

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická

Katedra řídicí techniky  
Obor: Kybernetika a robotika



# Návrh procesu inspekce dílu kolaborativním robotem

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Vypracoval: Viktor Nweke  
Vedoucí práce: Ing. Michal Vegracht  
Rok: 2024



## I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Nweke** Jméno: **Viktor** Osobní číslo: **492350**  
Fakulta/ústav: **Fakulta elektrotechnická**  
Zadávající katedra/ústav: **Katedra řídicí techniky**  
Studijní program: **Kybernetika a robotika**

## II. ÚDAJE K DIPLOMOVÉ PRÁCI

Název diplomové práce:

**Návrh procesu inspekce dílu kolaborativním robotem**

Název diplomové práce anglicky:

**Collaborative robot part inspection process design**

Pokyny pro vypracování:

1. Proveďte analýzu realizace pracoviště s kolaborativními roboty.
2. Seznamte se s doporučeným softwarem pro simulaci.
3. Navrhněte a simulujte virtuální pracoviště zaměřené na inspekci určeného dílu.
4. Navrhněte řídicí aplikaci kolaborativního robota.
5. Proveďte zhodnocení návratnosti investice do kolaborativního robota pro dané pracoviště.
6. Ověřte fungování simulace a řídicí aplikace.

Seznam doporučené literatury:

- [1] Asad Sherwani, M. M., F. Sherwani, and B. S. K. K. Ibrahim. "Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0)." In: 2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST) 1 (2020), s. 1–5. doi: 10.1109/ICETST49965.2020.9080724. Citováno 13. prosince 2023.
- [2] "Lexium Cobot." Schneider Electric. Citováno 13. prosince 2023.  
<https://www.se.com/cz/cs/product-range/131604407-lexium-cobot/?preferredCountry=yes#documents>
- [3] ISO/TS 15066. [Online]. Dostupné z: [https://www.diag.uniroma1.it/deluca/pHRI\\_elective/ISO\\_TS\\_15066\\_2016\\_en.pdf](https://www.diag.uniroma1.it/deluca/pHRI_elective/ISO_TS_15066_2016_en.pdf). Citováno 13. prosince 2023.

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) diplomové práce:

**Ing. Michal Vegricht Schneider Electric CZ, s.r.o. , U Trezorky 921, 158 00 Praha 5**

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) diplomové práce:

**Ing. Martin Hlinovský, Ph.D. katedra řídicí techniky FEL**

Datum zadání diplomové práce: **25.01.2024**

Termín odevzdání diplomové práce: **24.05.2024**

Platnost zadání diplomové práce:

**do konce letního semestru 2024/2025**

Ing. Michal Vegricht  
podpis vedoucí(ho) práce

prof. Ing. Michael Šebek, DrSc.  
podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry

prof. Mgr. Petr Páta, Ph.D.  
podpis děkana(ky)

## III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Diplomant bere na vědomí, že je povinen vypracovat diplomovou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v diplomové práci.

\_\_\_\_\_  
Datum převzetí zadání

\_\_\_\_\_  
Podpis studenta

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

V Praze dne .....

.....

Viktor Nweke

## **Poděkování**

Děkuji Ing. Michalu Vegrichtovi za vedení mé diplomové práce a za cenné rady, které ji obohatily. Dále děkuji školnímu garantovi mé práce Ing. Martinu Hlinovskému za spolupráci na formálních záležitostech.

Viktor Nweke

# Abstrakt

Tato práce se zabývá integrací kolaborativních robotů (kobotů) do procesu kontroly montáže v průmyslovém prostředí s využitím inovativního přístupu digitálního dvojčete. Výzkum se zaměřuje na návrh a vývoj modelu digitálního dvojčete, který simuluje operace kobotů ve virtuálním prostředí před jejich fyzickým nasazením. Tato preventivní simulace pomáhá identifikovat chyby v návrhu, vyhodnocovat efektivitu provozu a předvídat potenciální problémy, čímž se zlepšuje strategické plánování a přidělování zdrojů.

Práce představuje podrobnou analýzu nezbytných technologických komponent, včetně softwarových nástrojů, simulačních platforem a komunikačních protokolů, které jsou rozhodující pro úspěšnou integraci digitálního dvojčete do stávajícího výrobního systému. Prostřednictvím důkladné teoretické a empirické analýzy hodnotí tato práce ekonomickou životaschopnost implementace kobotů s důrazem na návratnost investice na základě empirických dat.

Zjištění této studie nejen zdůrazňují ekonomické přínosy a zvýšenou provozní efektivitu kobotů, ale zabývají se také širšími důsledky pro produktivitu a technologické inovace v této oblasti. Tato práce vytváří základní rámec pro budoucí výzkum a praktické aplikace digitálních dvojčat v kolaborativní robotice a připravuje půdu pro informovanější a efektivnější integrační strategie v moderních výrobních prostředích.

**Klíčová slova:** kolaborativní robotika, digitální dvojče, kontrola montáže, průmyslová automatizace, simulace, modelování, efektivita provozu, návratnost investice, bezpečnostní normy

# Abstract

This thesis explores the integration of collaborative robots (cobots) in the assembly inspection process within an industrial setting, utilizing the innovative approach of a digital twin. The research focuses on the design and development of a digital twin model that simulates cobot operations in a virtual environment before physical deployment. This preemptive simulation aids in identifying design errors, assessing operational efficiency, and foreseeing potential issues, thereby enhancing strategic planning and resource allocation.

The thesis presents a detailed analysis of the necessary technological components, including software tools, simulation platforms, and communication protocols critical for the successful integration of the digital twin within the existing manufacturing system. Through rigorous theoretical and empirical analysis, the work evaluates the economic viability of cobot implementation, emphasizing the return on investment based on empirical data and predictive analysis.

Findings from this study not only highlight the economic benefits and increased operational efficiency of cobots but also address broader implications for productivity and technological innovation within the field. This work lays a foundational framework for future research and practical applications of digital twins in collaborative robotics, paving the way for more informed and efficient integration strategies in modern manufacturing environments.

**Keywords:** collaborative robotics, digital twin, assembly inspection, industrial automation, simulation, modeling, operational efficiency, return on investment, safety standards

# Obsah

<b>Seznam obrázků</b>	<b>x</b>
<b>Seznam tabulek</b>	<b>xi</b>
<b>1 Úvod</b>	<b>1</b>
1.1 Motivace . . . . .	1
1.2 Struktura práce . . . . .	1
<b>2 Podrobný rozbor kolaborativní robotiky</b>	<b>3</b>
2.1 Uvedení do problematiky . . . . .	3
2.2 Opodstatnění kolaborativních robotů . . . . .	3
2.3 Historický vývoj . . . . .	4
2.4 Srovnání s tradičními roboty . . . . .	5
2.5 Technologické základy . . . . .	7
2.6 Bezpečnostní standard . . . . .	8
2.7 Ekonomické dopady . . . . .	11
2.8 Aplikace . . . . .	12
2.9 Současnost, budoucnost a výzvy . . . . .	12
<b>3 Sběr požadavků</b>	<b>15</b>
3.1 Analýza zadání . . . . .	15
3.2 Identifikace nepřímých požadavků . . . . .	15
<b>4 Analýza technologií</b>	<b>19</b>
4.1 Hardware . . . . .	19
4.2 Software . . . . .	23
4.3 Komunikační protokoly . . . . .	25
<b>5 Návrh</b>	<b>31</b>
5.1 Propojení komponent . . . . .	31
5.2 Proces inspekce dílů . . . . .	31
5.3 Stavové automaty . . . . .	34
5.4 Rozvržení pracoviště . . . . .	35
5.5 Bezpečnostní prvky pracoviště . . . . .	38
<b>6 Implementace</b>	<b>43</b>
6.1 Propojení komponent . . . . .	43
6.2 Implementace uchopovacího mechanismu . . . . .	47
6.3 Sestavení virtuálního pracoviště . . . . .	48
6.4 Pohybová sekvence kobota . . . . .	52
6.5 Inspekční sekvence kamerového systému . . . . .	54
6.6 Záznam dat . . . . .	54
6.7 Spuštění systému . . . . .	55



<b>7</b>	<b>Výsledky</b>	<b>57</b>
7.1	Testování . . . . .	57
7.2	Analýza návratnosti investice . . . . .	61
<b>8</b>	<b>Závěr</b>	<b>65</b>
	<b>Literatura</b>	<b>67</b>
	<b>Přílohy</b>	<b>71</b>
A	Seznam zkratek . . . . .	71
B	Struktura příložených adresářů s aplikací . . . . .	71

# Seznam obrázků

2.1	Velikost celosvětového trhu s koboty v letech 2020 a 2021 s prognózou na roky 2022 až 2030. [6]	5
2.2	Podíl prodeje tradičních a kolaborativních robotů na celém světě v letech 2018 až 2022 [10]	7
4.1	Logická a pohybová řídicí jednotka - model TM262M35MESS8T	19
4.2	Technologie Lexium Cobot	20
4.3	Uchopovací zařízení 2FG7 od společnosti OnRobot	22
4.4	Uchopovací zařízení PGC-140-50 od společnosti DH Robotics	22
5.1	Schéma zapojení komponent systému	31
5.2	Přehled všech typů dílů	32
5.3	Poloha 1	33
5.4	Poloha 2	33
5.5	Poloha 3	33
5.6	Poloha 4	33
5.7	Místo k uchopení dílu kobotem	33
5.8	Stavový automat hlavního systému	35
5.9	Stavový automat kobota	35
5.10	Současné pracoviště	36
5.11	Půdorys návrhu nového pracoviště	37
5.12	Výkres s rozměry kobota [26]	38
5.13	Zjednodušený model robota	40
5.14	Pohyb, který nepřekročí maximální stanovenou rychlost rotace	41
5.15	Pohyb, který hodnotu překročí	41
6.1	IP adresa virtuálního kontroléru	44
6.2	Nastavení síťových adaptérů	44
6.3	Aktivace přemostění	45
6.4	Připojení ke kontroléru přes Cobot Expert	45
6.5	Záložka Connections	46
6.6	Tabulka možností	46
6.7	Záložka Properties	46
6.8	Modbus slot	46
6.9	Applications Tree	47
6.10	Výběr kobota z katalogu	49
6.11	Nastavení kobota	49
6.12	Výběr gripperu z katalogu	50
6.13	Nastavení gripperu	50
6.14	Výběr podavače z katalogu	50
6.15	Nastavení podavače	50

6.16	Výběr světla z katalogu . . . . .	51
6.17	Nastavení světla . . . . .	51
6.18	Výběr objektu <i>Box</i> . . . . .	52
6.19	Finální vzhled modelovaného pracoviště . . . . .	52
6.20	Nastavení souřadnicových systémů v programu Cobot Expert . . . . .	53
6.21	Nastavení výchozího programu . . . . .	53
6.22	Spuštění programu ME Twin . . . . .	55
6.23	Spuštění programu Machine Expert . . . . .	56
6.24	Spuštění programu Cobot Expert . . . . .	56

## Seznam tabulek

4.1	Přehled verzí Lexium Cobot . . . . .	21
4.2	Porovnání gripperů [28][27] . . . . .	23
4.3	Přehled registrů [33] . . . . .	26
4.4	Přehled operací [33] . . . . .	27
5.1	Přehled referencí . . . . .	32
5.2	Přehled souřadnicových systémů [26] . . . . .	37
5.3	Číselné rozměry kobota [26] . . . . .	38
5.4	Výpočet maximální bezpečné lineární rychlosti . . . . .	42
5.5	Výpočet maximální bezpečné úhlové rychlosti . . . . .	42
6.1	Příklad nastavení IP adres v našem projektu . . . . .	44
6.2	Adresy PLC signálů odpovídající kloubovým aktuátorům . . . . .	49
6.3	Nastavení objektů a signálů . . . . .	51
7.1	Testované signály inspekční sekvence . . . . .	58
7.2	Testované signály uchopovacího systému . . . . .	58
7.3	Testované signály pohybové sekvence . . . . .	59
7.4	Testované signály virtuálního pracoviště . . . . .	59
7.5	Obecné parametry pro výpočet . . . . .	62
7.6	Výpočet návratnosti investice . . . . .	62
7.7	Výpočet návratnosti investice při maximální povolené rychlosti kobota . . . . .	62



# Kapitola 1

## Úvod

Tato diplomová práce se zabývá analytickým návrhem a vývojem digitálního dvojčete pro kolaborativního robota pracujícího v simulovaném průmyslovém prostředí. Hlavním cílem tohoto inovativního systému je pečlivě simulovat proces kontroly montovaných součástí, a tím preventivně vyhodnotit proveditelnost a efektivitu robotické aplikace v reálném výrobním prostředí.

### 1.1 Motivace

Integrace digitálního dvojčete v kolaborativní robotice nabízí v moderním průmyslovém prostředí mimořádné výhody [1]. Digitální dvojče slouží jako virtuální replika konkrétního kolaborativního robota (dále kobot) a umožňuje komplexní hodnocení před nasazením. Tento proaktivní přístup nejenže zmírňuje rizika spojená s přímými investicemi do fyzických kobotů, ale také zlepšuje strategické plánování a přidělování zdrojů.

V tradičních podmínkách může být pořízení fyzických prototypů pro testování nákladné a časově náročné. Technologie digitálního dvojčete tyto problémy obchází tím, že poskytuje vždy dostupnou virtuální reprezentaci kobota. Tato dostupnost umožňuje okamžitou interakci a iterativní testování bez logistické zátěže spojené s fyzickými prototypy.

Digitální dvojče je v ideálním případě pečlivě nakonfigurováno tak, aby odráželo specifické podmínky zamýšleného provozního prostředí. Tato na míru šitá simulace usnadňuje zkoumání různých výrobních scénářů, manipulačních úloh a řídicích procesů bez fyzických omezení. Díky takovému přesnému virtuálnímu modelování může výrobní společnost dosáhnout hlubšího pochopení schopností a omezení kobota, a tím optimalizovat pracovní procesy a zvýšit provozní přesnost.

V kontextu této diplomové práce se zaměřuji na proces inspekce, který je součástí linky Canalis ve výrobních závodech společnosti Schneider Electric v Písku. Navržením digitálního dvojčete přizpůsobeného tomuto konkrétnímu úkolu před samotným nasazením lze eliminovat některé chyby v návrhu, vyhodnotit efektivitu a identifikovat potenciální problémy.

### 1.2 Struktura práce

Diplomová práce je strukturována tak, aby čtenáře metodicky provedla koncepcí, návrhem a praktickým využitím digitálního dvojčete v kolaborativní robo-

tice. Teoretická část práce začíná podrobným přehledem literatury, která poukazuje na vývoj kolaborativní robotiky a klíčovou roli digitálních dvojčat v moderní výrobě. Tento přehled stanoví základní znalosti potřebné pro následné fáze návrhu a simulace.

Po teoretickém výkladu představuje práce podrobnou analýzu konkrétních požadavků na implementaci digitálního dvojčete, odvozených jak z průmyslových norem, tak ze specifických cílů projektu. Tato analýza zahrnuje vyhodnocení softwarových nástrojů, simulačních platforem, komunikačních protokolů a bezpečnostních standardů, které jsou rozhodující pro úspěšnou integraci digitálního dvojčete do stávajícího výrobního systému.

Praktická část práce se rozsáhle zaměřuje na návrh a vývoj stavových automatů, které řídí interakce v simulovaném prostředí a také samotný design pracoviště. Kromě toho jsou podrobně rozebrány bezpečnostní prvky, která jsou nezbytné pro správné fungování kolaborativních robotů.

Závěrečné části práce se zabývají ekonomickými aspekty a hodnotí potenciální návratnost investice na základě výpočtů i empirických dat. Tato komplexní analýza nejen zdůrazňuje ekonomickou životaschopnost implementace kolaborativních robotů, ale také zkoumá širší důsledky pro produktivitu a technologické inovace v této oblasti.

# Kapitola 2

## Podrobný rozbor kolaborativní robotiky

V této kapitole se podíváme na oblast kolaborativní robotiky, bezpečnostní normy a provázanost s průmyslem 4.0.

### 2.1 Uvedení do problematiky

Koboti jsou v poslední době po nástupu čtvrté průmyslové revoluce mimořádně důležití pro oblast výroby a zpracovatelského průmyslu. Vyvinuli se jako jedna z klíčových hnacích sil Průmyslu 4.0 a během posledních několika desetiletí výrazně pokročili. Ve srovnání s průmyslovými roboty nabízejí koboti vyšší flexibilitu, všestrannost a bezpečnost. Jsou totiž navrženi tak, aby vykonávali úkoly společně s lidskou pracovní silou a zároveň sdíleli stejný pracovní prostor jako lidští kolegové, a nabízejí tak větší mobilitu a flexibilitu [2].

Tyto stroje jsou navrženy tak, aby je bylo možné snadno přeprogramovat, a to i pracovníky bez jakéhokoli programátorského vzdělání. Interakce člověka s robotem (Human-Robot Interaction, HRI) poskytuje slibné metody k dosažení vyšší produktivity při snížení výrobních nákladů díky kombinaci rozhodovacích schopností lidí spolu s opakovatelností a silou robotů [2].

### 2.2 Opodstatnění kolaborativních robotů

Dříve se průmysloví roboti používali pouze k automatizaci určitého počtu úkolů, zatímco velká část menších úkolů, které bylo třeba automatizovat, byla velmi opomíjena. To je vlastně jeden z nejvýznamnějších přínosů, které koboti nabízejí. Mohou usnadnit automatizaci a zrychlení malých, dříve ignorovaných úloh, což přispívá k celkové rychlosti zpracování procesu. Za druhé nabízí pomoc lidským protějškům při vykonávání „špinavých, nebezpečných nebo nudných prací“, známých také jako 3D práce (Dirty, Dangerous, Dull) [2].

Další významnou výhodou je, že nepotřebují, aby uživatel nebo operátor měl komplexní programátorské nebo technické vzdělání. Není třeba je explicitně programovat a lze je dokonce naprogramovat pouhým pohybem po určité trajektorii [2].

## 2.3 Historický vývoj

Koncepce kolaborativních robotů neboli kobotů vznikla koncem 90. let 20. století na základě zřetelné potřeby překlenout mezeru mezi plně automatizovanými výrobními systémy a manuálními procesy obsluhovanými lidmi. Michael A. Peshkin a J. Edward Colgate, profesori na Northwestern University, zavedli v roce 1996 termín "kobot", přičemž zdůraznili bezpečnost a přímou interakci mezi člověkem a robotem bez nutnosti ochranných bariér [3].

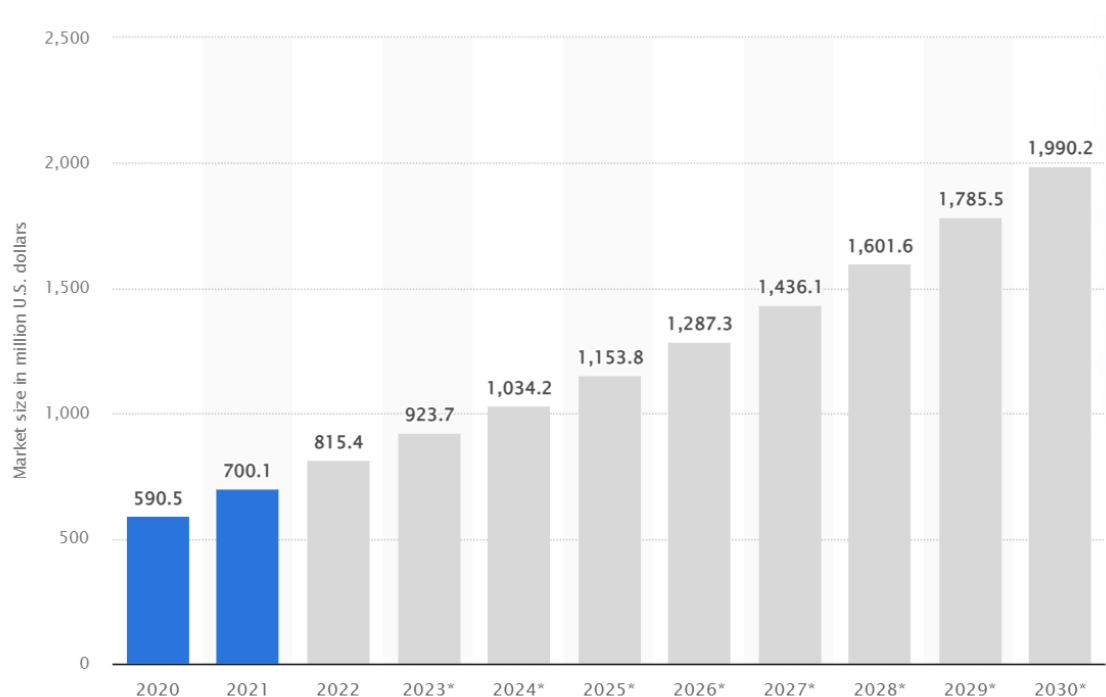
Původně byli koboti koncipováni tak, aby lidskou obsluhu spíše vedli a pomáhali jí, než aby ji nahrazovali, a byli navrženi s inherentními bezpečnostními mechanismy a intuitivními rozhraními. Tato základní filozofie se výrazně liší od tradičních robotických systémů, které se zaměřovaly především na automatizaci a efektivitu, často na úkor flexibility a interakce s člověkem [3].

Vývoj kobotů byl významně ovlivněn pokrokem v oblasti sensorové techniky a umělé inteligence. Tato technologická vylepšení umožnila kobotům provádět složitější úkoly s vyšší přesností a spolehlivostí. Moderní koboti například obsahují pokročilé systémy vidění a hmatové senzory, které jim umožňují vnímat prostředí v reálném čase, přizpůsobovat se změnám a bezpečně spolupracovat s lidskými pracovníky [4].

Integraci kobotů do průmyslového prostředí dále podpořil nástup Průmyslu 4.0, který klade důraz na kyberneticko-fyzikální systémy a internet věcí (IoT). V tomto kontextu jsou koboti nejen nástroji pro fyzické úkoly, ale také uzly ve větší síti inteligentních továren, které přispívají k analýze velkých objemů dat a prediktivní údržbě [5].

Trh s kolaborativními roboty zaznamenal výrazný růst, který by měl podle predikcí pokračovat. Přední výzkumná společnost Next Move Strategy Consulting poukazuje na to, že celosvětový trh s koboty, jehož hodnota v roce 2020 činila přibližně 590,5 milionu amerických dolarů, pravděpodobně výrazně vzroste a do roku 2026 dosáhne téměř dvou miliard amerických dolarů, přičemž předpokládaná složená roční míra růstu v letech 2020 až 2030 činí téměř 12 % (viz obr. 2.1) [6].





**Obrázek 2.1:** Velikost celosvětového trhu s koboty v letech 2020 a 2021 s prognózou na roky 2022 až 2030. [6]

## 2.4 Srovnání s tradičními roboty

Nástup kobotů přinesl změnu paradigmatu v robotice a v několika klíčových aspektech se výrazně liší od tradičních průmyslových robotů. Tato část obsahuje srovnávací analýzu kobotů a tradičních robotů se zaměřením na prostředí jejich nasazení, provozní efektivitu a dlouhodobé přínosy. Nakonec je graficky zobrazen podíl prodeje kobotů oproti tradičním robotům.

