-1} \times 4.5038} = 0.707 \quad S = 0.707$$

$$\varepsilon = \frac{t}{\sqrt{n}} \times \frac{s}{t_z} \times 100$$

$$\varepsilon = \frac{t}{\sqrt{10}} \times \frac{0.707}{34.65} \times 100 = 1.265 \quad \varepsilon = 1.265 \%$$

Výsledná míra rozptylu je validní z důvodu, že je v toleranci  $\pm 5 \%$ . Obdobným způsobem jsem prověřil odchylky u všech ostatních měření. Výsledné hodnoty  $\varepsilon$  jsou uvedeny v tabulkách níže. Téměř ve všech případech se hodnoty pohybovaly pod hranicí  $\pm 5 \%$ . V případě nakládání byla tato hranice překročena u 8 měření z celkových 560ti. V případě vykládání byla tato hranice překročena také u 8 měření z celkových 560ti. Na základě konzultace s odborníkem z katedry bylo schváleno, že při překročení míry rozptylu pouze u osmi měření lze výsledky považovat za validní. Následující tabulka 5-7 uvádí hodnoty měření rozptylu nakládky člověkem.

Tabulka 5-7: Rozptyl – Nakládání palet člověkem [%]

| Jméno měřené osoby | Typ měření                           |                                   |                                   |                                |                                       |                                    |                                    |                                 |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|                    | Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem | Hlavní ruka po pořadí s více puků | Dvě ruce po pořadí s jedním pukem | Dvě ruce po pořadí s více puků | Hlavní ruka po barvách s jedním pukem | Hlavní ruka po barvách s více puků | Dvě ruce po barvách s jedním pukem | Dvě ruce po barvách s více puků |
| Tomáš              | 1.265                                | 3.626                             | 6.005                             | 3.391                          | 2.513                                 | 3.477                              | 2.440                              | 2.510                           |
| Akram              | 3.606                                | 2.899                             | 2.348                             | 4.654                          | 1.569                                 | 3.838                              | 4.187                              | 2.649                           |
| Honza              | 4.377                                | 7.362                             | 5.292                             | 4.314                          | 3.168                                 | 4.703                              | 4.054                              | 4.723                           |
| Míša               | 4.231                                | 4.486                             | 5.879                             | 4.194                          | 8.710                                 | 6.606                              | 4.984                              | 4.632                           |
| Patrik             | 4.119                                | 4.647                             | 4.995                             | 4.979                          | 3.583                                 | 3.680                              | 4.812                              | 4.803                           |
| Pavel              | 3.918                                | 4.344                             | 9.016                             | 4.669                          | 8.144                                 | 4.736                              | 4.488                              | 4.722                           |
| Richard            | 3.389                                | 4.408                             | 4.296                             | 4.740                          | 4.614                                 | 4.861                              | 4.621                              | 4.088                           |
| <b>Průměr</b>      | 3.557                                | 4.538                             | 5.404                             | 4.420                          | 4.614                                 | 4.557                              | 4.226                              | 4.018                           |

V následující tabulce 5-8 jsou uvedeny hodnoty měření rozptylu vykládky člověkem.

Tabulka 5-8: Rozptyl – Vykládání palet člověkem [%]

| Jméno měřené osoby | Typ měření                           |                                   |                                   |                                |                                       |                                    |                                    |                                 |
|--------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------------------|---------------------------------------|------------------------------------|------------------------------------|---------------------------------|
|                    | Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem | Hlavní ruka po pořadí s více puků | Dvě ruce po pořadí s jedním pukem | Dvě ruce po pořadí s více puků | Hlavní ruka po barvách s jedním pukem | Hlavní ruka po barvách s více puků | Dvě ruce po barvách s jedním pukem | Dvě ruce po barvách s více puků |
| Tomáš              | 2.642                                | 4.757                             | 4.806                             | 4.410                          | 1.825                                 | 2.926                              | 4.278                              | 3.521                           |
| Akram              | 3.681                                | 3.028                             | 4.801                             | 4.578                          | 2.961                                 | 2.974                              | 3.100                              | 3.733                           |
| Honza              | 4.643                                | 4.312                             | 4.961                             | 4.529                          | 4.051                                 | 6.663                              | 3.866                              | 4.336                           |
| Míša               | 4.859                                | 8.070                             | 4.439                             | 4.660                          | 5.618                                 | 4.034                              | 4.576                              | 4.521                           |
| Patrik             | 4.867                                | 4.177                             | 4.190                             | 4.470                          | 4.053                                 | 4.006                              | 4.617                              | 4.517                           |
| Pavel              | 5.007                                | 4.913                             | 8.246                             | 4.692                          | 4.685                                 | 4.647                              | 7.850                              | 5.038                           |
| Richard            | 2.822                                | 4.402                             | 5.615                             | 4.428                          | 4.645                                 | 4.823                              | 4.861                              | 4.606                           |
| <b>Průměr</b>      | 4.074                                | 4.808                             | 5.294                             | 4.538                          | 3.976                                 | 4.296                              | 4.735                              | 4.324                           |

V tabulce 5-9 jsou uvedené průměrné hodnoty rozptylu robota.

Tabulka 5-9: Rozptyl – Nakládání i vykládání palet robotem [%]

| Typ měření | Nakládání po pořadí s jedním pukem | Vykládání po pořadí s jedním pukem |
|------------|------------------------------------|------------------------------------|
| Robot      | 1.297                              | 3.422                              |

Jak bylo výše zmíněno, bylo změřeno celkem 7 osob a u každé bylo provedeno 10 náměrů osmi různých měřených metod a stanovená tolerance míry rozptylu či přípustná chyba je 5 %.

U 6ti osob dosáhla míra rozptylu či přípustná chyba více než 5 % (riziko chybovosti) a to u metody dvě ruce po pořadí s jedním pukem z důvodu náročnosti na koordinaci a soustředění. U metody hlavní ruka po barvách s jedním pukem je také vyšší míra rozptylu u měření z toho důvodu, že během nakládání či vykládání barev dochází k chaotickému výběru správné barvy. U metody hlavní ruka po pořadí s více puky a hlavní ruka po barvách s více puky několikrát vypadl puk, čímž se proces zdržel, což ovlivnilo míru rozptylu. U metody dvě ruce po barvách s jedním pukem je vyšší míra rozptylu jen u jedné osoby, a to z důvodu nesoustředěnosti a vyčerpání.

U robota byla měřena jen jedna metoda hlavní ruka po pořadí s jedním pukem, protože robot v době provádění experimentu ještě nedokáže rozlišovat barvy, nemá ani dvě zápěstí či ramena. Jediné, co umí, je vybrat jeden puk po pořadí a splňuje minimální míru rozptylu.

### Měření chybovosti

Tabulka 5-10 níže ukazuje průměry počet chybovost, která je spočítána jako průměrná na jednu operaci a na jedno měření (u jednoho měření uvažujeme umístění 20 puků a tedy 20 operací), a to jak u člověka, tak i u robota. Chybovost je spočtena z naměřených dat, která zobrazuje tabulka 5-4 Počet měření chybovost Člověk – Robot. Z této tabulky plyne, že při nakládce je 14 chyb z celkových 560 měření. Průměrná chybovost se vypočte jednoduchým podílem, kdy u nakládky u člověka je tak 0.025 (2,5 %) na každé měření a 0,00125 (0,125 %) na každou operaci. U vykládky jde o 10 chyb z 560 měření tj. 0.018 (1,8 %) na každé měření a 0,0009 (0,09 %) na každou operaci. U robota průměrná chybovost je nulová jak u nakládky, tak i vykládky. Zde je vidět, že robot neděla žádnou chybovost, ale u člověka se chybovost vyskytuje. Výsledné hodnoty byly zprůměrované na 1 měření a operaci z každého, aby byla měření srovnatelná.

Tabulka 5-10: Průměrná chybovost na 1 měření

|        | Průměrný počet chyb na měření Nakládka | Průměrný počet chyb na operaci Nakládka | Průměrný počet chyb na měření Vykládka | Průměrný počet chyb na operaci Vykládka |
|--------|--|---|--|---|
| Člověk | 0.025 (2,5 %)                          | 0,00125 (0,125 %)                       | 0.018 (1,8 %)                          | 0,0009 (0,09 %)                         |
| Robot  | 0                                      | 0                                       | 0                                      | 0                                       |

## 6 Vyhodnocení experimentu

V této podkapitole je provedeno vyhodnocení měření času, vyhodnocení chybovosti, ekonomické a výsledné hodnocení.

### 6.1 Vyhodnocení měření času

Nyní je provedeno vyhodnocení měření času. Toto vyhodnocení je provedeno pro následující varianty v rámci měření času. Tyto varianty byly zvoleny na základě jejich potenciální relevantnosti pro výrobní proces. Jedná se o následující varianty:

- nejrychlejší způsob provádění operace člověkem
- průměrná délka času provádění operace člověkem
- nejpomalejší způsob provádění operace člověkem
- nejpodobnější způsob provádění operace člověkem a robotem

Čas robota byl uvažován pouze průměrný, protože odchylka hodnot měření času je minimální.

- **Nejrychlejší způsob provádění operace člověkem**

Tabulky níže 6-1 i 6-2 ukazují porovnání nejrychlejší metody člověk vs. robot nakládání i vykládání, u člověka nejrychlejší metoda nakládání je dvě ruce po barvách s jedním pukem, u robota byla metoda hlavní ruka po pořadí s jedním pukem. Rozdílná hodnota u nakládání je 64.56 sekund, což znamená, že je člověk 4x rychlejší než robot.

U vykládání je u člověka nejrychlejší metoda dvě ruce po barvách s více puků, u robota je hlavní ruka po pořadí s jedním pukem. Jejich rozdílná hodnota je 213.25 sekund což znamená, že poměr je výraznější, kdy je člověk 12x rychlejší.

**Tabulka 6-1: Nejrychlejší průměrný čas nakládání palet u člověka i robota [sec.]**

| Metoda měření                                |   |
|--|---|
| Člověk<br>Dvě ruce po barvách s jedním pukem | Robot<br>Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |
| 20.09  | 84.65   |
| Rozdíl                                       | 64.56   |

**Tabulka 6-2: Nejrychlejší průměrný čas vykládání palet u člověka i robota [sec.]**

| Metoda měření                             |   |
|---|---|
| Člověk<br>Dvě ruce po barvách s více puků | Robot<br>Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |
| 18.84                                     | 232.09  |
| Rozdíl                                    | 213.25  |

Tabulky níže 6-3 i 6-4 ukazují průměr míry rozptylu dobrovolníků i robota u zmíněných metod nakládání i vykládání, z tabulek vyplývá, že míra rozptylu člověka i robota jsou validní, protože nedosáhli odchylky 5 %.

**Tabulka 6-3: Míra rozptylu – nakládání palet u člověka i robota [%]**

| Metoda měření                                |   |
|--|---|
| Člověk<br>Dvě ruce po barvách s jedním pukem | Robot<br>Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |
| 4.226  | 1.297   |

**Tabulka 6-4: Míra rozptylu – vykládání palet u člověka i robota [%]**

| Metoda měření                                  |   |
|--|---|
| Člověk<br>Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem | Robot<br>Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |
| 3.976  | 3.422   |

- **Průměrný čas člověka a robota**

Tabulky 6-5 a 6-6 níže ukazují porovnání průměrné doby člověka a robota. Rozdílná hodnota u nakládání je 61.61 sekund což znamená, že je člověk 3,7x rychlejší než robot. U vykládání je poměr ještě výraznější, kdy je člověk téměř 9,7x rychlejší. Průměrný čas člověka při vykládce je 23.94 sekund. U robota je čas vykládání 232.09 sekund. Důvodem je delší vzdálenost místa vykládky, kterou musí urazit rameno robota i člověka než je při nakládání.

**Tabulka 6-5: Průměrný čas nakládání palet u člověka i robota [sec.]**

| Metoda měření        |                     |
|----------------------|---------------------|
| Průměrný čas člověka | Průměrný čas robota |
| 23.04                | 84.65               |
| Rozdíl               | 61.61               |

**Tabulka 6-6: Průměrný čas vykládání palet u člověka i robota [sec.]**

| Metoda měření        |                     |
|----------------------|---------------------|
| Průměrný čas člověka | Průměrný čas robota |
| 23.94                | 232.09              |
| Rozdíl               | 208.15              |

Tabulky níže 6-7 a 6-8 ukazují průměr míry rozptylu dobrovolníků i robota a jejich průměrných časů ze všech měření, což znamená, že míra rozptylu člověka i robota jsou validní, protože nedosáhli odchylky 5 %.

**Tabulka 6-7: Míra rozptylu – nakládání palet u člověka i robota [%]**

| Metoda měření        |                     |
|----------------------|---------------------|
| Průměrný čas člověka | Průměrný čas robota |
| 4.417                | 1.297               |

**Tabulka 6-8: Míra rozptylu – vykládání palet u člověka i robota [%]**

| Metoda měření        |                     |
|----------------------|---------------------|
| Průměrný čas člověka | Průměrný čas robota |
| 4,506                | 3,422               |

- **Nejpomalejší (nejpodobnější) způsob provádění operace člověkem**

Tabulky níže 6-9 i 6-10 ukazují nejpomalejší metodu u člověka vůči robotu, kterou je Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem. Tato metoda je zároveň i nejpodobnější metodou u člověka. Tabulky níže ukazují porovnání průměrné doby člověka a robota. Rozdílná hodnota u nakládání je 57.18 sekund což znamená, že je člověk 3x rychlejší než robot. U vykládání je poměr ještě výraznější, kdy je člověk téměř 8x rychlejší. Důvodem je delší vzdálenost místa vykládky, kterou musí urazit rameno robota, než je při nakládání.

**Tabulka 6-9: Nejpomalejší průměrný čas nakládání palet u člověka i robota [sec.]**

| Metoda měření                        |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Člověk                               | Robot                                |
| Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem | Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |
| 27.47                                | 84.65                                |
| Rozdíl                               | 57.18                                |

**Tabulka 6-10: Nejpomalejší průměrný čas vykládání palet u člověka i robot [sec.]**

| Metoda měření                        |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Člověk                               | Robot                                |
| Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem | Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |
| 29.40                                | 232.09                               |
| Rozdíl                               | 202.69                               |

Tabulky 6-11 i 6-12 níže ukazují průměr míry rozptylu dobrovolníků i robota u metody hlavní ruka po pořadí s jedním pukem, což znamená, že míra rozptylu člověka i robota jsou validní, protože nedosáhli odchylky 5 %. Výhoda u robota je, že jeho jednotlivé operace jsou časově stabilnější, tedy že hodnoty jednotlivých náměru jsou podobnější než u člověka, což ukazuje nižší míra rozptylu.

**Tabulka 6-11: Míra rozptylu – nakládání palet u člověka i robota [%]**

| Metoda měření                        |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Člověk                               | Robot                                |
| Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem | Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |
| 3.557                                | 1.297                                |

**Tabulka 6-12: Míra rozptylu – vykládání palet u člověka i robota [%]**

| Metoda měření                        |                                      |
|--------------------------------------|--------------------------------------|
| Člověk                               | Robot                                |
| Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem | Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |
| 4.074                                | 3.422                                |

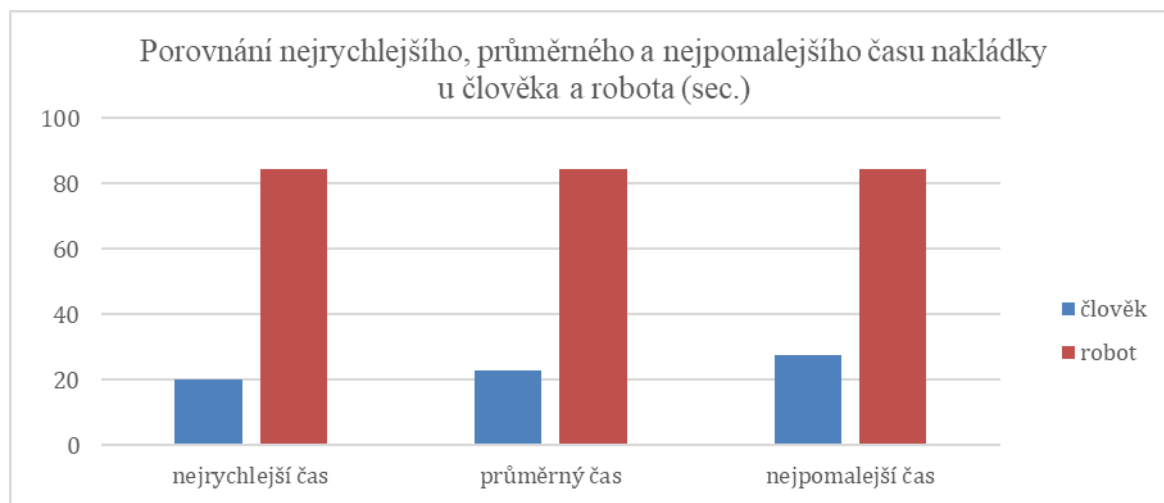
- **Souhrnné vyhodnocení měření času**

Na grafu č. 6-1 níže lze vidět porovnání nejrychlejšího, průměrného a nejpomalejšího průměrného času nakládky. Jednotlivé časy vychází z Tabulka 5-1 při porovnání s časem robota z Tabulky 5-3. Zde je zřejmé, že i přes větší časové odchylky jednotlivých metod je člověk výrazně rychlejší. Dvě ruce po barvách s jedním pukem je u člověka nejrychlejší metoda, kdy průměrný čas při měření byl 20,09 sekund. Průměrný čas za všechny metody je 23,04 sekund. Naopak Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem je nejpodobnější metodou a současně nejpomalejší, kdy člověk dosahoval průměrného času 27,47 sekund. Robotův čas při nakládce je 84,65 sekund. Při porovnání nejrychlejšího času nakládky u člověka a robota vyjde, že je člověk 4,2krát rychlejší. Oproti nejpomalejšímu času, kdy je člověk rychlejší 3,1krát. V průměru je člověk rychlejší 3,67krát. Přehledně jsou tyto časy zobrazeny v tabulce níže 6-13 porovnání nejrychlejšího, průměrného a nejpomalejšího času nakládky u člověka a robota.

Tabulka 6-13: Porovnání nejrychlejšího, průměrného a nejpomalejšího času nakládky u člověka a robota [sec.]

|                             | Nejrychlejší čas | Průměrný čas | Nejpomalejší čas |
|-----------------------------|------------------|--------------|------------------|
| Člověk                      | 20.09            | 23.04        | 27.47            |
| Robot                       | 84.65            | 84.65        | 84.65            |
| Porovnání časů robot/člověk | 4,2              | 3,67         | 3,1              |

Graf 6-1 Porovnání měření – nejrychlejšího, průměrného a nejpomalejšího času nakládky u člověka a robota [sec.]



Výsledné hodnoty porovnání času operace nakládky u člověka a robota vychází tak, že v rozmezí 4,2 – 3,1krát pomalejší robot oproti člověku. V průměru je to 3,7krát. Pokud by jediným kritériem volby, zda zvolit člověka nebo robota pro tuto operaci by čas operace, potom by jednoznačnou volbou byl člověk. Čas operace, ale není jediné kritérium, proto je nezbytné zvážit i kritéria další, která jsou uvedena dále v práci.

Graf č. 6-2 níže zobrazuje porovnání nejrychlejších a nejpomalejších a průměrných časů u člověka i robota při vykládání. Všechny časy vykládání jednotlivých metod u člověka vychází z Tabulka 5-2 u robota z Tabulka 5-3. Rozdíl mezi časem člověka a robota je zde výraznější. Dvě ruce po barvách s více puků je u člověka nejrychlejší metoda, kdy průměrný čas při měření byl 18,84 sekund. Průměrný čas všech měření u vykládky je 23,94 sekund. Naopak hlavní ruka po pořadí s jedním pukem je i při vykládce nejpomalejší metodou, kdy člověk dosahoval

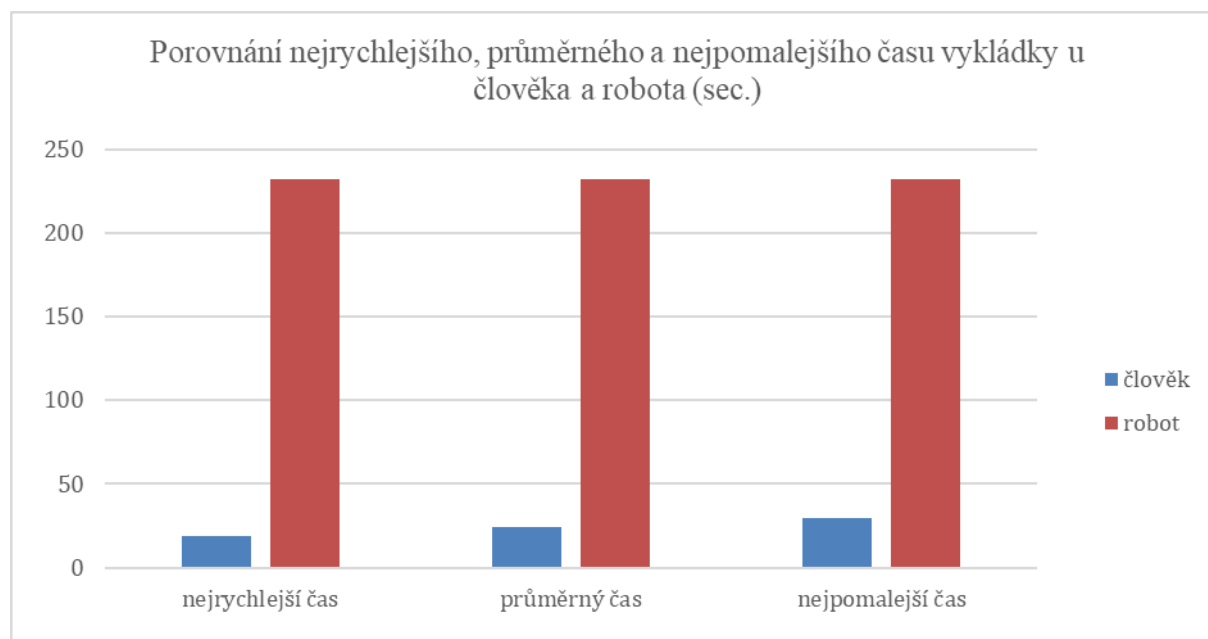
průměrného času 29,4 sekund. Zároveň je tato metoda nejpodobnější vzhledem k práci robota. Robotův čas při vykládce je 232,09 sekund. Při porovnání těchto časů vykládky je člověk s nejrychlejším časem 12,3krát rychlejší, s nejpomalejším časem 7,9krát rychlejší. V průměru je u vykládky člověk 9,7krát rychlejší. Výsledky tohoto srovnání jsou zaznamenány v Tabulka 6-14.