### 2.4.1 Prostředí nasazení

#### Tradiční průmysloví roboti

Tradiční roboti jsou obvykle nasazováni ve strukturovaných prostředích, kde je interakce s lidmi omezená, a z bezpečnostních důvodů pracují izolovaně. Tito roboti se často vyskytují ve velkých výrobních prostředích, kde se úkoly opakují a nevyžadují přizpůsobivost [7].

#### Kolaborativní roboti

Koboti jsou navrženi tak, aby pracovali v dynamickém prostředí společně s lidskými pracovníky. Jsou vybaveni pokročilými senzory a bezpečnostními prvky, které jim umožňují přizpůsobit se změnám a bezpečně spolupracovat s lidmi. Díky této všestrannosti jsou koboti vhodní pro širokou škálu průmyslových odvětví, včetně malých a středních podniků, které vyžadují flexibilní výrobní kapacity [8].

## 2.4.2 Provozní efektivita

### Tradiční průmysloví roboti

Tito roboti vynikají v úlohách, které vyžadují vysokou rychlost a přesnost po dlouhou dobu. Jejich konstrukce je optimalizována pro konzistentní výkon při velkoobjemových výrobních úlohách, díky čemuž jsou vysoce efektivní při specifických, neměnných operacích [9].

### Kolaborativní roboti

I když jsou obecně pomalejší než tradiční roboti, přinášejí koboti provozní efektivitu díky své schopnosti přizpůsobovat se a přepínat mezi úkoly bez výrazných prostojů. Jejich snadné programování a nasazení umožňuje rychlé změny ve výrobních procesech, což je výhodné zejména v odvětvích vyžadujících přizpůsobení a malé série [8].

## 2.4.3 Dlouhodobé výhody

### Tradiční průmysloví roboti

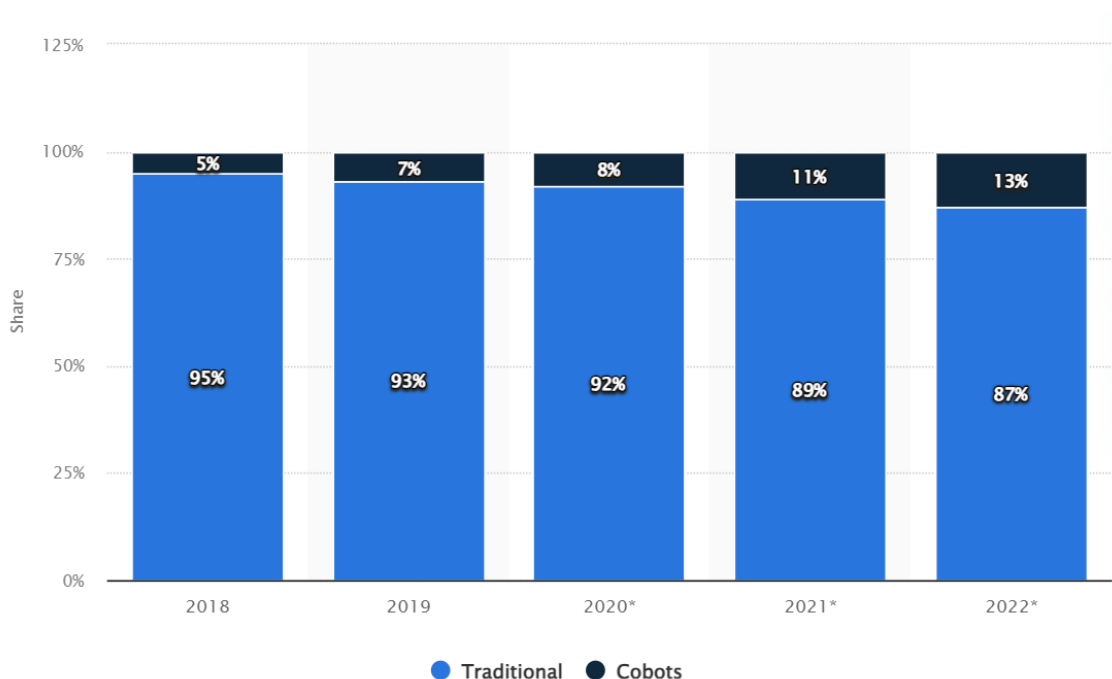
Dlouhodobé přínosy tradičních robotů zahrnují výrazné zvýšení produktivity a snížení nákladů na pracovní sílu v prostředí vhodném pro velkosériovou výrobu s nízkým počtem směsí. Jejich rigidita při nasazení a vysoké počáteční náklady na nastavení však mohou být překážkou pro adaptaci v měnících se tržních podmínkách [4].

### Kolaborativní roboti

Koboti nabízejí dlouhodobou flexibilitu a škálovatelnost, které jsou na rychle se měnících trzích klíčové. Jejich dovednost znásobovat schopnosti pracovní síly a snadno se integrovat do stávajících pracovních postupů, aniž by vytlačovali lidské pracovníky, přispívá k udržitelnému modelu růstu. Jejich nasazení navíc může zlepšit bezpečnost a ergonomii pracoviště, což vede k celkově vyšší spokojenosti a produktivitě práce [8].

## 2.4.4 Podíl na trhu

V roce 2018 tvořili koboti skromný segment širšího robotického průmyslu. Projekce však naznačují slibnou trajektorii růstu tohoto segmentu trhu v nadcházejících letech. Zatímco v roce 2018 představovali pouze pět procent celkového prodeje robotů, jejich podíl na trhu se do roku 2022 více než zdvojnásobil a dosáhl 13 procent (viz obr. 2.2). Tento trend, který bude s velkou pravděpodobností pokračovat (alespoň do jisté saturační úrovně), podtrhuje uznání a přijetí kobotů v různých průmyslových odvětvích [10].



**Obrázek 2.2:** Podíl prodeje tradičních a kolaborativních robotů na celém světě v letech 2018 až 2022 [10]

## 2.5 Technologické základy

Koboti představují významný vývoj v oblasti robotiky, který se vyznačuje jejich schopností pracovat bezpečně a efektivně po boku člověka. Technologie, které zastřešují schopnosti kobotů, jsou multidisciplinární a zahrnují pokrok v oblasti senzorové techniky, řídicích systémů, strojového učení a zpracování dat v reálném čase.

### 2.5.1 Senzory a systémy vnímání

Jádrum funkčnosti kobotů jsou sofistikované senzorové systémy, které umožňují vnímání a uvědomování si prostředí. Koboti jsou obvykle vybaveni řadou senzorů, včetně senzorů síly a točivého momentu, kamer pro vidění a senzorů vzdálenosti. Tyto senzory umožňují kobotům vnímat své okolí, detekovat přítomnost člověka a odpovídajícím způsobem adaptovat své činnosti, aby byla zajištěna bezpečná interakce [11].

Zrakové systémy kobotů často využívají pokročilé algoritmy zpracování obrazu, které zlepšují rozpoznávání objektů a porozumění scéně, což je klíčové pro úlohy vyžadující vysokou přesnost a přizpůsobivost [12].

### 2.5.2 Řídicí systémy

Řídicí systémy kolaborativních robotů jsou navrženy tak, aby byly vysoce citlivé a přizpůsobivé. Na rozdíl od tradičních průmyslových robotů, kteří pracují podle předem definovaných schémat, vyžadují koboti dynamické řídicí architektury, které se mohou přizpůsobit proměnlivému prostředí a úkolům. Tyto systémy obvykle integrují zpětnou vazbu v reálném čase ze senzorů, aby mohly modulovat činnosti na základě okamžitých vstupů z prostředí. Pokročilé řídicí algoritmy, jako je adaptivní

řízení nebo prediktivní řízení, se používají ke zvýšení reaktivity a bezpečnosti kobotů, což jim umožňuje bezproblémově vykonávat složité kolaborativní úkoly vedle lidských pracovníků [4].

### 2.5.3 Strojové učení a umělá inteligence

Strojové učení a umělá inteligence (AI) hrají v rozvoji kobotů klíčovou roli. Techniky umělé inteligence se používají ke zlepšení rozhodovacích schopností kobotů, což jim umožňuje učit se ze zkušeností a provádět úkoly s větší samostatností a efektivitou. Algoritmy strojového učení, zejména ty, které zahrnují posilované učení a učení pod dohledem, se používají k optimalizaci cest a pohybů kobotů pro bezpečnost i efektivitu ve scénářích, které se odehrávají v reálném čase [13].

### 2.5.4 Zpracování dat v reálném čase

Integrace technologií internetu věcí umožňuje kobotům fungovat jako součást propojených systémů v chytrých továrnách. Funkce zpracování dat v reálném čase jsou pro koboty nezbytné, aby mohli synchronizovat své operace s ostatními stroji a lidskými činnostmi v těchto prostředích. To zahrnuje rychlé zpracování a analýzu dat ze senzorů, které umožňují okamžité úpravy operací a zajišťují nepřetržitou a bezpečnou spolupráci [14].

Tyto technologické základy jsou nejen nezbytné pro současnou funkčnost kobotů, ale také připravují půdu pro budoucí pokrok v robotických systémech. S dalším vývojem těchto technologií se pravděpodobně budou rozšiřovat i možnosti kolaborativních robotů, což může vést k širšímu využití a hlubší integraci do průmyslových i neprůmyslových prostředí.

## 2.6 Bezpečnostní standard

Bezpečnost v kolaborativní robotice je zastřešena několika standardy.

- A. **ISO 10218-1** Standard obecné průmyslové robotiky.
- B. **ISO 10218-2** Standard kolaborativní průmyslové robotiky.
- C. **ISO/TS 15066** Technická specifikace kolaborativní robotiky.

Nejvíce směrodatný je dokument ISO/TS 15066. Jedná se o technickou specifikaci, která poskytuje pokyny pro kolaborativní průmyslové robotické systémy. Zaměřuje se na bezpečnostní požadavky na roboty pracující společně s lidmi.

Mezi špičkové společnosti, které provádí kontrolu dodržení parametrů standardu v ČR, patří například společnost SICK [15].

### 2.6.1 Základní pokyny

Zde je shrnutí nejdůležitějších pokynů, které standard uvádí [16]:

- I. **Posouzení rizik:** Proveďte komplexní posouzení rizik, abyste identifikovali potenciální nebezpečí a určili vhodná bezpečnostní opatření.

- II. Bezpečné monitorované zastavení:** Implementujte mechanismus, který robotovi umožní bezpečně zastavit nebo snížit rychlost, když se dostane do kontaktu s člověkem.
- III. Omezení výkonu a síly:** Zajistěte omezení výkonu a síly robota, aby nedošlo k úrazu v případě náhodného kontaktu.
- IV. Vedení rukou:** Umožněte bezpečnou a intuitivní interakci tím, že umožníte člověku řídit pohyby robota pomocí ovládání síly nebo polohy.
- V. Bezpečnostní ovládací zařízení:** Implementujte bezpečnostní řídicí zařízení, jako jsou systémy snímání přítomnosti nebo bezpečnostní rohože, které detekují přítomnost lidí a reagují na ni v pracovním prostoru robota.
- VI. Sledování rychlosti a separace:** Monitorujte rychlost robota a udržujte bezpečnou vzdálenost mezi robotem a lidmi, abyste zabránili kolizím nebo nehodám.
- VII. Školení a informování:** Zajistěte odpovídající školení a informace pro obsluhu a pracovníky údržby o bezpečném používání, údržbě a nouzových postupech souvisejících s robotickým systémem.

## 2.6.2 Režimy provozu

Kolaborativní operace mohou probíhat v jednom z následujících režimů nebo v jejich kombinaci:

### Bezpečnostně sledované zastavení

V této metodě se funkce monitorovaného zastavení robota s bezpečnostním hodnocením používá k zastavení pohybu robota v kolaborativním pracovním prostoru před vstupem operátora do kolaborativního pracovního prostoru za účelem interakce s robotickým systémem a dokončení úkolu (např. naložení dílu na koncový efektor). Pokud se v kolaborativním pracovním prostoru nenachází žádný operátor, robot může pracovat nekolaborativně [16].

### Ruční vedení

Při tomto způsobu ovládání obsluha pomocí ručního zařízení přenáší pohybové povely do robotického systému. Předtím, než je operátorovi umožněno vstoupit do kolaborativního pracovního prostoru a provést úkol ručního vedení, robot dosáhne monitorovaného zastavení s příslušným bezpečnostním stupněm [16].

### Sledování rychlosti a separace

Při tomto způsobu provozu se robotický systém a operátor mohou pohybovat v kolaborativním pracovním prostoru současně. Snížení rizika se dosahuje tím, že se mezi operátorem a robotem neustále udržuje ochranná oddělovací vzdálenost [16].

## Omezení výkonu a síly

Při tomto způsobu provozu může dojít k fyzickému kontaktu mezi robotickým systémem (včetně obrobku) a operátorem, a to buď úmyslně, nebo neúmyslně. Kolaborativní provoz s omezeným výkonem a silou vyžaduje robotické systémy speciálně navržené pro tento konkrétní typ provozu [16].

### 2.6.3 Pasivní a aktivní bezpečnostní opatření

Opatření ke snížení rizik při kvazistatickém a přechodném kontaktu jsou buď pasivní, nebo aktivní povahy. Pasivní bezpečnostní opatření se týkají mechanické konstrukce robotického systému, zatímco aktivní bezpečnostní opatření se týkají konstrukce řízení robotického systému [16].

Mezi metody návrhu pasivní bezpečnosti patří mimo jiné [16]:

1. zvětšení kontaktní plochy:
  - zaoblené hrany a rohy;
  - hladké povrchy;
  - poddajné povrchy;
2. pohlcování energie, prodloužení doby přenosu energie nebo snížení nárazových sil:
  - polstrování, tlumení;
  - deformovatelné součásti;
  - poddajné klouby nebo spoje;
  - omezení pohyblivých hmot.

Mezi metody konstrukce aktivní bezpečnosti patří mimo jiné [16]:

1. omezení sil nebo krouticích momentů;
2. omezení rychlostí pohyblivých částí;
3. omezení hybnosti, mechanického výkonu nebo energie jako funkce hmotností a rychlostí;
4. použití měkké osy s bezpečnostním stupněm a funkce omezení prostoru;
5. monitorované funkce zastavení s bezpečnostním stupněm;
6. snímání k předvídání nebo detekci kontaktu (např. detekce přiblížení nebo kontaktu k omezení kvazistatických sil).

Důležité je zmínit, že pokud na kobota nainstalujeme externí díl (například koncový efektor), který není navržen jako kolaborativní a nesplňuje bezpečnostní standard, pak ani celý systém včetně kobota nesplňuje standard kolaborativní robotiky a musí se považovat za klasického industriálního robota. Cílem by tedy mělo být instalovat externí prvky, které standard splňují, aby mělo smysl o kolaborativním systému uvažovat a abychom mohli využít všechny jeho přednosti [16].

## 2.6.4 Rozdělení fyzického kontaktu mezi člověkem a robotem

### Kvazistatický kontakt

Jedná se o situace, kdy je část těla člověka sevřena mezi pohyblivou částí robotického systému a jinou pevnou nebo pohyblivou částí pracovní buňky. V takové situaci by robotický systém působil tlakem nebo silou na uvězněnou část těla po delší časový interval, dokud by se stav nezmírnil [16].

### Přechodný kontakt

Tento jev se označuje také jako „dynamický náraz“ a popisuje situaci, kdy je část těla osoby zasažena pohyblivou částí robotického systému a může se od robota odrazit nebo stáhnout, aniž by došlo k sevření nebo zachycení kontaktované části těla. Přechodný kontakt závisí na kombinaci setrvačnosti robota, setrvačnosti části těla osoby a relativní rychlosti obou [16].

## 2.7 Ekonomické dopady

Integrace kobotů do různých odvětví, zejména do výroby, nejen změnila provozní pracovní postupy, ale také významně ovlivnila ekonomické výsledky. Tato část zkoumá ekonomický dopad kobotů se zaměřením na nákladovou efektivitu, návratnost investic (ROI) a dynamiku práce v průmyslových aplikacích.

### 2.7.1 Návratnost investic (ROI)

Návratnost investic ze zavedení kobotů může být značná. Koboti přispívají ke zvýšení efektivity výroby, snížení chybovosti a snížení provozních nákladů. Podle zprávy McKinsey Global Institute koboti v ekonomikách s vysokými náklady na pracovní sílu dosahují doby návratnosti kratší než dva roky, což z nich činí atraktivní investice pro společnosti, které chtějí zvýšit svou konkurenceschopnost a produktivitu [17].

### 2.7.2 Dynamika práce

Zavedení kobotů také ovlivňuje dynamiku pracovních sil tím, že spíše rozšiřují možnosti lidských pracovníků, než aby je nahrazovali. Koboti jsou navrženi tak, aby zvládali všední, opakující se nebo fyzicky namáhavé úkoly a umožnili lidským zaměstnancům soustředit se na složitější a kreativnější aspekty výroby. Tato spolupráce může vést k vyšší spokojenosti s prací a snížení počtu úrazů na pracovišti. Kromě toho se očekává, že s tím, jak koboti přebírají více rutinních úkolů, se bude vyvíjet povaha pracovních míst ve výrobě i v dalších odvětvích, což si vyžádá změnu dovedností a přístupů ke školení [18].

### 2.7.3 Dlouhodobé ekonomické dopady

Kromě okamžitých finančních ukazatelů přispívají koboti také k dlouhodobé ekonomické stabilitě a růstu. Díky své flexibilní povaze pomáhají koboti firmám

efektivněji reagovat na požadavky trhu a ekonomické výkyvy. Jejich role při podpoře udržitelných výrobních postupů optimalizací využívání zdrojů a snižováním množství odpadu navíc představuje významný příspěvek k ekonomické odolnosti [19].

## 2.8 Aplikace

Největší podíl na využití kolaborativních robotů má výrobní průmysl. Zejména automobilový průmysl a montážní linky využívají koboty k provádění mnoha úkolů od kompletace, balení a paletizace, svařování, montáže předmětů, manipulace s materiály, kontroly výrobků a mnoha dalších. Mezi další aplikace patří lékařství, humanoidní roboti, exoskeletární systémy a různé vojenské aplikace [2].

Podívejme se na některé z nejčastějších aplikací kobotů ve výrobním průmyslu [2]:

- A. Vychystávání, balení a paletizace položek:** Tyto aplikace se týkají tzv. 3D úloh, jak bylo uvedeno dříve, a patří mezi nejvýznamnější uplatnění kobotů.
- B. Svařování** Druhou významnou aplikací kolaborativních robotů je také svařování. Svařovací koboti mohou být použiti k usnadnění svařování lidským spolupracovníkům podle potřeby. Podobné aplikace mohou zahrnovat obsluhu strojů, lakování a další.
- C. Montáž předmětů:** Koboty lze také použít k pomoci jejich lidským spolupracovníkům při montáži předmětů. Tím se zvyšuje efektivita a přesnost montáže dílů a zároveň je zajištěna ergonomická bezpečnost.
- D. Manipulace s materiály:** Koboti mohou pomoci při zajišťování bezrizikového pracovního prostředí tím, že se postarají o suroviny, které mohou být pro lidskou pracovní sílu nebezpečné nebo škodlivé.
- E. Kontrola výrobků:** Kolaborativní roboti mohou tento monotónní úkol vykonávat s vysokou přesností, aniž by se na rozdíl od svých lidských protějšků vyčerpali nebo nudili.

Celkově lze říci, že používání kobotů přispívá ke zvýšení bezpečnosti a ochrany zdraví lidské pracovní síly, snížení provozních nákladů, zrychlení výrobních cyklů a omezení prostojů [2].

## 2.9 Současnost, budoucnost a výzvy

### 2.9.1 Současný stav

Kolaborativní roboti jsou relativně novou a velmi aktivní oblastí výzkumu. Od samotného vzniku je hlavním cílem výrobců kobotů a výzkumných pracovníků zlepšit hledisko bezpečnosti člověka při interakci člověka s robotem a zároveň zvýšit nosnost robota a zachovat mobilitu a flexibilitu. Mezi hlavní přispěvatele a výrobce v této oblasti patří Universal Robotics, Rethink Robotics, ABB, KUKA, Omron, Schneider Electric, FANUC a mnoho dalších. [2].



## 2.9.2 Budoucí trendy

Oblast kolaborativní robotiky se rychle vyvíjí díky technologickému pokroku a změnám v požadavcích průmyslu. Tato část se zabývá předpokládanými budoucími trendy.

### Zvýšená inteligence a autonomie

Očekává se, že koboti budou stále inteligentnější a autonomnější díky integraci sofistikovaných algoritmů umělé inteligence. Tento pokrok umožní kobotům činit složitější rozhodnutí, přizpůsobovat se měnícímu se prostředí a provádět širší škálu úkolů s minimálním zásahem člověka [8].

### Zlepšení interakce mezi člověkem a robotem (HRI)

Vzhledem k tomu, že jsou koboti na pracovištích stále rozšířenější, bude středem pozornosti zvyšování kvality interakce mezi člověkem a robotem. To zahrnuje zlepšení intuitivnosti uživatelských rozhraní a přirozenější a efektivnější interakce. Výzkumníci se zaměřují na vývoj systémů, které dokáží porozumět lidským činnostem a předvídat je, aby usnadnily hladší spolupráci [20].

### Větší přizpůsobitelnost a škálovatelnost

Budoucí koboti budou nabízet větší možnosti přizpůsobení a škálovatelnosti, což umožní jejich přizpůsobení specifickým potřebám odvětví a snadnou integraci do stávajících systémů. Modulární koboti, které lze přizpůsobit různým úkolům, budou pravděpodobně stále oblíbenější, protože poskytují větší flexibilitu a nákladovou efektivitu [21].

## 2.9.3 Výzvy

Budoucnost kolaborativní robotika slibuje významné zvýšení automatizace a efektivity pracovní síly, ale přináší také výzvy, které je třeba pečlivě zvážit. Aktivní řešení těchto výzev bude klíčem k využití plného potenciálu kobotů a zajištění jejich úspěšné integrace do společnosti a průmyslu.

### Bezpečnost a etika

S rostoucí mírou autonomie kobotů bude zajištění bezpečnosti a řešení etických otázek stále složitější. Vypracování komplexních norem a předpisů, které budou držet krok s technologickým pokrokem, bude mít zásadní význam pro zmírnění rizik spojených s autonomnějšími koboty [22].

### Narušení pracovní síly

Integrace kobotů do pracovní síly bude i nadále narušovat pracovní role a vyžadovat změny v dovednostech pracovníků. Roste potřeba programů rekvalifikace a rozvoje pracovní síly, které zajistí, aby zaměstnanci mohli efektivně pracovat vedle pokročilých robotických systémů a řídit nové technologie [19].

**Technická složitost a údržba**

S nárůstem schopností a funkcí se bude zvyšovat i technická složitost kobotů. To by mohlo představovat výzvu z hlediska údržby, odstraňování problémů a oprav, které vyžadují sofistikovanější technickou podporu a specializované znalosti [4].

# Kapitola 3

## Sběr požadavků

V této kapitole je provedena analýza zadání, na jejímž základě budou definovány požadavky, které bychom měli zohlednit při návrhu aplikace.