Tabulka 6-14: Porovnání nejrychlejšího, průměrného a nejpomalejšího měření času vykládky u člověka a robota [sec.]

|                             | Nejrychlejší čas | Průměrný čas | Nejpomalejší čas |
|-----------------------------|------------------|--------------|------------------|
| Člověk                      | 18,84            | 23,94        | 29,40            |
| Robot                       | 232,09           | 232,09       | 232,09           |
| Porovnání časů robot/člověk | 12,32            | 9,7          | 7,9              |

Graf 6-2 zobrazující zmíněné porovnání je uveden níže.

Graf 6-2 Porovnání měření - nejrychlejšího a nejpomalejšího času vykládky u člověka a robota [sec.]



Výsledné hodnoty porovnání času operace vykládky u člověka a robota vychází tak, že v rozmezí 8krát až 12krát je pomalejší robot oproti člověku. Pokud by jediným kritériem volby, zda zvolit člověka nebo robota pro tuto operaci by čas operace, potom by jednoznačnou volbou byl člověk.

Průměrně vychází, že je robot při vykládání 9,7krát pomalejší nežli člověk. To znamená značně v neprospěch robota. Je tak zřejmé, že by bylo nutné tuto operaci u robota nejdříve výrazně zoptimalizovat, než by mohlo dojít k nahrazení člověka robotem, proto u dalšího ekonomického hodnocení bude brána v potaz pouze operace nakládky, kde je rozdíl výrazně menší.

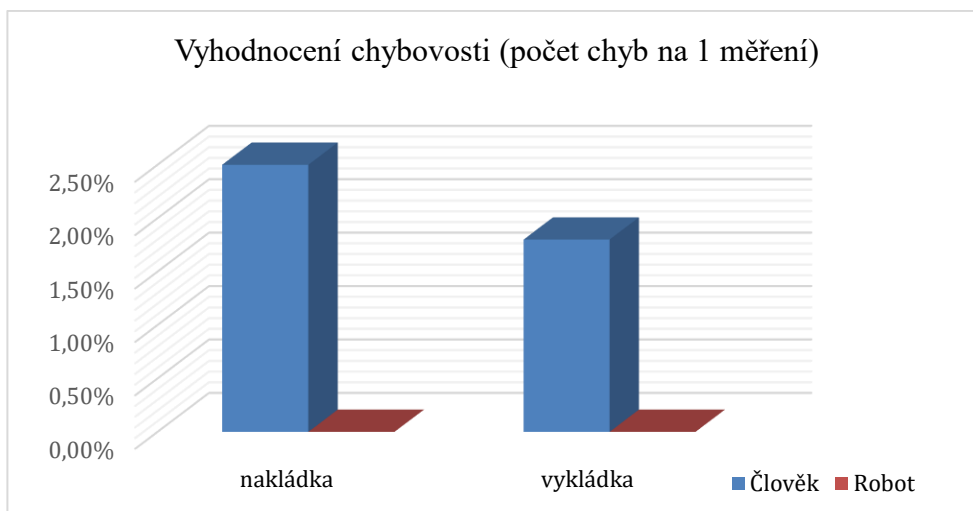
## 6.2 Vyhodnocení chybovosti

Druhým sledovaným parametrem při měření v rámci operace byla chybovost. Ta vycházela u robota a člověka různým způsobem. Průměrná chybovost u nakládky u člověka je 0.025 (2,5



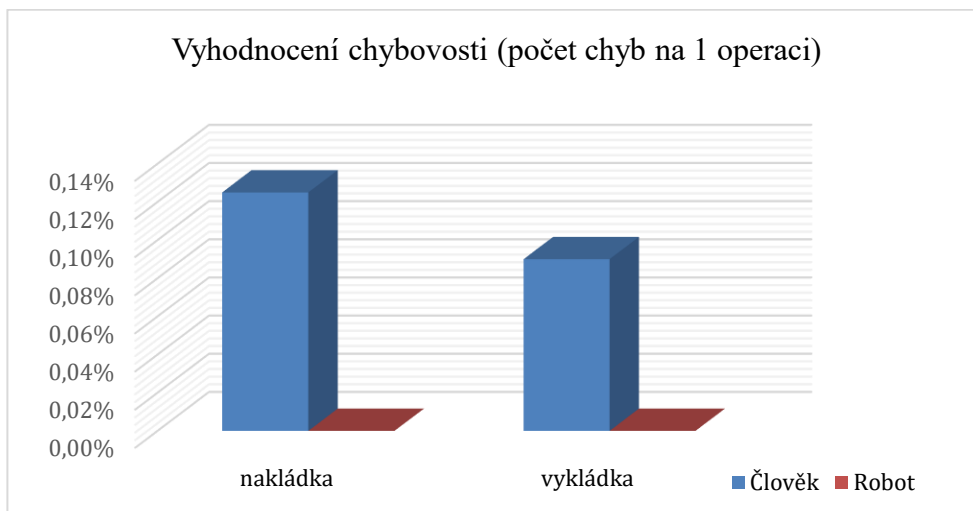
%) chyby na každé měření a 0,00125 (0,125 %) každou operaci, u vykládky 0.018 (1,8 %) chyby na každé měření a 0,0009 (0,09 %) na každou operaci. U robota průměrná chybovost je nulová jak u nakládky, tak i vykládky. Výsledné hodnoty jsou zprůměrované na 1 měření operaci z každého, aby to bylo podobné. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce č. 5-10. Výsledný graf 6-3 s vyhodnocením chybovosti na měření je znázorněn níže.

Graf 6-3 Vyhodnocení chybovosti na měření [%]



Výsledný graf 6-4 s vyhodnocením chybovosti na operaci je znázorněn níže.

Graf 6-4 Vyhodnocení chybovosti na operaci [%]



Zde je vidět, že robot nedělá žádné chyby, ale u člověka se chybovost vyskytuje. U člověka by tedy bylo vhodné zařadit určitou formu výstupní kontroly, např. pomocí automatického vyhodnocení fotografií paletky, kdy by byla příslušná paletka vyfotografována před i po operaci a fotografie byly počítačem porovnány. Pokud by si při vyhodnocení fotografie neodpovídaly, dostal by operátor informaci o nutnosti opravy vytvořené chyby. Návrh kontrolní operace však není cílem této práce, ale je nezbytné zohlednit chybovost člověka při výsledném hodnocení.

Výsledné hodnoty porovnání chybovosti u člověka a robota vychází jednoznačně v neprospěch člověka. Pokud by jediným kritériem volby, zda zvolit člověka nebo robota pro tuto operaci byla chybovost operace, potom by jednoznačnou volbou byl robot. Chybovost, ale není jediné kritérium, v rámci průmyslového inženýrství o výhodnosti a nevýhodnosti varianty rozhoduje výrazně také ekonomické hodnocení, to je součástí následující podkapitoly.

### 6.3. Ekonomické hodnocení

Cílem této podkapitoly je předložit ekonomické hodnocení nákupu robotů. Návratnost investice je v závislosti na různých uvažovaných parametrech investice v podniku různá a rovněž důležitost jednotlivých kritérií se může lišit.

- **Výchozí hodnoty pro ekonomické hodnocení**

Při uvažování, zda kolaborativního robota pořídit, či nikoli, musíme posuzovat několik faktorů. Je důležité si stanovit, které jsou pro nás důležité. Některé mohou být méně důležité, případně je lze zcela zanedbat. Mezi ty významné patří např. pořizovací cena robota a osobní náklady zaměstnanců. Kvůli zjednodušení výpočtů nebudeme uvažovat o běžných provozních nákladech, mezi které patří např. nájemné prostor, ani náklady které jsou v obou případech podobné. Dále ve výpočtech není zohledněna případná inflace a nárůst mezd pracovníků, protože je nelze přesně predikovat, proto jsou započítány jako nulové. Jak bylo zmíněno v poslední části kapitoly 6.1, je robot vhodnější pro nakládání. Proto v ekonomickém hodnocení je uvažováno pouze s pořízením robota pro nakládání.

V dalších ekonomických výpočtech je počítáno s průměrnými časy za všechny experimenty nakládky, abychom pokryly možnou různorodost přístupu k montáži na různých pracovištích v praxi. Bylo by samozřejmě možnou volbou konkrétního podniku pracovat s pro něho relevantními hodnotami (např. jedné konkrétní metody nakládky člověkem), zde obecně budeme vycházet z průměrných hodnot času.

Z tabulky 6-13 lze zpozorovat, že při porovnání průměrného času nakládání palet u člověka i robota je zřejmá nevýhoda robota, který je více jak 3,67x pomalejší než člověk. Pokud budeme uvažovat o nahrazení pracovníka uprostřed výrobního procesu při sériové pásové výrobě, lze tuto nevýhodu vyvážit zapojením čtyř robotů paralelně. Každý jeden robot bude zpracovávat každý čtvrtý výrobek. Například z předchozí výrobní operace, která má podobný časový takt, jako je tempo člověka, budou výrobky přicházet střídavě ke každému robotu, respektive si je roboti budou střídavě odebírat. Podobným způsobem bude probíhat i následující výrobní proces. Ten bude zásobován střídavě od každého robota a výrobní proces v původním taktu bude zachován.

Potvrzení toho, že čtyři roboti jsou schopni nahradit pracovníka, při zohlednění povinných přestávek, je uvedeno v následujícím textu. Při poměru 3,67x ve prospěch člověka, povinné přestávky nepovedou ke snížení počtu robotů, ale jsou zmíněny proto, že je třeba s nimi u člověka uvažovat. Dle zákoníku práce 262/2006 Sb. § 88 má zaměstnavatel povinnost poskytnout zaměstnanci přestávku na jídlo a oddech v trvání nejméně 30 minut, proto je ve výpočtech uvažováno s pracovní dobou člověka 7,5 hodiny. Stávající roboti pracují nonstop, respektive při třísměnném provozu 24 hodin oproti 22,5 hodinám člověka. Člověk za svoji tři směny dokáže průměrně přesunout 3516 puků, což se vypočte podělením celkové pracovní doby 22,5 hodiny (=81000 sekund) a průměrného času nakládání 23.04 sekund. Čtyři roboti za

24 hodiny (=86400 sekund) přesunou při času 84.65 sekund 4082 puků. Z porovnání 3516 přesunutých puků člověkem a 4082 přesunutých puků robotem plyne, že čtyři roboti jsou schopni zastoupit operátora při tomto typu operace.

Nyní přejdeme k údajům o konkrétních položkách potřebných pro výpočet návratnosti. Cena kolaborativního robota včetně podstavce je 835 000 CZK bez DPH a cena příslušenství (kamera, zásobníky, SW, další mechanické části, instalace a programování) je 615 000 CZK bez DPH. Celková cena jednoho kolaborativního robota tak činí 1 450 000 CZK bez DPH. Náklady na pracovníka pro výpočet uvažujeme jako jeho super hrubou mzdu - 33 450 CZK za měsíc (vypočteno z hrubé mzdy 25 000 CZK/měsíc). Výše mzdy je uvažována s ohledem na poměrně nenáročný proces nakládky, a tedy nižších nároků na operátora.