### 3.1 Analýza zadání

Požadavky vyplývající ze zadání a z podkladových materiálů linky Canalis od Schneider Electric:

- Základní prvky, které bude pracoviště obsahovat, jsou kamera, kobot, dávkovač se sestavenými díly a odkladná místa na zkontrolované a na vyřazené díly.
- Kobot vezme sestavený díl a polohuje jej před kamerou.
- Pokud je kamerovým systémem díl vyhodnocen jako správně sestavený, je umístěn ke zkontrolovaným výrobkům, v opačném případě je umístěn k vyřazeným.
- Celkově existuje 12 různých variací sestaveného dílu.
- Konkrétní části dílů nutné ke kontrole jsou předem dány, kobot tedy musí díl nastavit do takové polohy, aby byla kamera schopna požadované části sestaveného dílu zkontrolovat.
- Budoucí pracoviště pro kobota je omezeno rozměry, jež jsou dány současným stavem pracoviště.
- Pracoviště musí být navrženo tak, aby při pohybu člověka v bezprostřední blízkosti nemohlo dojít ke zranění.

Z důvodu omezených časových prostředků budeme pracovat pouze s jednou variací sestaveného dílu. Konkrétní podrobnosti k tomuto zjednodušení budou uvedeny v kapitole 5.

### 3.2 Identifikace nepřímých požadavků

Tato část rozebírá dodatečné elementy pracoviště, které mohou nepřímo vyplývat ze základních požadavků.

### 3.2.1 Chapadlo kobota

V rámci realizace projektu se předpokládá použití dvouprstého paralelního uchopovacího systému pro efektivní manipulaci s dvanácti díly podobného typu. Tyto díly, ačkoliv jsou si v základních parametrech podobné, vykazují specifické rozdíly v detailech, které vyžadují pečlivý výběr chapadla. Chapadlo musí být schopné spolehlivě uchopit každý díl a umožnit jeho přesné umístění. Tento proces vyžaduje důkladnou analýzu specifikací jednotlivých dílů a výběr chapadla, které dokáže zaručit vysokou úroveň adaptability a přesnosti. Zároveň by se mělo jednat o kolaborativní uchopovací systém, aby nedošlo k narušení konceptu kolaborativní robotiky.

### 3.2.2 Bezpečnost

Bezpečnostní aspekty při práci s robotem, zejména s kobotem, jsou nezbytné pro zajištění ochrany lidských operátorů. Kobot může operovat bez bezpečnostních bariér za předpokladu, že nejsou k jeho konstrukci připojeny žádné nekolaborativní externí moduly a že se pohybuje v rámci rychlostních limitů stanovených pro bezpečný kolaborativní provoz. Připojení manipulačního chapadla ke kobotovi může tento základní bezpečnostní stav změnit. V závislosti na typu chapadla, ať už kolaborativním či nekolaborativním, mohou být přesto vyžadována další bezpečnostní opatření, jako je instalace fyzických ochranných bariér nebo světelných závor, aby byla zajištěna maximální bezpečnost [16].

Důležité je rovněž strategické umístění tlačítka pro nouzové zastavení, což umožňuje okamžité deaktivování robota v případě potenciálního nebezpečí [16].

### 3.2.3 Kamerový systém

Ačkoliv je návrh kamerového systému nad rámec této diplomové práce, bude zde zmíněno pár poznatků, které mohou souviset s návrhem jiných částí pracoviště, a tudíž je důležité s nimi počítat. Při návrhu a implementaci kamerového systému pro robotické aplikace je zásadní zaměřit se na klíčové aspekty, které zajistí jeho optimální funkčnost a efektivitu při splnění stanovených úkolů. Tyto aspekty zahrnují výběr kamery, optimalizaci osvětlení, výběr softwaru pro zpracování obrazu a integraci celého systému s robotem.

#### Výběr kamery

Základem efektivního kamerového systému je kamera s vysokým rozlišením, schopná zachytit detailní a kvalitní snímky objektů. Rozlišení kamery by mělo být dostatečně vysoké, aby umožňovalo identifikaci i těch nejmenších detailů a potenciálních vad na dílech. Kromě rozlišení je důležitá také schopnost kamery pracovat v různých světelných podmínkách a s různými typy materiálů, což umožňuje flexibilitu v aplikacích [23].

#### Optimalizace osvětlení

Osvětlení hraje klíčovou roli ve schopnosti kamery zachytit detailní a kvalitní snímky. Správná kombinace rozptýleného a strukturovaného světla pomáhá minimalizovat vznik stínů a odlesků na objektech, které by mohly zkreslit analýzu obrazu.

Vyvážení intenzity a směru osvětlení je esenciální pro dosažení konzistentní kvality obrazu při zachování přirozených barev a textur objektů [23].

### **Software pro zpracování obrazu**

Klíčovým prvkem kamerového systému je rovněž software pro zpracování obrazu, který musí být schopen spolehlivě rozlišit mezi různými typy dílů a identifikovat potenciální vady. Software by měl být vybaven pokročilými algoritmy strojového učení nebo umělé inteligence, které umožňují automatizovanou analýzu a klasifikaci obrazů v reálném čase. Kompatibilita softwaru s ostatními komponentami systému a jeho schopnost integrace je nezbytná pro bezproblémový chod [23].

### **Integrace kamerového systému s kobotem**

Závěrečným krokem je integrace kamerového systému s robotem, což zahrnuje propojení hardwaru a softwaru tak, aby bylo možné realizovat spolehlivou a efektivní inspekci. Tato integrace vyžaduje vysokou míru kompatibility mezi kamerovým systémem a robotickým ovládáním, aby bylo možné zajistit přesnou a rychlou reakci robota na základě analýzy obrazu.

K tomuto se nabízí kamerové systémy společnosti Cognex, které jsou dobře integrovatelné se systémy Schneider Electric [24].

#### **3.2.4 Záznam dat**

Zvážit by se měl také proces dokumentace a analýzy získaných dat, který hraje zásadní roli v celkovém procesu kvalitní kontroly a optimalizace výrobních procesů. Systém by měl umožňovat zaznamenávání relevantních kontrolních dat, jejich třídění a generování zpráv. Tato funkčnost je klíčová pro sledování výkonnosti systému, identifikaci oblastí pro zlepšení a zajištění nepřetržité optimalizace procesů. Implementace efektivního systému pro záznam a analýzu dat přispěje k vyšší efektivitě výroby a lepší kvalitě konečných produktů.



# Kapitola 4

## Analýza technologií

V této kapitole se zaměříme na analýzu nástrojů pro implementaci systému, jenž bude vytvářen. Vzhledem k tomu, že je tato diplomová práce vypracována v součinnosti s firmou Schneider Electric, pochází od ní i většina použitého hardwaru a softwaru.

### 4.1 Hardware

Jedinou hardwarovou částí tohoto projektu bude PLC. Zbylá část se bude skládat ze softwaru běžícím na firemním notebooku značky Lenovo. V rámci hardwarových komponent bude pro úplnost uveden i Lexium Cobot, který není v ČR dostupný, a proto bude v tomto projektu zastoupen virtuálním kontrolérem. Dále bude uveden model chapadla, který bude z důvodu absence fyzického robota přidán pouze do simulovaného prostředí jako CAD model.

#### 4.1.1 PLC Modicon M262

Logická a pohybová řídicí jednotka Modicon M262 je nedílnou součástí portfolia průmyslové automatizace společnosti Schneider Electric. Jednotka je navržena tak, aby vyhovovala náročným aplikacím vyžadujícím rychlé a přesné řízení pohybu, čímž zvyšuje produktivitu a zajišťuje vysoce kvalitní výsledky výroby. Slouží jako klíčový prvek při řízení složitých strojních úloh, jako je synchronizovaný pohyb, polohování a provádění automatizovaných procesů [25]. Podoba produktu předvedena na obr. 4.1.



**Obrázek 4.1:** Logická a pohybová řídicí jednotka - model TM262M35MESS8T

Klíčové výhody a vlastnosti [25]:

- **Mimořádná konektivita:** Řídicí jednotka zajišťuje bezpečnou výměnu dat napříč různými komunikačními kanály, od propojení uvnitř zařízení až po širší integrace v rámci výrobních závodů a cloudu.
- **Přesnost v reálném čase:** Jednotka M262 se může pochlubit jednou z nejrychlejších dob cyklu sběrnice pro synchronizované řízení pohybu a je schopna zvládat přesné a vysokorychlostní úlohy:
  - Doba cyklu sběrnice je 1 ms pro synchronizaci v reálném čase.
  - Až 24 synchronizovaných os pro komplexní operace stroje.
- **Vylepšená diagnostika:** Integrovaný WebVisu a diagnostické nástroje zjednodušují procesy uvádění do provozu a údržby.
- **Připojení ke cloudu:** Přímá integrace s cloudovými řešeními, jako je EcoStructure Machine Advisor, rozšiřuje možnosti řídicí jednotky prostřednictvím stávajících cloudových aplikací pomocí rozhraní API.
- **Vestavěná bezpečnost:** M262 obsahuje bezpečnostní logickou řídicí jednotku, která umožňuje splnění SIL 3 a zajišťuje robustní provoz v rámci přísných bezpečnostních parametrů.

### 4.1.2 Lexium Cobot

Lexium Cobot je vysoce efektivní a pokročilý robotický systém společnosti Schneider Electric s technologiemi potřebnými pro snadné provádění složitých úkolů. Jeho podoba je na obr. 4.2. Tyto kolaborativní roboty lze snadno nastavit a jednoduše integrovat do kompletních robotických systémů s více dopravníky, s delta roboty apod. Zahrnují bezpečnostní systémy a certifikace, které jiní roboti nemívají. Po odpovídajícím posouzení rizik a jejich zohlednění mohou spolupracovat s lidmi při vykonávání širokého spektra úkolů [26].



**Obrázek 4.2:** Technologie Lexium Cobot

Kobot je spojen s kontrolérem a jeho programování provádí operátor. Operátoři mohou měnit nastavení i bez potřeby specializovaných odborných znalostí v oblasti robotiky. Konfigurace lze provádět na systémech Windows, Android a iOS. Kobota lze učit přímým ručním vedením nebo klasickým programováním trajektorií. Koboti jsou vybaveni bezpečnostními prvky a nevyžadují oplocení ani jiné průmyslové bezpečnostní vybavení, což dále snižuje náklady a zkracuje dobu integrace. Kontrolér podporuje široký rozsah síťových protokolů kontroléru: TCP/IP, Modbus TCP,



Modbus RTU, ProfiNet, Ethernet/IP. Kobota lze integrovat jak s hardwarovou platformou z portfolia společnosti Schneider Electric tak s PLC/IPC třetích stran. Dále lze kobota jednoduše integrovat se simulačním programem Machine Expert Twin pro vytvoření digitálního dvojčete [26].

Lexium Cobot je poměrně nová technologie a není ještě fyzicky dostupná v České Republice, proto bude mimo jiné projekt demonstrován pouze v simulaci.

V tab. 4.1 můžeme vidět přehled jednotlivých verzí Lexium Cobot. Jelikož potřebujeme v rámci našeho projektu manipulovat s objekty lehčími než 3 kg, zvolíme manipulátor LXMRL03S.

Kobot	LXMRL03S	-05S	-07S	-12S	-18S
Max. náklad (kg)	3	5	7	12	18
Pracovní dosah (mm)	626	954	819	1327	1073
Max. rychlost efektoru (m/s)	1,5	3	2,5	3	3,5
Příkon (W)	150	350	350	500	600

**Tabulka 4.1:** Přehled verzí Lexium Cobot

### 4.1.3 Uchopovací zařízení

V této sekci analyzujeme několik uchopovacích zařízení (gripperů) a rozhodneme, který je nejvhodnější pro naši aplikaci. Kvůli tvaru uchopovaného objektu, se kterým budeme pracovat, zvolíme paralelní dvouprstý gripper. Mezi základní požadavky, které na něj klademe patří:

- **Kompatibilita:** Gripper musí být kompatibilní s kobotem, kterého používáme v rámci našeho projektu.
- **Rozpětí prstů:** Prsty se musí pohybovat v takovém rozmezí, aby byl gripper schopen efektivně uchopit požadovaný objekt – pro nás je to 45 mm.
- **Nosnost:** Gripper musí mít dostatečnou sílu, aby udržel požadovaný objekt. Pro náš případ by to neměl být problém, jelikož manipulované objekty nepřesahují ani 0,5 kg.
- **Certifikace pro kolaborativní práci:** Gripper musí splňovat všechny bezpečnostní standardy definované normou pro kolaborativní práci (viz [16]).
- **Dostupnost digitálního modelu:** Zejména pro náš systém, který bude zpracován výhradně digitálně, je důležité mít možnost integrovat gripper do simulovaného pracoviště akvizicí CAD modelu.

V následující části porovnáme selekci kolaborativních gripperů, které splňují definované podmínky a vybereme ten nejvhodnější. Typ gripperu, který splňuje všechny naše nároky není úplně typický, podařilo se tedy vybrat pouze dva kandidáty.

### OnRobot OnRobot 2FG7

OnRobot 2FG7 je všestranné a snadno použitelné elektrické kolaborativní chapadlo, které nabízí bezproblémovou integraci s různými robotickými systémy. Díky rozpětí 35-73 mm a síle uchopení, kterou lze nastavit až na 140 N, se chapadlo 2FG7 hodí zejména pro aplikace vyžadující jemnou a přesnou manipulaci. Toto chapadlo je navrženo s možností vnitřního i vnějšího uchopení, což mu umožňuje manipulovat s různými velikostmi a tvary předmětů. Díky certifikaci pro čisté prostory a bezpečnosti ESD je ideální pro prostředí, jako je výroba elektroniky, kde je problémem citlivost na statickou elektřinu a pevné částice [27]. Vizualní prezentace produktu je na obr. 4.3.



**Obrázek 4.3:** Uchopovací zařízení 2FG7 od společnosti OnRobot

### DH Robotics PGC-140-50

DH Robotics PGC-140-50 je moderní elektrické kolaborativní paralelní chapadlo určené pro použití v různých průmyslových aplikacích. PGC-140-50 je uznáváno pro svou vysokou úroveň ochrany, je zkonstruováno tak, aby optimálně fungovalo i v náročných podmínkách a může se pochlubit krytím IP67 pro odolnost proti prachu a vodě. Schopnosti tohoto modelu zahrnují uchopovací sílu v rozmezí 40 až 140 N a maximální zatížení 3 kg, díky čemuž je velmi vhodný pro úlohy v odvětvích, jako je automatizace ve zdravotnictví, elektronika a energetika. Jeho integrační funkce, jako je plug & play s většinou značek kolaborativních robotů a nastavitelné parametry uchopení, podtrhují jeho všestrannost a snadné nasazení v komplexních automatizačních sestavách [28]. Vizualní prezentace produktu je na obr. 4.4.



**Obrázek 4.4:** Uchopovací zařízení PGC-140-50 od společnosti DH Robotics

## Souhrn a výběr

V tab. 4.2 vidíme porovnání dvou modelů, bohužel není veřejně dostupná jejich cena, která také může hrát svou roli.

Parametr	2FG7	PGC-140-50
Rozpětí (mm)	35-73	0-50
Opakovatelná přesnost (mm)	$\pm 0,1$	$\pm 0,03$
Uchopovací síla (N)	20-140	40-140
Nosnost (kg)	7	3
Váha (kg)	1,1	1

**Tabulka 4.2:** Porovnání gripperů [28][27]

Pro náš projekt byl zvolen model PGC-140-50 od DH Robotics na základě lepší opakovatelné přesnosti a nižší váhy, která hraje svou roli při určení maximální rychlosti pohybu kobota během návrhu bezpečnostních omezení. Nižší váha znamená menší setrvačnost, tedy vyšší povolenou rychlost, a tudíž větší produktivitu.

## 4.2 Software

V následujících podkapitolách si ukážeme, co nabízí softwarové komponenty, které budou tvořit náš systém.

### 4.2.1 Machine Expert

Software EcoStruxure Machine Expert společnosti Schneider Electric je ucelená vývojová platforma určená pro komplexní projektování strojních systémů. Toto prostředí umožňuje souběžný vývoj, konfiguraci a nasazení logiky stroje, řízení pohybu, systémů vzdálených vstupů a výstupů a souvisejících funkcí síťové automatizace v rámci jediného rozhraní. Podporuje celou řadu programovacích jazyků podle normy IEC 61131-3, což usnadňuje všestranný vývojový proces. Machine Expert integruje pokročilé diagnostické a ladicí nástroje, které umožňují složité zkoumání a doladování operací stroje [29].

Mezi klíčové technické vlastnosti programu Machine Expert patří [29]:

- **Schopnosti více úloh:** Podporuje cyklické a událostmi spouštěné provádění, čímž zvyšuje rychlost odezvy a přizpůsobivost operací stroje.
- **Podpora normy IEC 61131-3:** Podporuje všech pět jazyků definovaných normou (IL, LD, FBD, ST a SFC), což zajišťuje flexibilitu programovacích přístupů.
- **Integrované konfiguratory sběrnice:** Tyto nástroje zjednodušují proces nastavení různých síťových protokolů, jako jsou Modbus, EtherNet/IP a Sercos III, které jsou nezbytné pro připojení stroje.
- **Diagnostické funkce:** Vestavěná diagnostika a funkce sledovatelnosti poskytují v reálném čase přehled o výkonu systému a provozních problémech.

- **Edge Control:** Software dodržuje standardy IIoT a podporuje operace hraničního řízení, které jsou zásadní pro zpracování a manipulaci s daty v reálném čase.

Tento projekt pracuje s verzí Machine Expert 2.2.

### 4.2.2 Cobot Expert

EcoStruxure Cobot Expert je grafický řídicí software společnosti Schneider Electric pro ovládání kolaborativního robota Lexium Cobot. Software poskytuje integrované funkce pro ruční ovládání, implementaci programů, konfiguraci parametrů a monitorování informací robota Lexium Cobot. Cobot Expert nabízí alternativu k těžkopádným ručním programovacím zařízením pro roboty a integruje stejné funkce do softwaru, který lze nainstalovat do mobilních zařízení se systémem Android nebo do počítačů se systémem Windows [26].

Cobot Expert nabízí následující funkce:

- Konfigurace systému, provozu, bezpečnostních funkcí, hardwaru a komunikačních parametrů systému Lexium Cobot.
- Ruční ovládání ramene Lexium Cobot.
- Úprava a nastavení konfigurace I/O systému Lexium Cobot.
- Programování systému Lexium Cobot.
- Zobrazení obecných informací systému Lexium Cobot.

Tento projekt pracuje s verzí Cobot Expert 1.7.0.39.

### 4.2.3 Machine Expert Twin

EcoStruxure Machine Expert Twin (dále ME Twin) je softwarová sada společnosti Schneider Electric pro vytváření digitálních modelů skutečných strojů pro virtuální návrh, virtuální inženýrství a virtuální uvedení do provozu pro agilní vývoj před stavbou fyzického pracoviště - umožňuje tak paralelní projektování mechanických, elektrických a řídicích úloh. ME Twin nabízí intuitivní prostředí s možností přetahování mechatronických komponent, rozhraní pro virtuální (či augmented) realitu a připravené katalogové objekty. Otevřené programovací prostředí v jazyce C# umožňuje doplňky a rozšíření o množství pokročilých modelů, jakož i přizpůsobení zdrojům dat, pracovním postupům a procesům zákazníka [30].

ME Twin nabízí následující funkce [30]:

- Tvorba 3D digitálního dvojčete kompletního stroje pomocí přetahování z předdefinovaných katalogů a mechatronických komponent připravených k použití.
- Import a opětovné použití vlastních mechatronických komponent, vytvořených v programu ME Twin Developer.

- Emulace kompletního stroje s PLC ve smyčce. Možnost kombinování s řídicími a automatizačními systémy Schneider Electric i třetích stran.
- Vytváření a manipulace s plným řízením zátěží ve scéně prostřednictvím programování PLC.
- Zaznamenávání dat do samostatného souboru a možnost zpětného přehrání scény.

Tento projekt pracuje s verzí Machine Expert Twin 2.0.0.

#### 4.2.4 Emulovaný kontrolér kobota

Jak bylo dříve uvedeno, v okamžiku realizace projektu není dostupný žádný model Lexium Cobot ani jeho fyzický kontrolér. Proto bude v tomto projektu figurovat instance kontroléru ve virtuálním prostředí VMWare. Po spuštění lze nechat instanci kontroléru běžet pozadí a ovládat ji pomocí programu Cobot Expert, což bude popsáno v kapitole 6.

Verze použitého kontroléru je 1.7.0\_51\_SE\_X64.

#### 4.2.5 VMWare

VMware je přední společností v oblasti cloud computingu a virtualizačních technologií, která je známá tím, že jako první úspěšně virtualizovala architekturu x86. Její řada softwarových produktů funguje na různých platformách včetně Microsoft Windows, Linux a macOS. Podnikové řešení společnosti VMware, VMware ESXi, je hypervizor nezávislý na operačním systému, který běží na serverovém hardwaru a umožňuje efektivní správu zdrojů a provoz virtuálních počítačů. Akvizice společnosti VMware společností Broadcom Inc. byla dokončena v listopadu 2023, což znamenalo významný milník v historii společnosti [31].

Řešení společnosti VMware pokrývají široké spektrum virtualizačních potřeb. Nabízí hypervizory typu 2, jako jsou VMware Workstation a VMware Fusion, určené pro použití na stolních počítačích, kde umožňují provozovat více operačních systémů na stávajícím hostitelském operačním systému. Pro řešení v podnikovém měřítku poskytuje VMware vSphere robustní virtualizační platformu kombinující hypervizor ESXi a vCenter Server pro správu nasazení virtuálních počítačů [31].

V projektu je použitý VMWare Workstation Player 17.5.1.

### 4.3 Komunikační protokoly

Základním stavebním kamenem projektu zpracovávaného v rámci této diplomové práce jsou komunikační protokoly Modbus TCP a OPC UA, které si následně přiblížíme.

#### 4.3.1 Modbus TCP

Modbus TCP, varianta protokolu Modbus přizpůsobená pro síť TCP/IP, je klíčovým komunikačním protokolem v průmyslovém prostředí, který umožňuje zařízením, jako jsou programovatelné logické automaty (PLC), vzdálené koncové jed-

notky (RTU) a další, komunikovat prostřednictvím sítě. Na rozdíl od svých sériových protějšků Modbus TCP/IP zapouzdřuje rámce Modbus do paketů TCP/IP, což umožňuje komunikaci v sítích Ethernet, které jsou v moderních průmyslových zařízeních všudypřítomné [32].

Protokol Modbus, který v roce 1979 představila společnost Schneider Electric (Modicon), vyniká svou robustností, jednoduchostí a kompatibilitou, což z něj činí základní protokol v oblasti průmyslové automatizace a řídicích systémů. Přizpůsobivost protokolu Modbus TCP moderním síťovým technologiím při zachování základních funkcí protokolu Modbus zajišťuje jeho trvalý význam při usnadňování efektivní a spolehlivé komunikace v různých průmyslových prostředích [32].

### Registry a datové typy

Modbus TCP využívá různé registry a datové typy pro zpracování informací mezi zařízeními. Pro ukládání dat rozlišuje mezi udržovacími a vstupními registry, přičemž udržovací registry umožňují operace čtení i zápisu, zatímco vstupní registry jsou určeny pouze pro čtení (tab. 4.3). Tyto registry mohou obsahovat různé typy dat, včetně logických stavů pro signály zapnuto/vypnuto, 16bitových a 32bitových celých čísel, 32bitových čísel s plovoucí desetinnou čárkou pro desítkovou přesnost a znaků ASCII pro textové informace [33][34].

Označení	Význam
Discrete Input	Jeden bit určený pouze ke čtení. Např. binární vstup.
Coil	Jeden bit, který lze číst i zapisovat. Např. cívka relé, lze ji ovládat i zjišťovat její stav.
Input Register	16bitový registr určený pouze ke čtení. Např. analogový vstup.
Holding Register	16bitový registr, který lze číst i zapisovat. Např. čítač, lze jej nastavit i číst jeho hodnotu.

**Tabulka 4.3:** Přehled registrů [33]

### Schéma adresování

V protokolu Modbus TCP jsou zařízení identifikována pomocí IP adres, což je posun od metody slave ID v sériové verzi, které usnadňují integraci velkého počtu zařízení v rámci sítě. Toto adresování zařízení založené na protokolu IP je spojeno s adresováním registrů, které se řídí nulovým schématem pro přímý přístup k datům v rámci zařízení. (První datový bod v kterékoli z těchto tabulek je tedy adresován jako 0, druhý jako 1 atd. To je důležitý detail pro programování a konfiguraci komunikace Modbus, protože ovlivňuje způsob výpočtu adresy dat, ke kterým chceme přistupovat nebo která chceme upravit.) Adresování využívá funkční kódy pro specifikaci operací, jako je čtení nebo zápis registrů (tab. 4.4) [33].

Kód	Název funkce	Popis
01	Read Coils	Čtení jednoho nebo více bitů
02	Read Discrete Inputs	Čtení jednoho nebo více bitů
03	Read Holding Registers	Čtení jednoho nebo více 16bitových registrů
04	Read Input Registers	Čtení jednoho nebo více 16bitových registrů
05	Write Single Coil	Zápis jednoho bitu
06	Write Single Register	Zápis jednoho 16bitového registru
15	Write Multiple Coils	Zápis více bitů
16	Write Multiple Registers	Zápis více 16bitových registrů

**Tabulka 4.4:** Přehled operací [33]

### Komunikační tok

Komunikace v sítích Modbus TCP/IP probíhá podle modelu klient-server, kdy klient (např. HMI nebo PLC) požaduje data od serveru (např. snímače nebo akčního členu). Požadavky a odpovědi obsahují kódy funkcí, které specifikují požadovanou akci (např. čtení nebo zápis dat) a data cílového zařízení. Modbus TCP podporuje celou řadu operací, od čtení a zápisu diskretních vstupů a cívek až po složitější diagnostické funkce [33].

### Zpracování chyb a zabezpečení

Modbus TCP obsahuje mechanismy pro ošetření chyb prostřednictvím kódů výjimek, které informují klienta o problémech, jako jsou nelegální požadavky na funkce, neplatné datové adresy nebo selhání zařízení serveru. Ačkoli původně nebyly navrženy silné bezpečnostní prvky, postupy jako šifrování, ověřování a segmentace sítě mohou zvýšit zabezpečení sítě Modbus TCP proti neoprávněnému přístupu a manipulaci s daty [33].

### Integrace a interoperabilita

Jednou ze silných stránek protokolu Modbus TCP je jeho snadná integrace se širokou škálou průmyslových zařízení díky použití standardního zásobníku protokolů TCP/IP. To vedlo k jeho širokému rozšíření v různých průmyslových aplikacích, včetně výroby, správy energie, automatizace budov a dalších, a usnadňuje bezproblémovou komunikaci a interoperabilitu mezi různými zařízeními a systémy [34].

#### 4.3.2 OPC UA

Open Platform Communications - Unified Architecture (OPC UA) je platformně nezávislá, na Ethernetu založená, na služby orientovaná architektura určená pro průmyslovou automatizaci a interoperabilitu. Byla vydána v roce 2008 a integruje funkce svého předchůdce OPC Classic do bezpečnějšího a rozšiřitelnějšího rámce vhodného pro moderní průmyslové aplikace [35].

## Stručný přehled vlastností

Každý z těchto bodů se zabývá základními aspekty OPC UA a zdůrazňuje, jak se jeho funkce prakticky používají v průmyslovém kontextu, aby se dosáhlo efektivity, bezpečnosti a přizpůsobivosti [36]:

- **Interoperabilita a integrace:** OPC UA hraje v průmyslové automatizaci klíčovou roli, protože poskytuje standardizovaný rámec, který zajišťuje bezproblémovou komunikaci mezi různými zařízeními a systémy. Tento protokol funguje jako univerzální jazyk, který nejen umožňuje výměnu dat, ale také usnadňuje koordinaci mezi stroji, senzory a řídicími systémy. Tato integrace je klíčová pro zefektivnění procesů, zlepšení toku dat v reálném čase a optimalizaci provozní efektivity. Standardizovaný přístup minimalizuje problémy s kompatibilitou a umožňuje různým systémům hladce a efektivně spolupracovat.
- **Nezávislost na platformě:** Výrazným rysem OPC UA je jeho platformově agnostická konstrukce, která mu umožňuje fungovat v široké škále hardwarových a softwarových prostředí. Tato flexibilita má zásadní význam v globálních průmyslových prostředích, kde mohou být používány různé technologie. OPC UA si zachovává konzistentní funkčnost bez ohledu na to, zda je nasažen na tradičním hardwaru PC, vestavěných systémech na mikrokontrolérech nebo cloudových infrastrukturách. Tato multiplatformní schopnost zajišťuje, že průmyslové aplikace mohou využívat OPC UA k integraci, aniž by byly vázány na konkrétní operační systémy nebo hardwarové konfigurace.
- **Bezpečnost:** V oblasti průmyslové komunikace je integrita a důvěrnost dat nejdůležitější. OPC UA řeší tyto bezpečnostní problémy prostřednictvím komplexních opatření, která zahrnují šifrování, ověřování a autorizaci. Protokol zabezpečuje přenos dat v sítích, zabráňuje neoprávněnému přístupu a zajišťuje zachování integrity dat od konce ke konci. Tento robustní bezpečnostní rámec je nezbytný pro ochranu citlivých průmyslových dat a zachování důvěryhodnosti napříč komunikačními kanály.
- **Rozšiřitelnost:** OPC UA je navržen s architekturou orientovanou na budoucnost, která umožňuje rozšíření a přizpůsobení bez narušení stávajícího nasazení. Tato rozšiřitelnost zajišťuje, že se protokol může vyvíjet spolu s novými technologiemi a průmyslovými standardy a přidávat nové funkce podle potřeby. Pro organizace to znamená, že investice do systémů založených na protokolu OPC UA jsou odolné vůči nejisté budoucnosti a podporují dlouhodobý růst a technologický pokrok, aniž by vyžadovaly časté generální opravy nebo opravy kompatibility.
- **Informační modelování:** Kromě jednoduchého přenosu dat poskytuje OPC UA sofistikovaný rámec pro modelování informací, který umožňuje podrobnou reprezentaci složitých datových struktur a vztahů. Tato funkce je zásadní pro odvětví, která spravují složité systémy a vyžadují hluboké pochopení provozních souvislostí. Modelovací schopnosti OPC UA umožňují definovat sofistikované interakce a chování v rámci průmyslového ekosystému, což zvyšuje granularitu i využitelnost komunikovaných dat. Tento aspekt modelování je zásadní pro dosažení vysoké úrovně automatizace a inteligentního rozhodování v průmyslových procesech.



## Komunikační model

OPC UA podporuje dva základní komunikační modely, z nichž každý je přizpůsoben různým průmyslovým potřebám [35]:

### Model klient-server

- **Přímá interakce:** Je ideální pro prostředí vyžadující odezvu v reálném čase.
- **Je transakční:** Zajišťuje spolehlivou a přesnou výměnu dat, což je důležité pro proozy vyžadující okamžitý přístup k datům a jejich řízení.
- **Případy použití:** Vhodný pro monitorování a řízení v reálném čase, kde je nutná přímá komunikace.

### Model Publish-Subscribe (Pub-Sub)

- **Škálovatelná distribuce:** Používá zprostředkovatele zpráv k efektivnímu vysílání dat více klientům, což zvyšuje škálovatelnost a efektivitu sítě.
- **Oddělená komunikace:** Vydavatelé a odběratelé pracují nezávisle, což zvyšuje flexibilitu a snižuje složitost režie systému.
- **Případy použití:** Vhodné pro rozsáhlé aplikace, kde jsou stejná data distribuována různým příjemcům, například ve výrobě nebo při řízení veřejných služeb.

Díky své komplexní koncepci je OPC UA základním kamenem pro implementaci Průmyslu 4.0, který umožňuje inteligentní výrobu a integraci kyberneticko-fyzických systémů.

### 4.3.3 Souhrn hlavních rozdílů mezi zmíněnými protokoly

Modbus TCP i OPC UA jsou v průmyslové automatizaci široce používané komunikační protokoly, ale výrazně se liší z hlediska funkčnosti, architektury a případů použití. Zde je stručný přehled jejich hlavních rozdílů [33][35]:

#### 1. Návrh a architektura:

- **Modbus TCP:** Je jednoduchý a přímočarý a používá se především k přímému přenosu dat mezi automatizačními zařízeními. Pracuje na jednoduché architektuře master-slave, což může omezovat jeho škálovatelnost a flexibilitu ve složitějších systémech.
- **OPC UA:** Sofistikovanější protokol navržený od základu se zaměřením na komplexní výměnu dat, interoperabilitu a zabezpečení. Podporuje komunikační modely klient-server i publish-subscribe, což mu umožňuje dobře škálovat ve velkých a složitých průmyslových prostředích.

#### 2. Datové modelování:

- **Modbus TCP:** Ze své podstaty nepodporuje modelování dat; jednoduše čte a zapisuje do registrů a cívek bez kontextu o datech. To znamená, že veškerá interpretace dat je ponechána na aplikační vrstvě.

- OPC UA: Poskytuje rozsáhlou podporu modelování informací, což znamená, že dokáže reprezentovat nejen data, ale také vztahy a metadata. Díky tomu je protokol OPC UA velmi vhodný pro aplikace, které vyžadují komplexní interakce mezi zařízeními a systémy.

### 3. Bezpečnostní funkce:

- Modbus TCP: Nabízí velmi základní funkce zabezpečení, které závisí především na zabezpečení sítě, v níž je implementován. To může být významnou nevýhodou v prostředích, kde je bezpečnost prioritou.
- OPC UA: Obsahuje robustní bezpečnostní mechanismy zabudované do protokolu, včetně šifrování, ověřování a autorizace. Díky tomu je velmi vhodný pro aplikace, které vyžadují bezpečný přenos dat v potenciálně nezabezpečených sítích.

### 4. Výkon a efektivita:

- Modbus TCP: Je známý svou jednoduchostí a nízkou režii, takže je vysoce efektivní pro malé aplikace, kde šířka pásma není omezením a bezpečnostní riziko je zvládnutelné.
- OPC UA: Ačkoli je OPC UA obecně náročnější na zdroje kvůli své složité architektuře a bezpečnostním prvkům, je optimalizován pro výkon v rozsáhlých a složitých systémech a svými schopnostmi daleko předčí Modbus TCP při zpracování velkého množství dat a zajištění spolehlivé komunikace za různých podmínek.

### 5. Přijetí a použití v průmyslu:

- Modbus TCP: Převážně se používá v jednoduchých aplikacích typu point-to-point nebo tam, kde jsou zavedeny starší systémy. Převládá zejména ve starších průmyslových systémech a menších aplikacích.
- OPC UA: Stále častěji volený protokol pro nové průmyslové aplikace, zejména ty, které vyžadují integraci mezi různými systémy a dodavateli. Je široce rozšířen v průmyslových odvětvích, která přecházejí na standardy Průmyslu 4.0.

Souhrnně lze říci, že zatímco protokol Modbus TCP je vhodný pro jednoduché, méně kritické úlohy výměny dat, OPC UA nabízí pokročilé funkce, které vyhovují moderním průmyslovým aplikacím vyžadujícím vysokou úroveň zabezpečení, složitost dat a interoperabilitu systémů.

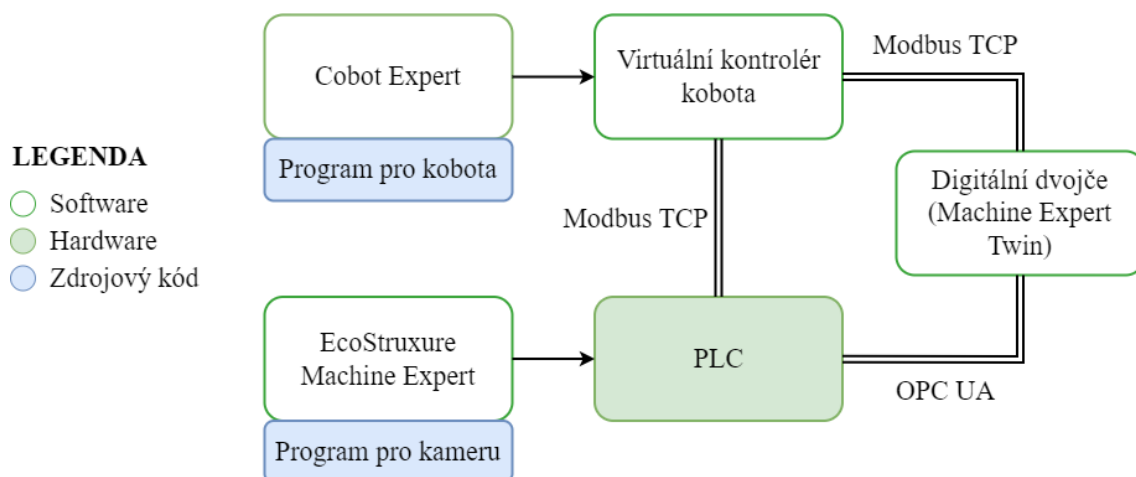
# Kapitola 5

## Návrh

Cílem této kapitoly je uvést čtenáře do kompozice celé aplikace před samotnou implementací.

### 5.1 Propojení komponent

Na obr. 5.1 lze vidět princip komunikace jednotlivých modulů tvořící náš systém. Hlavními řídicími komponentami jsou kontrolér kobota a PLC, které mezi sebou komunikují pomocí protokolu Modbus TCP a zároveň posílají data do simulačního programu ME Twin pomocí Modbus TCP, respektive OPC UA. Kontrolér kobota představuje sám o sobě zjednodušené PLC. Software Cobot expert slouží návržení programu a jeho nahrání do virtuálního kontroléru kobota. Pomocí Machine Expert můžeme sestavit program pro kameru a nahrát jej do PLC. V rámci našeho projektu v PLC poběží cyklus, který bude simulovat signály kamerového systému.



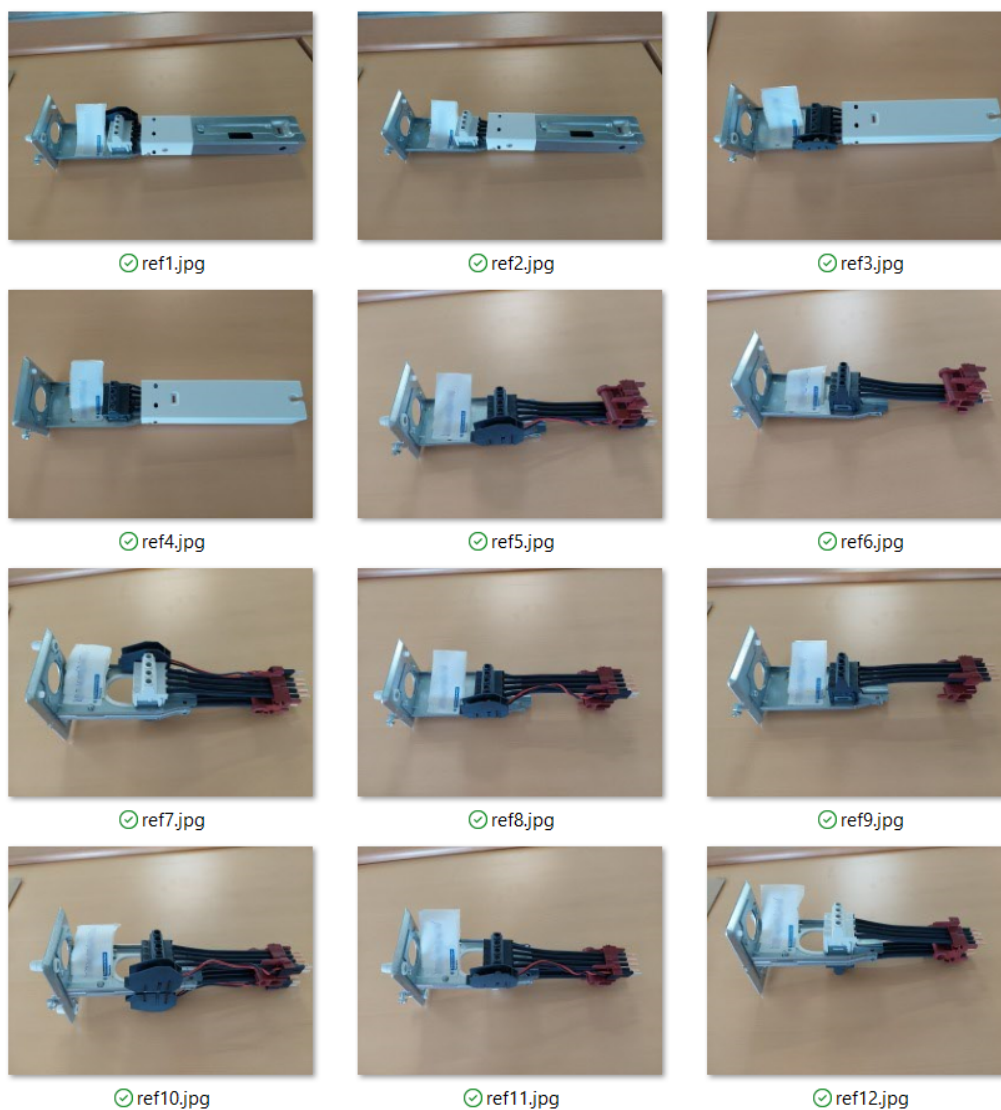
Obrázek 5.1: Schéma zapojení komponent systému

### 5.2 Proces inspekce dílů

Linka Canalis, v rámci které bude figurovat naše navržené automatizované inspekční pracoviště, vyrábí celkem 12 typů jednoho dílu. Konkrétní reference jsou pro přehlednost v tab. 5.1 a pro názornost na obr. 5.2. Pro představu je uveden i cycle time výroby jednotlivých referencí.

Označení	Počet kontrolovaných částí	Cycle time (s)
ref1	15	58,8
ref2	11	52
ref3	12	36,9
ref4	9	30,1
ref5	18	44,7
ref6	13	37,9
ref7	19	61,8
ref8	18	44,7
ref9	13	37,9
ref10	19	68,5
ref11	19	61,8
ref12	14	55

Tabulka 5.1: Přehled referencí



Obrázek 5.2: Přehled všech typů dílů

Spolu se zadáním jsme dostali k dispozici soubor MS Excel s přehledem všech kontrolovaných částí na jednotlivých dílech. Tento přehled nám poskytne výchozí data pro plánování trajektorií pohybu kobota. Polohování dílů by mělo probíhat tak, aby byla kamera schopna zachytit všechny kontrolované části a ověřit správnost jejich montáže. Zároveň je žádoucí provést kontrolu s co nejmenším počtem poloh, abychom šetřili energii a čas.

Podle zadaného přehledu kontrolovaných částí bylo navrženo, že stačí provést pro každý díl 4 různé polohy pod kamerou nezávisle na počtu kontrolovaných částí uvedených v tab. 5.1, aby přitom nedošlo k vynechání některé z částí.

Zde si na obrázcích ukážeme konkrétní polohy (kamera bude umístěna v oblasti nad podavačem - světle modrý čtverec):



Obrázek 5.3: Poloha 1

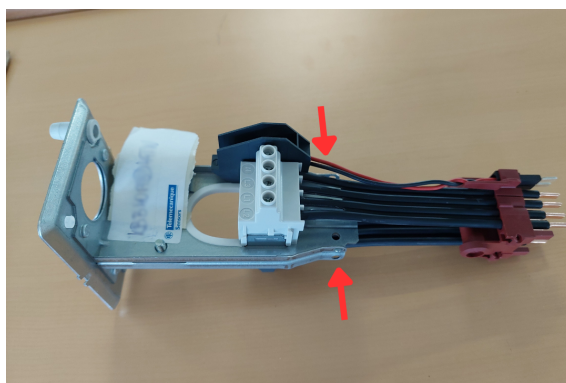
Obrázek 5.4: Poloha 2



Obrázek 5.5: Poloha 3

Obrázek 5.6: Poloha 4

Jako demonstrační díl byl vybrán *ref7* - v simulaci je zatím pouze nahrazen kvádrem. Na obr. 5.7 je navrženo místo, za které bude uchopen sestavený díl. Jedná se o část dílu, která byla vyhodnocena jako nejlepší pro úchop, jelikož je pro každou referenci stejná, je přístupná a je z pevného materiálu.



Obrázek 5.7: Místo k uchopení dílu kobotem

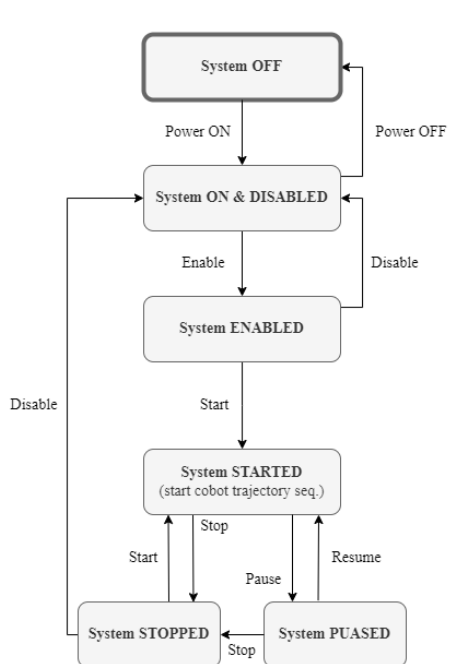
Jelikož má systém kontrolovat 12 různých dílů, měl by být před každou kontrolou nejdříve identifikován typ dílu, na základě kterého se spustí odpovídající kontrolní program. Z důvodů omezených prostředků vyhrazených na tuto diplomovou práci tuto funkci budeme považovat za nastavbovou a pro zjednodušení budeme pracovat pouze s výše uvedenou referencí *ref7*.