Z dokumentace k robotovi plyne jeho průměrná spotřeba elektrické energie 0,5kW. [50] Při využívání jednoho robota v třisměnném provozu, tj. 24 hodin denně, 20 dní v měsíci (uvažujeme ve výpočtu práci v pracovních dnech) vypočteme, že celkové roční náklady na elektrinu spotřebovanou robotem při její ceně 2,5 CZK /kWh budou 7200 CZK / rok. To je celkem 28 800 CZK za rok při plánovaném používání čtyř robotů. Jedná se tedy o 2400 CZK za měsíc. V tabulce 6-15 je uveden souhrn nákladů na pořízení robota, měsíční náklady na elektrickou energii a měsíční osobní náklady na jednoho pracovníka. Jde o základní vstupní hodnoty pro výpočet návratnosti.

Tabulka 6-15: Náklady na robota i operátora (CZK)

| Položka   | Peněžní vyjádření – cena, náklad (CZK) |
|---|--|
| Cena robota   | 835 000                                |
| Cena příslušenství  | 615 000                                |
| Celková cena jednoho robota                               | 1450 000                               |
| Měsíční náklady na el. energii (čtyři roboti – tři směny) | 2 400 / měsíc                          |
| Měsíční náklady na 1 pracovníka                           | 33 450 / měsíc                         |

Následovat bude výpočet doby návratnosti nejprve bez uvažování chybovosti a poté s uvažováním chybovosti.

- **Propočet doby návratnosti investice bez uvažování chybovosti**

Při propočtu doby návratnosti investice a její výhodnosti použijeme metodu propočet doby návratnosti (Pay-off-Periode), kdy o výhodnosti rozhoduje doba amortizace (DA). Jako dobu amortizace označujeme čas, za jak dlouho lze získat z budoucích úspor, případně zisku, zpět pořizovací náklady. Doba amortizace se liší dle směnnosti provozu. Vztah pro výpočet doby návratnosti je následující:

$$DA = \frac{\text{pořizovací náklady}}{\text{zisk (úspora) z investice}} \quad (3)$$

V předchozích odstavcích je vysvětlen důvod zakoupení 4 robotů současně, aby zůstal zachován takt linky. Z tohoto důvodu bude celková výše investice za pořízení robotů 5,8 milionu korun (tedy 1 450 000 CZK x 4 roboti). Nejrychlejší návratnost investovaných 5,8 milionu korun je při třisměnném provozu, kdy úspora každý měsíc za osobní náklady zaměstnanců pracujících na 3 směny činí 100 350 korun po odečtení nákladů na el. energii 2 400 CZK činí celková měsíční úspora 97 950 CZK. Při dosazení těchto čísel do vzorce (3) pro výpočet doby amortizace, který je uveden níže, vyjde doba návratnosti 59,2 měsíce.

$$DA = \frac{5\,800\,000}{97\,950} = 59,2 \text{ měsíců}$$

Při dvousměnné pracovní době by celková měsíční úspora byla 65 300 korun (tedy 66 900 CZK personální náklady – 1600 CZK el. energie při dvousměnném provozu) a návratnost by narostla na 88,8 měsíců. Pokud bychom předpokládali výrobu pouze na jednu směnu, návratnost tří robotů by byla nejdelsí a dosahovala by 177,64 měsíců. Výsledné hodnoty jsou uvedeny v tabulce číslo 6-16 je propočet návratnosti investice dle počet směn.

**Tabulka 6-16: Propočet návratnosti investice dle počtu směn**

| Amortizace nákupu 3 robotů při 3 směnách |               |
|--|---------------|
| Požizovací cena robota                   | 1 450 000 CZK |
| Počet robotů                             | 4             |
| Náklady celkem                           | 5 800 000 CZK |
| Měsíční úspora 1 směna                   | 32 650 Kč     |
| Návratnost 1 směna                       | 177,64 měsíců |
| Měsíční úspora 2 směny                   | 65 300 CZK    |
| Návratnost 2 směny                       | 88,8 měsíců   |
| Měsíční úspora 3 směny                   | 97 950 CZK    |
| Návratnost 3 směny                       | 59,2 měsíců   |

Z výpočtu i tabulky 6-16 výše je zřejmé, že nejvýhodnější varianta s nejrychlejší návratností je při třech směnách. Tehdy je návratnost 59,2 měsíců, tj. 4,93 roků. Pokud bychom úsporu osobních nákladů pracovníků na třech směnách promítly do jednotlivých let, tak jak zobrazuje následující tabulka 6-17, při porovnání pořizovacích nákladů robotů rychle zjistíme dosaženou úsporu a zisk (ztrátu) v prvních šesti letech používání robotů.

**Tabulka 6-17: Znázornění průběhu návratnosti při třisměnném provozu v jednotlivých letech**

| Nákup zařízení       |            |            |            |            |            |           |           |
|----------------------|------------|------------|------------|------------|------------|-----------|-----------|
| rok                  | 0          | 1          | 2          | 3          | 4          | 5         | 6         |
| úspora 3 směny (CZK) | 0          | 1 175 400  | 2 350 800  | 3 526 200  | 4 701 600  | 5 877 000 | 7 052 400 |
| Náklady (CZK)        | 5 800 000  | 5 800 000  | 5 800 000  | 5 800 000  | 5 800 000  | 5 800 000 | 5 800 000 |
| zisk (+) (CZK)       | -5 800 000 | -4 624 600 | -3 449 200 | -2 273 800 | -1 098 400 | 77 000    | 1 252 400 |

- **Propočet doby návratnosti investice při uvažování chybovosti**

Při rozhodování o nahrazení práce člověka robotem je potřeba zohlednit více parametrů. Některé společnosti se zaměřují na ekonomickou návratnost, jinde mohou výměnou vyřešit nedostatek personálních kapacit, nebo významný nárůst mezd. Pokud se započte i cena zmetků vznikající při ruční práci, která může být zanedbatelná nebo naopak výrazná při použití dražšího materiálu, může to při zavedení automatizace značně zrychlit návratnost pořízení robotů, kteří mají nulovou chybovost. Nulová chybovost může celý výrobní proces zrychlit.

V předchozí kapitole je zhodnoceno, jak se vyplatí pořízení robotů v porovnání s průměrnými časy, to bylo však vypočteno bez uvažování chybovosti, která má samozřejmě

také dopad na návratnost. Chybovost byla následujícím způsobem ohodnocena jako náklad na opravení chyby vytvořené člověkem.

Uvažujeme tři ilustrativní varianty ohodnocení nákladů na chybovost:

- 1) systém dokáže rozpoznat, kde je chyba a člověk pouze odebere špatnou barvu puku a umístí správný puk
- 2) systém nedokáže rozpoznat, kde je chyba a člověk musí zkontrolovat každou paletku a následně pokud nalezne chybu, pak odebere špatnou barvu puku a umístí správný puk
- 3) systém nedokáže rozpoznat, kde je chyba a člověk musí zkontrolovat paletku a následně pokud nalezne chybu, pak odebere špatnou barvu puku a umístí správný puk + je vytvořen zmetek v teoretické hodnotě 3 CZK

U první varianty uvažujeme, že vyhledání špatně umístěného puku provede systém – např. na obrazovce bude znázorněno, kde je špatně umístěný puk. Člověk pouze vyjme z pozice špatně umístěný puk a nahradí ho novým. Celá tato oprava pokusným měřením (pokusný náměr - dívání se na obrazovku, odebrání špatně umístěného puku a vložení správného puku) bude trvat 5 sekund, při super hrubé mzdě 33 450 CZK, opravu jedné chyby lze ohodnotit na 0,31 CZK. Nyní je uvažována pouze varianta třisměnného provozu, u níž je návratnost nejnižší. Lidé při třech směnách udělají za celý rok (uvažována průměrná délka operace nakládky) 843 840 ks palet (3516 ks (za 24 hodin) \* 20 pracovních dní v měsíci \* 12 měsíců). Pokud je každá čtyřicátá paleta chybně, tak to znamená, že při ceně 0,31 CZK/chybu jde o roční náklady 6 539,76 CZK.

U druhé varianty musí probíhat kontrola každé paletky, která zabere člověku dodatečné 3 sekundy (výsledek pokusného měření – kontrola barvy puků a podkladové barvy pod puky na paletce). Pokud máme chybu na každé čtyřicáté paletce (chybovost 0,025), musíme přičíst k času kontroly i čas na opravu této chyby. Tedy na jednu chybu celkový čas opravy 5 sekund a čas kontroly jedné paletky je 3 sekundy. Tedy náklady na samotnou opravu chyby budou viz předchozí varianta 6 539,76 CZK za rok. Náklady na kontrolu jedné palety při čase kontroly zmíněných 3 sekund jsou 0,186 CZK na paletu. Tedy při kontrole 843 840 ks palet za rok jsou celkové roční náklady na kontrolu 156 813,6 CZK. Suma těchto nákladů je pak 163 353,36 CZK za rok. Bylo překontrolováno, že čas kontroly a čas na opravu chyby nezpůsobí nárůst počtu operátorů v porovnání se čtyřmi roboty.

Třetí možná varianta pro zmetkovitost vychází z varianty druhé, kdy výchozí roční náklady jsou 163 353,36 CZK. Navíc je však v této variantě započítána i cena zmetku, který již nelze použít a jeho cena je stanovena na 3 CZK (Jedná se o ilustrativní hodnotu, každý podnik by si zvolil hodnotu podle svých konkrétních podmínek např. použitého materiálu). Při chybovosti 0,025 jsou samotné náklady na vytvořené zmetky 63 288 CZK. Celkové náklady na chybovost u této třetí varianty jsou pak 226 641,36 CZK.

V následující tabulce 6-18 je zobrazeno, jak může chybovost ovlivnit roční náklady operace. Nyní je uvažována pouze varianta třisměnného provozu, u níž je návratnost nejnižší.

**Tabulka 6-18: Zmetkovitost – Porovnání variant nákladů na chybovost u člověka v třisměnném provozu při průměrném času nakládání**

| Varianta chybovosti               | Nulové náklady chyby | Var. 1   | Var. 2     | Var. 3     |
|-----------------------------------|----------------------|----------|------------|------------|
| Čas (sekund) / jednou paletu      | 23,04                | 23,04    | 23,04      | 23,04      |
| palet (ks) / (22,5) hodin         | 3516                 | 3516     | 3516       | 3516       |
| Chybovost na měření (nakládka)    | 0,025                | 0,025    | 0,025      | 0,025      |
| Náklady na zmetky / 1 rok (CZK)   | 0                    | 6 539,76 | 163 353,36 | 226 641,36 |
| Náklady na zmetky / 1 měsíc (CZK) | 0                    | 544,98   | 13 612,78  | 18 886,78  |

Celkové náklady u první zvolené varianty jsou 6 539,76 Kč. Ve variantě dvě jsou roční náklady na chybovost 163 353,36 Kč a 226 641,36 Kč jsou celkové roční náklady chybovosti třetí varianty. Vlastní propočet doby návratnosti ovlivněný náklady na chybovost je následující.