### 5.3 Stavové automaty

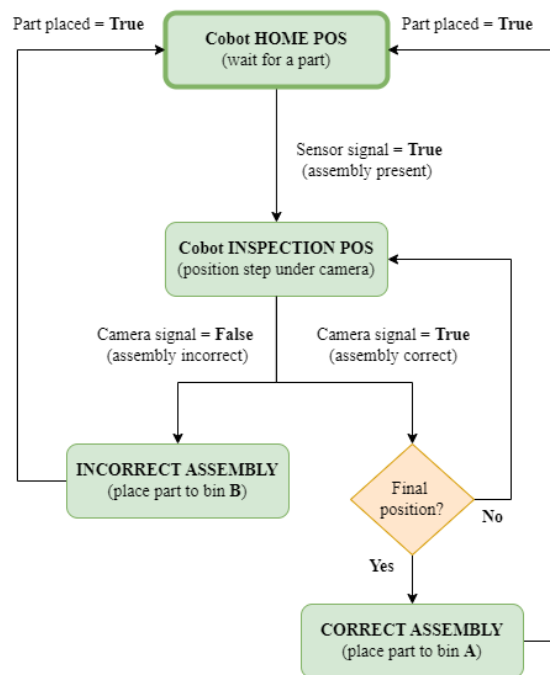
Na obr. 5.8 je stavový diagram hlavního systému. Na začátku je systém ve stavu *System OFF*, po zapnutí napájení ve stavu *System ON & DISABLED* a po následném odblokování ve stavu *System ENABLED*. Nyní je možné systém spustit a tím uvést do stavu *System STARTED*. V tomto okamžiku se spustí stavový automat 5.9 ovládající kobota. V případě potřeby lze systém zastavit do stavu *System STOPPED* a odsud jej buď opětovně spustit nebo uvést zpět do stavu *System ON & DISABLED*. Případně jej lze také uvést do stavu *System PAUSED* a pozastavit jeho činnost, odsud jej lze úplně zastavit nebo opětovně spustit od kroku, ve kterém se nacházel při pozastavení. Tento stavový diagram převážně vychází ze samotné architektury zařízení Lexium Cobot a programu Cobot Expert a znázorňuje proces spuštění programu.

Na druhou stranu, stavový diagram na obr. 5.9 je námi navržený a představuje samotnou pohybovou logiku pro kobota. Kobot začíná ve stavu *Cobot HOME POS*. Po detekci dílu v dávkovači jej kobot uchopí, napolohuje pod kameru a odešle signál kamerovému systému, tím se dostane do stavu *Cobot INSPECTION POS*. Kamerový systém vyhodnotí správnost montáže a odešle výsledek do kontroléru kobota.

Jestliže je výsledek logická 0 (díl nesprávně sestavený díl), kobot se dostane do stavu *INCORRET ASSEMBLY*, díl umístí na odkladiště B (určené pro přezkoumání lidským pracovníkem) a poté se přesune zpět do *Cobot HOME POS*. Pokud je výsledek logická 1 (díl správně sestavený díl), kobot setrvá ve stavu *Cobot INSPECTION POS* a vykoná další polohu pod kamerou. Cyklus se opakuje, dokud nenastane finální pozice, po které nastane stav *CORRET ASSEMBLY*, díl je umístěn na odkladiště A a kobot přejde zpět do *Cobot HOME POS*.



Obrázek 5.8: Stavový automat hlavního systému



Obrázek 5.9: Stavový automat kobota

## 5.4 Rozvržení pracoviště

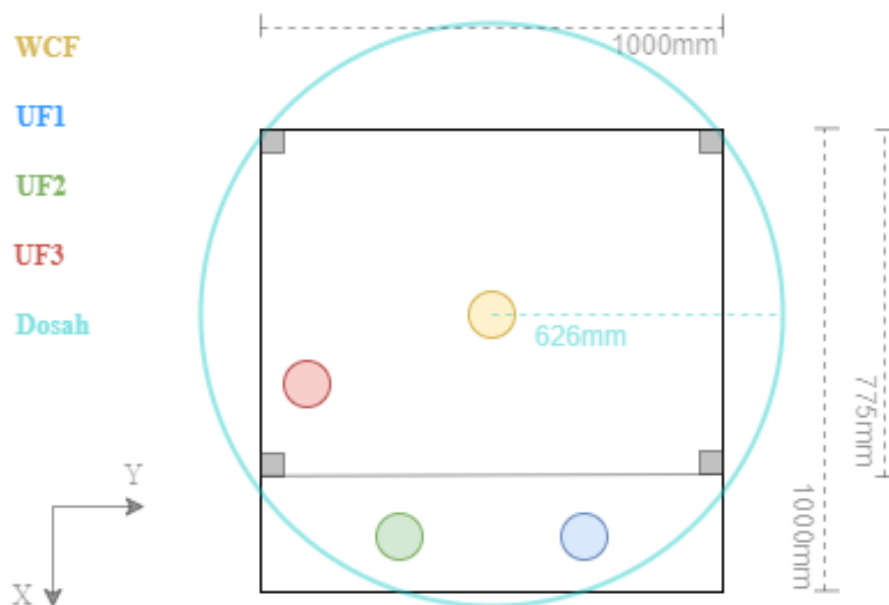
Pracoviště kobota bude součástí existující linky Canalis, proto je potřeba při návrhu počítat s prostorovými restrikcemi. Na obr. 5.10 je vyfocen současný stav pracoviště, kde se provádí manuální kontrola dílů.



**Obrázek 5.10:** Současné pracoviště

Jádro simulovaného pracoviště budou tvořit následující objekty: kobot, 2x odkladiště a podavač. Na obr. 5.11 je tyrkysovou kružnicí naznačen dosah kobota, ten určuje největší vzdálenost, do které lze umístit podavač a odkladové plochy. V tomto projektu bude použit Lexium Cobot LXMR03S, s nosností 3 kg a dosahem 626 mm.





Obrázek 5.11: Půdorys návrhu nového pracoviště

Rozvržení objektů bude následující:

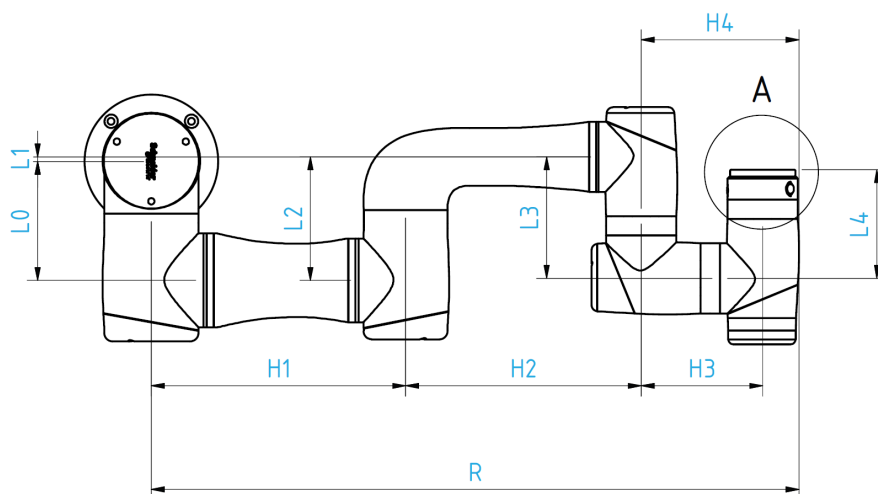
- A. **Kobot – WCF:** Kobot je umístěn na souřadnice World Coordinate Frame (WCF) na pracovní stůl o výšce 880mm. Od WCF se odvíjí ostatní souřadnicové systémy.
- B. **Podavač – UF1**
- C. **Odkladiště – UF2/UF3**

Pokud bychom uvažovali i fyzickou konstrukci a umístění kamery, umístili bychom ji někde nad podavač, jelikož první navržená poloha dílu ke kontrole je přímo na podavači (detail v sekci 5.2). Je také důležité zmínit, že se v návrhu pracoviště a následné implementaci konkrétních trajektorií musí počítat s rozměry ramene koboty. Například koncový efektor je oproti základně koboty vychýlený o celkových 113 mm (jak je zaznamenáno ve schématu na obr. 5.12).

Přehled poloh souřadnicových systémů (tab. 5.2):

Souřadnicový systém	x (mm)	y (mm)	z (mm)
WCF	0	0	880
UF1	420	200	860
UF2	420	-200	860
UF3	150	-400	880

Tabulka 5.2: Přehled souřadnicových systémů [26]



Obrázek 5.12: Výkres s rozměry kobota [26]

Označení	Rozměr (mm)
R	626
H1	246
H2	228
H3	117,5
H4	152,5
L0	115
L1	4,5
L2	119,5
L3	117,5
L4	105

Tabulka 5.3: Číselné rozměry kobota [26]

## 5.5 Bezpečnostní prvky pracoviště

Jak bylo zmíněno v kapitole 2.6, koboti podléhají speciálnímu standardu, který specifikuje bezpečnostní pokyny pro návrh kolaborativních systémů. A proto v rámci této sekce zpracujeme návrh bezpečnostních prvků.

### 5.5.1 Nezbytné ovládací funkce

Standard ISO/TS 15066 udává, že by měl systém mít dvě nezbytné ovládací funkce. Ve speciálních případech definovaných ve směrnici lze použít pouze první z následujících funkcí. Přesto implementujeme obě a zaručíme tak jednoznačnou jistotu. Navíc v obou případech se jedná o funkce zasazené přímo do architektury systému Lexium Cobot, tudíž nijak nezvyšují komplexitu našeho projektu.

### Funkce pohotovostního zastavení systému

Standard říká: „*Během kolaborativního provozu musí mít operátor možnost kdykoli zastavit pohyb robota jediným úkonem nebo musí mít k dispozici volné cesty k opuštění kolaborativního pracovního prostoru.*“ [16]

### Funkce blokování/odblokování systému

Standard dále říká: „*ISO 10218-1:2011, 5.8, obsahuje ustanovení pro závěsné ovládání s povolovacím zařízením (ISO 10218-1:2011, 5.8.3) a funkci nouzového zastavení (ISO 10218-1:2011, 5.8.4). Pokud se při posuzování rizik zjistí, že snížení rizika, kterého se tradičně dosahuje použitím povolovacího zařízení, by bylo alternativně dosaženo přirozeně bezpečnými konstrukčními opatřeními nebo omezujícími funkcemi s bezpečnostní úrovní, pak může být závěsné ovládání kolaborativního robotického systému poskytnuto bez povolovacího zařízení.*“ [16]

## 5.5.2 Maximální bezpečná rychlost

Ve standardu je tento aspekt bezpečnosti definován takto: „*Robot musí být vybaven bezpečnostní funkcí kontrolované rychlosti (ISO 10218-1:2011, 5.6.4) a bezpečnostní funkcí kontrolovaného zastavení. Pokud vzdálenost mezi nebezpečnou částí robotického systému a jakoukoli obsluhou klesne pod ochrannou oddělovací vzdálenost, musí robotický systém spustit ochranné zastavení nebo spustit bezpečnostní funkce připojené k robotickému systému v souladu s ISO 10218-2:2011, 5.11.2 g), např. vypnout všechny nebezpečné nástroje.*“ [16]

Během návrhu pracoviště je tedy naší povinností definovat maximální bezpečnou rychlost pohybu kobota, pokud se nachází v kolaborativním režimu.

### Osnova postupu výpočtu

Při výpočtu maximální bezpečné rychlosti se podle standardu postupuje následujícím způsobem:

- I. Stanovíme části lidského těla, které by mohly přijít do kontaktu s kobotem.
- II. Určíme, jestli se jedná o tranzientní nebo kvazi-statický kontakt.
- III. Určíme, které části lidského těla se mohou dostat do kontaktu s kobotem a podle tabulek ve standardu zjistíme jejich příslušné hodnoty potřebné k výpočtu
- IV. Použitím známých veličin a vzorce odvozeného od přenosové energie vypočítáme maximální rychlost.
- V. Pro různé části těla vychází různé rychlosti, rozhodující je ta nejnižší, tedy nejbezpečnější.

### Odvození vzorce

Následující odvození čerpá přímo ze standardu ISO/TS 15066 [16]. Předpokladem pro odvození mezní rychlosti pro kontakt je vyrovnání energie „pružiny“ v oblasti lidského těla s celkovou kinetickou energií v souřadnicích středu hmotnosti

za předpokladu plně nepružného kontaktu. Energie v tomto modelu je vyjádřena vzorcem 5.1:

$$E = \frac{F^2}{2k} = \frac{1}{2}\mu v_{rel}^2, \quad (5.1)$$

kde

$E$  je přenosová energie;

$F$  je síla, která působí na určitou část těla;

$k$  je efektivní konstanta pružnosti pro určitou část těla;

$v_{rel}$  je relativní rychlost mezi kobotem a částí lidského těla;

$\mu$  je redukovaná hmotnost soustavy dvou těles, která je vyjádřena vzorcem 5.2:

$$\mu = \left( \frac{1}{m_H} + \frac{1}{m_R} \right)^{-1}, \quad (5.2)$$

kde

$m_H$  je efektivní hmotnost části lidského těla;

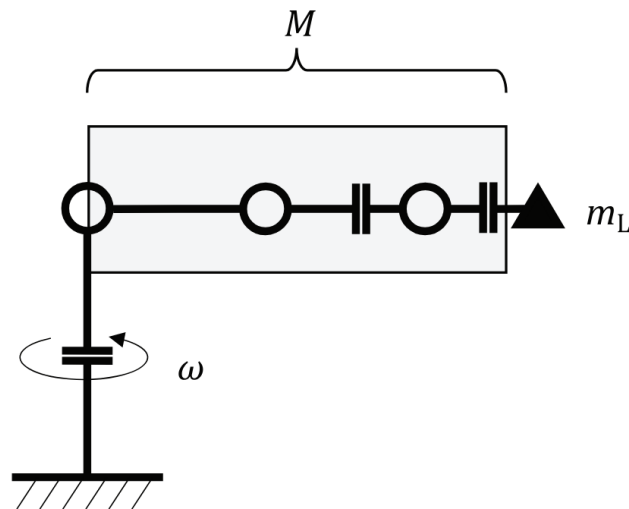
$m_R$  je efektivní hmotnost robota jako funkce polohy a pohybu robota (viz obr. 5.13), která je vyjádřena vzorcem 5.3:

$$m_R = \frac{M}{2} + m_L, \quad (5.3)$$

kde

$m_L$  je efektivní zatížení robotického systému včetně nástrojů a obrobku;

$M$  je celková hmotnost pohyblivých částí kobota.



**Obrázek 5.13:** Zjednodušený model robota ( $\omega$  je zde úhlová rychlost)

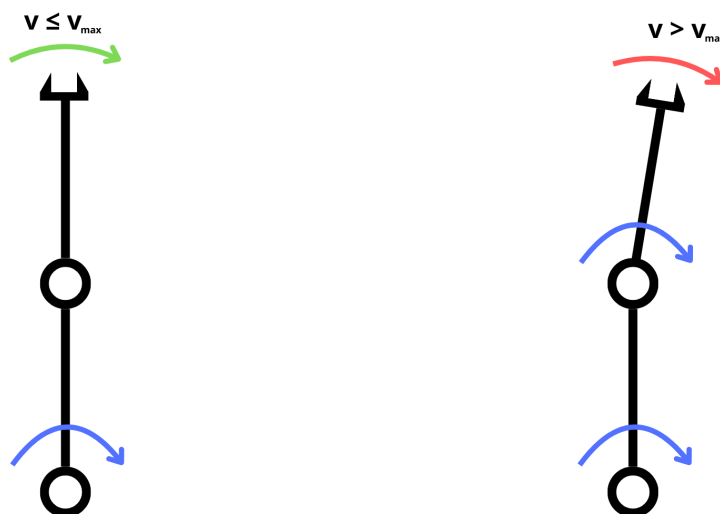
Vyjádřením rychlosti dostáváme vzorec 5.4, který lze použít pro výpočet maximální bezpečné rychlosti:

$$v_{rel,max} = \frac{F_{max}}{\sqrt{\mu k}}. \quad (5.4)$$

V programu Cobot Expert, který v tomto projektu používáme k programování trajektorií kobota, zadáváme kromě lineárních pohybů také kloubové, proto potřebujeme získat kromě maximální bezpečné lineární rychlosti i úhlovou.

Odvození této rychlosti ovšem není úplně jednoduché, k získání přesných hodnot pro víceosé manipulátory by bylo zapotřebí pracovat s kompletním modelem kinematického řetězce a brát v potaz skládání úhlových rychlostí jednotlivých částí robotického ramene.

Přijmeme tedy jedno omezení, které zjednoduší náš model. Pohyb, při kterém dosáhne efektor maximální rychlosti stanovíme jako rotaci kolem osy nejbližší základně (obr. 5.14). Jakýmkoliv složeným pohybům, které by měly tuto rychlost překročit, se při návrhu trajektorií vyvarujeme (obr. 5.15).



**Obrázek 5.14:** Pohyb, který nepřekročí ma-  
ximální stanovenou rychlost rotace

**Obrázek 5.15:** Pohyb, který hodnotu pře-  
kročí

Nevýhodou tohoto zjednodušení bude mírné omezení možností pohybů kobota a konzervativní odhad pro maximální celkovou úhlovou rychlost. To ovšem není příliš nepříznivé, jelikož zadání této diplomové práce nevyžaduje exaktní výpočty. Díky tomuto zjednodušení lze maximální bezpečnou úhlovou rychlost vypočítat pomocí obecně známého vzorce 5.5:

$$\omega = \frac{v}{r}, \quad (5.5)$$

kde

$v$  je lineární rychlost;

$r$  je délka ramene;

$\omega$  je úhlová rychlost.

### Vlastní výpočet maximální bezpečné rychlosti

Prvním krokem k výpočtu bude stanovit, které části lidského těla mohou přijít do kontaktu s kobotem. V případě našeho pracoviště to jsou spodní části paže, ruce a prsty. Ve standardu najdeme empiricky zjištěné hodnoty maximální bezpečné síly na

tyto části působící. Dále také v tabulce najdeme jejich konstanty pružnosti a hmotnost. Pro tranzientní kontakt jsou maximální hodnoty působící síly dvakrát vyšší než pro kvazi-statický. Jelikož v našem případě mohou nastat oba typy kontaktů, použijeme bezpečnější hodnoty pro kvazi-statický kontakt.

Další veličiny, které potřebujeme jsou hmotnost závaží, chapadla a kobota. Závaží zvážíme a hmotnost chapadla a kobota najdeme v dokumentaci zmíněné v kapitole 4. Jak je ovšem zmíněno v odvození v předchozí sekci, neměli bychom počítat s hmotností kobota, ale s celkovou hmotností pohyblivých částí kobota, to by vyžadovalo kompletní dynamický model a podrobnou analýzu každé trajektorie. Zavedeme proto další zjednodušení a budeme počítat s nejhorsším případem, což je hmotnost celého kobota. Tím získáme poměrně konzervativní, zato bezpečný odhad.

Délku ramene pro výpočet úhlové rychlosti zjistíme z obr. 5.12 uvedeného o několik sekcí výše (při vyčítání délky je nutné si uvědomit, v jaké konfiguraci se bude robotické rameno nacházet). Nesmíme k této délce zapomenout přidat délku chapadla uvedenou v příslušné dokumentaci.

Maximální bezpečná lineární a úhlová rychlost jsou vypočteny v tab. 5.4, respektive tab. 5.5. Rozhodující je pro nás výsledek pro spodní paže, jelikož má nižší hodnotu. Výsledná úhlová rychlost je vyjádřena ve stupních za sekundu, protože se v těchto jednotkách zadává i do programu Cobot Expert.

Parametr	Veličina	Ruce a prsty	Spodní paže
Hmotnost chapadla a závaží	$m_L$ [kg]	1,4	
Hmotnost pohyblivé části kobota	$M$ [kg]	13	
Sjednocená hmotnost kobota	$m_R$ [kg]	7,9	
Hmotnost části těla	$m_H$ [kg]	0,6	2
Konstanta pružnosti části těla	$k$ [N/m]	75 000	40 000
Maximální síla pro část těla	$k$ [N]	140	160
Sjednocená hmotnost	$\mu$ [kg]	0,558	1,596
Max. bezpečná lineární rychlost	$v_{max}$ [m/s]	0,685	<b>0,633</b>

**Tabulka 5.4:** Výpočet maximální bezpečné lineární rychlosti

Parametr	Veličina	Ruce a prsty	Spodní paže
Délka ramene	$r$ [m]	0,718	
Max. bezpečná úhlová rychlost	$\mu_{max}$ [°/s]	54,628	<b>50,533</b>

**Tabulka 5.5:** Výpočet maximální bezpečné úhlové rychlosti

## Shrnutí a upozornění

Je důležité zmínit, že náš výpočet slouží výhradně k nastavení orientačních limitů pro návrh simulovaného pracoviště a pro přibližný výpočet návratnosti investice. Pokud by mělo dojít k reálnému nasazení a provozu systému, je nutné, aby bylo provedeno kompletní testování bezpečnostních prvků příslušnými autoritami.

# Kapitola 6

## Implementace

Na základě předchozí analýzy a návrhu je v této kapitole popsán postup tvorby inspekčního pracoviště, který je popsán velice podrobně, aby bylo možné na jeho základě implementovat a nasadit reálné řešení.

### 6.1 Propojení komponent

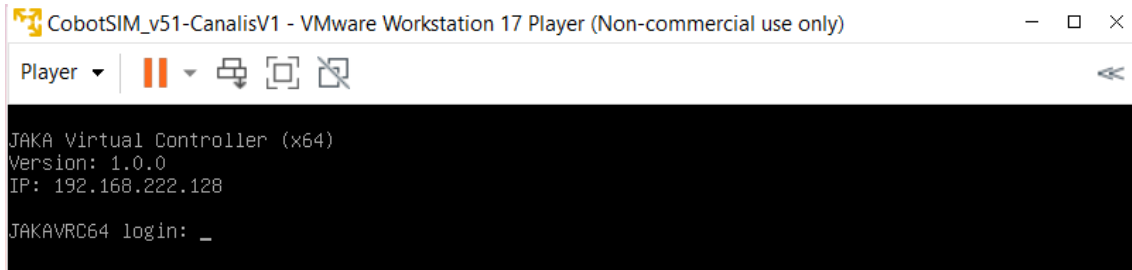
Tato podkapitola má za úkol popsat zprovoznění komunikace mezi jednotlivými komponentami projektu. Pro lepší orientaci ve vztahu mezi nimi slouží obr. 5.1 z předchozí kapitoly.

#### 6.1.1 Odblokování komunikace

Společnost Schneider Electric používá k zajištění kybernetické bezpečnosti na osobních počítačích software Trellix. Pokud chceme zajistit komunikaci mezi dvěma různými programy nebo zařízeními, je potřeba změnit nastavení programu Trellix, konkrétně odkliknout *Quick Settings* → *Enable Firewall Timed Groups* [37]. Nyní můžeme nastavit komunikaci mezi instancemi programů, se kterými budeme pracovat.

#### 6.1.2 Kontrolér kobota

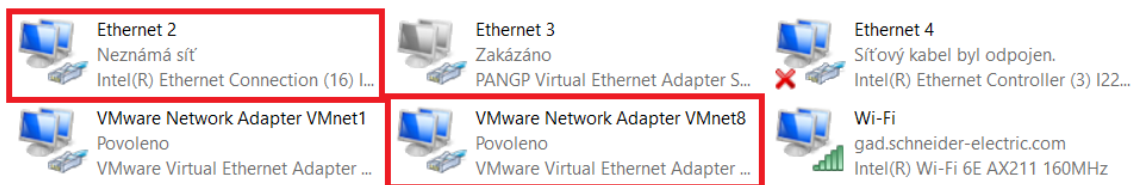
Nejdříve je potřeba spustit virtuální kontrolér kobota. Jako virtualizační software použijeme VMware [38], do kterého importujeme diskový soubor kontroléru kobota (ten je určen k interním testovacím účelům a je i s přístupovými údaji k získání pouze na žádost Schneider Electric). Po spuštění virtuálního kontroléru musíme změnit nastavení síťového adaptéru, abychom byli schopni získat IP adresu. Stisknutím *ctrl+D* se dostaneme do nastavení, přejdeme na záložku *Network Adapter* a změníme nastavení na *NAT* (neboli Network Address Translation). Po restartu instance virtuálního zařízení bychom měli na černé obrazovce vidět IP adresu (obr. 6.1).