Při uvažování chybovosti by se návratnost u třisměnného provozu změnila následujícím způsobem. Stále je uvažována pouze varianta třisměnného provozu, u níž je návratnost nejnižší. Tab. 6-19 uvádí výsledné hodnoty, výpočet probíhá dle stejného principu jako u předchozího propočtu bez uvažování nákladů chybovosti, pouze náklady na chybovost zvýší úsporu v rámci výpočtu návratnosti investice do robotického řešení.

**Tabulka 6-19: Propočet doby návratnosti investice s uvažováním chybovosti**

| Varianta chybovosti  | Nulové náklady chyby | Var. 1    | Var. 2     | Var. 3     |
|--|----------------------|-----------|------------|------------|
| Náklady na pořízení 4 robotů (CZK)                                       | 5 800 000            | 5 800 000 | 5 800 000  | 5 800 000  |
| Původní měsíční úspora 3 směny (mzda, energie)                           | 97 950               | 97 950    | 97 950     | 97 950     |
| Náklady chybovosti / 1 měsíc (CZK) (uvažováno jako úspora robot. řešení) | 0                    | 544,98    | 13 612,78  | 18 886,78  |
| Celková úspora / 1 měsíc (CZK)   | 97 950               | 98 494,98 | 111 562,78 | 116 836,78 |
| Návratnost (měsíc)   | 59,21                | 58,89     | 51,99      | 49,64      |

Při započítání variant chybovosti se doba návratnosti dále sníží. V prvním případě dojde ke snížení z původních 59,21 měsíců na 58,89 měsíce. U druhé varianty se investice do čtyř robotů vrátí za 51,99 měsíce. Při třetí možnosti dojde k úspoře a návratnosti investice již za 49,64 měsíce.

## 6.4 Výsledné vyhodnocení

V této podkapitole bude souhrnně vyhodnoceno měření času, chybovosti a ekonomickému hodnocení. Z toho bude vyvozeno výsledné doporučení, kdy použít robota a kdy lidského operátora.

Z hlediska porovnání doby operace nakládky (probíhalo v rámci měření času operace) u člověka a robota vychází, že v rozmezí 4,2 – 3,1krát je pomalejší robot oproti člověku. V průměru je to 3,7krát. Pokud by jediným kritériem volby, zda zvolit člověka nebo robota pro tuto operaci byl čas operace, potom by jednoznačnou volbou byl člověk.

Obdobně při porovnání času operace vykládky u člověka a robota jsou výsledné hodnoty takové, že v rozmezí 8 krát až 12 krát je pomalejší robot oproti člověku. Pokud by jediných

kritériem volby, zda zvolit člověka nebo robota pro tuto operaci by čas operace, potom by jednoznačnou volbou byl opět člověk.

Druhým sledovaným parametrem při měření v rámci operace byla chybovost. Průměrná chybovost u nakládky u člověka je 0.025 (2,5 %) chyby na každé měření a 0,00125 (0,125 %) každou operaci, u vykládky 0.018 (1,8 %) chyby na každé měření a 0,0009 (0,09 %) na každou operaci. U robota průměrná chybovost je nulová jak u nakládky, tak i vykládky. Zde je vidět, že robot nedělá žádné chyby, ale u člověka se chybovost vyskytuje. Výsledné hodnoty porovnání chybovosti u člověka a robota vychází jednoznačně v neprospěch člověka. Pokud by jediných kritériem volby, zda zvolit člověka nebo robota pro tuto operaci byla chybovost operace, potom by jednoznačnou volbou byl robot.

Z hlediska návratnosti bez uvažování chybovosti by bylo nutné při průměrném času provedení operace člověkem nakládky jej nahradit zakoupením 4 robotů, aby zůstal zachován takt linky. Nejrychlejší návratnost je při třisměnném provozu, kdy vyjde doba návratnosti 59,21 měsíce. Při dvousměnné pracovní době by návratnost narostla na 88,82 měsíců. Pokud bychom předpokládali výrobu pouze na jednu směnu, návratnost tří robotů by byla nejdelší a dosahovala by 177,64 měsíců. Výrobní podniky často hodnotí návratnost projektů do optimalizace výroby do 1 roku, pokud bychom to hodnotili stejným způsobem, zvolen by byl člověk.

Při uvažování jednotlivých variant chybovosti se doba návratnosti dále sníží. Nyní při uvažování pouze třisměnného provozu dojde ke snížení návratnosti z původních 59,21 měsíců na 58,89 měsíce při uvažování situace, že systém dokáže rozpoznat, kde je chyba a člověk pouze odebere špatnou barvu puku a umístí správný puk. U druhé varianty (tedy, že systém nedokáže rozpoznat, kde je chyba a člověk musí zkontrolovat každou paletku a případnou chybu opravit) se investice do čtyř robotů vrátí za 51,99 měsíce. Při třetí možnosti (navíc oproti předchozí variantě přibývají ještě náklady související s vytvořeným zmetkem v teoretické hodnotě 3 CZK) dojde k úspoře a návratnosti investice již za 49,64 měsíce. Podobně jako u předchozího způsobu propočtu návratnosti bez uvažování chybovosti, uvažujeme při výsledném hodnocení návratnost do 1 roku, pokud bychom to hodnotili takovým způsobem, zvolen by byl opět člověk.

Z těchto dílčích závěrů vyplývá, odpověď na otázku kdy je výhodné použít kolaborativního robota a kdy člověka. To je shrnuto v následující tabulce 6-20, kde X v tabulce znamená doporučení, koho zvolit u příslušného parametru.

Tabulka 6-20: Porovnání vhodnosti použití kolaborativního robota a člověka

| <b>Parametr</b>   | <b>Člověk</b> | <b>Kolaborativní robot</b> |
|---|---------------|----------------------------|
| Čas operace nakládky  | X             |                            |
| Čas operace vykládky  | X             |                            |
| Chybovost   |               | X                          |
| Posouzení návratnosti robotů do 1 roku (3 směnný provoz) – neuvažování chybovosti | X             |                            |
| Posouzení návratnosti robotů do 1 roku (3 směnný provoz) – uvažování chybovosti   | X             |                            |



## 7 Závěr

Nasazení kolaborativních robotů do výrobního procesu má několik výhod i nevýhod. To musíme zohlednit při volbě, zda nasadit kolaborativního robota či nikoli. Kolaborativní roboty mohou ulehčit pracovníkovi či operátorovi práci, například při montáži karoserie u auta, což může vést k chronickému poškození páteře u pracovníka. Kolaborativní roboty umožňují výrobcům automatizovat části výrobního procesu, které jsou zdlouhavé a pro pracovníky nudné. Naopak v některých společnostech je důležitá flexibilita výrobních kapacit, kdy rozdílnost výrobků anebo různá výrobní množství v průběhu roku mohou být negativem při zavádění automatizace.

Je důležité vzít v úvahu, že kolaborativní průmyslové roboty pracují pomaleji, ať už kvůli bezpečnosti, anebo jako podpora zaměstnanců v jejich práci. Jako příklad lze uvést kolaborativního robota, který je schopný držet nějakou součást, která je těžká a nehybná v požadované poloze, aby do ní pracovník mohl zašroubovat šrouby. Pracovník se může soustředit na jiné úkoly, které jsou zadané, vytvářet kreativní myšlenky a hodnoty. Inteligence a kognitivní flexibilita jsou lidské vlastnosti. Právě proto jsou kolaborativní roboty nasazovány k tomu, aby vykonávaly opakující se úkoly, kdy ale další změna na výrobní lince je pro kolaborativní roboty náročnější (přizpůsobení pracoviště, naprogramování...), ale pro pracovníka jakákoliv změna na výrobní lince je jednodušší a může se přizpůsobit často téměř okamžitě.

Z výše uvedených výpočtů návratnosti vidíme, že doba může být různě dlouhá a záleží na mnoha faktorech a konkrétním použití robota. Limit pro vyhodnocení, zda je návratnost akceptovatelná, je různý společnost od společnosti, a dokonce i různá v rámci managementu. Rozhodně by však toto porovnání nemělo být jediným kritériem pro zavádění automatizace do firmy. Mezi další faktory je potřeba zahrnout i přínos automatizace stávajícím zaměstnancům, zvýšená efektivita výroby, a v neposlední řadě i lepší kvalita výsledného produktu. Pokud je k otázce automatizace ve firmě přistupováno komplexně a s rozumem, kolaborativní robotika může firmám pomoci získat tolik potřebnou jistotu do budoucích let a nastartovat celou výrobu.

## 8 Seznam použité literatury

- [1] Technologie - ManagementMania.com. [online]. 2011 [cit. 21. 01. 2020]. Dostupné z: <https://managementmania.com/cs/technologie>
- [2] HORÁKOVÁ, Jana. 85 let čapkových robotů a jejich proměn. Digital Library, Faculty of Arts, [online]. Brno, 2006 [cit. 21-01-2020]. Dostupné z: [https://digilib.phil.muni.cz/bitstream/handle/11222.digilib/112355/H\\_Musicologica\\_41-2006-1\\_9.pdf?sequence=1](https://digilib.phil.muni.cz/bitstream/handle/11222.digilib/112355/H_Musicologica_41-2006-1_9.pdf?sequence=1)
- [3] S. Bolmsjö. Industriell robotteknik. Studentlitteratur, Lund, 2 edition, 1992. In Swedish. ISBN 91-44-28512-4
- [4] LORENZO, Sciavico and BRUNO, Siciliano. Modelling and Control of Robot Manipulators. Publisher: Springer London Ltd, 2000. ISBN: 9781852332211
- [5] WESTERLUND Lars. The Extended Arm of Man – A History of the Industrial Robot. Publisher: Informationsförlaget, 2000. ISBN-10: 9177364678, ISBN-13: 978-9177364672
- [6] ZELENÝ, Milan a KOŠTURIÁK, Ján., Průlomové technologie, automatizace a digitalizace [online]. [cit. 23-01-2020]. Dostupné z: <http://www.milanzeleny.com/cs-CZ/stranky/1/-/0/427/prulomove-technologie-automatiza>
- [7] MLÁDEK, Jan, Průmysl 4.0 – Revoluce probíhá, IX. Hospodářská diskuze k tématu roku ČNOPK. Praha: Ministr Průmyslu A Obchodu. [online]. 2015 [cit. 23-01-2020]. Dostupné z: <https://www.businessinfo.cz/app/content/files/dokumenty/Prumysl-4.pdf>
- [8] CAJNAROVÁ, Andrea. Průmyslové revoluce k 4. [online]. [cit. 23-01-2020]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/od-1-prumyslove-revoluce-ke-4\\_32491.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/archiv-technik/od-1-prumyslove-revoluce-ke-4_32491.html)
- [9] MACAULAY, James, BUCKALEW, Lauren and CHUNG, Gina. Internet Of Things In Logistics. Publisher: Represented by Matthias Heutger, Senior Vice President, DHL Customer Solutions & Innovation, 53844 Troisdorf, Germany. [online]. [cit. 23-01-2020]. Dostupné z: <https://discover.dhl.com/content/dam/dhl/downloads/interim/full/dhl-trend-report-internet-of-things.pdf>
- [10] SEDLÁČEK, Karel. Robot a člověk v jednom týmu. [online]. [cit. 23-01-2020]. Dostupné z: [https://www.technickytydenik.cz/rubriky/automatizace-robotizace/robot-a-clovek-v-jednom-tymu\\_42318.html](https://www.technickytydenik.cz/rubriky/automatizace-robotizace/robot-a-clovek-v-jednom-tymu_42318.html)
- [11] MICHAELA, Tejhmanová. Vývoj a výroba nízkonákladového robotu pro interakci s okolím. Brno, 2016. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Radek KNOFLÍČEK, Dr. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/www\\_base/zav\\_prace\\_soubor\\_verejne.php?file\\_id=128290](https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=128290)

- [12] LUBOJACKÝ, Oldřich a kolektiv: Základy robotiky, Skripta VŠST Liberec, 3. upravené vydání, Liberec 1990
- [13] KULHÁNEK, Lukáš. Robotizace linky tepelného zpracování HŽ9. [online]. 2008 [cit. 23-01-2020]. Dostupné z: <http://hdl.handle.net/11012/3348>
- [14] HAVEL, Ivan M. Robotika: úvod do teorie kognitivních robotů. 1. vyd. Praha: SNTL, 1980. 279
- [15] HLAVÁČ, Václav.: Úvod do robotiky, Fakulta elektrotechnická ČVUT. Praha [online] 2017. [cit. 23-01-2020]. Dostupné z: <http://people.ciirc.cvut.cz/~hlavac/TeachPresCz/51Robotika/01UvodRobotika.pdf>
- [16] RUMÍŠEK, Pavel. Automatizace: roboty a manipulátory. Brno [online]. 2003 [cit. 23-01-2020]. Dostupné z: [http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/emm\\_mechanizace\\_a\\_automatizace\\_roboty\\_rumisek.pdf](http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/img/opory/emm_mechanizace_a_automatizace_roboty_rumisek.pdf)
- [17] PISKAČ, Luděk. Průmyslové roboty. 2. přeprac. vyd. Plzeň: Západočeská univerzita, 2004. ISBN 80-7043-278-0
- [18] KOLÍBAL, Zdeněk. Průmyslové roboty I: Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů (PRaM). Brno: skriptum VUT Brno, 1993. 188 s ISBN 80-214-0526-0
- [19] Vachálek, Ján & Takács, Gergely. (2014). Robotika (Robotics). 10.13140/RG.2.1.3042.9522.
- [20] KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. 1. vyd. Brno: VUTUM, 2016. 787 s. ISBN 978-80-214-4828-5.
- [21] BĚLOHOUBEK, P. KOLÍBAL, Z.: Průmyslové roboty IV, Projektování výrobních systémů s PRaM (skriptum VUT Brno, 1993)
- [22] LUBOJACKÝ, O. a kolektiv: Základy robotiky, Skripta VŠST Liberec, 3. upravené vydání, Liberec 1990
- [23] BROUM, T.; POÓR, P.; BASEL, J. Role of Collaborative Robots in Industry 4.0 with Target on Education in Industrial Engineering. Katedra průmyslového inženýrství: Západočeská univerzita Plzeň
- [24] SPONG, M. W., & Vidyasagar, M. (2004). Robot dynamics and control. New York.
- [25] WILEY, ISBN 80-214-0526-0. III, F. B. C. The Main Parts of a Robot. [online]. 2019 [cit. 24-01-2020]. Dostupné z: <https://sciencing.com/main-parts-robot-7403157.html>
- [26] CHLEBNÝ, Jan a kol. Automatizace a automatizační technika: Prostředky automatizační techniky. Brno: Computer Press, 2014. 978-80-251-3747-5.

- [27] Basic Parts of a Robot. [online]. [cit. 24-01-2020]. Dostupné z: [https://www.idc-online.com/technical\\_references/pdfs/electronic\\_engineering/Basic\\_Parts\\_of\\_a\\_Robot.pdf](https://www.idc-online.com/technical_references/pdfs/electronic_engineering/Basic_Parts_of_a_Robot.pdf)
- [28] KOLÍBAL, Zdeněk, KNOFLÍČEK, Radek. Morfologická analýza stavby průmyslových robotů. 1. vydání. Košice: VIENALA, 2000. 185 s. ISBN 80-88922-27-5.
- [29] MICHAL, Staněk. Aplikace průmyslových robotů v oblasti obrábění. Brno, 2009. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce doc. Ing. Radek KNOFLÍČEK, Dr. Dostupné z: [https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp\\_id=20778](https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace?zp_id=20778)
- [30] ŠIŠKA, Lubomír. Montážní stanice s robotem MELFA RV-2AJ. Zlín [online]. 2008 [cit. 24-01-2020]. Dostupné z: <https://theses.cz/id/2etqlu/>
- [31] REPÁK, Tomáš. Trojosé manipulátory. Praha [online]. 2005 [cit. 24-01-2020]. Dostupné z: [https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/e/e9/Dp\\_2005\\_repak\\_tomas.pdf](https://support.dce.felk.cvut.cz/mediawiki/images/e/e9/Dp_2005_repak_tomas.pdf)
- [32] RADIM, Kolaja. Člákové roboty. Brno [online]. 2011 [cit. 25-01-2020]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/30307594.pdf>
- [33] DINWIDDIE, K. Basic Robotics. Boston MA: Cengage Learning. [online]. 2016 [cit. 25-01-2020]. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=2pmaBAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg\\_summary\\_r&cad=0#v=onepage&q&f=false](https://books.google.cz/books?id=2pmaBAAQBAJ&printsec=frontcover&hl=cs&source=gbg_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false)
- [34] ROBOTIQ COBOTS EBOOK. Collaborative Robots Buyer's Guide. [online]. [cit. 06-02-2020]. Dostupné z: <https://neffautomation.com/wp-content/uploads/COBOT-EBOOK-FINAL6.pdf>
- [35] VALDMAN, Tomáš. Implementace kolaborativního robota. Plzeň, 2017. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Vedoucí práce doc. Ing. Michal ŠIMON, Ph.D. Dostupné z: [http://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/26646/1/DP\\_VALDMAN.pdf](http://dspace5.zcu.cz/bitstream/11025/26646/1/DP_VALDMAN.pdf)
- [36] KOUKKARI, T. Collaborative Robotics. Seinäjoen ammattikorkeakoulu. [online]. 2016 [cit. 07-02-2020]. Dostupné z: [https://roboyhd.fi/wpcontent/uploads/2016/12/Timo\\_Koukkari\\_HRC\\_SeAMK.pdf](https://roboyhd.fi/wpcontent/uploads/2016/12/Timo_Koukkari_HRC_SeAMK.pdf)
- [37] Common Collaborative Robot Applications. Universal Robots. [online]. [cit. 07-02-2020]. Dostupné z: <https://info.universal-robots.com/hubfs/Enablers/White%20papers/Common%20Cobot%20Applications.pdf?submissionGuid=9212c11c-4333-4ed1-83db-b812b1bca0d8>
- [38] LUPI, Vergara, L. Collaborative Robots and Ergonomics. Robot Application. Federal University of Santa Catarina, Florianópolis. 2019. Brazil [online]. [cit. 07-02-2020]. Dostupné z:

- [https://www.researchgate.net/publication/331404163\\_Collaborative\\_Robots\\_and\\_Ergonomics](https://www.researchgate.net/publication/331404163_Collaborative_Robots_and_Ergonomics)
- [39] Robotiq, Collaborative Robot, 8th Edition Update. [online]. [cit. 09-02-2020]. Dostupné z: <https://blog.robotiq.com/hubfs/COBOT%20EBOOK%20FINAL.pdf>
- [40] HCR CZECH. Automation. Praha [online]. 2020 [cit. 09-02-2020]. Dostupné z: <https://www.hcr-czech.cz/vyuziti/>
- [41] Market Research Reports, I. World's Top 10 Industrial Robot Manufacturers. Market Research Blog. [online]. 2020 [cit. 16-02-2020]. Dostupné z: <https://www.marketresearchreports.com/blog/2019/05/08/world%E2%80%99s-top-10-industrial-robot-manufacturers>
- [42] FRONĚK, Michael. Využití snímacích systémů v průmyslové automatizaci. Plzeň, 2019. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Vedoucí práce doc. Ing. Michal ŠIMON, Ph.D.
- [43] VAŇKOVÁ, Radka. Top 10 výrobců robotů na světě. Kolik instalovali robotů? Factory Automation. Praha [online]. 2017 [cit. 14-03-2020]. Dostupné z: <https://factoryautomation.cz/top-10-vyrobcu-robotu-na-svete-kolik-instalovali-robotu/>
- [44] YAHYA, Doaa. Problematika 3D tisku pro použití v průmyslové praxi. Plzeň, 2018. Diplomová práce. Západočeská univerzita v Plzni. Fakulta strojní. Katedra průmyslového inženýrství a management. Vedoucí práce doc. Ing. Milan EDL, Ph.D.
- [45] BUREŠ, Marek. Předmět ŘOP- Řízení a organizace práce, ZČU v Plzni, 2019
- [46] SKAŘUPA, Jiří. Průmyslové roboty a manipulátory [online]. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita, [2008] [cit. 21-03-2020]. ISBN 978-80-248-1522-0. Dostupné z: [http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta\\_PRaM.pdf](http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/PRM/Text/Skripta_PRaM.pdf)
- [47] REFA – International Know-how. Seminare, Schulungen, Trainings & Ausbildungen | REFA [online]. Copyright © 2020 [cit. 21. 03. 2020]. Dostupné z: <https://refa.de/en/>
- [48] BUREŠ, Marek. PIVODOVA, Pavlina. Comparison of Time Standardization Methods on the Basis of Real Experiment. Procedia Engineering [online]. 2015, 100, 466-474 [cit. 22-03-2020]. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.01.392. ISSN 18777058. Dostupné z: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1877705815004191>
- [49] RYBYŠAROVÁ, Lenka. Řízení výroby ve společnosti ARCA Chrast s.r.o. Brno, 2011. Bakalářská práce. Mendelova univerzita. Provozně ekonomická fakulta. Vedoucí práce Tomas PYŠNÝ.
- [50] Spolupracující průmyslový robot FANUC CR-7iA a CR-7iA/L – Fanuc. Object moved [online]. [cit. 15. 04. 2020] Dostupné z: <https://www.fanuc.eu/cz/cs/roboty/str%C3%A1nka-filtru-robot%C5%AF/spolupracuj%C3%ADc%C3%AD-roboty/collaborative-cr7ial>