Obrázek 6.1: IP adresa virtuálního kontroléru

### 6.1.3 Nastavení síťových adaptérů

Prvním krokem pro nastavení komunikace mezi komponentami je synchronizace IP adres síťových adaptérů. U primárního ethernetového adaptéru a virtuálního adaptéru VMNet8 (viz obr. 6.2) nastavíme IP adresy, které se nachází ve stejné podsíti jako IP adresa virtuálního kontroléru (viz příklad v tab. 6.1). Primární adaptér se může lišit podle individuálního nastavení uživatele, zato VMNet8 zvolíme vždy, jelikož se jedná o adaptér, který využívá protokol NAT.



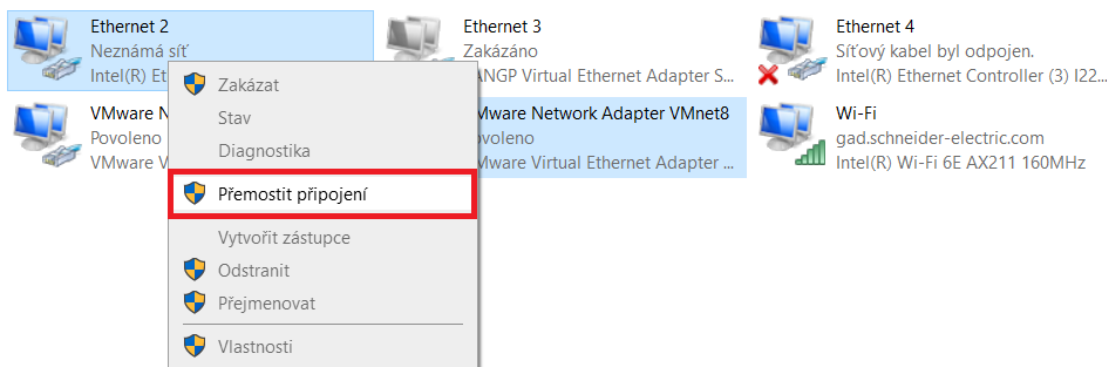
Obrázek 6.2: Nastavení síťových adaptérů

Adaptér/Zařízení	IP adresa
Ethernet 2	192.168.222.2
VMNet8	192.168.222.3
PLC	192.168.222.20
Virtuální kontrolér	192.168.222.128

Tabulka 6.1: Příklad nastavení IP adres v našem projektu

Dalším krokem je vytvoření síťového přemostění mezi nastavenými adaptéry způsobem ukázaným na obr. 6.3. Tímto krokem umožníme přímou komunikaci mezi PLC a kontrolérem kobota (jelikož PLC je fyzicky připojeno na primární adaptér a kontrolér je virtuálně připojen na VMNet8).

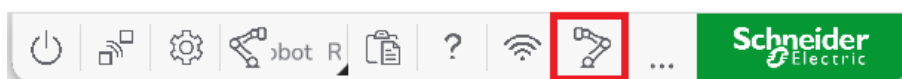




Obrázek 6.3: Aktivace přemostění

### 6.1.4 Cobot Expert

Nyní si ukážeme jak se přihlásit do kontroléru kobota, abychom do něj mohli nahrát program. Spustíme program Cobot Expert. V pravém horním rohu se nachází lišta, na níž je vpravo ikona kobota (obr. 6.4). Po kliknutí na ikonu se otevře okno s možnostmi připojení ke kontroléru. Zde bychom měli v seznamu zařízení vidět kontrolér s IP adresou, která se shoduje s tou v programu VMware. Klikneme na toto zařízení a přihlásíme se. Tím jsme nastavili spojení mezi virtuálním kontrolérem kobota a programem Cobot Expert.



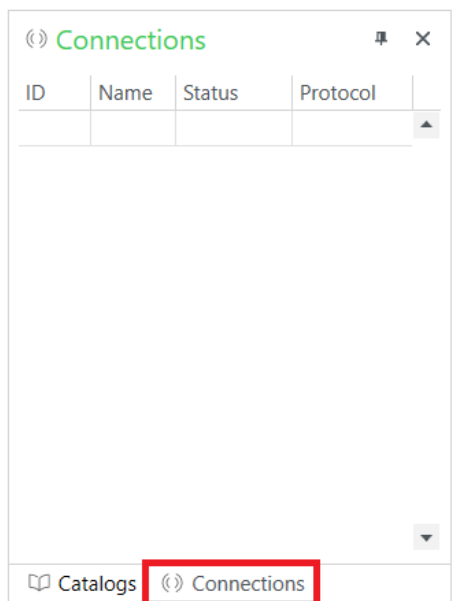
Obrázek 6.4: Připojení ke kontroléru přes Cobot Expert

### 6.1.5 ME Twin

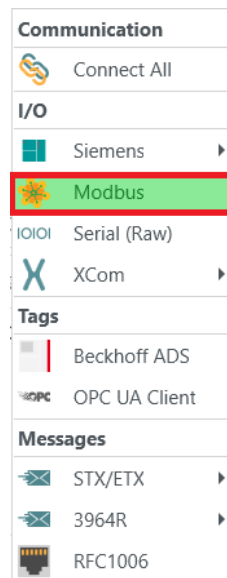
Třetí program, který je potřeba spustit, je ME Twin. Po spuštění se objeví nabídka, z níž vybereme následující katalogy:

- SchneiderElectric.Accessories
- SchneiderElectric.CobotGripper (teprve si vytvoříme v sekci 6.2)
- SchneiderElectric.Cobots
- SchneiderElectric.FieldEquipment

Po spuštění programu otevřeme v levé postranní liště záložku *Connections* (obr. 6.5). Klikneme pravým tlačítkem do prázdného prostoru této záložky. Tím vyvoláme tabulku možností a vybereme *Modbus* (obr. 6.6).

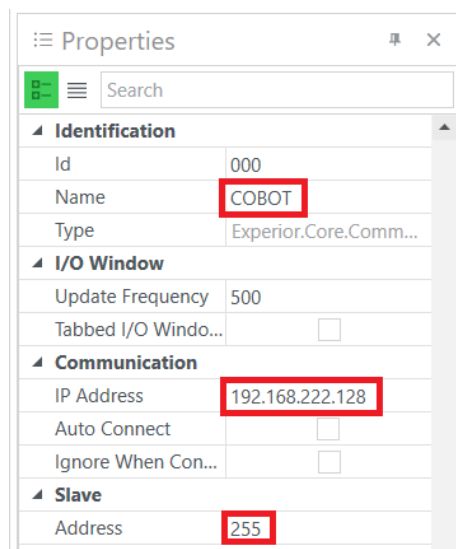


Obrázek 6.5: Záložka Connections

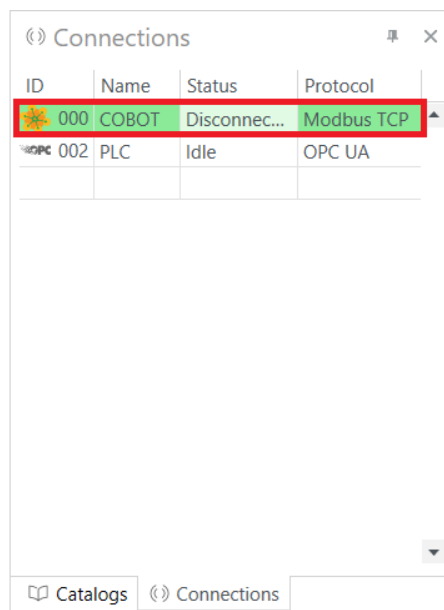


Obrázek 6.6: Tabulka možností

Nyní nám vznikl slot pro komunikaci s kontrolérem kobota. Klikneme na něj a v pravé postranní liště upravíme jeho vlastnosti v záložce *Properties* (podle obr. 6.7, přičemž zadáme správnou IP adresu kontroléru kobota). Komunikaci zahájíme dvojklikem na slot pro Modbus komunikaci (obr. 6.8).



Obrázek 6.7: Záložka Properties



Obrázek 6.8: Modbus slot

K aktivaci spojení ovšem ještě nemůže dojít, dokud není nastaven alespoň jeden PLC signál objektu korespondující se signálem v programu Cobot Expert (bude blíže vysvětleno v kapitole 6.3).

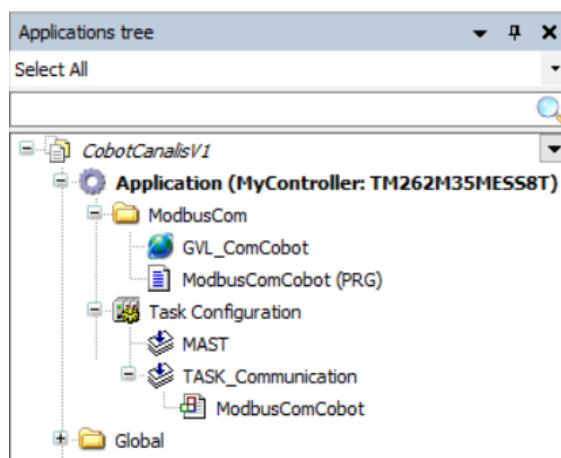
Podobným způsobem vytvoříme komunikační kanál mezi prostředím ME Twin a PLC. V tomto případě místo Modbus vybereme *OPC UA Client*. Komunikaci lze opět zahájit dvojklikem na tento slot pokud běží příslušný OPC UA server.

### 6.1.6 Machine Expert

V této části se zaměříme na propojení PLC s prostředím ME Twin a s virtuálním kontrolérem kobota v programu Machine Expert. Založíme nový projekt a vybereme PLC, v tomto projektu využíváme model TM262M35MESS8T.

Pro aktivaci OPC UA serveru, který bude běžet na PLC a bude sloužit ke komunikaci se simulačním prostředím ME Twin, otevřeme záložku *Devices tree* v levé postranní liště a provedeme dvojklik na *MyController*. Poté klikneme na *OPC UA Server Configuration* → *OPC UA Server enabled*. Dále otevřeme *Tools Tree* → *Symbol Configuration* a zaškrtneme proměnné, které si přejeme zpřístupnit na OPC UA serveru.

Pro otevření komunikačního kanálu mezi PLC a kontrolérem kobota využijeme knihovnu ModbusHandling (v tomto projektu v1.1.4.0), která je součástí instalace programu Machine Expert. Otevřeme záložku *Applications tree* v levé postranní liště a založíme nový soubor typu POU (Program Organization Unit) například s názvem *ModbusComCobot*. Pak založíme nový periodický task s prioritou 2 a intervalem 100 ms (nazveme jej např. *TASK\_Communication*), do něj umístíme *ModbusComCobot*. Ukázka výsledné struktury aplikace je zachycena na obr. 6.9. Konkrétní kód programu *ModbusComCobot* spolu s globálními proměnnými *GVL\_ComCobot* zajišťujícími komunikaci je k nalezení v souborech přiložených k této diplomové práci. Důležité zde je správně nastavit offsety Modbusových adres kontroléru kobota, jejich soupis lze najít v softwarové příručce [26].



Obrázek 6.9: Applications Tree

## 6.2 Implementace uchopovacího mechanismu

V rámci našeho projektu simulovaného pracoviště je klíčové přidat model uchopovacího mechanismu, známého také jako gripper. Tento prvek je zásadní pro interakci simulovaného robota s objekty ve virtuálním prostředí. Pro realizaci tohoto úkolu jsme se rozhodli využít vývojové prostředí Visual Studio, společně s knihovnami určenými pro vytváření a správu katalogových objektů v simulačním softwaru ME Twin. Programovací práce bude prováděna v jazyce C#.

Základním krokem v procesu implementace je akvizice CAD modelu preferovaného gripperu. Tento model obvykle obsahuje centrální uchopovací mechanismus a

dva manipulační prsty. Významnou částí implementace je správné nastavení relativních poloh těchto komponent v zdrojovém kódu, stejně jako programování několika klíčových funkcí, které zajišťují operativní interakci mezi gripperem a simulovaným prostředím.

### **Automatické připojení ke kobotovi**

Jednou z funkcí je vyhledání a automatické připojení gripperu k robotickému ramenu v simulaci. Tato funkce se pak v praxi aktivuje přetažením gripperu na pracovní plochu v simulátoru a zadáním názvu konkrétního robotického ramene do jeho vlastností.

### **Detekce přítomnosti objektu**

Dále jsme implementovali událostmi řízenou funkci pro detekci přítomnosti objektu. Tato funkce využívá senzor na konci gripperu, který zaznamenává fyzický kontakt s objektem (např. dílem podléhajícím inspekci).

### **Aktivace aktuátoru**

Další významnou funkcí je ovládání aktuátoru. Informace získané ze senzoru přítomnosti jsou využívány k aktivaci aktuátoru, který následně uchopí a udrží objekt v oblasti senzoru, na základě přijatého řídicího signálu.

### **Ovládání pohybu prstů**

Poslední funkcí je řízení pohybu prstů gripperu. Tato funkce reaguje na signál k aktivaci aktuátoru a sevře prsty kolem objektu. Ačkoli se v simulovaném prostředí objekty přichytávají k aktuátoru bez fyzického držení prsty, tato funkce přidává k realismu simulace.

### **Práce s katalogem**

Jakmile v projektu ve Visual Studio spustíme ladění (debugging), vytvořený katalog s gripperem se automaticky zařadí mezi ostatní dostupné katalogy. Při spuštění ME Twin prostředí se pak gripper objeví v uživatelské nabídce jako dostupná komponenta pro simulaci.

Tato implementace nejenže rozšiřuje funkčnost simulovaného prostředí, ale také poskytuje základ pro další vývoj a integraci komplexních robotických operací.

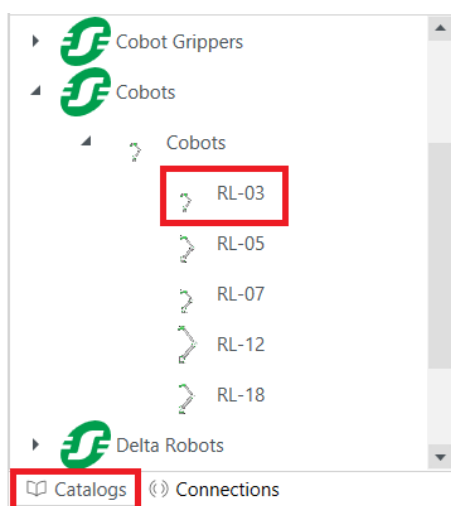
## **6.3 Sestavení virtuálního pracoviště**

V této části se zaměříme na proces sestavení virtuálního pracoviště s kobotem v programu ME Twin. Pro přehlednost jsou zde vypsány použité objekty:

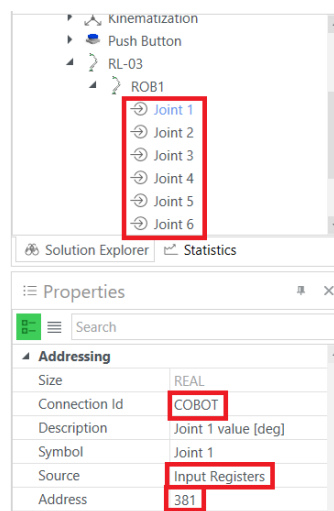
- 1x Lexium Cobot LXMRL03S
- 1x Cobot Gripper
- 6x Push Button

- 1x Feeder
- 2x Eater
- 1x Double Stack Light
- 1x Quadruple Stack Light
- 18x Box

První objekt, který umístíme je Lexium Cobot LXMR03S, který přetáhneme do prostoru z katalogu v levé postranní liště (obr. 6.10). Klikneme na přidání kobota a v pravé postranní liště v záložce *Properties* (obr. 6.11) upravíme *Connection ID* a adresy PLC signálů pro kloubové aktuátory podle tab. 6.2. Nyní máme nastavené první PLC signály a můžeme spustit komunikaci mezi ME Twin a kontrolérem kobota, jak bylo vysvětleno v části 6.1.5.



Obrázek 6.10: Výběr kobota z katalogu

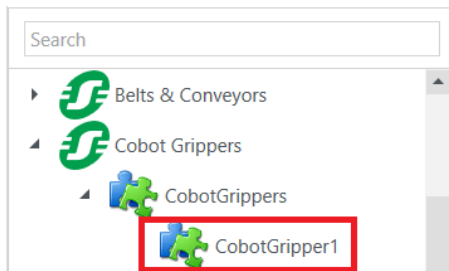


Obrázek 6.11: Nastavení kobota

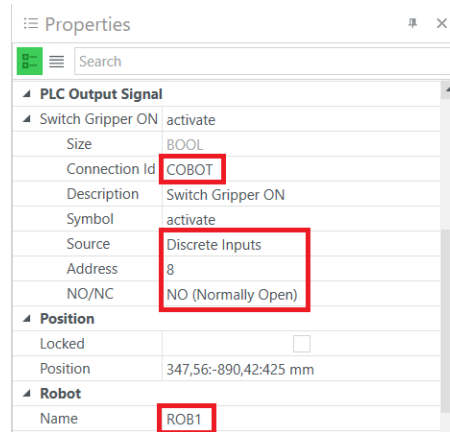
Joint 1	Joint 2	Joint 3	Joint 4	Joint 5	Joint 6
381	383	385	387	389	391

Tabulka 6.2: Adresy PLC signálů odpovídající kloubovým aktuátorům

Dále vybereme gripper z katalogu (obr. 6.12) a nastavíme jej podle obr. 6.13. Důležité je správně nastavit jméno robota, na který se má gripper připojit.

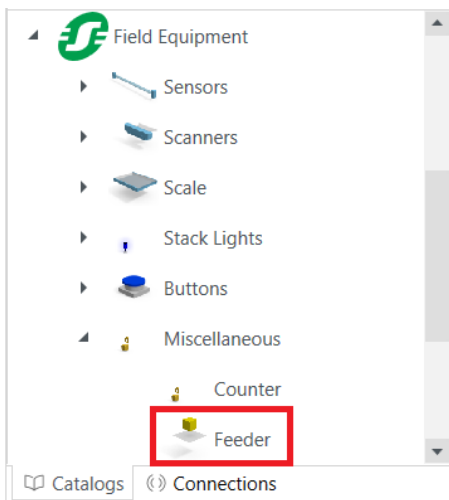


Obrázek 6.12: Výběr gripperu z katalogu

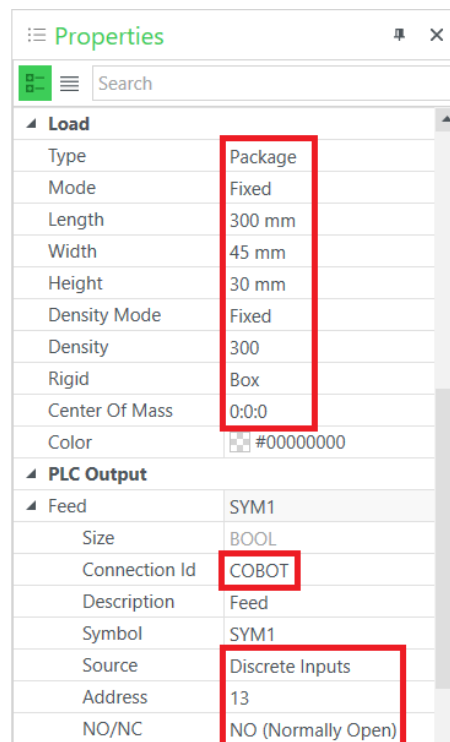


Obrázek 6.13: Nastavení gripperu

Jako další objekt vybereme z katalogu *Feeder*, který bude podávat díly ke kontrole (obr. 6.14). Zde nastavíme rozměry podávaného objektu podle rozměrů reálného dílu a PLC signál k podávání dílu podle obr. 6.15. Objekty typu *Eater* nepotřebují žádný signál, pokud se dostanou do kontaktu se závažím, závaží automaticky zmizí.

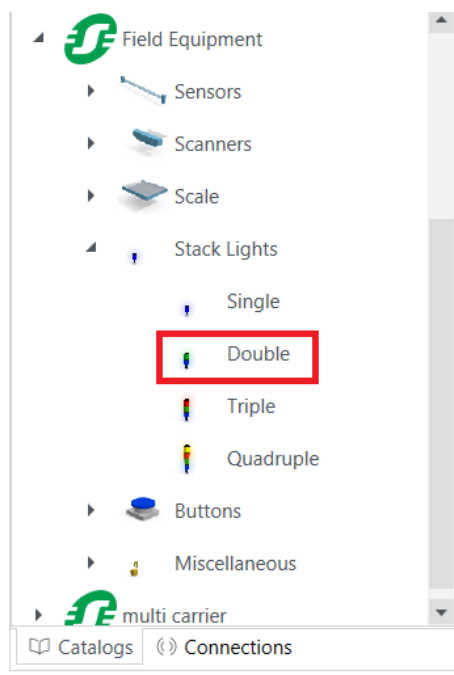


Obrázek 6.14: Výběr podavače z katalogu

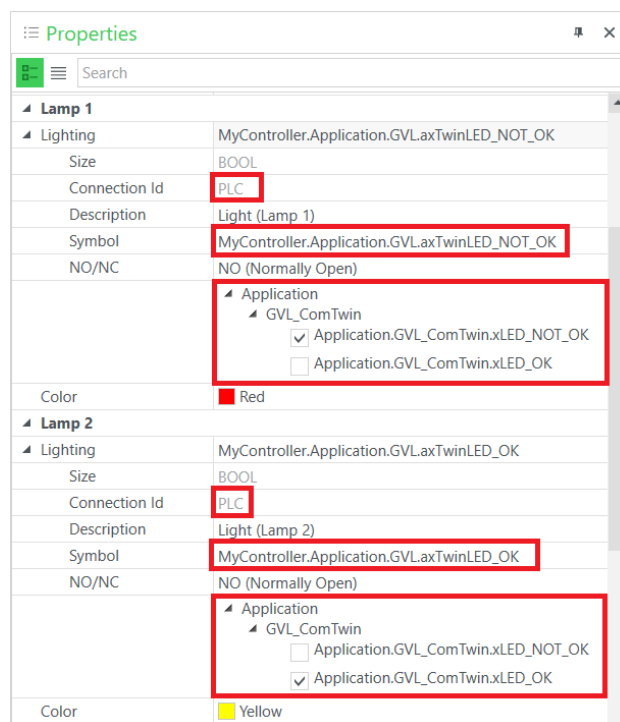


Obrázek 6.15: Nastavení podavače

Posledním objektem se speciální konfigurací je objekt *Double Stack Light* (vybereme podle obr. 6.16), který signalizuje pořízení snímku kamerovým systémem a výsledek kontroly: žlutá - správně sestavený díl, červená - nesprávně sestavený. Jako jediný signál bude připojen přes OPC UA klienta přímo k PLC. Jeho konfigurace je zobrazena na obr. 6.17 (konkrétní proměnné, jejichž signál si přejeme sledovat, lze zaškrtnout až po připojení se na server - postup připojení byl vysvětlen v části 6.1.5).