## **Seznam příloh**

Příloha č.1: Příklad vyplněného časového snímku REFA u konkrétního pracovníka

Příloha č.2: Hodnoty výpočtu míry rozptylu u konkrétního pracovníka

## **Příloha č.1**

**Příklad vyplněného časového snímku REFA u konkrétního pracovníka**

| Formulář časového snímku   |                     |                             |                  |                |                       | Schránka č.  |                   |                    |
|--|---------------------|-----------------------------|------------------|----------------|-----------------------|--|-------------------|--------------------|
|  |                     |                             |                  |                |                       | List č: z listu  |                   |                    |
| Pracovní úkol: Nakládání a vykládání palety - člověk   |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
| Zakázka č.   |                     | Množství m pracovní zakázky |                  | Oddělení       |                       | Nákladové středisko  |                   |                    |
| Datum časového snímku<br>19.2.2020   |                     | začátek<br>15:00            | čas<br>Množství  | konec<br>17:30 | čas<br>Množství       | Doba trvání<br>150 minut   |                   |                    |
| Skladba času na jednotku   |                     |                             |                  |                |                       | Čas v minutách   |                   |                    |
| původ  |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
|   |                     |                             |                  |                |                       | Základní čas tg  |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       | Čas na oddech ter Zer = %  |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       | Poměrný čas tv Zv = 8 %  |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       | Ostatní přírážky   |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       | Čas na jednotku te <sub>1</sub>                                  |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       | Te <sub>1</sub> / te <sub>100</sub> / te <sub>1000</sub> v min/h |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       | Přípravný čas tr v min/h   |                   |                    |
| Pracovní postup a pracovní metoda:   |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
| Operátor uchopí prvního puku a pustí posledního puku na různých pět paletu po různých osmi metod: Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem, hlavní ruka po pořadí s více puky, dvě ruce po pořadí s jedním pukem, dvě ruce po pořadí s více puky, hlavní ruka po barvách s jedním pukem, hlavní ruka po barvách s více puky, dvě ruce po barvách s jedním pukem a dvě ruce po barvách s více puky. |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
| Předmět práce (vstup)  | Označení            | Materiál                    | Stav na vstupu   |                |                       | Výkres č.  | Materiál č.       | Rozměry, hmotnosti |
|  |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
| Člověk   | Jméno               | Osobní číslo                | muž              | žena           | věk                   | Doba provádění   |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       | Podobných úkolů  | z koumaného úkolu |                    |
|  | Akram               |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
| Provozní prostředek  | Označení, typ       | Počet                       | Číslo pracoviště |                | Technické údaje, stav |  |                   |                    |
|  | montážní stanoviště |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
|  |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
| Vlivy okolí  |                     |                             |                  |                |                       | Odměňování   |                   |                    |
| Poznámky:  |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
| Jakost výsledku práce  |                     |                             |                  |                |                       |  |                   |                    |
| Zpracoval  | Přezkoušel          |                             |                  | Platnost od    |                       | do   |                   |                    |





Formulář pro plynulou chronometráž

datum: 19.02.2020  
jméno pozorovatele: Akram Rageh  
celkový popis činnosti viz. přední strana

| výrobek, zakázka                     |                | Vykládání palety - člověk         |                | pracoviště linky (popis)          |                | pracoviště linky (popis)       |                | pracoviště linky (popis)              |                | pracoviště linky (popis)           |                | pracoviště linky (popis)           |                | pracoviště linky (popis)        |                | pracoviště linky (popis)        |                |
|--------------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|-----------------------------------|----------------|--------------------------------|----------------|---------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|------------------------------------|----------------|---------------------------------|----------------|---------------------------------|----------------|
| Vykládání 5ti palet                  |                | Vykládání 5ti palet               |                | Vykládání 5ti palet               |                | Vykládání 5ti palet            |                | Vykládání 5ti palet                   |                | Vykládání 5ti palet                |                | Vykládání 5ti palet                |                | Vykládání 5ti palet             |                | Vykládání 5ti palet             |                |
| Hlavní ruka po porádí s jedním pukem |                | Hlavní ruka po porádí s více puky |                | Dvě ruce po porádí s jedním pukem |                | Dvě ruce po porádí s více puky |                | Hlavní ruka po barvách s jedním pukem |                | Hlavní ruka po barvách s více puky |                | Dvě ruce po barvách s jedním pukem |                | Dvě ruce po barvách s více puky |                | Dvě ruce po barvách s více puky |                |
| MB<br>začátek                        |                | MB<br>začátek                     |                | MB<br>začátek                     |                | MB<br>začátek                  |                | MB<br>začátek                         |                | MB<br>začátek                      |                | MB<br>začátek                      |                | MB<br>začátek                   |                | MB<br>začátek                   |                |
| MB<br>konec                          |                | MB<br>konec                       |                | MB<br>konec                       |                | MB<br>konec                    |                | MB<br>konec                           |                | MB<br>konec                        |                | MB<br>konec                        |                | MB<br>konec                     |                | MB<br>konec                     |                |
| čas                                  | L <sub>p</sub> | čas                               | L <sub>p</sub> | čas                               | L <sub>p</sub> | čas                            | L <sub>p</sub> | čas                                   | L <sub>p</sub> | čas                                | L <sub>p</sub> | čas                                | L <sub>p</sub> | čas                             | L <sub>p</sub> | čas                             | L <sub>p</sub> |
| 1                                    | 38,02          | 1                                 | 26,03          | 1                                 | 30,20          | 1                              | 29,23          | 1                                     | 30,28          | 1                                  | 24,85          | 1                                  | 24,85          | 1                               | 22,57          | 1                               | 20,46          |
| 2                                    | 36,90          | 2                                 | 27,52          | 2                                 | 29,21          | 2                              | 25,61          | 2                                     | 27,60          | 2                                  | 25,35          | 2                                  | 25,35          | 2                               | 23,06          | 2                               | 18,84          |
| 3                                    | 33,50          | 3                                 | 30,16          | 3                                 | 30,24          | 3                              | 27,32          | 3                                     | 29,14          | 3                                  | 24,15          | 3                                  | 24,15          | 3                               | 23,63          | 3                               | 18,19          |
| 4                                    | 33,90          | 4                                 | 27,95          | 4                                 | 29,45          | 4                              | 25,72          | 4                                     | 30,96          | 4                                  | 22,17          | 4                                  | 22,17          | 4                               | 23,14          | 4                               | 19,41          |
| 5                                    | 36,63          | 5                                 | 29,64          | 5                                 | 29,79          | 5                              | 26,58          | 5                                     | 32,36          | 5                                  | 23,22          | 5                                  | 23,22          | 5                               | 22,27          | 5                               | 21,09          |
| 6                                    | 36,48          | 6                                 | 28,99          | 6                                 | 27,85          | 6                              | 31,89          | 6                                     | 29,29          | 6                                  | 24,03          | 6                                  | 24,03          | 6                               | 25,46          | 6                               | 19,94          |
| 7                                    | 33,90          | 7                                 | 28,94          | 7                                 | 24,39          | 7                              | 25,87          | 7                                     | 29,16          | 7                                  | 22,21          | 7                                  | 22,21          | 7                               | 23,94          | 7                               | 17,91          |
| 8                                    | 32,52          | 8                                 | 27,08          | 8                                 | 25,19          | 8                              | 27,64          | 8                                     | 29,64          | 8                                  | 22,43          | 8                                  | 22,43          | 8                               | 23,46          | 8                               | 17,99          |
| 9                                    | 32,61          | 9                                 | 30,32          | 9                                 | 30,17          | 9                              | 30,06          | 9                                     | 32,00          | 9                                  | 22,61          | 9                                  | 22,61          | 9                               | 23,51          | 9                               | 19,51          |
| 10                                   | 32,78          | 10                                | 29,16          | 10                                | 26,60          | 10                             | 29,32          | 10                                    | 29,68          | 10                                 | 23,67          | 10                                 | 23,67          | 10                              | 21,00          | 10                              | 20,83          |
| 11                                   |                | 11                                |                | 11                                |                | 11                             |                | 11                                    |                | 11                                 |                | 11                                 |                | 11                              |                | 11                              |                |
| 12                                   |                | 12                                |                | 12                                |                | 12                             |                | 12                                    |                | 12                                 |                | 12                                 |                | 12                              |                | 12                              |                |
| 13                                   |                | 13                                |                | 13                                |                | 13                             |                | 13                                    |                | 13                                 |                | 13                                 |                | 13                              |                | 13                              |                |
| 14                                   |                | 14                                |                | 14                                |                | 14                             |                | 14                                    |                | 14                                 |                | 14                                 |                | 14                              |                | 14                              |                |
| 15                                   |                | 15                                |                | 15                                |                | 15                             |                | 15                                    |                | 15                                 |                | 15                                 |                | 15                              |                | 15                              |                |
| 16                                   |                | 16                                |                | 16                                |                | 16                             |                | 16                                    |                | 16                                 |                | 16                                 |                | 16                              |                | 16                              |                |
| 17                                   |                | 17                                |                | 17                                |                | 17                             |                | 17                                    |                | 17                                 |                | 17                                 |                | 17                              |                | 17                              |                |
| 18                                   |                | 18                                |                | 18                                |                | 18                             |                | 18                                    |                | 18                                 |                | 18                                 |                | 18                              |                | 18                              |                |
| 19                                   |                | 19                                |                | 19                                |                | 19                             |                | 19                                    |                | 19                                 |                | 19                                 |                | 19                              |                | 19                              |                |
| 20                                   |                | 20                                |                | 20                                |                | 20                             |                | 20                                    |                | 20                                 |                | 20                                 |                | 20                              |                | 20                              |                |
| lg                                   | 34,72          | lg                                | 28,58          | lg                                | 28,31          | lg                             | 28,12          | lg                                    | 30,01          | lg                                 | 23,47          | lg                                 | 23,20          | lg                              | 23,20          | lg                              | 19,42          |
| te                                   |                | te                                |                | te                                |                | te                             |                | te                                    |                | te                                 |                | te                                 |                | te                              |                | te                              |                |

## **Příloha č.2**

**Hodnoty výpočtu míry rozptylu u konkrétního pracovníka**

| Nakládání 5ti palet            |          |          |
|--------------------------------|----------|----------|
| Dvě ruce po pořadí s více puky |          |          |
| TZ                             |          | Vzorec   |
| 1                              | 28,06    | 26,355   |
| 2                              | 22,84    | 26,355   |
| 3                              | 27,04    | 26,355   |
| 4                              | 27,84    | 26,355   |
| 5                              | 25,91    | 26,355   |
| 6                              | 24,65    | 26,355   |
| 7                              | 24,73    | 26,355   |
| 8                              | 26,22    | 26,355   |
| 9                              | 29,75    | 26,355   |
| 10                             | 26,51    | 26,355   |
| suma                           |          | 35,25065 |
| S=                             | 1,979    |          |
| CV=                            | 7,509    |          |
| E=                             | 4,654311 |          |

| Nakládání 5ti palet             |        |         |
|---------------------------------|--------|---------|
| Dvě ruce po barvách s více puky |        |         |
| TZ                              |        | Vzorec  |
| 1                               | 21,00  | 20,895  |
| 2                               | 21,80  | 20,895  |
| 3                               | 21,07  | 20,895  |
| 4                               | 22,20  | 20,895  |
| 5                               | 20,81  | 20,895  |
| 6                               | 19,80  | 20,895  |
| 7                               | 19,97  | 20,895  |
| 8                               | 19,74  | 20,895  |
| 9                               | 20,60  | 20,895  |
| 10                              | 21,96  | 20,895  |
| suma                            |        | 7,18085 |
| S=                              | 0,893  |         |
| CV=                             | 4,275  |         |
| E=                              | 2,6496 |         |

| Nakládání 5ti palet               |          |         |
|-----------------------------------|----------|---------|
| Dvě ruce po pořadí s jedním pukem |          |         |
| TZ                                |          | Vzorec  |
| 1                                 | 24,10    | 24,708  |
| 2                                 | 26,27    | 24,708  |
| 3                                 | 24,67    | 24,708  |
| 4                                 | 25,15    | 24,708  |
| 5                                 | 25,85    | 24,708  |
| 6                                 | 24,60    | 24,708  |
| 7                                 | 23,09    | 24,708  |
| 8                                 | 24,01    | 24,708  |
| 9                                 | 25,15    | 24,708  |
| 10                                | 24,19    | 24,708  |
| suma                              |          | 7,89096 |
| S=                                | 0,936    |         |
| CV=                               | 3,790    |         |
| E=                                | 2,348887 |         |