Obrázek 6.16: Výběr světla z katalogu



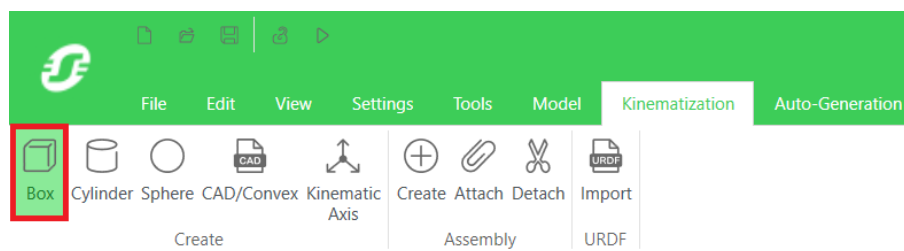
Obrázek 6.17: Nastavení světla

Podobným způsobem přidáme na pracovní plochu i ostatní objekty s jednodušším nastavením. Jejich kompletní seznam a konfigurace signálů je v tab. 6.3 (všechny mají nastavené *Connection ID*: COBOT).

Objekt - Signál	Source	Address	NO/NC
Push Button (PowerOn) - Pushed	Coils	43	NO
Push Button (Enable) - Pushed	Coils	45	NO
Push Button (Start) - Pushed	Coils	40	NO
Push Button (Stop) - Pushed	Coils	42	NO
Push Button (Pasue) - Pushed	Coils	49	NO
Push Button (Resume) - Pushed	Coils	41	NO
Quad. S. Light - Lamp 1 (PoweredOn)	Discrete Inputs	9	NO
Quad. S. Light - Lamp 2 (Enabled)	Discrete Inputs	10	NO
Quad. S. Light - Lamp 3 (Paused)	Discrete Inputs	12	NO
Quad. S. Light - Lamp 4 (Running)	Discrete Inputs	11	NO

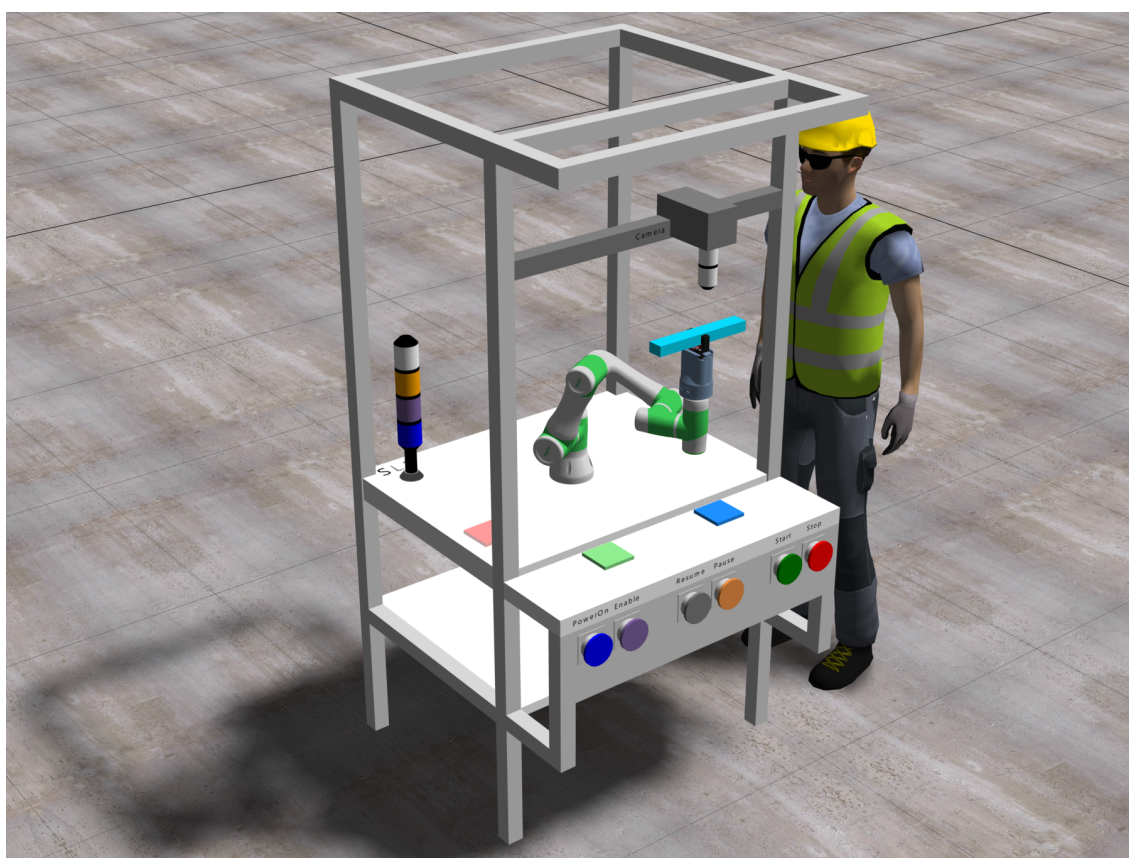
Tabulka 6.3: Nastavení objektů a signálů

Konstrukci pracovní stanice sestavíme z objektu *Box*, který najdeme v menu horní lišty (obr. 6.18) a naškálujeme rozměry podle potřeby.



Obrázek 6.18: Výběr objektu *Box*

Finální pracoviště je zachyceno na obr. 6.19. Tlačítka typu *Push Button* slouží k ovládní systému a semafor *Quadruple Stack Light* k indikaci stavu systému. Konkrétní režim kobota (kolaborativní/nekolaborativní atd.) je indikován světelným značením přímo na hřbetu efektoru.



Obrázek 6.19: Finální vzhled modelovaného pracoviště

## 6.4 Pohybová sekvence kobota

Před samotnou implementací pohybové logiky je důležité správně nastavit *Uživatelské souřadnicové systémy* (UCS - User Coordinate System, také zvané UF - User Frame), které budou představovat pozice, ve kterých kobot bude provádět určité operace. Konkrétní hodnoty jsou na obr. 6.20.



## User Coordinate System

Name	X(mm)	Y(mm)	Z(mm)	RX °	RY °	RZ °
pickCoord	420.000	200.000	300.000	180.000	0.000	0.000
placeCoordA	420.000	-200.000	300.000	180.000	0.000	0.000
placeCoordB	150.000	-400.000	300.000	180.000	0.000	0.000

Obrázek 6.20: Nastavení souřadnicových systémů v programu Cobot Expert

Nyní si ukážeme hlavní algoritmus pohybové sekvence kobota v podobě pseudokódu.

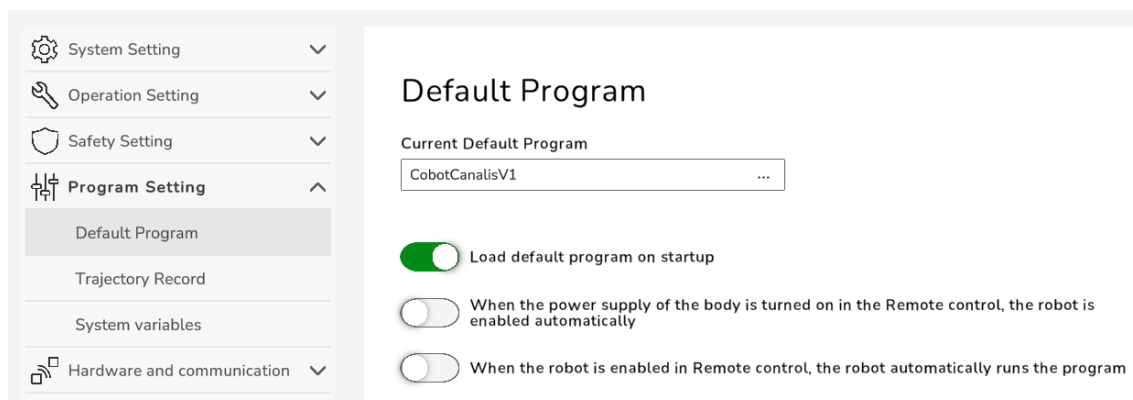
## Algoritmus 1: Kobot

```

1 deactivate gripper actuator;
2 move to homePos;
3 while stop is not pressed do
4   cobotStep ← 0;
5   send signal to camera that cobot is ready for new cycle;
6   move to pickCoordinates;
7   activate gripper actuator;
8   for  $i = 0, \dots, \text{number of positions}$  do
9     move to inspectionPositions[ $i$ ];
10    cobotStep ←  $i + 1$ ;
11    send cobotStep to camera;
12    wait until cobotStep = cameraStep;
13    if the part is incorrectly assembled then
14      move to placeCoordinatesB;
15      break;
16    end
17    move to placeCoordinatesA;
18  end
19 deactivate gripper actuator;
20 end

```

Na závěr nastavíme program jako výchozí a aktivujeme jeho automatické načtení při spuštění kontroléru podle obr 6.21.



Obrázek 6.21: Nastavení výchozího programu

## 6.5 Inspekční sekvence kamerového systému

Při implementaci inspekční sekvence v programu Machine Expert navážeme na sekci 6.1.6, kde jsme nastavili komunikaci. Pro programovou organizační jednotku (POU) hlavního programu založíme nový periodický task s prioritou 1 a intervalem 20 ms, bude mít tedy vyšší prioritu než komunikační task.

Následně si ukážeme hlavní algoritmus inspekční sekvence v podobě pseudokódu.

---

### Algoritmus 2: Kamera

---

```

1 while stop is not pressed do
2   if cobot is ready then
3     cameraStep ← 0;
4     feed new part for inspection;
5   end
6   for i = 0, ..., number of positions do
7     wait until cobotStep - 1 = cameraStep;
8     cobotStep ← i + 1;
9     decide correctness of the assembly;
10    send inspectionResult to cobot;
11    send cameraStep to cobot;
12    if the part is incorrectly assembled then
13      flash red LED;
14      break;
15    end
16    flash yellow LED;
17  end
18 end

```

---

V našem projektu je signál z kamery pouze simulovaný pomocí PLC, řádek 9 v pseudokódu je tedy pouze proměnná, kterou lze libovolně měnit a určovat tak korektnost montovaného dílu pro účely testování.

Řádky 13 a 16 odesílají signál do programu ME Twin pomocí OPC UA, řádky 10 a 11 odesílají signály do kontroléru kobota pomocí Modbus TCP, signály je důležité správně namapovat na proměnné v rámci našeho komunikačního kódu, který jsme si připravili v sekci 6.1.6.

## 6.6 Záznam dat

Záznam dat hraje nedílnou roli v celkovém procesu monitorování systému a poskytuje kritickou funkci pro sledování výkonnosti systému, identifikaci oblastí pro zlepšení a zajištění neustálé optimalizace procesů. Zavedení účinného systému záznamu a analýzy dat významně přispívá ke zvýšení efektivity výroby a zlepšení kvality finálních výrobků. Tento dohled usnadňuje sofistikovanější přístup k výrobě a umožňuje úpravy v reálném čase a dlouhodobé strategické plánování.

Pro implementaci této funkce jsme použili program Machine Expert, který nabízí funkční blok *LogRecord*, určený speciálně pro účely záznamu dat. Tento funkční blok je vložen do programové organizační jednotky (POU), která je prováděna v

cyklické úloze s prioritou 3 a periodou 1 ms. Takto nízká perioda je doporučena přímo v dokumentaci, protože použitý funkční blok vyžaduje po své aktivaci více než 15 intervalových cyklů pro uložení záznamu do souboru protokolu. Samotný soubor záznamu podporuje datový typ *Wide String*, který se skládá z 2bajtových znaků a pojme širokou škálu alfanumerických dat a symbolů. Pro naše konkrétní potřeby jsme se rozhodli použít pro zápis dat formát CSV (Comma-Separated Values). Tento formát je pro tuto aplikaci obzvláště vhodný, protože usnadňuje jednoduché zpracování dat a integraci s různými nástroji pro analýzu dat, což zvyšuje dostupnost a použitelnost zaznamenaných informací.

Část záznamu může vypadat takto:

```
Date,Time,AssemblyOK,Step,Cycle,Success,Failure
15/05/2024,08:52:50,TRUE,4,1088,1086,2
15/05/2024,08:53:20,FALSE,2,1089,1086,3
15/05/2024,08:53:49,TRUE,4,1090,1087,3
```

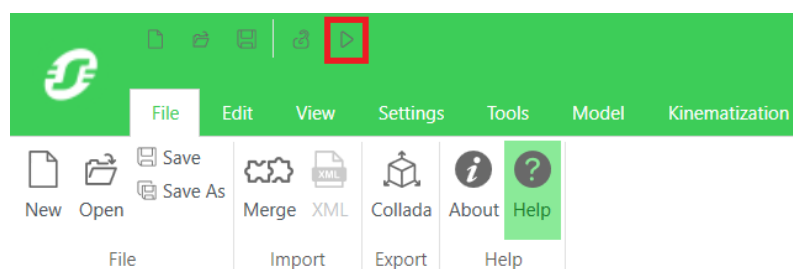
kde

- AssemblyOK: informuje o správnosti montáže;
- Step: udává, ve kterém kroku došlo k nalezení vady (pokud je montáž správná parametr je možno ignorovat);
- Cycle: zobrazuje číslo současného cyklu;
- Success: udává počet správných montáží;
- Failure: udává počet nesprávných montáží.

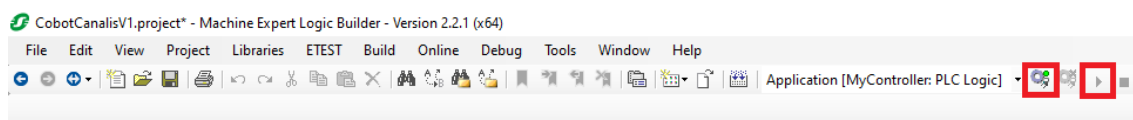
Soubor .log se záznamem najdeme v souborech PLC: *Devices Tree* → *MyController* → *Files*. V pravém okně průzkumníku souborů klikneme na *refresh* a otevřeme složku *Log*, ve které se nachází hledaný soubor.

## 6.7 Spuštění systému

Pro spuštění systému je potřeba správně nastavit všechny komponenty jak bylo uvedeno v sekci 6.1, poté spustit fyzikální engine ME Twin (obr. 6.22), připojit se k PLC přes Machine Expert a spustit jej (obr. 6.23) a následně spustit pohybovou sekvenci v programu Cobot Expert (obr. 6.24).



Obrázek 6.22: Spuštění programu ME Twin



Obrázek 6.23: Spuštění programu Machine Expert



Obrázek 6.24: Spuštění programu Cobot Expert

# Kapitola 7

## Výsledky

V této kapitole využijeme naše pečlivě navržené simulované pracoviště a otestujeme jeho funkčnost a efektivitu. Pomocí těchto empiricky ověřených dat a pomocí výpočtů ze sekce 5.5.2 zjistíme, jaká je návratnost investice našeho projektu.

### 7.1 Testování

Testování je klíčovou fází vývoje jakéhokoli systému, zejména pokud se jedná o kolaborativní robotiku. Správné testování zajistí, že systém bude bezpečný, spolehlivý a efektivní v reálných scénářích.

#### 7.1.1 Unit Testing

V této části jsou popsány metodiky testování jednotek (tzv. Unit Testing), které byly použity k ověření správné funkce každé součásti kolaborativního robotického systému. Testování jednotek je nezbytné pro ověření funkční integrity a spolehlivosti jednotlivých modulů před jejich integrací do rozsáhlého systému. Tento přísný testovací rámec podporuje včasné odhalení závad, čímž zvyšuje robustnost systému a snižuje problémy s následnou integrací [39].

#### Software pro testování

Pro účely testování používáme bezplatný software ModRSsim2, univerzální simulátor zařízení Modbus RTU a TCP/IP. Tento nástroj je užitečný pro testování, školení nebo vzdělávací účely související s těmito komunikačními protokoly, protože poskytuje kontrolované prostředí, ve kterém lze replikovat a analyzovat různé scénáře bez rizik spojených s manipulací s živým systémem [40].

#### Cíle testování

- **Ověření funkčnosti:** Je nezbytné zajistit, aby každá jednotka fungovala v souladu se svými konstrukčními specifikacemi. Toto ověření slouží jako základní kontrola, která zaručuje, že součásti splňují předem stanovená provozní kritéria.
- **Identifikace závad:** Včasná identifikace a řešení závad v rámci procesu vývoje minimalizují následné chyby a problémy s integrací. Tento proaktivní přístup

k zajištění kvality pomáhá udržovat kontinuitu a stabilitu životního cyklu vývoje.

- Zvyšování kvality: Pečlivým testováním a zdokonalováním lze zlepšit kvalitu softwarových i hardwarových komponent. Tento důraz na dokonalost přispívá k celkové robustnosti a efektivitě systému, čímž je zajištěn vyšší výkon a spolehlivost.

### Testované jednotky

- Inspekční sekvence: Tento algoritmus, který běží na PLC, má za úkol řídit kamerový systém a simulovat signály z kamery v rámci tohoto projektu.
- Uchopovací systém: Speciálně sestavená komponenta používaná v simulačním programu ME Twin, která hraje klíčovou roli při manipulaci s objekty v simulovaném prostředí.
- Pohybová sekvence kobota: Tento algoritmus pracuje v rámci virtuálního kontroléru kobota a řídí všechny operace přepínání režimů a trajektorie.
- Virtuální pracoviště: Obsahuje sadu objektů, které provádějí specifické akce na základě příchozích signálů. Patří sem tlačítka, signální světla a podavače.

### Konkrétní testované signály

Všechny vstupní a výstupní signály všech komponent jsou zapsány v tabulkách 7.1, 7.2, 7.3 a 7.4.

Signál	Druh	Hodnota	Funkce
CobotState	Vstup	0..4	informace o kontrolní pozici kobota
CobotReady	Vstup	0	bez funkce
		1	zapříčiní restart stavu kamery
CameraState	Výstup	0..4	informace o kontrolní pozici kamery
AssemblyOK	Výstup	0/1	informace o správnosti montáže
LED_OK	výstup	0/1	zhasnutí/rozsvícení žlutého světla
LED_NOT_OK	výstup	0/1	zhasnutí/rozsvícení červeného světla

**Tabulka 7.1:** Testované signály inspekční sekvence

Signál	Druh	Hodnota	Funkce
Gripper	vstup	0/1	deaktivace/aktivace gripperu

**Tabulka 7.2:** Testované signály uchopovacího systému

Signál	Druh	Hodnota	Funkce
CameraStep	vstup	0...4	informace o kontrolní pozici kamery
AssemblyOK	vstup	0/1	informace o správnosti montáže
PowerOn	vstup	0/1	zapnutí napájení
Enable	vstup	0/1	odblokování
Start	vstup	0/1	spuštění sekvence
Stop	vstup	0/1	zastavení sekvence
Pause	vstup	0/1	pozastavení sekvence
Resume	vstup	0/1	pokračování sekvence
CobotStep	výstup	0...4	informace o kontrolní pozici kobota
Gripper	výstup	0/1	deaktivace/aktivace gripperu
FeedLoad	výstup	0/1	signál pro podání dílu
PowerOn	výstup	0/1	informace o stavu napájení
Enabled	výstup	0/1	informace o stavu blokace
Running	výstup	0/1	informace o běhu sekvence
Suspended	výstup	0/1	informace o pozastavení

**Tabulka 7.3:** Testované signály pohybové sekvence

Signál	Druh	Hodnota	Funkce
FeedLoad	vstup	0/1	signál pro podání dílu
PowerOn	vstup	0/1	informace o stavu napájení
Enabled	vstup	0/1	informace o stavu blokace
Running	vstup	0/1	informace o běhu sekvence
Suspended	vstup	0/1	informace o pozastavení
LED_OK	vstup	0/1	zhasnutí/rozsvícení žlutého světla
LED_NOT_OK	vstup	0/1	zhasnutí/rozsvícení červeného světla
PowerOn	výstup	0/1	zapnutí napájení
Enable	výstup	0/1	odblokování
Start	výstup	0/1	spuštění sekvence
Stop	výstup	0/1	zastavení sekvence
Pause	výstup	0/1	pozastavení sekvence
Resume	výstup	0/1	pokračování sekvence

**Tabulka 7.4:** Testované signály virtuálního pracoviště

### Závěry z testování

Jednotky, které tvoří náš systém, byly úspěšně otestovány bez závažných závad, což potvrzuje jejich schopnost efektivně fungovat v rámci integrovaného systému. Toto ověření podtrhuje robustnost našich testovacích postupů a připravenost součástí systému pro nasazení v reálných scénářích.

### 7.1.2 Testování efektivity

Testování efektivity bylo provedeno za účelem měření doby trvání jednoho kompletního inspekčního cyklu kobota v simulovaném prostředí. To bylo provedeno za podmínek maximální bezpečné lineární a úhlové rychlosti, které byly předem vypočteny a zdokumentovány v části 5.5.2. Hlavním cílem bylo kvantifikovat a porovnat provozní účinnost automatizovaného systému ve srovnání s lidským kontrolním procesem.

#### Metodika

- Testovací sestava: Simulační prostředí bylo nakonfigurováno tak, aby co nejvěrněji kopírovalo reálné provozní podmínky. Kobot prováděl úkoly podle předem definovaných postupů při maximálních vypočtených bezpečných rychlostech.
- Sběr dat: Zaznamenávala se doba trvání deseti po sobě jdoucích cyklů, aby se zmírnila nejistota způsobená chybami měření nebo zpožděním síťového přenosu.
- Výpočet doby cyklu: Průměrná doba jednoho cyklu byla vypočtena ze zaznamenaných časů deseti cyklů. Tento průměr poskytuje spolehlivý odhad provozní rychlosti a účinnosti kobota za optimálních podmínek.

#### Srovnání výkonnosti lidských pracovníků

- Nastavení testování na lidech: Podobně byl hodnocen i výkon základně proškoleného lidského pracovníka, který prováděl stejné kontrolní úkoly. Lidský pracovník prověřoval výrobek vizuálně na základě předepsaného kontrolního seznamu součástí, které měly být zkontrolovány.
- Doba cyklu lidského pracovníka: Byla zaznamenána doba, kterou lidský pracovník potřeboval k dokončení jednoho cyklu, a tento proces byl opakován v deseti cyklech, aby se získal spolehlivý průměr. To poskytlo přímé srovnávací měřítko s výkonem kobota.

#### Předpoklad

- Integrita sestavy: Pro účely tohoto testu se předpokládalo, že všechny montážní díly byly správně smontovány. Tento předpoklad byl použit pro stanovení maximální délky cyklu pro kobota i lidského kontrolora.

#### Výsledky a analýza

- Výsledky doby cyklu: Průměrná doba cyklu u kobota byla zaznamenána **29,5** sekundy na cyklus, zatímco u lidského pracovníka činila v průměru **92** sekund na cyklus. Tento podstatný rozdíl poukazuje na potenciální časovou efektivitu získanou využitím automatizovaných systémů kobotů oproti tradiční lidské kontrole.
- Důsledky: Tyto výsledky podtrhují efektivitu využití kobotů pro rutinní kontrolní úkoly z hlediska rychlosti i spolehlivosti. Údaje rovněž poskytují základ pro další analýzu nákladové efektivity, potenciální návratnosti investic a oblastí pro další automatizaci v rámci výrobního procesu.