| Nakládání 5ti palet                |          |          |
|------------------------------------|----------|----------|
| Dvě ruce po barvách s jedním pukem |          |          |
| TZ                                 |          | Vzorec   |
| 1                                  | 21,20    | 21,917   |
| 2                                  | 21,34    | 21,917   |
| 3                                  | 21,43    | 21,917   |
| 4                                  | 24,03    | 21,917   |
| 5                                  | 20,97    | 21,917   |
| 6                                  | 21,64    | 21,917   |
| 7                                  | 24,23    | 21,917   |
| 8                                  | 23,57    | 21,917   |
| 9                                  | 20,83    | 21,917   |
| 10                                 | 19,93    | 21,917   |
| suma                               |          | 19,73461 |
| S=                                 | 1,481    |          |
| CV=                                | 6,756    |          |
| E=                                 | 4,187627 |          |

| Nakládání 5ti palet               |          |          |
|-----------------------------------|----------|----------|
| Hlavní ruka po pořadí s více puky |          |          |
| TZ                                |          | Vzorec   |
| 1                                 | 27,54    | 28,656   |
| 2                                 | 27,43    | 28,656   |
| 3                                 | 28,81    | 28,656   |
| 4                                 | 27,71    | 28,656   |
| 5                                 | 31,58    | 28,656   |
| 6                                 | 28,46    | 28,656   |
| 7                                 | 28,43    | 28,656   |
| 8                                 | 27,58    | 28,656   |
| 9                                 | 30,30    | 28,656   |
| 10                                | 28,72    | 28,656   |
| suma                              |          | 16,17104 |
| S=                                | 1,340    |          |
| CV=                               | 4,678    |          |
| E=                                | 2,899267 |          |

| Nakládání 5ti palet                |          |          |
|------------------------------------|----------|----------|
| Hlavní ruka po barvách s více puky |          |          |
| TZ                                 |          | Vzorec   |
| 1                                  | 28,44    | 24,962   |
| 2                                  | 24,45    | 24,962   |
| 3                                  | 23,95    | 24,962   |
| 4                                  | 25,15    | 24,962   |
| 5                                  | 25,23    | 24,962   |
| 6                                  | 24,92    | 24,962   |
| 7                                  | 26,11    | 24,962   |
| 8                                  | 23,44    | 24,962   |
| 9                                  | 25,06    | 24,962   |
| 10                                 | 22,87    | 24,962   |
| suma                               |          | 21,51216 |
| S=                                 | 1,546    |          |
| CV=                                | 6,194    |          |
| E=                                 | 3,838817 |          |

| Nakládání 5ti palet                  |         |          |
|--------------------------------------|---------|----------|
| Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |         |          |
| TZ                                   |         | Vzorec   |
| 1                                    | 28,76   | 29,688   |
| 2                                    | 30,99   | 29,688   |
| 3                                    | 27,55   | 29,688   |
| 4                                    | 28,46   | 29,688   |
| 5                                    | 29,63   | 29,688   |
| 6                                    | 29,40   | 29,688   |
| 7                                    | 28,83   | 29,688   |
| 8                                    | 33,28   | 29,688   |
| 9                                    | 28,52   | 29,688   |
| 10                                   | 31,46   | 29,688   |
| suma                                 |         | 26,86456 |
| S=                                   | 1,728   |          |
| CV=                                  | 5,820   |          |
| E=                                   | 3,60698 |          |

| Nakládání 5ti palet                   |          |         |
|---------------------------------------|----------|---------|
| Hlavní ruka po barvách s jedním pukem |          |         |
| TZ                                    |          | Vzorec  |
| 1                                     | 28,29    | 27,924  |
| 2                                     | 28,32    | 27,924  |
| 3                                     | 29,25    | 27,924  |
| 4                                     | 27,57    | 27,924  |
| 5                                     | 28,60    | 27,924  |
| 6                                     | 27,52    | 27,924  |
| 7                                     | 27,77    | 27,924  |
| 8                                     | 27,49    | 27,924  |
| 9                                     | 26,72    | 27,924  |
| 10                                    | 27,71    | 27,924  |
| suma                                  |          | 4,50204 |
| S=                                    | 0,707    |         |
| CV=                                   | 2,533    |         |
| E=                                    | 1,569863 |         |

| Vykládání 5ti palet            |          |           |
|--------------------------------|----------|-----------|
| Dvě ruce po pořadí s více puky |          |           |
| TZ                             | 28,124   | Vzorec    |
| 1                              | 29,23    | 1,223236  |
| 2                              | 25,61    | 6,320196  |
| 3                              | 27,32    | 0,646416  |
| 4                              | 25,72    | 5,779216  |
| 5                              | 28,58    | 0,207936  |
| 6                              | 31,89    | 14,18276  |
| 7                              | 25,87    | 28,124    |
| 8                              | 27,64    | 5,080516  |
| 9                              | 30,06    | 0,234256  |
| 10                             | 29,32    | 3,748096  |
| suma                           |          | 1,430416  |
| suma                           |          | 38,853304 |
| S=                             | 2,078    |           |
| CV=                            | 7,388    |           |
| E=                             | 4,578996 |           |

| Vykládání 5ti palet             |          |          |
|---------------------------------|----------|----------|
| Dvě ruce po barvách s více puky |          |          |
| TZ                              | 19,417   | Vzorec   |
| 1                               | 20,46    | 1,087849 |
| 2                               | 18,84    | 0,332929 |
| 3                               | 18,19    | 1,505529 |
| 4                               | 19,41    | 4,9E-05  |
| 5                               | 21,09    | 2,798929 |
| 6                               | 19,94    | 0,273529 |
| 7                               | 17,91    | 2,271049 |
| 8                               | 17,99    | 2,036329 |
| 9                               | 19,51    | 0,008649 |
| 10                              | 20,83    | 1,996569 |
| suma                            |          | 12,31141 |
| S=                              | 1,170    |          |
| CV=                             | 6,024    |          |
| E=                              | 3,733418 |          |

| Vykládání 5ti palet               |          |          |
|-----------------------------------|----------|----------|
| Dvě ruce po pořadí s jedním pukem |          |          |
| TZ                                | 28,309   | Vzorec   |
| 1                                 | 30,20    | 3,575881 |
| 2                                 | 29,21    | 0,811801 |
| 3                                 | 30,24    | 3,728761 |
| 4                                 | 29,45    | 1,301881 |
| 5                                 | 29,79    | 2,193361 |
| 6                                 | 27,85    | 0,210681 |
| 7                                 | 24,39    | 28,309   |
| 8                                 | 25,19    | 15,35856 |
| 9                                 | 30,17    | 9,728161 |
| 10                                | 26,60    | 3,463321 |
| suma                              |          | 2,920681 |
| suma                              |          | 43,29309 |
| S=                                | 2,193    |          |
| CV=                               | 7,748    |          |
| E=                                | 4,801972 |          |

| Vykládání 5ti palet                |         |          |
|------------------------------------|---------|----------|
| Dvě ruce po barvách s jedním pukem |         |          |
| TZ                                 | 23,204  | Vzorec   |
| 1                                  | 22,57   | 0,401956 |
| 2                                  | 23,06   | 0,020736 |
| 3                                  | 23,63   | 0,181476 |
| 4                                  | 23,14   | 0,004096 |
| 5                                  | 22,27   | 0,872356 |
| 6                                  | 25,46   | 5,089536 |
| 7                                  | 23,94   | 0,541696 |
| 8                                  | 23,46   | 0,065536 |
| 9                                  | 23,51   | 0,093636 |
| 10                                 | 21,00   | 4,857616 |
| suma                               |         | 12,12864 |
| S=                                 | 1,161   |          |
| CV=                                | 5,003   |          |
| E=                                 | 3,10083 |          |

| Vykládání 5ti palet               |          |          |
|-----------------------------------|----------|----------|
| Hlavní ruka po pořadí s více puky |          |          |
| TZ                                | 28,579   | Vzorec   |
| 1                                 | 26,03    | 6,497401 |
| 2                                 | 27,52    | 1,121481 |
| 3                                 | 30,16    | 2,499561 |
| 4                                 | 27,95    | 0,395641 |
| 5                                 | 29,64    | 1,125721 |
| 6                                 | 28,99    | 0,168921 |
| 7                                 | 28,94    | 0,130321 |
| 8                                 | 27,08    | 2,47001  |
| 9                                 | 30,32    | 3,031081 |
| 10                                | 29,16    | 0,337561 |
| suma                              |          | 17,55469 |
| S=                                | 1,397    |          |
| CV=                               | 4,887    |          |
| E=                                | 3,028896 |          |

| Vykládání 5ti palet                |          |          |
|------------------------------------|----------|----------|
| Hlavní ruka po barvách s více puky |          |          |
| TZ                                 | 23,469   | Vzorec   |
| 1                                  | 24,85    | 1,907161 |
| 2                                  | 25,35    | 3,538161 |
| 3                                  | 24,15    | 0,463761 |
| 4                                  | 22,17    | 1,687401 |
| 5                                  | 23,22    | 0,062001 |
| 6                                  | 24,03    | 0,314721 |
| 7                                  | 22,21    | 1,585081 |
| 8                                  | 22,43    | 1,079521 |
| 9                                  | 22,61    | 0,737881 |
| 10                                 | 23,67    | 0,040401 |
| suma                               |          | 11,41609 |
| S=                                 | 1,126    |          |
| CV=                                | 4,799    |          |
| E=                                 | 2,974397 |          |

| Vykládání 5ti palet                  |          |           |
|--------------------------------------|----------|-----------|
| Hlavní ruka po pořadí s jedním pukem |          |           |
| TZ                                   | 34,724   | Vzorec    |
| 1                                    | 38,02    | 10,863616 |
| 2                                    | 36,90    | 4,734976  |
| 3                                    | 33,50    | 1,498176  |
| 4                                    | 33,90    | 0,678976  |
| 5                                    | 36,63    | 3,632836  |
| 6                                    | 36,48    | 3,083536  |
| 7                                    | 33,90    | 0,678976  |
| 8                                    | 32,52    | 4,857616  |
| 9                                    | 32,61    | 4,468996  |
| 10                                   | 32,78    | 3,779136  |
| suma                                 |          | 38,27684  |
| S=                                   | 2,062    |           |
| CV=                                  | 5,939    |           |
| E=                                   | 3,681062 |           |

| Vykládání 5ti palet                   |          |          |
|---------------------------------------|----------|----------|
| Hlavní ruka po barvách s jedním pukem |          |          |
| TZ                                    | 30,011   | Vzorec   |
| 1                                     | 30,28    | 0,072361 |
| 2                                     | 27,60    | 5,812921 |
| 3                                     | 29,14    | 0,758641 |
| 4                                     | 30,96    | 0,900601 |
| 5                                     | 32,36    | 5,517801 |
| 6                                     | 29,29    | 0,519841 |
| 7                                     | 29,16    | 0,724201 |
| 8                                     | 29,64    | 0,137641 |
| 9                                     | 32,00    | 3,956121 |
| 10                                    | 29,68    | 0,109561 |
| suma                                  |          | 18,50969 |
| S=                                    | 1,434    |          |
| CV=                                   | 4,779    |          |
| E=                                    | 2,961788 |          |