### Závěr z testování

Testování efektivity potvrzuje vynikající výkonnost kobotů při standardizovaných úkolech ve srovnání s lidskou obsluhou za testovaných podmínek. Tato zjištění obhajují širší zavádění automatizačních technologií v podobných provozních podmínkách s cílem zvýšit produktivitu a zkrátit dobu cyklu.

## 7.2 Analýza návratnosti investice

V této části se zaměříme na to, do jaké míry se vyplatí automatizovat inspekční pracoviště pomocí kobota. Pro výpočet je potřeba zjistit následující údaje:

- Pořizovací cena kobota (včetně gripperu, nákladů na integraci, revizi bezpečnosti a školení)
- Elektrická spotřeba kobota (kWh) [26]
- Cena za kWh elektřiny (hodnoty zjistíme na webu Eurostat [41], nejnovější data jsou z druhého pololetí 2023)
- Hodinová cena kobota (součin spotřeby, ceny a počtu cyklů za hodinu)
- DVC - hodinová cena operátora, neboli mzda spolu se všemi ostatními náklady na zaměstnance (odkaz na literaturu dostupný pouze v síti Schneider Electric) [42]
- Počet provozních dní v roce
- Délka směny a počet směn
- Rezerva při zvýšené poptávce
- Celková efektivnost pracoviště
- Požadovaný objem kusů za rok

V tab. 7.5 jsou uvedeny obecné parametry a v tab. 7.6 je proveden výpočet návratnosti investice do kobota. V jednom sloupci uvažujeme porovnání vůči práci operátora Schneider Electric v České republice (CZ), v druhém sloupci pro názornou ukázkou uvažujeme práci operátora Schneider Electric v Německu (DE). Cena operátorů představuje reálný údaj poskytnutý finančním oddělením Schneider Electric. Cena kWh je pro Česko i Německo téměř stejná ( $\pm 0,01$  €).

V posledním řádku tab. 7.6 je uvedena doba návratnosti investice, při automatizaci pracoviště pomocí kobota. Je patrné, že v Německu je integrace kobota do provozu mnohem výhodnější, jelikož náklady na operátora jsou mnohem vyšší. Proto je před samotnou integrací kobota do pracoviště vždy důležité pečlivě provést výpočty a zvážit, zda se vůbec vyplatí o investici uvažovat.

Pozorný čtenář si mohl povšimnout, že v tab. 7.6 je uvedeno trvání cyklu pro kobota 138,5 s místo trvání 29,5 s, které bylo vypočteno na základě maximální bezpečné rychlosti. Je to proto, že trvání cyklu 138,5 odpovídá požadovanému objemu kusů za rok. Pojďme nyní provést analýzu citlivosti parametrů a podívat se, jak se klíčové parametry změní, pokud zvýšíme rychlost kobota na povolené maximum.

Parametr	Hodnota
Počet provozních dní v roce	250
Délka směny	7,5 h
Rezerva při zvýšené poptávce	30 %
Celková efektivnost pracoviště	80 %
Požadovaný objem kusů za rok	90 000
Spotřeba elektřiny na jeden cyklus	0,15 kWh
Cena kWh	0,44 €
Požizovací cena kobota	100 000,00 €

**Tabulka 7.5:** Obecné parametry pro výpočet

Parametr	Kobot	Operátor CZ	Operátor DE
Počet směn	3	2	2
Odpracovaných hodin za rok	5625	3750	3750
Trvání cyklu	138,5 s	92,3 s	92,3 s
Počet kusů za hodinu	26	39	39
Cena za hodinu	1,72 €	20,30 €	90 €
Cena za rok	9 652,50 €	76 125,00 €	337 500,00 €
Ušetřeno ročně po automatizaci	-	66 472,50 €	327 847,50 €
Doba návratnosti investice	-	<b>1,5 roku</b>	<b>0,31 roku</b>

**Tabulka 7.6:** Výpočet návratnosti investice

Parametr	Kobot	Operátor CZ	Operátor DE
Trvání cyklu	29,5 s	92,3 s	92,3 s
Počet kusů za hodinu	122,2	39	39
Cena za hodinu	8,07 €	20,30 €	90 €
Cena za rok	45 366,75 €	76 125,00 €	337 500,00 €
Ušetřeno ročně po automatizaci	-	30 758,25 €	292 133,25 €
Doba návratnosti investice	-	<b>3,25 roku</b>	<b>0,37 roku</b>

**Tabulka 7.7:** Výpočet návratnosti investice při maximální povolené rychlosti kobota

V tab. 7.7 vidíme zásadní zvýšení počtu zkontrolovaných kusů za hodinu, což se nutně promítne do spotřeby energie, a tudíž i provozní ceny kobota. Tato změna je velice zásadní pro dobu návratnosti investice, jelikož pro země s nižšími náklady na pracovní sílu, je tento projekt rázem méně výhodný. Zato do doby návratnosti investice pro země s vysokými náklady na pracovní sílu se tato změna téměř nepromítne a projekt je naopak stále velice atraktivní. V praxi by pravděpodobně bylo potřeba zhodnotit, jestli je nutné požadovat tak rychlý inspekční cyklus na základě cyklu výrobního. Můžeme se například ohlédnout do kapitoly 5.2 tab. 5.1, kde je nejkratší cycle time 30,1 s, který se téměř shoduje s empiricky vyhodnocenou dobou cyklu našeho inspekčního systému 29,5 s.

Velkým přínosem tohoto projektu by při reálném nasazení bezpochyby bylo snížení chybovosti inspekce, jelikož stroje obecně dosahují vyšší přesnosti při tomto typu rutinních úloh (jak bylo analyzováno v kapitole 2). Lidskému pracovníkovi trvá navíc tento typ inspekce mnohem déle. V našich výpočtech jsme nastavili požadovaný objem kusů za rok tak, aby pracovník zvládl zkontrolovat každý výrobek. Při analýze reálných výrobních objemů však bylo zjištěno, že jeden pracovník nemá šanci zkontrolovat každý výrobek a v praxi se to většinou řeší namátkovou kontrolou, čemuž se lze vyhnout automatizací pracoviště.



# Kapitola 8

## Závěr

Tato práce ukázala významný potenciál kolaborativních robotů při zlepšování procesů kontroly montáže v průmyslovém prostředí. Integrací technologie digitálního dvojčete v raných fázích nasazení kobotů tato studie nejen zmírnila potenciální konstrukční chyby, ale také maximalizovala provozní efektivitu a bezpečnost, čímž vytvořila pevný základ pro následné fyzické implementace.

V průběhu této práce bylo provedeno rozsáhlé teoretické a praktické zkoumání s cílem pochopit a optimalizovat interakci mezi lidmi a koboty. Fáze návrhu a implementace, podložené důkladným posouzením požadavků a bezpečnostní analýzou, byly rozhodující pro zajištění toho, aby koboti mohli fungovat efektivně a bezpečně bez nutnosti fyzických bezpečnostních bariér, čímž se zefektivnil proces integrace.

Ekonomická analýza, podpořená empirickými daty a prediktivní analýzou, poukázala na finanční životaschopnost implementace kobotů. Zejména výpočty návratnosti investic odhalily, že integrace kobotů by mohla výrazně snížit provozní náklady a zvýšit produktivitu, zejména na trzích s vysokou cenou pracovní síly. Zjištění důrazně naznačují, že koboti nemusí být jen technologickou modernizací, ale finančně rozumnou investicí, která může nabídnout rychlou dobu návratnosti a dlouhodobé ekonomické přínosy.

Výzkum navíc zdůraznil význam spolupráce člověka s robotem, zvýšení bezpečnosti práce a snížení ergonomické zátěže lidských pracovníků, které jsou v dnešní rychle se vyvíjející průmyslové oblasti klíčové. Flexibilita a škálovatelnost kobotů, jak bylo prokázáno v této práci, naznačují, že se dobře hodí k uspokojování rozmanitých a měnících se potřeb moderních výrobních prostředí.

Do budoucna se nabízí několik možností dalšího vývoje tohoto projektu, které by mohly zvýšit užitečnost a přizpůsobivost kolaborativních robotů v průmyslovém prostředí. Zaprvé, rozsáhlejší využití statistiky a analýzy získaných dat by mohlo zdokonalit provozní efektivitu, což by vedlo k robustnějším výkonům systému. Kromě toho by schopnost spouštět různé kontrolní programy přizpůsobené jednotlivým variant montovaných dílů výrazně zvýšila univerzálnost. Dále zdokonalení bezpečnostních funkcí kobota, jako je adaptivní úprava rychlosti na základě údajů o lidské činnosti v reálném čase, by mohlo stanovit nové standardy v oblasti bezpečnosti práce ve výrobních závodech Schneider Electric.

Současně by vývoj intuitivní aplikace pro HMI panel nejen zlepšil uživatelské zkušenosti, ale také zvýšil celkovou přístupnost a ovládání systému, což by podpořilo inkluzivnější prostředí pro všechny uživatele. A konečně, vytvoření komplexních školicích materiálů přizpůsobených různým provozním rolím by mohlo usnadnit hladší integraci a přijetí tohoto systému. Tyto iniciativy by nejen rozšířily praktické vý-

hody navrženého systému, ale také zajistily jejich udržitelnou integraci do různých výrobních prostředí.

Závěrem lze říci, že tato práce poskytuje přesvědčivé důkazy o tom, že strategická implementace kobotů, zejména ve specializovaných úlohách, jako je kontrola montáže, představuje perspektivní přístup, který vyvažuje technologické inovace s ekonomickou efektivitou a designem zaměřeným na člověka. Dláždí cestu pro další výzkum širších aplikací a nabízí plán pro průmyslová odvětví, jejichž cílem je využít novou vlnu robotické automatizace.

# Literatura

1. KAITWADE, Nikhil. *Collaborative Robots Market outlook (2023 to 2033)* [online]. Future Market Insights, 2023 [cit. 2023-10-18]. Dostupné z: <https://www.futuremarketinsights.com/reports/collaborative-robot-market>.
2. F. SHERWANI, M. M. Asad; IBRAHIM, B. S. K. K. Collaborative Robots and Industrial Revolution 4.0 (IR 4.0). *2020 International Conference on Emerging Trends in Smart Technologies (ICETST)* [online]. 2020, roč. 1, s. 1–5 [cit. 2023-10-18]. Dostupné z DOI: 10.1109/ICETST49965.2020.9080724.
3. COLGATE, J. E.; WANNASUPHOPRASIT, W.; PESHKIN, M. A. Cobots: Robots for Collaboration with Human Operators. *Proceedings of the ASME Dynamic Systems and Control Division* [online]. 1996, roč. 58, s. 433–39 [cit. 2024-04-20].
4. SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama (ed.). *Springer Handbook of Robotics* [online]. Springer, 2016 [cit. 2024-04-20]. Springer Handbooks. ISBN 978-3-319-32550-7. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-319-32552-1.
5. SAENZ, J.; BEHRENS, R.; SCHULENBURG, E. et al. Methods for considering safety in design of robotics applications featuring human-robot collaboration. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2020, roč. 107, s. 2313–2331 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-020-05076-5>.
6. STATISTA. *Size of the collaborative (cobot) robot market worldwide in 2020 and 2021, with a forecast for 2022 to 2030* [<https://www.statista.com/statistics/748234/global-market-size-collaborative-robots/>]. 2023. [cit. 2024-04-21].
7. *World Robotics Report 2020* [online]. International Federation of Robotics, 2020 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://ifr.org/ifr-press-releases/news/record-2.7-million-robots-work-in-factories-around-the-globe>.
8. VILLANI, Valeria; PINI, Fabio; LEALI, Francesco; SECCHI, Cristian. Survey on human–robot collaboration in industrial settings: Safety, intuitive interfaces and applications. *Mechatronics* [online]. 2018, roč. 55, s. 248–266 [cit. 2024-04-21]. ISSN 0957-4158. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mechatronics.2018.02.009>.
9. NOF, S.Y. *Springer Handbook of Automation* [online]. Springer Berlin Heidelberg, 2009 [cit. 2024-04-21]. Springer Handbooks. ISBN 9783540788317. Dostupné z: [https://books.google.cz/books?id=2v\\_91vSCIK0C](https://books.google.cz/books?id=2v_91vSCIK0C).

10. STATISTA. *Share of traditional and collaborative robot unit sales worldwide from 2018 to 2022* [<https://www.statista.com/statistics/1018935/traditional-and-collaborative-robotics-share-worldwide/>]. 2021. [cit. 2024-04-21].
11. BICCHI, Antonio; PESHKIN, Michael A.; COLGATE, J. Edward. Safety for Physical Human–Robot Interaction. In: *Springer Handbook of Robotics* [online]. Ed. SICILIANO, Bruno; KHATIB, Oussama. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2008, s. 1335–1348 [cit. 2024-04-20]. ISBN 978-3-540-30301-5. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-540-30301-5\_58.
12. CORRELL, Nikolaus; BEKRIS, Kostas E.; BERENSON, Dmitry; BROCK, Oliver; CAUSO, Albert; HAUSER, Kris; OKADA, Kei; RODRIGUEZ, Alberto; ROMANO, Joseph M.; WURMAN, Peter R. Analysis and Observations From the First Amazon Picking Challenge. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering* [online]. 2018, roč. 15, č. 1, s. 172–188 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z DOI: 10.1109/TASE.2016.2600527.
13. L. P. KAELBLING M. L. Littman, A. W. Moore. Reinforcement Learning: A Survey. *Journal of Artificial Intelligence Research* [online]. 1996, roč. 4, s. 237–285 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.cs/9605103>.
14. LEE, Jay; JIN, Chao; BAGHERI, Behrad. Cyber physical systems for predictive production systems. *Production Engineering* [online]. 2017, roč. 11 [cit. 2024-04-20]. Dostupné z DOI: 10.1007/s11740-017-0729-4.
15. *Měření síly a tlaku* [online]. SICK [cit. 2023-11-30]. Dostupné z: [https://www.sick.com/cz/cs/catalog/servis/konzultace-a-navrh-reseni/mereni-sily-a-tlaku/c/g552369?s\\_kwid=AL!8057!3!658680135777!p!g!!iso%20ts%2015066&gad\\_source=1&gclid=Cj0KCQiAgqGrBhDtARIsAM5s0\\_mjPwDlkjaX05cfmCo5aMyj3Uz\\_YfXGN\\_KKtiTL26DgDFatcrkpTWOaAmRsEALw\\_wcB](https://www.sick.com/cz/cs/catalog/servis/konzultace-a-navrh-reseni/mereni-sily-a-tlaku/c/g552369?s_kwid=AL!8057!3!658680135777!p!g!!iso%20ts%2015066&gad_source=1&gclid=Cj0KCQiAgqGrBhDtARIsAM5s0_mjPwDlkjaX05cfmCo5aMyj3Uz_YfXGN_KKtiTL26DgDFatcrkpTWOaAmRsEALw_wcB).
16. *Technical Specification ISO/TS 15066* [online]. DIAG, Sapienza Università di Roma [cit. 2023-11-30]. Dostupné z: [https://www.diag.uniroma1.it/deluca/pHRI\\_elective/ISO\\_TS\\_15066\\_2016\\_en.pdf](https://www.diag.uniroma1.it/deluca/pHRI_elective/ISO_TS_15066_2016_en.pdf).
17. *A Future that Works: Automation, Employment, and Productivity*. McKinsey a Company, 2017. Dostupné také z: <https://www.mckinsey.com/~media/mckinsey/featured%20insights/Digital%20Disruption/Harnessing%20automation%20for%20a%20future%20that%20works/MGI-A-future-that-works-Executive-summary.ashx>.
18. *The Impact of Robots on Productivity, Employment and Jobs* [online]. International Federation of Robotics, 2020 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: [https://ifr.org/img/office/IFR\\_The\\_Impact\\_of\\_Robots\\_on\\_Employment.pdf](https://ifr.org/img/office/IFR_The_Impact_of_Robots_on_Employment.pdf).
19. *The Future of Jobs Report 2018* [online]. World Economic Forum, 2018 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z: <https://www.weforum.org/publications/the-future-of-jobs-report-2018/>.
20. SHERIDAN, Thomas. Human-Robot Interaction: Status and Challenges. *Human factors* [online]. 2016, roč. 58 [cit. 2024-04-21]. Dostupné z DOI: 10.1177/0018720816644364.



21. WANG, Lihui; LIU, Sichao; LIU, Hongyi; WANG, Xi. Overview of Human-Robot Collaboration in Manufacturing. In: [online]. 2020, s. 15–58 [cit. 2024-04-21]. ISBN 978-3-030-46211-6. Dostupné z DOI: 10.1007/978-3-030-46212-3\_2.
22. MÜLLER, Vincent. Ethics of Artificial Intelligence. In: [online]. 2020, s. 122–137 [cit. 2024-04-21]. ISBN 978-0-429-19853-3.
23. HORNBERG, Alexander. *Handbook of Machine Vision* [online]. 2006. [cit. 2024-05-08]. ISBN 9783527405848. Dostupné z DOI: 10.1002/9783527610136.
24. *Schneider Electric partners with Cognex to drive global smart factory deployment* [online]. Cognex [cit. 2024-05-08]. Dostupné z: <https://www.cognex.com/customer-stories/electronics/schneider-electric-partners-with-cognex-to-drive-global-smart-factory-deployment>.
25. *Modicon M262* [online]. Schneider Electric [cit. 2024-05-04]. Dostupné z: <https://www.se.com/us/en/product/TM262M35MESS8T/motion-controller-modicon-m262-3ns-per-instruction-24-axes-ethernet-sercos/>.
26. *Lexium Cobot* [online]. Schneider Electric [cit. 2023-10-19]. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/product-range/131604407-lexium-cobot/?preferredCountry=yes#documents>.
27. *2FG7* [online]. OnRobot [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://onrobot.com/en/products/2fg7>.
28. *PGC Series* [online]. DH Robotics [cit. 2024-04-26]. Dostupné z: <https://en.dh-robotics.com/product/pgc>.
29. *Machine Expert* [online]. Schneider Electric [cit. 2024-05-10]. Dostupné z: <https://www.se.com/cz/cs/product-range/2226-ecostruxure-machine-expert/#documents>.
30. *Machine Expert Twin* [online]. Schneider Electric [cit. 2023-11-30]. Dostupné z: <https://www.se.com/us/en/product-range/97196554-ecostruxure-machine-expert-twin/#documents>.
31. *What is VMware?* [online]. IBM [cit. 2024-04-02]. Dostupné z: <https://www.ibm.com/topics/vmware>.
32. *Modbus - Widely used serial fieldbus for all applications* [online]. Schneider Electric [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.se.com/us/en/product-range/574-modbus/#overview>.
33. *Modbus TCP: A Comprehensive Guide to the Protocol and Its Applications* [online]. Wevolver [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://www.wevolver.com/article/modbus-tcp-a-comprehensive-guide-to-the-protocol-and-its-applications>.
34. *Modbus TCP/IP* [online]. Automation Networks [cit. 2024-04-01]. Dostupné z: <https://automation-networks.com/glossary/modbus-tcpip/>.
35. *What Is OPC-UA: A Comprehensive Guide to Understanding the Protocol* [online]. Ferry [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: <https://www.deployferry.io/explain/opc-ua>.
36. *Unified Architecture* [online]. OPC Foundation [cit. 2024-05-07]. Dostupné z: <https://opcfoundation.org/about/opc-technologies/opc-ua/>.

37. *Using timed groups* [online]. Trellix [cit. 2023-11-23]. Dostupné z: <https://docs.trellix.com/bundle/endpoint-security-10.6.0-firewall-client-product-guide-windows/page/GUID-655E2557-0C02-4EC3-B768-540095F7347A.html>.
38. *VMware Workstation Player* [online]. Broadcom [cit. 2023-11-23]. Dostupné z: <https://www.vmware.com/products/workstation-player.html>.
39. LEWIS, W.E. *Software testing and continuous quality improvement: Third edition*. 2016.
40. *ModRssim2* [online]. Source Forge [cit. 2024-05-12]. Dostupné z: <https://sourceforge.net/projects/modrssim2/>.
41. *Electricity prices for household consumers* [online]. Eurostat [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: [https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy\\_prices/enprices.html?geos=&product=6000&consumer=HOUSEHOLD&consoms=KWH\\_LT1000&unit=KWH&taxs=I\\_TAX,X\\_TAX,X\\_VAT&nrg\\_prc=NETC,NRG\\_SUP,OTH,TAX\\_CAP,TAX\\_ENV,TAX\\_NUC,TAX\\_RNW,VAT&currency=EUR&language=EN&detail=0&component=0&order=DESC&dataset=nrg\\_pc\\_204&time=2023-S2&modalOption=0&chartOption=0&precision=1&modalOpen=0&modal=0&modalLineOption=0](https://ec.europa.eu/eurostat/cache/infographs/energy_prices/enprices.html?geos=&product=6000&consumer=HOUSEHOLD&consoms=KWH_LT1000&unit=KWH&taxs=I_TAX,X_TAX,X_VAT&nrg_prc=NETC,NRG_SUP,OTH,TAX_CAP,TAX_ENV,TAX_NUC,TAX_RNW,VAT&currency=EUR&language=EN&detail=0&component=0&order=DESC&dataset=nrg_pc_204&time=2023-S2&modalOption=0&chartOption=0&precision=1&modalOpen=0&modal=0&modalLineOption=0).
42. *DVC - Direct Variable Cost* [online]. Schneider Electric [cit. 2023-12-21]. Dostupné z: [https://isee.schneider-electric.com/isee/DVC\\_-\\_Direct\\_Variable\\_Cost](https://isee.schneider-electric.com/isee/DVC_-_Direct_Variable_Cost).

# Přílohy

## A Seznam zkratek

<b>PLC</b>	Programmable Logic Controller
<b>ROI</b>	Return On Investment
<b>HMI</b>	Human Machine Interface
<b>CAD</b>	Computer Aided Design
<b>API</b>	Application Programming Interface
<b>SIL 3</b>	Safety Integrity Level 3
<b>TCP</b>	Transmission Control Protocol
<b>RTU</b>	Remote Terminal Unit
<b>IEC</b>	International Electrotechnical Commission
<b>ISO</b>	International Organization for Standardization
<b>IP</b>	Internet Protocol
<b>I/O</b>	Input/Output
<b>NAT</b>	Network Address Translation
<b>POU</b>	Program Organization Unit
<b>ESD</b>	Electrostatic Discharge
<b>CSV</b>	Comma Separated Values

## B Struktura přiložených adresářů s aplikací

```
canalis-v1-main
├── Cobot Expert
│   └── CobotCanalisV1.zip: Program pro kobota
├── Machine Expert
│   └── CobotCanalisV1.projectarchive: Program pro PLC
└── ME Twin
    └── CobotCanalisV1.Experior: Program pro simulátor
```

canalis-v1-gripper

├─ Models

│ └─ DHRobotics: Adresář s modelem gripperu

├─ Visual Studio

│ └─ Experior.Catalog.SchneiderElectric.CobotGripperV1.zip

Poznámka: Experior.Catalog.SchneiderElectric.CobotGripperV1.zip je VS projekt pro kolaborativní gripper.